

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Е. А. Беркова**

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Утверждено редакционно-издательским советом ФГБОУ ВО «КГТУ»  
в качестве учебно-методического пособия по изучению дисциплины  
для студентов бакалавриата по направлению подготовки  
13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО "КГТУ"  
2022

УДК 621.1.016

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО  
«Калининградский государственный технический университет» А.В. Толмачев

**Беркова, Е.А.**

Техническая термодинамика: учеб.-методич. пособие по изучению дисциплины для студ. бакалавриата по направлению подгот. 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника / Е.А. Беркова. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 58 с.

Учебно-методическое пособие подготовлено в соответствии с учебным планом и рабочей программой дисциплины «Техническая термодинамика» и предназначено для подготовки бакалавров направления подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника.

В учебно-методическом пособии представлены методические материалы по изучению дисциплины, включающие тематический план занятий с перечнем ключевых вопросов для каждой лекции, целевой установкой, рекомендуемой литературой, методическими указаниями и вопросами для самоконтроля. Изложены методические указания по выполнению студентами самостоятельной работы.

Табл. – 1, список литературы – 11 наименований

Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рассмотрено и одобрено методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 26.04.2022 г., протокол № 03

УДК 621.1.016

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2022 г.  
© Беркова Е.А., 2022 г.

## Содержание

Введение .....	4
1. Методические рекомендации по изучению дисциплины.....	9
2. Методические указания по выполнению самостоятельной работы.....	38
Список литературы .....	43
Приложения .....	45

## Введение

Дисциплина «Техническая термодинамика» входит в общепрофессиональный модуль обязательной части ОПОП ВО по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и изучается студентами очной и заочной форм обучения в третьем и четвертом семестрах.

Цель освоения дисциплины состоит в формировании знаний фундаментальных законов, являющихся основой функционирования тепловых машин и аппаратов, представлений о рабочих процессах, протекающих в тепловых машинах и их эффективности, о свойствах рабочих тел и теплоносителей.

В результате освоения дисциплины студент должен:

- знать законы сохранения и превращения энергии применительно к системам передачи и трансформации теплоты, калорические и переносные свойства вещества;
- уметь проводить термодинамический анализ циклов тепловых машин с целью оптимизации их рабочих характеристик и максимизации КПД;
- владеть основами термодинамического анализа рабочих процессов в теплосиловых машинах, навыками определения параметров работы теплосиловых установок и их тепловой эффективности.

Дисциплина опирается на профессиональные и общепрофессиональные компетенции, полученные при изучении таких дисциплин как «Математический анализ», «Физика», «Химия», «Теория горения».

Дисциплина «Техническая термодинамика» является базой для получения знаний, умений и навыков при изучении таких дисциплин как «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологии», «Тепломассообмен», «Возобновляемые источники энергии», «Турбины тепловых и атомных электростанций», «Котельные установки и парогенераторы», «Тепломеханическое и вспомогательное оборудование электростанций», «Парогазовые и газотурбинные установки», «Основы централизованного теплоснабжения», «Нормирование топливно-энергетических ресурсов на ТЭС».

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства поэтапного формирования результатов освоения дисциплины (текущая аттестация);
- оценочные средства для заключительной аттестации по дисциплине (промежуточная аттестация).
- К оценочным средствам поэтапного формирования результатов освоения дисциплины относятся:
  - индивидуальные задания по отдельным темам;
  - задание на написание реферата (только для студентов очной формы обучения);
  - задания и контрольные вопросы по лабораторным работам;

- задание и контрольные вопросы по курсовой работе;
- тестовые задания по отдельным темам дисциплины.

*Индивидуальные задания по отдельным темам* дисциплины для студентов очной формы обучения в первом семестре изучения дисциплины включают решение 19 задач из методических указаний [11] по темам: параметры состояния, закон сохранения энергии, идеальный газ и его свойства, термодинамические процессы для идеального газа, второй закон термодинамики, циклы теплосиловых установок, а также термодинамический анализ одного из трёх теоретических циклов двигателей внутреннего сгорания (Отто, Дизеля, Тринклера) в соответствии с алгоритмом расчета цикла и методикой анализа, изложенными в методическом пособии [8]. Во втором семестре изучения дисциплины студенты очной формы обучения выполняют 19 задач из [11] по темам: реальные газы и пары, термодинамика потока, влажный воздух, циклы теплосиловых установок, циклы холодильных установок. Индивидуальное задание для студентов заочной формы обучения включает шесть задач по темам: параметры состояния, закон сохранения энергии, идеальный газ и его свойства, термодинамические процессы для идеального газа, второй закон термодинамики [11] на выбор преподавателя и выполняется в первом семестре изучения дисциплины. Для самостоятельного решения разработано по 30 вариантов каждого из заданий. Вариант задания определяется преподавателем.

Индивидуальные задания выполняются студентами в течение текущего семестра. Консультации по выполнению индивидуальных заданий и их проверка проводятся преподавателями в часы индивидуальных консультаций. По результатам собеседований студент, самостоятельно выполнивший задания и продемонстрировавший понимание физического смысла рассмотренных процессов, получает оценку «зачтено».

*Задание на написание реферата* выдается студентам очной формы обучения в начале первого семестра изучения дисциплины. Студентам предлагаются на выбор темы по истории и проблемам развития мировой, отечественной и региональной энергетики, по технологии преобразования природных энерго-ресурсов (традиционных и нетрадиционных возобновляемых), по экологическим проблемам энергетики, по обеспечению энергетической безопасности. Темы рефератов приведены в Приложении А.

Объем реферата должен составлять 8-10 страниц формата А4. Выполненная работа предъявляется преподавателю на собеседовании в часы индивидуальных консультаций. Студент, самостоятельно выполнивший задание и усвоивший суть реферируемой проблемы, получает оценку «зачтено».

В соответствии с учебным планом выполнение лабораторных работ по дисциплине «Техническая термодинамика» предусмотрено во втором семестре изучения дисциплины. Для студентов очной формы обучения предусмотрено выполнение семи лабораторных работ. Студенты заочной формы обучения вы-

полняют одну лабораторную работу на выбор преподавателя. *Задания по лабораторным работам* выдаются в лаборатории. Перед началом выполнения каждой работы студент изучает задание и после краткой беседы с преподавателем приступает к её выполнению. По окончании работы студент предварительно знакомит преподавателя с полученными результатами и получает его согласие на оформление отчета, которое осуществляется во внеаудиторное время.

Защита отчета проводится либо на очередном лабораторном занятии, либо в часы индивидуальных или групповых консультаций преподавателя. Студент, защитивший отчёты по всем лабораторным работам с ответами на контрольные вопросы, получает оценку «зачтено». Задания и контрольные вопросы по лабораторным работам представлены в Приложении Б.

*Задание по курсовой работе* студент получает в середине четвёртого семестра, когда начинается изучение циклов паросиловых установок. Целью работы является углубление знаний, полученных студентами на лекциях и в лаборатории, в области теоретических и действительных циклов паросиловых установок, являющихся основными для тепловых электрических станций.

Курсовая работа выполняется по единой теме «Термодинамический анализ цикла паросиловой установки» (в 30-ти вариантах) по учебно-методическому пособию [10]. Варианты различаются выбором начальных параметров пара, что приводит к существенному различию в технико-экономических показателях цикла. Учебно-методическое пособие по выполнению курсовой работы устанавливает общие требования к содержанию и оформлению курсовой работы, включает методики термодинамического анализа теоретического цикла Ренкина и термодинамического анализа действительного цикла паросиловой установки (ПСУ) методом коэффициентов полезного действия и эксергетическим методом, сопоставление результатов анализа необратимого цикла разными методами, примеры расчетов и образцы графического материала. Пособие обязательно для ознакомления перед началом выполнения курсовой работы.

Курсовая работа должна быть выполнена студентом до завершения курса лекций и лабораторного практикума. Выполненная в соответствии с заданием курсовая работа защищается на собеседовании у преподавателя. Контрольные вопросы по курсовой работе приведены в Приложении В. По результатам защиты курсовой работы выставляется экспертная оценка («отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно»), которая учитывается при промежуточной аттестации по дисциплине (на экзамене). Студенту, получившему неудовлетворительную оценку, предоставляется право доработки курсовой работы и определяется новый срок её защиты.

*Тестовые задания по отдельным темам* дисциплины используются для текущего контроля освоения дисциплины. Тестирование студентов проводится на практических занятиях. Каждый вариант теста в зависимости от темы вклю-

чает в себя от пяти до 10 вопросов, на каждый из которых приведены четыре варианта ответа, в том числе один правильный. Оценивание осуществляется по следующим критериям: «зачтено» – 60-100 % правильных ответов на заданные вопросы; «не зачтено» – менее 60 % правильных ответов.

К оценочным средствам для промежуточной аттестации по дисциплине, проводимой в третьем семестре в форме зачета, в четвертом семестре – в форме экзамена, относятся соответственно:

- контрольные вопросы по дисциплине;
- экзаменационные вопросы.

К зачету допускаются студенты, получившие положительную оценку по результатам практических занятий, тестирования и самостоятельной работы. Зачет по дисциплине проводится при условии выполнения и успешной защиты двух индивидуальных заданий и реферата для студентов очной формы обучения или одного индивидуального задания для студентов-заочников.

Зачет проводится в форме собеседования. На зачете студенту задаётся три вопроса. Контрольные вопросы к зачету по дисциплине приведены в Приложении Г. Оценивание результатов сдачи зачета («зачтено» или «не зачтено») осуществляется в соответствии с критериями, указанными в таблице 1.

Таблица 1 – Система и критерии выставления оценки промежуточной аттестации

Система оценок  Критерий	2	3	4	5
	0-40 %	41-60 %	61-80 %	81-100 %
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
1	2	3	4	5
Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из которых может связывать между собой)	Обладает минимальным набором знаний, необходимым для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает набором знаний, достаточным для системного взгляда на изучаемый объект	Обладает полнотой знаний и системным взглядом на изучаемый объект

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Работа с информацией	Не в состоянии находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи	Может найти необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, интерпретировать и систематизировать необходимую информацию в рамках поставленной задачи	Может найти, систематизировать необходимую информацию, а также выявить новые, дополнительные источники информации в рамках поставленной задачи
Научное осмысление изучаемого явления, процесса, объекта	Не может делать научно корректных выводов из имеющихся у него сведений, в состоянии проанализировать только некоторые из имеющихся у него сведений	В состоянии осуществлять научно корректный анализ предоставленной информации	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные задачи данные	В состоянии осуществлять систематический и научно корректный анализ предоставленной информации, вовлекает в исследование новые релевантные поставленной задаче данные, предлагает новые ракурсы поставленной задачи
Освоение стандартных алгоритмов решения профессиональных задач	В состоянии решать только фрагменты поставленной задачи в соответствии с заданным алгоритмом, не освоил предложенный алгоритм, допускает ошибки	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом	В состоянии решать поставленные задачи в соответствии с заданным алгоритмом, понимает основы предложенного алгоритма	Не только владеет алгоритмом и понимает его основы, но и предлагает новые решения в рамках поставленной задачи

Заключительная аттестация по дисциплине в четвертом семестре проводится в форме экзамена. К экзамену допускаются студенты:

- положительно аттестованные по результатам освоения дисциплины в третьем семестре (получившие оценку «зачтено»);
  - получившие положительную оценку по результатам практических и лабораторных занятий и самостоятельной работы;
  - получившие положительную оценку за курсовую работу.
- Экзаменационный билет содержит три вопроса (см. Приложение Д), относящиеся соответственно к темам:
- первый закон термодинамики и процессы идеального газа;
  - свойства реальных газов и термодинамика потока;
  - второй закон термодинамики и циклы теплосиловых и холодильных установок.

Экзаменационная оценка («отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно») является экспертной, зависит от уровня освоения студентом тем дисциплины (наличия и сущности ошибок, допущенных студентом при ответе на экзаменационные вопросы) и выставляется в соответствии с критериями, указанными в таблице 1.

В данном учебно-методическом пособии представлены методические материалы по изучению дисциплины, включающие тематический план занятий с перечнем ключевых вопросов для каждой лекции, целевой установкой, рекомендуемой литературой, методическими указаниями и вопросами для самоконтроля. Изложены методические указания по выполнению студентами самостоятельной работы. В приложении приведены темы рефератов, типовые задания и контрольные вопросы по лабораторным работам, контрольные вопросы для защиты курсовой работы, контрольные вопросы по дисциплине, типовые экзаменационные вопросы, образцы оформления титульного листа индивидуального задания и реферата.

## **1. Методические рекомендации по изучению дисциплины**

Техническая термодинамика – это лишь первая часть более общей фундаментальной дисциплины, известной как «Теоретические основы теплотехники». Поэтому основное внимание при ее изучении отводится лекционному курсу с одновременным проведением практических занятий.

Начиная изучение дисциплины, следует очень серьезно относиться к вводной лекции, на которой преподавателем определяются цель и задачи дисциплины в общей программе профессиональной подготовки, её место в учебном плане, методы, которые будут использованы при её изучении. Указывается перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для самостоя-

тельного изучения ряда тем и разделов. Поэтому, кроме написания конспектов, нужно сразу же получить (приобрести) один из рекомендуемых учебников.

Также на вводной лекции обосновывается роль природных энергетических ресурсов в развитии человеческого общества и в обеспечении его научно-технического прогресса. Дается классификация традиционных и нетрадиционных возобновляемых энергоресурсов, указываются возможные направления их преобразования к видам, удобным для практического использования. Тем самым обеспечивается мотивация к изучению этой дисциплины как базовой при переходе к изучению всех остальных профессиональных дисциплин.

Материал всех остальных лекций сопровождается историческими справками в развитии тех или иных направлений научного познания в рамках программы дисциплины. Указываются возможные направления развития технологий энергетических преобразований. Тем самым на лекциях обеспечивается формирование необходимых для дальнейшей профессиональной деятельности компетенций.

Приходя на очередную лекцию, необходимо обязательно предварительно просмотреть конспект предыдущей лекции, а возникшие при этом вопросы постараться снять с помощью учебника или на консультации у преподавателя. В этом случае обеспечивается преемственность в последовательности изучения материала и устойчивое закрепление знаний. В случае вынужденного пропуска лекции нужно незамедлительно просмотреть и переписать её конспект.

Ниже приведен тематический план лекционных занятий.

## **Тема 1. Введение**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Цель и задачи дисциплины. Место дисциплины в структуре образовательной программы. Планируемые результаты освоения дисциплины.
2. Энергетический баланс мира и России.
3. Тепловая, механическая и электрическая энергия. Способы преобразования энергии. Теплогенераторы. Тепловые двигатели. Тепловые электростанции. Теплоносители. Рабочие тела. Теплообменные аппараты.
4. Термодинамика. Теплотехника.
5. Энергетическая безопасность.
6. Экологические проблемы энергетики.

*Целевая установка:* Изучение темы «Введение» должно привести к пониманию роли природных энергетических ресурсов в развитии человеческого общества; задач по рациональному использованию этих ресурсов и охране окружающей среды; способов преобразования природных видов энергии в тепловую, механическую и электрическую энергию; места и роли термодинамики в системе знаний об энергии и ее свойствах.

*Рекомендуемая литература:* [9, с. 4-9].

*Методические указания:*

В начале изучения дисциплины «Техническая термодинамика» необходимо обозначить цели и задачи изучения этой дисциплины, указать ее место в структуре образовательной программы, сформулировать планируемые результаты освоения дисциплины.

При изучении классификации природных энергетических ресурсов следует уяснить практическую необходимость их преобразования в тепловую, механическую или электрическую энергию. Нужно выделить решающую роль химической энергии органических топлив на современном этапе развития энергетики и в обозримом будущем, несмотря на всемерное вовлечение в энергобаланс нетрадиционных энергоресурсов – ядерной, термоядерной, солнечной и других возобновляемых видов энергии. Следует изучить структуру энергобаланса нашей страны и динамику энергопотребления в России и в мире.

При изучении схем классического преобразования природных видов энергии в тепловую, механическую и электрическую следует более подробно остановиться на схемах теплогенераторов (ТГ), теплосиловых установок (ТСУ) и теплоэлектростанций (ТЭС). Необходимо отметить, что в классических схемах вышеперечисленных установок превращение природной энергии в электрическую и механическую чаще всего происходит не прямо, а в несколько этапов и при участии рабочих тел – паров и газов.

Должны быть определены задачи теплотехники и ее теоретических основ – термодинамики и теплообмена.

Необходимо понять важность обеспечения энергетической безопасности в современных условиях, как Калининградской области, так и все страны.

Должны быть осознаны негативные последствия для окружающей среды при использовании теплоэнергетических установок.

*Вопросы для самопроверки:*

В.1. Какие виды природных энергоресурсов могут быть использованы человеком?

В.2. Какая часть мирового энергопотребления удовлетворяется за счет органического топлива?

В.3. В каких установках может быть получена тепловая, механическая и электрическая энергия?

В.4. Каковы задачи теплотехники как отрасли техники и науки?

В.5. Что понимают под нетрадиционными видами энергоресурсов?

В.6. Какие виды природной энергии используются на энергетических предприятиях?

В.7. Как может быть обеспечена энергетическая безопасность Калининградской области?

В.8. Какие негативные последствия для окружающей среды несет в себе теплоэнергетика?

В.9. Какие меры для охраны окружающей среды необходимо принимать при эксплуатации энергетических установок?

## **Тема 2. Основные понятия и определения**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Предмет и метод термодинамики.
2. Термодинамическая система.
3. Термодинамические параметры.
4. Термическое уравнение состояния.
5. Термодинамические процессы.
6. Энергия и энтальпия.
7. Работа и теплота.

*Целевая установка:* Студент должен получить понятие о предмете и методе исследования в термодинамике, о термодинамических состояниях и процессах, о термодинамических параметрах, об объекте исследования и способах его взаимодействия с окружающей средой.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 5-7], [4, с. 9-15, 28-30, 41-44], [9, с. 10-20].

*Методические указания:*

Термодинамика – это наука об энергии и её свойствах, изучающая закономерности превращения энергии в различных сопровождающихся тепловыми эффектами процессах, которая базируется на двух опытных законах. Техническая же термодинамика, как один из разделов этой науки, ограничивается изучением закономерностей взаимного преобразования тепловой и механической энергии в теплосиловых и холодильных установках. Поскольку в классических схемах такое преобразование осуществляется с участием рабочих тел (паров и газов), то в задачу технической термодинамики входит и изучение свойств паров и газов.

Объектом исследования в термодинамике являются термодинамические системы. Для тепловых и холодильных установок в качестве такой системы удобно использовать объем рабочего тела.

В соответствии с мировоззрением диалектического материализма неотъемлемым свойством материи является движение, а мерой движения – энергия.

По термодинамической классификации все виды энергии удобно разделить на внешнюю (энергию движения и взаимодействия макротел) и внутрен-

ною (энергию движения и взаимодействия элементарных частиц, из которых состоят макротела). Каждый вид энергии является функцией состояния тела.

В соответствии с двумя видами энергии различают и две формы ее преобразования или передачи от одних тел к другим: работу и теплоту. Работа – форма передачи внешней энергии; теплота – форма передачи внутренней энергии. Все тела обладают запасами энергии того или иного вида, которые однозначно могут быть определены в любом состоянии. Но работу и теплоту тела в себе содержать не могут. Работа и теплота проявляются лишь в процессе передачи энергии, т.е. являются функциями процесса и зависят от пути его протекания. В то же время величины работы и теплоты, являющиеся мерами передачи энергии, измеряются в тех же единицах, что и виды энергии (в системе СИ – в Джоулях, Дж).

Для характеристики физического состояния термодинамических систем используются термодинамические параметры состояния. В технической термодинамике из общего числа параметров выделяют термические (абсолютная температура  $T$ , К, абсолютное давление  $p$ , Па и удельный объем  $v$ , м<sup>3</sup>/кг) и калорические (удельная внутренняя энергия  $u$ , Дж/кг, удельная энтальпия  $h$ , Дж/кг и удельная энтропия  $s$ , Дж/(кг·К)).

Термические параметры связаны между собой термическим уравнением состояния  $F(p, v, T) = 0$ , а калорические – с любой парой термических параметров – калорическими уравнениями состояния, например,  $h = h(p, T)$ . Таким образом, независимых параметров, однозначно определяющих состояние системы, всего два. Поэтому любой равновесный процесс можно представить графически на плоскости в системе координат независимых параметров. Чаще всего для этого используются пары  $p$ - $v$ ;  $T$ - $s$ ;  $h$ - $s$ .

*Вопросы для самопроверки:*

- В.1. Что изучает термодинамика?
- В.2. Как классифицируются виды энергии в термодинамике?
- В.3. Что такое теплота?
- В.4. Что такое работа?
- В.5. Какое различие между функцией состояния и функцией процесса?
- В.6. Что называется термодинамической системой?
- В.7. Как взаимодействует неизолированная система с окружающей средой?
- В.8. Чем отличается открытая система от закрытой?
- В.9. Какие величины называют термодинамическими параметрами?
- В.10. Какие термодинамические параметры относят к термическим, а какие к калорическим?
- В.11. Что называется термическим, а что калорическим уравнением состояния?

- В.12. Что такое термодинамическое равновесие?  
В.13. Какой процесс называют обратимым, а какой – необратимым?  
В.14. Что такое внутренняя энергия?  
В.15. Что такое энтальпия?

### **Тема 3. Первый закон термодинамики**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Закон сохранения энергии.
2. Определение работы процесса.
3. Определение теплоты процесса.
4. Теплоемкость.
5. Энтропия.
6. Аналитические уравнения первого закона термодинамики.

*Целевая установка:* Студент должен научиться использовать всеобщий закон природы – закон сохранения и превращения энергии – в приложении к различным термодинамическим системам; уметь вычислять составляющие, входящие в уравнение этого закона; научиться графической интерпретации работы и теплоты.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 8-12, 22-24], [4, с. 25-27, 30-41, 44-48], [9, с. 20-29].

*Методические указания:*

В соответствии с принятой классификацией термодинамических систем уравнение закона сохранения и превращения энергии (первого закона термодинамики) для неизолированной системы предполагает возможность обмена энергией с окружающей средой в форме теплоты и внешней работы  $\delta q = de + \delta \ell_{\text{вн}}$ . В дальнейшем записываются различные формы этого уравнения – для закрытой системы, для потока вещества, для случаев обратимых и необратимых процессов.

Поскольку в тепловых и холодильных установках работа совершается (и затрачивается извне) благодаря изменению объема рабочих тел, вводится понятие работы изменения объема  $\ell$ . Часть этой работы всегда (и в обратимых и в необратимых процессах) затрачивается на вытеснение окружающей среды – работу проталкивания  $\ell_{\text{прот}}$ . Поэтому вводится понятие располагаемой работы:  $\ell_0 = \ell + \ell_{\text{прот}}$ . Располагаемая работа всегда связана с изменением давления в системе. Под технической работой понимают любую полезную работу, которую совершает рабочее тело (перемещение поршня в цилиндре, вращение колеса турбины, сыпучих грузов в трубопроводе и т.п.). Работа изменения объема и располагаемая работа процесса определяются графически с помощью рабочей  $p$ - $v$  диаграммы.

Для определения теплоты процесса вводится понятие теплоемкости, которая, как и теплота, является функцией процесса. Более универсальным оказывается аналитическое определение теплоты процесса через функцию состояния – энтропию, а графически – по тепловой T-s диаграмме. При этом необходимо отметить, что введение энтропии в этой теме является чисто формальным, на основании теоремы высшей математики о свойствах дифференциальных двучленов. Поскольку полный дифференциал функции указывает на то, что она является функцией состояния, новая функция названа «энтропией» и включена в число калорических параметров, удобных для определения теплоты процесса. Позднее, при изучении темы «Второй закон термодинамики», будет определен и физический смысл энтропии.

#### *Вопросы для самопроверки:*

- В.1. Когда впервые был сформулирован закон сохранения и превращения энергии?
- В.2. Каков общий вид уравнения первого закона для неизолированной системы?
- В.3. Как аналитически и графически определяется работа изменения объема?
- В.4. Что такое работа проталкивания?
- В.5. Как аналитически и графически определяется располагаемая работа?
- В.6. Что такое техническая работа?
- В.7. Что такое теплоемкость?
- В.8. Чем отличается истинная теплоемкость от средней теплоемкости?
- В.9. Как вычислить теплоту через истинную теплоемкость?
- В.10. Как вычислить теплоту через среднюю теплоемкость?
- В.11. Какова связь теплоты процесса с энтропией?
- В.12. Что такое тепловая диаграмма? Как графически определить теплоту по тепловой диаграмме?
- В.13. Как по тепловой диаграмме определяется истинная теплоемкость процесса?
- В.14. Какой вид имеет уравнение первого закона термодинамики для обратимых процессов в закрытой системе?
- В.15. Какой вид имеет уравнение первого закона термодинамики для обратимых процессов в открытой системе?

#### **Тема 4. Идеальный газ**

##### *Ключевые вопросы темы:*

1. Уравнение состояния.
2. Калорические уравнения.
3. Отношение теплоемкостей.

4. Энтропия идеального газа.
5. Смеси идеальных газов.
6. Термодинамические процессы для идеального газа.
7. Процессы сжатия в компрессоре.

*Целевая установка:* Студент должен вспомнить основные положения молекулярно-кинетической теории, изучавшиеся ранее в курсе физики, и научиться использовать их при анализе термодинамических систем. Далее на основании первого закона термодинамики, используя соотношения для идеального газа, студент должен научиться расчету термодинамических процессов, их графическому построению и анализу.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 12-19, 31-38], [4, с. 15-25, 215-236, 256-266], [9, с. 29-43].

*Методические указания:*

При изучении этой темы необходимо понять, что идеальный газ можно рассматривать как предельное состояние реального газа при  $p \rightarrow 0$ . Следовательно, чем ниже давление реального газа, тем ближе он по свойствам к газу идеальному. Поскольку во многих случаях давления рабочего тела в теплосиловых и холодильных установках невелики, использование соотношений для идеального газа позволяет существенно упростить их термодинамический анализ.

При использовании законов идеального газа для газовых смесей вводится понятие средней молярной массы смеси (массы некоторой средней молекулы в смеси)  $\mu_{см}$  и газовой постоянной смеси  $R_{см}$ . Для задания состава смеси вводятся понятия массовой и объемной долей.

В построении теории теплосиловых и холодильных установок решающая роль отводится серии политропных процессов, характеризующихся постоянством теплоемкости ( $c = \text{const}$ ). Общее уравнение этих процессов в системе координат  $p-v$  имеет вид  $p \cdot v^n = \text{const}$ , где  $n$  – показатель политропы, постоянный в пределах конкретного процесса. В общем же случае величина  $n$  может быть любой ( $-\infty < n < +\infty$ ).

В системе координат  $T-s$  уравнение политропы можно представить как  $ds = c \cdot (dT/T)$ . Теплоемкость политропного процесса  $c$ , оставаясь постоянной в пределах конкретного процесса, в общем случае может также принимать любые значения, в том числе и отрицательные.

Наиболее важными для практики частными случаями политропных процессов являются: изохорный ( $v = \text{const}$ ); изобарный ( $p = \text{const}$ ); изотермический ( $T = \text{const}$ ) и адиабатный ( $\delta q = 0$ , т.е. при отсутствии теплообмена с окружающей средой). В последнем случае для обратимого адиабатного процесса оказывается  $s = \text{const}$ , поэтому такой процесс называют еще изоэнтропийным.

Каждому из этих процессов присущи свои особенности реализации первого закона термодинамики, свой характер изменения параметров, свои значения показателя политропы  $n$  и теплоемкости  $c$ .

При положительных значениях  $n$  все политропы в  $p$ - $v$  диаграмме оказываются гиперболами. Чем больше  $n$ , тем круче проходит гипербола. При  $n=0$  гипербола вырождается в горизонтальную прямую (изобару); при  $n=\infty$  в вертикальную прямую (изохору).

При положительных значениях теплоемкостей в  $T$ - $s$  диаграмме все политропы оказываются логарифмическими кривыми. Чем больше значение  $c$ , тем положе логарифмическая кривая. При  $c=\infty$  получаем горизонтальную прямую (изотерму), при  $c=0$  вертикальную прямую (адиабату).

Особый интерес представляет серия политропных процессов с показателем  $k > n > 1$ , которые в обеих диаграммах располагаются между изотермой и адиабатой. Для них теплоемкость оказывается отрицательной ( $c < 0$ ). Поскольку  $c = \delta q / dT$ , то отрицательная теплоемкость означает разные знаки у  $\delta q$  и  $dT$ . Так, например, в процессе сжатия газа в компрессоре (или цилиндре двигателя внутреннего сгорания) температура увеличивается  $dT > 0$ , а теплота отводится с охлаждающей водой  $\delta q < 0$ , следовательно, теплоемкость этого процесса отрицательна  $c < 0$ . Анализ уравнения первого закона термодинамики ( $\delta q = du + \delta \ell$ ) для этого случая показывает, что затраченная на сжатие газа работа ( $\delta \ell < 0$ ) частично идет на увеличение внутренней энергии газа ( $du > 0$ ;  $dT > 0$ ), а частично преобразуется в теплоту и отводится в окружающую среду ( $\delta q < 0$ ).

При рассмотрении рабочего процесса одноступенчатого компрессора в индикаторной диаграмме надо обратить внимание на то, что единственным процессом, в котором изменяются параметры газа, является процесс сжатия. В процессах впуска и нагнетания газа параметры его теоретически не изменяются.

Поскольку на сжатие газа работа затрачивается извне, наши усилия должны быть направлены на то, чтобы по возможности эту работу уменьшить. Наилучшие результаты дало бы изотермическое сжатие, работа которого минимальна; в общем случае затраты работы тем меньше, чем ниже начальная температура газа. Поэтому при многоступенчатом сжатии можно уменьшить затраченную работу за счет введения промежуточного охлаждения газа между ступенями компрессора.

#### *Вопросы для самопроверки:*

В.1. Что такое идеальный газ? Какая роль отводится идеальному газу в технической термодинамике?

В.2. Как записывается уравнение состояния идеального газа для 1 кг и для произвольной массы вещества?

В.3. Что такое газовая постоянная? Что такое универсальная газовая постоянная?

В.4. От какого параметра зависит внутренняя энергия и энтальпия идеального газа?

В.5. Как определить теплоемкости  $c_p$  и  $c_v$  для идеального газа? Как записывается уравнение Майера? Что такое отношение теплоемкостей?

В.6. Как записать уравнение первого закона термодинамики для обратимых процессов с идеальным газом для открытой системы; для закрытой системы? Как записываются термодинамические тождества?

В.7. Какой вид имеет уравнение, связывающее энтропию идеального газа с давлением и температурой; с температурой и удельным объемом?

В.8. Что такое смесь идеальных газов? Что такое массовая доля? Что такое объемная доля?

В.9. Что называется парциальным давлением? Что называется парциальным объемом?

В.10. Почему молярная масса смеси называется средней молярной массой? Как она определяется?

В.11. Как определить массовую, объемную и молярную теплоемкости смеси идеальных газов?

В.12. Что такое политропный процесс? Каково уравнение политропы в координатах  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$ ?

В.13. Каково уравнение для теплоемкости политропного процесса?

В.14. Существуют ли процессы с отрицательной теплоемкостью?

В.15. Каковы наиболее распространенные частные случаи политропных процессов?

В.16. Как изобразить графически политропные процессы в  $p$ - $v$  диаграмме?

В.17. Как изобразить графически политропные процессы в  $T$ - $s$  диаграмме?

В.18. Каковы уравнения для работы изменения объема в политропном процессе и в частных его случаях (изохорном, изобарном, изотермическом, адиабатном)?

В.19. Каковы уравнения для располагаемой работы политропного процесса и его частных случаев?

В.20. Каковы уравнения для теплоты политропного процесса и его частных случаев?

В.21. Каково соотношение между параметрами политропного, изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного процессов?

В.22. Что такое индикаторная диаграмма?

В.23. Как определяется индикаторная работа компрессора графически и аналитически? В каком случае индикаторная работа компрессора минимальна?

В.24. С какой целью организуется многоступенчатое сжатие газа? Как изобразить процесс многоступенчатого сжатия газа с промежуточным охлаждением в T-s диаграмме?

В.25. Что такое степень повышения давления и как ее распределить между ступенями в многоступенчатом компрессоре?

## **Тема 5. Второй закон термодинамики**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Основные положения.
2. Прямые и обратные циклы.
3. Прямой и обратный обратимые циклы Карно.
4. Регенеративный цикл.
5. Математическое выражение второго закона термодинамики.
6. Принцип возрастания энтропии. Теорема Гюи-Стодолы.
7. Эксергия. Эксергетический КПД.
8. Статистическое толкование второго закона термодинамики.

*Целевая установка:* Студент должен понять сущность и пределы применимости второго закона термодинамики. Изучить термодинамические принципы действия теплосиловых и холодильных установок. На основании этого закона научиться определять максимальную работоспособность системы, оценивать эффективность преобразования энергии.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 20-21, 24-30, 66-72], [4, с. 49-117], [9, с. 43-59].

*Методические указания:*

Первый закон термодинамики указывает лишь на количественную сторону взаимного перехода различных видов энергии, но не дает ответа на вопросы – всегда ли эти переходы возможны и если не всегда, то каковы их условия. Направленность и условия протекания самопроизвольных макроскопических процессов в природе и определяет второй закон термодинамики. Это всеобщий закон природы, установленный многовековой практикой, но в отличие от первого закона, который справедлив для любых систем, действие второго закона ограничено макросистемами конечных размеров. Для микромира и макросистем, выходящих за пределы возможностей наших наблюдений, второй закон термодинамики применять нельзя.

Многообразие процессов, происходящих в природе, и историческая последовательность их изучения призвали к тому, что появилось большое число формулировок второго закона, постулирующих его частные положения. Основное внимание должно быть уделено формулировкам второго закона, определя-

ющим термодинамические принципы действия теплосиловой и холодильной установок.

Опыт показывает, что в тепловую энергию любой другой вид энергии, в том числе и механическая, может преобразовываться самопроизвольно, полностью и без дополнительных условий. Преобразование же тепловой энергии в другие виды, в том числе и в механическую, самопроизвольно не происходит. Тепловая энергия самопроизвольно передается от тел более нагретых к менее нагретым, а обратный процесс самопроизвольно также невозможен. В общем случае второй закон термодинамики утверждает, что все самопроизвольные процессы направлены от большего потенциала к меньшему, от наименее вероятного состояния к более вероятному состоянию. Организация же процессов несопроизвольных (противоположных естественным) требует создания определенных условий, некоторой компенсации за их осуществление в виде затрат внешней энергии.

Так, для преобразования тепловой энергии в механическую (в теплосиловой установке) необходим температурный перепад, который может быть реализован в качестве двух тел с разной температурой – источника с температурой  $T_1$  и приемника с меньшей температурой  $T_2$ . В результате передачи тепловой энергии от источника к приемнику, часть ее может быть преобразована в механическую энергию. Поскольку это преобразование возможно лишь при передаче тепловой энергии от источника к приемнику, полностью преобразовать тепловую энергию источника в механическую невозможно. Часть ее в виде компенсации обязательно будет передана приемнику. Критерием термодинамической эффективности теплосиловой установки является термический коэффициент, который принято называть термическим КПД  $\eta_t$ . Термический КПД всегда меньше единицы,  $\eta_t < 1$ .

В холодильной установке осуществляется несопроизвольный процесс передачи тепловой энергии от тела менее нагретого к телу более нагретому. Компенсацией за осуществление этого процесса является затрата внешней энергии (чаще всего в форме работы). Затраченная внешняя энергия преобразуется в тепловую, в результате чего более нагретое тело получает больше тепловой энергии, чем отдает менее нагретое тело. Критерием термодинамической эффективности холодильной установки является холодильный коэффициент  $\varepsilon_t$ .

Практическая реализация теплосиловых и холодильных установок осуществляется в прямых и обратных циклах рабочих тел (паров и газов). В общем случае каждый цикл должен включать в себя процессы подвода и отвода теплоты, расширения и сжатия рабочего тела. Наивысшую термодинамическую эффективность имеют обратимые циклы Карно, у них самые высокие значения  $\eta_t$  и  $\varepsilon_t$  в заданном интервале температур. В других циклах приблизиться к такой же эффективности позволяет регенерация.

При изучении этой темы необходимо понять значение функции состояния – энтропии, которую ранее ввели формально. При анализе термодинамических систем энтропия выступает как мера работоспособности при осуществлении необратимых процессов. В общем случае по Больцману энтропию можно характеризовать как меру вероятности термодинамического состояния системы.

Необходимо четко определить понятие эксергии, как максимально возможной работы системы в обратимом процессе, когда приемником тепловой энергии является окружающая среда. Использование понятия эксергии позволяет определить эксергетический КПД  $\eta_э$ . В случае обратимых процессов в системе  $\eta_э=1$ , если процессы необратимы,  $\eta_э<1$ . Таким образом, по эксергетическому КПД можно судить о степени необратимости процессов в системе (и в отдельных ее частях). По термическому КПД, который даже в идеальном случае меньше единицы, об этом судить нельзя.

*Вопросы для самопроверки:*

- В.1. Каковы основные формулировки второго закона термодинамики?
- В.2. Можно ли всю тепловую энергию источника преобразовать в механическую энергию?
- В.3. Можно ли использовать внутреннюю энергию морей, океанов, воздуха для непрерывного получения механической энергии?
- В.4. При каких условиях может быть осуществлена теплосиловая установка?
- В.5. Что такое термический КПД?
- В.6. При каких условиях может быть осуществлена холодильная установка?
- В.7. Что такое холодильный коэффициент?
- В.8. Какие процессы входят в состав циклов теплосиловых и холодильных установок?
- В.9. Что такое прямые и обратные циклы?
- В.10. Из каких процессов состоит прямой обратимый цикл Карно и как изобразить его в T-s диаграмме?
- В.11. От чего зависит термический КПД прямого обратимого цикла Карно?
- В.12. Как организован обратный обратимый цикл Карно, и как изобразить его в T-s диаграмме?
- В.13. Чем определяется холодильный коэффициент обратного обратимого цикла Карно?
- В.14. Реализуются ли прямой и обратный обратимые циклы Карно на практике?
- В.15. С какой целью в циклах теплосиловых и холодильных установок осуществляется регенерация?

В.16. Что такое среднеинтегральная температура?

В.17. Какой вид имеет уравнение второго закона термодинамики для циклов?

В.18. Какой вид имеет уравнение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов?

В.19. Как изменяется энтропия в изолированной систем при протекании в ней обратимых и необратимых процессов?

В.20. Как трактовать физический смысл энтропии по теореме Гюй-Стодолы?

В.21. Что такое эксергия?

В.22. Что такое эксергетический КПД?

## **Тема 6. Теплосиловые газовые циклы**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Классификация циклов ТСУ.
2. Степень термодинамического совершенства обратимых циклов.
3. Методы анализа необратимых циклов: метод коэффициентов полезного действия и эксергетический метод.
4. Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС): Отто, Дизеля, Тринклера. Индикаторные диаграммы.
5. Цикл газотурбинной установки (ГТУ) со сгоранием при постоянном давлении (Брайтона).
6. Действительный цикл простейшей ГТУ.
7. Методы повышения эффективности. Регенерация. Промежуточное охлаждение воздуха. Промежуточный подвод теплоты.
8. ГТУ замкнутого цикла.

*Целевая установка:* Студент должен познакомиться с теоретическими циклами теплосиловых установок и методами их анализа; научиться определять термодинамическую эффективность теоретических циклов.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 111-127], [4, с. 295-338], [9, с. 93-106].

*Методические указания:*

Все процессы, составляющие прямой или обратный цикл, практически невозможно осуществить в каком-либо одном универсальном устройстве. Чаще всего для каждого процесса создается специальное устройство: камера сгорания для подвода теплоты, турбина для расширения и т. п. Совокупность таких устройств для осуществления прямого цикла представляет собой теплосиловую установку. Тепловым двигателем в составе ТСУ называют устройство, в котором непосредственно получается механическая работа (например, паровая или газовая турбина).

В зависимости от свойств рабочего тела циклы ТСУ подразделяются на газовые и паровые.

В газовых циклах рабочим телом чаще всего являются продукты сгорания жидкого или газообразного топлива, агрегатное состояние которого не изменяется. Температура газа в течение всего цикла остается выше критической при сравнительно невысоких давлениях. Это позволяет при качественном анализе газовых циклов с достаточной точностью пользоваться соотношениями для идеального газа. К газовым относятся циклы двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок.

Ни одна из действующих установок не имеет в своей основе цикла Карно вследствие технической сложности его осуществления и повышенных необратимых потерях. Поэтому подвод и отвод теплоты в реальных циклах осуществляется чаще всего по изобарам и реже – по изохорам. Расширение же и сжатие рабочего тела, как и в цикле Карно, осуществляется по адиабатам.

Степень термодинамического совершенства обратимого цикла характеризуется величиной отношения его термического КПД  $\eta_t$  к термическому КПД обратимого цикла Карно  $\eta_t^K$  в том же интервале температур. Чем ближе это отношение к единице, тем совершеннее цикл.

Для оценки эффективности действительных циклов теплосиловых установок в настоящее время используют два основных метода – коэффициентов полезного действия и эксергетический.

Метод коэффициентов полезного действия заключается в определении потерь теплоты на отдельных участках цикла и в различных элементах установки, обусловленных лишь внутренней необратимостью, вызванной наличием трения при течении рабочего тела, механическими и электрическими потерями. В основе этого метода лежит первый закон термодинамики.

Эксергетический метод анализа теплосиловых установок базируется одновременно на первом и втором законах термодинамики. Его сущность – определение потерь работоспособности во всех элементах установки и для всей ТСУ в целом, обусловленных конечной разностью температур источника тепла и рабочего тела (внешняя необратимость).

Основными элементами ДВС являются цилиндр и поршень, совершающий возвратно-поступательное движение между двумя крайними положениями – верхней и нижней мертвыми точками (ВМТ и НМТ).

В цилиндре двигателя осуществляется три (из четырех) основных процессов цикла: сжатие, подвод теплоты в результате сгорания жидкого или газообразного топлива, расширение. Процесс отвода теплоты происходит за пределами цилиндра – в атмосфере.

Подвод теплоты в циклах ДВС производится либо по изохоре, либо по изобаре, либо комбинированно, сначала по изохоре, а затем по изобаре. В соответствии с этим различают три основных теоретических цикла ДВС: Отто, Ди-

зеля и Тринклера.

Принято различать два основных типа ГТУ – открытые и закрытые. Практически все действующие ГТУ обоих типов работают по циклу с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ .

В открытой ГТУ, как и в ДВС, рабочим телом являются продукты сгорания жидкого или газообразного топлива, которые после расширения выбрасываются в атмосферу. В ГТУ закрытого типа рабочее тело совершает движение по замкнутому контуру без изменения химического состава. Это позволяет в качестве рабочего тела использовать любой газ (воздух, гелий, азот, углекислоту и т. п.).

*Вопросы для самопроверки:*

- В.1. Какие существуют методы анализа циклов теплосиловых установок?
- В.2. Что такое относительный внутренний КПД?
- В.3. Что такое индикаторный (внутренний) КПД?
- В.4. Что такое эффективный КПД установки?
- В.5. Как оценить степень термодинамического совершенства обратимого цикла?
- В.6. Что такое индикаторная диаграмма?
- В.7. Изобразить цикл Отто в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах.
- В.8. Изобразить цикл Дизеля в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах
- В.9. Изобразить цикл Тринклера в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах.
- В.10. От каких относительных параметров зависят термические КПД в циклах Отто, Дизеля и Тринклера?
- В.11. По какому циклу работают большинство ГТУ?
- В.12. Изобразить цикл простейшей ГТУ в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах.
- В.13. Изобразить схему простейшей ГТУ и ГТУ с регенерацией.
- В.14. От чего зависит термический КПД ГТУ?
- В.15. Что такое степень регенерации?

## **Тема 7. Дифференциальные уравнения термодинамики**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Термодинамические тождества.
2. Виды взаимодействия системы с окружающей средой.
3. Характеристические функции.
4. Химический потенциал.
5. Дифференциальные уравнения в частных производных.

*Целевая установка:* Студент должен познакомиться с термодинамическими тождествами и на их основе, используя математические методы, научиться получать соотношения, устанавливающие связи между различными

термодинамическими свойствами вещества. Изучить основные виды взаимодействия термодинамической системы с окружающей средой и критерии равновесия системы – характеристические функции.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 39-42], [4, с. 118-136].

*Методические указания:*

Обобщая аналитические выражения первого и второго законов термодинамики, получим объединенные уравнения, имеющие следующий вид:  $TdS=dU+pdV$  и  $TdS=dH-Vdp$ . Эти выражения включают только функции состояния и носят названия термодинамических тождеств. Они используются для установления связи между термодинамическими свойствами систем, взаимодействующих с окружающей средой различными способами, характеризуемыми указанием независимых переменных.

Для каждой пары независимых переменных существует свой вид аналитического выражения, позволяющего наиболее полно выразить термодинамические свойства системы, который называется характеристической функцией.

Функция является характеристической, если ее самой, соответствующих ей независимых переменных и ее частных производных разных порядков по этим независимым переменным достаточно для того, чтобы в явном виде выразить любое термодинамическое свойство системы (вещества).

Внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $H$ , свободная энергия  $F$  и изобарно-изотермический потенциал  $\Phi$ , характеризующие условия равновесия термодинамической системы при различных условиях взаимодействия со средой, являются характеристическими функциями. Если мы знаем характеристическую функцию, выраженную через соответствующие, свои для каждой функции переменные, то можно вычислить любую термодинамическую величину.

Удельный (в расчете на единицу массы) изобарно-изотермический потенциал вещества называют химическим потенциалом  $\phi$ . Он позволяет вычислять изменение характеристической функции любой системы при изменении количества вещества в системе. Химический потенциал играет большую роль при анализе процессов фазовых переходов, а также в химической термодинамике при рассмотрении химических реакций.

Взаимосвязь различных термодинамических свойств веществ выражается через дифференциальные уравнения в частных производных, которые называются дифференциальными уравнениями термодинамики. Они получаются в результате математических операций над характеристическими функциями. Наиболее часто используются соотношения, устанавливающие зависимость энтропии от термических свойств – уравнения Максвелла; соотношения, характеризующие зависимость внутренней энергии и энтальпии от термических свойств; соотношения для теплоемкостей.

*Вопросы для самопроверки:*

В.1. Что такое термодинамические тождества?

В.2. Перечислите характеристические функции.

В.3. Что такое химический потенциал?

В.4. Что вычисляется с помощью химического потенциала?

В.5. Назовите основные виды взаимодействия термодинамической системы с окружающей средой.

В.6. Для чего используются дифференциальные уравнения термодинамики?

## **Тема 8. Основы химической термодинамики**

*Целевая установка:*

1. Термохимия. Закон Гесса и его следствия. Уравнения Кирхгофа.

2. Химическое равновесие и второй закон термодинамики. Константа равновесия и степень диссоциации.

3. Тепловой закон Нернста.

*Целевая установка:* Студент должен научиться применению законов химической термодинамики к расчетам процессов сгорания топлива в камерах сгорания и топочных устройствах энергетических установок.

*Рекомендуемая литература:* [4, с. 457-486], [7].

*Методические указания:*

При изучении этой темы необходимо обратить внимание на особенности написания первого закона термодинамики для химических процессов, на отличия в понятиях «внутренняя энергия» в технической и в химической термодинамике. В понятие обратимости химических реакций также заложен иной смысл, отличный от обратимости термодинамических процессов. Необходимо уделять серьезное внимание вопросу о характере химических реакций, способах их осуществления с целью получения максимального теплового эффекта или максимальной работы.

*Вопросы для самопроверки:*

В.1. Какой вид имеет уравнение первого закона термодинамики для процессов, сопровождающихся химическими реакциями?

В.2. Что понимается под тепловым эффектом реакции?

В.3. Как формулируется закон Гесса?

В.4. Какие следствия вытекают из закона Гесса?

В.5. Какова зависимость теплового эффекта реакции от температуры?

В.6. В чем отличие химической обратимости реакций и их термодинамической обратимости?

- В.7. Что такое константа равновесия?  
В.8. Как формулируется тепловой закон Нернста?

## **Тема 9. Реальные газы**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Уравнение состояния реальных газов. Основные свойства чистых веществ.
2. Фазовые переходы.
3. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Таблицы и диаграммы термодинамических свойств реальных веществ.
4. Термодинамические процессы для воды и водяного пара.
5. Влажный воздух.

*Целевая установка:* Студент должен изучить свойства реальных веществ и освоить методику расчетов для водяного пара с помощью таблиц и диаграмм. Приобрести навыки в пользовании таблицами и  $h$ - $s$  диаграммами влажного воздуха.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 43-65], [4, с. 177-214, 445-456], [9, с. 59-72, 89-93].

*Методические указания:*

В реальном газе в отличие от идеального существует взаимодействие между молекулами и нельзя пренебрегать собственным объемом молекул. В этих условиях уравнение Клапейрона оказывается неточным. С увеличением давления и понижением температуры реальный всё больше отличается от идеального.

Поиски простой формы уравнения состояния реальных веществ привели к уравнению Ван-дер-Ваальса, которое с качественной стороны хорошо отражает их свойства и может быть использовано в теории термодинамического подобия веществ. Однако количественно это уравнение дает при расчетах большие погрешности. С ростом температуры и понижением давления эти погрешности увеличиваются из-за возникающих при этих условиях явлений диссоциации и ассоциации молекул, которые уравнением Ван-дер-Ваальса не учитываются.

Точное уравнение состояния для воды и пара с учетом ассоциации и диссоциации молекул, полученное М.П. Вукаловичем и И.И. Новиковым, оказалось очень сложным. Был сделан вывод о том, что простой формы уравнения состояния реальных газов не существует, поэтому для инженерных расчетов используются уравнения состояния реальных веществ либо в табличной, либо в графической форме (диаграммы).

Изменение свойств реальных веществ и их фазовые переходы удобнее рассмотреть в диаграммах  $p$ - $T$  и  $p$ - $v$ . Для графического анализа циклов паросиловых установок очень удобна диаграмма  $T$ - $s$ , а для расчетов процессов водяного пара – диаграмма  $h$ - $s$ . Необходимо обратить внимание на характер пограничных кривых на всех диаграммах и линий постоянных параметров в областях жидкости, насыщения и перегретого пара.

Влажный воздух представляет собой один из частных случаев газовой смеси. Для практики представляет интерес влажный воздух при атмосферном или близком к атмосферному давлении в интервале температур, ограниченном снизу температурой не ниже минус  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этих параметрах сухой воздух может находиться только в газообразном состоянии, а вода может существовать в паровой, жидкой или твердой фазе в зависимости от температуры смеси. То есть влажный воздух представляет собой такую смесь газов, один из компонентов которой – водяной пар – при снижении температуры может переходить в другую фазу и вследствие этого выпадать из смеси. В этом состоит принципиальное отличие влажного воздуха от обычных газовых смесей.

При изучении свойств влажного воздуха, усвоив понятия абсолютной и относительной влажности, влагосодержания, необходимо научиться определять газовую постоянную влажного воздуха и его энтальпию. Основное внимание надо уделить освоению  $h$ - $d$  диаграммы, учитывая при этом, что она построена для постоянного давления. Все тепловые расчеты с использованием этой диаграммы основаны на балансе энтальпии и на материальном балансе. Следует иметь в виду, что состояние точки росы определяется термометром, а состояние предела охлаждения – мокрым термометром психрометра. Оба состояния лежат на кривой насыщения влажного воздуха, но точка росы получена путем охлаждения его при  $d=\text{const}$ , а точка предела охлаждения – путем увлажнения при  $h=\text{const}$ .

*Вопросы для самопроверки:*

- В.1. Чем отличаются реальные газы от идеальных?
- В.2. Какой вид имеет уравнение Ван-дер-Ваальса? Какой физический смысл постоянных в уравнении Ван-дер-Ваальса?
- В.3. Какие эффекты в газах дополнительно учтены в уравнения Вукаловича и Новикова?
- В.4. В каком виде уравнения состояния реальных газов используются в инженерных расчетах?
- В.5. Что представляет собой вириальное уравнение состояния? Что такое коэффициент сжимаемости?
- В.6. Что такое критическая точка?
- В.7. Что называется парообразованием, испарением, кипением? Что называется конденсацией?

- В.8. Что такое плавление и затвердевание, сублимация и десублимация?
- В.9. Каковы зависимости между давлением и температурой в фазовых переходах?
- В.10. Как определить тройную точку в  $p$ - $T$  диаграмме для воды?
- В.11. Что такое насыщенный, влажный насыщенный, сухой насыщенный и перегретый пар?
- В.12. Что такое степень сухости и степень влажности?
- В.13. Изобразите  $p$ - $v$  диаграмму для воды и пара.
- В.14. Изобразите  $T$ - $s$  диаграмму для воды и пара.
- В.15. Изобразите  $h$ - $s$  диаграмму для водяного пара.
- В.16. Что такое теплота парообразования и теплота конденсации?
- В.17. Как построены таблицы для воды и пара?
- В.18. Как определить теплоту изобарного процесса по  $h$ - $s$  диаграмме?
- В.19. Как определить располагаемую работу адиабатного процесса по  $h$ - $s$  диаграмме?
- В.20. Что называют влажным воздухом?
- В.21. В каком случае воздух насыщен и не насыщен влагой?
- В.22. Что такое абсолютная влажность? Что такое относительная влажность?
- В.23. Что такое влагосодержание? В каких пределах оно может изменяться?
- В.24. Что называют точкой росы?
- В.25. Как определяется плотность влажного воздуха?
- В.26. Что такое психрометр?
- В.27. Как построена  $h$ - $d$  диаграмма влажного воздуха?
- В.28. Как изображаются основные процессы для влажного воздуха в  $h$ - $d$  диаграмме?

## **Тема 10. Термодинамика потока**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Располагаемая работа в потоке. Адиабатное течение.
2. Критическое давление. Критическая скорость.
3. Профилирование сопел и диффузоров.
4. Адиабатное течение с трением.
5. Параметры торможения.
6. Дросселирование газов и паров.
7. Решение задач с помощью  $h$ - $s$  диаграммы.

*Целевая установка:* Студент должен научиться производить выбор типа сопел и диффузоров и осуществлять их расчет с помощью уравнений для иде-

ального газа, таблиц и диаграмм; должен научиться рассчитывать процессы дросселирования газов и паров.

*Рекомендуемая литература:* [4, с. 236-247, 267-294], [9, с. 73-84].

*Методические указания:*

Теория истечения основывается на использовании уравнения первого закона термодинамики, записанного для потока вещества. Располагаемая работа в потоке в общем случае затрачивается на изменение внешней кинетической энергии, внешней потенциальной энергии и на совершение технической работы, включая трение.

Наиболее важным для турбомашин, турбокомпрессоров и струйных аппаратов является процесс адиабатного течения в соплах и диффузорах. В результате исследования этого процесса определяются: скорость потока на выходе из канала, массовый расход и профиль канала сопла или диффузора. Для идеального газа эти задачи решаются аналитически с использованием соответствующих уравнений, а для реальных газов – с помощью таблиц или  $h-s$  диаграммы. Переход от дозвукового режима течения к сверхзвуковому в соплах и от сверхзвукового к дозвуковому в диффузорах происходит при достижении критического давления и критической скорости (местной скорости звука).

Необходимо обратить внимание на принципиальное различие процессов адиабатного расширения и адиабатного дросселирования. В первом случае в обратимом процессе располагаемая работа потока идет на увеличение внешней кинетической энергии, поэтому для сопла  $-vdp = cdc$  (при наличии трения лишь часть этой работы затрачивается на его преодоление). Во втором случае имеем дело с предельно необратимым процессом и практически вся располагаемая работа идет на преодоление трения, т.е.  $-vdp = \delta l_{тр}$ , а увеличением внешней кинетической энергии можно пренебречь.

В то же время процесс дросселирования имеет большое практическое применение в холодильных установках при получении низких температур, в измерительной технике, в гидравлических и пневматических системах регулирования энергетических установок и т.п.

*Вопросы для самопроверки:*

В.1. Написать уравнение первого закона термодинамики для потока. На что расходуется располагаемая работа в потоке?

В.2. Какие каналы называются соплами и диффузорами?

В.3. За счет чего получается располагаемая работа при адиабатном течении?

В.4. Как определить скорость потока на выходе из канала?

В.5. Какой вид имеет уравнение неразрывности?

В.6. Что такое критическое давление?

- В.7. Как выглядит расходная характеристика сопла?
- В.8. Каков физический смысл критической скорости?
- В.9. Каким параметрам потока соответствует минимальное сечение канала сопла и диффузора?
- В.10. Что такое сопло Лаваля?
- В.11. Как выбрать профиль канала сопла и диффузора?
- В.12. Как учитывается трение при истечении?
- В.13. Изобразить процесс адиабатного истечения водяного пара в  $h$ - $s$  диаграмме.
- В.14. Как определить параметры торможения водяного пара по  $h$ - $s$  диаграмме?
- В.15. Что такое дросселирование?
- В.16. Как изменяются параметры потока в результате адиабатного дросселирования?
- В.17. Что такое дроссель-эффект?
- В.18. Что такое температура инверсии?
- В.19. Где используется процесс адиабатного дросселирования?
- В.20. Как изменяется состояние влажного пара при дросселировании?

## **Тема 11. Циклы паротурбинных установок**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Цикл Ренкина. Действительный цикл паротурбинной установки (ПТУ).
2. Влияние параметров пара на экономичность цикла ПТУ.
3. Вторичный перегрев пара.
4. Регенерация.
5. Теплофикационные циклы. Турбины с противодавлением и теплофикационным отбором пара. Комбинированная выработка энергии.

*Целевая установка:* Студент должен познакомиться с теоретическим и действительным циклами паротурбинных установок, научиться определять их термодинамическую эффективность, изучить способы ее повышения – вторичный перегрев, регенерацию, теплофикацию.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 73-102, 106-110], [4, с. 347-379, 388-390], [9, с. 106-111].

*Методические указания:*

Паротурбинные установки нашли широкое применение в качестве основного оборудования для выработки электроэнергии на тепловых электростанциях. Основными их достоинствами являются высокая экономичность, возможность создания агрегатов большой единичной мощности – до 1000 МВт и выше, возможность использования любых видов топлива.

Рабочим телом в паровых циклах, как правило, является водяной пар. Фазовый состав рабочего тела в цикле меняется в процессах парообразования и конденсации. Для анализа этих циклов необходимо использовать таблицы термодинамических свойств веществ в диаграммы состояния.

Теоретическим циклом ПТУ является цикл Ренкина, усовершенствованный Клаузиусом. Его термодинамическая эффективность оценивается термическим КПД (термическим коэффициентом), который характеризует лишь степень превратимости тепловой энергии источника в механическую энергию, допускаемую вторым законом термодинамики.

В действительном цикле Ренкина из-за различных необратимых потерь величина отданной паротурбинной установкой внешнему потребителю энергии уменьшается. Термодинамическая эффективность реального цикла определяется величиной внутреннего КПД, а эффективность теплосилового оборудования электростанции в целом определяется ее эффективным абсолютным КПД.

Повышение эффективности ПТУ может быть достигнуто в результате усовершенствования отдельных элементов, а также за счет увеличения термического КПД цикла. К увеличению  $\eta_t$  приводит повышение начальных параметров пара  $p_1$  и  $t_1$  и снижение конечного давления  $p_2$ , однако величина термического КПД при этом не превышает 48 %.

Более существенного увеличения  $\eta_t$  можно достичь за счет введения в цикл регенерации, суть которой заключается в подогреве поступающей в котел воды паром, отобранном из промежуточных полостей турбины. Теоретически наибольший КПД будет при бесконечном числе отборов пара. Однако из-за существенного усложнения ПТУ в стационарных установках их число не превышает 10-11. При этом увеличение термического КПД достигает 7-12 % от  $\eta_t$  для схемы без регенерации.

Отрицательным результатом повышения начального давления является смещение линии расширения в турбине влево и, следовательно, увеличение влажности пара в конце расширения. Это приводит к уменьшению относительного внутреннего КПД турбины и к эрозийному износу ее лопаток, работающих во влажном паре. Считается, что для удовлетворительной работы турбины влажность пара в конце расширения не должна превышать 12-14 %. Эта цель достигается при вторичном перегреве пара.

Вторичный перегрев пара существенно усложняет и утяжеляет ПТУ. В то же время при правильном выборе  $p_{пе}$  можно повысить среднеинтегральную температуру подвода теплоты в цикле и увеличить  $\eta_t$  на 2-3 %.

В настоящее время за счет регенерации и вторичного перегрева пара  $\eta_t$  цикла ПТУ может достичь 55 %.

Более полно использовать теплоту сгорающего топлива можно в теплофикационном цикле при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии. Термический КПД по выработке механической энергии в тепло-

фикационном цикле уменьшается, однако экономическая эффективность этого цикла оценивается по суммарному полезному эффекту, который заключается в совместном производстве работы и в передаче теплоты внешним потребителям. Критерием экономической эффективности теплофикационного цикла является коэффициент использования теплоты, который в реальной установке составляет 70-80 %.

*Вопросы для самопроверки:*

- В.1. Изобразить схему простейшей паротурбинной установки.
- В.2. Изобразить теоретический и действительный цикл Ренкина в  $p-v$  и  $T-s$  диаграммах.
- В.3. Как влияют начальные и конечные параметры на термический КПД цикла Ренкина?
- В.4. Что такое «сопряженные начальные параметры»?
- В.5. С какой целью осуществляется вторичный перегрев пара?
- В.6. Изобразить схему ПТУ с вторичным перегревом пара.
- В.7. Как определяется термический КПД цикла паротурбинной установки с вторичным перегревом пара?
- В.8. Как осуществляется регенерация в паросиловом цикле?
- В.9. Как определяются доли пара, направляемые в регенеративный подогреватель?
- В.10. Как определяется КПД регенеративного цикла ПТУ?
- В.11. Что такое теплофикационный цикл?
- В.12. В чем особенность теплофикационной установки, имеющей турбину с противодавлением?
- В.13. В каком случае применяют теплофикационные турбины с регулируемым отбором пара?
- В.14. Как определяется коэффициент использования теплоты в теплофикационном цикле?

## **Тема 12. Циклы атомных электростанций**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Тепловые схемы атомных электростанций (АЭС).
2. Типы атомных реакторов.
3. Теплоносители и рабочие тела.
4. Цикл паротурбинной установки АЭС с реактором ВВЭР.

*Целевая установка:* Студент должен познакомиться с циклами паротурбинных установок АЭС, научиться определять их термодинамическую эффективность, понять особенности получения теплоты от реактора.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 103-106].

*Методические указания:*

Существуют различные виды атомных электростанций (АЭС), различающихся типами атомных реакторов, используемым топливом, замедлителями нейтронов, теплоносителями, рабочими телами и др. Однако для преобразования полученной от реактора теплоты в электроэнергию всегда применяется паротурбинная установка.

Особенности получения теплоты от реактора, а также минимальная доля затрат на топливо себестоимости вырабатываемой электроэнергии, по сравнению с ТЭС, приводят к тому, что на АЭС чаще всего верхняя граница температурного интервала, в котором осуществляется цикл паротурбинной установки, намного ниже, чем для циклов ТЭС. В этих условиях становится целесообразным использование цикла с влажным водяным паром.

Если пар при входе в турбину является насыщенным, то при дальнейшем адиабатном расширении влажность его может достичь величины, недопустимой по условиям безопасной работы паровой турбины. Чтобы избежать этого, применяется процесс сепарации пара при некотором промежуточном давлении. Однако этого во многих случаях бывает недостаточно, так как при дальнейшем расширении влажность пара может снова достичь недопустимых значений. Поэтому после сепарации пар еще перегревают.

Из-за низких параметров водяного пара паротурбинных установок АЭС, их КПД меньше, чем обычных ТЭС, и составляет  $28\div 30\%$  против  $38\div 40\%$ , характерных для крупных тепловых электростанций. Тем не менее, себестоимость электроэнергии на АЭС ниже, чем на ТЭС, что связано с низким удельным расходом топлива.

*Вопросы для самопроверки:*

В.1. Каковы особенности паротурбинных установок, применяемых на АЭС?

В.2. Изобразить схему паротурбинной установки АЭС с реактором ВВЭР.

В.3. Изобразить теоретический цикл паротурбинной установки АЭС с реактором ВВЭР.

В.4. Как определяется термический КПД цикла паротурбинной установки АЭС с реактором ВВЭР?

В.5. Чем объясняется малый вклад топливной составляющей в себестоимость электроэнергии, вырабатываемой на АЭС?

**Тема 13. Циклы парогазовых установок**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Бинарные циклы. Выбор рабочих тел.
2. Парогазовые установки (ПГУ).
3. Цикл ПГУ с газоводяным подогревателем.

#### 4. Цикл ПГУ с котлом-утилизатором.

*Целевая установка:* Студент должен познакомиться с циклами парогазовых установок, научиться определять их термодинамическую эффективность, изучить способы ее повышения.

*Рекомендуемая литература:* [2, с. 128-133], [4, с. 380-388], [9, с. 111-113].

*Методические указания:*

Комбинирование установок, в которых различные рабочие тела используются в оптимальных для каждого из них температурных интервалах, позволяет существенно повысить термический КПД бинарного цикла и эффективный КПД бинарной установки. Самая высокая из всех тепловых машин эффективность преобразования теплоты в работу достигнута на парогазовых установках, которые в настоящее время всё более активно внедряются в теплоэнергетику.

Парогазовые установки представляют собой комбинацию паротурбинной и газотурбинной установок. Термодинамический цикл ПГУ называют циклом Ренкина-Брайтона.

В комбинированных циклах ПГУ цикл ГТУ занимает область высоких температур, а цикл Ренкина – область низких температур. Такое взаимное расположение циклов связано со следующими соображениями:

- максимальные температуры газа в современных ГТУ (1350-1500 °С) существенно выше максимальных температур пара (550-600 °С) паротурбинных установок;

- теплоту уходящих газов ГТУ, имеющих температуру 400-600 °С, выгоднее использовать в низкотемпературном паротурбинном цикле, чем отдавать в окружающую среду при высокой средней температуре;

- в цикле паротурбинной установки отвод теплоты осуществляется в изотермическом процессе при температуре, близкой к температуре окружающей среды.

Существует несколько вариантов схем ПГУ, различающихся способом утилизации теплоты уходящих газов ГТУ в цикле паротурбинной установки. Наиболее эффективны парогазовые установки с котлом-утилизатором при степени бинарности ее равной единице. В этом случае сжигание топлива в котле-утилизаторе не производится, и вся работа паротурбинной части комбинированной установки осуществляется за счет использования теплоты уходящих газов ГТУ.

*Вопросы для самопроверки:*

В.1. Что такое бинарный цикл? В какой форме он реализуется на практике?

В.2. Как определяется кратность циркуляции рабочих тел в цикле парогазовой установки?

В.3. Как определяется мощность парогазовой установки?

В.4. Как можно повысить КПД котла-утилизатора парогазовой установки?

В.5. Что называется степенью бинарности цикла?

В.6. При какой степени бинарности цикла достигается наибольшее значение эффективного КПД парогазовой установки?

#### **Тема 14. Циклы холодильных установок**

*Ключевые вопросы темы:*

1. Методы получения холода. Рабочие тела газовых и паровых циклов холодильных установок.

2. Теоретический цикл воздушной холодильной установки.

3. Теоретический цикл парокompрессорной холодильной установки.

4. Схема и термодинамические показатели тепловых насосов.

*Целевая установка:* Студент должен познакомиться со способами получения холода и изучить теоретические циклы холодильных установок и тепловых насосов.

*Рекомендуемая литература:* [4, с. 414-429, 438-440], [9, с. 113-125].

*Методические указания:*

Холодильные установки работают по обратному циклу. Здесь рассматриваются лишь теоретические циклы холодильных установок. Термодинамическая эффективность этих циклов оценивается степенью приближения их теоретического холодильного коэффициента к величине холодильного коэффициента обратного обратимого цикла Карно.

Необходимо оценить достоинства и недостатки воздушных и парокompрессорных холодильных установок. Эти установки имеют принципиально различные методы понижения температуры холодильного агента – в воздушных холодильных установках это достигается путем адиабатного расширения воздуха, а в парокompрессорных холодильных установках – путем адиабатного дросселирования в дроссельном устройстве.

По обратному циклу работают не только холодильные установки, но и тепловые насосы, в которых низкопотенциальная теплота, забираемая из окружающей среды, с помощью затраты внешней работы может быть использована для целей отопления или осуществления технологических процессов при более высокой температуре.

*Вопросы для самопроверки:*

В.1. Что такое холод?

В.2. Какие существуют способы получения холода?

В.3. Какие вещества используются в качестве холодильных агентов?

В.4. На какие группы делятся холодильные установки?

В.5. Изобразить схему и цикл воздушной холодильной установки в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах.

В.6. Каковы достоинства и недостатки воздушной холодильной установки?

В.7. Изобразить схему и цикл парокомпрессорной холодильной установки в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах.

В.8. Каковы достоинства и недостатки парокомпрессорных холодильных установок?

В.9. В чем заключается отличие цикла парокомпрессорной холодильной установки от цикла теплового насоса?

В.10. Что такое коэффициент преобразования для теплонасосной установки?

Формами, направленными на практическую подготовку, являются практические и лабораторные занятия, курсовая работа в четвертом семестре, выполнение индивидуальных заданий и написание реферата в рамках самостоятельной работы студентов (СРС).

На практических занятиях в аудитории решаются типовые задачи по тематике лекций. Дополнительно в рамках СРС каждый студент по индивидуальному варианту решает ряд задач с последующей защитой решения у преподавателя. Приходить на практические занятия необходимо, имея при себе вычислительную технику и конспект лекций, который тоже желательно предварительно просмотреть. Справочным материалом необходимым для решения задач на занятиях студентов обеспечивает преподаватель.

Вся информация по тематике и содержанию практических занятий, методические рекомендации и алгоритмы решения типовых задач, задания для самостоятельной работы по каждой теме изложены в учебно-методическом пособии по практическим занятиям.

Лабораторный практикум начинается во втором семестре изучения дисциплины, когда студентом уже освоены материалы о фундаментальных законах (первом и втором) термодинамики, об использовании этих законов при создании тепловых двигателей и их совершенствовании в процессе развития энергетики. Только в этом случае возможно осознанное закрепление в лабораторных условиях профессиональных навыков и умений.

При выполнении лабораторных работ следует предварительно ознакомиться с учебно-методическим пособием по выполнению лабораторных работ,

где для каждой работы приведены ее название и цель, используемое оборудование, алгоритм проведения опыта и обработки полученных данных. Приступать к проведению работы можно только с разрешения преподавателя. По завершении работы необходимо показать её результаты преподавателю и в случае их одобрения можно приступать к оформлению работы в соответствии с требованиями учебно-методического пособия. Как правило, оформление отчета по лабораторной работе завершается дома, а защита проходит на очередном лабораторном занятии или в часы консультаций. Не следует откладывать оформление и защиту лабораторных работ на конец семестра.

Курсовую работу можно начинать выполнять сразу же после прослушивания необходимого теоретического материала на лекциях, руководствуясь учебно-методическим пособием [10], имеющимся в библиотеке и размещенном в электронной информационно-образовательной среде университета. Защитить курсовую работу необходимо до начала экзаменационной сессии. Возникающие при этом вопросы всегда можно снять на еженедельных консультациях у преподавателя.

В процессе освоения дисциплины студентом составляется портфолио дисциплины, которое формируется к окончанию курса обучения. В портфолио студентом фиксируются результаты обучения, формируется своего рода учебная копилка.

Следует приучить себя к систематической работе в течение всего семестра, не откладывая решение проблемных вопросов в «долгий ящик». Это обеспечит прочность полученных знаний и успешную аттестацию на экзамене по дисциплине.

## **2. Методические указания по выполнению самостоятельной работы**

Содержание самостоятельной работы студентов определяется рабочей учебной программой. Наряду с проработкой лекционного материала и подготовкой к практическим занятиям и лабораторным работам здесь предусмотрено решение комплекса задач, выполнение индивидуального задания по термодинамическому анализу одного из трёх теоретических циклов ДВС, написание реферата. В четвертом семестре студенты выполняют курсовую работу.

При выполнении *индивидуального задания (задачи)* следует придерживаться следующих правил:

- условия задач должны быть переписаны полностью;
- решения задач необходимо сопровождать пояснениями и подробными вычислениями;
- при вычислении каждой величины надо указывать ее название, формулу, по которой она определяется. После записи формулы с буквенными обозначениями подставляются в таком же порядке их численные значения;

– необходимо указывать единицы измерения всех величин, как заданных в условии задачи, как и полученных в результате расчетов. Применять нужно только Международную систему единиц СИ.

Решения задач выполняются в тетради в клетку или на стандартных листах бумаги формата А4, закрепленных в скоросшиватель. Для заметок рецензента (преподавателя) на каждой странице тетради (на листе) отводятся поля.

На обложке тетради или титульном листе скоросшивателя обязательно должны содержаться следующие сведения: полное наименование вуза; наименование института – «Институт морских технологий, энергетики и строительства»; наименование кафедры – «Кафедра энергетики»; вид работы – «Индивидуальное задание (задачи)»; название учебной дисциплины; шифр учебной группы; фамилия и инициалы студента; ученая степень, научное звание (при наличии), инициалы и фамилия преподавателя; место и год выполнения работы. Образец оформления титульного листа индивидуального задания приведен в Приложении Е.

*Индивидуальное задание «Термодинамический анализ теоретических циклов ДВС»* выполняется в соответствии с рекомендациями методического пособия по выполнению СРС [8] в третьем семестре. Оформленная работа должна содержать: результаты расчетов по заданному варианту в форме таблицы; изображение цикл ДВС в  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммах; графики зависимостей и результаты их анализа.

Индивидуальное задание выполняется печатным способом на стандартных листах формата А4 без рамок и распечатывается с одной стороны листа бумаги. Рисунки (графики) выполняются на миллиметровой бумаге.

*Задание на написание реферата* выдается студентам очной формы обучения в начале третьего семестра. Реферат – это краткое изложение материала по заданной теме, обобщающее информацию из нескольких литературных источников: монографий, учебников, научных статей и т.п. Работа над рефератом включает поиск, анализ и структурирование информации, ее самостоятельное изложение, оценку общего состояния рассматриваемой проблемы.

Студентам предлагаются на выбор темы по истории и проблемам развития мировой, отечественной и региональной энергетики, по технологии преобразования природных энергоресурсов (традиционных и нетрадиционных возобновляемых), по экологическим проблемам энергетики, по обеспечению энергетической безопасности (Приложение А).

Задание на написание реферата выполняется в следующей последовательности:

- выбор темы реферата;
- поиск и изучение литературных источников по выбранной теме;
- составление плана реферата;

- изложение материала по плану со ссылками на использованные источники;
- оформление реферата в соответствии с приведенными ниже рекомендациями.

Реферат должен иметь следующую структуру: титульный лист, содержание, введение, основная часть (может включать несколько разделов), заключение, список использованной литературы.

Титульный лист является первым листом реферата. Он оформляется в соответствии с существующими в университете нормами (см. Приложение Ж). После титульного листа приводится «Содержание», где последовательно перечисляются заголовки разделов и подразделов и указываются номера страниц, с которых они начинаются. Все разделы и подразделы, кроме введения, заключения, списка использованной литературы и приложения (если оно есть в реферате), должны быть пронумерованы.

Введение – это краткое изложение всей работы. Здесь нужно определить предмет и объект исследования, обосновать актуальность выбранной темы, описать цель работы, выделить несколько задач, помогающих достичь цели, указать методы исследования.

Основная часть реферата, как правило, содержит несколько разделов, где излагаются результаты исследования, раскрывающие рассматриваемую проблему. Названия разделов должны быть сформулированы так, чтобы было понятно их содержание. Изложение подобранного по выбранной теме материала должно быть логичным и последовательным, выстроенным хронологически или по смыслу. В основной части могут быть представлены рисунки (схемы, графики и т.д.), таблицы, формулы.

Заключение является обобщением всего исследования. В заключении подводятся итоги по всей работе, даются ответы на поставленные во введении задачи, формулируются выводы, делается заключение о достижении цели реферата.

Список использованной литературы должен содержать сведения об источниках, которые были использованы в процессе работы над рефератом. Рекомендуется использовать не менее пяти источников информации. При формировании списка лучше отдать предпочтение изданным за последние пять лет источникам. Количество более старой литературы не должно превышать 30% от общего объема списка использованных источников. Не допускается включение в список источников информации, которыми студент не пользовался. На каждый источник в тексте должна быть ссылка. Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления». Список формируется в алфавитном порядке или в порядке появления в тексте ссылок на использованные

источники. Ссылки приводятся в квадратных скобках и соответствуют порядковому номеру источника в списке литературы.

Объем реферата должен быть от 8-10 листов (на введение и заключение выделяется по 1-2 страницы), оригинальность должна составлять не менее 40 %, при этом из одного источника не допускается копировать более 15 % текста.

Реферат выполняется печатным способом на стандартных листах формата А4 без рамок и распечатывается с одной стороны листа бумаги. Рекомендуется набирать текст работы шрифтом Times New Roman размером (кеглем) 12 через полуторный межстрочный интервал с выравниванием основного текста по ширине и автоматической расстановкой переносов. Цвет шрифта – черный. Отступ первой строки – 1,25 см. Поля страницы слева – не менее 30 мм, вверху, внизу и справа – не менее 20 мм. Номера страниц проставляются внизу, посередине. Титульный лист включается в общую нумерацию страниц работы, но номер страницы на нем не ставится. Заголовки разделов и подразделов печатаются полужирным шрифтом с выравниванием текста по центру. Подчеркивание и перенос слов в заголовках не допускается, точка в конце заголовка не ставится. От текста заголовки отделяются одним интервалом.

Рисунки, таблицы, формулы следует нумеровать арабскими цифрами. Нумерация может быть как сквозной по всему тексту, так и внутри раздела. В тексте реферата на все таблицы и рисунки обязательно должны быть ссылки. Таблицы и рисунки помещают после упоминания о них в тексте или на следующей странице. От основного текста рисунки, таблицы и формулы отделяются отступом в один интервал. Слово «Таблица» указывается слева над таблицей, следом идет номер и название таблицы. Если таблица занимает несколько страниц, то в начале каждой следующей страницы пишут: «Продолжение таблицы», с указанием ее номера. При этом столбцы таблицы должны быть пронумерованы. Рисунки нумеруются и подписываются снизу посередине. Если в реферате только одна таблица или один рисунок, они не нумеруются.

Работу над рефератом надо начинать сразу же после выбора темы.

*Курсовая работа* посвящена термодинамическому анализу простейшего цикла паросиловой установки на базе первого и второго законов термодинамики. Целью курсовой работы является углубление знаний, полученных студентами на лекциях, практических занятиях и в лабораториях, в области теоретических и действительных циклов паросиловых установок, являющихся основными для тепловых электрических станций. Кроме того, студенты приобретают навыки самостоятельной работы со справочными и нормативными документами, учебной и учебно-методической литературой, ресурсами интернета, различными программными средствами.

Студент должен рассчитать теоретический цикл паросиловой установки и определить степень его термодинамического совершенства по отношению к

обратимому циклу Карно в том же интервале температур. Для оценки эффективности действительного цикла студент должен провести его анализ с учетом внутренних и внешних необратимых потерь методом коэффициентов полезного действия (на основании первого закона термодинамики), а также с помощью эксергетического метода (с учетом первого и второго законов термодинамики). В результате работы определяются относительный внутренний КПД цикла, эффективный и эксергетический КПД установки и отдельных ее элементов. Строится диаграмма тепловых потоков, потоков эксергии, изображения действительного цикла в различных диаграммах состояния. Завершается работа сравнением и анализом полученных результатов.

Выполняется курсовая работа в соответствии с учебно-методическим пособием [10]. Учебно-методическое пособие по курсовой работе устанавливает общие требования к содержанию и оформлению курсовой работы. Пособие включает в себя методики термодинамического анализа теоретического цикла Ренкина и термодинамического анализа действительного цикла паросиловой установки методом коэффициентов полезного действия и эксергетическим методом, сопоставление результатов анализа необратимого цикла разными методами, пример расчетов и образцы графического материала.

Курсовую работу можно начинать выполнять сразу же после прослушивания необходимого теоретического материала на лекциях. Защитить её необходимо до начала экзаменационной сессии.

Полученные индивидуальные задания на дом в рамках СРС желательно выполнять незамедлительно по мере их получения, а по всем неясным вопросам обращаться к преподавателю на консультациях или во время практических занятий.

## Список литературы

1. Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник / А.А. Александров, Б.А. Григорьев; ГСССД. – Москва: МЭИ, 1999. – 164 с.
2. Александров, А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок: учебное пособие для вузов / А.А. Александров. – 2-е изд., стер. – Москва: МЭИ, 2006. – 158 с.
3. Зубарев, В.Н. Практикум по технической термодинамике: учебное пособие / В.Н. Зубарев. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 303 с.
4. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: МЭИ, 2008. – 495 с.
5. Пухов, В.В. Основы химической термодинамики: учебное пособие для студентов, обучающихся по спец. 290700 – Теплогазоснабжение и вентиляция / В.В. Пухов; Калининградский государственный технический университет. – Калининград: КГТУ, 2000. – 24 с.
6. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства газов: таблицы / С.Л. Ривкин. – 3-е изд. перераб. и доп. – Москва: Энергия, 1973. – 287 с.
7. Сборник задач по технической термодинамике: учебное пособие для студентов вузов / Т.Н. Андрианова и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: МЭИ, 2000. – 354 с.
8. Селин, В.В. Термодинамический анализ теоретических циклов ДВС: методическое пособие по выполнению СРС (домашние задания) по дисциплинам «Теплотехника» для спец. 180403.65 – Эксплуатация судовых энергетических установок и «Теоретические основы теплотехники» для спец. 140101.65 – Тепловые электрические станции / В.В. Селин, Е.А. Беркова; Калининградский государственный технический университет. – Калининград: КГТУ, 2010. – 17 с.
9. Селин, В.В. Техническая термодинамика: учебное пособие / В.В. Селин, В.М. Фокин; Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. – Волгоград: [ВолгГАСУ], 2008. – 131 с.
10. Селин, В.В. Техническая термодинамика: учебно-методическое пособие по курсовой работе для студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Тепловые электрические станции») / В.В. Селин; Е.А. Беркова; Калининградский государственный технический университет. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. – 31 с.
11. Теоретические основы теплотехники: методические указания и индивидуальные задания для самостоятельной работы студентов спец. 140101.65 – Тепловые электрические станции, 180403.65 – Эксплуатация судовых энергетических установок

ческих установок и 270109.65 – Теплогазоснабжение и вентиляция / В.В. Се-  
лин, Е. А. Беркова; КГТУ. – Калининград: КГТУ, 2007. – 38 с.

### Темы рефератов

1. Характеристика и классификация природных энергетических ресурсов.
2. Топливо-энергетический комплекс России.
3. Проблемы топливо-энергетического комплекса Калининградской области.
4. История развития энергетики России.
5. Энергетическая безопасность России.
6. Тенденции развития мировой энергетики.
7. Экологические проблемы энергетики.
8. Перспективы развития угольной энергетики в России и в мире.
9. Современные способы сжигания твёрдых топлив.
10. Перспективы развития ядерной энергетики.
11. Подземные атомные электростанции повышенной безопасности.
12. Плавающие атомные электростанции.
13. Причины и уроки Чернобыльской аварии.
14. Характеристика и классификация возобновляемых источников энергии.
15. Гидроэнергетические ресурсы мира и России.
16. Развитие малой гидроэнергетики в России.
17. Крупнейшие аварии на ГЭС: причины и последствия.
18. Использование солнечной энергии для теплоснабжения.
19. Термодинамические и фотоэлектрические солнечные электростанции.
20. Перспективы использования геотермальной энергии в энергетике.
21. Тепловые насосы и перспективы их использования в автономных системах теплоснабжения.
22. Развитие ветроэнергетики в России и в мире.
23. Биомасса и технологии её использования для получения электроэнергии и тепла.
24. Перспективы использования биомассы в энергетическом балансе Калининградской области.
25. Способы переработки твёрдых коммунальных отходов. Мировой опыт.
26. Характеристика и потенциал энергетических ресурсов Мирового океана.
27. Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии на ТЭЦ. Крупнейшие ТЭЦ России.
28. Паротурбинные, газотурбинные и парогазовые электростанции: преимущества и недостатки.
29. История восстановления и послевоенного развития энергетических объектов Калининградской области.
30. О вероятности «сланцевой революции» в энергетике.

## Типовые задания и контрольные вопросы по лабораторным работам

*Лабораторная работа № 1.* Определение изобарной теплоёмкости воздуха при атмосферном давлении

Задание по лабораторной работе: Определение средней изобарной теплоёмкости воздуха в интервале температур от комнатной до 40-50 °С методом потока в проточном калориметре.

Контрольные вопросы:

1. Что называется теплоёмкостью, удельной теплоёмкостью? Единицы измерения удельных теплоёмкостей и связь между ними.
2. Теплоёмкости  $c_p$  и  $c_v$  для идеального газа. Закон Майера. Отношение теплоёмкостей.
3. Истинная и средняя теплоёмкости. Как вычисляется теплота через истинную и среднюю теплоёмкости?
4. Какова техника измерения температуры, расхода воздуха и теплового потока?
5. Как производится тарировка графика для определения расхода воздуха?
6. Как оценить точность экспериментальных данных?

*Лабораторная работа № 2.* Определение газовой постоянной и показателя адиабаты для воздуха

Задание по лабораторной работе: Экспериментально определить величину газовой постоянной воздуха и показатель адиабаты, используя метод взвешивания стеклянного сосуда с воздухом при переменном давлении. Сравнить с табличными значениями.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличается идеальный газ от реальных газов? Свойства идеального газа.
2. Каков физический смысл газовой постоянной? Ее связь с универсальной газовой постоянной.
3. Что представляет собой термическое уравнение состояния для идеального газа?
4. Какой процесс называют изохорным? Уравнения для работы изменения объёма, располагаемой работы и теплоты. Соотношение между параметрами процесса.
5. Какой процесс называют адиабатным? Его графическое изображение в  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$  координатах.

## 6. Как в лабораторной работе определяется показатель адиабаты?

*Лабораторная работа № 3. Исследование кривой насыщения для воды и водяного пара*

Задание по лабораторной работе: Построить зависимость температуры насыщения водяного пара от давления и сравнить с действительной кривой насыщения.

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение понятиям: парообразование, испарение, кипение, конденсация, сублимация, десублимация.
2. Что такое температура насыщения, давление насыщения, температурная депрессия? Что называют теплотой парообразования?
3. Что такое критическая точка, тройная точка?
4. Изобразите фазовую диаграмму  $p$ - $T$  и линии фазовых переходов.
5. Дайте определение понятиям: сухой насыщенный пар, влажный насыщенный пар, перегретый пар. Что такое степень перегрева?
6. Что такое степень сухости и степень влажности?

*Лабораторная работа № 4. Исследование процессов во влажном воздухе*

Задание по лабораторной работе: Изучение изменений состояния влажного воздуха в процессах, протекающих в сушильной установке.

Контрольные вопросы:

1. Что называют влажным воздухом?
2. В каких случаях влажный воздух является ненасыщенным и насыщенным влагой?
3. Что называется точкой росы? Как определить «точку росы» с помощью  $h$ - $d$  диаграммы?
4. Что такое абсолютная влажность и относительная влажность? Как определяются давление, плотность, газовая постоянная и энтальпия влажного воздуха?
5. Что такое влагосодержание? В каких пределах оно может изменяться?
6.  $h$ - $d$  диаграмма влажного воздуха. Графическое изображение основных процессов в  $h$ - $d$  диаграмме.

*Лабораторная работа № 5. Исследование процесса адиабатного истечения газа через суживающееся сопло*

Задание по лабораторной работе: Построить экспериментальную зависимость расхода воздуха через суживающееся сопло от давления за соплом (расходную характеристику сопла). Определить коэффициенты расхода и скорости сопла.

Контрольные вопросы:

1. Дайте определение понятиям сопло и диффузор.
2. Что такое критическое давление и от чего оно зависит? Каково критическое отношение давлений для воздуха?
3. Что такое расходная характеристика сопла?
4. Каков физический смысл критической скорости?
5. Как определяется скорость на выходе из сопла и массовый расход через сопло? Что такое коэффициент скорости сопла?
6. В каких случаях используются суживающиеся сопла и сопла Лаваля?

*Лабораторная работа № 6. Исследование процесса дросселирования воздуха через пористую перегородку*

Задание по лабораторной работе: Опытным путем определить изменение температуры воздуха в процессе адиабатного дросселирования при перепаде давления на дросселе до 0,8 МПа, а также определить внутреннее давление газа, применяя для воздуха модель реального газа Ван-дер-Ваальса.

Контрольные вопросы:

1. Что такое адиабатное дросселирование?
2. Основные закономерности процесса адиабатного дросселирования.
3. Что называют дифференциальным и интегральным дроссель-эффектом?
4. Что такое температура инверсии? Кривая инверсии?
5. Процесс Джоуля-Томсона. Схема опытного участка.
6. Назовите сферы использования процесса дросселирования в технике и в быту? В каких случаях необходимо бороться с эффектом дросселирования?

*Лабораторная работа № 7. Определение теплоёмкости твёрдых материалов методом регулярного режима.*

Задание по лабораторной работе: Экспериментально определить теплоёмкость исследуемого твердого тела и её температурную зависимость и сравнить со справочными данными.

Контрольные вопросы:

1. Что такое теплоёмкость, удельная теплоёмкость?
2. Чем отличается теплоёмкость твёрдых тел от теплоёмкости газов?
3. Что такое адиабатная оболочка?
4. Методы экспериментального определения теплоёмкости твердых материалов.
5. Объясните принцип действия лабораторной установки.
6. Что такое регулярный режим?

### Контрольные вопросы для защиты курсовой работы

1. От чего зависит термический КПД ПСУ, работающей по циклу Ренкина?
2. Основное назначение ПСУ.
3. Какой параметр характеризует эффективность ПСУ? Написать формулу и название всех величин, входящих в эту формулу.
4. Как определяются внутренний относительный КПД турбины и внутренний относительный КПД насоса?
5. Как определяется потеря эксергии турбогенераторной установки? Какие потери эксергии она учитывает?
6. Подробно объяснить, что изображено на рис. – Изображение теоретического цикла Ренкина в T-s диаграмме.
7. Подробно объяснить, что изображено на рис. – Изображение действительного цикла Ренкина в T-s диаграмме.
8. Объяснить, что изображено на рис. – Принципиальная тепловая схема электростанции.
9. Как определяется внутренний абсолютный КПД цикла ПСУ?
10. Как определяется потеря эксергии котельной установки? Какие потери эксергии она учитывает?
11. Как определяется эксергетический КПД турбогенераторной установки? Написать формулу, название всех величин и формулы для их определения.
12. Перечислить способы снижения потерь эксергии в каждом элементе ПСУ.
13. Какой элемент ПСУ характеризуется самым низким эксергетическим КПД? Объяснить, с чем это связано.
14. Объяснить принцип действия парового котла.
15. Объяснить принцип действия паровой турбины.
16. Объяснить принцип действия конденсатора.

**Контрольные вопросы по дисциплине**

1. Предмет и метод термодинамики. Работа и теплота. Термодинамическая система и окружающая среда.
2. Термодинамические параметры. Основные термические параметры. Термическое уравнение состояния. Термодинамическая поверхность. Термодинамическое равновесие. Термодинамические процессы. Процессы обратимые и необратимые.
3. Калорические параметры состояния и их свойства. Внутренняя энергия и энтальпия. Вид калорических уравнений состояния.
4. Первый закон термодинамики и его аналитические выражения.
5. Вычисление работы процесса. Работа изменения объёма. Работа проталкивания. Располагаемая работа. Техническая (полезная) работа. Графическое определение работы. Рабочая диаграмма.
6. Вычисление теплоты процесса. Теплоёмкость как функция процесса. Истинная и средняя теплоёмкости.
7. Энтропия как функция состояния. Тепловая диаграмма. Определение теплоты в обратимых процессах.
8. Идеальный газ и его свойства. Уравнение состояния идеального газа. Вид калорических уравнений состояния для внутренней энергии и энтальпии. Отношение теплоёмкостей.
9. Энтропия идеального газа. Калорические уравнения состояния для энтропии.
10. Смеси идеальных газов. Газовая постоянная и средняя молярная масса смеси.
11. Изохорный процесс для идеального газа.
12. Изобарный процесс для идеального газа.
13. Изотермический процесс для идеального газа.
14. Адиабатный процесс для идеального газа. Изоэнтروпийный процесс.
15. Политропные процессы для идеального газа. Их общая графическая интерпретация. Процессы с отрицательной теплоёмкостью.
16. Процессы сжатия в компрессоре. Индикаторная диаграмма. Многоступенчатое сжатие с промежуточным охлаждением.
17. Основные положения и формулировки второго закона термодинамики. Прямые и обратные циклы. Термический коэффициент (КПД). Теоретический холодильный коэффициент.
18. Прямой обратимый цикл Карно. Среднеинтегральная температура. Теорема Карно.

19. Обратный обратимый цикл Карно. Регенеративный цикл. Идеальный регенератор.

20. Математические выражения второго закона термодинамики. Интегралы Клаузиуса. Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах.

21. Принцип возрастания энтропии. Теорема Гюи-Стодолы. Физический смысл энтропии. Энтропия и термодинамическая вероятность.

22. Эксергия и её свойства. Эксергетический КПД.

**Типовые экзаменационные вопросы по дисциплине**

1. Природные энергетические ресурсы. Классические схемы получения тепловой, механической и электрической энергии. Предмет теплотехники. Теоретические основы теплотехники. Топливо-энергетический комплекс. Топливо-энергетический баланс. Энергетическая стратегия России. Энергетическая безопасность. Проблемы развития мировой энергетики. Экологические проблемы энергетики.

2. Предмет и метод технической термодинамики. Энергия внешняя и внутренняя. Работа и теплота. Термодинамическая система. Термодинамические параметры. Термические и калорические параметры. Термическое уравнение состояния.

3. Термодинамические процессы. Процессы обратимые и необратимые. Диаграммы состояния. Внутренняя энергия. Энтальпия.

4. Первый закон термодинамики. Закон сохранения и превращения энергии. Вычисление работы процесса. Работа изменения объёма, работа проталкивания, располагаемая работа. Графическая интерпретация работы. Рабочая диаграмма.

5. Вычисление теплоты процесса. Теплоёмкость. Аналитические выражения первого закона термодинамики. Энтропия. Тепловая диаграмма.

6. Идеальный газ и его свойства. Уравнение состояния идеального газа. Калорические уравнения состояния. Термодинамические тождества. Энтропия идеального газа. Смеси идеальных газов.

7. Термодинамические процессы для идеального газа. Политропный процесс.

8. Частные случаи политропного процесса: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный.

9. Второй закон термодинамики. Основные формулировки. Термодинамические схемы теплосиловой и холодильной установок. Термический коэффициент (КПД). Холодильный коэффициент.

10. Прямые и обратные циклы. Прямой обратимый цикл Карно. Среднеинтегральная температура.

11. Обратный обратимый цикл Карно. Регенеративный цикл. Термодинамическая температурная шкала.

12. Математические выражения второго закона термодинамики. Принцип возрастания энтропии. Теорема Гюи-Стодолы.

13. Статистическое толкование второго закона термодинамики. Термодинамическая вероятность состояния. Физический смысл энтропии по Больцману.

14. Эксергия. Эксергия потока вещества. Графическое представление эксергии в диаграммах состояния. Потери эксергии в необратимых процессах.

15. Эксергия теплоты. Температурный эксергетический коэффициент. Эксергетический КПД.

16. Рабочий процесс одноступенчатого компрессора. Индикаторная диаграмма для теоретического процесса.

17. Многоступенчатый компрессор. Промежуточное охлаждение газа. Рабочий процесс в индикаторной и тепловой диаграммах. Распределение степеней повышения давления по ступеням компрессора.

18. Циклы теплоэнергетических установок. Общие методы анализа обратимых и необратимых циклов. Метод тепловых потоков. Энтропийный и эксергетический методы.

19. Циклы ДВС. Теоретический цикл с комбинированным подводом теплоты. Индикаторная диаграмма. Относительные параметры цикла. Термический КПД и его зависимость от относительных параметров.

20. Теоретический цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме. Сравнение теоретических циклов ДВС при одинаковых степенях адиабатного сжатия.

21. Теоретический цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении. Сравнение теоретических циклов ДВС при одинаковых максимальных параметрах.

22. Теоретический цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении. Установки открытого и закрытого цикла. Термический КПД.

23. Влияние начальной температуры газа на термический КПД цикла ГТУ. Основные достоинства и недостатки ГТУ в сравнении с ДВС. Способы повышения начальной температуры газа.

24. Действительный цикл ГТУ. Влияние гидравлических сопротивлений, КПД турбин и компрессоров и ряда других факторов на эффективный КПД установки. Оптимальная степень повышения давления. Удельный расход воздуха.

25. Регенерация в газотурбинных установках. Влияние степени регенерации на характеристики цикла.

26. Газотурбинные установки с промежуточным охлаждением воздуха и промежуточным подводом теплоты. Многовальные ГТУ. Распределение степеней повышения давления по ступеням компрессора.

27. Общие методы получения холода. Цикл воздушной холодильной установки. Теоретический холодильный коэффициент. Действительный холодильный коэффициент.

28. Основные свойства чистых веществ. Фазовые переходы. Теплота фазовых переходов. Тройная точка. Понятие о степени сухости и степени влажности пара.

29. Уравнение состояния реальных газов. Водяной пар. Анализ Уравнения Ван-дер-Ваальса. Критическая точка.
30. Диаграмма  $p-v$  для воды и пара. Таблицы термодинамических свойств воды и пара. Диаграмма  $T-s$  для воды и пара.
31. Диаграмма  $h-s$  для воды и пара. Определение эксергии потока с помощью этой диаграммы.
32. Расчётные уравнения для воды и водяного пара. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
33. Термодинамические процессы для воды и водяного пара. Расчёт процессов с помощью таблиц и диаграмм.
34. Расчёт смешения потоков водяного пара с помощью  $h-s$  диаграммы. Смешение газов в постоянном объёме, в потоке и при заполнении объёма.
35. Термодинамика потока. Располагаемая работа. Сопла и диффузоры. Адиабатное течение. Определение скорости потока.
36. Расходная характеристика сопла. Анализ зависимости расхода от давления за соплом для идеального газа. Критическое давление. Критическая скорость. Профилирование сопел и диффузоров.
37. Адиабатное течение с трением. Решение задачи истечения с помощью  $h-s$  диаграммы.
38. Термодинамика потока несжимаемой жидкости. Уравнение Бернулли.
39. Дросселирование газов и паров. Температура инверсии. Потери энергии при дросселировании.
40. Методы термодинамического анализа обратимых и необратимых циклов. Термический КПД. Понятие об относительном внутреннем КПД цикла, абсолютном (внутреннем) КПД цикла и эффективном КПД установки.
41. Теоретический цикл простейшей паросиловой установки. Влияние начальных и конечных параметров цикла на его термический КПД.
42. Методы повышения эффективности паросиловых циклов. Цикл с вторичным перегревом пара.
43. Регенеративный цикл паросиловой установки.
44. Теплофикационные циклы паросиловых установок. Коэффициент использования теплоты. Различные схемы теплофикации.
45. Требования к свойствам рабочих тел, обеспечивающие увеличение термического КПД паросилового цикла. Бинарные циклы.
46. Циклы парогазовых установок.
47. Циклы атомных электростанций. Особенности паротурбинной установки АЭС. Тепловая схема и цикл ПТУ АЭС с реактором типа ВВЭР в  $T-s$  диаграмме. Термический КПД, удельный расход топлива. Сравнение этих показателей с показателями ТЭС на органическом топливе.
48. Понятие о холоде. Общие принципы получения холода. Циклы теплонасосных установок. Отопительный коэффициент.

49. Теоретический цикл парокомпрессорной холодильной установки. Теоретический холодильный коэффициент. Действительный холодильный коэффициент.

50. Влажный воздух. Понятие об абсолютной и относительной влажности. Влагосодержание. H-d диаграмма влажного воздуха.

51. Предмет химической термодинамики. Термохимия. Закон Гесса и его следствия.

52. Тепловые эффекты изохорно-изотермической и изобарно-изотермической реакций. Зависимость тепловых эффектов реакций от температуры. Уравнения Кирхгофа.

53. Химическое равновесие и второй закон термодинамики. Правило Лешателье-Брауна. Химическое сродство. Максимальная работа реакции. Термодинамические потенциалы. Константа равновесия.

54. Тепловой закон Нернста. Третий закон термодинамики.

**Образец оформления титульного листа индивидуального задания**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства  
Кафедра энергетики

Индивидуальное задание  
допущено к защите:  
должность (звание), ученая степень  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
(подпись)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Индивидуальное задание  
защищено:  
должность (звание), ученая степень  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
(подпись)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

**ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ**

по дисциплине  
«Техническая термодинамика»

Вариант № \_\_\_\_

Работу выполнил:  
студент гр. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
(подпись)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Калининград,  
202\_\_

**Образец оформления титульного листа реферата**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО РЫБОЛОВСТВУ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства  
Кафедра энергетики

Реферат по дисциплине  
«Техническая термодинамика»  
Тема № \_\_\_\_

**СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ СЖИГАНИЯ ТВЁРДЫХ ТОПЛИВ**

Работу принял:  
должность (звание), ученая степень  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
(подпись)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Работу выполнил:  
студент гр. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Фамилия И.О.  
(подпись)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ г.

Учебное издание

Елена Анатольевна Беркова

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

*Редактор И.В. Голубева*

Подписано в печать 16.05.2022 г. Формат 60x90 1/16. Уч.-изд. л. 4,6.  
Печ. л. 3,6. Тираж 30 экз. Заказ № 27

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»  
236022, Калининград, Советский проспект, 1