

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

Школа Инженерная школа природных ресурсов
Направление подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело
Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Повышение эффективности работы газоперекачивающего агрегата путем увеличения мощности двигателя силовой установки

УДК **622.691.5:66.078-048.35**

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4Е5А	Тельцов Андрей Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Зиякаев Г.Р.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

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

Томск – 2020 г

Кодрезультата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>в области проектной деятельности</i>		
Р6	Эффективно использовать любой имеющийся арсенал технических средств для максимального приближения к поставленным производственным целям при <i>разработке и реализации проектов</i> , проводить <i>экономический анализ затрат, маркетинговые исследования, рассчитывать экономическую эффективность</i>	УК-2, ОПК-1, ОПК-2, ОПК-7, ПК-19, ПК20, ПК- 21, ПК-22
<i>в области организационно-управленческой деятельности</i>		
Р7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и оперативные планы всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, готовность нести ответственность за результаты работы	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-23, ПК-24, ПК-25, ПК-26).
<i>в области проектной деятельности</i>		
Р8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности; активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности	УК-2, ОПК-3, ОПК-5, ОПК-6, ПК-27, ПК-28, ПК- 29, ПК-30, (АВЕТ-3с), (ЕАС-4.2-е).
Профиль «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»		
Р9	Планировать и организовывать работу по проведению планово-предупредительных ремонтов и технического обслуживания технологического оборудования	ОПК-5, ОПК-6, ПК-3, ПК-7, ПК-9, ПК-11, ПК- 13, ПК-14, ПК-21, требования профессионального стандарта 19.003 "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования", 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»
	Планировать внедрение новой техники и передовых технологий, разрабатывать и реализовывать программы модернизации и технического перевооружения предприятия с целью повышения надежности, долговечности и эффективности работы технологического оборудования	ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-10, ПК-12, ПК-17, ПК-21, ПК-23, требования профессионального стандарта 19.003 "Специалист по

P10		<p><i>ремонт и обслуживанию нефтезаводского оборудования», 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»</i></p>
-----	--	---

P11	<p>Организовывать проведение проверок технического состояния и экспертизы промышленной безопасности, проводить оценку эксплуатационной надежности технологического оборудования.</p>	<p><i>ОПК-1, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-9, ПК-10, ПК-17, ПК-30, требования профессионального стандарта 19.003 «Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования», 19.029 «Специалист по эксплуатации газораспределительных станций», 19.0015 «Специалист по эксплуатации оборудования подземных хранилищ газа»</i></p>
-----	--	--

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

Школа Инженерная школа природных ресурсов
Направление подготовки 21.03.01 Нефтегазовое дело
Отделение школы (НОЦ) Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студенту:

Группа	ФИО
3-4Е5А	Тельцову Андрею Владимировичу

Тема работы:

Повышение эффективности работы газоперекачивающего агрегата путем увеличения мощности двигателя силовой установки	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. Д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. Д.).</i></p>	<p>Объект исследования: газотурбинный двигатель НК-16СТ. Мощность 16МВт, режим работы: непрерывный, вид сырья: природный газ.</p>
---	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений науки и техники в рассматриваемой области. 2. Расчет газотурбинного двигателя с целью изучения зависимостей существующих параметров, а также изучение их влияния на работу двигателя. 3. Финансовый менеджмент. 4. Социальная ответственность. 5. Выводы по работе.
Перечень графического материала	Конструкция газотурбинного двигателя «НК-16СТ», общий вид существующих газотурбинных двигателей, кинематическая схема, презентация.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережения	
Социальная ответственность	Черемискина М.С..., ассистент

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Зиякаев Г.Р.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4E5A	Тельцов Андрей Владимирович		

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-4Е5А	Тельцов Андрей Владимирович

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	21.03.01 Нефтегазовое дело

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Оклады участников проекта, нормы рабочего времени, районный коэффициент по г. Томску
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	1. – потенциальные потребители результатов 2. исследования; 3. – анализ конкурентных технических решений.
2. Разработка устава научно-технического проекта	1. – цели и результаты исследования; 2. – участники проекта.
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	1. – структура работ в рамках научно-технического проекта; 2. – определение трудоемкости выполнения работ; 3. – составление графика проведения научно-технического проекта; 4. – определение бюджета научно-технического проекта.
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	1. – оценка эффективности проекта.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. График проведения НТИ

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Трубченко Татьяна Григорьевна	к.э.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4Е5А	Тельцов Андрей Владимирович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
3-4Е5А	Тельцов Андрей Владимирович

Школа	ИШПР	Отделение (НОЦ)	ОНД
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	21.03.01 Нефтегазовое дело

Тема ВКР:

Повышение эффективности работы газоперекачивающего агрегата путем увеличения мощности двигателя силовой установки	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является газотурбинный двигатель Д-30ЭУ, который является приводом для газоперекачивающего агрегата ГПА Урал 6. Данный агрегат предназначен для сжатия газа до определенного давления, чтобы обеспечить низкотемпературную сепарацию и дальнейшую его транспортировку в магистральный газопровод. Рабочая зона – Мыльджинское нефтегазоконденсатное месторождение, дожимная компрессорная станция.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 №116-ФЗ ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. СанПиН 2.2.1//2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. ФЗ от 28 декабря 2013 г. №426-ФЗ «О специальной оценке условий труда»
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные факторы: 1. Недостаточная освещённость рабочей зоны; 2. Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе;

	<p>3. Повышенная загазованность воздуха рабочей среды. Опасные факторы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Пожаровзрывоопасность. 2. Статическое электричество. 3. Электрическая дуга металлические искры при сварке 3. Движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования.
3. Экологическая безопасность:	<p>При проведение ремонтных работ на газотурбинном двигателе будет оказываться негативное воздействие, в основном, на:</p> <ul style="list-style-type: none"> - атмосферу: выбросы газа; - гидросферу: разлив масла; - литосферу: утилизация отработанного масла.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<p>Возможные ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> - пожар - взрыв <p>Типичная ЧС:</p> <ul style="list-style-type: none"> - загазованность

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-4E5A	Тельцов Андрей Владимирович		

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

Инженерная школа Природных ресурсов
Отделение Нефтегазового дела
Направление подготовки Нефтегазовое дело
Профиль подготовки Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов
Уровень образования бакалавр
Период выполнения (осенний/весенний семестр 2019/2020 учебного года)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	<i>Объект и методы исследования. Разработка модели.</i>	
	<i>Выполнение расчетной части работы.</i>	
	<i>Устранение недочетов в работе.</i>	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОНД	Зиякаев Г.Р.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

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

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.

ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования.

ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства и методы защиты от шума. Общие требования.

ГОСТ 12.0.004-90. Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения.

СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.

СанПиН 2.2.2776-10. Гигиенические требования к оценке условий труда при расследовании случаев профессиональных заболеваний.

СанПиН 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.

СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.

СанПиН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

СанПиН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.

ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.

Список сокращений

ГГ - газогенератор;

ГТ - газовая турбина;

ГДС - газодинамическая сила;

ГПА - газоперекачивающий агрегат;
ГТД - газотурбинный двигатель;
ГТУ - газотурбинная установка;
КВД - компрессор высокого давления;
КС - камера сгорания;
К- компрессор;
КНД – компрессор низкого давления;
КПД - коэффициент полезного действия;
НА - направляющий аппарат;
ОК - осевой компрессор;
РЛ - рабочие лопатки;
СА - сопловой аппарат;
ССТ- свободная силовая турбина;
Т- турбина;
ТВД - турбина высокого давления;
ТНД - турбина низкого давления;
ЦБС - центробежная сила.

Определения

В настоящей работе применены следующие термины с соответствующими определениями.

Нагнетатель – компрессор, предназначенный для сжатия газа (воздуха)

Газотурбинная установка (ГТУ) — энергетическая установка: конструктивно объединённая совокупность газовой турбины, электрического генератора, газоздушного тракта, системы управления и вспомогательных устройств (пусковое устройство, компрессор, теплообменный аппарат или котёл-утилизатор для подогрева сетевой воды для промышленного снабжения).

Газотурбинный двигатель (ГТД) — это воздушный двигатель, в котором воздух сжимается нагнетателем перед сжиганием в нём топлива, а

нагнетатель приводится газовой турбиной, использующей энергию нагретых таким образом газов.

Камера сгорания — объём, образованный совокупностью деталей двигателя или печи (в последнем случае камера сгорания называется топкой) в котором происходит сжигание горючей смеси или твёрдого топлива.

ГПА (ГПА) — устройство, предназначенное для сжатия природного газа на компрессорных станциях газопроводов и подземных хранилищ.

Лопатка (лопасть) — деталь лопаточных машин, предназначенная для изменения в них параметров газа или жидкости.

Турбина высокого давления — ступень (ступени) турбины двухвального (трёхзального) ГТД, механически связанная с компрессором высокого давления.

Турбина низкого давления — ступень (ступени) турбины двухвального (трёхзального) ГТД, механически связанная с компрессором низкого давления.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 111с., 20 рис., 23таблицы, 3 приложения, 3источник.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, установка, компрессор, газоперекачивающий агрегат, нагнетатель газ, камера сгорания, выхлопные газы, турбина высокого давления.

Объект исследования: газотурбинный двигатель, входной тракт, воздухоочистительное устройство, двигатель.

*Цель работы:*повышение эффективности работы газоперекачивающего агрегата путем увеличения мощности двигателя силовой установки

Для реализации поставленной цели необходимо выполнить следующие *задачи:*

- изучение современного парка конвертируемых газотурбинных двигателей;
- тепловой расчет ГТУ при номинальном переменном режиме работы;
- определение закономерности мощностных потерь, по результатам расчета переменного режима работы;
- предложение технического решения, позволяющего повысить полезную мощность и производительность ГТУ в условиях высоких температур.

В процессе исследования проводились: обзор литературы, анализ расчетов и их выполнение. Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: давление, подача, расход, температура, частота вращения.

Область применения: добыча, компримирование и транспортировка газа, нефтехимия, электроустановки, холодильные системы.

Экономическая эффективность заключается в подробном проведении расчетов, которые могут использоваться для выявления параметров, которые могут быть оптимизированы и подобраны экономически выгодно. В будущем планируется трехмерное моделирование узлов газотурбинного двигателя и проведение расчетов на прочность.

Оглавление

Введение	16
1. Обзор литературы.....	18
1.1. Анализ применения современного парка газотурбинных установок в составе газоперекачивающих агрегатов	18
1.2. Преимущества применения конвертированных авиационных ГТД в качестве привода ГПА	20
1.3. Обзор газотурбинных установок, построенных на основе отечественных авиационных газотурбинных двигателей	22
1.3.1. Наземные газотурбинные установки на основе авиационного двигателя Д-30	25
1.3.2. Наземные газотурбинные установки на основе авиационного двигателя ПС-90А.....	27
1.3.3. Наземная газотурбинная установка на основе авиационного двигателя АЛ-31Ф	31
1.3.4. Наземные газотурбинные установки семейства «НК»	31
2. Объект и методы исследования	37
2.1. Двигатель НК-16СТ в составе компрессорной станции (КС)	39
2.2 Кинематическая схема НК-16-СТ	40
2.3. Принцип работы двигателя в составе газоконпрессорной станции.....	41
3. Расчетная часть.....	42
3.1 Уточненный расчет тепловой схемы на номинальный режим	42
3.2. Расчет баланса мощностей, расходов и теплоперепадов	54
3.3 Расчет климатических характеристик и переменных режимов работы ГТУ 57	
4. Социальная ответственность	69
4.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	70
4.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства	70
4.1.2.Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	71
4.2. Производственная безопасность	72
4.2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов	73
4.3. Экологическая безопасность	78
	14

4.2. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	80
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ..	83
5.1. Предпроектный анализ	83
5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	83
5.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	85
5.2. Планирование научно-исследовательских работ	90
5.2.1. Структура работ в рамках научного исследования.....	90
5.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ	91
5.2.3. Разработка графика проведения научного исследования	92
5.3. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	100
5.4. Определение ресурсоэффективности проекта.....	101
Заключение	105
Список используемых источников.....	106

Введение

Газоперекачивающие агрегаты (на базе авиационных двигателей) широко применяются на компрессорных станциях магистральных трубопроводов, дожимных компрессорных станциях и компрессорных подземных хранилищах.

В 1971 году НК-12СТ стал первым конвертированным ГТД авиационного типа. Его мощность составляла 6,3 МВт, а КПД 26,1%. На сегодняшний день двигатель эксплуатируется в составе более чем 850 ГПА.

Следующими в качестве двигателей для ГПА были внедрены двигатели НК-16СТ, с более высокими показателями мощности – 1 МВт; и КПД – 29%. Эти двигатели были созданы на базе авиадвигателя НК-8-2У, устанавливаемого на самолетах Ил-62, Ту-154. В 1979 г. была начата разработка двигателя для ГПА-Ц-16. И ГПА, и двигатель были созданы в очень короткие сроки в связи с введением США эмбарго на поставку аналогичного оборудования. Руководство «Минавиапрома» подключило к производству двигателя НК-16СТ пять крупных заводов, и серийная поставка двигателей была начата в 1982 году, хотя изначально планировалось ввести двигатели в эксплуатацию только в 1984 году. Двигатель НК-16СТ в составе более чем 500 ГПА-Ц-16 эксплуатируется на 118 компрессорных станциях.

В настоящее время ГПА-Ц-6,3 и ГПА-Ц-16 с двигателями НК-12СТ и НК-16СТ составляют 34,2% от всей установленной мощности газотурбинных приводов магистральных газопроводов стран СНГ.

Работа отечественных предприятий по многостороннему использованию двигателей поддерживается ПАО «Газпром». Опыт эксплуатации двигателей НК-12СТ и НК-16СТ стал основой для разработки «ВНИИгазом» и «Мингазпромом» новой концепции создания конвертированных двигателей. Также следующие основные положения конвертирования авиационных двигателей для народного хозяйства были

сформулированы при проектировании и эксплуатации двигателя НК-16СТ в составе ГПА-Ц-16:

- термодинамические и газодинамические параметры, являющиеся основополагающей в теории и практике создания авиадвигателей;
- качество изготовления достигается благодаря высокому уровню технологий производства ГТД;
- относительно малые габариты и масса двигателя соответствует надежности, мощности благодаря высокому уровню конструирования;
- высокая мобильность, быстрота монтажа, автоматизированный и быстрый пуск двигателя, а также взаимозаменяемость деталей для необходимого назначения двигателя, например: транспорт нефти и газа, судовые приводы;
- минимальное количество времени на подготовку и запуск двигателя при различных условиях окружающей среды;
- рациональное использование металла благодаря конкурентоспособному уровню технологии производства и в то же время высокое качество деталей, обеспечивающие высокую надежность.

Возрастающие с каждым годом требования ПАО «Газпром» к технологическим, экономическим и экологическим характеристикам ГТД для ГПА привели к необходимости усовершенствования ранее разработанных двигателей. Повышение экономичности главным образом возможно достичь повышением начальных термодинамических параметров цикла, что и послужит объектом исследования в данном дипломном проекте.

1. Обзор литературы

1.1. Анализ применения современного парка газотурбинных установок в составе газоперекачивающих агрегатов

Основными элементами компрессорных станций являются газоперекачивающие агрегаты (ГПА). ГПА состоят из нагнетателя природного газа, привода нагнетателя, всасывающего и выхлопного устройств, систем автоматики, маслосистемы, топливовоздушных и масляных коммуникаций и вспомогательного оборудования.

По виду привода нагнетателя их можно разделить на три группы:

ГПА с приводом нагнетателя от газотурбинной установки (ГТУ), ГПА с электрическим приводом и ГПА приводом от поршневых двигателей внутреннего сгорания. Распределение парка ГПА по виду привода нагнетателя приведён на рисунке 1.



Рисунок 1 – распределение парка ГПА по виду привода нагнетателя

Как видно из рис.1.1 в структуре парка газоперекачивающих агрегатов основным видом привода является ГТУ, которые подразделяются на:

- 1) стационарные – ГТУ, спроектированные для применения на компрессорных станциях или на тепловых электрических станциях;

2) авиационные – газотурбинные двигатели (ГТД) самолётов и вертолётот, подвергнутые конвертации в наземную установку;

3) судовые – газотурбинные силовые установки судов, специально реконструированные для наземного применения.

Распределение парка ГПА по типу ГТУ приведён на рисунке 2.

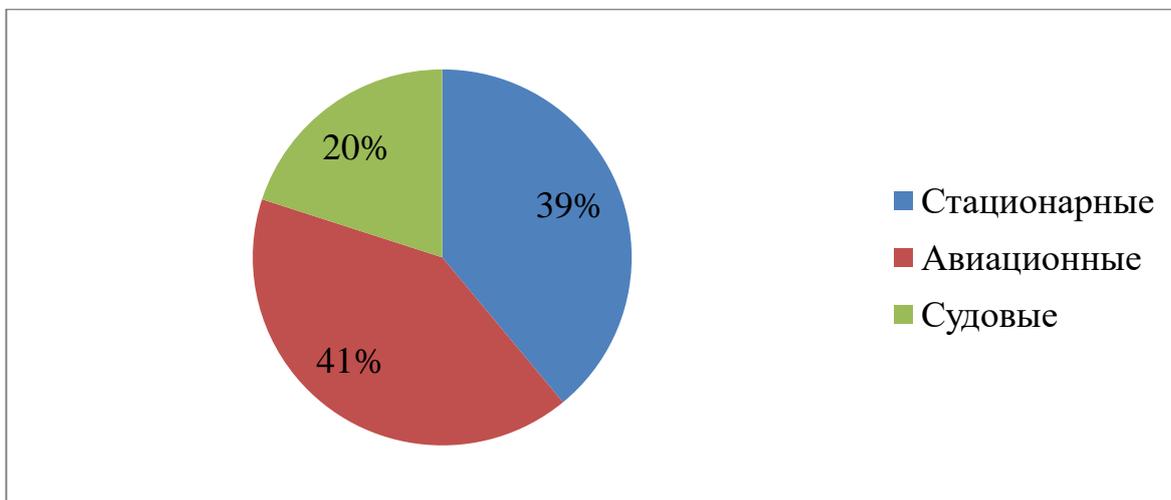


Рисунок 2 – распределение парка ГПА по типу ГТУ

Причинами, обусловившими преимущественный спрос на газотурбинные двигатели, являются:

1. Фактическое наличие широкого ассортимента ГТУ авиационного типа и заводов-изготовителей двигателей.

2. Возможность использования ГТУ авиационного типа, выработавших лётный ресурс в 3000 часов, для нужд народного хозяйства с продлением ресурса до 100 тыс. часов.

3. Возможность регулирования степени сжатия и производительности газотурбинного двигателя путём изменения числа оборотов, в отличие от электродвигателя, что даёт дополнительные возможности управления гидравлическим режимом газопровода.

Развитие газотранспортной системы, обусловленной созданием современных транспортных мощностей для транспортировки газа из новых регионов добычи. Расширение настоящих газотранспортных коридоров

требует увеличения количества газотурбинных установок. Возможно два пути решения данной задачи:

1. Разработка и производство новых газотурбинных двигателей наземного назначения.

2. Конвертирование и использование судовых и авиационных ГТД.

Очевидно, что с точки зрения экономики, второй путь более перспективен. Стоимость конвертирования существующего двигателя получается в разы ниже разработки нового.

Крупнейшим поставщиком судовых ГТД для применения на газопроводах России является ГП НПКГ «Зоря» — «Машпроект», расположенный в городе Николаев, Украина. Установки мощностью 10 МВт (типа ГПУ-10"Волна") и 16 МВт (ГПУ-16), разработанные этим предприятием, зарекомендовали себя высокой надёжностью и ресурсом. Главным недостатком их использования является необходимость в случае ремонта везти их на завод в г. Кривой Рог, что приводит к большим транспортным расходам. Поэтому целесообразнее применение конвертированных авиационных ГТД.

1.2. Преимущества применения конвертированных авиационных ГТД в качестве привода ГПА

Сравнивая ГТД авиационного типа со стационарными промышленными ГТ, можно выделить следующие значимые преимущества первых:

- более высокие значения КПД двигателей авиационного типа, лежащие в пределах 37-44%, против 26-35% у стационарных;

- газовые турбины авиационного типа занимают на 50% меньше места, и они легче на 40% стационарных промышленных турбин равной мощности;

– более дешёвое обслуживание двигателей, в которых используются детали и узлы, ранее отработавшие свой ресурс в авиации, вследствие чего их эксплуатация дешевле;

– автоматизация и простота обслуживания позволяет иметь минимум рабочего персонала для эксплуатации и регулировки и контроля процессов на промышленном объекте. Рабочие, эксплуатирующие ГТД, имеют возможность обслуживать оборудование вахтовым методом;

– сравнительно низкая стоимость, относительно сжатые сроки и низкие затраты при создании и доводке;

– более быстрый холодный запуск авиационных двигателей. Запуск стационарного ГТД требует мощный воздушный или газовый стартер для раскрутки основного ротора, а в то время как для запуска авиадвигателя требуется стартер относительно слабее (около 500-600 кВт). Выход на полную мощность требует длительного времени в целях сохранения ресурса частей и механизмов, в то время как на авиадвигателе время выхода на режим до 10 минут;

– время выхода на необходимую мощность из режима ожидания от 2-х минут (у двигателя авиационного исполнения), а у стационарного ГТД 20 минут;

– останов достигается за 5-15 минут у авиационного двигателя, а у стационарного до 60 минут;

– готовность к обслуживанию авиационного двигателя достигается за минимальное время (менее одного часа) после останова, в то время как стационарные двигатели охлаждаются в течение 10-24 часов. Причиной является большая масса;

- в случае несрабатывания какой-либо системы в стационарной турбине необходим полный её рестарт, который достигается за 20-30 минут из-за работы полного алгоритма всех систем, в частности системы охлаждения. В то время как авиационный двигатель перезапускается моментально.

1.3. Обзор газотурбинных установок, построенных на основе отечественных авиационных газотурбинных двигателей

Общие сведения о газотурбинных двигателях

Объем мирового производства ГТД, в общем, на сегодняшний день по стоимости распределяются таким образом: авиационного типа составляют приблизительно 70%, морского и стационарного около 30%.

Объем производства стационарных и морских двигателей классифицируется:

- газотурбинные двигатели для энергетики ~ 91 %;
- ГТД для привода промышленно оборудования, и наземных транспортных средств ~ 5 %;
- двигатели для морских условий ~ 4 %.



Рисунок 3 – объекты применения газотурбинных двигателей

Газотурбинные двигатели на сегодняшний день продолжают вытеснять поршневые двигатели не только в гражданской, но и в военной промышленности и авиации. Единицы военной и гражданской техники существуют на данный момент в производстве с поршневым двигателем.

Применение ГТУ во всевозможных отраслях стало доступной из-за энергоотдаче, надежности, компактности, взаимозаменяемости и быстрозаменяемости отдельных узлов и блоков по сравнению с другими типами силовых установок.

Высокие удельные параметры ГТД достигаются благодаря конструктивным особенностям и непрерывному термодинамическому циклу.

Цикл ГТД состоит из тех же основных процессов, что и цикл поршневых двигателей внутреннего сгорания, но имеет существенное отличие. В поршневых двигателях процессы происходят последовательно, один за другим, в одном и том же элементе двигателя - цилиндре. В ГТД эти же процессы происходят одновременно и непрерывно в различных элементах двигателя. Благодаря этому в ГТД нет такой неравномерности условий работы элементов двигателя, как в поршневом, а средняя скорость и массовый расход рабочего тела в 50...100 раз выше, чем в поршневых двигателях. Это позволяет сосредоточить в малогабаритных ГТД большие мощности.

Классификация ГТД по способу создания тягового усилия

Авиационные ГТД по способу создания тягового усилия относятся к классу реактивных двигателей.

Среди реактивных двигателей можно выделить две основные группы. Первую группу составляют ракетные двигатели. Они создают тяговое усилие за счет ускорения рабочего тела, запасённого на борту летательного аппарата (ЛА). В настоящее время наибольшее распространение получили жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) и ракетные двигатели твёрдого топлива (РДТТ). Первые из них используют двухкомпонентное жидкое топливо - размещённые в разных ёмкостях горючее и окислитель. А вторые - твёрдое топливо, которое содержит горючие и окисляющие компоненты и целиком размещается в камере сгорания.

Ко второй группе относятся воздушно-реактивные двигатели (ВРД),

для которых атмосферный воздух является основным компонентом рабочего тела, а кислород воздуха используется как окислитель. Задействование воздушной среды позволяет значительно сократить запас рабочего тела на борту ЛА, повысить экономичность и дальность полёта. В свою очередь, ВРД подразделяются на две основные подгруппы.

Ракетные двигатели применяются в основном в ракетах различного назначения и могут использоваться для полётов в безвоздушном пространстве (в космосе), так как для создания силы тяги им не требуется окружающая среда.

1. Бескомпрессорные ВРД, включающие прямоточные (ПВРД) и пульсирующие (ПуВРД) двигатели. В прямоточных ВРД воздух сжимается за счет скоростного напора. Двигатели могут применяться для сверхзвуковых скоростей полёта и гиперзвуковых скоростей. Однако прямоточные ВРД не имеют стартовой тяги. Этот органический недостаток ПВРД можно исправить переходом к пульсирующему процессу подачи воздуха и сжиганию топлива при постоянном объёме. Такой процесс реализован в ПуВРД. В них сжатие воздуха происходит без использования скоростного напора и компрессора. ПуВРД использовались в Германии в конце Второй мировой войны на крылатых ракетах «V-1», но дальнейшего развития не получили. В последнее время интерес к пульсирующим ВРД возобновился. Активно изучаются так называемые импульсные детонационные двигатели, в которых тяга дискретно создаётся за счёт ударных волн, образующихся в результате детонационного (взрывного) сгорания топлива в камере сгорания.

2. Газотурбинные ВРД, получившие своё название из-за наличия турбокомпрессорного агрегата, имеющего в своём составе газовую турбину как основной источник механической энергии.

ВРД отдельных типов могут быть конструктивно объединены друг с другом или с ракетными двигателями в единой двигательной установке. Такие комбинированные двигатели совмещают в себе положительные

качества исходных двигателей. Например, в турбопрямоточном двигателе сочетаются возможность самостоятельного старта ТРД и работоспособность при высоких сверхзвуковых скоростях полёта. Группа комбинированных двигателей может включать большое число схем и вариантов, наиболее характерные - турбопрямоточный, ракетно-прямоточный, ракетно-турбинный.

Реактивные двигатели, в которых вся полезная работа цикла затрачивается на ускорение рабочего тела, называются двигателями прямой реакции. К ним относятся ракетные двигатели всех типов, комбинированные двигатели, прямоточные и пульсирующие ВРД, а из группы ГТД - турбореактивные двигатели (ТРД) и двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД). Если же основная часть полезной работы цикла в виде механической работы на валу двигателя передаётся специальному движителю, например воздушному винту, то такой двигатель называется двигателем непрямой реакции. Примерами двигателей непрямой реакции являются турбовинтовой двигатель (ТВД) и вертолётный ГТД. Классическим примером двигателя непрямой реакции может служить также поршневая винтомоторная установка. Качественного отличия по способу создания тягового усилия между ней и турбовинтовым двигателем нет.

Применение ГТД в военной и гражданской авиации, начавшееся после Второй мировой войны, позволило совершить качественный скачок в развитии авиации: освоить большие высоты полёта и сверхзвуковые скорости, значительно повысить грузоподъёмность и дальность.

1.3.1. Наземные газотурбинные установки на основе авиационного двигателя Д-30

а) ГТУ-4ПГ

Газотурбинная установка «ГТУ-4ПГ» номинальной мощностью 4 МВт применяемая с мультипликатором «М-45ПХГ» используется для привода центробежных компрессоров природного газа в «ГПА-4ПХГ» Производство

установки заводом "Урал", которая используется для подземных хранилищ газа (ПХГ).

Погодные условия эксплуатации могут быть неблагоприятные, в которых установка сохраняет свои мощностные характеристики.

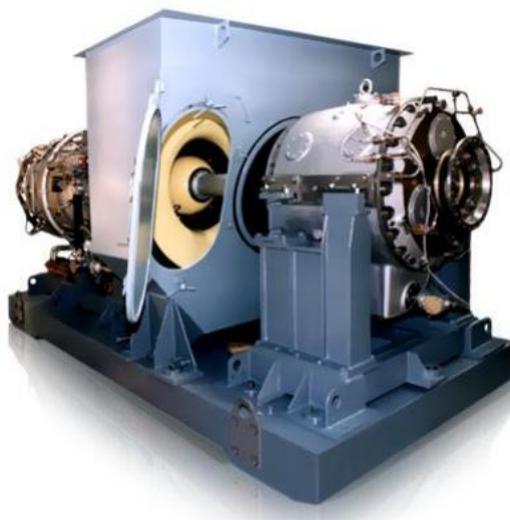


Рисунок 4 – общий вид ГТУ-4ПГ

Разработчик ГТУ - ОАО «Авиадвигатель».

Серийный производитель - АО "ОДК-Пермские моторы".

Основа установки - газотурбинный двигатель Д-30ЭУ-2, разработанный ОАО "Авиадвигатель" на базе авиационного двигателя Д-30 III серии.

Согласование частоты вращения ротора силовой турбины двигателя (7014 об/мин) с номинальной частотой вращения вала для привода нагнетателя (14000 об/мин) производится при помощи мультипликатора М-45ПХГ. Мультипликатор М-45ПХГ позволяет оптимизировать характеристики газоперекачивающего агрегата.

б) ГТУ-6ПГ

Модифицированная газотурбинная установка ГТУ-6ПГ номинальной мощностью 6 МВт с мультипликатором М-60 создана для привода центробежного компрессора газоперекачивающих агрегатов.



Рисунок 5 – общий вид ГТУ-6ПГ

Разработчик ГТУ - ОАО «Авиадвигатель».

Серийный производитель - АО "ОДК-Пермские моторы".

Головная газотурбинная установка смонтирована в 2006 году на МНГКМ «Мыльджинское» ОАО "Томскгазпром". Ведётся опытно-промышленная эксплуатация установки в составе ГПА-6ДКС «Урал».

ГТУ-6ПГ также используются в составе газотурбинного насосного агрегата ГТНА "Урал-6000" поставленного в рамках проекта "Сахалин-2" на ДНКС-2.

Наработка ГТУ-6ПГ составила 13 700 часов без ремонта.

Основные параметры данной установки представлены в табл.1.1.

1.3.2. Наземные газотурбинные установки на основе авиационного двигателя ПС-90А

а) ГТУ-12П

Газотурбинная установка ГТУ-12П предназначена для эксплуатации в составе газоперекачивающих агрегатов нового поколения ГПА-12 «Урал», а также при реконструкции существующего газоперекачивающего оборудования.



Рисунок 6 – общий вид ГТУ-12П

Разработка – ОАО «Авиадвигатель»

Серийное производство – ОАО «Пермский моторный завод».

Газотурбинная установка ГТУ-12П создана на базе газогенератора авиационного двигателя ПС-90А, применяющегося в составе силовой установки лучших современных отечественных пассажирских самолётов Ил-96, Ту-204, Ту-214.

ГТУ-12П – первая газотурбинная установка, разработанная ОАО «Авиадвигатель» по заказу ОАО «Газпром» для газовой промышленности. Серийный выпуск ведётся с 1995 года.

б) ГТУ-10П

Газотурбинная установка ГТУ-10П создана на базе газотурбинной установки ГТУ-12П. Применяется в составе блочно-комплектных газоперекачивающих агрегатов на дожимных компрессорных станциях и станциях подземного хранения газа ГПА-10 ДКС «Урал» и ГПА-10 ПХГ «Урал» производства ОАО «НПО «Искра», а также при реконструкции существующих агрегатов ГПА-Ц-6,3 и других. Отличительной особенностью конструкции ГТУ является высокооборотная силовая турбина, обеспечивающая высокую эффективность нагнетателя и унифицированный с ГТУ-12П газогенератор. Унаследовала все преимущества газотурбинной установки ГТУ-12П.

Разработчик - ОАО «Авиадвигатель».

Серийный производитель - АО "ОДК-Пермские моторы".



Рисунок 7 – общий вид ГТУ-10П

в) ГТУ-16П

Газотурбинная установка ГТУ-16П создана на базе газогенератора высокоэффективного авиадвигателя ПС-90А и газотурбинной установки ГТУ- 12П. Обладает более высокими параметрами цикла (применён 14 ступенчатый компрессор) и имеет силовую турбину, адаптированную по параметрам для существующих ГПА. Применяется в составе блочно-комплектного газоперекачивающего агрегата ГПА-16 «Урал» производства ОАО «НПО «Искра» и при реконструкции существующих газоперекачивающих агрегатов ГТК-10, ГПА-Ц-16, ГПУ-16, ГПУ-10 и других.

Газотурбинная установка ГТУ-16П отлично зарекомендовала себя в процессе эксплуатации на газоперекачивающих станциях России.

Унифицирована и полностью взаимозаменяема с газотурбинной установкой ГТУ-12П, обладает всеми её преимуществами и достоинствами. Разработчик - ОАО «Авиадвигатель».

Серийный производитель - АО "ОДК-Пермские моторы".



Рисунок 8 –общий вид ГТУ-16П

г) ГТУ-25П

Самая мощная среди пермских установок 25-мегаватная газотурбинная установка ГТУ-25П предназначена для привода газовых компрессоров в составе газоперекачивающих агрегатов нового поколения и модернизации устаревшего оборудования, а также для закачки газа в подземные хранилища.

Основу конструкции ГТУ-25П составляет газотурбинный двигатель ПС-90ГП-25, разработанный на базе высокоэффективного авиационного двигателя ПС-90А с использованием узлов газотурбинных установок ГТУ-12П и ГТУ-16П.

Двигатель состоит из двух модулей:

- газотурбинного двухвального газогенератора;
- силовой турбины. Двигатель и силовая турбина на общей подмоторной раме монтируются на раму ГПА.

Разработчик ГТУ – ОАО «Авиадвигатель».

Серийный производитель – АО "ОДК-Пермские моторы".



Рисунок 9 – общий вид ГТУ-25П

1.3.3. Наземная газотурбинная установка на основе авиационного двигателя АЛ-31Ф

ГТУ АЛ-31СТН используется в качестве привода центробежного газового компрессора в газоперекачивающих агрегатах мощностью 16 МВт при строительстве новых компрессорных станций, а также при проведении реновации, модернизации и реконструкции действующих газоперекачивающих агрегатов для замены двигателей, выработавших ресурс.

Разработан НТЦ им. А. Люльки (ОАО «НПО «Сатурн») на базе авиационного двигателя АЛ-31Ф, устанавливаемого на самолётах Су-27.

Конструктивно двигатель выполнен в виде двух модулей: модуля газогенератора и модуля силовой турбины.

Производится серийно ОАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение».

Применяется в составе ГПА на компрессорных станциях ОАО «Газпром».



Рисунок 10 – внешний вид АЛ-31СТН

1.3.4. Наземные газотурбинные установки семейства «НК»

а) НК-12СТ

Газотурбинный двигатель, номинальной мощностью 6,3 МВт, был создан в начале 70-х годов на базе авиационного двигателя НК-12МВ, созданного для использования на стратегическом бомбардировщике Ту-95. Это был один из первых опытов применения авиационных технологий в промышленных целях.

Разработчик данного двигателя – ОАО «СКБМ».

Серийное производство – ОАО «Моторостроитель».

ГТД НК-12СТ стал основной газоперекачивающего арсенала советской газовой промышленности. За время серийного производства изготовлено около 2000 двигателей. Они эксплуатируются более чем на 100 компрессорных станциях в составе 800 газоперекачивающих агрегатов.

НК-12СТ применяется на ГПА-Ц- 6,3/56 и ГПА-Ц-6,3/76. Общая наработка всех НК-12СТ превышает 25 млн. часов. Отдельные двигатели наработывают без ремонта более 60000 часов.

Топливом для двигателя является очищенный природный газ. Производительность газоперекачивающего агрегата с двигателями НК-12СТ 11 млн.м³ газа в сутки. Назначенный ресурс двигателя 50000 часов.



Рисунок 11 – внешний вид НК-12СТ

б) НК-14СТ

ГТД семейства НК-14 были созданы на базе авиационного двигателя НК-12, с использованием технологий, применённых при разработке НК-12СТ. Установки закрывают важную нишу в классе промышленных ГТУ мощностью 8-10 МВт.

Газотурбинный двигатель НК-14СТ с улучшенными экологическими характеристиками, сконструирован по заказу ОАО «Газпром» на базе ГТД НК-12СТ и полностью с ним взаимозаменяем в газоперекачивающих агрегатах, имеет улучшенные основные характеристики. За время серийного производства изготовлено 210 двигателей. Лидирующий двигатель НК-14СТ 1994 года выпуска, отработал без капитального ремонта 50 010 час.



Рисунок 12 – внешний вид НК-14СТ

в) НК-16СТ

Двигатель НК-16СТ конструкции ОКБ Кузнецова создан на базе авиационного двухконтурного двигателя НК-8-2У семейства двигателей НК. Базовый двигатель применяется в качестве силовой установки самолёта Ту-154.

Двигатель НК-16СТ предназначен для работы в составе газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76.

Конструктивно двигатель состоит из 2-х модулей - газогенератора (собственно базового двигателя с доработками) и силовой турбины. Каждый модуль имеет свою раму для крепления, что позволяет при необходимости заменять двигатель целиком или отдельно газогенератор и силовую турбину.

Серийное изготовление и поставка двигателя НК-16СТ на магистральные газопроводы производятся с 1982 года. Выпущено 1065 двигателей. Суммарная наработка парка двигателей составляет больше 50 миллионов часов. В связи с высокой надёжностью данный привод нашёл применение в энергетике. В настоящее время на более чем 30 электростанциях двигатели НК-16СТ используют в качестве приводов энергоустановок, работающих на попутном нефтяном газе.

г) НК-16-18СТ

Двигатель НК-16-18СТ применяется для привода нагнетателя и электрогенераторов в составе газотурбинных ГПА и энергетических установок. Может быть установлен идентично с двигателем НК-16СТ.

Изготавливается и поставляется на месторождения и магистральные перекачивающие станции с 1995 года. Отмечается высокой мощностью. За счёт улучшения характеристик компрессора, подвески двигателя, изменения конструкции камеры сгорания и топливно-регулирующей аппаратуры обеспечена мощность на валу свободной турбины 18 МВт. Двигатели НК-16-18СТ имеют ресурс свыше 80000 часов, по показателям надёжности и стоимости жизненного цикла. Данный вид двигателя на 20% превосходит современные ГТУ подобного класса. Двигатели отмечаются высокой наработкой.



Рисунок 13 – внешний вид НК-16-18СТ

д) НК-36СТ

Относительно мощный, и эффективный газотурбинный двигатель НК-36СТ предназначен для привода центробежного компрессора в комплексе с «ГПА-Ц-25» и «Нева-25НК» на дожимных компрессорных станциях и компрессорных станциях магистральных газопроводов. Отличительная особенность – это высокий КПД - 36%, высокая надежность. Модифицированный двигатель зарекомендован как двигатель с лучшими техническими характеристиками, а именно мощностные параметры привода. Аналогов не существует на отечественных рынках. Данный двигатель отличается высокой по времени наработкой.

Двигатель спроектирован на базе серийного двигателя НК-32, используемого на стратегических бомбардировщиках-ракетоносцах Ту-160.

Сочетает в себе последние достижения в области двигателестроения и большой опыт эксплуатации на магистральных газопроводах двигателей НК-12СТ и НК-16СТ, изготавливается и поставляется ПАО «Кузнецов» комплектно со всем необходимыми вспомогательными агрегатами и системами.

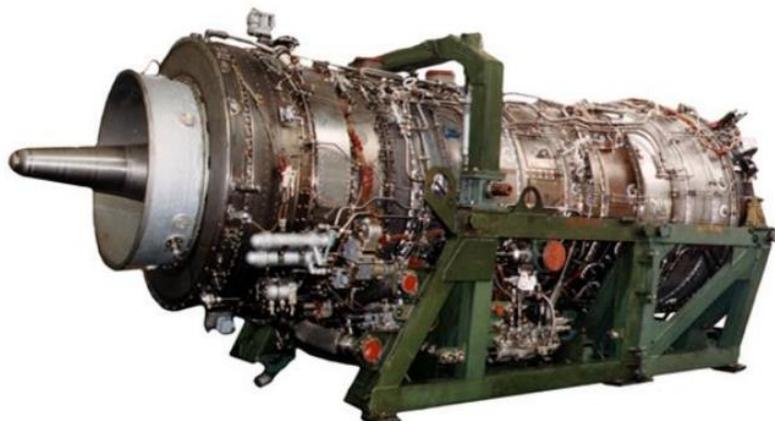


Рисунок 14 – внешний вид НК-36СТ

е) НК-38СТ

Двигатель НК-38СТ предназначен для привода компрессора в составе газоперекачивающих агрегатов серии «Волга».

База двигателя: НК-93.

Серия ГПА: «Волга».

Использование в авиации: Ил-96, Ту- 204, Ту-330.

Эффективный КПД не менее 38%.

Количество выпущенных двигателей от ПАО «Кузнецов»: 11.



Рисунок 15 – внешний вид НК-38СТ

Разработан на базе современного авиадвигателя, который планировалось использовать в авиации. При необходимости замены НК-16СТ на НК-38СТ необходим специальный комплект для ввода в эксплуатацию и переоснастки. Расход топливного газа, а также стоимость жизненного цикла НК-38СТ за 100000 часов назначенного ресурса значительно ниже по сравнению с аналогичными показателями двигателей других производителей.

2. Объект и методы исследования

Объект исследования: газотурбинный двигатель НК-16-СТ.

Объектом исследования является ГТУ НК-16-СТ предназначенный для нефтегазодобывающей и энерго промышленности, который был создан, а точнее конвертирован на базе авиадвигателя. Благодаря использованию данного привода в авиации, данное оборудование является надежным и долговечным, а самое главное эффективным для применения его в составе газоперекачивающих агрегатов. Эксплуатационные характеристики позволяют использовать двигатель в широком диапазоне параметров и адаптировать двигатель под различные условия работы на месторождениях.

Причины применения.

Широкое применения подобных двигателей меньшей мощности повлекло за собой изготовление и поставку более мощного двигателя НК-16СТ. На дожимные компрессорные станции и магистральные газопроводы доставляется и эксплуатируется с 1982 года. На сегодняшний день было выпущено и конвертировано более 1200 двигателей. Общая наработка всего парка приводов составляет больше 65 миллионов часов. Помимо нефтегазовой промышленности данный привод нашел применение и в энергетике благодаря своим характеристикам и эксплуатационной надежности. Попутный нефтяной газ – как основной вид топлива на энергоустановках позволяет использовать двигатели в местах, отдаленных от цивилизации и производить электроэнергию для месторождений и являться независимым поставщиком энергии. Это дополнительный и значимый аргумент использования данного привода.

Назначение

Конвертируемый двигатель НК-16-СТ применяется для привода нагнетателя и электрогенераторов в составе газотурбинных ГПА и энергетических установок.



Рисунок 16– газотурбинный двигатель НК-16-СТ

Таблица 1 - технические характеристики

Наименование параметра	Значение
Мощность, МВт, не менее	18
Эффективный КПД, %, не менее	31
Диапазон изменения частоты вращения приводного вала свободной турбины, об./мин	3975-5565
Содержание в выхлопных газах, мг/нм ³ <ul style="list-style-type: none"> • окислов азота • окиси углерода 	140 100
Максимальный уровень звукового давления, дБ	136,5
Расход топливного газа, м ³ /ч	6 500
Масса двигателя с рамой, кг	7 800
Запуск двигателя	электрический, пневматический
Температура газа на выходе из свободной турбины, °С	427
Гарантийный ресурс, ч	8 000
Межремонтный ресурс, ч	25 000
Назначенный ресурс, ч	150000
Применяемое масло	ТП-22С

2.1. Двигатель НК-16СТ в составе компрессорной станции (КС)

Назначение, описание конструкции

Конструктором, Николаем Дмитриевичем Кузнецовым, возглавлявшим бюро главного конструктора, был спроектирован и создан двигатель НК-16СТ, базой которого является авиационный двухконтурный двигатель НК-8-2У. Данный двигатель по сей день применяется на самолете ТУ-154Б в качестве силовой установки.

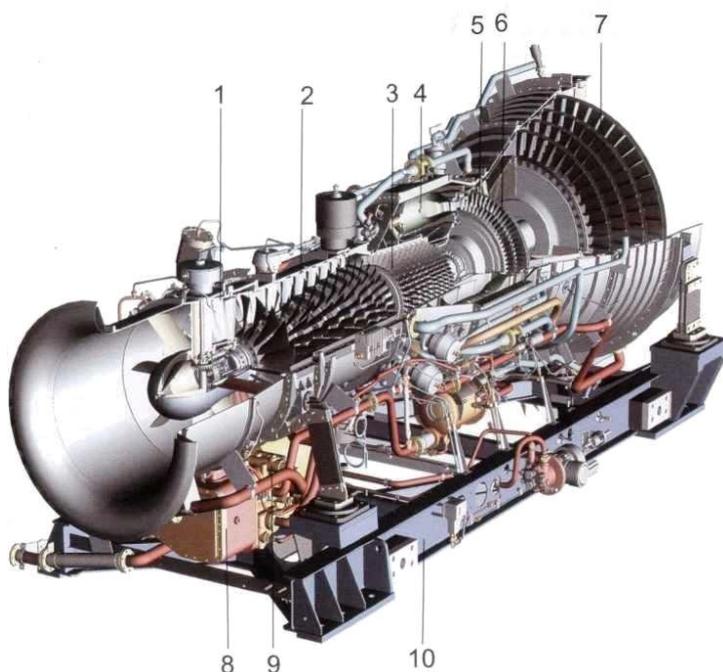


Рисунок 17 – конструкция газотурбинного двигателя НК-16-СТ

1 – поворотный входной направляющий аппарат; 2 – компрессор низкого давления (КНД); 3 – компрессор высокого давления (КВД); 4 – камера сгорания (КС); 5 – турбина высокого давления (ТВД); 6 – турбина низкого давления (ТНД); 7 – силовая турбина (СТ); 8 – коробка приводов; 9 – стартер; 10 – рама.

Так как для использования двигателя необходимы конструктивные изменения, то разработчиками была применена конвертация двигателя для его адаптации. Практически 70-80% узлов и деталей были сохранены, и данная материальная часть эксплуатировалась и проверялась в воздухе и по сей день служит на земле и показывает себя только с надежной стороны и

имеет достаточный ресурс.

В составе двигателя имеются 2 модуля. Первый – базовый двигатель вместе с адаптивными доработками, а второй – силовая (свободная) турбина. Обязательным условием является индивидуальная рама для крепления и это условие обуславливается полным или частичной заменой двигателя или его частей. Для применения данного двигателя в составе ГПА, модуль силовой турбины был изменен конструктивно, а именно: из двух имеющихся контуров был оставлен только один, а вход другого был заглушен. Рабочие колеса, а точнее лопатки были обрезаны. Данные изменения проводились для регулировки параметров, требуемых для стационарного использования, а также для регулировки энергозатрат.

2.2 Кинематическая схема НК-16-СТ

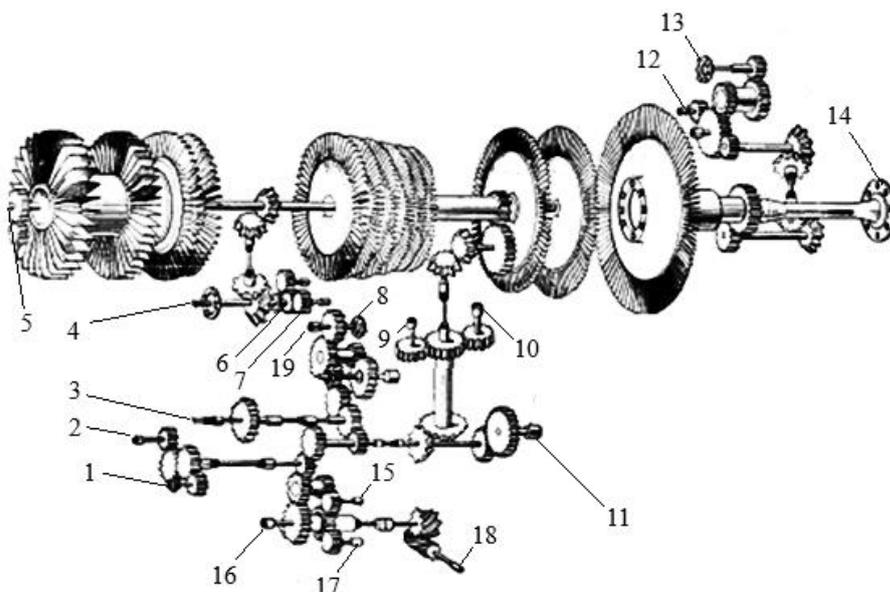


Рисунок 18 - двигатель НК-16СТ и его кинематическая схема

1,5,6,13 - индуктор датчика частоты вращения ДЧВ – 2500; 2 – привод суфлера и насоса опоры турбины; 3 – привод нагнетающего насоса свободной турбины; 4 – откачивающий насос передней опоры; 7 – привод регуляторов оборотов; 8 – привод суфлера опор компрессора; 9 – привод нагнетающего и подкачивающего насосов; 10 – привод центрифуги и откачивающего насоса; 11 – привод насосов; 12 – привод ограничителя

оборотов; 14 – выходная муфта двигателя; 15,17 – свободный привод; 16 – привод стартера; 18 – привод ручной прокрутки; 19 – привод суфлера и насоса свободной турбины.

2.3. Принцип работы двигателя в составе газокompрессорной станции

Из атмосферы, воздух через специальное воздухоочистительное устройство (ВОУ) поступает в центробежные фильтра и очищается, затем нагревается, при необходимости, для поступления в камеру всасывания газоперекачивающего агрегата. Далее в осевом компрессоре низкого и высокого давления воздух компримируется и поступает в камеру сгорания под высоким давлением и высокой температурой. В камере сгорания вместе с воздухом дозируется природный газ через дозирующее устройство (ДУС), далее форсунки. Образуется топливно-воздушная смесь, и продукты сгорания направляются на лопатки турбины газогенератора. Происходит преобразование тепловой энергии в механическую энергию. Далее энергия первой ступени преобразуется в механическую энергию вращения ротора компрессора высокого давления, в то время как вторая ступень вращает компрессор низкого давления. Энергия, поступившая на свободную турбину, расходуется на нагнетатель. Через выхлопное устройство происходит выброс отработанных продуктов в атмосферу. Цикл непрерывный, нет последовательной цепочки преобразования энергии.

3. Расчетная часть

3.1 Уточненный расчет тепловой схемы на номинальный режим

Целью расчета тепловой схемы является определение полезной мощности и КПД ГТУ, на основании чего оцениваются технико–экономические показатели, а, следовательно, и целесообразность модернизации ГТД.

Принципиальная тепловая схема ГТУ показана на рисунке 19. Исходные данные, необходимые для теплового расчета, представлены в таблице 2. Тепловой расчет схемы ГТУ произведен по методике, изложенной в [1].

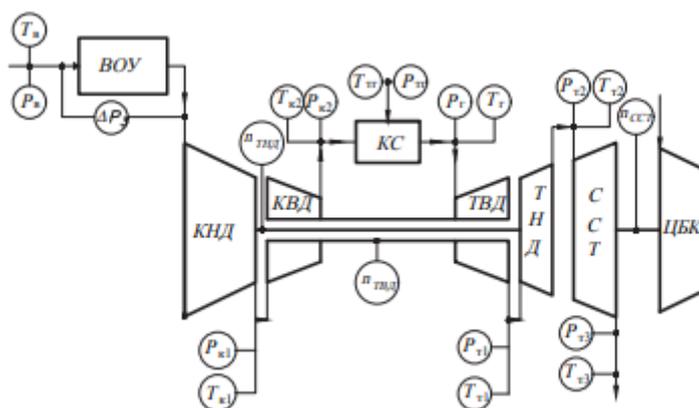


Рисунок – 19 принципиальная тепловая схема ГТУ, трехвальная

Таблица 2 – исходные данные

Наименование величины	Обозначение	Формула	Размерность	Величина
Эффективная мощность ГТД	N_e	Задано	МВт	16
Температура газа перед ТВД	T_2	Принимаем	К	1223
Температура воздуха	T_B	Задано	К	288
Давление воздуха	P_B	Задано	Па	101300
Величина потерь давления по тракту	ζ_{mp}	Принимаем	–	0,10
КПД ТВД	η_{T1}	Принимаем	–	0,895
КПД ТНД	η_{T2}	Принимаем	–	0,895
КПД СТ	η_{T3}	Принимаем	–	0,895
КПД КНД	η_{K1}	Принимаем	–	0,870

КПД КВД	$\eta_{к2}$	Принимаем	–	0,870
КПД камеры сгорания	$\eta_{кС}$	Принимаем	–	0,995
КПД механический	$\eta_{мех}$	Принимаем	–	0,975
Относительный расход воздуха на охлаждение	$q_{охл}$	Принимаем	–	0,05
Относительный расход воздуха на утечки	$q_{ут}$	Принимаем	–	0,015
Относительный расход топлива	$q_{топ}$	Принимаем	–	0,015
Коэффициент расхода для ТВД	ν_1	Принимаем	–	0,95
Коэффициент расхода для ТНД	ν_2	Принимаем	–	0,97
Коэффициент расхода для СТ	ν_3	Принимаем	–	0,98
Теплоемкость воздуха в ОК	$C_{рк}$	Принимаем	кДж/кг·К	1,01
Показатель адиабаты для воздуха в ОК	k_k	Принимаем	–	1,40
Теплоемкость продуктов сгорания в Т	$C_{рТ}$	Принимаем	кДж/ кг·К	1,17
Показатель адиабаты для продуктов сгорания в Т	k_T	Принимаем	–	1,33
Теплоемкость воздуха перед КС	$C_{рв}$	Принимаем	кДж/ кг·К	1,02
Теплоемкость продуктов сгорания в КС	$C_{ркс}$	Принимаем	кДж/ кг·К	1,08
Газовая постоянная	R	Принимаем	Дж/ кг·К	287,0

Степень повышения давления в цикле $\pi_{к\Sigma} = 14$. [1, стр. 19]

Степень повышения давления в КНД:

Распределение общей степени повышения давления между компрессорами зависит от принятого распределения работ сжатия по отсекам. При равных работах сжатия на компрессор низкого давления приходится несколько большая степень повышения давления, поскольку КНД сжимает воздух начиная с меньших значений начальных параметров (более холодный воздух) по сравнению с КВД.

$$\pi_{к1} = 0,7 \cdot \pi_{к\Sigma}^{0,5}; \quad (1)$$

где: $\pi_{к\Sigma}$ – степень повышения давления в цикле.

$$\pi_{K1} = 0,7 \cdot \pi_{K\Sigma}^{0,5} = 0,7 \cdot 14^{0,5} = 2,5;$$

Степень повышения в КВД:

$$\pi_{K2} = \frac{\pi_{K\Sigma}}{\pi_{K1}}; \quad (2)$$

$$\pi_{K2} = \frac{\pi_{K\Sigma}}{\pi_{K1}} = \frac{14}{2,5} = 5,6;$$

Принимаем в соответствии с рекомендациями [1] КПД КНД $\eta_{K1} = 0,87$ и КПД КВД $\eta_{K2} = 0,87$. Принимается истинное значение теплоемкости воздуха в КНД для средней температуры процесса по приложению 1,2.

$c_{pK1} = f(a_\theta, T_{K1cp}), a_\theta = \infty$, $c_{pK1} = 1,006 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$, показатель адиабаты для воздуха в КНД $k_{K1} = f(a_\theta, T_{K1cp}), a_\theta = \infty$, $k_{K1} = 1,399$.

Комплекс работы сжатия КНД:

$$\overline{H}_{K1} = \pi_{K1}^{\frac{(k_{K1}-1)}{k_{K1}}} - 1; \quad (3)$$

$$\overline{H}_{K1} = \pi_{K1}^{\frac{(k_{K1}-1)}{k_{K1}}} - 1 = 2,5^{\frac{(1,399-1)}{1,399}} - 1 = 0,2987;$$

Удельная работа сжатия КНД, кДж/кг:

$$H_{K1} = \frac{c_{pK1} \cdot T_\theta \cdot \overline{H}_{K1}}{\eta_{K1}}; \quad (4)$$

где: T_θ – температура воздуха;

$T_6 = 288 \text{ K}$, согласно приложению 2, [1].

$$H_{K1} = \frac{c_{pK1} \cdot T_6 \cdot \overline{H_{K1}}}{\eta_{K1}} = \frac{1,006 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \cdot 288 \text{ K} \cdot 0,2987}{0,870} = 99,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Температура воздуха за КНД, К:

$$T_{K1} = T_B + \frac{H_{K1}}{c_{pK1}} = 386,9 \text{ K}; \quad (5)$$

$$T_{K1} = T_B + \frac{H_{K1}}{c_{pK1}} = 288 \text{ K} + \frac{99,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{1,006 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}} = 386,9 \text{ K};$$

Средняя температура процесса сжатия в КНД, К:

$$T_{K1cp} = \frac{(T_B + T_{K1})}{2}; \quad (6)$$

$$T_{K1cp} = \frac{(T_B + T_{K1})}{2} = \frac{(288 \text{ K} + 386,9 \text{ K})}{2} = 337,4 \text{ K};$$

По приложению 1 определяем показатель адиабаты для воздуха в КВД

$k_{K2} = f(a_6, T_{K2cp}) = 1,384$, теплоемкость воздуха в КВД

$$c_{pK2} = f(a_6, T_{K2cp}) = 1,034 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}.$$

Комплекс работы сжатия КВД:

$$\overline{H_{K2}} = \pi_{K2}^{\frac{(k_{K2}-1)}{k_{K2}}} - 1; \quad (7)$$

$$\overline{H_{K2}} = \pi_{K2}^{\frac{(k_{K2}-1)}{k_{K2}}} - 1 = 5,6^{\frac{(1,384-1)}{1,384}} - 1 = 0,6128;$$

Удельная работа сжатия КВД, кДж/кг:

$$H_{K2} = \frac{c_{pK2} \cdot T_{K1} \cdot \overline{H_{K2}}}{\eta_{K2}}; \quad (8)$$

$$H_{K2} = \frac{c_{pK2} \cdot T_{K1} \cdot \overline{H_{K2}}}{\eta_{K2}} = \frac{1,034 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \cdot 386,9\text{К} \cdot 0,6128}{0,870} = 281,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Температура воздуха за КВД, К:

$$T_{K2} = T_{K1} + \frac{H_{K2}}{c_{pK2}}; \quad (9)$$

$$T_{K2} = T_{K1} + \frac{H_{K2}}{c_{pK2}} = 386,9\text{К} + \frac{281,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{1,034 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}} = 659,4\text{К};$$

Средняя температура процесса сжатия в КВД, К:

$$T_{K2cp} = \frac{(T_{K1} + T_{K2})}{2}; \quad (10)$$

$$T_{K2cp} = \frac{(T_{K1} + T_{K2})}{2} = \frac{(386,9\text{К} + 659,4\text{К})}{2} = 523,1\text{К};$$

Для оценочных расчетов коэффициента избытка воздуха продуктов сгорания, в интервале температур воздуха $T_B=400\dots900$ К, продуктов сгорания перед турбиной $T_T=800\dots2000$ К – можно воспользоваться интерполяционной формулой:

$$\alpha_{2=} = \frac{(3000 - 0,367 \cdot T_2)}{T_2 - T_{K2}}; \quad (11)$$

где T_2 – температура газа перед ТВД;

$$\alpha_{2=} = \frac{(3000 - 0,367 \cdot T_2)}{T_2 - T_{K2}} = \frac{(3000 - 0,367 \cdot 1223\text{К})}{1223\text{К} - 659,4\text{К}} = 4,53;$$

По приложению 1 определяем показатель адиабаты для продуктов сгорания в ТВД $k_{T1} = f(a_2, T_{T1cp}) = 1,314$, теплоемкость продуктов сгорания в ТВД $c_{pT1} = f(a_2, T_{T1cp}) = 1,205 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$.

Суммарная степень расширения в турбинах:

$$\pi_{T\Sigma} = \pi_{K\Sigma} \cdot (1 - \zeta_{mp}); \quad (12)$$

где ζ_{mp} – величина потерь давления по тракту.

Величину коэффициента гидравлических потерь давления по тракту принимаем согласно [2, стр.7] для ГТУ с регенерацией теплоты $\zeta_{mp} = 0,1$ (обычно $\zeta_{mp} \leq 0,11$ – для ГТУ с регенерацией теплоты).

$$\pi_{T\Sigma} = \pi_{K\Sigma} \cdot (1 - \zeta_{mp}) = 14 \cdot (1 - 0,10) = 12,58;$$

Удельная работа расширения ТВД, кДж/кг:

$$H_{T1} = \frac{H_{K2}}{v_1 \cdot \eta_{mex}}; \quad (13)$$

где v_1 – коэффициент расхода для ТВД;

η_{mex} – КПД механический.

Относительное значение механических потерь в подшипниках и на привод вспомогательных механизмов зависит от величины единичной мощности [2, стр.8]. В долях от полезной мощности они могут составлять 2–4 %, т.е. $\eta_{mex} = 0,96 - 0,98$. Для двух- и трехвальных ГТУ механический КПД η_{mex} на каждом валу можно оценить в 97..99 %. Мы принимаем $\eta_{mex} = 0,975$.

$$H_{T1} = \frac{H_{K2}}{v_1 \cdot \eta_{mex}} = \frac{281,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{0,95 \cdot 0,975} = 304,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Степень расширения продуктов сгорания в ТВД:

$$\pi_{T1} = \left(1 - \frac{H_{T1}}{c_{pT1} T_2 \eta_{T1}}\right)^{\frac{k_{T1}}{1-k_{T1}}}; \quad (14)$$

где η_{T1} – КПД ТВД;

Принимаем в соответствии с рекомендациями [2, стр.9]

$$\eta_{T1} = \eta_{T2} = \eta_{T3} = 0,895.$$

$$\pi_{T1} = \left(1 - \frac{H_{T1}}{c_{pT1} T_2 \eta_{T1}}\right)^{\frac{k_{T1}}{1-k_{T1}}} = \left(1 - \frac{304,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{1,205 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \cdot 1223\text{К} \cdot 0,895}\right)^{\frac{1,314}{1-1,314}} = 2,997;$$

Температура продуктов сгорания за ТВД, К:

$$T_{T1} = T_{T2} = T_2 - \frac{H_{T1}}{c_{pT1}}; \quad (15)$$

$$T_{T1} = T_{T2} = T_2 - \frac{H_{T1}}{c_{pT1}} = 1223\text{К} - \frac{304,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{1,205 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}} = 970,5\text{К};$$

Средняя температура процесса расширения в ТВД, К:

$$T_{T1cp} = \frac{(T_2 + T_{T1})}{2}; \quad (16)$$

$$T_{T1cp} = \frac{(T_2 + T_{T1})}{2} = \frac{(1223\text{К} + 970,5\text{К})}{2} = 1096,7\text{К};$$

По приложению 1 определяем показатель адиабаты для продуктов сгорания в ТНД $k_{T2} = f(a_2, T_{T2cp}) = 1,328$, теплоемкость продуктов

сгорания в ТНД $c_{pT2} = f(a_2, T_{T2cp}) = 1,166 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$.

Удельная работа расширения ТНД, кДж/кг:

$$H_{T2} = \frac{H_{K1}}{\nu_2 \cdot \eta_{мех}}; \quad (17)$$

где ν_2 – коэффициент расхода для ТНД;

$$H_{T2} = \frac{H_{K1}}{\nu_2 \cdot \eta_{мех}} = \frac{99,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{0,97 \cdot 0,975} = 105,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Степень расширения продуктов сгорания в ТНД:

$$\pi_{T2} = \left(1 - \frac{H_{T2}}{c_{pT2} T_{T2} \eta_{T2}}\right)^{\frac{k_{T2}}{1-k_{T2}}}; \quad (18)$$

где η_{T1} – КПД ТНД;

$$\pi_{T2} = \left(1 - \frac{H_{T2}}{c_{pT2} T_{T2} \eta_{T2}}\right)^{\frac{k_{T2}}{1-k_{T2}}} = \left(1 - \frac{105,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{1,166 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \cdot 970,5 \text{К} \cdot 0,895}\right)^{\frac{1,328}{1-1,328}} = 1,559;$$

Температура продуктов сгорания за ТНД, К:

$$T_{T2} = T_{T3} = T_{T2} - \frac{H_{T2}}{c_{pT2}}; \quad (19)$$

$$T_{T2} = T_{T3} = T_{T2} - \frac{H_{T2}}{c_{pT2}} = 970,5 \text{К} - \frac{105,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{1,166 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}} = 880,3 \text{К};$$

Средняя температура процесса расширения в ТНД, К:

$$T_{T2cp} = \frac{(T_{T2} + T_{T2})}{2}; \quad (20)$$

$$T_{T2cp} = \frac{(T_{T2} + T_{T2})}{2} = \frac{(970,5K + 880,3K)}{2} = 925,4K;$$

По приложению 1 определяем показатель адиабаты для продуктов сгорания в ССТ $k_{T3} = f(a_2, T_{T3cp}) = 1,342$, теплоемкость продуктов

сгорания в ССТ $c_{pT3} = f(a_2, T_{T3cp}) = 1,130 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$.

Степень расширения продуктов сгорания в ССТ:

$$\pi_{T3} = \frac{\pi_{T\Sigma}}{\pi_{T1} \cdot \pi_{T2}}; \quad (21)$$

$$\pi_{T3} = \frac{\pi_{T\Sigma}}{\pi_{T1} \cdot \pi_{T2}} = \frac{12,58}{2,997 \cdot 1,559} = 2,692;$$

Удельная работа расширения ССТ кДж/кг:

$$H_{T3} = c_{pT3} T_{T3} (1 - \pi_{T3}^{\frac{(1-k_{T3})}{k_{T3}}}) \eta_{T3}; \quad (22)$$

где η_{T3} – КПД СТ.

$$\begin{aligned} H_{T3} &= c_{pT3} T_{T3} (1 - \pi_{T3}^{\frac{(1-k_{T3})}{k_{T3}}}) \eta_{T3} = \\ &= 1,167 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \cdot 880,3K \cdot (1 - 2,692^{(1-1,342)/1,342}) \cdot 0,895 = 198,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \end{aligned}$$

Удельная эффективная работа кДж/кг:

$$H_e = H_{T3} \cdot v_3 \cdot \eta_{мех}; \quad (23)$$

где v_3 – коэффициент расхода для СТ;

$$H_e = H_{T3} \cdot v_3 \cdot 0,975 = 198,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 0,98 \cdot 0,975 = 189,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Температура продуктов сгорания за ССТ, К:

$$T_{T3} = T_{Г3} - \frac{H_{T3}}{c_{PT3}}; \quad (24)$$

$$T_{T3} = T_{Г3} - \frac{H_{T3}}{c_{PT3}} = 880,3\text{К} - \frac{198,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{1,130 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}} = 704,6\text{К};$$

Средняя температура процесса расширения в ССТ, К:

$$T_{T3cp} = \frac{(T_{Г3} + T_{T3})}{2}; \quad (25)$$

$$T_{T3cp} = \frac{(T_{Г3} + T_{T3})}{2} = \frac{(880,3\text{К} + 704,6\text{К})}{2} = 792,4\text{К};$$

Теплоемкость воздуха перед КС, определяемая по кривым

приложению 3 $c_{pv} = f(a_v, T_{к2}) = 1,020 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$.

Количество теплоты воздуха поступившего в КС, кДж/кг:

$$Q_B = c_{pv} \cdot T_{K2} \cdot (1 - q_{охл} - q_{ут}); \quad (26)$$

где $q_{охл}$ – относительный расход воздуха на охлаждение;

$q_{ут}$ – относительный расход воздуха на утечки.

По данным практики следует принимать для ГТУ при $t_r = 800 - 900 \text{ }^\circ\text{C}$ – $q_{охл} = 0,035 - 0,045$; при $t_r = 900 - 1050 \text{ }^\circ\text{C}$ $q_{охл} = 0,04 - 0,06$. Примем $q_{охл} = 0,05$, т.к. $T_z = 1223\text{K}$. $q_{ут}$ обычно находится в пределах $0,01 - 0,02$, примем среднее $q_{ут} = 0,015$.

$$Q_B = c_{pв} \cdot T_{K2} \cdot (1 - q_{охл} - q_{ут}) = 1,02 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \cdot 659,4\text{K} \cdot (1 - 0,05 - 0,015) = 628,85 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Количество теплоты, подведенное к п.с., кДж/кг:

$$Q_{КС} = \frac{c_{pкс} \cdot T_z \cdot (1 - q_{охл})}{\eta_{КС}} - Q_B; \quad (27)$$

где $c_{pкс}$ – теплоемкость продуктов сгорания в КС;

$\eta_{КС}$ – КПД камеры сгорания.

$c_{pкс}$ средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания при температуре T_r , определяемая по приложению 3 – $c_{pкс} = 1,08 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$.

Химический недожог топлива учитывается с помощью КПД камеры сгорания, величина которого во многом зависит от вида топлива. Для углеводородных топлив $\eta_{КС} = 0,98 - 0,995$. Принимаем $\eta_{КС} = 0,995$.

$$Q_{КС} = \frac{c_{pкс} \cdot T_z \cdot (1 - q_{охл})}{\eta_{КС}} - Q_B = \frac{1,08 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \cdot 1223\text{K} \cdot (1 - 0,05)}{0,995} - 628,85 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 632,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Эффективный КПД, %:

$$\eta_e = \frac{H_e \cdot 100\%}{Q_{КС}}; \quad (28)$$

$$\eta_e = \frac{H_e \cdot 100\%}{Q_{КС}} = \frac{189,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 100\%}{632,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 30,1\%;$$

Расход воздуха в цикле, кг/с:

$$G_B = \frac{N_e}{H_e}; \quad (29)$$

где N_e – эффективная мощность ГТД.

$$G_B = \frac{N_e}{H_e} = \frac{16000 \text{ Вт}}{189,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}} = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

Расходы рабочего тела для ТВД, кг/с:

$$G_{T1} = G_B \cdot \nu_1; \quad (30)$$

$$G_{T1} = G_B \cdot \nu_1 = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 0,95 = 80,11 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

Расходы рабочего тела для ТНД, кг/с:

$$G_{T2} = G_B \cdot \nu_2; \quad (31)$$

$$G_{T2} = G_B \cdot \nu_2 = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 0,97 = 81,80 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

Расходы рабочего тела для ССТ, кг/с:

$$G_{T3} = G_B \cdot \nu_3; \quad (32)$$

$$G_{T3} = G_B \cdot \nu_3 = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 0,98 = 82,64 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

3.2. Расчет баланса мощностей, расходов и теплоперепадов

Условие балансов мощностей, расходов и теплоперепадов представляет собой равенство мощностей, расходов и теплоперепадов турбин с приводными ими компрессорами и полезной нагрузки с учетом механических потерь.

Удельная работа сжатия КНД, рассчитана ранее по выражению (4) и составляет 99,5кДж/кг. Удельная работа расширения ТНД, определена по выражению (17) и составляет 105,2кДж/кг.

Расход воздуха через КНД, кг/с:

$$G_{k_1} = G_g; \quad (33)$$

где G_g –расход воздуха в цикле.

$$G_{k_1} = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

Расход воздуха через ТНД, кг/с:

$$G_{T_2} = G_g \cdot v_2; \quad (34)$$

$$G_{T_2} = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 0,97 = 81,80 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

Мощность, потребляемая КНД, МВт:

$$N_{k_1} = G_{k_1} \cdot H_{K_1}; \quad (35)$$

$$N_{k_1} = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 99,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 8,39 \text{ МВт};$$

Мощность на муфте ТНД, МВт:

$$N_{T_2} = G_{T_2} \cdot H_{T_2} \cdot \eta_{\text{мех}}; \quad (36)$$

$$N_{T_2} = 81,80 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 105,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 0,975 = 8,39 \text{ МВт};$$

Удельная работа сжатия КВД, кДж/кг:

$$H_{K_2} = \frac{C_{PK} \cdot T_{K_1} \cdot H'_{K_2}}{\eta_K}; \quad (37)$$

где T_{K_1} – температура воздуха за КНД;

H'_{K_2} – комплекс работы сжатия КВД.

$$H_{K_2} = \frac{1,020 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 386,9 \text{ К} \cdot 0,6128}{0,870} = 281,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Удельная работа расширения ТВД, кДж/кг:

$$H_{T_1} = \frac{H_{K_2}}{(v_1 \cdot \eta_{\text{мех}})}; \quad (38)$$

где v_1 – коэффициент расхода для ТВД.

$$H_{T_1} = \frac{281,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{(0,95 \cdot 0,975)} = 304,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Расход воздуха через КВД, кг/с:

$$G_{K_2} = G_{K_1} = G_{\sigma}; \quad (39)$$

$$G_{K_2} = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

Расходы рабочего тела для ТВД, кг/с:

$$G_{T1} = G_6 \cdot v_1; \quad (40)$$

$$G_{T1} = 84,33 \text{ кг} / \text{с} \cdot 0,95 = 80,11 \frac{\text{кг}}{\text{с}};$$

Мощность, потребляемая КВД, МВт:

$$N_{k2} = G_{k2} \cdot H_{K2}; \quad (41)$$

$$N_{k2} = 84,33 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 281,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 23,77 \text{ МВт};$$

Мощность на муфте ТВД, МВт:

$$N_{T1} = G_{T1} \cdot H_{T1} \cdot \eta_{\text{мех}}; \quad (41)$$

$$N_{T1} = 80,11 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot 304,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 0,975 = 23,77 \text{ МВт};$$

Удельная работа расширения ССТ, кДж/кг:

$$H_{T3} = C_{PT} \cdot T_{T3} \cdot (1 - \pi_{T3}^{(1-k)/k}) \eta_{T3}; \quad (42)$$

где T_{T3} – температура продуктов сгорания за ТНД;

π_{T3} – степень расширения продуктов сгорания в ССТ;

η_{T3} – КПД СТ.

$$H_{T3} = 1,167 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}} \cdot 880,3 \text{ К} \cdot (1 - 2,692^{(1-1,342)/1,342}) \cdot 0,895 = 198,6 \text{ кДж} / \text{кг};$$

Расходы рабочего тела для ССТ, кг/с:

$$G_{T3} = G_6 \cdot v_3; \quad (43)$$

где v_3 – коэффициент расхода для СТ.

$$G_{T3} = 84,33 \text{ кг} / \text{с} \cdot 0,98 = 82,64 \text{ кг} / \text{с};$$

Мощность на муфте ТВД, МВт:

$$Ne = G_{T3} \cdot H_{T3} \cdot \eta_{\text{мех}}; \quad (44)$$

$$Ne = G_{T3} \cdot H_{T3} \cdot \eta_{\text{мех}} = 82,64 \text{ кг} / \text{с} \cdot 198,6 \cdot 0,975 = 16,00 \text{ МВт};$$

Вывод: в ходе выполнения уточненного теплового расчета получили номинальную мощность двигателя НК–16СТ, которая составляет 16МВт.

3.3 Расчет климатических характеристик и переменных режимов работы ГТУ

Особенность ГТУ открытого цикла — большая зависимость развиваемой мощности и других ее показателей от параметров атмосферного воздуха. Барометрическое давление в любой местности обычно колеблется не больше чем на 4% от среднего значения. В соответствии с этим плотность воздуха, его расход и полезная мощность ГТУ меняются также не более чем на 4%, а КПД остается постоянным.

Однако температура воздуха в центральной части континентов может изменяться в течение суток на 5–7% (до 15–20 °С), а в течение года более чем на 30% (по шкале Кельвина), например, от –50 °С зимой до +40 °С летом при среднегодовой около 0 °С. При увеличении температуры засасываемого воздуха возрастает работа сжатия каждого килограмма рабочего тела пропорционально его абсолютной температуре, уменьшается расход воздуха из-за снижения его плотности, а при неизменности подводимой к компрессору удельной мощности падает и его напор. В приводных ГТУ расход уменьшается и вследствие снижения частоты вращения компрессорного вала, т.к. для ее поддержания требуется превышение

температуры газа перед турбиной, что обычно не допускается по условиям надежности.

При пониженной по сравнению с расчетной температурой атмосферного воздуха картина меняется на обратную: расход, мощность и эффективный КПД увеличиваются. Для построения зависимости располагаемой мощности приводной ГТУ от температуры воздуха t_v (климатические характеристики ГТУ) необходимо знание в первую очередь фактических характеристик компрессоров и способа регулирования ГТУ (возможность поддержания заданной частоты вращения турбокомпрессорного вала, заданной температуры продуктов сгорания за турбиной и т.д.). Кроме этого на зависимость располагаемой мощности от t_v влияют: степень повышения давления в цикле, расчетная (номинальная) температура продуктов сгорания перед турбиной, КПД компрессоров и турбин, гидравлические потери по тракту ГТУ и другие факторы.

Исходной информацией для расчета являются данные номинального режима работы. Расчет проводят, используя уравнение расхода через турбину — уравнение Стодолы — Флюгеля. Для приводных ГТУ точность этой зависимости обычно достаточна и для ответственных расчетов. Для отсеков турбин с регулируемым сопловым аппаратом эта формула не применяется.

Параметрам номинального режима работы дополнительно присваиваем индекс «0» (таблица 3). Относительные величины рассматриваем по отношению к номинальному режиму работы.

Таблица 3 – Параметры номинального режима работы

<i>Величина и её значение</i>	<i>Пояснение</i>
$T_{Г0} = 1223K;$	Температура газа перед ТВД
$\pi_{К0} = 14;$	Степень повышения давления

$H_{e_0} = 189,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;	Удельная эффективная работа
$\pi_{T_0} = 12,57505$;	Степень расширения продуктов сгорания в КНД
$\pi_{T_{10}} = 2,997$;	Степень расширения продуктов сгорания в ТВД
$\pi_{T_{20}} = 1,5589$;	Степень расширения продуктов сгорания в ТНД
$\pi_{T_{30}} = 2,691$;	Степень расширения продуктов сгорания в ССТ
$\eta_{e_0} = 30$;	Эффективное КПД ГТУ

Значения КПД турбомашин, теплофизических параметров рабочих тел, вспомогательных коэффициентов принимаем из уточненного расчета схемы ГТУ при номинальном режиме работы.

Обсчитаем следующий переменный режим работу ГТУ: переменная температура воздуха при постоянной температуре продуктов сгорания перед турбиной, то есть определим располагаемую мощность. При расчете режима $\bar{T}_B = \text{var}$, $\bar{T}_T = 1$.

Как и в двухвальных, в трехвальных ГТУ для расчета переменного режима работы используется уравнение расхода рабочего тела через турбину Стодолы — Флюгеля. По аналогии с двухвальной ГТУ составляем это уравнение для всей турбины (из трех турбин: ТВД, ТНД, СТ) и первой турбины (ТВД) и, приравнявая их, получаем:

$$\pi_{T1} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{A'(\pi_T^2 - 1)}{\pi_T^2}}}; \quad (45)$$

где A' — константа

$$A' = \frac{1 - \pi_{T_{10}}^{-2}}{1 - \pi_{T_0}^{-2}} = \frac{1 - 2,997^{-2}}{1 - 12,57505^{-2}} = 0,89;$$

$$\pi_{T_1} = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{0,89(13^2 - 1)}{13^2}}} = 3;$$

Комплекс:

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{\pi_T^2 - 1}{\pi_{T_0}^2 - 1}}; \quad (46)$$

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{13^2 - 1}{12,57^2 - 1}} = 1,11;$$

Степень расширения продуктов сгорания в свободной силовой турбине:

$$\pi_{T_2} = \sqrt{\frac{1}{\pi_{T_1}^2 \left[1 - \frac{B \cdot \bar{G}^2 \cdot \bar{T}_{T_1}}{\pi_T^2} \right]}}; \quad (47)$$

где B – константа

\bar{T}_{T_1} – температура продуктов сгорания перед турбиной.

$$B = \pi_{T_0}^2 \left[1 - (\pi_{T_{10}} \cdot \pi_{T_{20}})^{-2} \right] = 12,57505^2 \left[1 - (2,997 \cdot 1,5589)^{-2} \right] = 150,88;$$

$$\pi_{T_2} = \sqrt{\frac{1}{9 \left[1 - \frac{150,88 \cdot 1,03^2 \cdot 1}{13^2} \right]}} = 1,57;$$

Удельная работа расширения турбины компрессора высокого давления:

$$H_{T1} = c_{pT1} \cdot T_{Г1} \cdot (1 - \pi_{T1}^{\frac{1-k}{k}}) \cdot \eta_{T1}; \quad (48)$$

$$H_{T1} = 1,205 \cdot 1223 \cdot (1 - 3^{\frac{1-1,314}{1,314}}) \cdot 0,895 = 335,77 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Температура продуктов сгорания перед турбиной компрессора низкого давления:

$$T_{Г2} = T_{Г1} - \frac{H_{T1}}{c_{pT1}}; \quad (49)$$

$$T_{Г2} = 1223 - \frac{459,49}{1,205} = 927,22\text{K};$$

Удельная работа расширения турбины компрессора низкого давления:

$$H_{T2} = c_{pT2} \cdot T_{Г2} \cdot (1 - \pi_2^{\frac{1-k}{k}}) \cdot \eta_{T2}; \quad (50)$$

$$H_{T2} = 1,166 \cdot 841,74 \cdot (1 - 1,56^{\frac{1-1,328}{1,328}}) \cdot 0,895 = 99,88 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Удельная работа, затрачиваемая на сжатие воздуха в цикле:

$$H_K = \frac{H_{T1} + H_{T2}}{\nu \cdot \eta_{мех}}; \quad (51)$$

$$H_K = \frac{459,49 + 194,81}{0,95 \cdot 0,97} = 377,69 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Степень повышения давления в цикле:

$$\pi_K = \frac{\pi_T}{(1 - \zeta_{TP})}; \quad (52)$$

$$\pi_K = \frac{13}{(1 - 0,1)} = 15,56;$$

Температура воздуха на входе в компрессор:

$$T_B = \frac{H_K \cdot \eta_K}{c_{pK} (\pi_k^k - 1)}; \quad (53)$$

$$T_B = \frac{353,2 \cdot 0,87}{1,01(14,47^{1,4} - 1)} = 273,28K;$$

Температура продуктов сгорания перед свободной силовой турбиной:

$$T_{Г3} = T_{Г2} - \frac{H_{Т2}}{c_{pТ2}}; \quad (54)$$

$$T_{Г3} = 841,74 - \frac{194,81}{1,166} = 836,92K;$$

Степень расширения продуктов сгорания в свободной силовой турбине:

$$\pi_{Т3} = \frac{\pi_T}{\pi_{Т1} \cdot \pi_{Т2}}; \quad (55)$$

$$\pi_{Т3} = \frac{13}{3 \cdot 1,56} = 2,96$$

Удельная работа расширения продуктов сгорания в свободной силовой турбине:

$$H_{T3} = c_{pT3} \cdot T_{T3} \cdot \left(1 - \pi_{T3}^{\frac{1-k}{k}}\right) \cdot \eta_{T3}; \quad (56)$$

$$H_{T3} = 1,130 \cdot 674 \cdot \left(1 - 2,77^{\frac{1-1,342}{1,342}}\right) \cdot 0,895 = 198,97 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Удельная эффективная работа ГТУ:

$$H_e = H_{T3} \cdot v_3 \cdot \eta_{мех}; \quad (57)$$

$$H_e = 236,15 \cdot 0,98 \cdot 0,975 = 190,12 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Температура воздуха за компрессором высокого давления:

$$T_{K2} = T_B + \frac{H_K}{c_{pk}}; \quad (58)$$

$$T_{K2} = 141,78 + \frac{353,2}{1,01} = 647,24 \text{K};$$

Количество теплоты, подведенное к продуктам сгорания в КС:

$$Q_{КС} = c_{pkc} \cdot T_G \cdot (1 - q_{охл}) - c_{pв} \cdot T_K \cdot (1 - q_{охл} - q_{ут}); \quad (59)$$

$$Q_{КС} = 1,08 \cdot 1223 \cdot (1 - 0,05) - 1,02 \cdot 491,49 \cdot (1 - 0,05 - 0,015) = \\ = 637,53 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}};$$

Эффективный КПД ГТУ:

$$\eta_e = \frac{(H_e \cdot \eta_{КС})}{Q_{КС}}; ; \quad (60)$$

$$\eta_e = \frac{(225,64 \cdot 0,995)}{786} = 0,3;$$

Относительный КПД ГТУ:

$$\bar{\eta}_e = \frac{\eta_e}{\eta_{e0}}; ; \quad (61)$$

$$\bar{\eta}_e = \frac{0,28}{0,3} = 1,06;$$

Относительная удельная эффективная работа ГТУ:

$$\bar{H}_e = \frac{H_e}{H_{e0}}; ; \quad (62)$$

$$\bar{H}_e = \frac{225,64}{189,73} = 1,08;$$

Относительная эффективная мощность ГТУ:

$$\bar{N}_e = \bar{G} \cdot \bar{H}_e; ; \quad (63)$$

$$\bar{N}_e = 1,034 \cdot 1,18 = 1,20;$$

После выполнения расчетов, по данным таблицы 4 (режим $\bar{T}_B = \text{var}$, $\bar{T}_r = 1$), построим зависимость $\bar{N}_e, \bar{\eta}_e = f(\bar{T}_B)$, изображенную на рисунке 20.

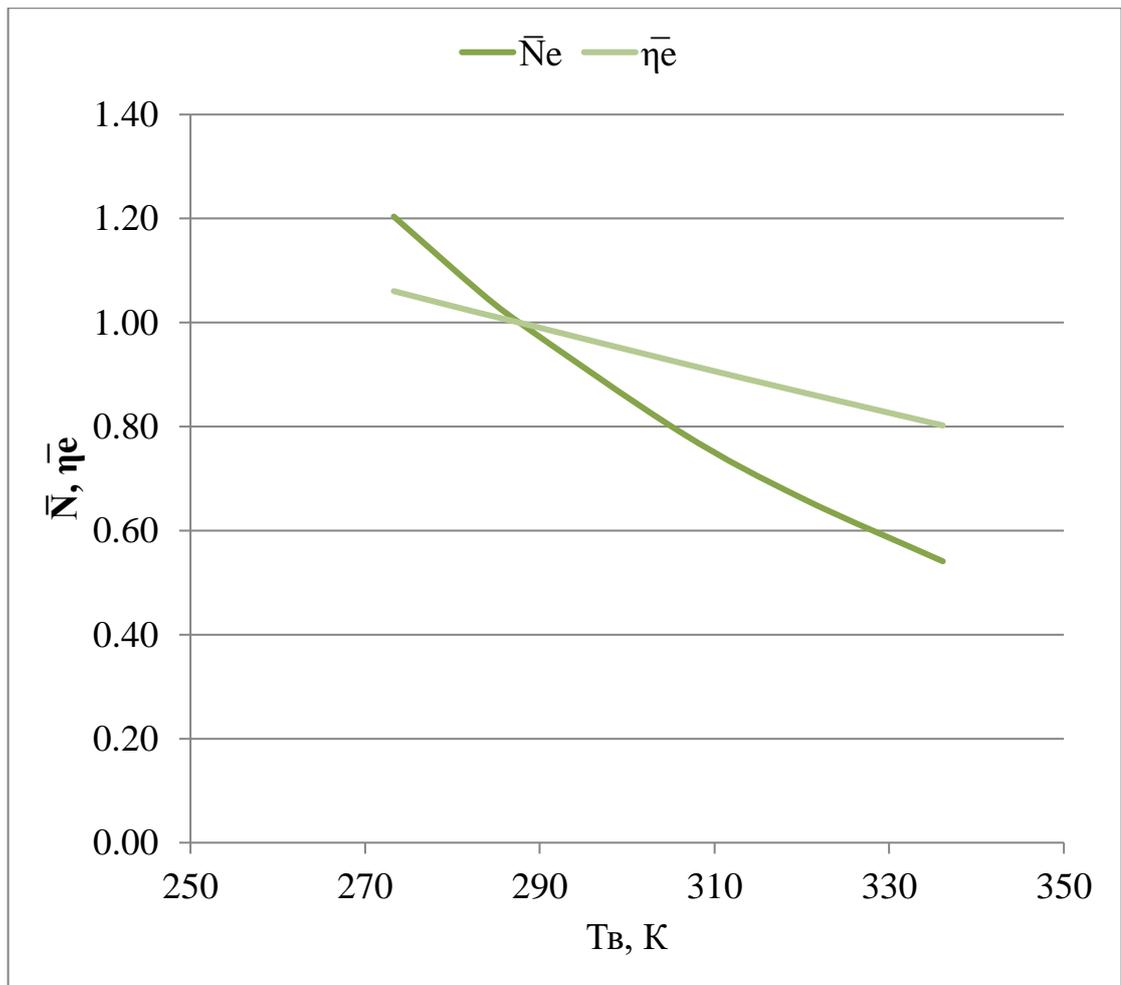


Рисунок 20 – климатические характеристики трехвальной ГТУ простого открытого цикла

По данным рисунка 20 и таблицы 4 можно сделать вывод об изменении мощности и топливной экономичности ГТУ в зависимости от температуры наружного воздуха. Мы видим явную зависимость развиваемой мощности от параметров атмосферного воздуха. При увеличении температуры засасываемого воздуха мощность и КПД ГТУ снижаются. Но этот же график говорит о том, что при понижении температуры атмосферного воздуха картина меняется на обратную: мощность и эффективный КПД увеличиваются.

Таблица 4 – Расчет переменного режима работы трехвальной ГТУ (режим $\bar{T}_B = \text{var}$, $\bar{T}_T = 1$)

Величина	Обозначения	Расчетная формула	Единицы измерения	Режимы					
				1	2	3	4	5	6
Степень расширения продуктов сгорания в турбинах	π_T	Задаем	–	14,00	13,00	12,57	11,00	10,00	9,00
Комплекс	\bar{G}	$\sqrt{\frac{\pi_T^2 - 1}{\pi_{T_0}^2 - 1}}$;	–	1,11	1,03	1,00	0,87	0,79	0,71
Степень расширения продуктов сгорания в турбине компрессора	π_{T1}	$\sqrt{1 - \frac{1}{A'(\pi_T^2 - 1) \pi_T^2}}$;	–	3,01	3,00	3,00	2,97	2,95	2,93
Удельная работа расширения турбины компрессора высокого давления	H_{T1}	$c_{pT1} \cdot T_{T1} \cdot (1 - \pi_{T1}^{\frac{1-k}{k}}) \cdot \eta_{T1}$	кДж/кг	335,77	334,92	334,49	332,49	330,71	328,35
Температура продуктов сгорания перед турбиной компрессора низкого давления	T_{T2}	$T_{T1} - \frac{H_{T1}}{c_{pT1}}$	К	927,22	927,97	928,35	930,11	931,68	933,76
Степень расширения продуктов сгорания в турбине компрессора низкого давления	π_{T2}	$\sqrt{\pi_{T1}^2 \left[1 - \frac{B \cdot \bar{G}^2 \cdot \bar{T}_{T1}}{\pi_T^2} \right]}$	–	1,57	1,56	1,56	1,54	1,52	1,50

Удельная работа расширения турбины компрессора низкого давления	H_{T2}	$c_{pT2} \cdot T_{T2} \cdot (1 - \pi_2^{\frac{1-k}{k}}) \cdot \eta_{T2}$	кДж/кг	99,88	98,83	98,31	95,95	93,92	91,32
Удельная работа, затрачиваемая на сжатие воздуха в цикле	H_K	$\frac{H_{T1} + H_{T2}}{v \cdot \eta_{мех}}$	кДж/кг	377,69	376,06	375,35	371,29	367,80	363,19
Степень повышения давления в цикле	π_K	$\frac{\pi_T}{(1 - \zeta_{TP})}$	–	15,56	14,44	13,97	12,22	11,11	10,00
Температура воздуха на входе в компрессор	T_B	$\frac{H_K \cdot \eta_K}{c_{pK} (\pi_K^{\frac{1-k}{k}} - 1)}$	К	273,28	283,01	287,63	306,16	320,12	336,14
Температура продуктов сгорания перед свободной силовой турбиной	T_{T3}	$T_{T2} - \frac{H_{T2}}{c_{pT2}}$	К	836,92	838,61	839,46	843,37	846,76	851,19
Степень расширения продуктов сгорания в свободной силовой турбине	π_{T3}	$\frac{\pi_T}{\pi_{T1} \cdot \pi_{T2}}$	–	2,96	2,77	2,69	2,40	2,22	2,04
Удельная работа расширения продуктов сгорания в свободной силовой турбине	H_{T3}	$c_{pT3} \cdot T_{T3} \cdot (1 - \pi_{T3}^{\frac{1-k}{k}}) \cdot \eta_{T3}$	кДж/кг	198,97	188,84	184,26	166,17	153,43	139,61
Удельная эффективная работа ГТУ	H_e	$H_{T3} \cdot v_3 \cdot \eta_{мех}$	кДж/кг	190,12	180,44	176,06	158,78	146,60	133,39

Температура воздуха за компрессором высокого давления	T_{K2}	$T_B + \frac{H_K}{c_{pk}}$	К	647,24	655,35	659,26	673,78	684,28	695,74
Количество теплоты, подведенное к продуктам сгорания в КС	$Q_{КС}$	$c_{pkc} \cdot T_G \cdot (1 - q_{охл}) - c_{pv} \cdot T_K \cdot (1 - q_{охл} - q_{yt})$	кДж/кг	637,53	629,79	626,06	612,21	602,20	591,27
Эффективный КПД ГТУ	η_e	$\frac{(H_e \cdot \eta_{КС})}{Q_{КС}}$	–	0,30	0,29	0,28	0,26	0,24	0,22
Относительный КПД ГТУ	$\bar{\eta}_e$	$\frac{\eta_e}{\eta_{e0}}$	–	1,06	1,02	1,00	0,92	0,87	0,80
Относительная удельная эффективная работа ГТУ	\bar{H}_e	$\frac{H_e}{H_{e0}}$	–	1,08	1,03	1,00	0,90	0,83	0,76
Относительная эффективная мощность ГТУ	\bar{N}_e	$\bar{G} \cdot \bar{H}_e$	–	1,20	1,06	1,00	0,79	0,66	0,54

4. Социальная ответственность

Введение

В ВКР производится обзор современных газотурбинных двигателей как воздушного, так и наземного базирования. Газотурбинные двигатели нашли широкое применение в нефтегазовой промышленности в качестве привода для газоперекачивающих агрегатов и энергоустановок и по сей день показывают надежность и бесперебойную работу. Основной частью данной работы является расчетно-практическая глава, в которой рассматривается как тепловой расчет двигателя, так и расчет отдельных систем. Важность понимания методик расчета для будущих специалистов можно объяснить тем, что специалист будет понимать все существующие зависимости параметров двигателя и сможет в дальнейшем анализировать работу и решать возникающие проблемы.

В качестве персонала рассматривается машинист технологических компрессоров.

Рабочим местом машиниста является ангар, шумо-теплоизоляционный кожух газоперекачивающего агрегата, пульт управления.

В обязанности машиниста входит обслуживание щитов управления агрегатного уровня, отдельных технологических компрессоров. Запуск и остановка газоперекачивающих агрегатов, регулирование технологического режима их работы, контроль за работой технологического оборудования. Ремонт компрессоров и их приводов, узлов газовых коммуникаций, аппаратов и вспомогательного оборудования цехов, выявление и устранение неисправностей в работе газоперекачивающих агрегатов. Ведение ремонтных журналов.

4.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Требования промышленной безопасности должны соблюдаться согласно Федеральному закону «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и Постановлению Правительства РФ «Об организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах» с использованием «Методических рекомендаций по организации производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах» РД 04-355-00.

Участники работ должны быть ознакомлены с расположением технических средств, средствами связи, противопожарного инвентаря и постов медицинской помощи.

Все участники работ обеспечиваются спецодеждой, соответствующей сезону и конкретным видам работ, и необходимыми средствами индивидуальной защиты.

4.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства

При работах с вредными и опасными условиями труда, а также выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, работникам бесплатно выдаются прошедшие обязательную, сертификацию или декларирование соответствия специальная одежда, специальная обувь и другие средства индивидуальной защиты, а также смывающие и (или) обезвреживающие средства в соответствии с типовыми нормами.

При работе с вредными условиями труда работникам выдаются бесплатно по установленным нормам молоко или другие равноценные пищевые продукты. Выдача работникам по установленным нормам молока или других равноценных пищевых продуктов по письменным заявлениям работников может быть заменена компенсационной выплатой в

размере, эквивалентном, стоимости этих продуктов, если это предусмотрено коллективным договором и (или) трудовым договором [21].

Федеральный государственный надзор за соблюдением трудового законодательства и иных нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права, осуществляется федеральной инспекцией труда в порядке, установленном Правительством Российской Федерации. Государственный контроль (надзор) за соблюдением требований по безопасному ведению работ в отдельных сферах деятельности осуществляется в соответствии с законодательством Российской Федерации уполномоченными федеральными органами исполнительной власти.

Ведомственный контроль за охраной труда проводят министерства и ведомства, которые контролируют внутриведомственное соблюдение законодательства о труде. Для этого создают специальные службы охраны труда в виде отделов с аппаратом инженеров по охране труда, санитарных врачей и других специалистов.

Профсоюзный общественный контроль за охраной труда осуществляют общественные инспектора и комиссии по охране труда комитетов профсоюзов.

Для исключения возможности несчастных случаев должны проводиться обучение, инструктажи и проверка знаний работников требований безопасности труда.

4.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Участники работ должны быть ознакомлены с расположением технических средств, средствами связи, противопожарного инвентаря и постов медицинской помощи.

Все участники работ обеспечиваются спецодеждой, соответствующей сезону и конкретным видам работ, и необходимыми средствами индивидуальной защиты.

Персонал допускается к работе только в спецодежде и средствах индивидуальной защиты. На рабочем месте должны быть запасы сырья и материалов, не превышающие сменную потребность. Необходимо знать специфические свойства применяемых веществ и соблюдать установленные правила работы с ними. Производственный процесс должен быть организован так, чтобы не допускать выделения в воздух рабочей зоны пыли и вредных веществ. Все эксплуатируемые электроустановки должны соответствовать требованиям «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей», и других нормативных документов. Эксплуатация электрооборудования без заземления не допускается. Помещения опытно-производственной лаборатории обеспечиваются первичными средствами пожаротушения согласно действующим нормам. Все работники должны уметь пользоваться средствами пожаротушения и уметь оказывать первую помощь при несчастном случае. Не допускается загромождения рабочих мест, проходов, выходов из помещений и здания, доступа к противопожарному оборудованию.

4.2. Производственная безопасность

Выполнение работ по дожимной компрессорной станции сопровождается следующими вредными и опасными факторами приведёнными в таблице 5

Таблица 5 – Вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1	2	3	4	5
1. Недостаточная освещённость рабочей зоны	+	+	+	ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ[22] СП 52.13330.2016[23]
2. Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе.			+	СанПиН 2.2.4.548-96[24] ГН 2.2.5.3532-18[25]

3. Повышенная загазованность воздуха рабочей среды.			+	ГОСТ 12.1.004-91[26] ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ[27]
4. Пожаровзрывоопасность	+	+	+	
5. Электрический ток	+	+	+	
6. Движущиеся машины и механизмы; подвижные части производственного оборудования.			+	

4.2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов

Рассмотрим основные наиболее вероятные вредные производственные факторы на рабочих местах, которые могут иметь место при выполнении данного вида работ.

Недостаточная освещённость рабочей зоны

Поскольку ремонт проводится в ограниченном пространстве в кожухе шумо-тепловой защиты, где установлен двигатели и все его вспомогательные элементы, то в итоге рабочие испытывают недостаток освещения на себе при выполнении ремонтных работ.

СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 характеризует требования к освещению (нормы освещённости территории вне задний приведены в табл. б).

Необходим постоянный контроль за соблюдением установленных правил, так как недостаточная освещённость может стать причиной получения травм или возникновения чрезвычайных ситуаций.

Таблица 6 – Освещённость мест производства работ вне зданий

Разряд зрительной работы	Отношение минимального размера объекта различия к расстоянию это этого объекта до глаз работающего	Минимальная освещённость в горизонтальной плоскости, лк
IX	Менее 0,005	50
X	От 0,005 до 0,01	30
XI	Св. 0,01 “ 0,02	20
XII	“0,02 “ 0,05	10
XIII	“0,05 “ 0,1	5
XIV	Св. 0,1	2

Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе

Другой характерной особенностью района является регулярное проведение работ в зимнее время в условиях Севера, когда температура может опускаться до крайне низких значений.

Подобные климатические условия могут стать причиной переохлаждения, обморожения и нанести вред здоровью человека.

Для того чтобы этого избежать необходимо следовать допустимой продолжительности однократного пребывания работников на открытом воздухе табл.7. Помимо этого, необходимо использование специальной утеплённой формы.

Таблица 7 – Допустимая продолжительность (ч) однократного за рабочую смену пребывания на открытой территории во II климатическом регионе (III климатический пояс) в зависимости от температуры воздуха и уровня энергозатрат

Температура воздуха	Энерготраты, Вт/м ² (категория работ)		
	88 (Iб)	113 (Ia)	145 (IIб)
-10	охлаждение через 1,7	охлаждение чрез 4,6	охлаждение поверхности тела отсутствует
-15	1,2	2,2	
-20	0,9	1,5	Охлаждение через 5,5
-25	0,8	1,1	2,4
-30	0,7	0,9	1,6
-35	0,6	0,7	1,1
-40	0,5	0,6	0,9

Повышенная запылённость и загазованность рабочей зоны

Главным источником формирования данного фактора является скопление вредных и взрывопожарных веществ, при работе связанной с осмотром, чисткой и ремонтом технологического оборудования, а также с установкой и снятием заглушек, что может вызвать отравление парами углеводородов и ожоги при возгорании смеси.

К работам внутри закрытых емкостей допускаются физические здоровые лица не моложе 20 лет, прошедшие специальное обучение по технике безопасности. Выполнение работ внутри закрытых емкостей допускается только при наличии письменного разрешения (допуска), выдаваемого начальником цеха ответственному руководителю работ перед началом работ внутри емкости. В допуске указывается фамилия и должность ответственного руководителя; состав бригады; содержание работ, которые необходимо провести; необходимые защитные средства; спасательное снаряжение; длительность пребывания рабочего в емкости и порядок его смены, а также особые меры безопасности.

До начала выполнения работ емкость должна быть подготовлена к ремонту, освобождена от продукта и отключена от технологических магистралей. Работы внутри емкостей должны проводиться бригадой (но менее 2 человек): в силосах – не менее 4 человек; в канализационных колодцах – не менее 3 человек.

Перед спуском в аппарат или емкость рабочий проходит инструктаж, проверяет в присутствии руководителя работы подгонку маски по лицу, при необходимости надевает спасательный пояс с сигнальной веревкой, берет аккумуляторную включенную взрывозащищенную электролампу напряжением 12 В и осторожно, не имея в руках никаких предметов, опускается в емкость.

Спуск рабочего в емкость производится при обязательном присутствии лица, ответственного за производство работ и наблюдающего дублера. Для

емкостей, имеющих верхние и нижние люки, допуск рабочих внутрь емкости осуществляется только через нижний люк. Продолжительность пребывания рабочего в емкости устанавливается инструкцией по производству работ внутри емкостей в зависимости от условий выполняемых в них работ. При работе с применением противогаза срок одновременного пребывания рабочего в емкости не должен превышать 15 мин, с последующим отдыхом на свежем воздухе в течение 15 мин.

Статическое электричество

Главным источником формирования данного фактора является возможностью возникновения заряда статического электричества вследствие трения слоев газа и конденсата друг о друга, или со стенкой трубы (оборудования).

Электрические заряды при перекачке нефтепродуктов возникают как в самом нефтепродукте, так и на стенках сосудов, трубопроводов, в которых она находится. Величина возникающего заряда статического электричества в некоторых случаях достаточна для возникновения мощного электрического разряда, который может послужить источником зажигания и возникновения пожара.

Технологические операции с нефтепродуктами, являющимися хорошими диэлектриками, сопровождаются образованием электрических зарядов – статического электричества. Для устранения опасности разрядов статического электричества при технологических операциях необходимо предусматривать следующие меры:

- заземление резервуаров, цистерн, трубопроводов;
- снижение интенсивности генерации зарядов статического электричества путем уменьшения скорости налива при правильном подборе диаметра трубопровода.

ГОСТ 12.4.124-83 ССБТ. Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования. В зависимости от назначения делит СИЗ от статического электричества на:

- специальную одежду антиэлектростатическую;
- специальную обувь антиэлектростатическую;
- предохранительные приспособления антиэлектростатические (кольца и браслеты);
- средства защиты рук антиэлектростатические.

Для изготовления антиэлектростатической специальной одежды должны применяться материалы с удельным поверхностным электрическим сопротивлением не более 107 Ом.

Сопротивление подошвы специальной обуви от 106 до 108 Ом.

Напряжение электропитания - трехфазное 380/220 В, частотой 50 Гц по двум вводам от двух независимых источников - основное напряжение - по I категории. Выполнено заземление оборудования, обеспечивающее безопасность обслуживания персонала при эксплуатации и ремонте, молниезащита объекта.

Опасность воздействия электрического тока на организм человека зависит от электрического сопротивления тела и приложенного к нему напряжения, силы тока, длительности его воздействия, путей прохождения тока через человека, рода и частоты тока, индивидуальных особенностей человека, окружающей среды и ряда других факторов.

Существенное влияние на исход действия электрического тока оказывает путь прохождения тока в теле человека: чем больше жизненно важных органов подвержено действию тока, тем тяжелее исход поражения. Согласно ГОСТ ИЕС 61140-2012 для максимальной защиты персонала необходимо предпринимать следующие меры:

- изолировать токоведущие части оборудования;

- заземлять точки источника питания или искусственной нейтральной точки;

- устанавливать знаки предостережения в местах повышенной опасности.

4.3. Экологическая безопасность

Настоящий раздел разработан в соответствии с требованиями действующих нормативных и проектных документов, и законодательством в области охраны окружающей природной среды.

Литосфера

При проведении ремонтных работ возможен розлив масла или его отработки в окружающую среду.

В целях охраны литосферы от негативного воздействия предусматривается:

- использование специальных емкостей для хранения отработанного масла;
- функционирование заводов по переработке отработанного масла;
- правильная организация работ для предотвращения пролива масла;
- наличие трубопроводов для транспортировки отработанного масла в емкости для хранения.

Гидросфера

Благодаря наличию на дожимной компрессорной станции пяти агрегатов, установленных вблизи друг к другу, то поступления токсичных веществ в гидросферу будет носить локальный характер.

В целях исключения загрязнения водоносного горизонта пресных вод при выполнении ремонта и эксплуатации используется специальный трубопровод и емкости для транспортировки и хранения масла, промывочной жидкости, а также других жидкостей, используемых при эксплуатации газоперекачивающего агрегата.

Атмосфера

Основная деятельность, на Мыльджинском месторождении – подготовка, добыча и транспортировка газа и конденсата. Основными существующими источниками выброса в атмосферу являются:

- факел - организованный источник выбросов углеводородов по метану, диоксида азота, оксида углерода, диоксида углерода, сажи, бенз(а)пирена;

- свеча рассеивания на ГПА, БКС ННГ, БКС СГУ - организованный источник выбросов углеводородов по метану;

- неплотности фланцевых соединений запорно-регулирующей арматуры – неорганизованные источники выбросов предельных углеводородов; - неплотности соединений ЗРА, компрессоров и сепараторов, расположенных на площадке ДКС;

- газонефтепровод - неорганизованный источник выбросов предельных углеводородов;

Загрязняющие вещества (ЗВ), выбрасываемые в атмосферу от существующих источников, относятся к 1 – 4 классам опасности.

В условиях равнинного рельефа месторождения и отсутствия препятствий, вытянутых в одном направлении, возможность длительного застоя выбрасываемых ЗВ исключается. Минимизация негативного воздействия на атмосферный воздух территории разработки достигается:

- полной герметизацией технологического оборудования;
- контролем швов сварных соединений трубопроводов;
- защитой оборудования от коррозии;
- оснащением предохранительными клапанами всей аппаратуры, в которой может возникнуть давление, превышающее расчетное;
- испытание оборудования и трубопроводов на прочность и герметичность после монтажа;
- сбросом газа с предохранительных клапанов на факел.

4.2. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Анализ возможных ЧС

Взрыв и пожар представляет собой большую опасность, как для персонала, так и для окружающей среды. Причиной возникновения пожара и взрыва на установках промысла является разгерметизация трубопровода вследствие человеческого фактора, износа оборудования или стихийного бедствия.

Пожарная и взрывная безопасность

Возможные источники и причины пожаров и взрывов на рабочем месте:

- наличие легковоспламеняющихся жидкостей и взрывопожароопасных паров;
- наличие в котельной источника открытого огня и нагретых поверхностей;
- возможная разгерметизация трубопроводов или оборудования;
- наличием электрооборудования; - наличие нагретых поверхностей оборудования и трубопроводов;
- несоблюдение правил хранения смазочных масел и обтирочных материалов;
- возможность возникновения заряда статического электричества вследствие трения слоев нефтепродуктов друг о друга или со стенкой трубы.

Для обеспечения контроля возникновения пожара во взрыво- и пожароопасных зонах устанавливаются взрывозащищенные извещатели пожарные типа ИП, ручные типа ИПР и оповещатели (устанавливаются снаружи вне опасной зоны).

Главная задача при возникновении пожара – его локализация. Небольшие загорания, а также пожары в начальной стадии могут быть успешно ликвидированы обслуживающим персоналом первичными средствами пожаротушения: порошковые и углекислотные

огнетушители, асбестовые полотна, грубошерстные ткани (кошма, войлок), песок.

При проведении процесса соляно-кислотной обработки существует риск возникновения ЧС.

ГОСТ Р 22.0.07-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники техногенных чрезвычайных ситуаций. Классификация и номенклатура поражающих факторов и их параметров характеризует и классифицирует 78 основные виды ЧС.

Поражающие факторы при возникновении чрезвычайных ситуаций делятся на факторы химического и физического воздействия.

К наиболее опасным факторам стоит отнести тепловое воздействие и воздушную ударную волну.

Все работники должны пройти инструктаж и сдать тестирования на знания техники пожарной безопасности и порядка действий в случае возникновения аварии.

Непосредственно перед началом работ необходимо проведение дополнительного инструктажа.

В случае возникновения чрезвычайных ситуаций в первую очередь требуется покинуть опасную зону, по возможности оказав помощи коллегам.

Удалившись на достаточное расстояние, следует сообщить специальные службы о произошедшем и следовать их инструкциям.

Необходимо помнить, что самое важное при ЧС – сохранение жизни и здоровья сотрудников.

ВЫВОД

Газовая промышленность является на сегодняшний день одной из наиболее опасных отраслей производства из-за сложности его переработки и разделения на требуемые фракции. Для выполнения требований заказчика и потребителя требуется высокотехнологичное оборудование, обучение персонала для умения правильной эксплуатации, а также немаловажным

аспектом является – деятельность в районах с тяжелыми климатическими условиями, где требуется эти работы выполнять.

В рамках рассмотрения социальной части в данной работе, были рассмотрены следующие аспекты:

- правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности;
- производственная безопасность;
- экологическая безопасность;
- безопасность в чрезвычайных ситуациях.

В результате проведён анализ опасных факторов при проведении технологии, рассмотрены превентивные меры по предупреждению, ликвидации последствий.

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

В настоящее время во всем мире актуальными проблемами являются рациональное природопользование, а также энергоэффективность и энергосбережение. В нашей стране эти темы также немаловажны и относятся к приоритетным направлениям развития науки и техники Российской Федерации, с учётом прогноза развития до 2030 года.

Проведение расчётов газотурбинного двигателя и модернизация его вспомогательных систем может позволить более экономично использовать двигатель на объектах добычи нефти и газа. Выявление зависимостей, которые позволят отследить потери мощности, её приобретение за счёт изменения какого-либо параметра или модернизации систем является также актуальной задачей для изготовителей, проектных организаций. С этой целью необходимо рассчитать и сформировать бюджетный фонд, для проведения научной работы.

5.1. Предпроектный анализ

5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Продукт: газотурбинный двигатель «Д-30ЭУ». Для анализа используем целевой рынок, а именно: нефтегазовые компании.

Таблица 8 – нефтяные и газовые компании

		Вид исследования газотурбинного двигателя		
		Изучение парка газотурбинных двигателей	Выявление актуальной методики расчета	Выполнение расчетов компрессора
Размер компании	Крупные			
	Средние			
	Мелкие			

 - «Востокгазпром»  - «NordImperial»  - «Руснефть»

На сегодняшний день актуальность выбора газотурбинных приводов имеет место в силу того, что газовые скважины истощаются и для того чтобы пустить газ в переработку необходимо относительно высокое давление и поэтому добывающие компании включают в газовые промыслы дожимные компрессорные станции. На данных станциях используются газотурбинные двигатели в качестве привода газоперекачивающих агрегатов. Выбор газотурбинного двигателя «Д-30ЭУ» с экономической точки зрения аргументируется надёжностью и долговечностью работы, высокой производительностью и простотой в эксплуатации.

Выполнение необходимых и актуальных расчётов, их усовершенствование, выявление зависимостей, которые могут позволить эксплуатировать и производить двигатели более экономичными, использовать всю энергию сгораемого топлива и переводить её в полезную мощность - актуальная задача.

Исследование различных проблем, возникающих в процессе работы двигателя, является немаловажной частью, т.к. их решение будет способствовать сохранению бюджета компании, рабочей силы обслуживающего персонала.

Моделирование рабочих элементов имеет важную роль для выявления проблем. При их создании в специальных программах, типа «SolidWorks», «Ansys», имеется возможность исследовать все силы, действующие на рабочие элементы, как они будут вести себя в рабочем режиме, выявление максимальных нагрузок, и как эти нагрузки повлияют на механизмы. На основе моделирования ведётся исследование, учитываются все силы, возникающие в процессе работы, а также приводятся возможные последствия от воздействия этих сил.

5.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для её будущего повышения. Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты.

Таблица 9 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Срок службы	0,13	2	2	3	0,26	0,26	0,39
2. Ремонтопригодность	0,1	3	2	2	0,3	0,2	0,2
3. Надежность	0,12	2	4	2	0,24	0,48	0,24
4. Простота ремонта	0,1	4	3	4	0,4	0,3	0,4
5. Удобство в эксплуатации	0,08	3	4	2	0,24	0,32	0,16
6. Уровень шума	0,11	3	3	4	0,33	0,33	0,44
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	2	4	3	0,06	0,12	0,09
2. Уровень проникновения на рынок	0,08	3	4	2	0,24	0,32	0,16
3. Цена	0,1	4	3	3	0,4	0,3	0,3
4. Предполагаемый срок	0,07	2	4	4	0,14	0,28	0,28

эксплуатации							
5. Послепродажное обслуживание	0,06	4	4	3	0,24	0,24	0,18
6. Наличие финансирования поставщиками оборудования	0,02	4	2	3	0,08	0,04	0,06
Итого	1	36	39	35	2,93	3,19	2,9

Б_ф – Применение газотурбинного двигателя «НК-16»;

Б_{к1} – Применение газотурбинного двигателя «ПС-90»;

Б_{к2} – Применение газотурбинного двигателя «Д-30ЭУ».

По таблице 9 видно, что наиболее эффективно использование газотурбинного двигателя «Д-30ЭУ», так же он является наиболее конкурентоспособным к другим видам, так как обладает рядом преимуществ, например, простота эксплуатации, высокая надёжность, относительно низкая стоимость.

По сравнению с другими компаниями, например, компания «Искра», имеет высокий рейтинг из-за дополнительных возможностей, предоставляемых компанией, одной из них является длительный срок гарантийного обслуживания.

$$k1 = \frac{Бф}{Бк1} = \frac{39}{36} = 1,1 \quad (64)$$

5.1.3. SWOT – анализ

SWOT-анализ представляет собой комплексный анализ инженерного проекта. Его применяют для того, чтобы перед организацией или менеджером проекта появилась отчётливая картина, состоящая из лучшей возможной информации и данных, а также сложилось понимание внешних сил, тенденций и подводных камней, в условиях которых научно-исследовательский проект будет реализовываться.

В первом этапе обычно описываются сильные и слабые стороны проекта, а также возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Результаты первого этапа SWOT-анализа:

1. Сильные стороны научно- исследовательского проекта:

- Простота механизма;
- Отсутствие необходимости закупки лабораторных стендов для проведения исследований;
- Использование 3D моделирования;
- Определение актуальных расчётов для выявления зависимости мощностных характеристик.
- Квалифицированный персонал.

2. Слабые стороны научно - исследовательского проекта:

- Использование некоторых упрощений (например, не учитываем материалы взаимодействующих деталей);
- Отсутствие возможности проверки предлагаемых технических решений на лабораторных стендах;
- Возможность возникновения ошибок в программном обеспечении.

3. Возможности:

- Использование информации предприятий, эксплуатирующих данные системы;
- Сотрудничество с представителями данной продукции на семинарах;
- Существование потенциального спроса на данное исследование со стороны газовых предприятий;
- Получение гранта для дальнейших исследований;

4. Угрозы:

- отсутствие возможности внедрения разработок;
- развитие принципиально новых технологий.

После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа.

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых

сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 10 –Интерактивная матрица возможностей и сильных сторон проекта

Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	-	+	-
	B2	-	-	0	-+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие возможности и сильные стороны проекта: B1C1C3, B2C4.

Таблица 11 - Интерактивная матрица возможностей и слабых сторон проекта

Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	-	0	-
	B2	-	-	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить то что слабых сторон данный проект не имеет.

Таблица 12 - Интерактивная матрица угроз и сильных сторон проекта

Угрозы проекта		C1	C2	C3	C4
	У1	-	-	-	-
	У2	0	0	-	+

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие угрозы и сильные стороны проекта: У2С4.

Таблица 13 - Интерактивная матрица угроз и слабых сторон проекта

		Сл1	Сл2	Сл3
--	--	-----	-----	-----

Угрозы проекта	У1	+	+	+
	У2	+	0	-

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие угрозы и сильные стороны проекта: У1Сл1Сл2Сл3, У2Сл1.

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа (табл.14).

Таблица 14 - Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1: Простота механизма;</p> <p>С2.Отсутствие необходимости закупки лабораторных стендов для проведения исследований; С3. Использование 3D моделирования;</p> <p>С4.Определение возможных причин потери мощности.</p> <p>С5. Квалифицированный персонал.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Использование некоторых упрощений (например, не учитываем материалы взаимодействующих деталей);</p> <p>Сл2. Отсутствие возможности проверки предлагаемых технических решений на лабораторных стендах;</p> <p>Сл3. Возможность возникновения ошибок в программном обеспечении.</p>
<p>В1. Использование информации предприятий, эксплуатирующих данные системы;</p> <p>В2. Сотрудничество с представителями данной продукции на семинарах;</p> <p>В3. Существование потенциального спроса на данное исследование со стороны газовых предприятий;</p> <p>В4. Получение гранта для дальнейших исследований;</p>	<p>В1С1С3 – возможность заимствования паспортных данных у завода- изготовителя для проведения расчетов;</p> <p>В2С4 – большое количество квалифицированного персонала, которые могут провести данные расчеты, покрывает спрос на исследование;</p> <p>Мероприятия, которые позволят использовать сильные стороны и возможности: используем паспортные данные и устройство по эксплуатации данного оборудования в целях добычи необходимой</p>	<p>У2Сл1- угроза развития принципиально новых технологий за счет использования новых менее изнашивающихся материалов. Необходимо исследовать и изучить материалы, которые используются в исследуемых механизмах.</p>

	информации для проведения исследований.	
Угрозы: У1. Отсутствие возможности внедрения разработок; У2. Развитие принципиально новых технологий.	У2С5– возможно развитие конкурентных разработок, если при их создании участвует квалифицированный персонал; Мероприятия по предотвращению угроз благодаря сильным сторонам: используем документацию поставщика для проведения исследований соответственно внедряем разработки и развиваем новые технологии.	У1Сл1Сл2Сл3– возможно отсутствие спроса на данное исследование вследствие: применения некоторых упрощений при моделировании, учета только одного вида нагрузки, наличия некоторых погрешностей при отсутствии возможности проверки результатов; У2Сл1– возможно развитие конкурентных исследований вследствие осуществления более точных расчетов при минимальных упрощениях в проекте;

5.2. Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ.

По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

В данном разделе составим перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проведем распределение исполнителей по видам работ.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в табл.15

Таблица 15 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудовые затраты, ч
1	Зиякаев Г.Р., НИ ТПУ, к.т.н., доцент	Руководитель	Выбор направления исследований, формулировка темы, консультации и обсуждение полученных результатов	536

2	Тельцов А.В., НИ ТПУ, бакалавр	Исполнитель	Разработка плана работ, выполнение работ, обсуждение полученных результатов	920
Итого				1456

5.2.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (65)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{ч_i}, \quad (66)$$

где

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

5.2.3. Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} * k_{\text{кал}}, \quad (67)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;
 $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (68)$$

где $T_{\text{кал}} = 365$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}} = 51$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}} = 14$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 51 - 14} = 1,22 \quad (69)$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округляем до целого числа.

Все рассчитанные значения сведены в табл. 16.

Таблица 16 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_{ki}
	t_{min} , Чел-дни	t_{max} , Чел-дни	$t_{\text{ож}}$, Чел-дни			

Календарное планирование работ по теме	3	6	4,2	Руководитель, Исполнитель	2	5
Составление и утверждение тех. задания	1	3	1,8	Руководитель	2	2
Подбор и изучение материалов по теме	10	15	12	Исполнитель	12	15
Согласование материалов по теме	5	8	6,2	Руководитель	6	8
Проведение теоретических расчетов и обоснование	6	18	10	Исполнитель	10	12
Проектирование и моделирование	3	12	6,6	Исполнитель	7	8
Оценка результатов исследования	3	5	3,8	Руководитель, Исполнитель	2	5
Составление пояснительной записки	7	16	11,4	Руководитель, Исполнитель	6	9

На основе таблицы 16 строим план график.

Таблица 17 – Календарный план график проведения НИР по теме

№ р	Вид работ	Испол- нители	Т _{кi} , кал. дни	Продолжительность выполнения работ															
				Фев.		Март			Апрель			Май							
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3					
1	Составление и	Р	3																

	утверждение тех. задания													
2	Подбор и изучение материалов по теме	И	18											
3	Согласование материалов по теме	Р	9											
4	Календарное планирование работ по теме	Р, И	3											
5	Проведение теоретических расчетов и обоснование	И	15											
6	Проектирование рабочего элемента ГТУ	И	10											
7	Оценка результатов исследования	Р, И	3,8											
8	Составление пояснительной записки	Р, И	9											

 - руководитель  - исполнитель

5.2.4. Бюджет научно-технического исследования

Затраты на специальное оборудование и материальные затраты отсутствуют, поскольку настоящее исследование не требует закупки оборудования, сырья, материалов, запасных частей. В моем научно-техническом исследовании изготовление опытного образца не производится, поэтому затраты на его производство отсутствуют.

Для проведения научного исследования нам необходим компьютер, с установленным на него специальных программ и с нужным нам программным обеспечением.

Затраты на покупку компьютера:

$$З = d_k + d_{по} = 24000 + 2000 = 26000 \text{ руб.} \quad (70)$$

где d_k – стоимость компьютера;

$d_{по}$ – стоимость программного обеспечения.

Установка специальных программ для исследования и моделирования объекта производится бесплатно.

Основная заработная плата исполнителей темы

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, а также рабочих опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется на основе трудоемкости выполняемых работ и действующей системы тарифных ставок и окладов. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада.

Таблица 18 - *Расчет основной заработной платы*

№	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.	Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу(окладу), тыс. руб.
1	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, Исполнитель	2	1,16	2,32
2	Выбор темы исследований	Руководитель	7	0,93	6,51
3	Составление и	Руководитель	2	0,93	1,86

	утверждение тех. задания				
4	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель	12	0,23	2,76
5	Проведение теоретически х расчетов и обоснование	Исполнитель	8	0,23	1,84
6	Проектирован ие рабочих элементов двигателя	Исполнитель	6	0,23	1,38
7	Оценка результатов исследования	Руководитель, Исполнитель	4	1,16	4,64
8	Составление пояснительно й записки	Руководитель, Исполнитель	5	1,16	5,8
Итого:					27,11

Настоящая статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением научно-технического исследования, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (71)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = T_p \cdot Z_{дн}, \quad (72)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51413 \cdot 10,4}{199} = 2661 \text{ руб.}, \quad (73)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб.дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Таблица 19–Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
- выходные		
- праздничные	118	118
Потери рабочего времени:		
- отпуск	48	72
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	175

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 23264 \cdot (1 + 0,3 + 0,4) \cdot 1,3 = 51413 \text{ руб.},$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{тс}$);

k_d – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 - 0,5 (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: 15- 20 % от $Z_{тс}$);

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Тарифная заработная плата $Z_{тс}$ находится из произведения тарифной ставки работника 1-го разряда $T_{ci} = 600$ руб. на тарифный коэффициент k_t и учитывается по единой для бюджетной организации тарифной сетке. Для предприятий, не относящихся к бюджетной сфере, тарифная заработная плата (оклад) рассчитывается по тарифной сетке, принятой на данном предприятии.

За основу оклада берется ставка работника ТПУ, согласно занимаемой должности. Из таблицы окладов для доцента (степень – кандидат наук) – 23264 руб., для ассистента (степень отсутствует) – 14584 руб.

Таблица 20–Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_{тс}$, тыс. руб.	$k_{пр}$	k_d	k_p	Z_m , тыс. руб.	$Z_{дн}$, тыс. руб.	T_p , раб. дн.	$Z_{осн}$, тыс. руб.
Руководитель	23264	0,3	0,4	1,3	51413	2,674	20	53,48
Исполнитель	14584	0	0	1,3	18959	1,126	37	41,66
Итого:								95,14

Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с

обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,13 \cdot 53480 = 6952 \text{ руб}; \quad (74)$$

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,13 \cdot 41660 = 5416 \text{ руб}, \quad (75)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,302 \cdot (53480 + 6952) = 18250 \text{ руб},$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст.58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, в 2020 году ставка – 30,2%.

Таблица 21–Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб	Дополнительная заработная плата, тыс. руб
-------------	-------------------------------------	---

	Исп. 1	
Руководитель	53,480	6,952
Исполнитель проекта	41,660	5,416
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302	
Итого		
Исполнение 1	29,134	

Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{накл}} &= (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{\text{нр}} = (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) \cdot 0,16 = \\
 &= (95140 + 12368 + 29134) \cdot 0,16 = 21863 \text{ руб,}
 \end{aligned}$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

5.3. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 22–Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	95140	
2. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	12368	
3. Отчисления во внебюджетные фонды	29134	
4. Затраты на покупку компьютера	28000	
5. Прочие расходы	21863	
6. Бюджет затрат НИИ	186505	Сумма ст. 1-5

5.4. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования.

Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчёта (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{186505}{186505} = 1, \quad (76)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп } i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость *i*-го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (77)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэф.	Рабочая лопатка силовой турбины с изменённым углом атаки	Использование энергии выхлопных газов для компрессора газогенератора	Модернизация воздухоочистительного устройства компрессора ГТУ
1. Безопасность	0,1	4	4	5
2. Удобство в эксплуатации	0,15	3	4	4
3. Срок службы	0,15	3	3	5
4. Ремонтопригодность	0,20	3	5	5
5. Надёжность	0,25	4	4	4
6. Материалоёмкость	0,15	4	3	5
Итого:	1	3,5	3,9	4,6

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 4,6.(78)$$

$$I_p = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 = 3,9.(79)$$

$$I_p = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 4.(80)$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет высокое значение, что говорит об эффективности использования технического проекта.

Таким образом, проведение исследований газотурбинного двигателя «Д-30ЭУ» являются актуальными, т.к. модернизация двигателя сделает его более конкурентоспособным и позволит потребителям затрачивать минимальные ресурсы для его эксплуатации.

Вывод

В ходе выполнения данной части выпускной работы была доказана конкурентоспособность данного технического решения, а также определены действующие потребители газотурбинного оборудования. Были приведены аргументы выбора данного оборудования добывающими предприятиями.

Выполнен анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения, где приведены критерии оценки. Приведена оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений, которая стала инструментом для анализа и выбора конкурентоспособного двигателя.

Был выстроен календарный план график проведения НИР по теме, который является немаловажной частью, которая определяет временные ресурсы, потраченные на выполнение данной работы.

Был произведен SWOT-анализ. В данном анализе были приведены сильные и слабые стороны научно - исследовательского проекта, а также возможности и угрозы. Также был посчитан бюджет НИИ равный 186505 руб., основная часть которого приходится на зарплаты сотрудников. Предложение технических решений по результатам расчётов и вариантов модернизации позволит предприятию использовать двигатель более

эффективно и продолжительно, увеличит его ресурс, а также сохранит средства, силы обслуживающего персонала.

Заключение

В результате выпускной квалификационной работы:

1. Изучен современный парк конвертируемых газотурбинных двигателей.
2. Выполнен тепловой расчет ГТУ при номинальном и переменном режиме работы.
3. По результатам расчета переменного режима работы, определена следующая закономерность мощностных потерь:

Выявлена явная зависимость развиваемой мощности ГТУ от параметров атмосферного воздуха. При увеличении температуры засасываемого воздуха мощность и КПД ГТУ снижаются. Но картина меняется на обратную при понижении температуры атмосферного воздуха: мощность и эффективный КПД увеличиваются.

4. Предложено техническое решение, позволяющее повысить полезную мощность и производительность ГТУ в условиях высоких температур. Данное техническое решение, позволяет не терять мощность при увеличении температуры воздуха на входе. Суть заключается в принудительном охлаждении воздуха на входе перед воздухоочистительным устройством. Данное решение позволит контролировать температуру, а следовательно и мощность ГТУ.

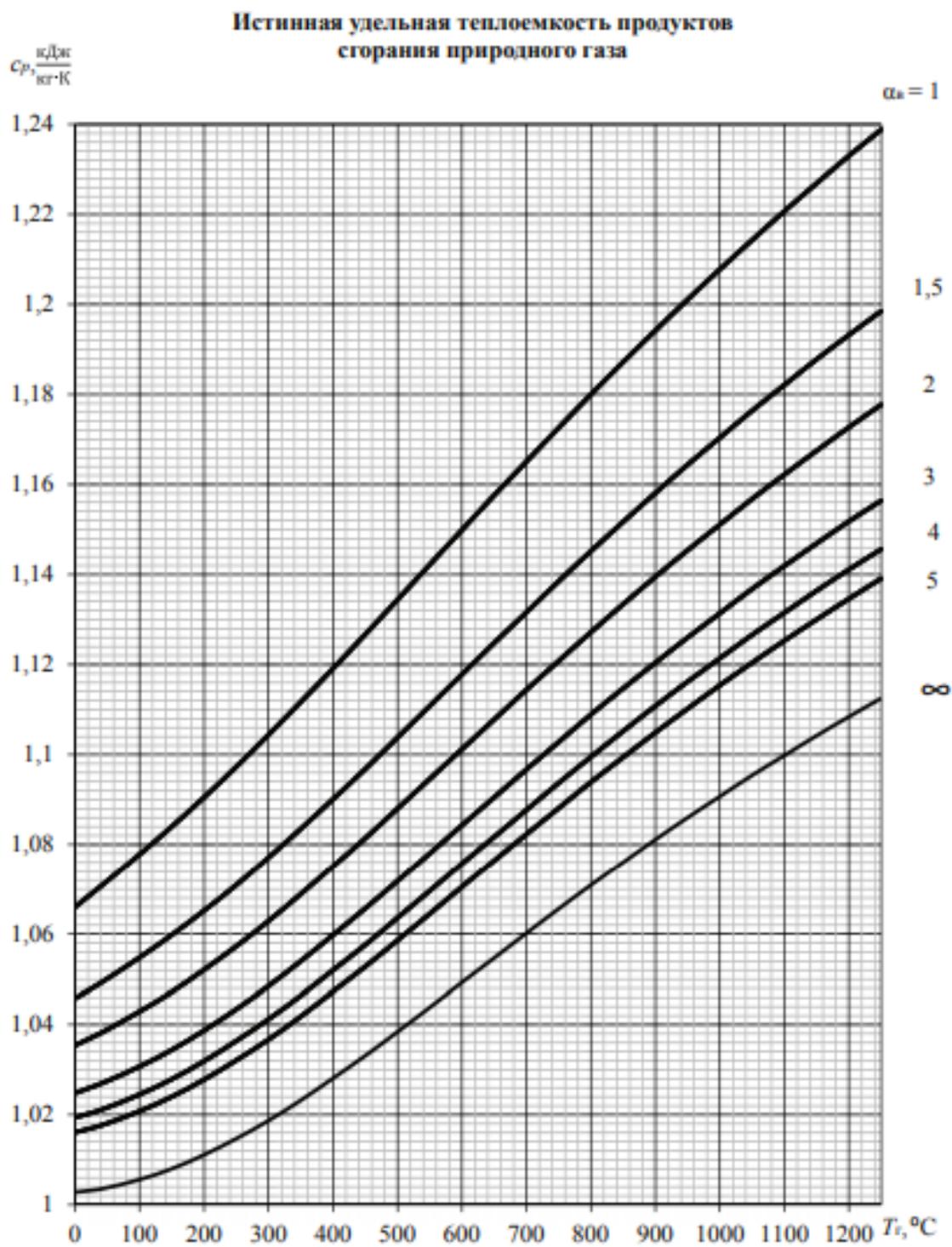
Список используемых источников

1. Тепловой расчет схем приводных газотурбинных установок на номинальный и переменный режимы работы: Учебное пособие / Б.С.Ревзин, А.В. Тарасов, В.М. Марковский. Екатеринбург: ГОУ УГТУ – УПИ, 2001. 61с.
2. Тепловые и газодинамические расчеты газотурбинных установок/ Учебное пособие/ .В. Комаров, В. Л. Блинов
3. Газотурбинные установки. Конструкции и расчет./ Справочное пособие под общ.ред. Л. В. Арсеньева и В. Г. Тырышкина. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1978, 232с.
4. Нечаев Ю.Н., Федоров Р.М. Теория авиационных газотурбинных двигателей. М: Машиностроение, 1977. Ч1.312 с.
5. Газодинамический расчет ступени газовой турбины: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию/ И. Д. Ларионов. Свердловск: УПИ, 1989, 37с.
6. Газодинамический расчет многоступенчатой газовой турбины: Методические указания к курсовому проектированию по курсу “Турбомашины”/ Б. С. Ревзин, В. Г. Шамрук. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1994. 31с.
7. Тиханов А.Д., Ерголин М.Г. Обобщение опыта эксплуатации КС с турбоагрегатами ГПА - Ц-16.- М :ВНИИЭгазпром, 1985. 55 с.
8. Газотурбинный двигатель со свободной турбиной НК-16СТ. Техническое описание 16.000.000 ТО, 1981.98 с.
9. Отт К.Ф. Основы технической эксплуатации компрессорных цехов с газотурбинным приводом (ОТЭ). ИРЦ. М.: Газпром, 1996,68.
10. Ревзин Б.С., Ларионов И.Д. Газотурбинные установки с нагнетателем для транспорта газа. Справочное пособие. М.: Недра, 1991. 303с.

11. ГОСТ 19.402-78 Единая система программной документации. Описание программы.
12. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
13. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
14. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
15. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
16. ГОСТ 12.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
17. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
18. ГОСТ 12.1.008-76 ССБТ. Биологическая безопасность. Общие требования.
19. Основные данные о производственных опасностях и организационных мероприятиях, обеспечивающих минимальный уровень опасности производства [Электронный ресурс]. – URL: <http://vunivere.ru/work33189/page4> (дата обращения: 16.03.2017).
20. ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением №1). - М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 4 с.
21. ГОСТ 19.402-78 Единая система программной документации. Описание программы.
22. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
23. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.

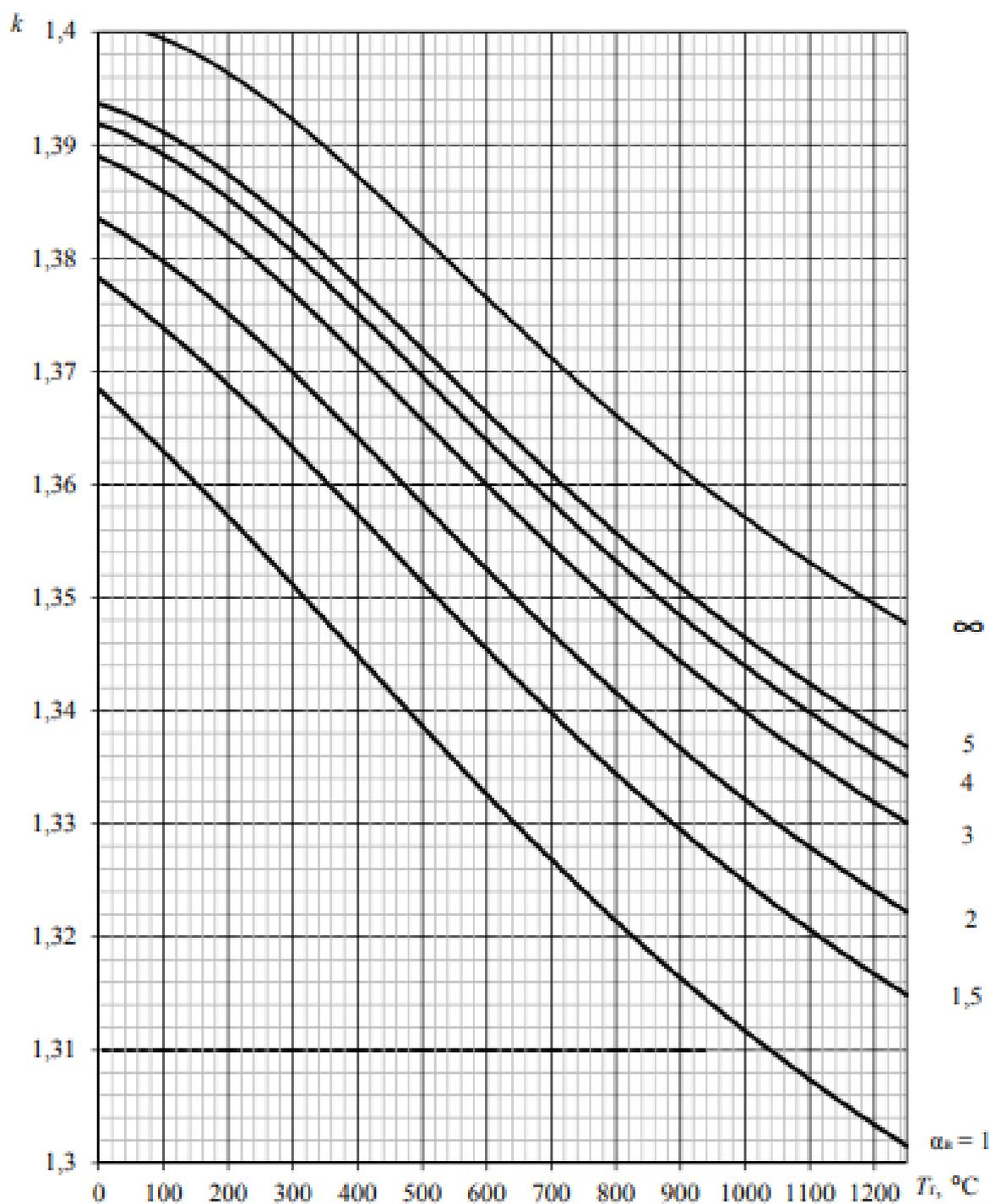
24. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
25. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
26. ГОСТ 12.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности.
27. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.
28. ГОСТ 12.1.008-76 ССБТ. Биологическая безопасность. Общие требования.
29. Основные данные о производственных опасностях и организационных мероприятиях, обеспечивающих минимальный уровень опасности производства [Электронный ресурс]. – URL: <http://vunivere.ru/work33189/page4> (дата обращения: 16.03.2020).
30. ГОСТ 12.0.003–74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация (с Изменением №1). - М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 4 с.
31. Федеральный закон от 27.07.2006 № 149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» (последняя редакция).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Истинный показатель адиабаты продуктов сгорания
природного газа



ПРИЛОЖЕНИЕ 3

