

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

Школа Инженерная школа энергетики
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Математическое моделирование элементов ГТД для исследования характеристик их работы

УДК 621.311.22.002.5:621.165

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ92	Герасимов Ян Маркович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Галашов Н.Н.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Е.С. Киселёва	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент Отделения общетехнических дисциплин	М.С. Черемискина	—		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.04.01. Теплоэнергетика и теплотехника, Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	В.И. Максимов	к.т.н., доцент		

Томск – 2021 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы магистра по направлению в соответствии целями основной образовательной программы, видами и задачами профессиональной деятельности, указанными в ФГОС ВО 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код компетенции	Наименование компетенции
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий
ПК(У)-2	Способен осуществлять научное руководство в области энергетики
ПК(У)-3	Способен организовывать и осуществлять работу по эксплуатации ТЭС и АЭС с учетом требований экономичности, экологической и технологической безопасности
ПК(У)-4	Способен участвовать в разработке комплексных проектов ТЭС и АЭС, их оборудования и технологических систем
ПК(У)-5	Способен ставить и решать инновационные задачи по совершенствованию технологии производства и отпуска электроэнергии и теплоты

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

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ :
Руководитель ООП

 В.И. Максимов
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

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

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ92	Герасимову Яну Марковичу

Тема работы:

Математическое моделирование элементов ГТД для исследования характеристик их работы	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№105-51/с от 15.04.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1 июня 2021 года
--	------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Данные учебных, специальных справочных и периодических источников.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none">1. Введение.2. Обзор и анализ научно-технической литературы по теме.3. Описание математических моделей.4. Разработка расчетных математических моделей основных элементов ГТД.5. Исследования характеристик элементов ГТД на математических моделях.

	6. Социальная ответственность. 7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 8. Заключение.
Перечень графического материала	—
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Черемискина М.С., ассистент Отделения общетехнических дисциплин
Финансовый менеджмент	Киселёва Е.С., доцент Отделения социально-гуманитарных наук
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: Обзор литературы.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.12.20
---	----------

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Галашов Николай Никитович	к.т.н., доцент		01.12.20

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ92	Герасимов Ян Маркович		01.12.20

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ92	Герасимову Яну Марковичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение (НОЦ)	НОЦ им. И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

Математическое моделирование элементов ГТД для исследования характеристик их работы	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: газотурбинный двигатель. Область применения: газотурбинная электростанция.
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. 	Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере" ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Анализ вредных факторов: - Параметры микроклимата - Освещенность рабочего места - Уровень шума - Уровень электромагнитных излучений - Уровень ионизации воздуха Анализ опасных факторов: - Опасность поражения электрическим током
3. Экологическая безопасность:	Атмосфера: выброс парниковых газов Гидросфера: утилизация сточных вод Литосфера: утилизация компьютеров, другой оргтехники и люминесцентных ламп
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: буря, ураган, землетрясение, пожар, наводнение, террористический акт и т.п. Наиболее типичная ЧС: пожар

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	17.02.2021
--	------------

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ92	Герасимов Ян Маркович		17.02.2021

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

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ92	Герасимову Яну Марковичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы (НОЦ)	НОЦ им. И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ; Бюджет НИ: 86722 руб.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	30% премии; 20% надбавки; 16% накладные расходы; 30% районный коэффициент.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды – 30,2 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Сегментирование рынка, SWOT-анализ.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Указание участников проекта, составление бюджета исследования.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Календарный план проекта, диаграмма Гантта, реестр рисков.
4. <i>Определение ресурсной эффективности</i>	Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сегментирование рынка
2. Матрица SWOT
3. График проведения НТИ
4. Оценка ресурсной и финансовой эффективности НТИ
5. Реестр рисков
6. Бюджетирование

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2021
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШБИП	Киселева Е.С.	К.Э.Н.		01.03.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ92	Герасимов Ян Маркович		01.03.2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 107 с., 23 рис., 19 табл., 31 источник, 2 прил.

Ключевые слова: (математическая) модель, газотурбинный двигатель, газотурбинная установка, характеристики, расчет.

Объектом исследования является газотурбинный двигатель.

Цель работы – создание математической модели газотурбинного двигателя и изучение на ее основе характеристик двигателя.

В процессе исследования проводились сбор и изучение информации по теме, создание математической модели путем написания автоматизированной программы в среде «Microsoft Excel», которая включает в себя расчет схемы простой газотурбинной установки, а также узлов газотурбинного двигателя – осевого компрессора, камеры сгорания и газовой турбины. На базе изученной литературы и созданной математической модели были произведены исследования характеристик газотурбинного двигателя в зависимости от различных факторов.

В результате исследования создана универсальная математическая модель газотурбинного двигателя, позволяющая производить автоматический расчет агрегата при различных исходных данных.

Степень внедрения: проект реализован.

Область применения: энергетика, добывающие отрасли, сельское хозяйство, сфера ЖКХ, металлургическая промышленность, проектирование и разработка.

Экономическая эффективность/значимость работы: существенная экономия времени при изучении характеристик проектируемых газотурбинных двигателей.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ГТУ – Газотурбинная установка;

ГТД – Газотурбинный двигатель;

ГТ – Газовая турбина;

КС – Камера сгорания;

ОК – Осевой компрессор;

ММ – Математическое моделирование (модель);

КПД – Коэффициент полезного действия;

ЧС – Чрезвычайная ситуация;

МГТД – малогабаритный турбодвигатель.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	11
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	12
2. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ.....	26
3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТД.....	29
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВ ГТД.....	39
4.1. Моделирование осевого компрессора	39
4.2. Моделирование камеры сгорания	45
4.3. Моделирование газовой турбины	48
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	56
6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	87
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	88
Приложение А	91
Приложение Б.....	94

ВВЕДЕНИЕ

Энергетика – одна из самых широких и востребованных отраслей в мире, которая делится на множество различных сегментов. С момента зарождения этой отрасли она развивалась высокими темпами, что и происходит по сей день. Сегментирование энергетической отрасли обусловлено, в том числе, применяемыми способами получения электрической и тепловой энергии. В нашей стране и по всему миру широко применяются энергетические станции, использующие для своей работы традиционное топливо – углеводороды и ядерное топливо.

Исторически, развитие энергетики начиналось с применения классических паровых циклов, сердцем которых являлась паровая турбина. Однако дальнейшее развитие индустрии привело нас к открытию нового двигателя – газотурбинного. Использование газовых двигателей накладывает на себя огромное количество как плюсов, так и минусов, а также определенное количество различных аспектов. Все эти изыскания давно изложены в научных трудах отечественных и зарубежных ученых.

Поскольку газотурбинная отрасль энергетики является крайне перспективной, всегда был интерес к разностороннему изучению всевозможных аспектов применения газовых двигателей различного назначения. Следовательно, с целью соответствия современным тенденциям считается актуальным пополнить научно-исследовательскую базу по данному вопросу.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

С точки зрения энергетики, газотурбинный двигатель – это неотъемлемая часть газотурбинной установки (ГТУ). Газотурбинные установки нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. Исторически наибольшее распространение ГТУ получили при использовании их в качестве привода на дожимных и линейных компрессорных станциях магистральных газопроводов предприятий группы компаний ПАО «Газпром», а также у независимых поставщиков природного газа. С начала 2000-х годов, в связи с развитием энергетической отрасли, в России введено в эксплуатацию большое количество энергетических ГТУ большой мощности в составе парогазовых установок тепловых электрических станций. Кроме того, широкое распространение получили энергетические ГТУ малой мощности, которые используются в качестве электростанций собственных нужд в нефтегазовой, химической, металлургической и других отраслях промышленности, а также в качестве пиковых установок в электроэнергетическом секторе. Количество ГТУ различных типов стационарного применения, находящихся в эксплуатации в нашей стране, составляет более 5000 единиц и с каждым годом возрастает.

При проектировании ГТУ расчет начинается с выбора исходных данных:

- Атмосферных условий работы ГТУ;
- Эффективной мощности ГТУ;
- Минимального значения эффективности ГТУ;
- Номинальной частоты вращения ротора приводимого агрегата (центробежного газового компрессора, электрогенератора, насоса и др.)
- Полной начальной температуры рабочего тела в цикле.

В случае принятия решения о проектировании ГТУ на базе известного прототипа (установки со схожими исходными данными) дополнительными данными могут являться, например:

- Степень повышения давления в осевом компрессоре;
- Массовый расход воздуха через осевой компрессор ГТУ-прототипа;

- Частоты вращения роторов ГТУ-прототипа.

Газотурбинный двигатель (ГТД) – это тепловая машина, предназначенная для преобразования энергии сгорания топлива в кинетическую энергию реактивной струи и (или) в механическую работу на валу двигателя, основными элементами которой являются компрессор, камера сгорания и газовая турбина [8]. В данном случае, нас интересуют ГТД, относящиеся к стационарной энергетике. Такие ГТД является неотъемлемой частью газотурбинной установки (ГТУ).

В свою очередь, газотурбинная установка представляет собой конструктивно объединенную совокупность газотурбинного двигателя (двигателей) с входным и выходным устройствами, а также со всеми агрегатами и системами, необходимыми для его (их) эксплуатации на летательном аппарате, транспортном средстве или в энергетике и системе перекачки газа. В качестве систем можно применять теплоутилизационные контуры, паровые турбины, электрогенераторы и нагнетатели для перекачки разных сред [1].

В качестве энергетических ГТУ большой мощности наибольшее распространение получили одновальные (блокированные) и двухвальные схемы простого и сложного (в основном в составе ПГУ) циклов. В газовой промышленности для привода центробежных компрессоров природного газа получили большое распространение стационарные ГТУ со свободной силовой турбиной, выполняемые по простому или регенеративному открытому циклу. Принципиальные схемы таких ГТУ приведены ниже:

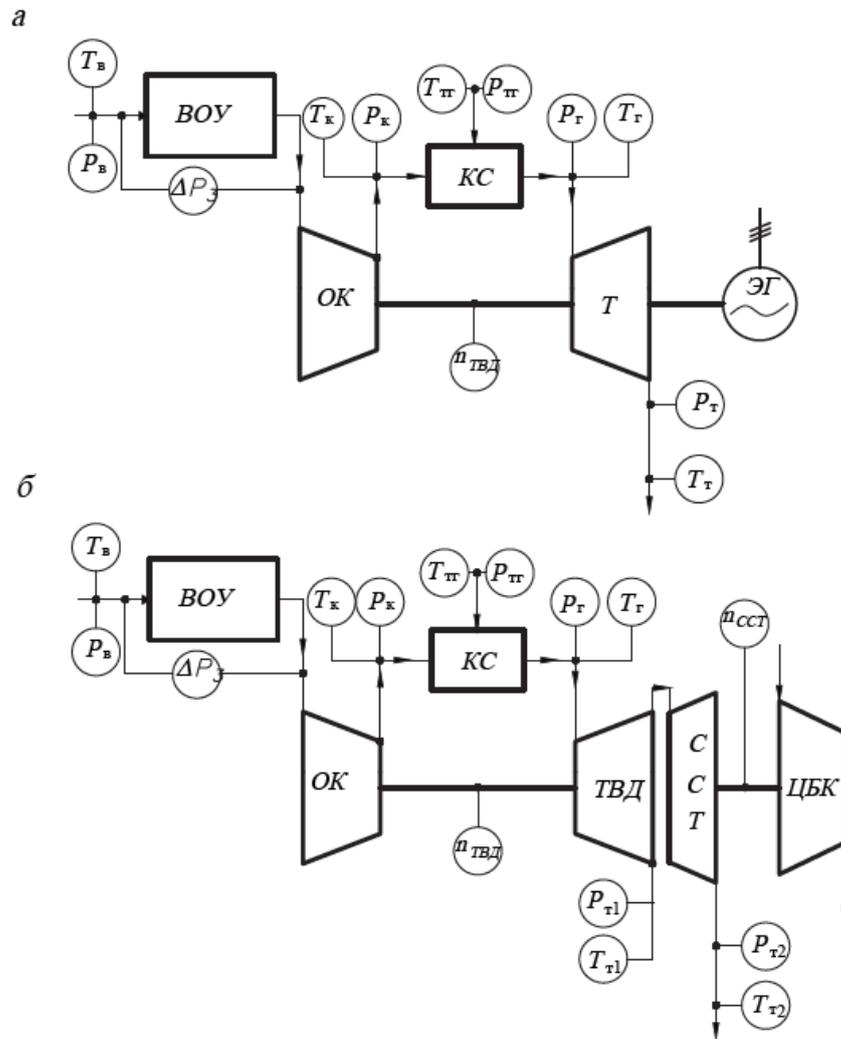


Рисунок 1 – Принципиальные схемы распространенных типов ГТУ (а – однокомпрессорная одновальная ГТУ простого открытого цикла; б – аоднокомпрессорная двухвальная ГТУ простого открытого цикла) [2]

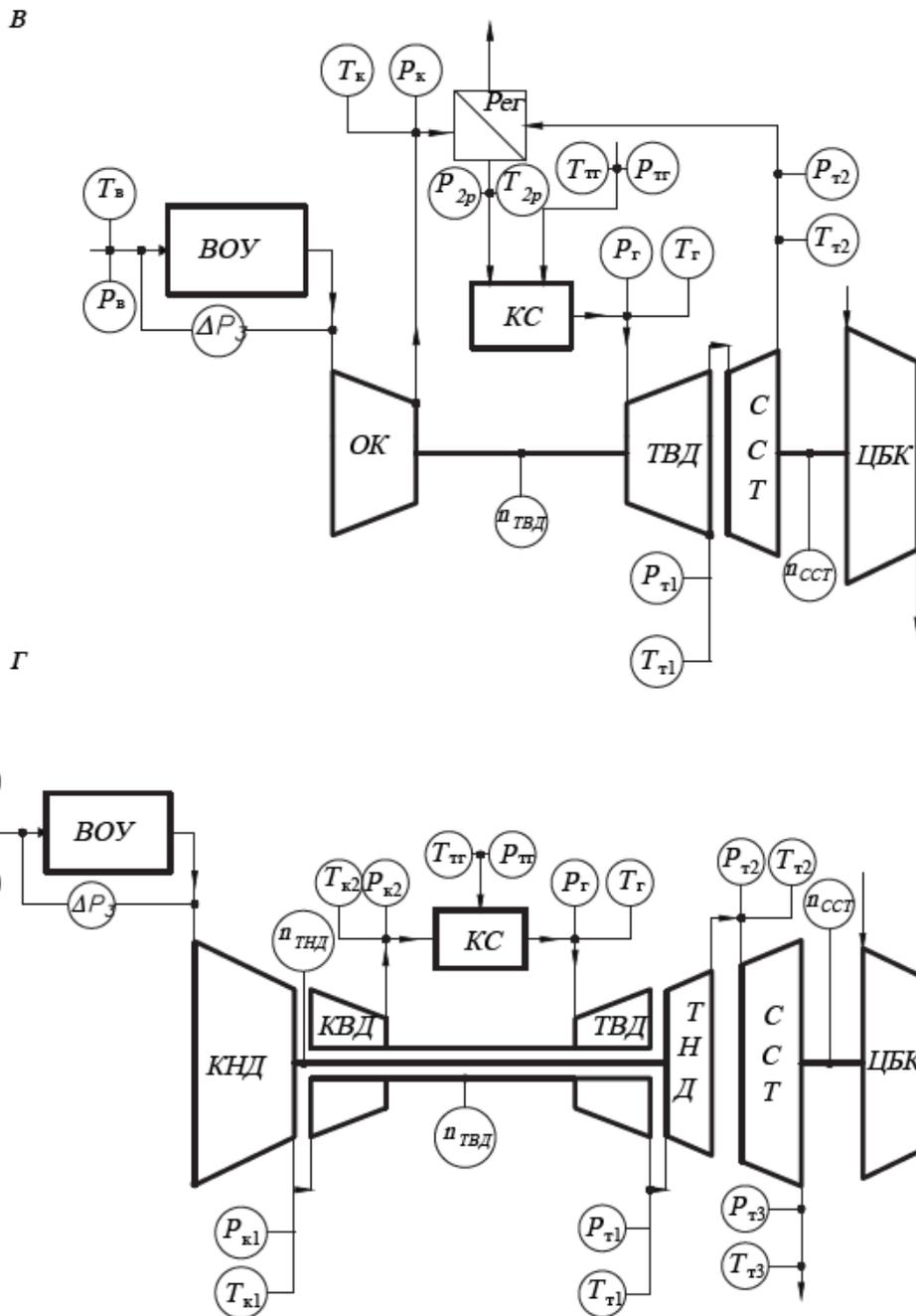


Рисунок 2 – Принципиальные схемы распространенных типов ГТУ (в – однокомпрессорная двухвальная ГТУ с регенерацией теплоты уходящих газов; г – двухкомпрессорная трехвальная ГТУ простого открытого цикла) [2]

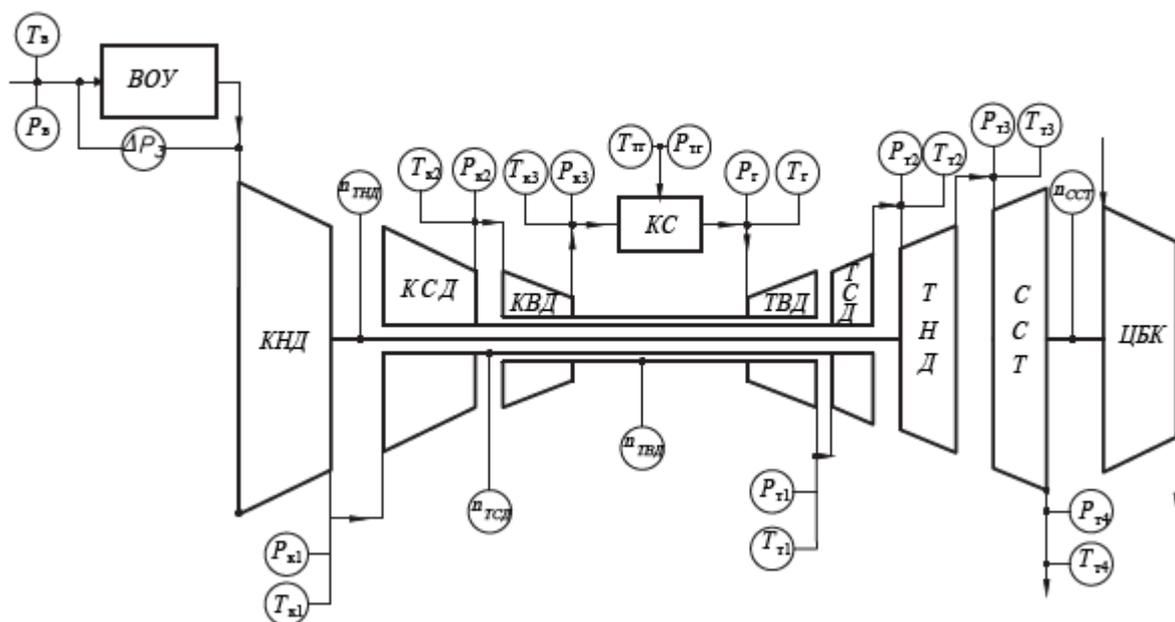


Рисунок 3 – Трехкомпрессорная четырехвальная схема ГТУ простого открытого цикла [2]

Непосредственно ГТД можно разделить на 2 крупных семейства [1]:

- 1) Турбореактивные двигатели;
- 2) Турбовальные двигатели.

Первая группа не представляет для нас интереса, так как относится к авиастроительной отрасли. В свою очередь, турбовальный двигатель – это ГТД, в котором преобладающая доля энергии сгорания топлива преобразуется в работу на выводном валу [8]. Они могут быть классифицированы по размерам: малогабаритные (МГТД) и полноразмерные. Первые также используются в основном в авиационной отрасли, однако они также применяются в ГТУ мощностью не более 4 МВт. Характерной особенностью современных МГТД являются высокие окружные скорости вращения по концам лопаток первых осевых ступеней, которые составляют $U_k = 460...500$ м/с. В сочетании с применяемыми лопатками малого удлинения, повышающими прочность и жесткость венцов, такое решение позволяет не только сократить число ступеней и количество лопаток в ступени, но и обеспечить приемлемые значения чисел Рейнольдса, тем самым увеличить КПД компрессора [1].

Полноразмерные турбовальные ГТД типично представлены стационарными ГТУ для привода электрогенераторов, а также ГТД для привода насосов, компрессоров и др.

Внешний потребитель полезной мощности определяет характер изменения частоты вращения выходного вала. Если потребителем полезной нагрузки является электрогенератор, то частота вращения выходного вала поддерживается в процессе эксплуатации постоянной в пределах погрешности регулирования. В ГТУ для привода насосов и компрессоров диапазон изменения частоты вращения вала полезной мощности значительно больше и зависит от особенностей потребителя и условия эксплуатации.

Выбор конструктивной схемы турбовальной ГТД определяется назначением установки, особенностями ее эксплуатации и требованиями к маневренности. На рис. 1 – 3 показаны основные схемы турбовальных ГТД в составе ГТУ. Как правило, большинство отечественных и зарубежных ГТУ выполняют по простой тепловой схеме. Это связано с тем, что такие машины надежны и просты в обслуживании, имеют малые удельные металлозатраты и обладают высокой маневренностью.

Указанные преимущества ГТД простой тепловой схемы обусловили их широкое применение в энергоблоках для покрытия пиковых нагрузок, многорежимных автономных энергоустановках, а также в приводах нагнетателей, насосов и др.

Переходя к теме непосредственного моделирования, в частности, математического, необходимо обозначить суть этого процесса. Таким образом, математическое моделирование (ММ) – это идеальное научное знаковое формальное моделирование, при котором описание объекта осуществляется на языке математики, а исследование модели проводится с использованием тех или иных математических методов. В свою очередь, сам термин «модель» имеет большое количество определений. Однако в общем случае, под моделью понимается такой материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе познания (изучения) замещает объект-оригинал, сохраняя

некоторые важные для данного исследования типичные его черты. Процесс построения и использования модели называется моделированием. Другими словами, модель – это объект-заменитель объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых интересующих исследователя свойств оригинала. Следует отметить, что само по себе моделирование имеет большое множество способов, а также включает себя приличное количество методов.

Что касается математического моделирования, на данный момент это один из самых результативных и наиболее часто применяемых методов научного исследования. Фактически все современные разделы науки посвящены построению и исследованию математических моделей различных физических объектов и явлений. Такой подход позволяет значительно снизить затраты на проведение эксперимента, повысить его эффективность.

В сравнении с натуральным моделированием, математическое имеет следующий ряд преимуществ:

- 1) Экономичность;
- 2) Возможность моделирования гипотетических, не реализуемых в реальности объектов;
- 3) Возможность реализации опасных или трудновоспроизводимых режимов и ситуаций реальных объектов;
- 4) Возможность изменения масштабов времени;
- 5) Большая прогностическая сила вследствие возможности выявления общих закономерностей;
- 6) Универсальность технического и программного обеспечения проводимой работы.

Кроме того, реальны случаи, когда именно математическое моделирование является единственным методом, способным дать практические результаты.

Как и любой метод моделирования, ММ также имеет свои основные этапы, к которым, в общем случае, следует отнести:

1. Создание качественной модели (формулировка физических закономерностей явления или процесса на основании эксперимента);
2. Создание непосредственно математической модели/постановка задачи, в том числе:
 - Выделение существенных факторов;
 - Выделение дополнительных условий;
3. Изучение математической модели
 - Математическое обоснование модели;
 - Качественное исследование модели;
 - Численное исследование модели;
4. Получение результатов и их интерпретация;
5. Использование полученных результатов.

Исходя из описания преимуществ ММ, легко заключить, что для отрасли энергетики именно этот метод является самым приемлемым. Это объясняется, в первую очередь, дороговизной и трудностью проведения исследований на натуральных объектах. Кроме того, такие исследования занимают гораздо больше времени и человеческих ресурсов, что крайне невыгодно.

Математическое моделирование позволяет до создания реального объекта или возникновения реальной ситуации на уже созданном изделии при выбранных управляющих воздействиях провести объективный анализ поведения системы. С помощью математического моделирования можно решить задачу выбора оптимальной (рациональной) системы регулирования, обеспечивающей требуемый характер изменения определенных показателей двигателя.

Поскольку в данной работе рассматривается ГТД в составе ГТУ, будем обращаться к литературе, связанной непосредственно с газотурбинными установками. Математическое моделирование ГТУ осуществляется путем последовательного расчета всех ее элементов по эмпирическим формулам, согласно изученным физическим законам. Так, например, Комаров О.В. в своей

работе [2] предлагает следующую последовательность расчета ГТУ с подробным расчетом составных компонентов:

1. Тепловой расчет схем ГТУ при номинальном и переменном режимах работы;
2. Моделирование осевого компрессора;
3. Газодинамический расчет газовой турбины;
4. Профилирование лопаток турбины;

В свою очередь, Рыбалко В.В. в работе [3] следует отличной от предыдущей последовательности моделирования ГТУ:

1. Исследование характеристики рабочего процесса ГТУ;
2. Расчет характеристик ГТУ;
3. Расчет долговечности ГТУ;

Стоит сказать, что позиции обоих авторов совершенно справедливы, потому что они освещают различные, но важные аспекты моделирования ГТУ. Автор работы [2] делает упор на расчет характеристик газовой турбины и ее вспомогательных элементов, то есть ГТД, в то время как работа [3] раскрывает расчет для анализа всей ГТУ в целом.

В то же время, авторы работы [1] перед тем, как подойти непосредственно к математическому моделированию ГТД, подробно разъясняют, как важно правильное согласование характеристик ГТД и потребителя его мощности. Переходя к математическому моделированию ГТД, следует отметить, что ММ нерасчетных установившихся и переходных режимов ГТД с заданными сечениями проточной части и характеристиками узлов и отдельных элементов при известных условиях на входе в машину представляет собой решение задачи в следующей постановке:

на установившихся режимах – выполнение термогазодинамического расчета двигателя на расчетном режиме с последующим определением параметров потока на других режимах, мощности (тяги), удельного расхода топлива, КПД, физических и приведенных частот вращения роторов, запасов

устойчивости и других данных при условии, что законы (программы) регулирования известны;

на неустановившихся режимах – определение времени и характера протекания переходных процессов – приема и сброса газа с расчетом изменения параметров двигателя во времени при заданных законах регулирования на этих режимах.

Правильный расчет двигателя на установившихся и переходных режимах и его проектирование с учетом эксплуатационных характеристик является важной практической задачей.

Согласно [1], к построению ММ ГТД предъявляются следующие требования:

- иерархическое построение математической модели (от блоков верхнего уровня, управляющих входной и выходной информацией и вычислительным процессом решения системы уравнений в соответствии с типом задач, до математических моделей узлов и вспомогательных блоков нижнего уровня);

- блочная структура модели, позволяющая заменять, добавлять или совершенствовать отдельные части модели без нарушения общей системы (структура модели должна в целом соответствовать делению двигателя на узлы и элементы);

- максимальное использование стандартных математических методов при решении системы уравнений, оптимизации параметров и исследовании других задач.

Эти принципы учитываются в процессе разработки методов расчета двигателей различных схем и при использовании современных мощных вычислительных систем все перечисленные требования к программам математических моделей становятся обязательными. Их реализация позволяет охватывать многие задачи на различных этапах разработки ГТД и уделять основное внимание физической сущности поставленной задачи и

полученным результатам, а не формальным логическим и вычислительным операциям.

Немаловажен тот факт, что в данной работе также имеется подразделение моделирования на уровни, в частности на нулевой, первый и второй (высший). Это позволяет более комплексно рассчитать и изучить исследуемый элемент или явление для целостной оценки характеристик ГТД в общем.

Нулевой уровень подразумевает описание характеристик моделируемого объекта как черного ящика с помощью формальных взаимосвязей (таблиц, аппроксимирующих и статистических зависимостей).

Первый уровень включает применение соотношений и уравнений, отражающих физические взаимосвязи внутренних подсистем, с типичными для инженерной постановки задачи допущениями, причем подсистемы представлены моделями нулевого уровня;

Наконец, *второй* уровень – это детальное моделирование взаимосвязей подсистем, представленных, в свою очередь, моделями первого уровня.

Авторы рассматриваемой работы [1] предлагают следующий порядок математического моделирования ГТД:

1. ММ узлов и элементов ГТД на первом уровне моделирования;
2. ММ узлов турбокомпрессорной установки группы ГТД на первом уровне моделирования;
3. Расчет характеристик турбокомпрессора ГТД с помощью моделирования высокого уровня.

Такой подход к моделированию не обеспечивает полного объяснения всех происходящих физических явлений, однако при наличии достаточно полных характеристик узлов позволяет решать многие задачи, связанных с определением эксплуатационных характеристик для различных законов регулирования, которые представляют большой интерес в исследованиях двигателей.

Необходимо добавить, что при моделировании ГТУ большое внимание уделяется к созданию и изучению универсальных характеристик агрегата, в

частности, осевого компрессора. Часто данную характеристику делают совмещенной с характеристикой газовой турбины.

Интерес к рассмотрению универсальных характеристик обусловлен тем, что в действительности ГТД практически всегда работает в переменном режиме. Параметры воздуха на входе в компрессор часто изменчивы, в связи с этим изменению также подвергаются и зависимые выходные параметры. Именно поэтому для определения влияния режима работы компрессора на основные параметры рабочего тела строятся универсальные характеристики агрегата.

Согласно [7], характеристиками компрессорной машины называют графически изображенные зависимости между подачей (расходом) и основными параметрами – конечным давлением (чаще – степенью повышения давления), мощностью, внутренним КПД при определенных частотах вращения и свойствах газа.

Основными способами получения подобных характеристик являются испытания на стенде завода-изготовителя либо после создания сложных математических моделей с использованием мощных вычислительных комплексов. Таким образом, при наличии готовой характеристики компрессора, затрагивающей различные режимы работы машины, существует возможность произвести пересчет параметров рабочего тела в зависимости от его текущего режима работы.

Если обращаться к способу создания характеристик машины посредством математического моделирования, то можно увидеть, как много возможностей открывается в ходе выполнения данного процесса. Так, например, в работе [1] указано, что именно математическое моделирование даже первого уровня позволяет решать следующий ряд задач:

- Рассчитывать характеристики двигателя с определением границы устойчивых режимов компрессора по заданному запасу устойчивости в расчетной точке;
- Исследовать влияние поворота лопаток входного направляющего аппарата (ВНА), а также влияние противопомпажного перепуска

- воздуха за одной или двумя произвольными ступенями на характеристику машины и рассогласование ступеней;
- Определять режим работы каждой ступени в заданной точке характеристики компрессора;
 - Находить оптимальные углы поворота ВНА на режимах вдоль линии рабочих режимов;
 - Исследовать влияние отклонения геометрических параметров ступеней и их различных значений на характеристику ГТД.

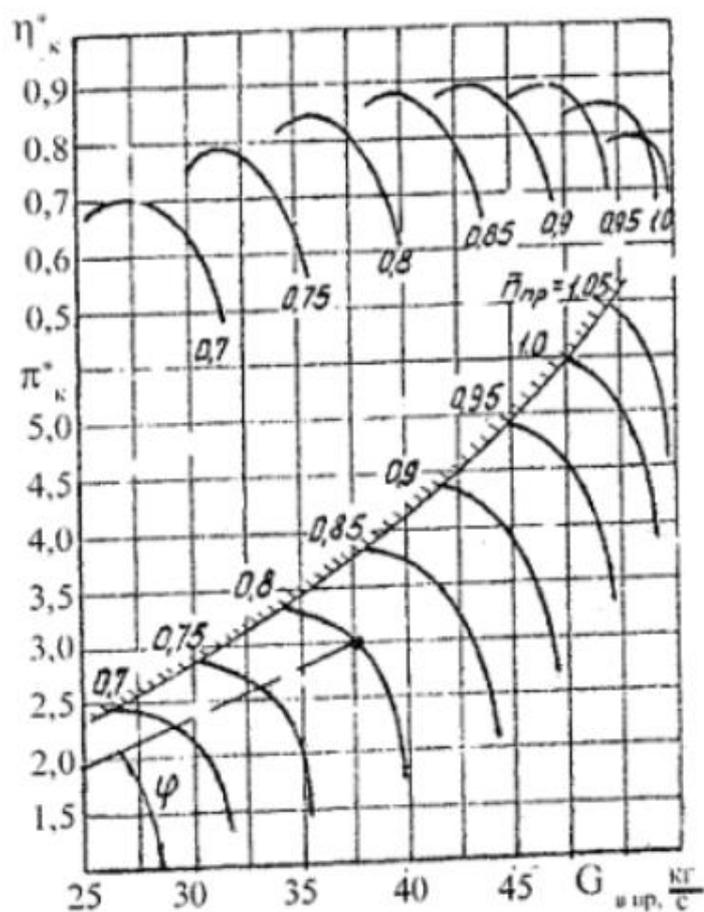


Рисунок 4 – Пример характеристики осевого компрессора [1]

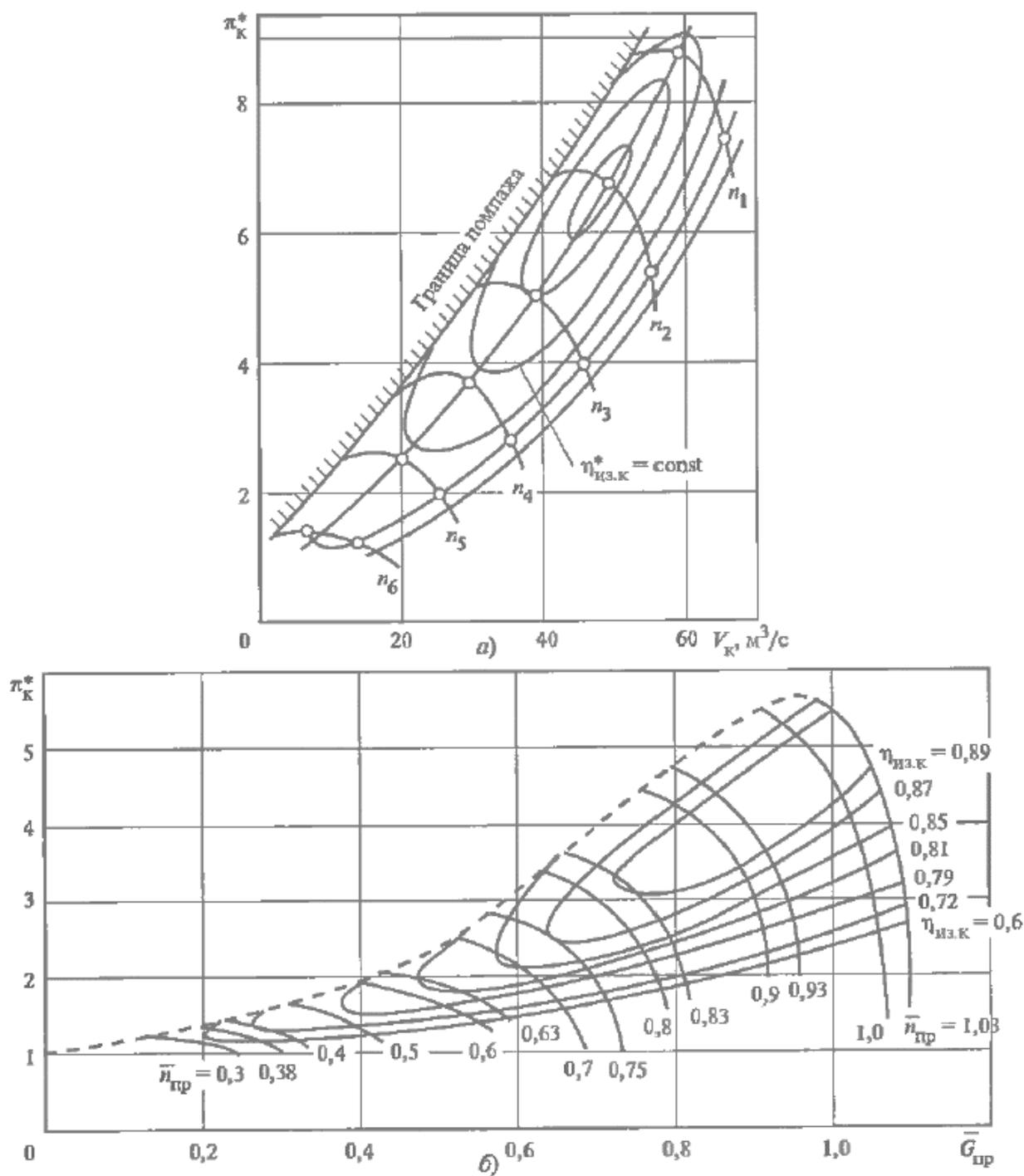


Рисунок 5 – Примеры характеристик компрессора (а – по абсолютным значениям, б – по универсальным параметрам) [6]

2. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

При заданных условиях на входе в двигатель и принятых моделях элементов проточной части параметры потока и режимы работы основных узлов однозначно определяет совокупность (набор) независимых переменных (неизвестных) в математической модели любого ГТД.

При моделировании ГТД задача сводится к нахождению такого режим работы двигателя, который соответствовал бы заданным условиям на входе и принятому закону регулирования (программе дросселирования) двигателя. Это достигается путем подбора значений независимых переменных, удовлетворяющих условиям совместной работы всех элементов в системе моделируемого двигателя и условиям закона (программы) его регулирования [2].

Основу системы уравнений, описывающих работу двигателя (определяющая система уравнений), составляют уравнения баланса и мощностей турбины и компрессора:

$$\begin{cases} G_{\text{вк}}(1 - \Delta\bar{G}) - G_{\text{гт}} = 0; \\ G_{\text{вк}}L_{\text{к}} - \eta_m G_{\text{гт}}L_{\text{т}} = 0, \end{cases}$$

где $\Delta\bar{G}$ – относительное изменение массового расхода воздуха в результате ввода топлива в камеру сгорания и отбора воздуха за компрессором на охлаждение и другие нужды [1].

Однако следует отметить, что этих двух уравнений недостаточно даже для описания простейшего одновального ГТД, поэтому следует дополнять систему количеством уравнений, соответствующему числу независимых переменных. Например, для одновального ГТД это могут быть такие переменные, как $x = (\pi_{\text{к}}^* - 1)G_{\text{вр}} / (\pi_{\text{к}}^* - 1)G_{\text{в}}$ – угловая координата на масштабированной напорной ветви характеристики $n_{\text{пр}} = \text{const}$; $n_{\text{пр}}$ – предельное число оборотов ротора компрессора или турбины; $\alpha_{\text{кс}}$ – избыток воздуха в камере сгорания; $\pi_{\text{к}}^*$ – степень повышения давления в компрессоре.

Следует понимать, что в общем случае под математической моделью газотурбинного двигателя понимают совокупность уравнений, условий и ограничений, принятых для описания реальных процессов в ГТД, из которых

одна часть отражает условия совместной работы основных узлов и элементов, а другая представляет собой описание их свойств и характеристик [1].

В качестве примера можно привести комплексную ММ ГТД, представленную в работе [1]:

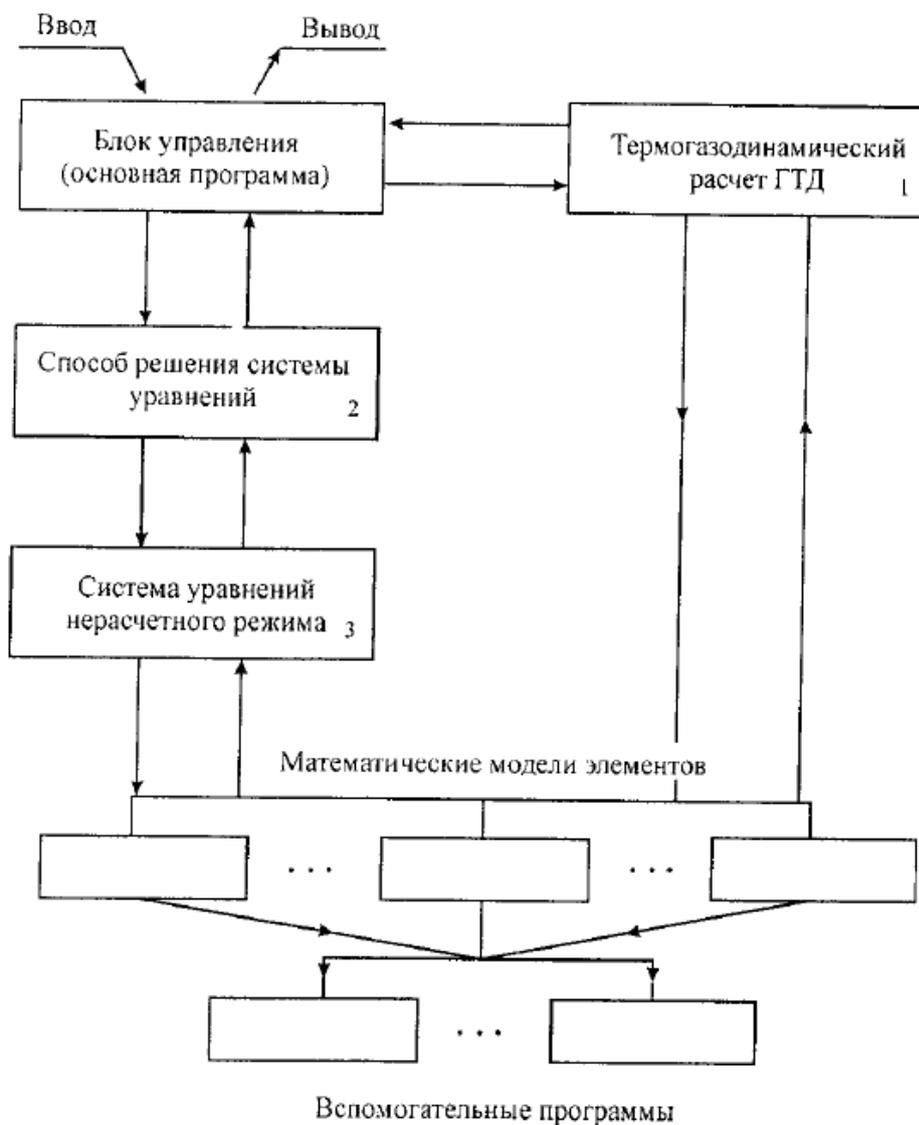


Рисунок 4 – Пример структурной схемы алгоритма ММ ГТД [1]

В подпрограмме 1 заполняются все массивы данных расчетного режима, включая и массив значений независимых переменных. Подпрограмма 2 включает в себя блок или несколько блоков расчета и поиска, в которых подготавливаются значения независимых переменных для работы подпрограммы 3. В этой же подпрограмме по величине нормы формируется решение о продолжении расчета - переходе к следующему приближению - или его завершении в связи с достижением требуемой точности.

Вычисление значений физических и нормированных невязок и определение величины нормы осуществляется в подпрограмме 3. С этой целью в подпрограмме по массивам данных расчетного режима и заданному подпрограммой 2 набору значений независимых переменных с использованием подпрограмм математических моделей элементов проточной части выполняется термогазодинамический расчет двигателя на заданном расчетном режиме.

Следующий иерархический уровень программы занимают подпрограммы математических моделей компрессора (вентилятора), камеры сгорания, турбины, камеры смешения, реактивного сопла.

Нижний иерархический уровень занимают подпрограммы стандартной атмосферы, газодинамических функций и др.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГТД

Как указывалось выше, математическое моделирование может подразделяться на различные уровни. Для поставленной задачи считается удовлетворительной модель первого уровня. Обязательным является соответствие модели следующим требованиям:

- предоставление отдельных блоков с четко определенными входными и выходными параметрами;
- соблюдение устойчивости вычислительного процесса при случайном выходе за пределы области измерения параметров, для которой модель предназначалась.

По сути, в качестве моделей узлов и элементов используются их характеристики, задаваемые в аппроксимационной или табличной формах. Первый случай гораздо удобнее в использовании, так как графическое представление зависимостей дает наглядное представление о взаимосвязях между параметрами. В данном случае также существует возможность экстраполяции за пределы рассматриваемой области.

Переходя непосредственно к моделированию первого уровня узлов ГТД, следует указать, что в общем случае математическая модель компрессора представляется следующим образом [1]:

$$\begin{cases} \pi_k^* = \pi(G_{в.пр.}, n_{пр}), \\ \eta_k = \eta(G_{в.пр.}, n_{пр}). \end{cases}$$

Расчет ГТД для составления такой модели позволяет получить оценки экономичности установки, а также выбрать основные параметры, характеризующие рабочую зону. Но главной целью этой модели является получение характеристик ГТД для нерасчетных режимов.

Моделирование начинается с расчета основных характеристик двигателя на полной мощности. В первую очередь, необходимо иметь какой-либо базовый режим работы двигателя. Как правило, при начале расчета существует

информация о том, для каких целей создается ГТД. Следовательно, все необходимые исходные данные указываются в техническом задании.

Существуют различные способы расчета ГТД на режиме полной мощности. Однако авторы различных методов отмечают, что в предварительных оценках параметров ГТД наиболее прост и удобен, при достаточной точности, аналитический метод расчета при постоянных теплоемкостях воздуха и газа. Следует принять во внимание, что подобное допущение является абсолютно правомочным, так как в результате занижение значения КПД установки совершенно незначительное.

В рамках данной работы создается универсальная программа, которая способна рассчитывать характеристики ГТД и ГТУ в целом с определенными погрешностями и допущениями, характерными для моделирования первого уровня. Программа приспособлена для автоматического расчета при любых исходных данных. Далее для примера будут приведены исходные данные и расчеты параметров для одного номинального режима.

Для расчета топлива, подаваемое в камеру сгорания, принимается стандартом углеводородным, то есть его масса состоит из 85 % углерода и 15 % водорода. Расчет установки начинается с расчета простой схемы ГТУ. Таким образом, для выбранного варианта моделирования имеются следующие исходные данные:

Таблица 1 – Пример исходных данных для расчета

Наименование, размерность	Обозначение	Величина
Тип схемы		Простая ГТУ (рис. 5)
Степень повышения давления	ε	18
Избыток воздуха в камере сгорания	α	1,2
Электрическая мощность, МВт	N_e	50
Температура воздуха на входе в компрессор, К	T_1	288,15
Давление воздуха на входе в компрессор, кПа	P_1	101,325
Температура газов на выходе из камеры сгорания, К	T_3	1300
КПД компрессора	η_k	0,89
Коэффициент гидравлических потерь на входе в компрессор	σ_k	0,98
КПД камеры сгорания	η_{kc}	0,98
Коэффициент гидравлических потерь камеры сгорания	σ_{kc}	0,98
Коэффициент учета массы топлива, добавленного в цикловой воздух	β	0,015
КПД газовой турбины	η_T	0,89
Коэффициент гидравлических потерь газовыхлопного устройства	$\sigma_{вых}$	0,98
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	Q_p^H	50056
Теплоемкость атмосферного воздуха, кДж/ кг · К	c_p^B	1,01
Теплоемкость продуктов сгорания, кДж/кг · К	c_p^t	1,015
Показатель адиабаты воздуха	κ_B	1,41
Показатель адиабаты продуктов сгорания	κ_t	1,33
Универсальная газовая постоянная воздуха, Дж/кг · К	R	287,2

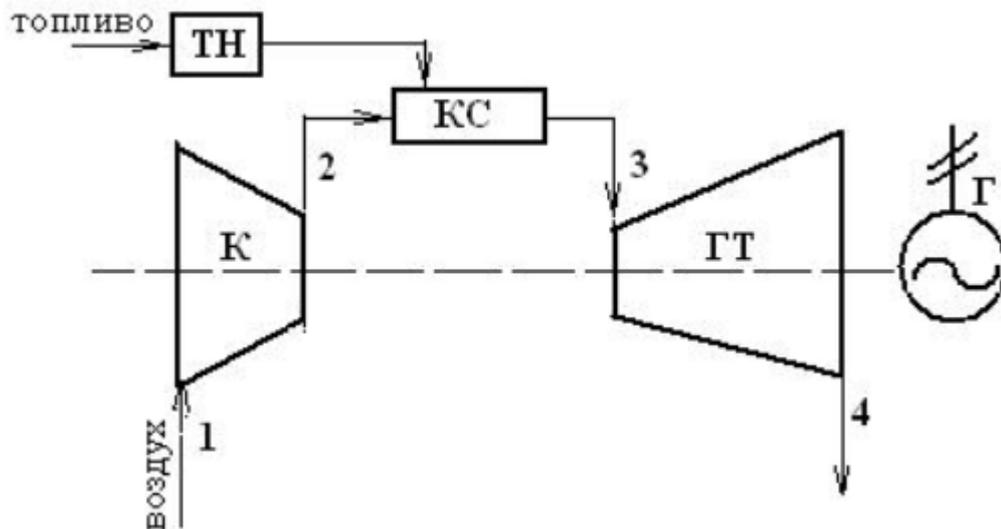


Рисунок 5 – Схема простейшей ГТУ (ТН – топливный насос, К – компрессор, КС – камера сгорания, ГТ – газовая турбина)

Для некоторого упрощения расчета добавляются следующие вспомогательные коэффициенты:

$$m_b = \frac{\kappa_b - 1}{\kappa_b} = \frac{1,41 - 1}{1,41} = 0,2908;$$

$$m_t = \frac{\kappa_t - 1}{\kappa_t} = \frac{1,33 - 1}{1,33} = 0,2489;$$

$$\beta^* = 1 + \beta = 1 + 0,015 = 1,015.$$

Давление воздуха за компрессором:

$$P_2 = P_1 \cdot \sigma_k \cdot \varepsilon = \left(\frac{101,325}{10^3} \right) \cdot 0,98 \cdot 18 = 1,78 \text{ МПа.}$$

Температура воздуха за компрессором:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(1 + \frac{\varepsilon^{m_b} - 1}{\eta_k} \right) = 288,15 \cdot \left(1 + \frac{18^{2,908} - 1}{0,89} \right) = 714,69 \text{ К.}$$

Потребная работа сжатия компрессора:

$$l_k = c_p^b \cdot \frac{T_1}{\eta_k} (\varepsilon^{m_b} - 1) = 1,01 \cdot \frac{288,15}{0,89} (18^{2,908} - 1) = 430,8 \text{ кДж/кг.}$$

Давление рабочего тела перед турбиной:

$$P_3 = P_2 \cdot \sigma_{kc} = 1,78 \cdot 0,98 = 1,75 \text{ МПа.}$$

Степень понижения давления в турбине:

$$\varepsilon_t = \frac{P_3 \cdot \sigma_{\text{ВЫХ}}}{P_1} = \frac{1,75 \cdot 0,98 \cdot 10^3}{101,325} = 16,94.$$

Температура газов за турбиной:

$$T_4 = T_3[1 - \eta_T(1 - \varepsilon_t^{-m_t})] = 1300[1 - 0,89(1 - \varepsilon_t^{-0,2481})] = 716,33 \text{ К.}$$

Работа расширения в турбине:

$$l_T = c_p^t \cdot T_3 \cdot \eta_T \cdot \beta^* \cdot (\varepsilon_t^{-m_t}) = 1,15 \cdot 1300 \cdot 0,89 \cdot 1,015 \cdot \varepsilon_t^{-0,2481} = \\ = 681,29 \text{ кДж/кг.}$$

Полезная работа ГТУ:

$$l_i = l_T - l_K = 681,29 - 430,8 = 250,48 \text{ кДж/кг.}$$

Расход газа через турбину:

$$G_T = \frac{N_3}{l_i \eta_g \eta_m} = \frac{50 \cdot 10^3}{250,48 \cdot 0,98 \cdot 0,98} = 207,85 \text{ кг/с,}$$

где $\eta_g = \eta_m = 0,98$ – КПД генератора и механический КПД соответственно.

Теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания 1 кг топлива составит:

$$V_0 = 0,0889 \cdot C + 0,265 \cdot H = 0,0889 \cdot 85 + 0,265 \cdot 15 = 11,53 \text{ н. м}^3/\text{кг.}$$

Количество воздуха, минимально необходимое для сжигания одного килограмма топлива:

$$L_0 = V_0 \cdot \rho_B = 11,53 \cdot 1,227 = 14,15 \text{ кг/кг,}$$

где $\rho_B = 1,227 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при принятых условиях.

Расход воздуха, подаваемого в компрессор:

$$G_K = \frac{\alpha L_0}{1 + \alpha L_0} G_T = \frac{1,2 \cdot 14,15}{1 + 1,2 \cdot 14,15} \cdot 207,85 = 221,21 \text{ кг/с.}$$

Расход топлива:

$$B = \frac{G_T}{1 + \alpha L_0} = \frac{207,85}{1 + 1,2 \cdot 14,15} = 11,56 \text{ кг/с.}$$

Теплота, подведенная в цикл в камере сгорания:

$$Q = \frac{1}{\eta_{\text{кс}}} (c_p^t \cdot \beta^* \cdot T_3 - c_p^b \cdot T_2) = \frac{1}{0,98} (1,15 \cdot 1,015 \cdot 1300 - 1,01 \cdot 714,69) = 811,83 \text{ кДж/кг.}$$

Внутренний КПД установки:

$$\eta_i = \frac{l_i}{Q} = \frac{250,48}{811,83} = 0,3085.$$

Удельный расход топлива:

$$b_i = \frac{3600}{Q_p^H \cdot \eta_i} = \frac{3600}{50056 \cdot 0,3085} = 0,2331 \text{ кВт/кг} \cdot \text{ч.}$$

Удельный расход воздуха:

$$d_i = \frac{1}{l_i} = \frac{1}{250,48} = 0,004 \text{ кг/кДж.}$$

По данной методике проведены расчеты при различных степенях повышения давления в компрессоре и построены зависимости некоторых параметров от соответствующих значений ε в абсолютных величинах.

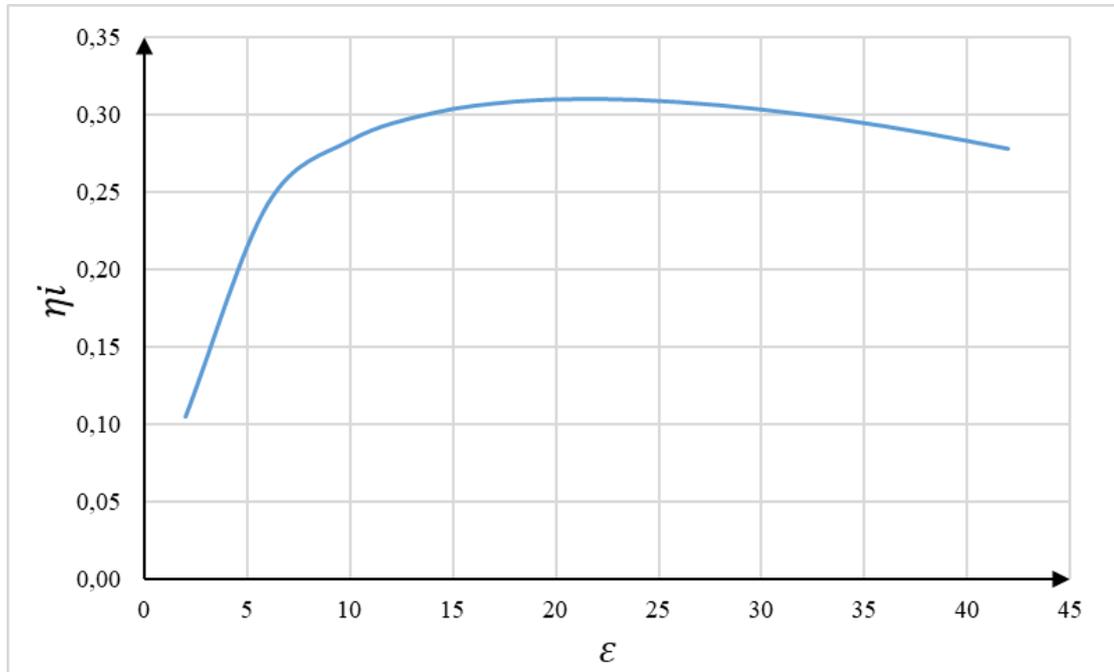


Рисунок 6 – Зависимость внутреннего КПД установки от степени повышения давления

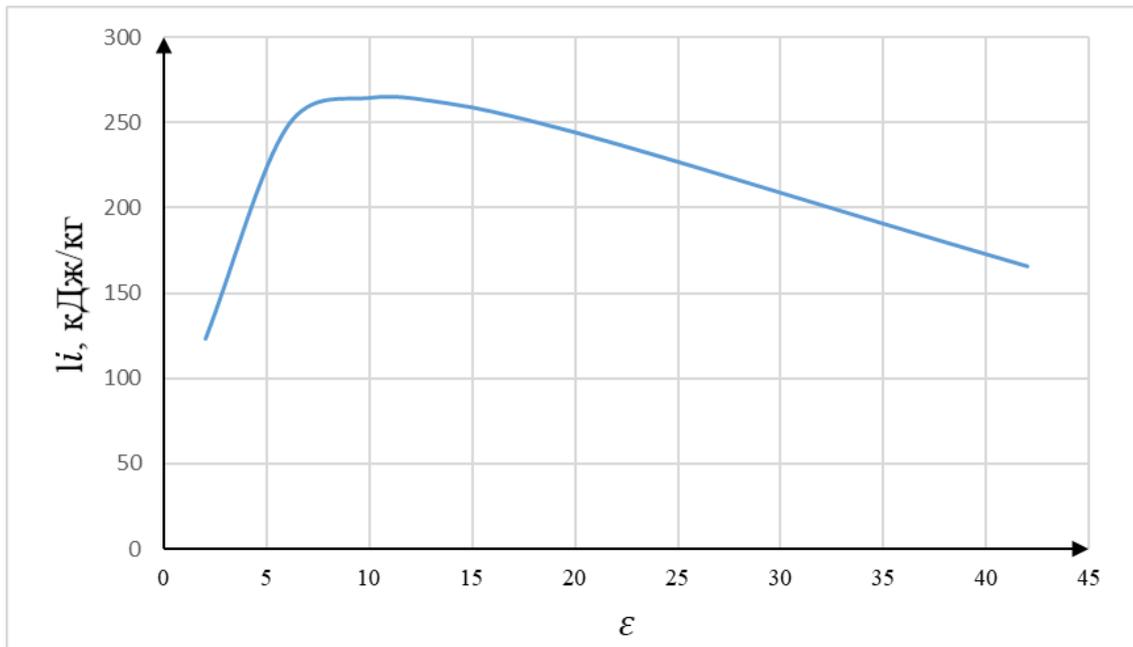


Рисунок 7 – Зависимость полезной работы установки от степени повышения давления

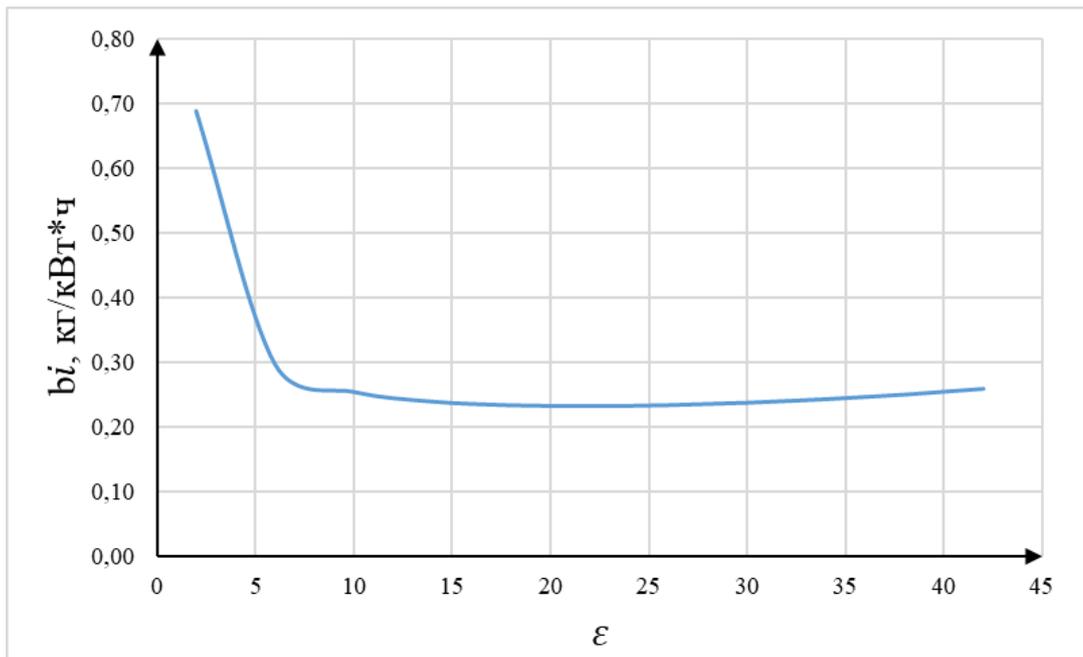


Рисунок 8 – Зависимость удельного расхода топлива от степени повышения давления

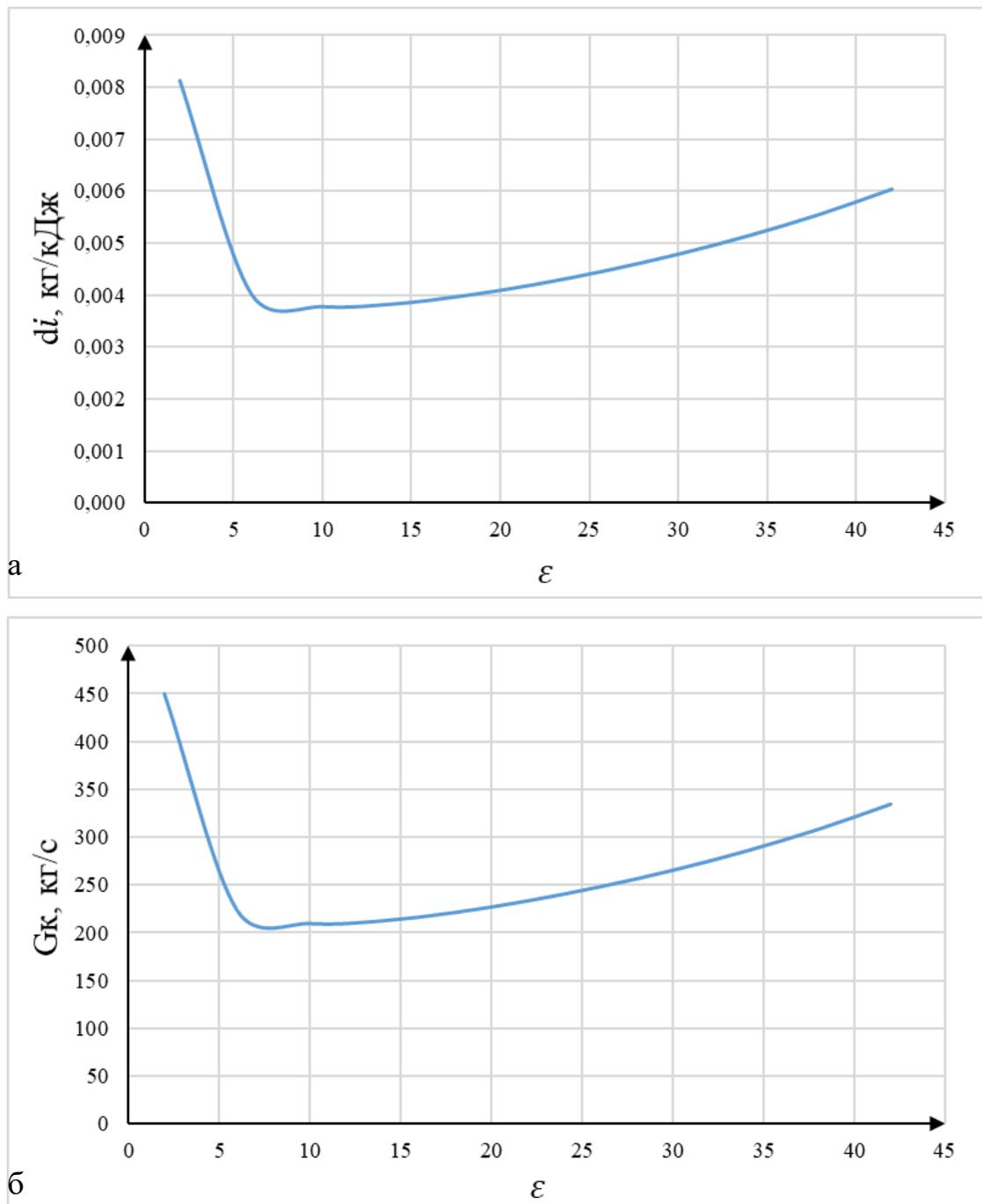


Рисунок 9 – Зависимость удельного (а) и абсолютного (б) расхода воздуха от степени повышения давления

Как видно из приведенных выше рисунков, для всех зависимостей характерен экстремальный характер. Для каждого параметра отчетливо наблюдается оптимальная величина степени повышения давления. Отсюда можно сделать вывод, что, как и говорилось выше, математическое моделирование первого уровня дает наглядное представление об основных экономических характеристиках установки. После получения подобной простой

модели схемы ГТУ появляется возможность оценить влияние степени повышения давления на основные параметры установки, главным образом, на КПД установки.

Тем не менее, построение подобных графиков для каждого рабочего режима в отдельности является хоть и максимально наглядным методом, однако не самым удобным при условии отсутствия автоматизированного расчета. Однако выполненная в рамках данной работы программа позволяет получать подобные зависимости после автоматического расчета при изменении требуемых исходных данных.

Как уже неоднократно упоминалось, ГТУ работает преимущественно в переменных режимах. Это означает, что сама установка имеет широкий диапазон регулирования. Представляет интерес рассмотреть, как изменяется КПД установки при различных режимах работы в зависимости от изменения температуры атмосферного воздуха. Уже указанным выше способом был произведен расчет схемы простой ГТУ при различных температурах забираемого воздуха, а также при нескольких знаменаниях степени повышения давления в компрессоре.

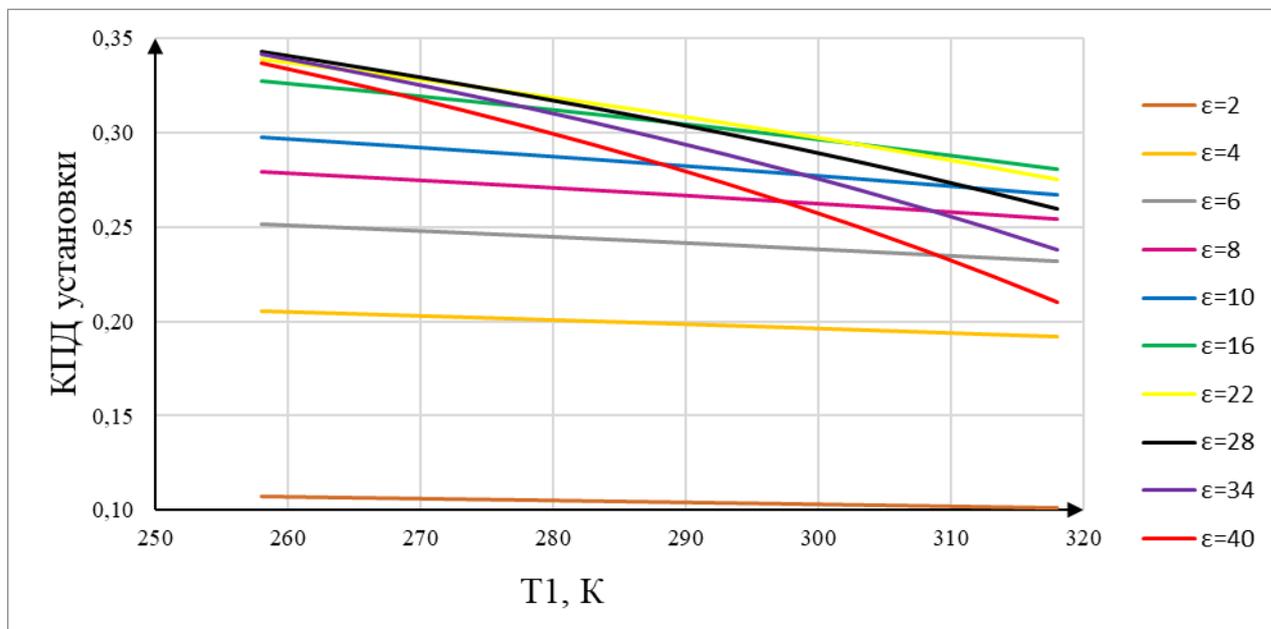


Рисунок 10 – Зависимость внутреннего КПД ГТУ от температуры атмосферного воздуха при различных ε

Из приведенного рисунка отчетливо видно два факта: во-первых, с увеличением степени повышения давления каждое новое возрастание ε дает все меньшую прибавку КПД, причем, также как и на рисунке б, видно, что после определенного значения рост степени сжатия отрицательно сказывается на эффективности установки, особенно при повышенных температурах воздуха. Во-вторых, справедливо будет отметить, что чем выше ε , тем сильнее влияние температуры забираемого воздуха на КПД установки.

Суммируя, можно подтвердить известный факт о том, чем ниже температура атмосферного воздуха, тем более благоприятные условия создаются для работы ГТУ.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗЛОВ ГТД

4.1. Моделирование осевого компрессора

После построения модели схемы всей установки, уместно переходить к моделированию основных узлов ГТД. Наиболее важным объектом в системе регулирования двигателя является компрессор. Изменения в работе именно этого агрегата влекут за собой и дальнейшие изменения параметров рабочего тела в цикле. Поэтому в литературе уделяется особое внимание к правильному расчету и моделированию осевого компрессора в составе ГТД, а также к составлению его характеристик.

Далее будет приведен пример дополнительных исходных данных для автоматизированного расчета компрессора и построения математической модели первого уровня.

Таблица 2 – Дополнительные данные для моделирования осевого компрессора

Наименование, размерность	Обозначение	Величина
Частота вращения ротора, об/мин	n_k	1200
КПД ступени компрессора	η_a	0,93
КПД входного патрубка компрессора	$\eta_{ВХ}^k$	0,9
КПД выходного патрубка компрессора	$\eta_{ВЫХ}^k$	0,6
Скорость воздуха во входном патрубке, м/с	ω_1	30
Скорость воздуха перед первой ступенью, м/с	c_1	150
Скорость воздуха в выхлопном патрубке, м/с	ω_2	40
Скорость воздуха за последней ступенью, м/с	c_1	130
Коэффициент расхода	φ_1	0,7
Относительный диаметр втулки	ϑ_1	0,5
Степень реактивности ступеней компрессора	ρ	0,75
Частота решетки компрессора	b/t	1,5

Плотность воздуха перед компрессором по параметрам торможения:

$$\rho_1^* = \frac{P_1}{R_B \cdot T_1} = \frac{101,325 \cdot 10^3}{287,2 \cdot 288,15} = 1,22 \text{ кг/м}^3.$$

Потеря давления торможения во входном патрубке:

$$\Delta P_1^* \approx \frac{1 - \eta_{\text{ВХ}}^{\text{К}}}{\eta_{\text{ВХ}}^{\text{К}}} \cdot \rho_1^* \cdot \frac{c_1^2 - \omega_1^2}{2} = \frac{1 - 0,9}{0,9} \cdot 1,22 \cdot \frac{150^2 - 40^2}{2} = 1469,25 \text{ Па.}$$

Давление торможения перед первой ступенью:

$$P_1^{\cdot} = P_1 - \Delta P_1^* = 101,325 \cdot 10^3 - 1469,25 = 99855,75 \text{ Па.}$$

Температура воздуха перед первой ступенью:

$$T_1^1 = T_1 - \frac{c_1^2}{2 \cdot c_p^B} = 288,15 - \frac{150^2}{2 \cdot 1,01} = 277,01 \text{ К.}$$

Давление перед первой ступенью:

$$P_1^1 = P_1^{\cdot} \cdot \left(\frac{T_1^1}{T_1} \right)^{1/m_B} = 99855,75 \left(\frac{277,01}{288,15} \right)^{\frac{1}{0,2908}} = 87195,39 \text{ Па.}$$

Плотность воздуха перед первой ступенью:

$$\rho_1 = \frac{P_1^1}{R_B \cdot T_1^1} = \frac{87195,39}{287,2 \cdot 277,01} = 1,10 \text{ кг/м}^3.$$

Объемный расход воздуха через первую ступень:

$$V_1 = \frac{G_{\text{К}}}{\rho_1} = \frac{221,23}{1,10} = 201,85 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Окружная скорость концов рабочих лопаток первой ступени:

$$u_{1\text{П}} = 4\pi \left(\frac{n_{\text{К}}^2 \cdot V_1}{\varphi_1 (1 - \vartheta_1^2)} \right)^{0,25} = 4\pi \left(\frac{(1200/60)^2 \cdot 201,85}{0,7(1 - 0,5^2)} \right)^{0,25} = 248,85 \text{ м/с.}$$

Осевая скорость первой ступени:

$$c_1 = \varphi_1 \cdot u_{1\text{П}} = 0,7 \cdot 248,85 = 174,20 \text{ м/с.}$$

Периферийный и прикорневой диаметры первой ступени соответственно:

$$d_{1\text{П}} = \frac{u_{1\text{П}}}{\pi \cdot n_{\text{К}}} = \frac{248,85}{\pi \cdot 200/60} = 3,96 \text{ м;}$$

$$d_{1\text{К}} = d_{1\text{П}} \cdot \vartheta_1 = 3,96 \cdot 0,5 = 1,98 \text{ м.}$$

Высота рабочих лопаток первой ступени:

$$l_1 = \frac{d_{1п} - d_{1к}}{2} = \frac{3,96 - 1,98}{2} = 0,99 \text{ м.}$$

Давление торможения за компрессором:

$$P_2^* = \varepsilon \cdot P_1^1 = 18 \cdot 87195,39 = 1569517,09 \text{ Па.}$$

Располагаемый теплоперепад компрессора:

$$H_0^* = c_p^B \cdot T_1 \cdot (\varepsilon^{m_B} - 1) = 1,01 \cdot 288,15 \cdot (18^{0,2908} - 1) = 383,42 \text{ кДж/кг.}$$

Температура торможения за компрессором:

$$T_2^* = T_1 + \frac{1}{\eta_k} \cdot \frac{H_0^*}{c_p^B} = 288,15 + \frac{1}{0,89} \cdot \frac{383,42}{1,01} = 714,69 \text{ К.}$$

Плотность воздуха за компрессором (по параметрам торможения):

$$\rho_{B2}^* = \frac{P_2^*}{R_B \cdot T_2^*} = \frac{1569517,09}{287,2 \cdot 714,69} = 7,65 \text{ кг/м}^3.$$

Потеря полного давления в выходном патрубке:

$$\begin{aligned} \Delta P_2^* &\approx (1 - \eta_{\text{ВЫХ}}^K) \cdot \rho_{B2}^* \cdot \frac{c_2^2 - \omega_2^2}{2} = (1 - 0,6) \cdot 7,65 \cdot \frac{130^2 - 40^2}{2} = \\ &= 23398,38 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Давление торможения за последней ступенью:

$$P_Z^{K*} = P_2^* + \Delta P_2^* = 1569517,09 + 23398,38 = 1592915,46 \text{ Па.}$$

Температура воздуха за последней ступенью:

$$T_Z^K = T_2^* - \frac{c_2^2 - \omega_2^2}{2 \cdot c_p^B} = 714,69 - \frac{130^2 - 40^2}{2 \cdot 1,01 \cdot 10^3} = 707,12 \text{ К.}$$

Давление воздуха за последней ступенью:

$$P_Z^K = P_Z^{K*} \cdot \left(\frac{T_Z^K}{T_2^*} \right)^{1/m_B} = 1592915,46 \cdot \left(\frac{707,12}{714,69} \right)^{\frac{1}{0,2908}} = 1535605,51 \text{ Па.}$$

Плотность воздуха за последней ступенью:

$$\rho_Z^K = \frac{P_Z^K}{R_B \cdot T_Z^K} = \frac{1535605,51}{287,2 \cdot 707,12} = 7,56 \text{ кг/м}^3.$$

Прикорневой диаметр рабочей лопатки последней ступени при условии постоянства диаметра расточки корпуса компрессора $d_H = const$ ($d_{1п} = d_{2п} =$

=3,96 м):

$$d_{zk} \approx \sqrt{d_{zn}^2 - \frac{4 \cdot G_k}{\pi \cdot \rho_z^k \cdot c_2}} = \sqrt{3,96^2 - \frac{4 \cdot 221,23}{\pi \cdot 7,56 \cdot 130}} = 3,89 \text{ м.}$$

Высота рабочей лопатки последней ступени:

$$l_z = \frac{d_{zn} - d_{zk}}{2} = \frac{3,96 - 3,89}{2} = 0,037 \text{ м.}$$

Действительный теплоперепад в компрессоре:

$$H_k = \frac{H_0^*}{\eta_k} = \frac{383,42}{0,89} = 430,80 \text{ кДж/кг.}$$

Средний диаметр первой ступени:

$$d_{cp1} = \frac{d_{1n} + d_{1k}}{2} = \frac{3,96 + 1,98}{2} = 2,97 \text{ м.}$$

Окружная скорость лопатки первой ступени на среднем диаметре:

$$u_{cp1} = \frac{\pi d_{cp1} n}{60} = \frac{\pi \cdot 2,97 \cdot 1200}{60} = 186,64 \text{ м/с.}$$

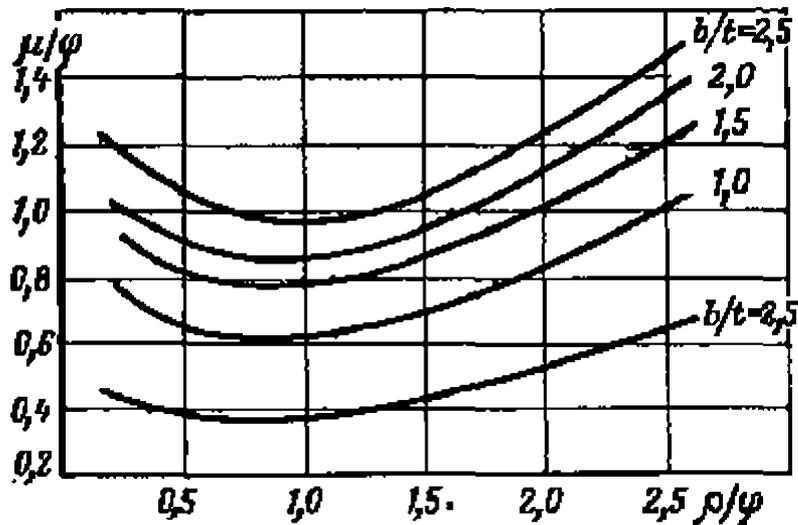


Рисунок 11 – График зависимости между относительными значениями коэффициента закрутки и степени реактивности для решеток различной плотности [7]

Исходя из отношения $\frac{\rho}{\varphi} = \frac{0,75}{0,7} = 1,07$ и $b/t = 1,5$, получаем $\frac{\mu}{\varphi} = 0,796$ (в программе данная операция производится автоматически с помощью аппроксимации указанного графика).

Коэффициенты закрутки и напора соответственно:

$$\mu = \frac{\mu}{\varphi} \cdot \varphi = 0,796 \cdot 0,7 = 0,557;$$

$$\psi = 2\mu\eta_a = 2 \cdot 0,557 \cdot 0,93 = 1,037.$$

Изоэнтروпная работа первой ступени:

$$L_{a.ст.} = \frac{\psi u_{ср1}^2}{2} = \frac{1,037 \cdot 186,64^2}{2} = 18059,37 \text{ Дж/кг.}$$

Изоэнтропная работа компрессора по заданным параметрам в проточной части:

$$\begin{aligned} L_a &= \frac{k_B}{k_B - 1} R_B T_1 \left(\varepsilon^{\frac{k_B - 1}{k_B}} - 1 \right) = \frac{1,41}{1,41 - 1} \cdot 287,2 \cdot 288,15 \left(18^{\frac{1,41 - 1}{1,41}} - 1 \right) = \\ &= 374946,10 = \text{Дж/кг.} \end{aligned}$$

Количество ступеней компрессора:

$$z_k = \frac{L_a}{L_{a.ст.}} = \frac{374946,10}{18059,37} = 21 \text{ шт.}$$

После проведения подобного расчета мы получаем представление о геометрических габаритах осевого компрессора. Комбинируя различные исходные данные, можно подобрать число ступеней и высоты рабочих колес согласно требованиям к проектируемому агрегату.

В созданной при выполнении данной работы программе регулирование режима работы двигателя происходит вручную путем изменения исходных данных. То есть частота вращения вала компрессора является заданной величиной. Основными параметрами регулирования, зависящими друг от друга, являются расход (подача) рабочего тела и частота вращения ротора агрегата. Для наглядной демонстрации зависимости частоты вращения ротора от расхода воздуха при регулировании системы следует принять постоянной окружную скорость концов рабочих лопастей равную, например, $u_{ср} = 300 \text{ м/с}$ и ввести следующие уравнения:

Объемная подача компрессора на входе:

$$Q = \frac{G_k}{\rho_1}, \text{ кг/с,}$$

где $\rho_1 = f(T_1)$.

Необходимая частота вращения ротора компрессора:

$$n_k = \frac{60u_{cp}}{\pi \sqrt{\frac{Q}{0,785(1 - v_1^2)c_1}}}, \text{ мин}^{-1}.$$

Таким образом, меняя вручную расход воздуха через компрессор можно получить отдельные точки зависимости частоты вращения ротора от подачи компрессора. Для примера, ниже приведен график регулирования компрессора в диапазоне 2600-4600 кг/с при различных температурах атмосферного воздуха.

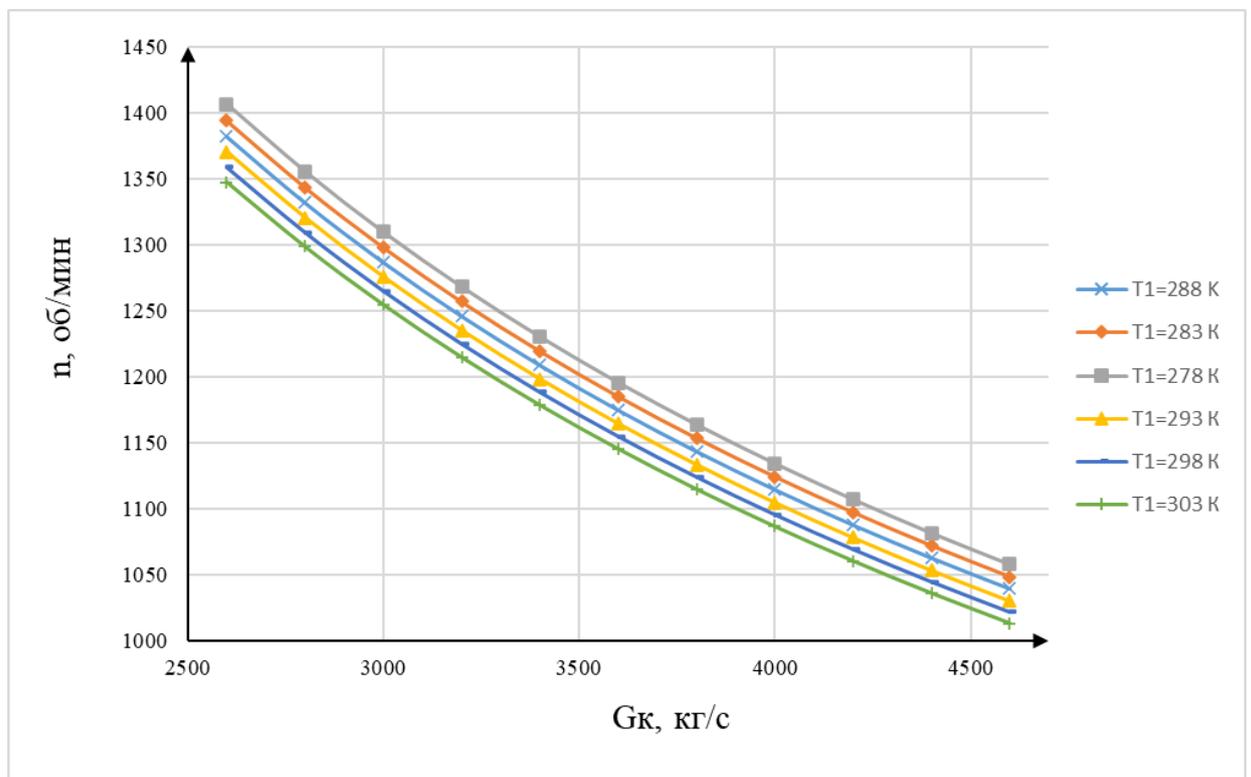


Рисунок 12 – Пример изменения частоты вращения в зависимости от расхода рабочего тела в диапазоне регулирования подачи 2600 – 4600 кг/с при различных температурах атмосферного воздуха.

Данный рисунок наглядно демонстрирует нам подтверждение известного факта о том, что с увеличением расхода частота вращения ротора агрегата плавно снижается. Стоит отметить, что крайне важной является необходимость попадания в соответствующую «рабочую точку» компрессора при изменении наружной температуры воздуха.

С целью того, чтобы показать общую зависимость эффективности работы компрессора от степени повышения давления в нем безотносительно температуры наружного воздуха и расхода, требуется ввести следующую зависимость – связь политропного и адиабатического КПД:

$$\eta_{oi}^k = (\varepsilon^{m_v} - 1) / (\varepsilon^{\eta_{пол}} - 1),$$

где $\eta_{пол}$ – политропный КПД компрессора.

Вследствие того, что политропный КПД не зависит от степени повышения давления, он принимается постоянным, например $\eta_{пол} = 0,96$. Подставляя в указанную формулу различные значения ε получаем следующую зависимость:

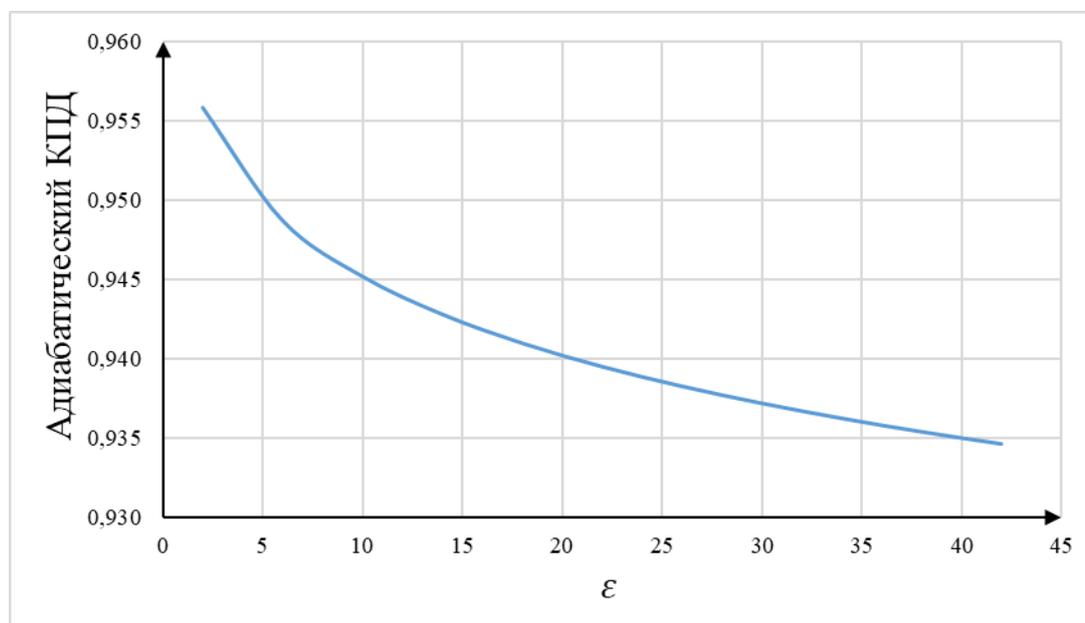


Рисунок 13 – Зависимость адиабатического КПД компрессора от степени повышения давления.

Рисунок 13 подтверждает тот факт, что рост степени повышения давления в компрессоре приводит к снижению эффективности его работы. Однако если посмотреть на числовые значения оси КПД, то видно, что между соседними интервалами ε влияние на эффективность агрегата незначительно.

4.2. Моделирование камеры сгорания

Математическая модель камеры сгорания состоит из функций, описывающих параметры газа на выходе в зависимости от параметров газа на

входе, а также от избытка воздуха в самой камере. Основной расчет является составление и расчет тепловых балансов элементов камеры сгорания. Согласно [6], тепловой расчет КС можно разделить на общий и позонный. Для ММ первого уровня достаточно воспользоваться первым вариантом. Тепловой баланс КС учитывает теплоту, внесенную с воздухом, выделенную при горении топлива, а также теплоту, вынесенную из КС с продуктами сгорания. Дополнительно учитывается тепловая энергия, отведенная от КС с охлаждающим воздухом.

В общем виде уравнение теплового баланса КС можно выразить в следующем виде:

$$G_K h_{к.к.} + B(Q_p^H \cdot \eta_{КС} + h_{т.п.} + G_B^{охл} h_B^{охл}) = G_{н.т.} h_{н.т.},$$

где $h_{к.к.}$, $h_{т.п.}$, $h_B^{охл}$, $h_{н.т.}$ – энтальпии, кДж/кг, соответственно сжатого воздуха за компрессором, подогретого топлива, охлаждающего воздуха и газов на входе в турбину;

$G_{н.т.}$ – расход газов на входе в турбину, кг/с.

После решения теплового баланса камеры сгорания составляются зависимости КПД камеры от параметров газовой смеси (температуры и давления) и избытка воздуха. В математической модели первого уровня позволяет не учитывать зависимость теплоёмкости газа от температуры.

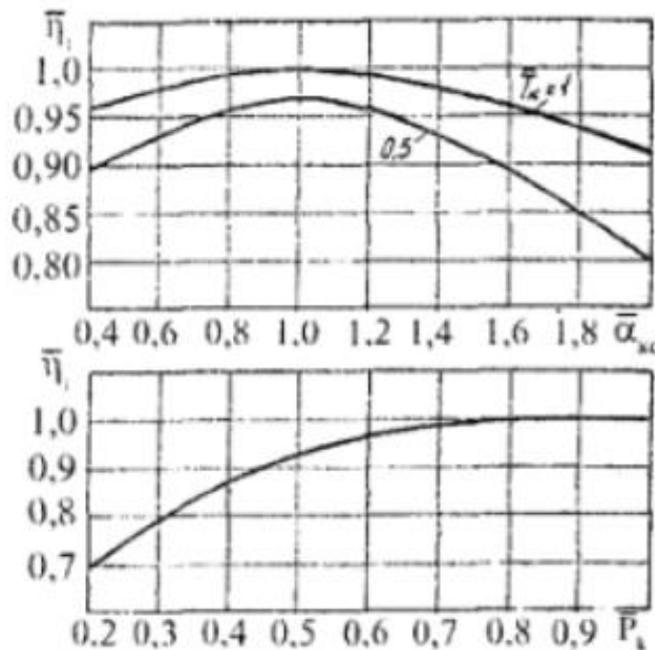


Рисунок 14 – Пример характеристики камеры сгорания [1]

В данной работе последовательность расчета такова, что необходимость решения балансового уравнения упраздняется, поскольку все участвующие в нем величины находятся опосредованно. Тем не менее, существует интерес произвести конструкторские расчеты для определения геометрических параметров некоторых узлов КС. Составление такой математической модели может дать представление о габаритах камеры сгорания на самом раннем этапе проектирования.

Расход первичного воздуха:

$$G_{в1} = \alpha B L_0 = 1,2 \cdot 11,56 \cdot 14,15 = 196,29 \text{ кг/с.}$$

Объём пламенной (жаровой) трубы камеры сгорания:

$$V_{ПТ} = \frac{B Q_{н}^p \eta_{КС}}{q_p P_2},$$

где $q_p = 170 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{Па})$ – приведенная теплонапряженность пламенной трубы, зависит от конструкции КС; P_2 – давление в камере сгорания.

$$P_2 \approx P_z^к = 1535605,51 \text{ Па;}$$

$$V_{ПТ} = \frac{11,56 \cdot 50056}{170 \cdot 1535605,51} = 2,17 \text{ м}^3.$$

Диаметр пламенной трубы:

$$d_{ПТ} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{ПТ}}{\pi \lambda_{ПТ}}},$$

где $\lambda_{ПТ} = 2,7$ – отношение длины пламенной трубы к её диаметру для цилиндрических камер сгорания;

$$d_{ПТ} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 2,17}{\pi \cdot 2,7}} = 0,34 \text{ м.}$$

Длина пламенной трубы:

$$L_{ПТ} = \lambda_{ПТ} d_{ПТ} = 2,7 \cdot 0,34 = 0,92 \text{ м.}$$

Общая длина КС:

$$L_{КС} \approx 1,33 L_{ПТ} = 1,33 \cdot 0,92 = 1,23 \text{ м.}$$

Расход вторичного воздуха:

$$G_{B2} = G_K - G_{B1} = 221,23 - 196,29 = 24,94 \text{ кг/с}$$

Площадь кольцевого канала для прохода вторичного воздуха:

$$F_K = \frac{G_{B2}}{\rho_z^k w_2} = \frac{24,94}{7,56 \cdot 40} = 0,08 \text{ м}^2.$$

Внутренний диаметр кожуха КС:

$$d_{BK} = \sqrt{\frac{4F_K}{\pi} + (d_{ПТ} + 2\delta_{ПТ})^2},$$

где $\delta_{ПТ} = 0,01$ м – толщина стенки пламенной трубы;

$$d_{BK} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,08}{\pi} + (0,34 + 2 \cdot 0,01)^2} = 0,49 \text{ м}.$$

4.3. Моделирование газовой турбины

Согласно [1], в моделировании ГТД рассматриваемого уровня достаточно использование модели, основанной на приближенном расчете характеристик турбины. Поэтому, если известны параметры газа на входе в турбину, без затруднений могут быть определены и параметры газа на выходе, а также работа, совершаемая турбиной, физический расход газа через нее и ее мощность.

Кроме прочего, отмечена зависимость параметров газа на выходе из турбины от приведенной окружной скорости. Однако установлено [1], что влияние данной величины на параметр расхода в первом приближении невелико, что дает право ее не учитывать.

Следовательно, упрощенная математическая модель газовой турбины ГТД первого уровня выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{G}_z = G(\varepsilon), \\ \eta_T = \eta(\varepsilon), \end{cases}$$

где $\bar{G}_z = \frac{G_T \sqrt{T_3}}{P_3}$ – приведенный параметр расхода газа через турбину.

Таким образом, для составления характеристики турбины рекомендуется пользоваться следующими соотношениями [1] (индекс «ноль» соответствует расчетному режиму работы):

$$\begin{cases} \bar{G}_z = 1 - 0,75 \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1}\right), \\ \bar{\eta}_T = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1}\right) - 0,6 \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1}\right). \end{cases}$$

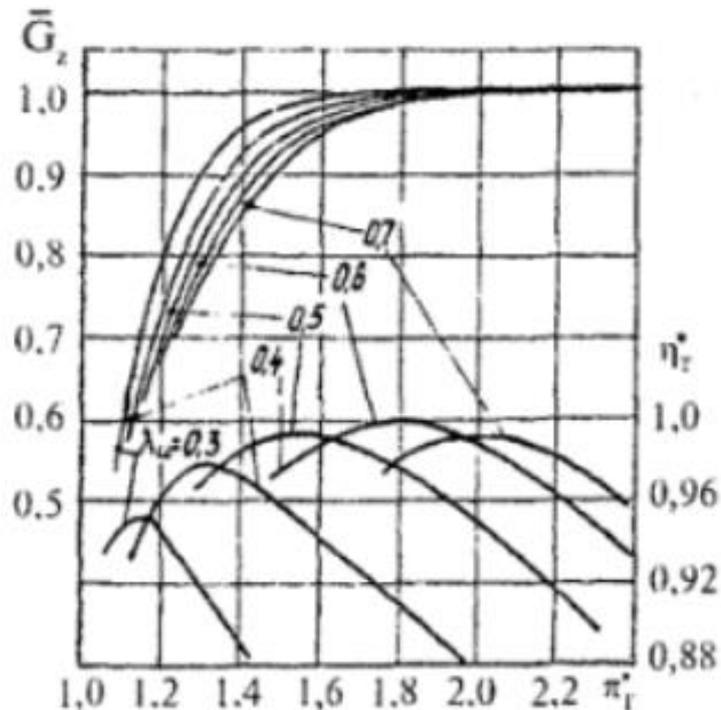


Рисунок 15 – Пример характеристики газовой турбины

Внутренний относительный КПД газовой турбины характеризуется совершенством проточной части. В проектных и аналитических расчетах (в том числе и в данной работе), как правило, он принимается в пределах 0,88 – 0,91. Подобные характеристики, как на рисунке 14, создаются на испытательных стендах завода-изготовителя путем проведения тестов.

В нашем случае есть возможность провести оценочный расчет ГТ с целью установления параметров рабочего тела в ней, а также числа ступеней.

Потеря давления во входном патрубке:

$$\Delta P_3 = \frac{1 - \eta_{\text{вх}}}{\eta_{\text{вх}}} \cdot \rho_3 \cdot \frac{c_3^2 - w_3^2}{2},$$

где ρ_3 – плотность газов на входе в турбину; $\eta_{\text{вх}} = 0,98$ – КПД входного патрубка; $c_3 = 85$ м/с – скорость газа перед первой ступенью турбины; $w_3 = 35$ м/с – скорость газа во входном патрубке.

$$\rho_3 = \frac{P_z^k}{R \cdot T_3} = \frac{1535605,51}{287,2 \cdot 1300} = 4,11 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\Delta P_3 = \frac{1 - 0,89}{0,89} \cdot 4,11 \cdot \frac{85^2 - 35^2}{2} = 251,81 \text{ Па.}$$

Давление газа перед первой ступенью турбины:

$$P_3 = \Delta P_{\text{КС}} \cdot P_z^k - \Delta P_3,$$

где $\Delta P_{\text{КС}} = 0,98$ – коэффициент потерь давления в камере сгорания.

$$P_3 = 0,98 \cdot 1535605,51 - 251,81 = 1489285,54 \text{ Па.}$$

Температура газов за последней ступенью:

$$T_z^T = T_3 - \frac{c_4^2}{2c_p^t},$$

где $c_4 = 150$ м/с – скорость газа за последней ступенью;

$$T_z^T = 1300 - \frac{150^2}{2000 \cdot 1,15} = 1290,22 \text{ К.}$$

Так как давление газа за последней ступенью мало отличается от давления за турбиной, то при определении плотности газа принимается:

$$\rho_z^T = \frac{P_4}{R \cdot T_z^T},$$

где P_4 – давление газов за турбиной.

$$P_4 = P_1(1 + \xi_{\text{ВЫХ}}),$$

где $\xi_{\text{ВЫХ}} = 0,04$ – коэффициент гидравлических потерь в выхлопном патрубке ГТ;

$$P_4 = 101,325 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0,04) = 105378,0 \text{ Па;}$$

$$\rho_z^T = \frac{105378,0}{287,2 \cdot 1290,22} = 0,284 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Потеря полного давления в выходном патрубке:

$$\Delta P_{\text{ВЫХ}} = (1 - \eta_{\text{ВЫХ}}) \cdot \rho_z^T \frac{c_4^2 - w_4^2}{2},$$

где $\eta_{\text{ВЫХ}} = 0,66$ – КПД выходного патрубка; $w_4 = 45$ м/с – скорость газа в выходном патрубке.

$$\Delta P_{\text{ВЫХ}} = (1 - 0,66) \cdot 0,284 \cdot \frac{150^2 - 45^2}{2} = 989,86 \text{ Па.}$$

Давление газа за последней ступенью:

$$P_z^T = P_4 + \Delta P_{\text{вых}} = 105378,0 + 989,86 = 106367,86 \text{ Па.}$$

Располагаемый теплоперепад турбины по параметрам перед первой и за последней ступенями:

$$H_a = c_p^t T_3 (1 - \delta^{-m_t}) + \frac{c_4^2 - c_3^2}{2},$$

где $\delta = \frac{P_3}{P_z^T} = \frac{1489285,54}{106367,86} = 14,0$ – степень расширения газа в проточной части турбины.

$$H_a = 1,15 \cdot 1300(1 - 14,0^{-0,2481}) + \frac{150^2 - 85^2}{2} = 725,94 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Располагаемый теплоперепад ступени по диаметру корневого сечения:

$$H_{\text{ост}} = \frac{1}{2} \left(\frac{u_k}{x_{\text{ок}}} \right)^2,$$

где $x_{\text{ок}} = 0,41$ – отношение скоростей; u_k – окружная скорость в корневом сечении:

$$u_k = \pi d_{\text{ок}} n_T,$$

где $d_{\text{ок}} = 2 \text{ м}$ – принимаемый диаметр корневого сечения лопаток;

$n_T = 50 \text{ об/с}$ – частота вращения ротора турбины.

$$u_k = \pi \cdot 2 \cdot 50 = 314,16 \text{ м/с};$$

$$H_{\text{ост}} = \frac{1}{2} \left(\frac{314,16}{0,41} \right)^2 = 293,56 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Число ступеней турбины:

$$z_T = \frac{H_a}{H_{\text{ост}}} = \frac{725,94}{293,56} = 2 \text{ шт.}$$

После составления модели, основанной на приведенном расчете, появляется возможность отследить изменения параметров рабочего тела при расширении в турбине, а также ее число ступеней при различных исходных данных.

Аналогично ситуации с осевым компрессором, также представляет интерес изучить влияние степени расширения газов в турбине (δ) на ее

производительность. Для этой цели вводится следующее соотношение адиабатического и политропного КПД газовой турбины:

$$\eta_{oi}^T = (1 - \delta^{-m_t \cdot \eta_{пол}}) / (1 - \delta^{-m_t}),$$

где $\eta_{пол}$ – политропный КПД газовой турбины.

Поскольку, как и у осевого компрессора, политропный КПД не зависит от степени расширения, он принимается постоянным, например, $\eta_{пол} = 0,94$. В таком случае, подставляя различные значения δ в приведенное уравнение, получаем следующую характеристику:

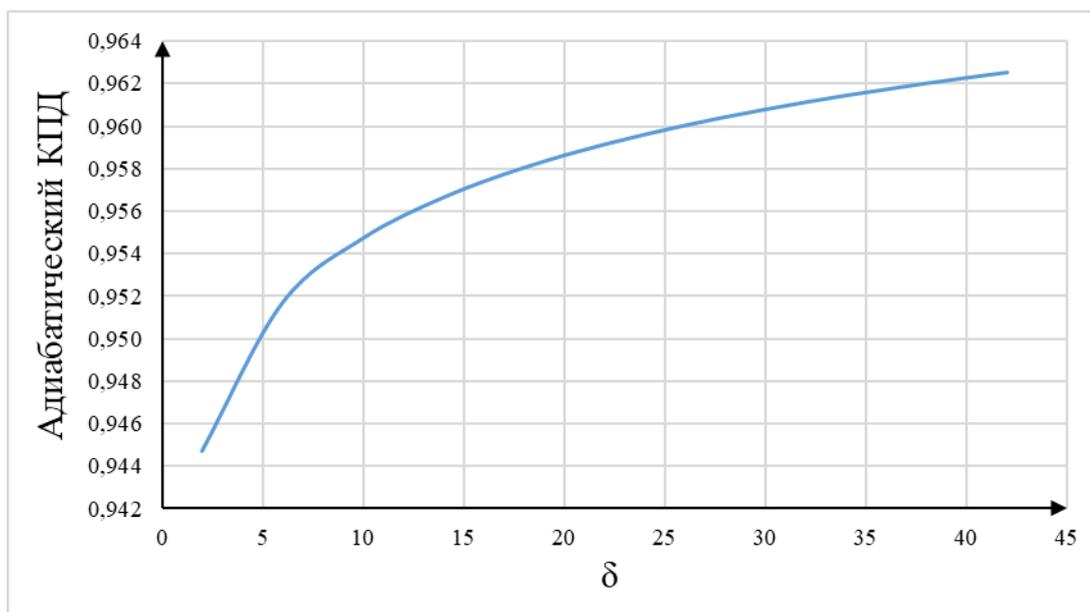


Рисунок 16 – Зависимость КПД газовой турбины от степени расширения газов в ней

Исходя из данного рисунка, можно сформулировать совершенно справедливое заключение: чем больший перепад давлений срабатывает в турбине, тем выше ее эффективность. Поскольку в цикле простой ГТУ давление на выходе из турбины близко к атмосферному, то повышение степени расширения газов в турбине зависит только от давления на выходе из компрессора. Учитывая тот факт, что производительность компрессора обратнопропорциональна его степени повышения давления, возникает необходимость установления такой точки работы системы, при которых КПД обоих агрегатов будут оптимальными.

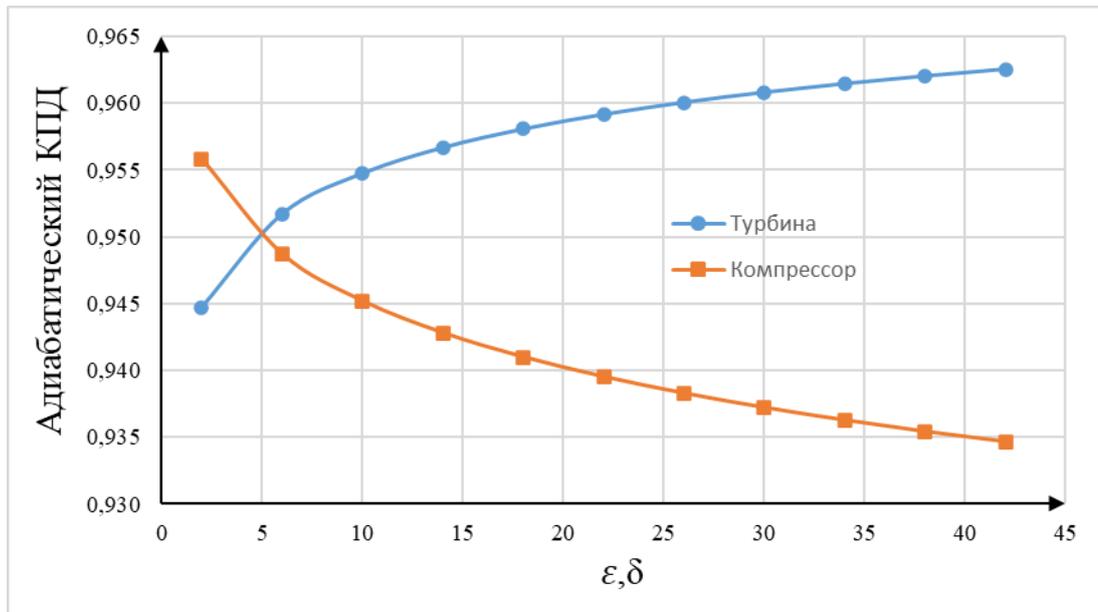


Рисунок 17 – Пример согласования рабочих параметров системы компрессор-турбина для установления оптимального КПД для обоих агрегатов

Для удобного анализа работы осевого компрессора, как уже упоминалось выше, уместно использовать его универсальную характеристику, наложив на нее линию статических режимов. Линией статических режимов, как правило, называется геометрическое место точек на характеристике компрессора, параметры каждой из которых являются решением системы уравнений, описывающих условия совместной работы компрессора и турбины. Используя методику, предложенную в [3], представим универсальную характеристику осевого многоступенчатого компрессора в виде системы аппроксимационных зависимостей.

Вводятся приведенные параметры:

$$Y = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon_0 - 1} - \text{относительная степень повышения давления};$$

$$X = \frac{G_k / G_{k0} \cdot \sqrt{T_1 / T_{10}}}{P_1 / P_{10}} - \text{относительный приведенный расход воздуха}.$$

Индекс «ноль» принадлежит к параметрам в номинальном режиме работы.

Далее вычисляется приведенная частота вращения ротора компрессора:

$$\bar{n}_{\text{пр}} = \frac{n/n_0}{\sqrt{T_1/T_{10}}} = 0,1416 \cdot 1,1471 \cdot Y - 0,3085 \cdot Y^2 + (0,7711 - 2,3499 \cdot Y + 1,22 \cdot Y^2) \cdot X + (0,1454 + 0,9193 \cdot Y - 0,6844 \cdot Y^2) \cdot X^2.$$

Параметры компрессора на границе помпажа:

$$Y_{\text{помп}} = \frac{-0,003402 + 0,19002384 \cdot \bar{n}_{\text{пр}}}{1 + 1,744562 \cdot \bar{n}_{\text{пр}} + 0,869701 \cdot \bar{n}_{\text{пр}}^{-1}};$$

$$X_{\text{помп}} = -0,79569 + 3,789277 \cdot \bar{n}_{\text{пр}} - 4,29138 \cdot \bar{n}_{\text{пр}}^{-2} + 2,191142 \cdot \bar{n}_{\text{пр}}^{-3}.$$

Коэффициент запаса устойчивости компрессора:

$$\Delta K_y = \left(\frac{Y_{\text{помп}} \cdot X}{X_{\text{помп}} \cdot Y} - 1 \right) \cdot 100.$$

С помощью баланса расходов рабочего тела через компрессор и газовую турбину, пользуясь уравнениями и промежуточными расчетами (2.12 – 2.15) [3], производим вычисления для отдельных точек характеристики и наносим их в масштабе на координатные оси.

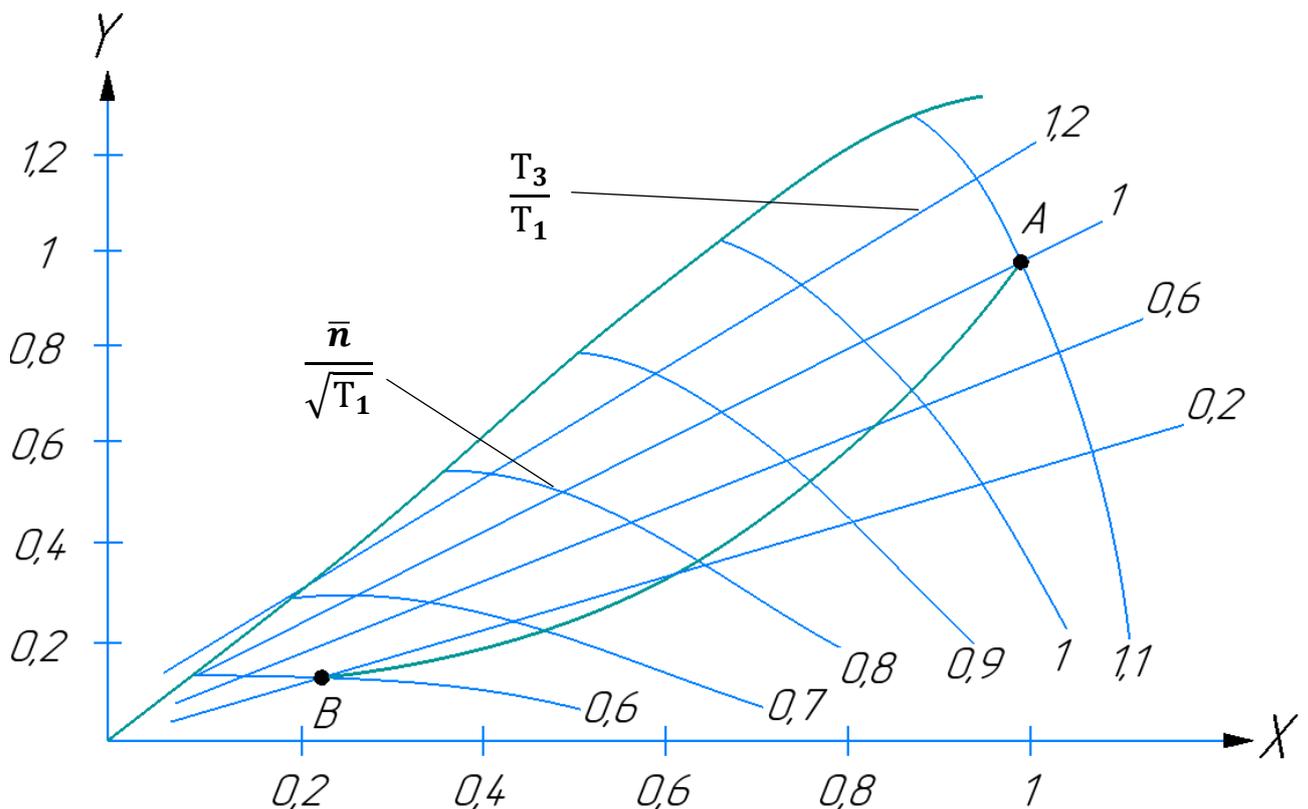


Рисунок 18 – Универсальная характеристика режимов работы компрессора (AB – линия статических режимов работы)

Как видно из рисунка, при уменьшении режима работы от номинального линия статических режимов работы смещается вниз от точки А и, последовательно пересекая изотермы, приближается к границе помпажа.

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Для поисков источников дальнейшего финансирования проекта необходимо произвести оценку коммерческой ценности разработки. Следовательно, цель данного раздела – оценка с позиции ресурсной и финансовой эффективности разработки математической модели ГТД и изучения на ее основе характеристик установки. Оценка составляется на основе выполнения следующих задач:

- Сегментирование рынка и выявление потенциальных потребителей;
- Проведение SWOT-анализа;
- Составление календарного плана-графика проведения работ;
- Обозначение участвующих лиц и распределение обязанностей между ними;
- Построение диаграммы Ганта;
- Расчет бюджета проекта;
- Составление реестра рисков;
- Определение эффективности проекта с помощью расчета соответствующих интегральных показателей.

Потенциальные потребители результатов исследования

Для понимания ориентированности проекта существует необходимость проанализировать сегменты рынка, которые так или иначе могут иметь отношение к теме данной работы.

Основных и единственных потенциальных потребителей разработанного продукта можно разделить на два рыночных сегмента: коммерческие и не коммерческие организации. К первой группе будут относиться любые частные корпорации и организации, использующие в своей деятельности энергетические газотурбинные двигатели. Это могут быть предприятия энергетической, добывающей и любых других отраслей. Ко второй группе следует отнести

потребителей научно-исследовательской сферы, таких, как научно-исследовательские центры (институты), государственные конструкторские бюро, университеты и другие образовательные учреждения.

Прежде всего, коммерциализировать представленный научно-исследовательский проект перспективно в первом выделенном сегменте рынка. Что касается организаций некоммерческой сферы, продукт может быть распространен на договорной основе.

По итогу такого сегментирования рынка можно сделать предположение, что спрос на разработанную математическую модель будет более высоким, все же, в некоммерческой сфере.

SWOT – Анализ

Аббревиатура данного анализа расшифровывается как S – strengths (сильные стороны), W – weaknesses (слабые стороны), O – opportunities (возможности), T – threats (угрозы). Такой анализ является комплексным исследованием внутренней и внешней среды проекта. Результат проведенного анализа фиксируется в матрице SWOT со следующими обозначениями: С – сильные стороны, Сл – слабые стороны, В – возможности, У – угрозы.

Таблица 10 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Простота в использовании.</p> <p>С2. Отсутствие необходимости использовать нестандартное или специальное ПО.</p> <p>С3. Простота в редактировании и правках.</p> <p>С4. Полная готовность программы к использованию по назначению.</p> <p>С5. Удовлетворительная точность расчетов.</p> <p>С6. Доступность для широкого круга лиц.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Отсутствие возможности проведения высокоточных конструкторских расчетов.</p> <p>Сл2. Примитивный интерфейс программы.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Широкие возможности для редактирования и корректировки расчетов.</p> <p>В2. Возможность использования в различных сферах деятельности.</p> <p>В3. Возможность интегрирования программы в другие программные комплексы.</p>	<p>В1С1С3</p> <p>В2С1С2С3С4С5С6</p> <p>В3С1С2С3С4</p>	<p>В1Сл2</p> <p>В2Сл1Сл2</p> <p>В3Сл2</p>

Продолжение таблицы 10

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Вероятность повышения спроса на более детальные и точные расчеты.</p> <p>У2. Востребованность в более простом и эргономичном интерфейсе.</p>	<p>У1С1С2С3</p> <p>У2С3</p>	<p>У2Сл2</p>
---	-----------------------------	--------------

Первый взгляд на приведенную таблицу дает нам понимание, что очевидных преимуществ (сильных сторон и возможностей) у проекта больше, чем отрицательных сторон.

На следующем этапе анализа, исходя из приведенной матрицы SWOT, составляются интерактивные матрицы корреляции сильных, слабых сторон и возможностей, а также соотношений сильных и слабых сторон с угрозами. Данное представление поможет сделать вывод о необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 11 – Интерактивная матрица возможностей и угроз

Возможности	Сильные стороны проекта					
	С1	С2	С3	С4	С5	С6
В1	+	-	+	-	-	-
В2	+	+	+	+	+	+
В3	+	+	+	+	0	-
	Слабые стороны проекта					
	Сл1	Сл2				
В1	-	+				
В2	+	+				
В3	-	+				
Угрозы	Сильные стороны проекта					
	С1	С2	С3	С4	С5	С6
У1	+	+	+	-	-	-
У2	0	-	+	-	-	-
	Слабые стороны проекта					
	Сл1	Сл2				
У1	-	-				
У2	-	+				

Таким образом, после проведенного исследования можно сделать заключение, что сильные стороны проекта гораздо больше коррелируют с его возможностями, нежели чем с угрозами. Это четко видно из таблиц 10 и 11. Гибкость, простота и доступность программы поспособствуют ее широкому использованию. Из этого можно сделать выводы о высокой надежности разработанного продукта.

Организация работ по выполнению проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ начинается с составления календарного и сетевого графиков выполнения поставленных задач, их обозначения с указанием участников. Наиболее удобной и наглядной формой

для решения данной задачи является диаграмма Гантта. Диаграмма Гантта – это горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяжёнными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для оптимального составления данной диаграммы рекомендуется длительность каждого из этапов работ перевести из рабочих дней в календарные согласно данной формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительной выполнения i -ой работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительной выполнения i -ой работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

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

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

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

На 2021 год имеем следующие данные:

$$T_{\text{кал}} = 365 \text{ д.}$$

$$T_{\text{пр}} + T_{\text{вых}} = 118 \text{ д.}$$

В таком случае, коэффициент календарности составит:

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 118} = 1,478.$$

Каждый этап выполнения работ оценивается с точки зрения времязатрат и исполнителей. Минимально и максимально возможная трудоёмкость выполнения работ обозначается t_{min} и t_{max} соответственно. Ожидаемая трудоёмкость выполнения заданной работы обозначается как $t_{\text{ож}}$ и определяется следующим образом:

$$t_{\text{ож}} = \frac{3t_{\text{min}} + 2t_{\text{max}}}{5}.$$

Таблица 12 – Временные показатели проведения научного исследования

№ работы	Название работы	Трудоемкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
		t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
		Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер				
1	Выбор направления исследования	2	2	5	5	3	3	3	3	4	4
2	Разработка задания	1	-	3	-	2	-	2	-	3	-
3	Поиск и изучение информации по теме	-	7	-	15	-	10	-	10	-	15
4	Разработка математической модели	1	12	3	20	2	15	2	15	3	22
5	Отладка и проверка программы	1	3	2	5	1	4	1	4	1	6
6	Поэтапное оформление ВКР	-	20	-	40	-	28	-	28	-	41
7	Проверка работы	2	-	5	-	3	-	3	-	4	-
8	Исправление ошибок и недочетов	-	3	-	7	-	5	-	5	-	7
9	Защита ВКР	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
	Итого							11	52	15	96

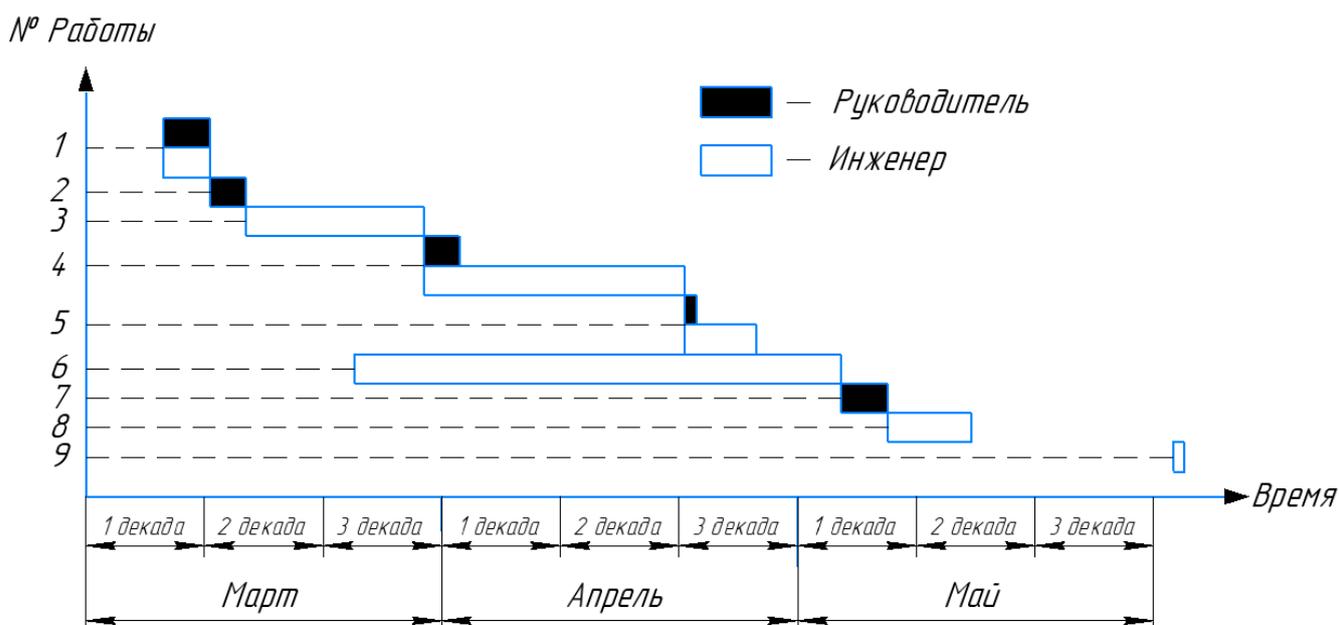


Рисунок 20 – Диаграмма Ганта проведения работ

Представленная в разделе информация наглядно демонстрирует весь план проведения работ по рабочим и календарным дням с распределением работ между задействованными лицами, а также непосредственный состав участников проекта. Суммируя, можно заключить, что вся команда состоит их двух человек – исполнителя (инженера) и научного руководителя проекта. Календарная длительность выполнения работ составила 15 дней для руководителя и 96 дней для исполнителя.

Бюджет научного исследования

Полное и достоверное отражение всех планируемых расходов, необходимых для выполнения научного исследования, является обязательной частью анализа проекта. По итогам планирования бюджета делается вывод о целесообразности вложения средств в разработку данного проекта.

По причине того, что проект выполнен исключительно в электронной среде, материальные затраты на физические предметы отсутствуют. Основной статьей расхода данного научного исследования является заработная плата (ЗП) руководителя проекта. Величина расходов на заработную плату определяется из трудоемкости работ и действующей системы оплаты труда. Дополнительными расходами являются отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы.

Основная ЗП руководителя от ТПУ рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда и включает в себя следующие составляющие:

- Оклад (базовый) – определяется организацией. В ТПУ оклад зависит от занимаемой должности;
- Стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителями подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и пр.;
- Иные выплаты; районный коэффициент.

Основная зарплата руководителя рассчитывается следующим образом:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где $Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата сотрудника, руб;

$T_{\text{раб}} = 26$ – продолжительность работ, выполняемых сотрудником при шестидневной рабочей неделе, раб. дни.

Среднедневная ЗП рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}},$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад сотрудника;

$M = 10,4$ – количество месяцев без отпуска в течение года при шестидневной рабочей неделе, мес;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени сотрудника.

Таблица 13 – Баланс рабочего времени при шестидневной рабочей неделе

Показатели рабочего времени	Руководитель
Календарное число дней	366
Количество нерабочих дней: выходные и праздничные дни	50
Потери рабочего времени: отпуск, невыходы по болезни	51
Действительный годовой фонд рабочего времени	265

Месячный должностной оклад сотрудника:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{б}} \cdot (1 + K_{\text{пр}} + K_{\text{д}}) \cdot K_{\text{р}},$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад сотрудника, руб.;

$K_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент;

$K_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок;

$K_{\text{р}}$ – районный коэффициент.

Таблица 14 – Расчет основной заработной платы руководителя

Исполнители	$Z_{\text{б}}$, руб.	$K_{\text{пр}}$	$K_{\text{д}}$	$K_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$, руб.	$T_{\text{раб}}$, раб. дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	26624	0,3	0,2	1,3	51917	2037	26	52962

Дополнительная заработная плата учитывается в размере 10-15% от основной. В таком случае она составит:

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot 0,12 = 52962 \cdot 0,12 = 6355 \text{ руб.}$$

Следовательно, суммарные затраты на заработную плату научного руководителя составят 59317 рублей.

Еще одной статьей расходов являются отчисления во внебюджетные фонды, которые рассчитываются следующим образом:

$$C_{\text{внеб}} = K_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где $K_{\text{внеб}} = 0,302$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot (52962 + 6355) = 17914 \text{ руб.}$$

Накладные расходы учитывают затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Накладные расходы определяются как:

$$C_{\text{накл}} = K_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где $K_{\text{накл}} = 0,16$ – коэффициент, накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,16 \cdot (52962 + 6355) = 9491 \text{ руб.}$$

Таблица 15 – Бюджет затрат проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.	%
Затраты по заработной плате	59317	68
Отчисления во внебюджетные фонды	17914	21
Накладные расходы	9491	11
Бюджет затрат проекта	86722	100

После детального анализа бюджета затрат на реализацию проекта установлено, что итоговый бюджет затрат составляет 86722 рублей. Более половины всех затрат (68 %) является заработная плата руководителя проекта. Стоит отметить, что бюджет такого размера является совершенно адекватным для представленного исследования.

1.5. Реестр рисков проекта

Для страховки проекта от непредвиденных ситуаций необходимо заранее идентифицировать все возможные риски и оценить их влияние на проект. Такой подход позволит избежать неблагоприятных эффектов и разработать превентивные меры по их предотвращению. Удобной формой представления вероятных рисков, возможных причин их появления и мер по смягчению или предотвращению является таблица реестра рисков. Вероятность наступления риска и его влияние оценены по пятибалльной шкале.

Таблица 16 – Реестр рисков проекта

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения	Условия наступления
1	Спрос на высокоточные расчеты	Падение актуальности и проекта	3	3	Высокий	Разработка более высокоточной модели	Возрастание спроса на ГТУ в промышленности
2	Уменьшение спроса	Падение актуальности и проекта	1	3	Средний	Расширение универсальности и программы	Деградация промышленности с использованием ГТУ
3	Требование эргономичного и простого интерфейса	Падение актуальности и проекта	3	3	Высокий	Внедрение программы в другие эргономичные программные комплексы	Расширение использования ГТУ в промышленности
4	Появление новых методик и технологий расчета	Падение актуальности и проекта	1	2	Низкий	Гибкость программы дает возможность легкого редактирования	Развитие отраслей и использованием ГТУ
5	Наличие ошибок или неточностей в расчетах	Падение актуальности и проекта	3	4	Высокий	№ 4	Отсутствие опыта у разработчика

Исходя из данных реестра рисков делаем вывод, что наибольшей угрозой являются риски № 1, 3 и 5. Именно на них следует обратить особое внимание при внедрении проекта.

Определение ресурсоэффективности проекта

Определение финансово – ресурсной эффективности проекта основывается на сравнении трех и более вариантов исполнения проекта и заключается в расчете интегрального показателя эффективности научного исследования. Для расчета данного показателя требуется определить две средневзвешенные величины: финансовая и ресурсная эффективность. Для

сравнительного анализа необходимо представить минимум 2 альтернативных варианта разработки проекта. Варианты могут быть следующие:

1. Текущий (Т) – Времызатраты, исполнители и финансовые расходы соответствуют вышеописанным разделам. Разработка происходит без участия дополнительных лиц и без использования иных программ, кроме Microsoft Excel.
2. Аналог 1 (А1) – К проекту привлекаются дополнительные ресурсы в виде специалистов по расчетам и программированию, соответственно, с использованием иных программных сред. В таком случае, бюджет исследования возрастает, однако сокращаются трудозатраты отдельных участников, а также уменьшаются сроки реализации проекта, возрастает его компетентность.
3. Аналог 2 (А2) – Использование уже готовых математических моделей для проведения исследования. В таком случае бюджет возрастет в силу приобретения готового продукта, однако трудозатраты на исследование значительно снизятся.

Таблица 17 – Варианты разработки проекта

Вариант исполнения	Текущий	Аналог 1	Аналог 2
Стоимость, руб.	86722	137000	90000

Интегральный финансовый показатель:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}},$$

где Φ_{pi} – Стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} – Максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта, в данном случае – аналог 1.

Следовательно, интегральные финансовые показатели вариантов работ для текущего способа и аналогов 1 и 2 соответственно составят:

$$I_{\Phi}^T = \frac{86722}{137000} = 0,63;$$

$$I_{\Phi}^{A1} = \frac{137000}{137000} = 1;$$

$$I_{\Phi}^{A2} = \frac{90000}{137000} = 0,66.$$

Полученные значения дают нам представление о том, во сколько именно раз текущий вариант исполнения проекта или аналог 2 дешевле аналога 1.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a, \quad I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p$$

где I_m^a, I_m^p -интегральный показатель ресурсоэффективности для i-го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i-го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i-го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Таблица 18 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО \ Категории	Весовой коэффициент параметра	Текущий вариант	Аналог 1	Аналог 2
Скорость	0,1	2	4	5
Качественность (надежность)	0,3	3	5	4
Контролируемость	0,25	5	3	4
Трудозатратность	0,05	5	3	2
Экономичность	0,15	5	2	3
Целесообразность	0,15	5	4	2

В таком случае, интегральные показатели ресурсоэффективности для текущего варианта, для аналога 1 и 2 соответственно:

$$I_m^T = 0,1 \cdot 2 + 0,3 \cdot 3 + 0,25 \cdot 5 + 0,05 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 = 4,1;$$

$$I_m^{A1} = 0,1 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,25 \cdot 3 + 0,05 \cdot 3 + 0,15 \cdot 2 + 0,15 \cdot 4 = 3,7;$$

$$I_m^{A2} = 0,1 \cdot 5 + 0,3 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4 + 0,05 \cdot 2 + 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 2 = 3,55.$$

Интегральные показатели эффективности текущего варианта разработки, аналогов 1 и 2 соответственно:

$$I_{\text{фи.нр}}^T = \frac{I_m^T}{I_{\Phi}^T} = \frac{4,1}{0,63} = 6,51;$$

$$I_{\text{фи.нр}}^{A1} = \frac{I_m^{A1}}{I_{\Phi}^{A1}} = \frac{3,7}{1} = 3,7;$$

$$I_{\text{фи.нр}}^{A2} = \frac{I_m^{A2}}{I_{\Phi}^{A2}} = \frac{3,55}{0,66} = 5,38.$$

Данные показатели помогут определить сравнительную эффективность проекта относительно текущего варианта и двух аналогов, вычисляемую как:

$$\mathcal{E}_{\text{ср1}} = \frac{I_{\text{фи.нр}}^T}{I_{\text{фи.нр}}^{A1}} = \frac{6,51}{3,7} = 1,76;$$

$$\mathcal{E}_{\text{ср2}} = \frac{I_{\text{фи.нр}}^T}{I_{\text{фи.нр}}^{A2}} = \frac{6,51}{5,38} = 1,21.$$

Таблица 19 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий вариант	Аналог 1	Аналог 2
1	Интегральный финансовый показатель	0,63	1	0,66
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования	4,1	3,7	3,55
3	Интегральный показатель разработки и аналогов	6,51	3,7	5,38
4	Сравнительная эффективность проекта	-	1,76	1,21

После проведения данного анализа можно сделать вывод о том, что текущий вариант разработки оказался самым оптимальным с точки зрения всех исследуемых параметров. Главным преимуществом используемого способа является более глубокое погружение исследователя в изучаемый вопрос. К недостаткам можно отнести относительное увеличение времени разработки и некоторые возможные несовершенства модели. Из рассматриваемых

альтернатив оба варианта адекватны, однако первый аналог наиболее дорогостоящий.

Выводы по главе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. По итогам выполнения данной главы были обозначены цели выполняемого исследования, а также указаны потенциально заинтересованные в нем лица и организации различных сфер.
2. Проведен SWOT-анализ с указанием преимуществ и недостатков проекта, по итогам которого можно сделать вывод о значительном потенциале разработки. Основными сильными сторонами проекта являются полная его готовность к использованию, а также простота в работе с программой и, как следствие, ее доступность для широкого круга лиц. Главная возможность – это гибкость программы, благодаря которой в последствии ее легко редактировать и внедрять в другие проекты. Существенным недостатком разработки является отсутствие возможности проведения высокоточных инженерных расчетов. Следовательно, именно появление большого спроса на высокоточные расчеты является существенной угрозой для успешного развития проекта.
3. Представлен план-график проведения работ с указанием участвующих лиц. Команда состоит из двух человек – руководитель проекта и исполнитель (инженер). Для наглядного представления распределения работ создана диаграмма Ганта. Общее количество календарных дней по работе над проектом составило 15 для руководителя и 96 для исполнителя.
4. Рассчитан бюджет научного исследования, который является сравнительно небольшим для данной разработки и составляет 87622 рублей. Главной статьей расходов (68%) является заработная плата руководителя.

5. Представлен реестр рисков проекта, позволяющий принимать во внимание возможные угрозы и применение мер по их устранению или смягчению. Основной риск проекта – вероятность наличия ошибок и неточностей в расчетах. Также стоит отметить, что несмотря на все сильные стороны данного НТИ, существует риск появления другого более точного и удобного продукта для моделирования.
6. Анализ ресурсоэффективности проекта показал, что выбранный вариант разработки исследования является самым оптимальным по сравнению с двумя приведенными альтернативами. Главными преимуществами текущего варианта исследования являются более детальное изучение рассматриваемого вопроса исполнителем проекта, а также сравнительная дешевизна НТИ. Интегральный финансовый показатель, показатель ресурсоэффективности текущего варианта исполнения и показатель разработки и аналогов имеют значения 0,63; 4,1 и 6,51 соответственно, они являются самыми высокими из указанных аналогов.

6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

Введение

Целью данной работы является исследование характеристик работы элементов газотурбинного двигателя с помощью созданной математической модели. Так как данная работа выполнена в электронной среде, поэтому рабочим местом является компьютерный стол, оснащённый необходимым электрооборудованием. Вследствие этого представляется необходимым осветить правила и меры предосторожности для данного рабочего места. Предполагается, что областью применения данной работы будет являться среда разработки и анализа газотурбинных установок – конструкторские бюро и научно-исследовательские центры. Потенциальные пользователи – сотрудники указанных организаций. Разработка предполагает ее использование в офисных условиях непосредственно в электронной среде. Выполненная работа имеет высокую актуальность в кругу лиц, занимающихся изучением или конструированием элементов ГТД, и должна стать действенным инструментом в достижении научных и практических целей.

Специфика и режим работы исследователя или разработчика характеризуются значительным умственным напряжением, сильной нагрузкой на зрительный аппарат, неподвижностью и напряженностью в шейно-грудном и поясничном отделах позвоночника, что приводит к появлению усталости изменению функционального состояния центральной нервной системы, появлению болей в запястьях, локтевых суставах, кистях, пальцах рук и спине. При длительной работе за экраном монитора появляются болезненные ощущения в глазах и головная боль.

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Безопасность труда определяется не только окружающими условиями, но и правилами и нормами поведения за рабочим местом, в особенности режим труда и отдыха. Одним из документов, регламентирующих их является "ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере" (утв. Приказом Минсвязи РФ от 02.07.2001 N 162) [14].

Согласно ей, деятельность, проводимая при работе с нашим приложением, относится к 3-ей группе: творческая работа в режиме диалога с компьютером. Она соответствует III категории тяжести и напряженности работы с компьютером, которые определяются по суммарному времени непосредственной работы с компьютером за рабочую смену. Категории работ представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Категории работ и время регламентированных перерывов [14]

Категория работы	Уровень нагрузки за рабочую смену при видах работ с компьютером			Суммарное время регламентированных перерывов, мин	
	Группа А, количество знаков	Группа А, количество знаков	Группа В, часов	При 8-ми часовой смене	При 12-ти часовой смене
I	До 20000	До 15000	До 2	30	70
II	До 40000	До 30000	До 4	50	90
III	До 60000	До 40000	До 6	70	120

При 8-часовой рабочей смене работе на компьютере регламентированные перерывы следует устанавливать для III категории работ через 1,5 - 2,0 часа от начала рабочей смены и через 1,5 - 2,0 часа после обеденного перерыва продолжительностью 20 минут каждый или продолжительностью 15 минут через каждый час работы.

При 12-часовой рабочей смене регламентированные перерывы должны устанавливаться в первые 8 часов работы аналогично перерывам при 8- часовой рабочей смене, а в течение последних 4 часов работы, независимо от категории и вида работ, каждый час продолжительностью 15 минут.

При долгой работе за компьютером происходит большая нагрузка на глаза, шейный, плечевой и поясничные отделы позвоночника, что может стать причиной таких заболеваний как близорукость, сколиоз, синдром запястного канала, остеохондроз, гиподинамию, ожирение, которые могут быть стать причиной более тяжелых заболеваний. Так же длительный труд в таких условиях

может вызвать быструю утомляемость, снижение работоспособности, расстройства нервной системы, неприятные и болезненные ощущения в глазах. В целях профилактики вышеперечисленных заболеваний следует в каждом перерыве между работой проводить разминки для глаз и опорно-двигательного аппарата.

Наряду с организованными физкультминутками на перерывах, сохранить здоровье и хорошее самочувствие поможет правильно организованное рабочее место. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009 «Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5» [15] подробно описывает все детали правильной организации рабочего пространства. Основные ее параметры указаны на рисунке ниже.

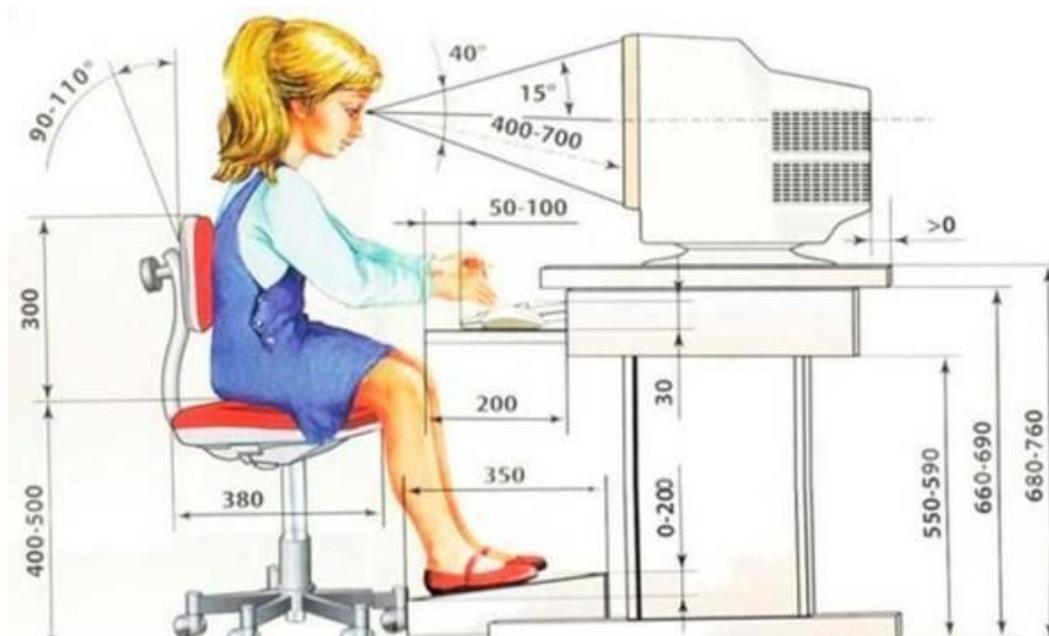


Рисунок 19 – Организация работы на ПЭВМ

Данный вид работы сопровождается рядом вредных и опасных факторов производства. Эти факторы по ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [13] представлены в таблице 4.

Производственная безопасность

Таблица 4 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Неудовлетворительное состояние микроклимата	+	+	+	ГОСТ 12.1.005-88; СанПиН 2.2.4.548-96; ГОСТ Р 50571. 17-2000.
2. Повышенный уровень шума на рабочем месте	+	+	+	СанПиН 2.2.42.1.8.562-96; ГОСТ 12.1.003–83; ГОСТ 12.1.029-80.
3. Пониженная ионизация воздуха	+	+	+	СанПиН 2.6.1.2523-09
4. Повышенный уровень электромагнитных излучений	+	+	+	СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03
5. Плохая освещенность	+	+	+	СНиП 23-05-95; ГОСТ Р 50923-96.
6. Поражение электрическим током, короткое замыкание	+	+	+	ГОСТ 12.1.038–82; ГОСТ Р 12.1.019-2009; ГОСТ 12.4.011-89

Анализ вредных и опасных факторов

Микроклимат

Одним из основных факторов производства является микроклимат рабочего помещения. В любых трудовых условиях микроклимат должен поддерживаться в оптимальном состоянии, дающем ощущение теплового комфорта в течение всего трудового дня, различными методами защиты. Недопустимо, чтобы у работника случились нарушения состояния здоровья, вызванные отклонениями в микроклимате.

В нашем случае работа производится в однообразном сидячем положении, что соответствует 1а категории тяжести работ по СанПиН 2.2.4.548-

96 [16]: легкие, интенсивность энергозатрат до 120 ккал/час, работы сидя с незначительным физическим напряжением.

Для категории 1а установлены пределы значений температуры и влажности, указанные в таблице 5.

Таблица 5 – Допустимые величины показателей воздушной среды на рабочих местах производственных помещений по СанПиН 2.2.4.548-96

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С не более	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/сек
Холодный	Легкая – 1а	22-24	40-60	0,1
Теплый	Легкая – 1а	22-25	40-60	0,1

Температура воздуха в рабочих помещениях держится около $23\pm 2^{\circ}\text{C}$, влажность около 60%, что соответствует нормам. Поддержание оптимальных условий происходит при помощи центрального отопления и вентиляции.

Освещенность рабочего места

Не менее важным фактором производства является качественное и правильное освещение рабочего места. В соответствии с ГОСТ Р 50923-96 «Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения» [18], существуют следующие рекомендации к освещенности в помещениях и на рабочих местах:

1. Для освещения зоны расположения документов допускается установка светильников местного освещения;

2. Отношение яркостей в зоне наблюдения (экран, документ, поверхность стола) должно быть не более 10:1;

3. В поле зрения оператора должны отсутствовать прямая и отраженная блескость. Для снижения блескости необходимо:

– оборудовать светопроемы солнцезащитными устройствами (шторами, регулируемые жалюзи, внешними козырьками и т.д.);

- использовать для общего освещения светильники с рассеивателями и экранирующими решетками, яркость которых в зоне углов излучения более 50° от вертикали не должна превышать 200 кд/м^2 ;
- использовать для местного освещения светильники с непросвечивающим отражателем и защитным углом не менее 40° ;
- размещать рабочий стол так, чтобы оконный проем находился сбоку (справа или слева), при этом дисплей должен располагаться на поверхности стола справа или слева от оператора;
- размещать рабочий стол между рядами светильников общего освещения;
- использовать дисплей, имеющий антибликовое покрытие экрана или антибликовый фильтр.

4. На рабочем месте оператора должна быть ограничена пульсация освещенности от газоразрядных источников света.

Согласно СНиП 23-05-95 [19], освещенность в кабинетах с вычислительной техникой при общем освещении должна составлять 400 лк. Расчет комфортного уровня освещения, опираясь на [26 – 31], представлен в приложении А.

Уровень шума

Ещё один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды – шум. Предельно допустимый уровень звука по СН 2.2.4/2.1.8.562–96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки» [20] приведен в таблицах 6 и 7.

Таблица 6 – Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Творческая деятельность, научная деятельность, программирование, врачебная деятельность	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Таблица 7 – Допустимые уровни звукового давления, уровни звука, эквивалентные и максимальные уровни звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий и шума на территории жилой застройки

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука (в дБА)	Максимальные уровни звука L _{Аmax} , дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
	5		5	0	0	0	0	0			
Учебные кабинеты, аудитории учебных заведений, читальные залы библиотек	79	63	52	45	39	35	32	30	28	40	5

Рабочее место находится в компьютерных классах НТБ ТПУ, где основными источниками шума являются вычислительные машины и система вентиляции и кондиционирования воздуха. Исходя из технической документации установленного в помещении оборудования, можно сделать вывод, что шумовая обстановка соответствует норме.

Повышенный уровень электромагнитных излучений

Любое оборудование, работающее от электрической сети, производит электромагнитное излучение (ЭМИ). Чаще всего мы не ощущаем его влияния, но если ЭМИ достигает колоссальной мощности, то человек чувствует его как выброс тепла. Однако небольшие мощности остаются незамеченными и

медленно, но верно, наносят вред нашему организму. Наше тело вырабатывает немало бегущий по нему электрических импульсов. С их помощью ЦНС может передавать указания мышцам и получать информацию от рецепторов, сердечная мышца сокращаться, и ряд других функций осуществлять свое незаметное действие для полноценной деятельности организма. При нарушении спокойного прохождения этих импульсов могут развиваться неврологические заболевания, сердечно-сосудистой системы, эндокринные. Чтобы обезопасить людей от воздействия ЭМИ разработан СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов» [21], описывающий допустимые нормы воздействия ЭМИ, требования для его измерения и защиты. Предельно допустимые условия указаны в таблице 8.

Таблица 8 – ПДУ электромагнитных полей на рабочих местах пользователей ПК и другими средствами ИКТ.

Нормируемые параметры	Частота	ПДУ
Напряженность электрического поля	5 Гц - < 2 кГц	25 В/м
	2 кГц - < 400 кГц	2,5 В/м
Напряженность магнитного поля	5 Гц - < 2 кГц	250 нТл
	2 кГц - < 400 кГц	25 нТл
Плотность потока энергии	300 МГц – 300 ГГц	10 мкВт/см

Защита персонала от воздействия ЭМИ РЧ осуществляется путем проведения организационных и инженерно-технических мероприятий, а также использования средств индивидуальной защиты. К организационным мероприятиям относятся: выбор рациональных режимов работы оборудования; ограничение места и времени нахождения персонала в зоне воздействия ЭМИ РЧ. Инженерно-технические мероприятия включают: рациональное размещение оборудования; использование средств, ограничивающих поступление электромагнитной энергии на рабочие места персонала (поглотители мощности, экранирование, использование минимальной необходимой мощности генератора); обозначение и ограждение зон с повышенным уровнем ЭМИ РЧ. К средствам индивидуальной защиты относятся защитные очки, щитки, шлемы,

защитная одежда (комбинезоны, халаты и т.д.). Способ защиты в каждом конкретном случае должен определяться с учетом рабочего диапазона частот, характера выполняемых работ, необходимой эффективности защиты.

Пониженная ионизация воздуха

В комнатах и офисах, наполненных техникой, отрицательные ионы воздуха (аэроионы) теряют свой заряд. На поверхности телевизоров, мониторов компьютеров образуется положительный заряд, который и притягивает отрицательные частицы. Экраны ПК и ТВ не только поглощают все полезные аэроионы, они ещё и генерируют мириады вредоносных положительных ионов, наполняя ими воздух помещений. Поэтому вокруг человека, работающего за компьютером, аэронов совсем мало. Именно из-за этого начинаются головные боли, появляется утомляемость и снижается иммунитет. Таким образом, людям, которые проводят у экранов ПК и ТВ много времени, дышать аэроионами, вырабатываемыми ионизатором крайне необходимо: только так в этих условиях можно сохранить здоровье и создать благоприятный микроклимат.

Таблица 9 – Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений согласно СанПиН 2.6.1.2523-09.

Число ионов в 1 см ³ воздуха (N+, N-)	N+	N-
Минимально необходимые	400	600
Оптимальные	1500-3000	3000-5000
Максимально допустимые	50000	50000

По СанПиН 2.6.1.2523-09 [22] рекомендуется производить нормализацию аэроионного состава воздуха на протяжении всего времени пребывания человека на рабочем месте.

Опасность поражения электрическим током

Помимо перечисленных выше опасных факторов работы за компьютером нельзя также забывать об опасности поражения электрическим током: статическим и переменным.

На основе уже проведённых исследований можно классифицировать негативные воздействия на организм человека в случае длительного нахождения в поле статистического заряда:

- функциональные нарушения в Центральной Нервной Системе;
- спазм сосудов, способный вызвать повышение артериального давления;
- чрезмерная эмоциональность и раздражительность;
- головные боли;
- нарушения аппетита и сна;

Согласно ГОСТу 12.4.011-89 «Средства защиты работающих. Общие требования и классификация» [23] к средствам защиты от повышенного уровня статического электричества относятся:

- Заземляющие устройства;
- Увлажняющие устройства;
- Нейтрализаторы;
- Экранирующие устройства;
- Антиэлектростатические вещества.

Гораздо более редко бывают случаи поражения переменным током, но о них тоже не нужно забывать. Причиной их служить может работа с неисправным оборудованием, нарушение техники безопасности, короткое замыкание. В "Правилах эксплуатации электроустановок потребителей" и "Правилах техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей" сказано, что для сведения к минимуму электроопасности при работе с компьютером, следует установить дополнительные оградительные устройства, обеспечивающие недоступность токоведущих частей для прикосновения и обязательным во всех случаях является наличие защитного заземления или зануления (защитного отключения) электрооборудования. Специально для снижения опасности короткого замыкания используются устройства защитного отключения (УЗО). Они обеспечивают автоматическое разъединение электроустановки от питающей сети при возникновении опасности поражения электротоком. УЗО

включает в себя датчики, сигнализирующие о появлении опасной ситуации на оборудовании, усилители с исполнительными органами, разъединяющими электрическую сеть по сигналам датчиков, а также контрольно-измерительные и сигнальные устройства. В сетях напряжением до 1000 В исполнительными органами УЗО являются автоматические выключатели и контакторы. В зависимости от применяемых датчиков УЗО обеспечивает отключение оборудования при появлении потенциала на корпусе или изменении напряжения фазы относительно земли, резком возрастании тока в проводниках зануления, падения сопротивления изоляции проводов сети и др.

В компьютерном зале НТБ ТПУ используются приборы, потребляющие напряжение 220В переменного тока с частотой 50Гц. Это напряжение опасно для жизни, поэтому обязательны следующие меры предосторожности:

1. перед началом работы необходимо убедиться, что выключатели и розетка закреплены и не имеют оголённых токоведущих частей;
2. при обнаружении неисправности оборудования и приборов, необходимо не делая никаких самостоятельных исправлений сообщить ответственному за оборудование;
3. запрещается загромождать рабочее место лишними предметами.

Экологическая безопасность

Понятие экологической безопасности подразумевает под собой совокупность природных, социальных и других условий, обеспечивающих безопасную жизнь и деятельность проживающего на данной территории населения. Вредные и опасные факторы, влияющие на человека, мы рассмотрели выше, в этом разделе рассмотрим влияние на природу. Основной проблемой данного раздела будет являться утилизация отходов компьютерной техники и ламп, использующихся для освещения рабочего пространства.

Большинство компьютерных компонентов содержит определённый объём вредных или опасных веществ. В состав печатных плат входит пластмасса, цветные металлы, стекловолокно, мышьяк, кремний, галлий и свинец. ЭЛТ-дисплеи содержат стекло, металлы, пластмассы, свинец, барий, а также

редкоземельные металлы. Батареи портативных компьютеров могут содержать свинец, кадмий, литий, щелочной марганец и ртуть. Так как все эти материалы могут представлять опасность для окружающей среды и здоровья человека, их утилизацию, включая захоронение в мусорных свалках нужно осуществлять согласно законодательству и другим нормативным положениям. Основным документом, регламентирующим утилизацию отходов, является ГОСТ Р 51768-2001 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами» [24]. Отдельное упоминание компьютерной техники содержится в Статье 192. УК РФ «Нарушение правил сдачи государству драгоценных металлов и драгоценных камней» и Статье 19.14. КоАП РФ Ответственность за «Нарушение правил извлечения, производства, использования, обращения, получения, учета и хранения драгоценных металлов, драгоценных камней или изделий, их содержащих», так как помимо вредных и опасных веществ в составе элементов ПК содержатся драгоценные металлы, такие как золото, серебро и платина.

Утилизация отходов электронного оборудования и оргтехники проходит поэтапно. Сложноструктурные отходы разделяются на перерабатываемые компоненты и компоненты, направляемые на обезвреживание. Технология переработки большинства компонентов включает их сортировку, гомогенизацию и направление на повторное использование с предварительной переплавкой или помолом. Переработка таких компонентов, как электронно-лучевые трубки и жидкокристаллические мониторы сложный технологических процесс, требующий принятия специальных мер для обеспечения требуемого уровня безопасности персонала, а получаемые в результате компоненты не представляют интереса в качестве вторичных материальных ресурсов.

Аналогичная ситуация с утилизацией люминесцентных ламп. После поломки их корпуса в атмосферу выделяются вредные пары ртути, составляющие принцип работы этого типа ламп. Поэтому их, как и компьютеры и другие электронные приборы нужно сдавать на предприятия для переработки и утилизации. В настоящее время есть много фирм, предлагающие свои услуги по организации вывоза из квартир и утилизации отходов.

Безопасность в чрезвычайных ситуациях

По характеру источников возникновения чрезвычайные ситуации делятся на:

- природные;
- техногенные;
- экологические;
- биолого-социального характера.

С наибольшей вероятностью в рассматриваемом случае может возникнуть чрезвычайная ситуация техногенного характера, а именно пожар. Согласно ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. «Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1)» [25] пожарная безопасность объекта должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Противопожарная защита должна достигаться применением одного из следующих способов или их комбинацией:

- применением средств пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;
- применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения;
- применением основных строительных конструкций и материалов, в том числе используемых для облицовок конструкций, с нормированными показателями пожарной опасности;
- применением пропитки конструкций объектов антипиренами и нанесением на их поверхности огнезащитных красок (составов);
- устройствами, обеспечивающими ограничение распространения пожара;
- организацией с помощью технических средств, включая автоматические, своевременного оповещения и эвакуации людей;
- применением средств коллективной и индивидуальной защиты людей от опасных факторов пожара;

- применением средств противодымной защиты.

Компьютерный класс в НТБ ТПУ имеет несколько пунктов из указанных методов защиты, а именно, он оснащен несколькими ручными углекислотными огнетушителями ОУ-2, пожарным краном, автоматической установкой пожарной сигнализации, устройствами оповещения людей, а также стикерами-указателями «выход там», информационными фосфоресцирующими плакатами со схемами эвакуации и светящимися табличками «выход».

Заключение по разделу «Социальная ответственность»

В ходе выполнения работы над разделом «Социальная ответственность» были выявлены опасные и вредные факторы, воздействию которых может подвергнуться человек, производящий компьютерное моделирование. Среди этих факторов есть шум, уровень освещённости, показатели микроклимата, умственное перенапряжение, электромагнитное излучение и электрический ток, но их показатели не превышают допустимых значений. Был проведен анализ нормативной документации.

Основываясь на результатах проделанной работы, был предложен ряд мер, для исключения или уменьшения влияния опасных и вредных факторов на человека и окружающую среду. Таким образом, рабочее место исследователя соответствует нормативным требованиям по безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе представлены данные исследования вопроса о математическом моделировании ГТД, а также изучения на основе созданных моделей их характеристик. В процессе выполнения работы была установлена суть математического моделирования как в целом, так и для ГТД в частности, а также указано назначение моделей с точки зрения энергетики. Проведенный анализ показал, что математическое моделирование может подразделяться на несколько иерархических уровней с различными степенями точности расчета и областями охвата исследуемого вопроса.

В вопросе регулирования газотурбинных двигателей наибольший интерес представляет составление универсальной характеристики агрегата. Было установлено, что решение этой задачи достигается либо путем тестирования установки на испытательном стенде завода-изготовителя, либо при составлении моделей высоких уровней.

С помощью общеизвестных методик расчета ГТУ в среде Microsoft Excel создана математическая модель первого уровня для расчета схемы ГТУ простого цикла, а также для моделирования ГТД – осевого компрессора, камеры сгорания и газовой турбины. Программа представляет из себя лист (страницу) с таблицей ввода исходных данных и страницу результатов расчета.

По итогам исследования получены и представлены типичные характеристики основных параметров ГТД в зависимости от различных условий эксплуатации.

Проведен анализ вредных и опасных факторов, которые могут воздействовать на разработчика либо на пользователя данной программы. Указаны правила и меры предосторожности по снижению их влияния.

Представлена оценка проекта с точки зрения ресурсной и финансовой эффективности, а также анализ его социальной значимости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев Б.П., Коваль В.А., Канаков В.В., Павленко Г.В., Романов В.В. Основы проектирования газотурбинных двигателей и установок. - Харьков: Контраст, 2005. - 376 с.
2. Комаров, О. В. Тепловые и газодинамические расчеты газотурбинных установок: учебно-методическое пособие / О. В. Комаров, В. Л. Блинов, А. С. Шемякин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. — 164 с.
3. Рыбалко В.В., Часовских А.А. Методика теплового расчета газотурбинных энергетических установок: Учебное пособие/СПбГТУ РП СПб, 2002. 102с.: ил.31.
4. Трещёв Д.А., Ромахова Г.А. Особенности работы котла-утилизатора парогазовых установок на нерасчетных режимах [Электронный ресурс] / Д. А. Трещев, Г. А. Ромахова. – Электрон. текстовые дан. URL: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/008783.pdf>. Дата обращения 02.5.2020 г.
5. Паровые и газовые турбины для электростанций [Электронный ресурс]: учебник для вузов / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний; под ред. А.Г. Костюка. — М.: Издательский дом МЭИ, 2016. — Загл. с тит. экрана.
6. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / под ред. С.В. Цанева – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 584 с., ил.
7. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: Учебник для теплоэнергетических специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с., ил.
8. ГОСТ 23851-79. Двигатели газотурбинные авиационные. Государственный стандарт Союза ССР.
9. Трухний А. Д. Парогазовые установки электростанций: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013. — 648 с.: ил.

10. Расчётная модель ГТУ с энергетическим впрыском водяного пара. Суворов Д. М., Суших В. М., Содикзода Т. Х. В сборнике: Общество. Наука. Инновации (НПК-2019). Сборник статей XIX Всероссийской научно-практической конференции. Вятский государственный университет. 2019. С. 349-354.
11. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели». 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. 432 с., ил.
12. Расчет осевого компрессора и газовой турбины ГТУ: Метод. указания / Сост.: Л.Б. Шигапов. А.Л. Шигапов. – Казань: Казан, гос. энерг. ун-т, 2009. - 32 с.
13. ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
14. "ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере" (утв. Приказом Минсвязи РФ от 02.07.2001 N 162).
15. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT). Часть 5. Требования к расположению рабочей станции и осанке оператора.
16. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату
17. производственных помещений.
18. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
19. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
20. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.

21. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов.
22. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности.
23. ГОСТ 12.4.011-89. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
24. ГОСТ Р 51768-2001. Ресурсосбережение. Обращение с отходами.
25. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования (с Изменением N 1).
26. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 800 с.
27. Кнорринг Г.М. Осветительные установки. – Л.: Энергия, 1981. – 412 с.
28. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Под ред. Г.М. Кнорринга. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 448 с.
29. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*».
30. ГОСТ 6825-91. Лампы люминесцентные трубчатые для общего освещения.
31. ГОСТ 2239-79. Лампы накаливания общего назначения.

Приложение А

(обязательное)

Расчёт искусственного освещения

Расчет проведен опираясь на источники [26 – 31]. Дано помещение с размерами: длина $A = 10$ м, ширина $B = 10$ м, высота $H = 4$ м, площадь $S = 100$ м². Высота рабочей поверхности $h_{\text{рп}} = 0,75$ м. Требуется создать освещенность $E = 400$ лк. Коэффициент отражения стен $\rho_c = 50\%$, потолка $\rho_{\text{п}} = 70\%$. Коэффициент запаса $k = 1,5$, коэффициент неравномерности $Z = 1,1$. Рассчитать систему общего люминесцентного освещения.

Решение

Выбираются светильники типа ОД-2-40 со следующими размерами: длина $l = 1230$ мм, ширина $b = 266$ мм. Для такого типа светильников величина $\lambda = 1,4$.

Высота свеса принимается равной $h_c = 0,45$ м. Высота подвеса:

$$h_{\text{п}} = H - h_c = 4 - 0,45 = 3,55 \text{ м,}$$

что является выше наименьшей допустимой высоты подвеса светильников выбранного типа (3,5 м).

Расчетная высота:

$$h = H - h_c - h_{\text{рп}} = 4 - 0,45 - 0,75 = 2,8 \text{ м.}$$

Расстояние между светильниками:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,8 = 3,9 \text{ м.}$$

Расстояние от крайнего ряда светильников до стены:

$$\frac{L}{3} = 1,31 \text{ м.}$$

Количество рядов светильников и количество светильников в ряду:

$$n_{\text{ряд}} = \frac{B - \frac{2}{3}L}{L} + 1 = \frac{10 - \frac{2}{3} \cdot 3,9}{3,9} + 1 \approx 3;$$

$$n_{\text{св}} = \frac{A - \frac{2}{3}L}{l + 0,5} + 1 = \frac{10 - \frac{2}{3} \cdot 3,9}{1230 + 0,5} + 1 \approx 5.$$

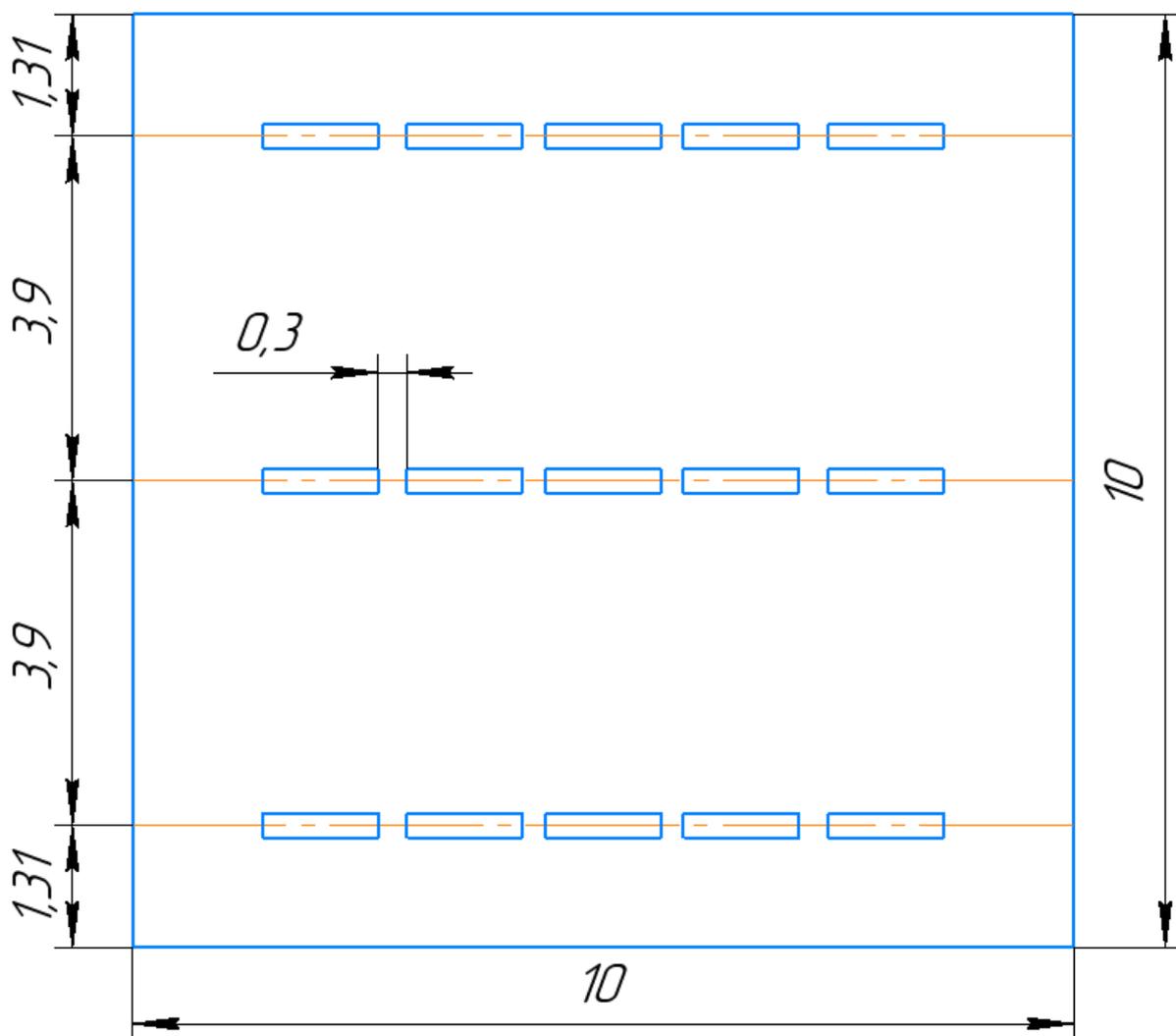


Рисунок А.1 – План помещения и размещение светильников с люминесцентными лампами

По итогам расчетов светильники размещаются в три ряда, по 5 штук в каждом. Учитывая, что в каждом светильнике установлено по 2 лампы, общее количество ламп составило $N = 30$ шт.

Индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A+B)} = \frac{100}{2,8 \cdot (10+10)} = 1,79.$$

Коэффициент использования светового пучка в соответствии с методическими указаниями:

$$\eta = 0,6.$$

Потребный световой поток ламп в каждом из рядов:

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot k \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{400 \cdot 100 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{30 \cdot 0,6} = 3667 \text{ лм.}$$

Выбирается ближайшая стандартная лампа – ЛД 65 Вт с потоком 3750 лм.

Проверка выполнения условия:

$$-10 \% \leq \frac{\Phi_{\text{станд}} - \Phi_{\text{расч}}}{\Phi_{\text{станд}}} \cdot 100 \% \leq 20 \%;$$

$$\frac{\Phi_{\text{станд}} - \Phi_{\text{расч}}}{\Phi_{\text{станд}}} \cdot 100 \% = \frac{3750 - 3667}{3750} \cdot 100 \% = 2,2\%.$$

Электрическая мощность осветительной установки:

$$P = 30 \cdot 65 = 1950 \text{ Вт.}$$

Приложение Б

(справочное)

LITERATURE REVIEW

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ92	Герасимов Ян Маркович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Галашов Николай Никитович	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения иностраннх языков	Кемерова Наталья Сергеевна	-		

Gas turbine plants are widely used in various industries. Historically, GTPs were most widely spread as a drive at booster and linear compressor stations of main gas pipelines. Since 2000s a large number of high-capacity power gas turbines were put into operation as part of steam-gas plants of thermal power plants in Russia due to the development of the energy industry in country. Moreover, low-power gas turbines are also becoming widely spread as auxiliary power source in the oil and gas, chemical, metallurgical and other industries. They also become to be used to cover peak ratings in the electricity sector. Several stationary gas turbine plants of various types used in our country has more than 5000 units.

When engineering of GTP starts, it is necessary to choose some input data:

- Atmospheric conditions of the GTP operation;
- Effective power of GTU;
- The minimum efficiency value of the gas turbine;
- Rotor speed rotation of the driven unit;
- Full initial temperature of the working fluid in the cycle.

When designing a gas turbine based on a known prototype (a plant with similar initial data), additional data can be:

- Pressure rise degree in the axial compressor;
- Mass air flow in the axial compressor of the prototype GTP;
- Rotation frequencies of the prototype GTP rotors.

A gas turbine engine (GTE) is a heat engine designed to convert the energy of fuel combustion into the kinetic energy of a jet stream and (or) into mechanical work on the engine shaft. The main elements of it are a compressor, a combustion chamber and a gas turbine [8]. In this paper, we are interested in gas turbine engines related to stationary energy. Such gas turbine engines are an integral part of a gas turbine plant.

A gas turbine plant is constructively combined gas turbine engine(s) with input and output devices including all units and systems necessary for exploitation. As units and systems can be heat circuits, steam turbines, electric generators and blowers for pumping various substances [1].

Single-shaft and two-shaft schemes of simple and complex cycles are most widespread in power gas plants of high power. In the gas industry, stationary gas turbines with a free power turbine are widely used to drive centrifugal compressors of natural gas. Such turbines are made with simple or regenerative open circuit. The schematic diagrams of such gas turbines are given below:

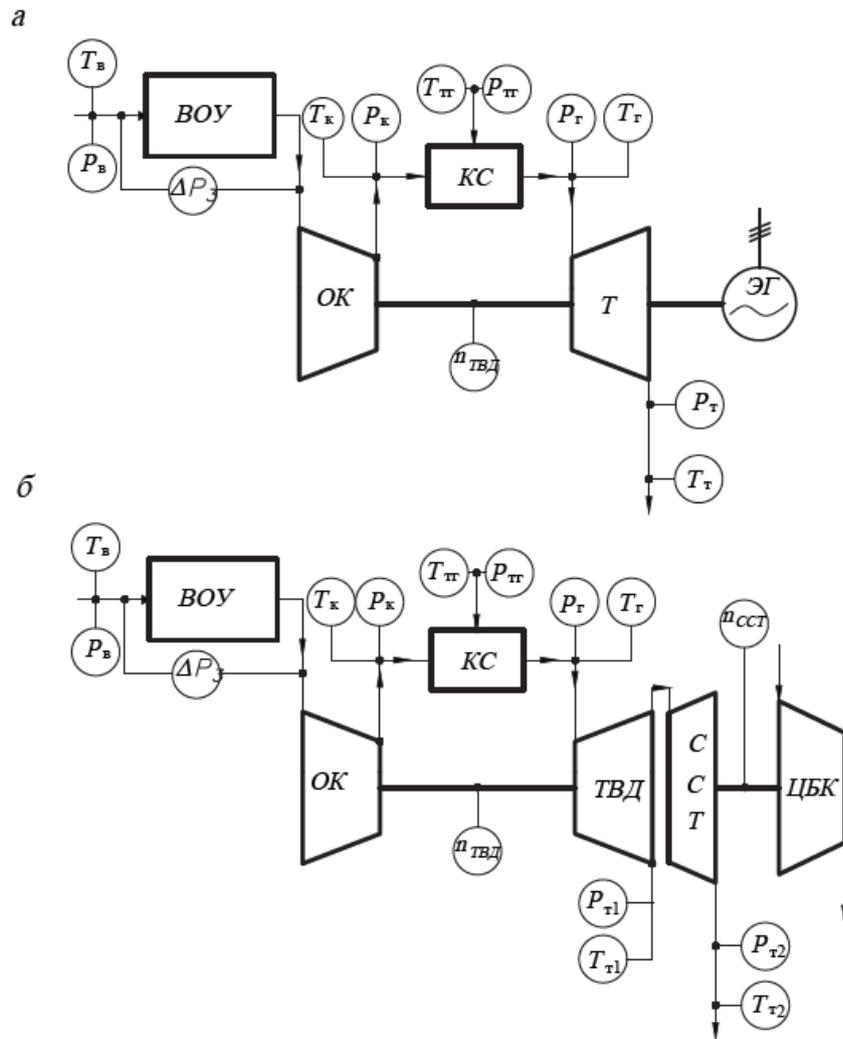


Figure Б.1 - Schematic diagrams of common types of GTP (a - single-compressor single-shaft GTP of a simple open cycle; b - single-compressor two-shaft GTP of a simple open cycle) [2]

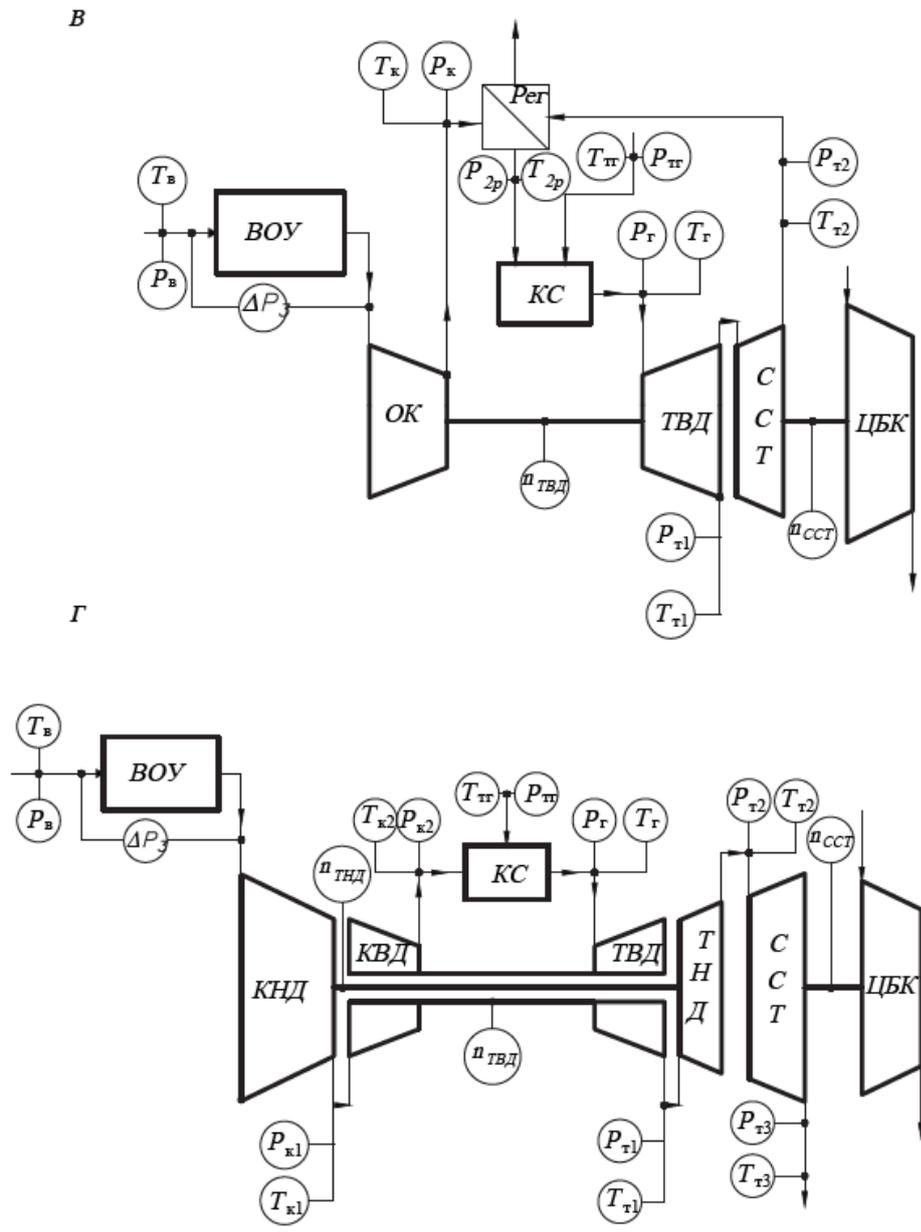


Figure Б.2 - Schematic diagrams of common types of GTP (c - single-compressor two-shaft GTP with heat regeneration of exhaust gases; d - two-compressor three-shaft GTP of a simple open cycle)

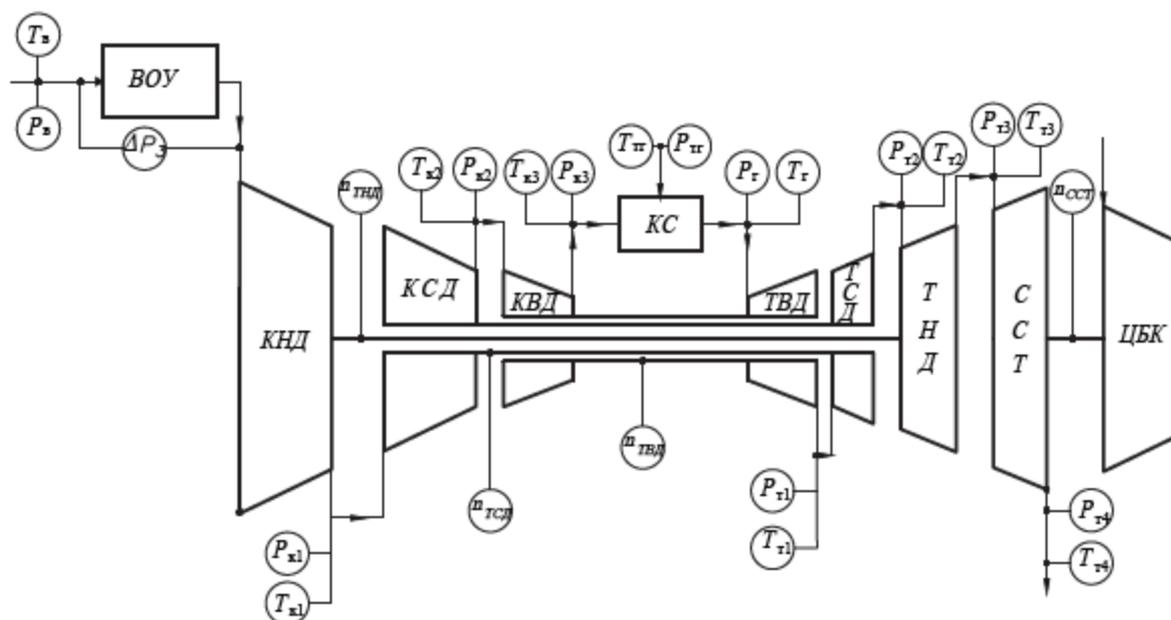


Figure B.3 - Three-compressor four-shaft scheme of a simple open-cycle gas turbine plant [2]

The GTEs can be divided into 2 large segments [1]:

- 1) Turbojet engines;
- 2) Turboshaft engines.

The first group is not interesting to us, because it relates to the aviation industry. The second one includes engines where the most part of fuel combustion energy is converted into work on the output shaft. They can be classified by size: small-sized and full-sized. The small-sized engines are also used mainly in the aviation industry, but they can also be used in gas turbines plants with a capacity of no more than 4 MW. A characteristic feature of modern small-sized GTEs is high peripheral speeds of rotation at the ends of the blades of the first axial stage. It can be 460-500 m/s. Small elongation blades which increase the strength and toughness are also used in construction of small-sized GTEs. This technology allows to reduce the number of stages and the number of blades in a stage, as well as to ensure acceptable values of the Reynolds numbers, making it possible to reach higher compressor efficiency [1].

Full-size turboshaft gas turbine engines are typically used in GTP for driving power generators, pumps, compressors, etc.

The external consumer of useful power specifies the character of the shaft rotation speed changes. If the consumer is a power generator, then the speed of the output shaft is kept constant within the control error. The range of change of the shaft speed rotation is much larger in GTP which used for driving pumps and compressors. This range depends on the characteristics of the consumer and the operating conditions.

The purpose of the unit, the features of its operation and the requirements for manoeuvrability define the choice of the turboshaft GTE scheme. In fig. 1 – 3, the main schemes of turboshaft GTE as part of the GTP are shown. Usually, most native and foreign GTP are performed according to a simple thermal scheme. This is due to the fact that such machines are reliable and easy to service, they have low metal consumption and highly manoeuvrable.

Because of this fact, this GTP have wide application in power units to fulfil peak loads, multi-mode autonomous power plants, as well as in drives of blowers, pumps, etc.

It's important to give a general outline of mathematical modelling. A mathematical model is a description of a system using mathematical concepts and language. The process of developing a mathematical model is termed “mathematical modelling”. There are many definitions of word “model”. But in general case the model is a miniature representation of something; a pattern of something to be made; an example for imitation or emulation; a description or analogy used to help visualize something (e.g., an atom) that cannot be directly observed; a system of postulates, data and inferences presented as a mathematical description of an entity or state of affairs. It should be noted that there are a large variety of modelling ways, and it also includes a lot of number of methods.

Mathematical modelling is one of the most effective and most frequently used methods of scientific research now. In fact, all modern sections of science are devoted to the construction and study of mathematical models of various physical objects and phenomena. This approach can significantly reduce the cost of conducting an experiment and increase its efficiency.

Compared to natural modelling, mathematical has the following advantages:

- 1) Economy;
- 2) Possibility of modelling hypothetical objects that cannot be realized in reality;
- 3) The possibility of implementing dangerous or difficult to reproduce modes and situations of real objects;
- 4) Possibility of changing the time scale;
- 5) High predictive due to the ability to identify common patterns;
- 6) Versatility of hardware and software.

In addition, there are real cases when the mathematical modelling is the only method to receive practical results.

The main stages of mathematical modelling:

1. Creation of a qualitative model (formulation of physical regularities of a phenomenon or process on the basis of an experiment);
2. Creation of a mathematical model/problem statement, including:
 - Highlighting essential factors;
 - Highlighting additional conditions;
3. Studying the mathematical model:
 - Mathematical justification of the model;
 - Qualitative research of the model;
 - Quantitative research of the model;
4. Obtaining results and their interpretation;
5. Using the obtained results.

Based on the description of the advantages of MM, it is easy to conclude that this method is the most acceptable for the energy industry. First of all, this is due to the high cost and difficulty of conducting research using real objects. Moreover, research based on a real unit takes much more time and human resources. That is extremely disadvantageous.

Before a real object is built, or a real situation happened, mathematical modelling lets us to conduct an objective analysis of the system operation. Using of

mathematical modelling makes it possible to solve the problem of choosing the optimal (rational) control system that provides the required character of changes in engine parameters.

Since in this paper a gas turbine engine considered as part of a gas turbine plant, it is logical to refer to the literature related directly to gas turbine plants. Mathematical modelling of GTP is carried out by sequential calculation of all its elements using empirical formulas, in accordance with the known physical laws. For example, Komarov O.V. [2] proposes the following sequence for calculating a gas turbine plant:

1. Thermal calculation of GTP circuits at nominal and variable operating modes;
2. Modelling an axial compressor;
3. Gas-dynamic calculation of a gas turbine;
4. Turbine blade profiling.

But in comparison with the method presented above, Rybalko V.V. [3] describes it following way:

1. Study of the characteristics of the GTP working process;
2. Calculation of GTP characteristics;
3. Calculation of GTP durability;

It should be noted that positions of both authors are completely fair, because they elucidate various but important aspects of GTP modelling. The author of the paper [2] focuses on the calculation of the characteristics of a gas turbine and its auxiliary elements (a gas turbine engine). The article [3] discloses the calculation for the analysis of the entire gas turbine in general.

At the same time, the authors of [1] explain in detail how important it is to correctly match the characteristics of both the GTP and the consumer prior to the mathematical modelling of the GTE. When we start creating the MM of GTE, we must solve the following tasks:

- 1) *in a static mode* – thermogasdynamic calculation of GTE in a basic operation mode, calculation of flow parameters in other modes, search of power rate, unit (relative) fuel consumption, efficiency, real and relative speeds of rotors,

stability reserve, and other data. It can be possible when the laws (programs) of regulation are known.

2) *in a non-static mode* – determination of characters of transitional processes (reception and dropping of gas) and their time to proceed. Calculation of engine parameters, which are changing over time, is possible when the laws (programs) of regulation are known.

Correct calculation of the engine in static and non-static operation modes and its design creation, while taking into account operational characteristics, are important practical tasks.

According to [1], the following requirements are imposed on the construction of the MM GTE:

- hierarchical construction of a mathematical model;
- block structure of the model which allows to replace, add or improve single parts of the model without breaking the overall system;
- while solving a system of equations, optimizing parameters and researching other problems, it is necessary to use standard mathematical methods to the maximum.

These principles are taken into account in the development of methods for calculating engines of various schemes. In case of using modern powerful computing systems, all the mentioned requirements for programs of mathematical models are mandatory. Application of these rules allows solving many problems at various stages of GTE development. It also permits to focus on the physical gist of the task and the obtained results, rather than formal logical and computational operations.

An important fact is that there is a division of modelling into levels, namely, the first, the second (highest) and zero levels. This assertion makes it possible to calculate and study the element or phenomenon which considered a holistic assessment of the GTE characteristics more comprehensively.

Zero level includes a description of the modelled object characteristics as a black box using formal interconnections (tables, approximating and statistical dependencies).

The first level includes the use of relationships and equations that show the physical relationships of internal subsystems. In this case typically errors are used to formulate the task. Moreover, the subsystems are represented by zero-level models.

The second level is a detailed modelling of the interconnections where subsystems consist of the 1st level models.

The following sequence for mathematical modelling of the GTE is proposed by the authors of paper [1]:

1. Mathematical modelling of GTE elements by 1st level models;
2. Mathematical modelling of turbocharger of GTE group by 1st level models;
3. Calculating of GTE turbocharger characteristics by 2nd level models.

Unfortunately, this approach to modelling doesn't give a complete explanation of all physical phenomena occurring. However, if characteristics of the main elements are enough, then it is possible to solve several problems, such as finding the characteristics of regulation ways which is considered to be the most important in engine research.

In addition, it is necessary to pay attention to creation and studying of universal characteristics of the axial compressor, while developing a mathematical model. This characteristic is often combined with that of a gas turbine.

We need to consider universal characteristics, due to which the GTP most often works in a load-changing operation mode. The output parameters of fluid in the compressor are volatile because they depend on inlet air parameters, which are volatile too. Accordingly, universal characteristics are created to find the main parameters of the working fluid dependence on compressor operating mode.

According to [], characteristics of the compressor are a delivery capacity (discharge) dependence on main parameters – final pressure (more often - the pressure ratio), power, internal efficiency graphically depicted under certain rotation frequency, and parameters of gas.

The main ways to create such characteristics are doing tests at a facility of factory, or applying complex mathematical models using powerful computing systems.

If we have a ready-made compressor characteristic describing various machine operating modes, it is possible to recalculate parameters of the working fluid depending on operating mode.

When a characteristic is created by math modelling, there are many opportunities. For example, in [1] it is indicated that the mathematical modelling, even of the first level, allows to solve the following series of problems:

- Calculate the characteristics of the engine, find the margin of stability in a design point;
- Research mistuning stages and machine characteristics depending on rotational angle of inlet guide vanes and surge air bypass;
- Find each stage operating mode at a specific point of the compressor characteristic;
- Find an optimal rotational angle of inlet guide vanes;
- Research the characteristic of GTP depending on the stages of geometric parameters.

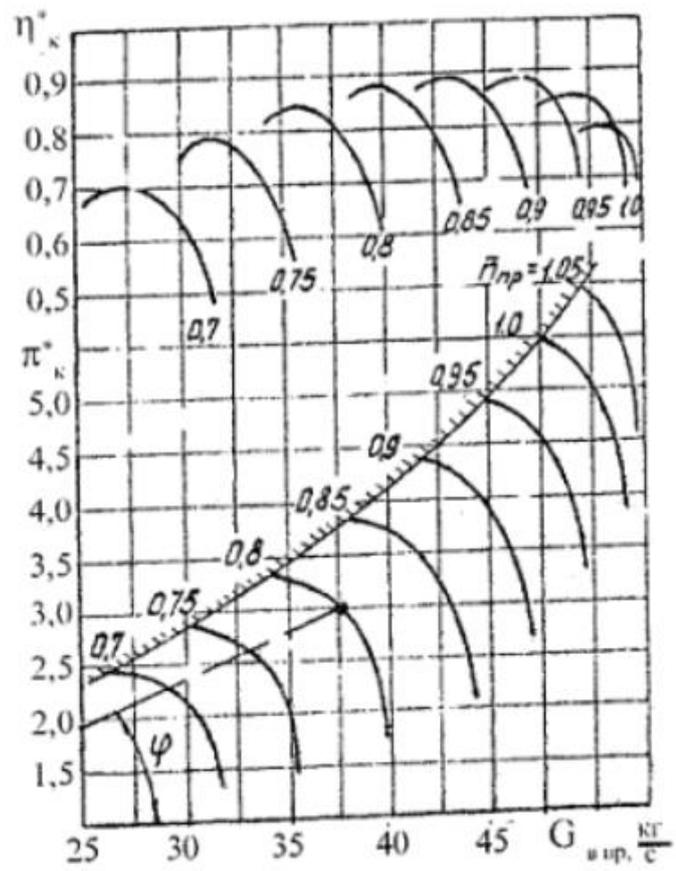


Figure B.4 - Example of an axial compressor characteristics [1]

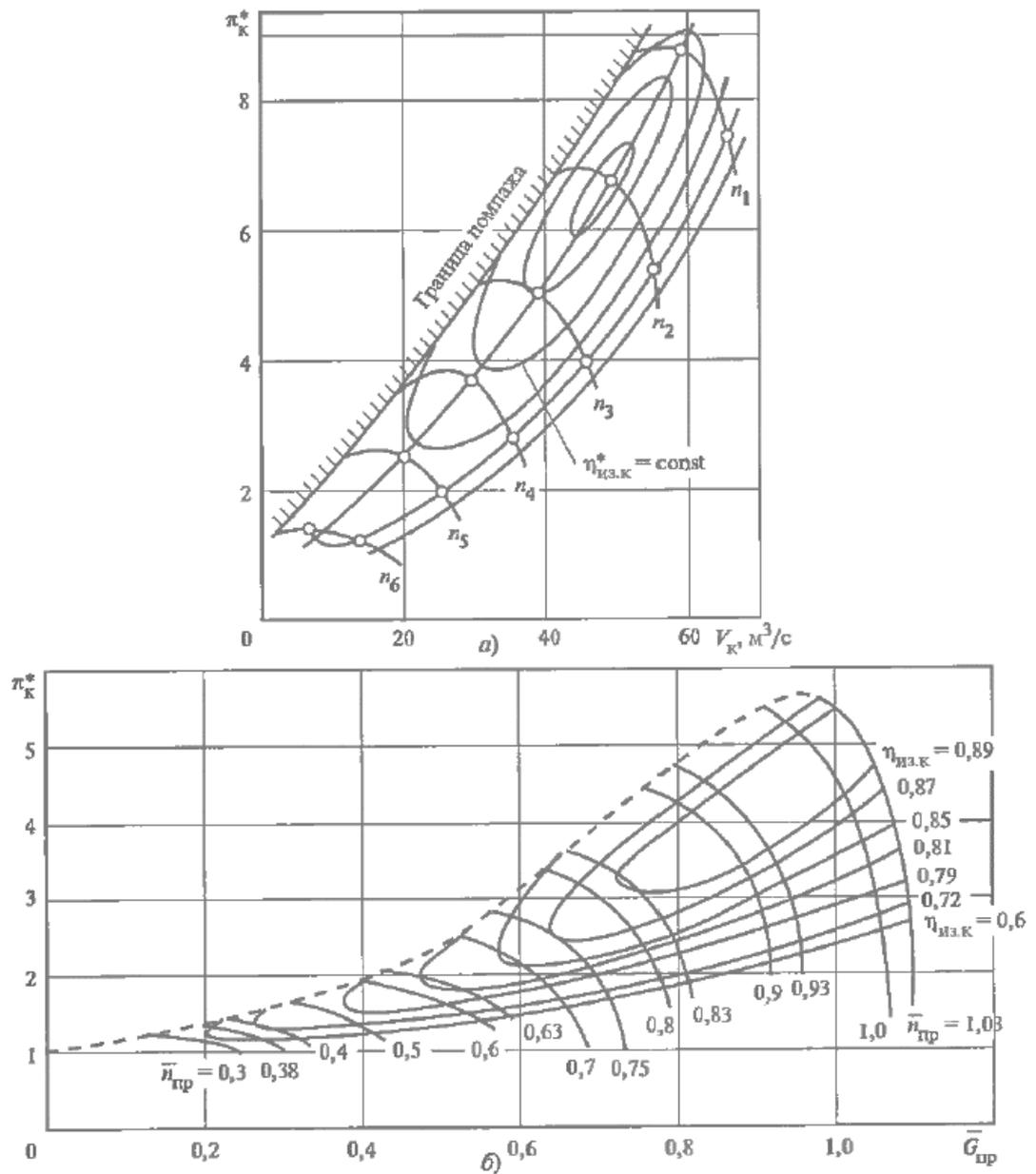


Figure B.5 - Examples of compressor characteristics (a - by absolute values, b - by universal parameters) [6]