

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт нефти и газа

Кафедра технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Э. А. Петровский
подпись

«___» _____ 2021

БАКАЛАВАРСКАЯ РАБОТА

Направление 21.03.01 «Нефтегазовое дело»

профиль 21.03.01.07 «Эксплуатация и обслуживание технологических объектов
нефтегазового производства»

«Разработка паспорта надежности для турбодетандеров криогенных установок»

Руководитель _____
подпись, дата

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

В.Г. Жуков
инициалы, фамилия

Выпускник _____
подпись, дата

Х.Г. Гурбанов
инициалы, фамилия

Красноярск 2021

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институту нефти и газа

институт

Технологические машины и оборудование нефтегазового комплекса
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Э. А. Петровский

подпись инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2021 г

ЗАДАНИЕ

НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

в форме _____ **бакалаврской работы**

бакалаврской работы, дипломного проекта, дипломной работы, магистерской диссертации

Студенту Гурбанову Халигу Галибовичу

фамилия, имя, отчество

Группа ГБ17-07Б Направление (специальность) 21.03.01 «Нефтегазовое

номер

код

дело», профиль 21.03.01.07 «Эксплуатация и обслуживание

наименование

технологических объектов нефтегазового производства»

Тема выпускной квалификационной работы «Разработка паспорта надежности для турбодетандеров криогенных установок»

Утверждена приказом по университету № 2741/с от 25.02.21

Руководитель ВКР В. Г. Жуков, к.т.н., доцент кафедры ТМОНГК ИНГ СФУ

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: Данные анализа информации об отказах турбодетандеров криогенных установок. Данные по эксплуатации, обслуживании и ремонту турбодетандеров криогенных установок.

Перечень разделов ВКР: Введение. Актуальность темы и современное состояние проблемы.

Глава 1 – Принцип действия, применение турбодетандеров; описание основных узлов турбодетандера; основные разработчики и заводы изготовители; причины отказов и износа турбодетандеров криогенных установок.

Глава 2 – Анализ необходимости и планирования ремонта, техническое обслуживание и структура ремонтного цикла; оценка уровня эксплуатационной надёжности.

Глава 3 - Классификация и категоризация оборудования и систем установки. Разработка паспорта надежности.

Заключение. Выводы по результатам выполненной работы.

Руководитель ВКР

подпись

В. Г. Жуков

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

Х. Г. Гурбанов

инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 Анализ предметной области	7
1.1 Определения и области применения турбодетандеров криогенных установок	7
1.2 Применение турбодетандеров криогенных установок.....	9
1.3 Принцип действия турбодетандеров криогенных установок	10
1.4 Описание основных узлов турбодетандеров криогенных установок	11
1.5 Характеристика турбодетандеров криогенных установок номенклатура и маркировка	14
1.6 Основные разработчики и заводы изготовители турбодетандеров криогенных установок.....	16
1.7 Причины отказов и износа турбодетандеров криогенных установок	20
2 Анализ расчет данных для разработки паспорта надежности	23
2.1 Необходимость и планирование ремонта.....	23
2.2 Основы выбора способа восстановления турбодетандеров криогенных установок.....	28
2.3 Основы выбора оборудования и оснастки для восстановления турбодетандеров криогенных установок.....	31
2.4 Техническое обслуживание.....	34
2.5 Структура ремонтного цикла	36
2.6 Расчет интенсивности отказа и обработка информации о надежности турбодетандеров криогенных установок.....	39
2.7 Оценка уровня эксплуатационной надежности турбодетандеров криогенных установок.....	44
2.8 Расчеты режимов ремонта деталей турбодетандеров криогенных установок наплавкой	47

2.9	Расчеты режимов ремонта деталей электромеханического привода механической обработкой	49
2.10	Расчет режимов и параметров восстановления деталей электромеханического привода методом электрохимического нанесения покрытий	51
2.11	Термообработка для повышения износостойкости турбодетандеров криогенных установок при ремонте	54
3	Разработка паспорта надежности	56
	Заключение	63
	Список использованных источников	65

ВВЕДЕНИЕ

Турбодетандер – это машина для производства холода. Наряду с компрессором он является основным агрегатом криогенной установки. При расширении газа в направляющем аппарате и на лопатках рабочего колеса он отдает энергию за счет производимой работы, вследствие чего происходит понижение температуры потока. Отданная газом энергия в турбодетандере частично поглощается сопротивлением в подшипниках, а остальная часть используется тормозным колесом воздуходувки, дожимающим компрессором или в электрогенераторе.

Целью данной бакалаврской работы является разработка паспорта надежности для турбодетандеров криогенных установок. Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи: рассмотреть общие сведения, а именно принцип действия, структурные схемы, описание узлов, основные положения существующей нормативной литературы, информация по заводам-изготовителям, маркировка, номенклатура и эксплуатационные характеристики.

Проанализировать данные для совершенствования эксплуатационных характеристик и ремонта центробежного компрессора, а именно причины отказов и износа, основы выбора способа восстановления деталей, основы выбора оборудования и оснастки для восстановления деталей, основы необходимости и планирования ремонта, техническое обслуживание.

Рассчитать режимы ремонта компрессора, в том числе наплавкой и механической обработкой. Рассчитать нормы времени выполнения операций по ремонту деталей механической обработкой, нормы расхода материала и времени выполнения операций по ремонту деталей нанесением покрытий, режимы и параметры восстановления деталей методом электрохимического нанесения покрытий, а также рассмотреть применение термообработки для повышения износостойкости объекта при ремонте.

1 Анализ предметной области

1.1 Определения и области применения турбодетандеров криогенных установок

Турбодетандер – расширительная машина лопаточного типа, в которой происходит расширение потока газа с совершением внешней механической работы. Расширение газа с отводом энергии приводит к понижению давления и температуры газа, а также выработке «холода». Особенности турбодетандеров:

- компактные размеры;
- индивидуальное исполнение;
- низкие капитальные затраты на возведение;
- минимальные технические требования к фундаменту;
- высокий уровень автоматизации;
- быстрый (примерно 30 сек.) запуск из холодного состояния в полноценный рабочий режим;
- надежность и долговечность конструкции;
- широкий диапазон нагрузок;
- оптимальное соотношение цены и качества;
- короткий срок поставки;
- сертификация на территории России.

Турбодетандеры – основные машины по производству «холода» в циклах современных низкотемпературных установок. Турбодетандер представляет собой низкотемпературную турбину, для которой главная задача – понижать давление газа с целью снижения температуры газа и отвода от него энергии вовне за счет совершения газом механической работы. Типы выпускаемых турбодетандеров:

- турбодетандеры низкого, среднего и высокого давлений для воздухоразделительных установок и ожижителей азота;

- парожидкостные турбодетандеры для различных технических газов;
- турбодетандеры для ожижителей водорода;
- турбодетандеры для криогенных гелиевых установок;
- турбодетандерные агрегаты для природного газа;
- турбодетандеры-генераторы для энергосберегающих технологий.

Турбодетандер – компрессорные агрегаты низкого и среднего давления,

– выпуск которых начат с 1993 г., успешно эксплуатируются в России и Китае. Их высокая термодинамическая эффективность (КПД до 89 %), в сочетании с использованием мощности детандера для дополнительного сжатия рабочего газа в компрессорной ступени, существенно повышает технико-экономические показатели современных ВРУ.



Рисунок 1 – Турбодетандер "Sea Launch"

Турбодетандеры используются в большом количестве различных применений, где требуется процесс:

- нефтегазовая промышленность;
- металлургия;

- горнодобывающая промышленность.

1.2 Применение турбодетандеров криогенных установок

Турбодетандерные агрегаты используются в составе следующих видов установок:

- воздухоразделительные установки (ВРУ);
- ожижители азота, водорода и гелия;
- воздушные холодильные машины ВХМ;
- гелиевые рефрижераторы;
- ожижители природного газа (ПГ);
- турбодетандеры-электрогенераторы на перепаде давлений сетевого газа.



Рисунок 2 – Турбодетандерный агрегат среднего давления

Основное применение турбодетандеры нашли в технологических процессах получения жидкого водорода, кислорода, воздуха, азота и других криогенных газов. Однако сегодня турбодетандеры начинают применяться в процессах

утилизации избыточной энергии дросселируемого природного газа на ГРС и ГРП при распределении газа, транспортируемого по магистральным газопроводам.

Большие перспективы применения турбодетандеров в технологических процессах производств с применением пара в качестве основного энергоносителя (нефтеперерабатывающие и химические заводы), а также на газовых и нефтяных промыслах.

1.3 Принцип действия турбодетандеров криогенных установок

Детандер – устройство, преобразующее потенциальную энергию газа в механическую энергию. Наиболее распространены поршневые детандеры и турбодетандеры



Рисунок 3 – Турбодетандер в применении

Турбодетандеры – лопаточные машины непрерывного действия, в которых поток проходит через неподвижные направляющие каналы, преобразующие часть потенциальной энергии газа в кинетическую, и систему вращающихся лопаточных каналов ротора, где энергия потока преобразуется в механическую

работу, в результате чего происходит охлаждение газа. Они делятся по направлению движения потока на центростремительные, центробежные и осевые: по степени расширения газа в соплах – на активные и реактивные и по числу ступеней расширения – на одно и многоступенчатые.

Наиболее распространен реактивный одноступенчатый центростремительный детандер, разработанный П. Л. Капицей.

Торможение турбинных детандеров осуществляется электрогенератором, гидротормозом, нагнетателем, насосом.

Турбодетандеры применяются главным образом в установках с холодильным циклом низкого давления 0,4-4000 мЗ/ч.

Созданы турбодетандеры для холодильных циклов низкого, среднего и высокого давлений с объемными расходами газа 1,5-40 мЗ/ч. Эти машины характеризуются малыми размерами и высокой частотой вращения ротора [7].

1.4 Описание основных узлов турбодетандеров криогенных установок

Наиболее простая и надежная схема подключения турбодетандера, представлена на рисунке 4. Подключение турбодетандера параллельно узлу редуцирования станции позволяет минимизировать затраты на строительномонтажные работы, а также при высокой степени надежности обеспечить широкий диапазон регулирования расхода газа через турбодетандерный агрегат.

Природный газ поступает к турбодетандерной установке по газопроводу высокого давления. Отдав часть своей энергии турбине, газ через газопровод уже со сниженным давлением поступает к потребителю. Мощность турбины передается генератору, производящему электрический ток.

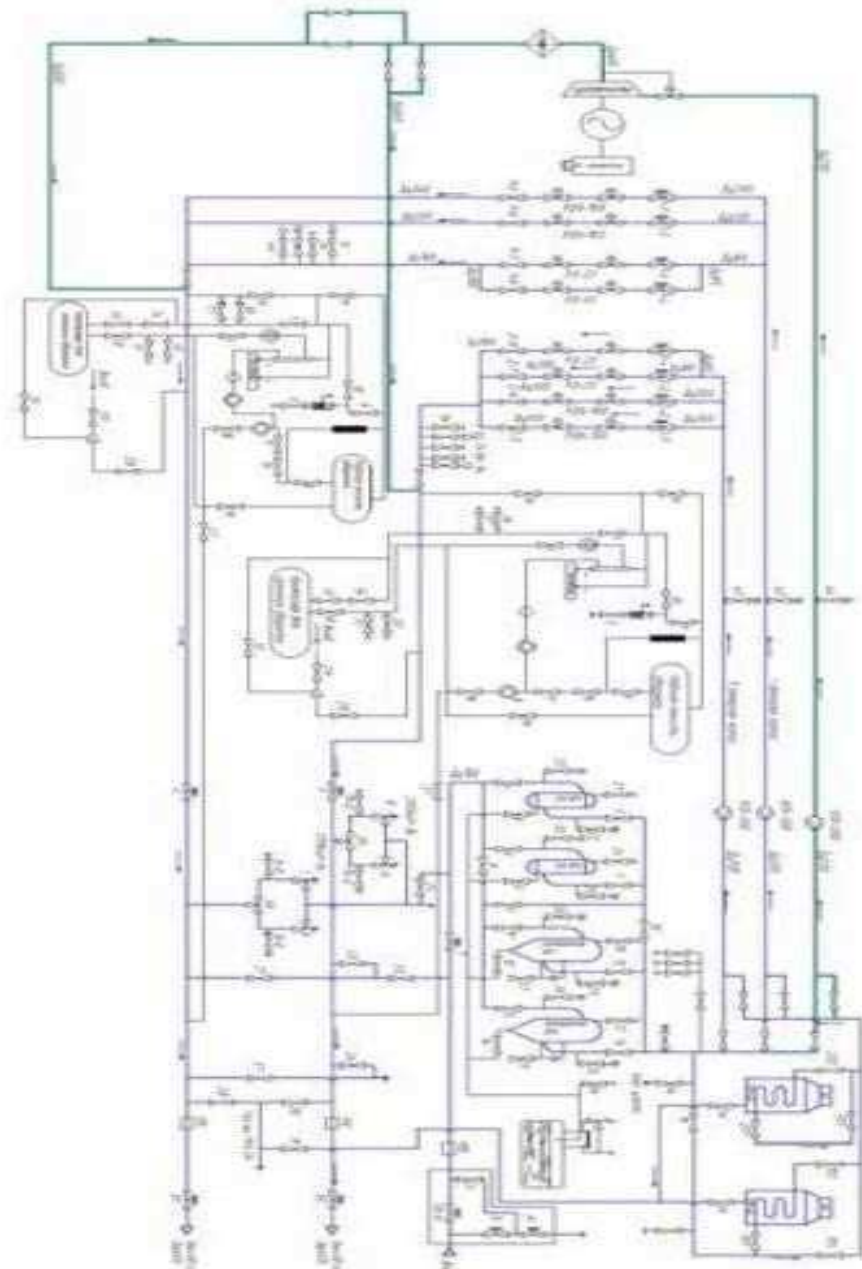


Рисунок 4 – Схема подключения турбодетандера параллельно узлу редуцирования ГРС «Сокол»

Газ на выходе из турбодетандера нагревается в подогревателе для предотвращения выпадения из него влаги и тяжелых фракций (гидратов, пропана, бутана и т.п.). Для этого необходимо, чтобы температура газа составляла около 5°C.

Регулирующий клапан турбины, управляемый регулятором давления, поддерживает необходимое потребителю значение давления газа в газопроводе после турбины.

Узел редуцирования выступает также в роли байпасного трубопровода, используется в процессе пуска установки, ее нормального и аварийного выводов из действия. В этих случаях узел редуцирования обеспечивает поддержание необходимого потребителю значения давления газа в газопроводе.

В результате терм газодинамического и конструктивного расчетов турбодетандеров с различными диаметрами рабочих колес был установлен оптимальный диаметр рабочего колеса в условиях ГРС «Сокол», который составляет 350 мм, его характеристики представлены в таблице 1. Очевидно, что турбодетандеры с меньшим диаметром рабочего колеса позволяют получать более высокие значения КПД (рисунок 5). Однако следует учитывать, что при уменьшении диаметра рабочего колеса возрастает и его частота вращения при том же расходе газа через турбодетандер, а значит, происходит ускоренный износ трущихся частей, что негативно сказывается на показателях надежности.

Параметр	Ед. изм.	Расход газа, тыс. куб. м/час		
		21,76	35,88	160
КПД	%	79	82	85
Холодопроиз-водительность	кВт	816	1395	6487
Эффективная мощность	кВт	775	1325	6163
Температура газа на выходе	К	203	199	195

Рисунок 5 – Характеристики турбодетандера рабочего колеса

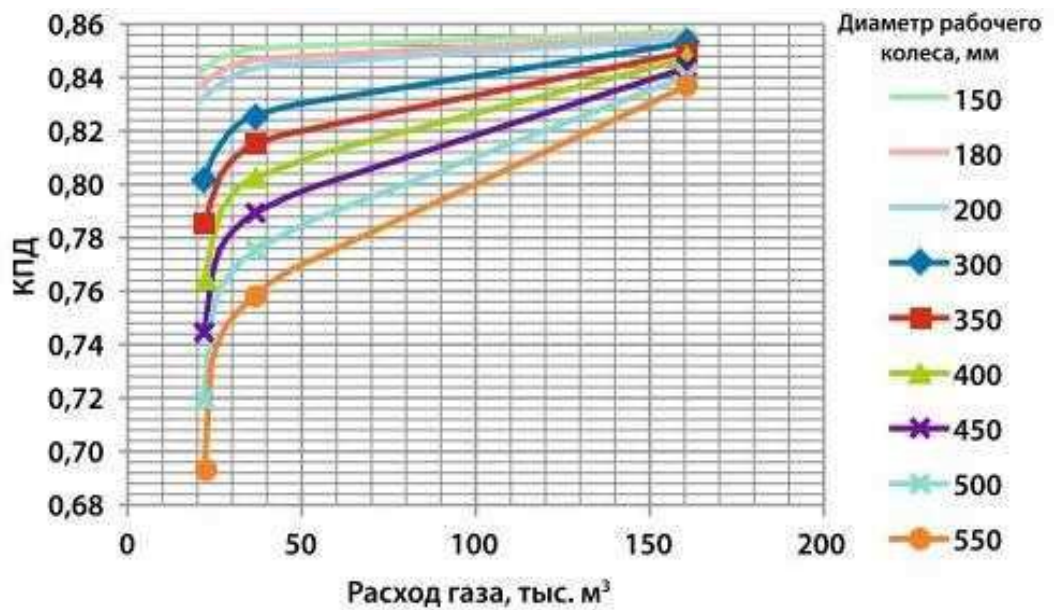


Рисунок 6 - График зависимости КПД турбодетандеров с различными диаметрами рабочих колес в зависимости от расхода газа

1.5 Характеристика турбодетандеров криогенных установок номенклатура и маркировка

К модельному ряду будут относиться такие разделы как масляная система, контрольно-измерительные приборы, распределительные панели.

Масляная система:

- в качестве масляного резервуара выступает фундаментная плита;
- данная система турбодетандерных агрегатов является одной из основных комплектующих элементов турбины;
- во время работы подача масла осуществляется за счет насоса, приводимого в действие от вала турбины;
- во время запуска турбодетандеры работают от вспомогательного электрического насоса.

Контрольно-измерительные приборы (КИП):

- простой стандартный интерфейс PROFIBUS/Ethernet/modbus позволяет осуществить быстрое подключения к DCS заказчика;
- шкаф управления может устанавливаться как рядом с турбиной, так и на удалении;
- все турбодетандерные агрегаты выполнены во взрывозащищенном варианте.
- распределительные панели
- индикация и управление;
- проведение измерений и мониторинга;
- дистанционное техническое обслуживание;
- синхронизация;
- электрическая защита генератора;
- управление и питание с использованием вспомогательного электрооборудования.

Давление природного газа на входе	3 - 131 бар
Давление природного газа на выходе	1,1 - 13 бар
Скорость вращения агрегата	500-25 000 об/мин
Температура газа на входе	до 300 °С
Максимальная мощность	10 000 кВт
Расход газа	до 212 000 Нм ³ /час

Рисунок 7 – Технические характеристики турбодетандеров

Себестоимость СПГ примерно равна 25\$ США за 1 т. Срок окупаемости подобных проектов составляет 3-6 лет.

Снижение себестоимости полученного СПГ на ГРС, обусловленное использованием вторичных энергоресурсов – потенциальной энергии давления сжатого газа.

Однозначно, предлагаемые решения требуют уточнения и расчетов, которые обеспечат определение точных характеристик оборудования, объема капитальных затрат и величины экономического эффекта, но перспективность самой концепции не оставляет вопросов.

1.6 Основные разработчики и заводы изготовители турбодетандеров криогенных установок

«Криогенмаш» предлагает широкий ассортимент криогенных турбодетандеров, полностью удовлетворяющий как внутренние потребности предприятия, так и любые запросы заказчиков.

Проводимое в последнее десятилетие совершенствование наших традиционных изделий – редукторных турбодетандеров с тормозными электрогенераторами, а также инновационные разработки, направленные на создание новых типов конструкций с использованием в качестве тормоза компрессорной ступени, способствовали широкому признанию турбомашин с маркой Криогенмаш.

С 1996 г. Криогенмаш приступил к выпуску турбодетандеров ВРУ на газостатических опорах, используемых ранее только в турбомашинах гелиевых ожижителей. Положительный опыт эксплуатации в течение более 6 лет на узбекском металлургическом комбинате (г. Бухара) свидетельствует об их высоком качестве и надежности.

Разработана и внедрена специальная технология модернизации ранее выпускаемых и эксплуатируемых турбодетандеров непосредственно у заказчиков. Замена элементов проточной части на более совершенные, а элементов ходовой базы – на более надежные, позволяет не только продлить

срок службы турбодетандеров, но и значительно повысить производительность ВРУ.



Рисунок 8 – Логотип «Криогенмаш»

ООО Кислородмаш располагает полным комплектом производственного оборудования для изготовления воздухоразделительных установок. Имеющееся оборудование позволяет изготавливать собственными силами узлы, сборки, механизмы, входящие в состав воздухоразделительных установок.

Предприятие ООО Кислородмаш состоит в «Ассоциации металлообрабатывающих предприятий» (АМП).



Рисунок 9 – Криогенные воздухоразделительные установки



Рисунок 10 – Криогенная арматура



Рисунок 11 – Насосы НСГ и запасные части



Рисунок 12 – Турбодетандерные агрегаты и турбины



Рисунок 13 – Логотип «Кислородмаш»

Школа развития турбодетандеростроения в НПО «ГЕЛИЙМАШ» имеет большую историю, начавшуюся еще во времена ВНИИКИМАШ. Первыми машинами для расширения газа в лопаточной турбине стали турбодетандеры, созданные под руководством нобелевского лауреата, академика П.Л. Капицы.

Достижения специалистов были неоднократно отмечены специалистами ведущих мировых фирм и получили признание. В 1996 году в Брюсселе на Международной выставке Турбодетандеры ОАО «НПО «ГЕЛИЙМАШ» отмечены золотой медалью.

В процессе развития инженерами и конструкторами ГЕЛИЙМАШ были созданы следующие типы турбодетандеров:

- воздушные турбодетандерные агрегаты низкого давления (НД) большой производительности для воздухоразделительных установок (ВРУ) на гидродинамических разъемных подшипниках и с тормозным электрогенератором;

- турбодетандерные агрегаты среднего давления (СД) и высокого давления (ВД) большой производительности для воздухоразделительных установок (ВРУ) на гидродинамических подшипниках;

- турбодетандерные агрегаты малой производительности на газо- и гидродинамических подшипниках;

- турбодетандерные агрегаты для расширения гелия на комбинированных подшипниках;

- турбодетандерные агрегаты для расширения водорода;

- турбодетандерные агрегаты для расширения природного и попутного газа на гидродинамических подшипниках;
- турбодетандерные агрегаты для расширения природного газа большой производительности на магнитных подшипниках.



Рисунок 14 – Логотип «НПО Гелиймаш»

1.7 Причины отказов и износа турбодетандеров криогенных установок

Неспокойный ход турбодетандерного агрегата может явиться следствием следующих неисправностей:

- попадание твердой углекислоты и льда в проточную часть;
- попадания сжиженного газа в проточную часть;
- небаланса ротора; увеличения зазора в подшипниках в результате износа;
- вибрации ротора при наступлении резонанса между частотой его собственных колебаний и частотой возбуждающих сил;
- расцентровки муфт;
- контакта между гребнями и обоймами лабиринтовых уплотнений;
- ослабления посадки колеса на вал; искривления вала и др.

Повреждение ротора турбодетандера может произойти при попадании посторонних тел в проточную часть.

Другими причинами могут быть:

– сдвиг ротора по отношению к корпусу, вследствие износа или выплавки упорных поверхностей упорного подшипника;

– искривление вала при контакте между гребнями и обоймами лабиринтовых уплотнений.

Повреждения ротора могут также произойти вследствие тепловых деформаций при быстром охлаждении турбодетандера во время пуска, или попадания льда, твердой углекислоты или сжиженного газа в проточную часть. Наконец, ротор и машина в целом могут быть повреждены при разгоне в случае отказа системы защиты при обесточивании электрогенератора.

Повреждение подшипников турбодетандера может наступить при недостатке масла (отказ масляного насоса), при повышенном осевом усилии (например, в случае попадания сжиженного газа в проточную часть), при загрязненном масле, при недостаточном охлаждении масла, при расцентровке муфт.

Неисправности в подшипниках обычно обнаруживаются повышением температуры.

При регулярном наблюдении, а еще лучше при наличии соответствующей предупредительной сигнализации, неисправности в подшипниках обнаруживаются своевременно.

При своевременном обнаружении неисправностей в подшипниках их повреждения невелики и ограничиваются обычно выплавкой баббитовой заливки и надиром шеек вала. В этом случае шейки должны быть проточены, отполированы, а подшипники вновь залиты, разделаны и пришабрены по шейкам валов.

Износ зубчатой муфты обычно является следствием расцентровки, а также плохой смазки.

Турбодетандеры чрезвычайно просты в эксплуатации и нуждаются в минимальном обслуживании. При медленном охлаждении во время пуска, правильном режиме, предотвращающем высаживание в проточной части льда и углекислоты, а также заброса сжиженного газа, неполадки в работе турбодетандера, а тем более повреждение его деталей, как это подтверждено практикой — явление редкое [6].

2 Анализ расчет данных для разработки паспорта надежности

2.1 Необходимость и планирование ремонта

Для поддержания оборудования, агрегата в работоспособном состоянии, восстановления важнейших эксплуатационных характеристик реализуется система планово – предупредительных ремонтов (ППР). Сущность системы ППР заключается в проведении через определенный срок профилактических осмотров и различных плановых ремонтов. Структура ремонтного цикла предусматривает техническое обслуживание (ТО), плановый ремонт и капитальный ремонт.

Работы по ТО выполняются для поддержания работоспособности агрегата в течение межремонтного периода. Процедура технического обслуживания агрегата включает:

- ежедневное техническое обслуживание (ЕТО). Периодичность выполнения работ по ЕТО - раз в сутки;
- техническое обслуживание (ТО1), проводимое через 750 часов наработки;
- техническое обслуживание (ТО2), проводимое через 3000 часов наработки, а также при перерывах в работе установки на период более 2 месяцев;
- техническое обслуживание (ТО3), проводимое через 6000 часов наработки.

При выполнении работ по ТО2 необходимо останавливать агрегат до 2 часов, а при ТО3 – не более 8 часов.

Разовые работы выполняются при, перерывах в работе, хранении и транспортировании и сезонном обслуживании. К разовым относятся работы,

связанные с восстановлением лакокрасочных покрытий агрегата, консервацией неокрашенных поверхностей и проведением мероприятий по коррозионной защите агрегата. Разовые работы выполняются при их необходимости.

Таблица 1 – Перечень работ, проводимых при различных видах технического обслуживания (ТО)

№ п\п	Наименование ТО и работы	Виды ТО			
		ЕТ О	ТО1	ТО2	ТО3
1	Контроль технических параметров агрегата	+			
2	Прослушивание шума работающего агрегата	+			
3	Осмотр состояния технологической обвязки блока агрегата турбодетандерного	+			
4	Стравливание конденсата газа охлаждения	+			
5	Осмотр заземления элементов агрегата		+		
6	Осмотр состояния воздушных фильтров ШУМП			+	
7	Осмотр состояния и замена фильтроэлементов газовых фильтров охлаждения обмоток АМП			+	
8	Осмотр технического состояния и замена фильтроэлементов воздушных фильтров			+	
9	Контроль технического состояния приводных кранов и клапанов			+	
10	Контроль технического состояния ШУМП и АМП				+
11	Осмотр состояния входных газовых фильтров				+
12	Осмотр состояния технологических дросселей			+	

Восстановление деталей на предприятиях производится по разрабатываемому технологическому процессу, который должен обеспечить при наименьших затратах высокое качество выполняемых работ.

Технологический процесс проектируют, руководствуясь требованиями стандартов Единой системы конструкторской документации (ЕСКД), Единой системы технологической документации (ЕСТД) и Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП).

Исходными данными для разработки технологического процесса являются:

- рабочий чертеж детали, технические условия на дефектацию и восстановление детали, паспорта и каталоги оборудования и инструмента, применяемого для выполнения работ,

- производственная программа восстановления деталей, а также нормативы по режимам резания, сварки и наплавки и другим процессам.

Рабочий чертеж детали должен содержать необходимые проекции, сечения, размеры с допусками, краткое описание детали, сведения о ее назначении и условиях работы в узле. Технические условия на дефектацию и восстановление детали приведены в Правилах капитального и среднего ремонта козловых кранов, авто-мобильных и аккумуляторных погрузчиков и других ана-логичных изданиях.

Восстановление детали может происходить по технологическому процессу, разработанному на каждый дефект (подефектная технология), на комплекс дефектов определенного сочетания, образовавшихся на деталях данного наименования (маршрутная технология) и на группу однотипных деталей определенного класса (групповая технология).

При подефектной технологии комплектование партии деталей, требующих ремонта, осуществляется только по наименованию, без учета однотипности и совокупности имеющихся дефектов. Прохождение деталей по производственным участкам усложнено, продолжительность цикла

восстановления значительна, при высокой стоимости качество восстановления детали обычно низкое. Такой процесс допустим лишь при единичном характере производства.

При маршрутной технологии технологический процесс предусматривает устранение определенного сочетания дефектов и оптимальную последовательность выполнения операций при кратчайшем маршруте прохождения деталей по производственным участкам. Количество маршрутов для деталей данного наименования (в целях упрощения организации производства) должно быть меньшим. Маршрутная технология применяется при централизованном восстановлении деталей.

При групповой технологии технологический процесс разрабатывается для группы деталей, восстановление которых производится одним и тем же методом, на однотипном оборудовании. Групповая технология основывается на классификации деталей, которая учитывает геометрическую форму, материал, термообработку детали, износы и другие дефекты, условия их работы и пр. В этом случае широко используются групповые приспособления, специальное оборудование и наиболее совершенные технологические процессы, что снижает затраты и повышает качество восстановленных деталей. Групповая технология применяется при поточном методе восстановления деталей.

В состав технологической документации на процессы обработки деталей при их изготовлении и восстановлении входят: маршрутная и операционная карты, карта эскизов и схем, технологическая инструкция, материальная ведомость, ведомость оснастки, а также спецификация технологических документов.

В зависимости от типа ремонтного производства технологические процессы разрабатывают с различной степенью детализации. В условиях

индивидуального и мелкосерийного ремонтного производства необходимо разрабатывать маршрутную карту, спецификацию технологических документов и ведомость технологической оснастки.

Для примера технической характеристики я использую турбодетандер Кар-30 [9].

Данный турбодетандер входит в состав агрегатов ГПА-4РМ-03, предназначен для понижения давления газа с целью снижения температуры и отвода от него энергии вовне. КПД не менее 1,3.

Основные преимущества:

- унификация узлов и элементов проточной части; 2. КПД – 89,2%;
- возможность применения с различными типами ГТУ.

Мощности, кВт	от 0,05 до 5000
Расход газа, млрд. нм ³ /год	от 0,002 до 5,0
Температуры на выходе, К	от 273 до 4,5
Степень расширения в одной ступени	от 1,2 до 30
Адиабатный КПД	до 87%
Диаметры рабочих колес, мм	от 20 до 500
Скорости вращения роторов, об/мин	от 10 000 до 300 000
Рабочие среды турбодетандеров:	воздух, азот, кислород, гелий, водород, природный газ, попутный газ и др.

Рисунок 15 – Технические характеристики КАр-30

2.2 Основы выбора способа восстановления турбодетандеров криогенных установок

Для поддержания в охлаждаемых помещениях требуемых параметров воздушной среды (температуры и относительной влажности) в них устанавливают теплообменные аппараты. Эти теплообменные аппараты, называемые камерными приборами охлаждения, предназначены для отвода теплоты из охлаждаемых помещений и передачи ее охлаждающей среде, циркулирующей в приборах охлаждения.

Воздушную систему охлаждения камер в настоящее время применяют в камерах холодильной обработки продуктов, а также в камерах хранения охлажденного и мороженого упакованного груза. Воздухоохладители создают принудительную циркуляцию воздуха в камерах. Скорость воздуха может достигать 10 м/с. При такой скорости циркуляции воздух хорошо перемешивается, вследствие чего создается равномерность параметров воздушной среды по объему камеры.

Широко применяют бесканальную систему охлаждения. При бесканальной системе используются подвесные потолочные воздухоохладители. Вентиляторы воздухоохладителей создают направленное движение воздуха в камере. Воздухоохладители размещаются под покрытием помещения и не занимают грузовой объем. В зависимости от размера камеры, типа и конструкции воздухоохладителя они могут размещаться у стены или в середине помещения по одному или по два на пролет.

Кроме того, применяется бесканальная система с сосредоточенной раздачей воздуха через насадки. В качестве насадок используются цилиндрические или конические суживающиеся сопла.

Для уменьшения сопротивления теплоотдаче от воздуха и создания компактных поверхностей воздухоохладители выполняют чаще всего оребренными снаружи. Оребренная труба – сложная конструкция, каждый элемент которой выполняет особую функцию: внутренняя трубка функционирует как несущий элемент, который устойчив к воздействию избыточного давления и коррозии, а внешние ребра из алюминия, из-за своей развитой поверхности, создают хорошую теплопередачу от продукта к окружающему воздуху. Ребро накатных труб достаточно жесткое, что позволяет обеспечивать отличную тепловую передачу между ребром и несущей трубой в разном диапазоне температур. Профиль ребра различный по всему сечению и рассчитан таким образом, чтобы теплопередача осуществлялась по всей высоте ребра.

Охлаждающая батарея воздухоохладителя изготавливается из стальных бесшовных труб. Материал ребер - стальная холоднокатаная лента. Расположение труб в пучке шахматное. Оптимальный шаг ребер при автоматическом оттаивании инея составляет 10-12 мм.

В качестве охлаждающей среды в воздухоохладителях холодильника используется природный газ, охладившийся в турбинах детандергенераторной установки. Перед подачей его потребителю газ последовательно пропускают через теплообменники камер холодильника, где его температуру повышают и возвращают в трубопровод подачи газа на ГРС. Параметры газа не нарушаются. При этом отсутствует традиционное холодильно-компрессорное отделение со всей инфраструктурой (системы хранения, подвода, отвода аммиака, смазочных масел, электроэнергии и пр.).

Перейдем к выбору рационального метода восстановления деталей:

Хромирование:

$K_{и}=2,3$, $K_{в}=2$,

$K_{сц}=1$,

где $K_{и}$, $K_{в}$ и $K_{сц}$ значения коэффициентов износостойкости, выносливости и сцепляемости соответственно.

Коэффициент долговечности $K_{д}$ численно принимается равным значению коэффициента, который имеет наименьшую величину, $K_{д}=1$.

$S_{в}$ – удельная себестоимость способа устранения дефекта, руб./м², $S_{в} = 186$ руб./м² $K_{и}= 1,8$, $K_{в} = 1,6$, $K_{сц} = 2,8$, $K_{д}=1,3$.

$S_{в} = 87$ руб./м²

Окончательное решение о выборе рационального способа устранения дефекта детали принимают по технико-экономическому критерию (обобщенный критерий). Он отражает технический уровень применяемой технологии, затраты на восстановление и эксплуатацию детали. Рассмотрим отношение $S_{в}/K_{д}$

Наиболее рациональным способом устранения дефекта детали считается тот, для которого отношение удельной себестоимости к долговечности $S_{в}/K_{д}$ является минимальным.

$$Cв/Кд(\text{хромирование}) = 186/1=186 \quad Cв/Кд(\text{наплавка}) = 87/1,3=66,9$$

Наиболее рациональным способом устранения дефекта является ручная наплавка. Так как восстановление детали происходит только при помощи вибродуговой наплавки, то сравним вибродуговую наплавку в среде CO₂ и под флюсом.

Вибродуговая наплавка в среде CO₂:

$$K_{и}=18,8, \quad K_{в}=0,7,$$

$$K_{сц}=1. \quad K_{д}=0,7.$$

$$Cв=82 \text{ руб./м}^2$$

Вибродуговая наплавка под флюсом:

$$K_{и}=1,7, \quad K_{в}=0,98,$$

$$K_{сц}=1. \quad K_{д}=0,87.$$

$$Cв = 81 \text{ руб./м}^2 \quad Cв/Кд(\text{среде CO}_2) = 117,7$$

$$Cв/Кд(\text{под флюсом}) = 101,25$$

Наиболее рациональным способом устранения дефекта является вибродуговая наплавка под флюсом [7].

2.3 Основы выбора оборудования и оснастки для восстановления турбодетандеров криогенных установок

Ручная наплавка, как правило, производится в стационарных условиях. В комплект оборудования поста для ручной электродуговой наплавки входит: источник питания, стол или манипулятор изделия, электроддержатель, сварочные провода, защитные приспособления, вспомогательный инструмент. Для оснащения поста используется обычное оборудование для ручной электродуговой сварки.

Для ручной наплавки используют источники переменного и постоянного тока, однако в большой степени обеспечивают стабильность процесса и качество наплавки. Устойчивость процесса наплавки зависит в первую очередь от внешней характеристики источника питания - зависимости напряжения на его зажимах от тока нагрузки.

В настоящее время единичная мощность, которую можно достичь в одном модуле криоэнергетической системы достигает 20 МВт, а запас энергии может быть 100-200 МВт часов. При этом стоимость возведения модульной криоэнергостанции, по разным оценкам, составит от 1000 до 2000 долларов за 1 кВт выдаваемой мощности. Все компоненты станции (воздухоразделительные установки, емкости криогенного хранения, газовые турбины и т.д.) давно известны и выпускаются серийно. Гарантированный срок службы комплектующих, а значит, и время жизни станции превышает 25 лет.

Казалось бы, задача решена, но существенный недостаток такого метода –в его низкой эффективности. Энергия тратится не только на сжижение, но еще и на газификацию. В результате на выходе получается всего 25% затраченной энергии. Используя аккумулятор холода и «бросовое» тепло для газификации, можно поднять эффективность до 75%.

Но даже в этом случае такой накопитель энергии по своим характеристикам будет существенно уступать накопителям других типов, и строить такие накопители экономически нецелесообразно. Технические характеристики приведены на рисунке 16.

Наименование параметра	Значение
Перерабатываемый воздух:	
- объемный расход, м ³ /ч	155 000
- давление, бар	5,4
- температура, К	373
Кислород газообразный:	
- объемная производительность, м ³ /ч	30 000
- объемная доля кислорода, %	99,7
- давление на выходе из установки, бар	35
Кислород жидкий:	
- массовая производительность, кг/ч	1 330
- объемная доля кислорода, %	99,7
- давление на выходе из установки, бар	2,5
Азот жидкий:	
- массовая производительность, кг/ч	2 330
- объемная доля кислорода, %	0,01
- давление на выходе из установки, бар	4
Аргон жидкий:	
- массовая производительность, кг/ч	1 740
- объемная доля кислорода, %	0,0005
- давление на выходе из установки, бар	2,5
Криптоновый концентрат:	
- объемная производительность, м ³ /ч	25
- объемная доля (Kr+Xe), %	0,5
- давление на выходе из установки, бар	0,4-0,5
Неоно-гелиевая смесь:	
- объемная производительность, м ³ /ч	6
- объемная доля (Ne+He), %	40
- давление на выходе из установки, бар	4

Рисунок 16 – Технические характеристики установки КАр-30

Оборудование для автоматической вибродуговой наплавки. В состав установки для вибродуговой наплавки металла на реставрируемые детали входит несколько устройств:

- переоборудованный токарный станок, обеспечивающий необходимую скорость вращения зафиксированной в зажимах детали;
- наплавочная вибродуговая головка, в этом качестве используют автоматические аппараты для дуговой сварки, источник электропитания.

В вибродуговых автоматах меняют конструкцию мундштука, вместо подачи флюса монтируют подачу защитного газа. Модифицируют головки ОКС-1252 и ОКС-6569. Проволоки, применяемые для вибродуговой

технологии: для чугуна – Св-15; для среднеуглеродистой стали – Св-18ХГСА, Св-08А, Нп-30ХГСА, Нп-50; для обычной стали – 65Г.

В качестве запчастей необходимы направляющие трубки, мундштуки, направляющие ролики.

Для вибродуговой наплавки применяют источники питания с жесткой внешней характеристикой: генераторы АДН-500/250, выпрямители ВС-300, ВС-600, преобразователи ПД-305, ПСГ-500, а также дроссели типа А-780 или А-855.

Оборудование для дуговой наплавки.

Станки моделей У-651, У-652, У-653 и У-654, предназначенные для дуговой наплавки различных поверхностей деталей. Высокий уровень внутригрупповой унификации этих станков позволил создать ряд станков как по типам наплавляемых (свариваемых) изделий, так и по размерам этих изделий.

Все станки имеют унифицированные станины, тумбы и стойки. На станинах установлены механизмы вращения заготовок с коробками скоростей и подач. По направляющим станины перемещаются наплавочный автомат и пиноль. Для отвода вредных газов и аэрозолей из зоны наплавки имеются вытяжные зонты [8].

2.4 Техническое обслуживание

Нормальная эксплуатация криогенных установок зависит от следующих факторов - организации технического обслуживания и ремонта, составляющего оборудование. Данная система предусматривает:

- осмотр и устранение мелких дефектов при эксплуатации;
- ежедневный уход;

– плановые остановки для профилактических мероприятий, поддерживающих работоспособность установки,

– технические осмотры (ревизии) и текущий ремонт.

Технический осмотр - так называемый ревизией, плановый осмотр для проверки состояния ходовых частей и узлов креплений, устранения неисправностей и удаления дефектных деталей без значительной разборки и длительного перерыва в работе установки.

Текущий ремонт проводят только в установленные сроки. Он включает в себя обязательное устранение неисправностей, которые были выявлены при работе установки, и выполнение работ по техническому уходу, предусмотренных инструкцией по обслуживанию.

Периодичность текущих ремонтов зависит от параметров, габаритов, конструктивных особенностей установки, от числа отработанных часов и правильности эксплуатации.

При капитальном ремонте разбирают все основные части установки, заменяют подшипники коленчатого вала, калибруют шейки валов, проверяют узлы и подвижные соединения, детали, а также выполняют другие работы для восстановления исходных, паспортных значений параметров и надежной работы установки до очередного планового ремонта.

При дефектации осматривают работающую установку, обязательно обращая внимание на стуки, вибрацию и течи, состояние фундамента и др. Результаты обследования записывают в дефектовочную ведомость строго в установленном порядке: наименование узлов и деталей, их основные размеры и материал; число деталей, в том числе годных без ремонта и с ремонтом, негодных и отсутствующих; выявленные дефекты и результаты измерений;

способ устранения дефектов. По дефектовочной ведомости определяют трудовые затраты и стоимость ремонтных работ.

2.5 Структура ремонтного цикла

Ремонтный цикл – это повторяющаяся совокупность различных видов планового ремонта, выполняемых в предусмотренной последовательности через установленные равные числа часов оперативного времени работы оборудования, называемые межремонтными периодами.

Ремонтный цикл завершается капитальным ремонтом и будет определен структурой и продолжительностью.

Структура ремонтного цикла – это перечень ремонтов, входящих в его состав, расположенных в последовательности их выполнения.

Продолжительность ремонтного цикла – это число часов оперативного времени работы оборудования, на протяжении которого производятся все ремонты, входящие в состав цикла.

Для проведения ремонта предполагается вывод агрегата из работы. При этом агрегат должен быть освобожден от рабочей среды, отключен от действующего оборудования и проветрен. Системой ППР предусмотрены следующие виды ремонтов: текущий, внеплановый и капитальный. Текущий ремонт (ТР) проводится при наработке 12000 часов. Для его осуществления производится частичная разборка агрегата с целью восстановления эксплуатационных характеристик. Этот вид ремонта выполняется в условиях Заказчика.

Капитальный ремонт (КР) агрегата выполняется при достижении наработки 12000 часов эксплуатации агрегата. Объем выполняемых работ предусматривает полную разборку и замену изнашиваемых деталей (лопаток

направляющего аппарата, рабочих колес и др.). КР выполняется ремонтной бригадой, включающей механиков, электрика, специалиста по КИП. Время простоя агрегата – до 30 календарных дней.

При проведении ТР должны быть выполнены:

- все виды ТО;
- проверка крепления турбодетандера на раме блока;
- проверка затяжки хомутов крепления трубопроводов и состояние разъемных соединений трубопроводов;
- проверка состояния теплоизоляции трубопроводов выхода газа из турбины и из компрессора;
- демонтаж и полная разборка СПЧ, входящей в состав турбодетандера, дефектация износившихся деталей и узлов вставки, их ремонт или замена, сборка и балансировка ротора вставки;

Для замены изношенных изделий при ремонте вставки могут быть использованы сборочные единицы, детали, стандартные и прочие изделия согласно Комплекту запасных частей.

- осмотр и ремонт комплектующих изделий (краны клапаны и другие комплектующие) в соответствии с указаниями в паспортах на эти изделия;
- проверка и настройка параметров системы активных магнитных подшипников;
- восстановление нарушенных лакокрасочных покрытий блока агрегата и консервация неокрашенных поверхностей.

При проведении КР должны быть проведены:

- работы по ТО;
- работы по ТР;
- проверка толщины стенок труб Ду100, Ду150, Ду200;

- гидравлические испытания агрегата на прочность и плотность;
- проверка срабатывания аварийной и предупредительной сигнализации

Перечень деталей, которые могут быть использованы для обеспечения текущего ремонта блока агрегата турбодетандерного, приведен в Комплекте запасных частей 696-10.940.00.

При всех видах ремонта агрегата турбодетандерного должны быть использованы приспособления согласно Комплекту приспособлений 696-70.000.00

Срок службы турбодетандера в среднем составляет 3 года. Ремонтный цикл – 12 месяцев.

Коэффициент использования оборудования по машинному времени $k_{маш} = 0,8$; коэффициент использования оборудования по календарному времени $k_{к} = 1,2$. Найдем количество капитальных ремонтов за срок службы турбодетандера и также период между средними и текущими ремонтами в часах работы оборудования.

Период между капитальными ремонтами – 10 месяцев. При сроке службе в 3 года капитальных ремонтов будет 3. Период между текущими ремонтами составляет $T_{тр} = 1$ месяц, период между средними ремонтами составляет $T_{ср} = 3,5$ месяца. Месячный календарный фонд времени из расчета работы оборудования 12 часов в сутках (количество дней в месяце в среднем умножили на количество часов):

$$T = 12 * 30 = 360 \text{ часов}$$

Месячный календарный фонд времени в таком случае равен:

$$T = T * k_{маш} * k_{к} = 360 * 0,8 * 1,2 = 345,6 \text{ часов}$$

Периоды между текущими, средним и капитальными ремонтами в часах работы оборудования соответственно составляют:

$$T_1 = 1 * 345,6 = 345,6 \text{ часоВ};$$

$$T_2 = 3,5 * 345,6 = 1209,6 \text{ часоВ};$$

$$T_3 = 10 * 345,6 = 3456 \text{ часоВ};$$

Второй средний ремонт наступит через $24 \cdot 1209,6$ ч. после капитального ремонта, а учитывая, что турбодетандер отработал 13000 ч: $24 \cdot 1209,6 - 13000 = 16030$ ч. - осталось отработать до второго среднего ремонта [10].

2.6 Расчет интенсивности отказа и обработка информации о надежности турбодетандеров криогенных установок

В данной части работы необходимо:

- составить статистический ряд (частотную гистограмму) информации об отказах оборудования;
- вычислить основные оценки числовых характеристик отказов;
- построить гипотетическую статистическую функцию плотности распределения;
- построить статистическую функцию плотности распределения (в MathCAD);
- найти вероятность безотказной работы оборудования (в MathCAD);
- найти среднюю наработку до отказа (в MathCAD).

Для начала составим статистический ряд наработок до отказа турбодетандера в программе Statgraphics, с помощью данной программы будет производиться дальнейшая обработка информации. В испытании участвовали 40 турбодетандеров [11].

Далее необходимо вычислить основные оценки числовых характеристик отказов и составить частотную гистограмму. Для этого нужно создать выборку значений случайной величины и в окне «One Variable Analysis» (рис.18) выберем необходимый статистический ряд. Далее выберем в окне «таблицы и графики» пункты «Summary Statistics» «Frequency Histogram».

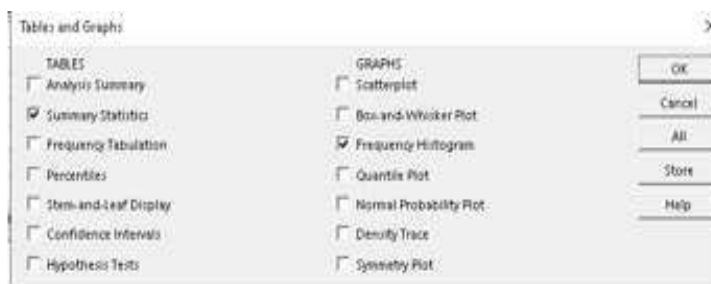


Рисунок 17 – Выборка значений

Для определения числовых характеристик следует на панели «Summary Statistics» нажать правую кнопку мыши и во всплывающем меню выбрать пункт «Pane Options». В появившемся окне указываем все числовые характеристики. Для оценки всех основных числовых характеристик нажимаем кнопку «All».



Рисунок 18 – Выбор характеристик и результатов анализа

Далее необходимо произвести подбор распределения:

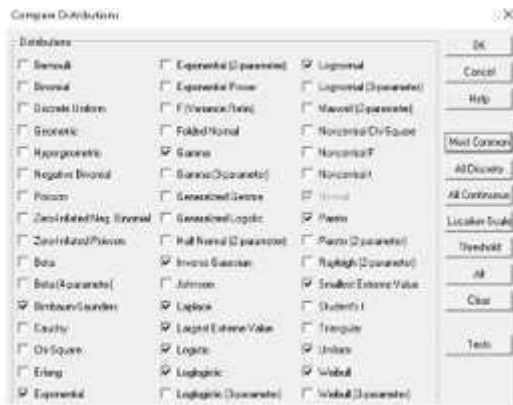


Рисунок 19 – Результат подбора закона распределения

Для подбора закона распределения наработке образца до отказа выполним исследование для всех распределений непрерывных случайных величин с множеством возможных значений на полуинтервале $[0, \infty)$.

Результаты подбора распределения представлены. Из них видно, что в соответствии с критерием согласия Пирсона наилучшим образом с экспериментальными данными согласуется распределение Gamma. А при использовании критерия Колмогорова-Смирнова наилучшее согласование с экспериментальными данными показывает нормальное распределение.

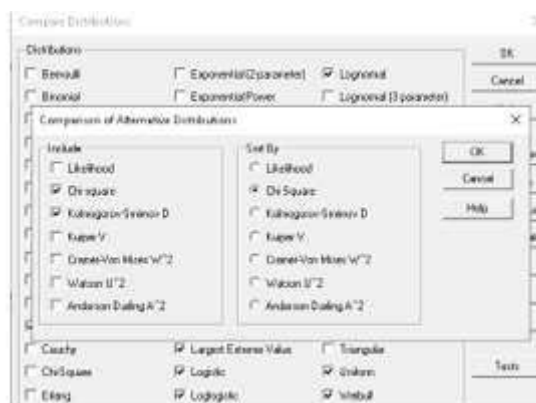


Рисунок 20 – Результаты подбора распределения

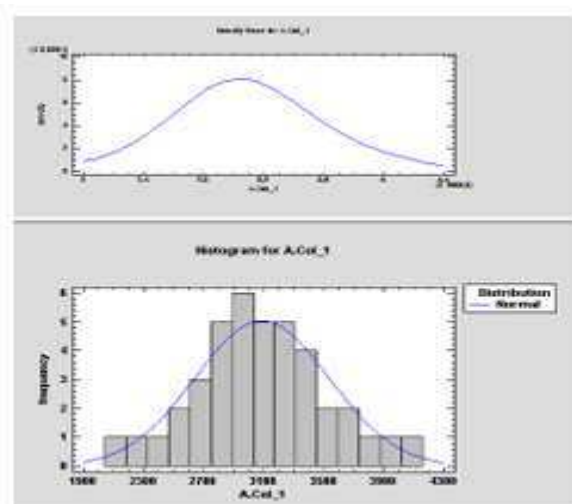


Рисунок 21 – Результаты подбора распределения

Построим статистическую функцию плотности распределения в программе MathCAD (рис.22).

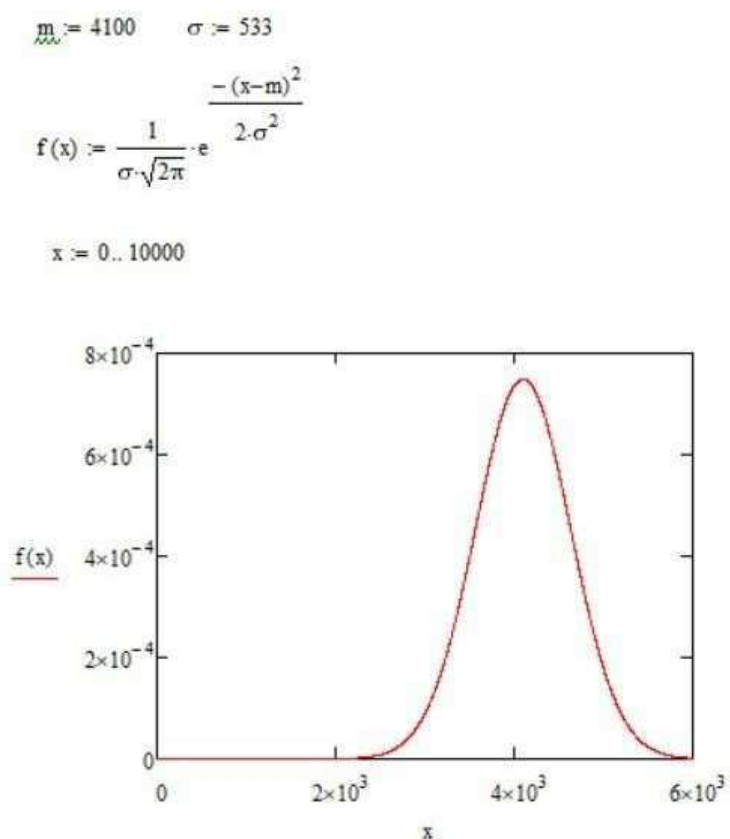


Рисунок 22 – Плотность распределения нормального закона

Рассчитаем вероятность безотказной работы до 2000 часов, средней наработки, расчет приведен ниже.

$$m := 4100 \quad \sigma := 533$$

$$\Phi(t) := \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

$$P(x) := 0.5 - \Phi\left(\frac{x - m}{\sigma}\right)$$

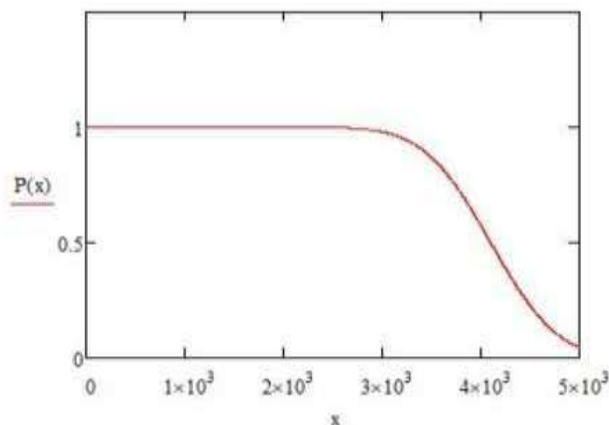


Рисунок 22 – Расчет (1)

$$x := 2000$$

$$P := 0.5 - \Phi\left(\frac{x - m}{\sigma}\right) = 1$$

$$P(x) := 0.5 - \Phi\left(\frac{x - m}{\sigma}\right)$$

$$T_{\text{ср}} := \int_0^{\infty} (P(x)) dx \rightarrow 4100.000000000000485$$

Рисунок 23 – Расчет (2)

Средняя наработка до отказа практически совпадает с оценкой математического ожидания по выборке, наработка до отказа составляет 3087,95 часов [10].

2.7 Оценка уровня эксплуатационной надежности турбодетандеров криогенных установок

Приведем оценку уровня надежности турбодетандеров криогенных установок по структурным схемам. На рисунке 25 и 26 представлены две схемы, которые мы сравним по уровню надежности при работе без отказа в течение 10000 часов по значениям интенсивностей отказов отдельных элементов конструкции.

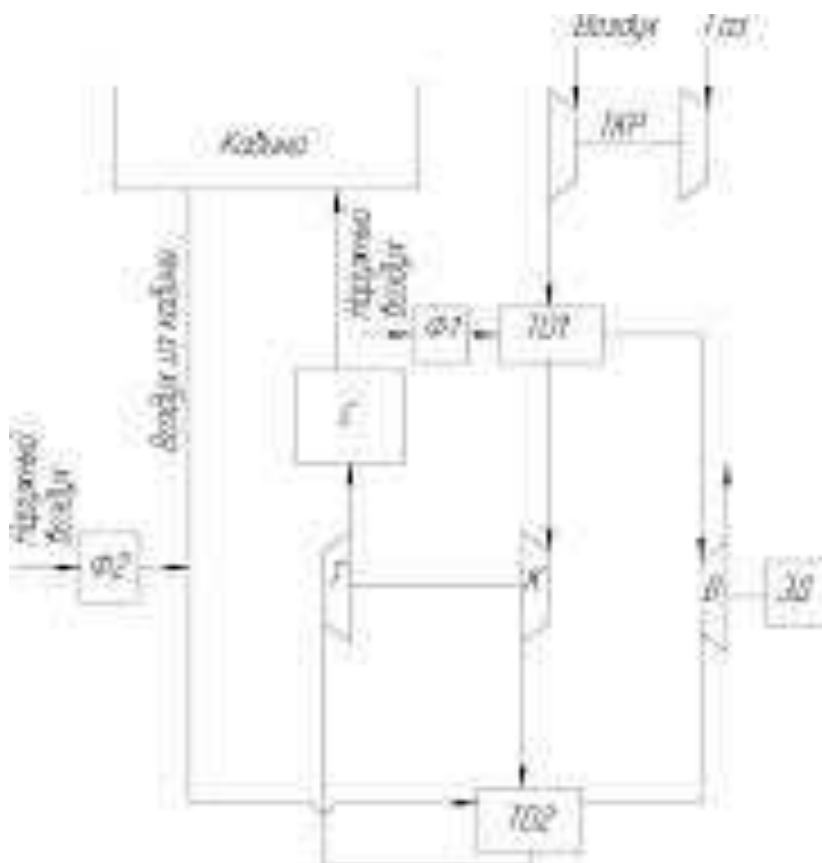


Рисунок 25 – Схема турбодетандера: Входной патрубок, выходной патрубок, устройство торможения входящего потока, теплообменник, система трубопроводов, гидродинамический теплогенератор. силовой корпус, ступень турбины

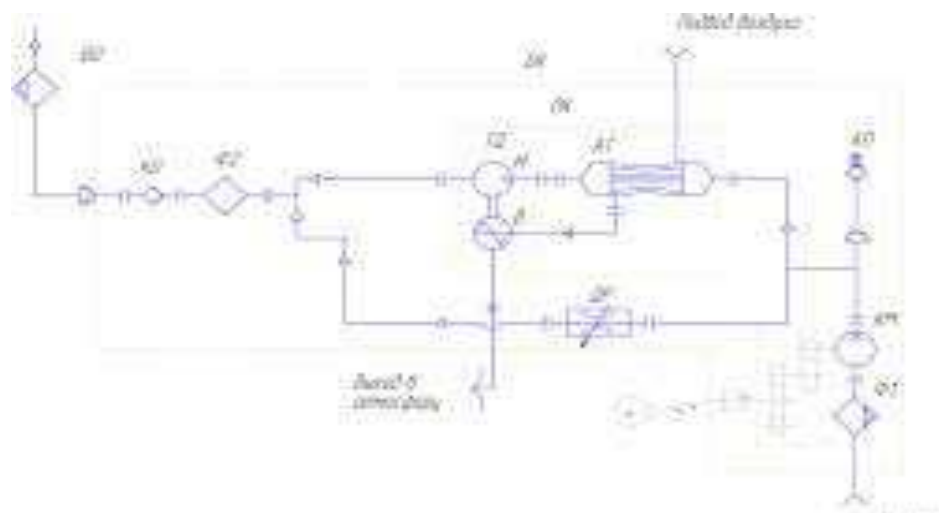


Рисунок 26 – Схема Турбодетандера: Входной патрубок, выходной патрубок, устройство торможения входящего потока, теплообменник, система трубопроводов, гидродинамический теплогенератор, силовой корпус

Таблица 2 – Интенсивность отказов λ элементов турбодетандеров криогенных установок

Элементы Турбодетандера (1)	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6} / \text{ч}$
Входной патрубок	2,3
Выходной патрубок	0,9
Устройство торможения входящего потока	3,3
Теплообменник	2,8
Система трубопроводов	0,22
Гидродинамический теплогенератор	1,1
Силовой корпус	2*0,
Ступень турбины	33
0,06	
Элементы Турбодетандера (2)	Интенсивность отказов $\lambda \cdot 10^{-6} / \text{ч}$
Входной патрубок	2,3
Выходной патрубок	2*0,
Устройство торможения входящего потока	9
Теплообменник	3,3
Система трубопроводов	2,5
Гидродинамический теплогенератор	0,22
Силовой корпус	1,1
	2*0,
	33

Определим общие интенсивности отказов двух конструкций турбодетандеров и вероятность безотказной работы в течение 10000 в пакете «MathCAD».

$$\lambda_1 := \begin{pmatrix} 2.3 \\ 0.9 \\ 3.3 \\ 2.8 \\ 0.22 \\ 1.1 \\ 2 \cdot 0.33 \\ 0.06 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6} \quad \lambda_2 := \begin{pmatrix} 2.3 \\ 2 \cdot 0.9 \\ 3.3 \\ 2.5 \\ 0.22 \\ 1.1 \\ 2 \cdot 0.33 \end{pmatrix} \cdot 10^{-6}$$

$$\sum \lambda_1 = 1.134 \times 10^{-5} \quad \sum \lambda_2 = 1.188 \times 10^{-5}$$

$$\frac{\sum \lambda_1}{\sum \lambda_2} = 0.955$$

$$t := 10000$$

$$P1(t) := e^{-\left(\sum \lambda_1\right) \cdot t}$$

$$P2(t) := e^{-\left(\sum \lambda_2\right) \cdot t}$$

$$P1(t) = 0.893$$

$$P2(t) = 0.888$$

Рисунок 24 – Определение показателей надежности двух ЦК

Таким образом, интенсивность отказа схемы 1 меньше в 0,893 раза, ввиду повышенной сложности схемы и большего количества элементов конструкции.

2.8 Расчеты режимов ремонта деталей турбодетандеров криогенных установок наплавкой

В данном пункте бакалаврской работы необходимо изучить методику расчета ремонта деталей турбодетандеров наплавкой различного вида. Рассчитать режимы ремонта наплавкой деталей. Дуговая наплавка под флюсом

Необходимо произвести расчет дуговой наплавки под легирующим флюсом. Так как наплавленный металл в процессе его охлаждения самозакаливается до требуемой твердости, соответственно, после наплавки термическая обработка валов не требуется. При точном соблюдении режима процесса наплавки ресурс вала после ремонта почти такой же, как у нового.

Основные параметры режимов наплавки и скорость наплавки рассчитывается по формуле:

$$V_H = \frac{\alpha_H \cdot I}{h \cdot s \cdot \gamma}, \quad (1)$$

где α_H - коэффициент наплавки, г/Ач (при наплавке постоянным током обратной полярности = 12...16);

h - толщина наплавленного слоя, равная 2 мм, мм;

γ - плотность электродной проволоки, г/см³ = 6,73;

I - сила тока = 180 А;

шаг наплавки:

$$S = 8 \text{ мм / об}$$

Вставим необходимые данные в формулу (1):

$$V_H = \frac{12 \cdot 180}{1,2 \cdot 8 \cdot 6,73} = 33,5 \text{ м/л} \quad (2)$$

Частота вращения детали равна:

$$n_d = \frac{1000V_H}{60\pi d} = \frac{1000 \cdot 33,5}{60 \cdot 3,14 \cdot 130} = 1,4 \text{ об/мин} \quad (3)$$

d – диаметр детали, 130 мм.

Скорость подачи проволоки равна:

$$V_{\text{пр}} = \frac{4 \cdot \alpha_H \cdot I}{\pi \cdot d_{\text{пр}}^2 \cdot \gamma} = \frac{4 \cdot 12 \cdot 180}{3,14 \cdot 4 \cdot 6,73} = 101,8 \text{ м/ч} \quad (4)$$

Вылет электрода равен:

$$\delta = (10 - 12)d_{\text{пр}} = 12 \cdot 22 = 22 \text{ мм.} \quad (5)$$

Смещение электрода равно:

$$l = (0,05 - 0,07)d_{\text{пр}} = 0,07 \cdot 180 = 12,6 \text{ мм} \quad (6)$$

Необходимо произвести расчет вибродуговой наплавки коленчатого вала, необходимые данные возьмем из 1 пункта расчетов.

Расчеты параметров режима нанесения покрытий:

$$I = \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}}^2}{4} = 173 \text{ А} \quad (7)$$

где $d_{\text{пр}}$ - диаметр электродной проволоки, мм, рассчитан в 1 пункте.

Скорость подачи электродной проволоки равна:

$$V_{\text{пр}} = \frac{0,1 \cdot I \cdot U}{d_{\text{пр}}^2} = 69,9 \text{ м/ч} \quad (8)$$

где: U - напряжение, В ($U = 14...20$ В);

Скорость наплавки равна:

$$V_H = \frac{0,785 \cdot d_{np}^2 \cdot V \cdot \eta}{h \cdot s \cdot \alpha} = 52,8 \text{ м/ч} \quad (9)$$

где η ($= 0,7...0,8$) - коэффициент перехода электродного материала в наплавленный металл;

S – шаг наплавки, мм/об, рассчитанный в 1 пункте;

α - коэффициент, учитывающий отклонения фактической площади сечения наплавленного слоя от площади четырехугольника с высотой h ;

Амплитуда колебаний равна:

$$A = 0,9$$

2.9 Расчеты режимов ремонта деталей электромеханического привода механической обработкой

В данном разделе была задача изучить методику расчета ремонта деталей турбодетандера механической обработкой различного вида, рассчитать режимы ремонта восстанавливаемых деталей оборудования.

Рассчитаем параметры режимов токарной обработки рабочего колеса.

Частота вращения детали, об/мин:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d} \quad (10)$$

Скорость резания, мм/мин:

$$V = \frac{C}{t^x \cdot S^y \cdot T^m} = 29,2 \text{ м/мин} \quad (11)$$

где, $t = z_2$ глубина резания принимается равной припуску, для способа получения покрытия вибродуговая наплавка равна 0,3,

S - подача, равна 1,8 мм/об (табл. 2 документа методика).

T - стойкость инструмента, для быстрорежущая стали примем 120 мин (табл. 5 документа методика).

Значения коэффициентов C и показателей степени x , y , для восстановленных стальных деталей примем соответственно 29,2; 0,11; 0,36.

Значение коэффициента m примем равным 0,136 (табл. 6. документа методика)

Вставим все необходимые значения в формулу (1) и получим:

$$n = 36,5 \text{ об/мин}$$

Число проходов определяется по формуле:

$$i = \frac{z}{t} = 38,4 \quad (12)$$

Продольная подача, мм/об равна:

$$S = 0,3 \cdot B_k = 5 \text{ мм/об}$$

где B_k - ширина шлифовального круга,

$$B_k = 16,6 \text{ мм.}$$

Окружную скорость детали V_d для чистового шлифования принимаем 4 м/мин.

Скорость продольного перемещения стола $V_{ст}$, мм/мин определяется по формуле:

$$V_{\text{ст}} = \frac{S \cdot n_d}{1000} = 0,4 \quad (13)$$

2.10 Расчет режимов и параметров восстановления деталей электромеханического привода методом электрохимического нанесения покрытий

Необходимо определить технологические режимы при восстановлении рабочего колеса методом хромирования. Режимы механической обработки детали после нанесения слоя металлопокрытия.

Определяем величину износа трущейся части:

$$H = D_{\text{max}} - D = 0,186 \text{ мм.}$$

К режимам электролитического хромирования относят силу тока, норму времени на восстановление и время выдержки детали в ванне.

Сила тока определяется по формуле:

$$I = D_k \cdot F_k \quad (14)$$

где D_k – катодная плотность тока, А/дм² (определяется условиями работы детали, видом покрытия, температурой и концентрацией электролита).

Для хромирования $D_k=30-55 \text{ А/дм}^2$; F_k – площадь покрываемой поверхности, дм².

$$F_k = \pi \cdot D \cdot L = 281,6 \text{ дм}^2$$

Тогда по формуле (1) сила тока равна:

$$I = 18554,7 \text{ А}$$

Норма времени T_H определяется выражением:

$$T_H = \frac{(t_0 - t_1) K_{ПЗ}}{\eta_d \cdot \eta_{и}} \quad (15)$$

где t_0 – продолжительность электролитического осаждения металлов в ванне, ч;

t_1 – время на загрузку и выгрузку деталей;

$K_{ПЗ}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное и подготовительно-заключительное время;

n_d – число деталей, одновременно восстанавливаемых в ванне;

$\eta_{и}$ – коэффициент использования ванны.

Время выдержки деталей в ванне:

$$t_0 = \frac{1000 \cdot h \cdot \gamma}{C \cdot D_k \cdot \eta_B} \quad (16)$$

где h – толщина наращивания, мм (выбирается с учетом износа и припуска на механическую обработку);

γ – плотность осажденного металла, г/см³;

C – электрохимический эквивалент, г/А·ч;

η_B – выход металла по току.

Подставив исходные значения в формулу получим:

$$t_0 = 5,34 \text{ ч}$$

Тогда норма времени T_H определяется по формуле:

$$T_H = 0,25 \text{ ч.}$$

В качестве последующей механической обработки после хромирования выбираем притирку.

Норма времени на механическую обработку после хромирования в общем случае определяется по формуле:

$$T_H = T_O + T_B + T_{\text{доп}} + \frac{T_{\text{пз}}}{\text{шт}} \quad (17)$$

где T_O – основное время на обработку детали, мин; для шлифования оно определяется как:

$$T_O = \frac{t \cdot i \cdot K_3}{S_{\text{пр}}} = 0,077 \text{ мин}$$

где t – глубина обработки, мм;

i – число проходов, $i=1$;

K_3 – коэффициент зачистных ходов,

$S_{\text{пр}}$ – продольная подача камня, м/мин;

$T_{\text{ВСП}}$ – вспомогательное время, затрачиваемое на выполнение основной работы, мин;

$T_{\text{д}}$ – дополнительное время, затрачиваемое на подготовку рабочего места, мин.

$T_{\text{д}}$ определяется как:

$$T_{\text{д}} = 0,1(T_O + T_B) = 1,011 \text{ мин}$$

T_{II} – подготовительно-заключительное время, расходуемое на получение задания, ознакомление с работой, мин;

$T_{II3}=15-20$ мин;

n – количество обрабатываемых деталей, шт.

Норма времени определится по формуле:

$$T_H = 25,003$$

2.11 Термообработка для повышения износостойкости турбодетандеров криогенных установок при ремонте

Необходимо рассчитать кривые охлаждения для отжига, нормализации, закалки в воде турбодетандера и определить с использованием этих кривых по анизотермической диаграмме превращения аустенита стали 35X полученные структурные состояния.

Проанализируем и оценим возможную износостойкость полученных структур.

Критическая температура A_{c3} для стали 45X составляет 680 °С. Температура нагрева для получения аустенитного состояния составляет $T_{max}=900$ °С.

Время, затраченное на охлаждение с температуры T_{max} до температуры T_i при средней скорости охлаждения $\omega_{охл}$, с:

$$t = \frac{T_{max}-T_i}{\omega_{охл}} \quad (7)$$

- полный отжиг: характерная скорость охлаждения — от 0,07 до 0,09 С°/с.
- пормализация: характерная скорость охлаждения — от 20 до 27 С°/с.

– закалка в воде: характерная скорость охлаждения — до 300 С°/с.

Расчет времени охлаждения при разных видах термической обработки представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Время охлаждения при разных видах термической обработки

Температура	Время охлаждения с максимальной температуры нагрева до температуры T_i			
	800	600	400	200
Отжиг	1600	13600	23500	47200
Нормализация	3	27	43	65
Закалка	-	0,5	0,83	1,6

После сопоставления полученных значений с анизотермической диаграммой превращения аустенита для стали 35 получены следующие составы структур:

– полный отжиг — феррит и перлит, твердость HRC 13 (данное структурно-фазовое состояние не обеспечивает высокую износостойкость из-за значительного количества феррита в феррито-перлитной смеси и низкой твердости);

– нормализация – бейнит, феррит и перлит, твердость HV 24 (за счет формирования бейнитно-мартенситной структуры ожидается существенное повышение износостойкости стали при сохранении достаточно высокого уровня вязкости);

– закалка в воде – мартенситно-аустенитная структура с преобладанием мартенсита, твердость HRC 42 (полученная структура обеспечивает высокую износостойкость при абразивном изнашивании и трении металла по металлу) [9].

3 Разработка паспорта надежности

При эксплуатации технологического оборудования проводится его периодическое обслуживание и ремонт. В общем случае периодичность ремонта определяется либо принятым межремонтным циклом (планово-предупредительный характер проведения ремонтов), либо возникновением неисправностей элементов (проведение ремонтов по фактическому состоянию).

Ведение мониторинга с анализом основных параметров работы турбодетандерного агрегата и показателей энергоэффективности может быть принято как основание для досрочного проведения ремонта, в то же время удовлетворительные значения параметров могут служить основанием для увеличения межремонтного периода.

Увеличение межремонтного периода предлагается в первую очередь для агрегатов с наилучшими показателями вероятности безотказной работы. Для агрегатов, выполняющих резервирующие функции, целесообразно рассмотреть варианты модернизации, включающие ротацию агрегатов.

Полученные в работе зависимости показателей надёжности могут использоваться для планирования времени проведения ремонтов поршневых агрегатов из условия минимизации затрат.

При эксплуатации технологического оборудования проводится его периодическое обслуживание и ремонт. В общем случае периодичность ремонта определяется либо принятым межремонтным циклом (планово-предупредительный характер проведения ремонтов), либо возникновением неисправностей элементов (проведение ремонтов по фактическому состоянию). На рисунке 25 представлена вероятность отказа в зависимости от продолжительности эксплуатации оборудования.

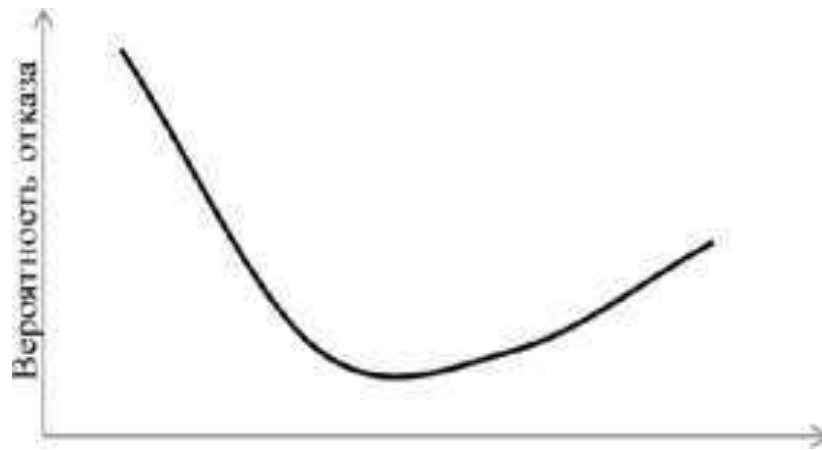


Рисунок 25 – Вероятность отказа и влияние накопления технических обслуживаний

Вероятности безотказной работы для турбодетандерных установок показаны на рисунке 2. Всего рассмотрено 142 межремонтных периода, основное количество из которых приходится на турбодетандеры с общей наработкой от 100 тыс. ч.

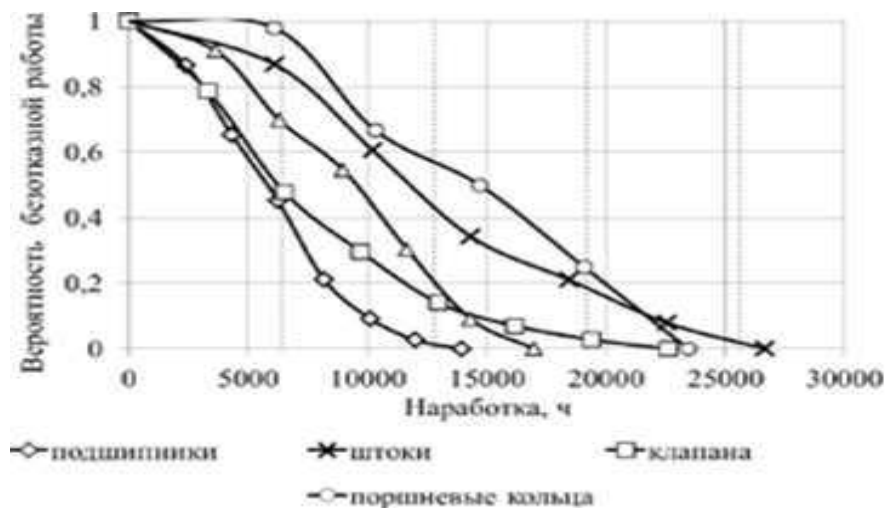


Рисунок 26 – Вероятность безотказной работы для турбодетандеров с разной общей наработкой

Необходимо отметить, что большая часть турбодетандеров с общей наработкой менее 100 тыс. ч. имеют резервирующие функции и работают во время ремонта основных агрегатов. В связи с этим их эксплуатация носит непостоянный характер, сопровождающийся большим количеством пусков и остановов, что уменьшает вероятность безотказной работы. Поэтому из дальнейшего анализа данных по отказам эти турбодетандеры исключены.

Анализ данных показывает повышение вероятности безотказной работы на интервале до 6 тыс. часов с увеличением общей наработки. Сравнение рисунков 24 и 25 показывает, что с увеличением количества технических обслуживаний увеличение вероятности отказов не происходит. Таким образом, физического износа турбодетандеров с большой наработкой по итогам анализа вероятности безотказной работы не происходит. Так же не обнаружено влияние общей наработки на энергетическую эффективность

Для турбодетандеров с общей наработкой более 100 тыс. часов был проведён анализ вероятности безотказной работы наиболее часто ремонтируемых элементов. На основе анализа проведённых ремонтов выявлено, что ремонт или замена подшипников проводится в 65% от общего количества ремонтов, клапанов в 63%, штоков – 33%, поршневых колец 22%. Для остальных элементов значение не превышает 20%.

Итоги анализа показаны на рисунке 26. Отказы возникают по причине износа, разрушения или загрязнения элемента. Пунктиром обозначены промежутки между плановыми ремонтами.

Данные зависимости могут быть использованы при планировании ремонтов и обосновании перехода на ремонт по фактическому состоянию. Износ или выход из строя представленных элементов может косвенно диагностироваться при мониторинге температур узлов и показателей энергоэффективности. При этом проблематично выяснить причину снижения показателя энергоэффективности без инструментального построения индикаторной диаграммы или использования средств вибродиагностики.

В качестве параметра для оценки показателей надёжности рассматривалась интенсивность отказов. Математические модели интенсивности отказов восстанавливаемых технических систем приводятся в [11]. Реализация математических моделей по интенсивности отказов для невосстанавливаемых систем рассматривается в. Данные модели важны в первую очередь для систем, где невозможно восстановление элемента без останова всей системы. Для восстанавливаемых систем подобные модели необходимо корректировать.

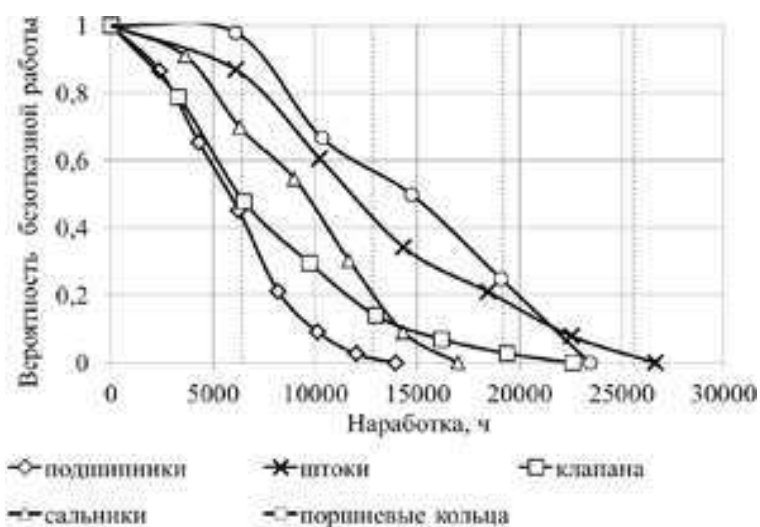


Рисунок 27 – Вероятность безотказной работы некоторых элементов поршневых компрессоров типа 5Г

Зарегистрированные отказы, приводящие к необходимости проведения ремонта, были объединены в общую выборку. Параметры выборки представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры выборки

Параметр	Значение
Минимальное значение наработки до отказа, ч	60
Максимальное значение наработки до отказа, ч	8 096
Количество учтенных отказов	136
Число интервалов	9
Размер интервала, ч	893

Отказы турбодетандеров с вероятностью в 75% происходят до планового ремонта. При значении наработки после последнего ремонта более 5500 интенсивность отказов начинает стремительно расти, что на практике означает повышение вероятности появления отказа. После отказа в большинстве случаев турбодетандер работоспособен, но дальнейшая эксплуатация может привести к увеличению количества и масштаба отказов со значительным снижением энергоэффективности. Также в этом случае может потребоваться ранее проведение капитального ремонта.

Анализ кривых рисунка 27 показывает, что при переходе на ремонт по фактическому состоянию максимальный ожидаемый межремонтный период будет составлять порядка 8000 ч., так как при такой наработке появляется необходимость ремонта, по крайней мере, одного из элементов турбодетандера.

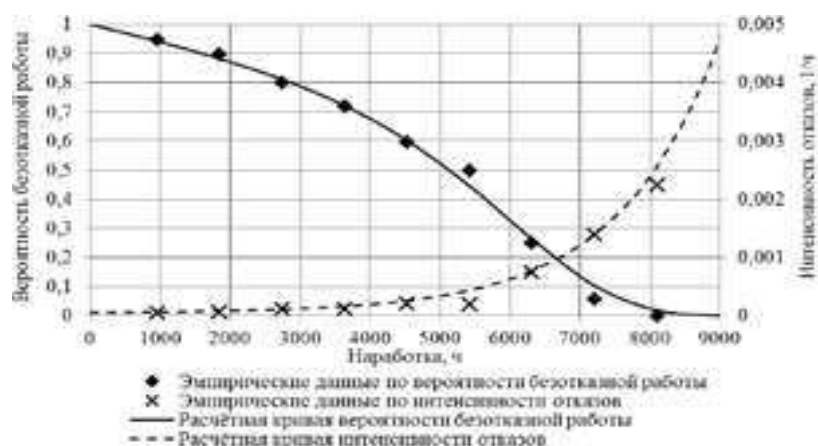


Рисунок 28 – Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов поршневых компрессоров типа 5Г

На рисунке 28 показан результат расчёта вероятности безотказной работы и интенсивности отказов для турбодетандеров (параметры выборки показаны в таблице 5).

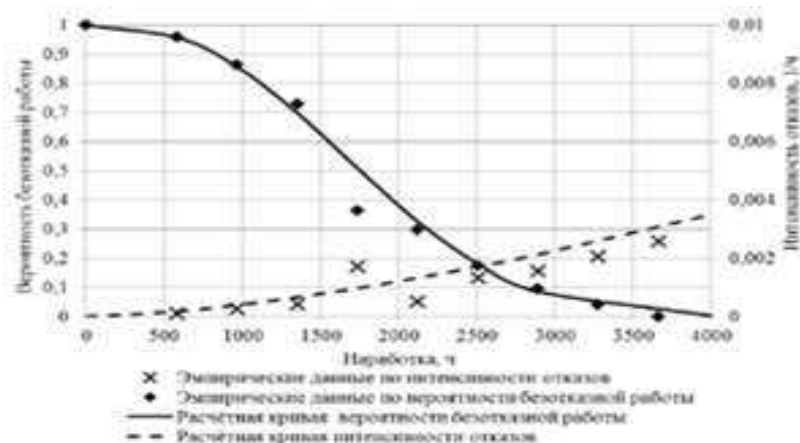


Рисунок 29 – Вероятность безотказной работы и интенсивность отказов поршневых компрессоров марки 2ГМ10- 10/20-50Б

Таблица 5 – Параметры выборки и рассматриваемых интервалов для турбодетандеров

Параметр	Значение
Минимальное значение наработки до отказа, ч	197
Максимальное значение наработки до отказа, ч	3 660
Количество учтенных отказов	74
Число интервалов	9
Размер интервала, ч	385

На основании проведенных исследований, можем сказать, что ведение мониторинга с анализом основных параметров работы турбодетандера и показателей энергоэффективности может быть принято, как основание для досрочного проведения ремонта, в то же время удовлетворительные значения параметров могут служить основанием для увеличения межремонтного периода. Увеличение межремонтного периода предлагается в первую очередь для

агрегатов с наилучшими показателями вероятности безотказной работы. Для агрегатов, выполняющих резервирующие функции, целесообразно рассмотреть варианты модернизации, включающие ротацию агрегатов.

Полученные в работе зависимости показателей надёжности могут использоваться для планирования времени проведения ремонтов поршневых агрегатов из условия минимизации затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы цель достигнута: разработан паспорт надежности для турбодетандеров криогенных установок. Описание выполненных задач разделено на три главы.

В первой главе рассмотрены общие сведения о турбодетандерах криогенных установок: а именно принцип действия, структурные схемы и описание узлов, основные положения существующей нормативной литературы, информация по заводам-изготовителям и предприятиям-разработчикам, маркировка, эксплуатационные характеристики, основные узлы. Ведущими производителями центробежных компрессоров являются НПО Гелиймаш, Криогенмаш, Кислородмаш и другие. Рассмотрена основная нормативная документация для монтажа и эксплуатации турбодетандеров криогенных установок. Также рассмотрены способы маркировки и их эксплуатационные характеристики.

Во второй главе проанализированы данные для совершенствования эксплуатационных характеристик и ремонта турбодетандеров криогенных установок, а именно причины отказов и износа. Для ремонта корпусных деталей рассмотрены основы выбора способа восстановления деталей, основы выбора оборудования и оснастки для восстановления деталей, основы необходимости и планирования ремонта, техническое обслуживание. В качестве способа восстановления деталей определены наплавка и наплавка под слоем флюса. Также проведение анализ статистического ряда наработок до отказа.

Рассчитаны режимы ремонта деталей, в том числе наплавкой и механической обработкой. Рассчитаны нормы времени выполнения операций по ремонту деталей механической обработкой, нормы расхода материала и времени выполнения операций по ремонту деталей нанесением покрытий,

режимы и параметры восстановления деталей методом электрохимического нанесения покрытий, а также рассмотрено применение термообработки для повышения износостойкости турбодетандеров криогенных установок при ремонте.

Турбодетандеры чрезвычайно просты в эксплуатации и нуждаются в минимальном обслуживании. При медленном охлаждении во время пуска, правильном режиме, предотвращающем высаживание в проточной части льда и углекислоты, а также заброса сжиженного газа, неполадки в работе турбодетандера, а тем более повреждение его деталей, как это подтверждено практикой — явление редкое

Полученные в работе зависимости показателей надёжности могут использоваться для планирования времени проведения ремонтов поршневых агрегатов из условия минимизации затрат.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Меркурьев А.Н. Справочник по ремонту деталей машин: В 4-х т. – 8-е изд., перераб. и доп./ под ред. О.Т. Курочкиным – М.: Машиностроение, 2001 г.

2 Березовский Ю.Н. и др. Детали машин: Учебник для машиностроительных техникумов /Ю.Н. Березовский, Д.В. Чернилевский, М.С. Петров; Под ред. Н.А. Бородина. – М.: Машиностроение, 1983. – 384 с., ил.

3 Козулин Н.А., Соколов В.Н., Шапиро А.Я. Примеры и решение задач по курсу оборудования заводов – Л.: Ленингр. отд-ние изд. Машиностроение, 1965 – 492 с.

4 Михайлюк Т.Р. Конструкция и основы проектирования машин. Учебное пособие для техникумов. – М., Машиностроение, 1976.– 376 с.

5 Методические указания к курсовой работе "Расчет криогенных установок". – Новосибирск, НГТУ, 2011. – 89 с.

6 Электропривод: Учебное пособие. / сост. А. И. Мамонтов, М. В. Кришьянис. – Архангельск: С(А)ФУ, 2015 – 303 с.

7 Neftegaz [Электронный ресурс] сайт производителя // Технический каталог – Режим доступа: <https://neftegaz.ru>

8 КРИОГЕН [Электронный ресурс] сайт производителя // Технические характеристики турбодетандеров криогенных установок – Режим доступа: <https://www.cryogenmash.com/ru/>

9 Турбодетандеры криогенных установок указания [Электронный ресурс] сайт производителя // Технические характеристики – Режим доступа: <https://tyajprommash.ru>

10 Ремонтный цикл турбодетандеров криогенных установок [Электронный ресурс] сайт производителя // Структура ремонтных циклов –

Режим доступа: <https://www.docs.cntd/document/1200082157>

11 ДАЛГАКИРАН [Электронный ресурс] сайт производителя // Нарботка до отказа турбодетандеров криогенных установок – Режим доступа: <https://ihi.dalgakiran.ru>

12 Андреев Г. Н. Эксплуатация и ремонт турбодетандеров криогенных установок на предприятиях: учебное пособие / А. Н. Андреев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 186 с.

13 ГОСТ Р 53122-2011 Нефтяная и газовая промышленность. Турбодетандеры и турбодетандерные агрегаты. Общие технические требования – Введ. 01.01.1987 М: Москва Стандартиформ, 2005. – 722 с.

14 ГОСТ Р 55141-2012 Малогабаритные блочные газоперерабатывающие комплексы. Общие технические требования – Введ. 01.01.1987 М: Москва Стандартиформ, 2011. – 13 с.

15 ГОСТ Р 26-04-2153-77 Система стандартов безопасности труда. Оборудование криогенное. Общие требования безопасности к конструкции – Введ. 23.01.2001 М: Москва Стандартиформ, 2001. – 98 с.

16 ГОСТ Р 15150-69 Система стандартов безопасности труда. Оборудование криогенное. Определение шумовых характеристик – Введ. 12.11.2003 М: Москва Стандартиформ, 2003. – 44 с.

17 Пат. RU 2205277 С2 Российская Федерация, Высокоскоростная турбина, Малышев А. Н. – М: Москва, 1998, с. 12, 13.

18 Пат. RU 2206755 С1 Российская Федерация, Высокоскоростная турбомашина. Ремонт, Чанчиков А. А. – М: Москва, 2001, с. 63.

19 Пат. RU 2001109465 А Российская Федерация, Бескорпусная высокоскоростная турбомашина, Лалетин А. Т. – М: Недра, 1992, с 27.

20 Пат. RU 126437 U1 Российская Федерация, Система турбогенератор,

Курочкин Р. О. – М: Москва, 1992, с 23.

21 Пат. RU 2027957 C1 Российская Федерация, Турбодетандер высокого давления, Дроздов П. А. – М: Москва, 2011, с 93.

22 Пат. RU 2522132 C2 Российская Федерация, Способ разделения воздуха, Мищюк О. С. – М: Москва, 2001, с 54.

23 Пат. RU 2743402 C2 Российская Федерация, Комплексный способ и установка для разделения воздуха посредством криогенной дистилляции и охлаждения газа, Мальцев А. А. – М: Москва, 1998, с 11.

24 Пат. RU 126437 U1 Российская Федерация, Система теплогенератор-турбодетандер, Харитонов А. П. – М: Москва, 1976, с 33.

25 Методические указания к курсовой работе «Ремонт турбодетандеров криогенных установок» - Новочеркасск, НГТУ, 2012 – 13 с.

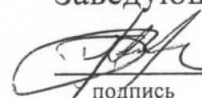
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт нефти и газа

Кафедра технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 Э. А. Петровский
подпись

«21» июля 2021

БАКАЛАВАРСКАЯ РАБОТА

Направление 21.03.01 «Нефтегазовое дело»

профиль 21.03.01.07 «Эксплуатация и обслуживание технологических объектов
нефтегазового производства»

«Разработка паспорта надежности для турбодетандеров

криогенных установок»


Руководитель


подпись, дата

К. Т. К. доцент
должность, ученая степень

В. Г. Жуков
инициалы, фамилия

Выпускник


подпись, дата

Х. Г. Гурбанов
инициалы, фамилия

Красноярск 2021