

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

Е. А. Беркова

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАССООБМЕН

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический
материал по изучению дисциплины для студентов,
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки
08.03.01 Строительство

Калининград
2022

Рецензент

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

Беркова, Е. А.

Техническая термодинамика и тепломассообмен: учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал по изучению дисциплины для студентов бакалавриата по направлению подготовки 08.03.01 Строительство / Е. А. Беркова. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 49 с.

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал по изучению дисциплины. Подготовлено в соответствии с учебным планом и рабочей программой модуля и предназначено для подготовки бакалавров направления подготовки 08.03.01 Строительство.

В учебно-методическом пособии представлены 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 лит. – 12 наименований

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие по изучению дисциплины рекомендовано к использованию методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 25.05.2022 г.

Оглавление

1 ВВЕДЕНИЕ	4
2 Методические рекомендации по изучению дисциплины	8
3 Методические указания по выполнению самостоятельной работы	38
Библиографический список	41
Приложение А. Типовые задания и контрольные вопросы по лабораторным работам	42
Приложение Б. Типовые экзаменационные вопросы по дисциплине	45
Приложение В. Образец оформления титульного листа индивидуального задания (контрольной работы)	3

1 ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Техническая термодинамика и тепломассообмен» входит в обязательную часть ОПОП ВО по направлению подготовки 08.03.01 Строительство и изучается студентами очной и заочной форм обучения в пятом семестре.

Целью освоения дисциплины является формирование начальных основных понятий и навыков анализа явлений и процессов в сфере будущей профессиональной деятельности, а именно:

- знаний об источниках тепловой энергии, энергетическом топливе и процессах производства тепловой энергии, воздействии этих процессов на экологическую обстановку;
- умений и навыков правильно оценивать стоящие перед инженерами-строителями задачи при разработке, монтаже и эксплуатации систем теплоснабжения с учетом экологической, топливно-энергетической и экономической ситуации в стране.

В результате освоения дисциплины студент должен:

- **знать** теоретические основы в области технической термодинамики и тепломассообмена для работы в сфере своей профессиональной деятельности;
- **уметь** с учетом знаний в области технической термодинамики и тепломассообмена проводить описание объектов профессиональной деятельности;
- **владеть навыками** проектирования и технического обслуживания оборудования систем теплоснабжения и кондиционирования зданий и сооружений; анализа и предоставления отчета об объектах и процессах профессиональной деятельности.

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

Дисциплина «Техническая термодинамика и тепломассообмен» является базой для получения знаний, умений и навыков при изучении таких дисциплин как «Теплогенерирующие установки», «Теплоснабжение», «Отопление», «Газоснабжение», «Вентиляция», «Теоретические основы создания микроклимата в помещении», «Энергосбережение в системах ТГВ».

Для оценки результатов освоения дисциплины используются:

- оценочные средства текущего контроля успеваемости;
- оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине.

К оценочным средствам текущего контроля успеваемости относятся:

- индивидуальные задания по отдельным темам (для студентов очной формы обучения);

- задания по контрольной работе (для студентов заочной формы обучения);
- задания и контрольные вопросы по лабораторным работам;
- тестовые задания по отдельным темам дисциплины.

Индивидуальные задания по отдельным темам дисциплины для студентов очной формы обучения включают решение 16 задач из методических указаний [8]. К решению предлагаются задачи по двум разделам: техническая термодинамика и теория тепломассообмена. Студенты выполняют 10 задач по темам: параметры состояния, закон сохранения энергии, термодинамические процессы для идеального газа, реальные газы и пары, термодинамика потока, циклы теплосиловых установок, циклы холодильных установок из первого раздела и 6 задач по темам: теплопроводность, конвективный теплообмен, теплообмен излучением, теплопередача и теплообменные аппараты из второго раздела. Для самостоятельного решения разработано 30 вариантов заданий. Вариант задания и номера задач определяются преподавателем.

Индивидуальные задания выполняются студентами в течение 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».

Задания по контрольной работе по отдельным темам дисциплины выдаются студентам заочной формы обучения с целью контроля качества их самостоятельной работы. Контрольная работа предполагает решение шести задач и ответы на четыре теоретических вопроса по двум разделам дисциплины: техническая термодинамика и тепломассообмен. По разделу «Техническая термодинамика» задачи предлагаются по темам: теоретические циклы теплосиловых и холодильных установок, процессы в сушильной установке (влажный воздух) из методических указаний [10]. По разделу «Тепломассообмен»: теплообмен при свободном и вынужденном движении; теплопередача и теплообменные аппараты из методических указаний [9]. Номера задач определяются преподавателем. Алгоритмы решения всех задач даются на практических занятиях.

Выполненные контрольные задания студенты сдают на проверку преподавателю, который делает замечания по их выполнению и пишет рецензию. В случае отсутствия серьёзных замечаний студент допускается к защите контрольной работы. При наличии серьёзных замечаний работа направляется на доработку. Защита проводится в часы индивидуальных консультаций преподавателя. Студент, самостоятельно выполнивший задание и обнаруживший понимание физического смысла рассмотренных процессов,

получает оценку «зачтено», которая является одним из условий допуска к заключительной аттестации – экзамену.

Задания по лабораторным работам выдаются в лаборатории теоретических основ теплотехники. Для студентов очной формы обучения предусмотрено выполнение семи лабораторных работ. Студенты заочной формы обучения выполняют две лабораторные работы на выбор преподавателя. Перед началом выполнения каждой работы студент изучает задание и после краткой беседы с преподавателем приступает к её выполнению. По окончании работы он 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 А.

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 включает в себя от 5 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 форме экзамена, относятся экзаменационные вопросы.

К экзамену допускаются студенты, получившие положительную оценку по результатам практических и лабораторных занятий и самостоятельной работы. Экзамен по дисциплине проводится при условии выполнения всех индивидуальных заданий или контрольной работы (для студентов заочной формы обучения) и успешной защиты лабораторных работ.

Экзаменационный билет содержит три вопроса (два – по технической термодинамике и один – по тепломассообмену), относящихся соответственно к темам (Приложение Б):

- основные понятия, определения и законы термодинамики, идеальный газ и его свойства, термодинамические процессы для идеального газа;
- реальный газ и его свойства, термодинамика потока, циклы теплосиловых и холодильных установок;
- законы тепломассообмена и теплообменные аппараты.

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 приложениях – типовые задания и контрольные вопросы по лабораторным работам, типовые экзаменационные вопросы, образцы оформления титульного листа индивидуального задания/контрольной работы.

Таблица 1 – Система и критерии выставления оценки промежуточной аттестации

Система оценок Критерий				
	«неудовлетворительно»	«удовлетворительно»	«хорошо»	«отлично»
	«не зачтено»	«зачтено»		
Системность и полнота знаний в отношении изучаемых объектов	Обладает частичными и разрозненными знаниями, которые не может научно-корректно связывать между собой (только некоторые из них 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
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-орректных 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

2 Методические рекомендации по изучению дисциплины

Начиная изучение дисциплины «Техническая термодинамика и теплообмен», следует очень серьёзно отнестись 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 самостоятельного 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 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. Основные понятия и определения

Ключевые вопросы темы:

1. Цель и задачи дисциплины. Место дисциплины в структуре образовательной программы. Планируемые результаты освоения дисциплины.
2. Энергия и её свойства. Природные энергетические ресурсы.
3. Тепловая, механическая и электрическая энергия. Способы преобразования энергии.
4. Термодинамика. Теплоносители. Рабочие тела. Теплообменные аппараты.
5. Предмет и метод технической термодинамики.
6. Термодинамические параметры. Термодинамические процессы.
7. Работа и теплота.

Целевая установка: Изучение темы «Основные понятия и определения» должно привести к пониманию роли природных энергетических ресурсов в развитии человеческого общества; задач по рациональному использованию этих ресурсов; способов преобразования природных видов энергии в тепловую, механическую и электрическую энергию; места и роли дисциплины в системе знаний об энергии, ее свойствах, способах преобразования и передачи. Студент должен получить понятие о предмете и методе исследования в термодинамике, термодинамических состояниях и процессах, термодинамических параметрах, объекте исследования и способах его взаимодействия с окружающей средой.

Рекомендуемая литература: [4, с. 9–15, 28–30, 41–44; 7, с. 5–24].

Методические указания

В начале изучения дисциплины «Техническая термодинамика и теплообмен» необходимо понять цели и задачи этой дисциплины, ее место в структуре образовательной программы, планируемые результаты освоения. Дисциплина состоит из двух разделов: «Техническая термодинамика» и «Теплообмен». Изучение начинается с раздела «Техническая термодинамика», а именно с классификации природных энергетических ресурсов.

При изучении классификации природных энергетических ресурсов следует уяснить практическую необходимость их преобразования в тепловую, механическую или электрическую энергию. Нужно осознать решающую роль химической энергии органического топлива 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.

Термодинамика – это наука об энергии и её свойствах, изучающая закономерности ее превращения в различных сопровождающихся тепловыми эффектами процессах, базирующаяся на двух опытных законах. Техническая термодинамика как один из разделов этой науки ограничивается изучением закономерностей взаимного преобразования тепловой и механической энергии в теплосиловых и холодильных установках. В ее задачу также входит изучение свойств рабочих тел (паров и газов), участвующих в этих преобразованиях.

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

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 , м³/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 $p-v$; $T-s$; $h-s$.

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 внутреннюю (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 превращения 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).

Вопросы для самопроверки

1. Какие виды природных энергоресурсов могут быть использованы человеком?
2. Какая часть мирового энергопотребления удовлетворяется за счет органического топлива?
3. В каких установках может быть получена тепловая, механическая и электрическая энергия?
4. Каковы задачи теплотехники как отрасли техники и науки?
5. Что изучает термодинамика?
6. Как классифицируются виды энергии в термодинамике?
7. Что такое теплота? Что такое работа?
8. Какие величины называют термодинамическими параметрами?
9. Какие термодинамические параметры относят к термическим, а какие к калорическим?
10. Что называется термическим, а что калорическим уравнением состояния?
11. Что такое термодинамическое равновесие?
12. Какой процесс называют обратимым, а какой – необратимым?

Тема 2. Первый закон термодинамики

Ключевые вопросы темы:

1. Закон сохранения и превращения 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: [4, с. 25–27, 30–41, 44–48; 9, с. 25–33].

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 ℓ . Часть этой работы всегда (и в обратимых и 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

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

Тема 3. Термодинамические процессы идеального газа

Ключевые вопросы темы:

1. Уравнение состояния идеального газа.
2. Калорические уравнения состояния.
3. Отношение теплоемкостей.
4. Энтропия идеального газа.
5. Политропный процесс.
6. Частные случаи политропных процессов для идеального газа.

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, он должен научиться расчету термодинамических процессов, их графическому построению и анализу.

Рекомендуемая литература: [4, с. 15–25, 215–236; 7, с. 35–40, 42–50].

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.

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 изэнтропийным.

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 s , тем положе логарифмическая кривая. При $s = \infty$ получаем горизонтальную прямую (изотерму), при $s = 0$ – 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 ($s < 0$). Поскольку $s = \delta q/dT$, отрицательная теплоемкость означает разные знаки у δq 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 – $s < 0$. 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 ($\delta q < 0$).

Вопросы для самопроверки

1. Что такое идеальный газ? Какая роль отводится идеальному газу в технической термодинамике?
2. Как записывается уравнение состояния идеального газа для 1 кг и для произвольной массы вещества?
3. Что такое газовая постоянная? Что такое универсальная газовая постоянная?
4. Как определить теплоемкости c_p и c_v для идеального газа? Как записывается уравнение Майера? Что такое отношение теплоемкостей?
5. Как записать уравнение первого закона термодинамики для обратимых процессов с идеальным газом для открытой системы; для закрытой системы?
6. Какой вид имеет уравнение, связывающее энтропию идеального газа с давлением и температурой; с температурой и удельным объемом?
7. Что такое политропный процесс? Каково уравнение политропы в координатах p - v и T - s ?
8. Каково уравнение для теплоемкости политропного процесса?
9. Перечислите наиболее распространенные частные случаи политропных процессов.
10. Как изобразить графически политропные процессы в p - v диаграмме?
11. Как изобразить графически политропные процессы в T - s диаграмме?

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

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

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

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

Тема 4. Второй закон термодинамики

Ключевые вопросы темы:

1. Основные формулировки.
2. Прямые и обратные циклы.
3. Прямой и обратный обратимые циклы Карно.
4. Математические выражения второго закона термодинамики.
5. Физический смысл энтропии.
6. Теорема Гюи–Стодолы.

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: [4, с. 49–69, 81–98, 115–117; 7, с. 54–67].

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 привели к тому, что появилось большое число

формулировок второго закона, постулирующих его частные положения. Основное внимание должно быть уделено формулировкам второго закона, определяющим термодинамические принципы действия теплосиловой и холодильной установок.

Опыт показывает, что в тепловую энергию любой другой вид энергии, в том числе механическая, может преобразовываться самопроизвольно, полностью и без дополнительных условий. Преобразование же тепловой энергии в другие виды, в том числе 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. Организация же процессов несамопроизвольных (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 η_t . Термический КПД всегда меньше единицы, $\eta_t < 1$.

В холодильной установке осуществляется несамопроизвольный 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 ε_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

η_t и ε_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.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные формулировки второго закона термодинамики?
2. Можно ли всю тепловую энергию источника преобразовать в механическую энергию?
3. При каких условиях может быть осуществлена теплосиловая установка?
4. Что такое термический КПД?
5. При каких условиях может быть осуществлена холодильная установка?
6. Что такое холодильный коэффициент?
7. Какие процессы входят в состав циклов теплосиловых и холодильных установок?
8. Из каких процессов состоит прямой обратимый цикл Карно и как изобразить его в T-s диаграмме?
9. От чего зависит термический КПД прямого обратимого цикла Карно?
10. Как организован обратный обратимый цикл Карно, и как изобразить его в T-s диаграмме?
11. Чем определяется холодильный коэффициент обратного обратимого цикла Карно?
12. Какой вид имеет уравнение второго закона термодинамики для циклов?
13. Какой вид имеет уравнение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов?
14. Как изменяется энтропия в изолированной системе при протекании в ней обратимых и необратимых процессов?
15. Как трактовать физический смысл энтропии по теореме Гюи–Стодола?

Тема 5. Реальные газы

Ключевые вопросы темы:

1. Уравнение состояния реальных газов.
2. Фазовые переходы.
3. Водяной пар.

4. Таблицы и диаграммы состояния для водяного пара.
5. Диаграмма «энтальпия–энтропия».
6. Термодинамические процессы для воды и водяного пара.
7. Расчет процессов с помощью таблиц и диаграмм.

Целевая установка: Студент должен изучить свойства реальных веществ и освоить методику расчетов для водяного пара с помощью таблиц и диаграмм.

Рекомендуемая литература: [4, с. 177–214; 7, с. 72–85].

Методические указания

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

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличаются реальные газы от идеальных?

2. Какой вид имеет уравнение Ван-дер-Ваальса? Какой физический смысл постоянных в уравнении Ван-дер-Ваальса?
3. Что представляет собой вириальное уравнение состояния? Что такое коэффициент сжимаемости?
4. Что такое критическая точка?
5. Что называется парообразованием, испарением, кипением? Что называется конденсацией?
6. Что такое плавление и затвердевание, сублимация и десублимация?
7. Что такое насыщенный, влажный насыщенный, сухой насыщенный и перегретый пар?
8. Что такое степень сухости и степень влажности?
9. Изобразите p - v диаграмму для воды и пара.
10. Изобразите T - s диаграмму для воды и пара.
11. Изобразите h - s диаграмму для водяного пара.
12. Что такое теплота парообразования и теплота конденсации?
13. Как построены таблицы для воды и пара?
14. Как определить теплоту изобарного процесса по h - s диаграмме?
15. Как определить располагаемую работу адиабатного процесса по h - s диаграмме?

Тема 6. Влажный воздух

Ключевые вопросы темы:

1. Области использования влажного воздуха как идеальноегазовой смеси.
2. Абсолютная и относительна влажность.
3. Точка росы.
4. Влагосодержание.
5. Энтальпия влажного воздуха.
6. Диаграмма «энтальпия–влагосодержание».
7. Процессы сушки.

Целевая установка: Студент должен изучить свойства влажного воздуха, приобрести навыки в пользовании h - d диаграммой влажного воздуха, освоить методику расчетов основных параметров влажного воздуха и процессов сушки.

Рекомендуемая литература: [4, с. 445–456; 7, с. 106–109].

Методические указания

Влажный воздух представляет собой один из частных случаев газовой смеси. Для практики представляет интерес влажный воздух при атмосферном или близком к атмосферному давлению в интервале температур, ограниченном

снизу температурой не ниже минус 50°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

1. Что называют влажным воздухом?
2. В каком случае воздух насыщен и не насыщен влагой?
3. Что такое абсолютная влажность? Что такое относительная влажность?
4. Что такое влагосодержание? В каких пределах оно может изменяться?
5. Что называют точкой росы?
6. Как определяется плотность влажного воздуха?
7. Что такое психрометр?
8. Как построена h - d диаграмма влажного воздуха?
9. Как изображаются основные процессы для влажного воздуха в h - d диаграмме?

Тема 7. Термодинамика потока

Ключевые вопросы темы:

1. Располагаемая работа в потоке.
2. Сопла и диффузоры.
3. Критическое давление. Критическая скорость.
4. Расходная характеристика сопла.
5. Профилирование сопел и диффузоров.

6. Адиабатное течение с трением.
7. Дросселирование газов и паров.

Целевая установка: Студент должен научиться производить выбор типа сопел и диффузоров и осуществлять их расчет с помощью уравнений для идеального газа, таблиц и диаграмм; должен научиться рассчитывать процессы дросселирования газов и паров.

Рекомендуемая литература: [4, с. 236–247, 267–288; 7, с. 87–97].

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

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

2. Какие каналы называются соплами и диффузорами?
3. За счет чего получается располагаемая работа при адиабатном течении?
4. Как определить скорость потока на выходе из канала?
5. Какой вид имеет уравнение неразрывности?
6. Как выглядит расходная характеристика сопла?
7. Каков физический смысл критической скорости?
8. Что такое сопло Лаваля?
9. Как выбрать профиль канала сопла и диффузора?
10. Как учитывается трение при истечении?
11. Что такое дросселирование?
12. Как изменяются параметры потока в результате адиабатного дросселирования?
13. Что такое дроссель-эффект?
14. Что такое температура инверсии?
15. Где используется процесс адиабатного дросселирования?

Тема 8. Циклы теплосиловых установок

Ключевые вопросы темы:

1. Теоретический цикл газотурбинной установки (ГТУ).
2. Регенерация в ГТУ.
3. Теоретический цикл паросиловой установки (ПСУ).
4. Теплофикационные циклы.
5. Методы повышения эффективности паросиловых установок.

Целевая установка: Студент должен познакомиться с теоретическими циклами теплосиловых установок – ГТУ и ПСУ; научиться определять термодинамическую эффективность теоретических циклов; изучить способы ее повышения.

Рекомендуемая литература: [4, с. 319–331, 349–356, 372–379, 388–389; 7, с. 110–113, 117–129].

Методические указания

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 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.).

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.

Паросиловые 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 ПСУ 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.

Повышение эффективности ПСУ может быть достигнуто в результате усовершенствования отдельных элементов, а также за счет увеличения термического КПД цикла. К увеличению η_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 η_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 η_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 эрозионному 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 η_t на 2-3 %.

В настоящее время за счет регенерации и вторичного перегрева пара η_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 теплофикационном 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

1. По какому циклу работают большинство ГТУ?
2. Изобразить цикл простейшей ГТУ в $p-v$ и $T-s$ диаграммах.
3. Изобразить схему простейшей ГТУ и ГТУ с регенерацией.
4. От чего зависит термический КПД ГТУ?
5. Что такое степень регенерации?
6. Изобразить схему простейшей паросиловой установки.
7. Изобразить теоретический цикл Ренкина в $p-v$ и $T-s$ диаграммах.
8. Как влияют начальные и конечные параметры на термический КПД цикла Ренкина?
9. С какой целью осуществляется вторичный перегрев пара?
10. Как определяется термический КПД цикла ПСУ с вторичным перегревом пара?
11. Как осуществляется регенерация в паросиловом цикле?
12. Как определяются доли пара направляемые в регенеративный подогреватель?
13. Как определяется КПД регенеративного цикла ПСУ?
14. Что такое теплофикационный цикл?
15. Как определяется коэффициент использования теплоты в теплофикационном цикле?

Тема 9. Циклы холодильных установок

Ключевые вопросы темы:

1. Методы получения холода.

2. Рабочие тела холодильных установок.
3. Теоретический цикл воздушной холодильной установки.
4. Теоретический цикл парокomppressorной холодильной установки.
5. Схема и термодинамические показатели тепловых насосов.

Целевая установка: Студент должен познакомиться со способами получения холода, изучить теоретические циклы холодильных установок и тепловых насосов, научиться определять их термодинамическую эффективность.

Рекомендуемая литература: [4, с. 414–429, 438–440; 7, с. 132–138, 141–144].

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 парокomppressorных холодильных установок. Эти установки имеют принципиально различные методы понижения температуры холодильного агента – в воздушных холодильных установках это достигается путем адиабатного расширения воздуха, а в парокomppressorных 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

1. Что такое холод?
2. Какие существуют способы получения холода?
3. Какие вещества используются в качестве холодильных агентов?
4. На какие группы делятся холодильные установки?
5. Изобразить схему и цикл воздушной холодильной установки в $p-v$ и $T-s$ диаграммах.
6. Каковы достоинства и недостатки воздушной холодильной установки?

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

8. Каковы достоинства и недостатки парокомпрессорных холодильных установок?

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

10. Что такое коэффициент преобразования для теплонасосной установки?

Тема 10. Общая характеристика процессов тепломассообмена

Ключевые вопросы темы:

1. Способы тепло- и массопереноса: теплопроводность, конвекция, излучение, диффузия.

2. Сложные процессы тепло- и массопереноса.

3. Температурное поле.

4. Градиент температуры.

5. Тепловой поток. Плотность теплового потока.

Целевая установка: Студент должен получить понятие о существующих в природе механизмах передачи теплоты и массопереносе, о сложных процессах тепло- и массообмена и закономерностях их протекания. Усвоить ключевые понятия теории теплообмена.

Рекомендуемая литература: [7, с. 147–151; 12, с. 13–16, 18–24].

Методические указания

В разделе Техническая термодинамика вопрос о механизме передачи теплоты от горячего тела к холодному не рассматривался. Изучением этого механизма и физической сущности различных способов передачи теплоты занимается теория теплообмена; она же определяет соотношения для расчета параметров в процессах. Процессы теплообмена очень сложны, а условия их протекания многообразны. Среда, в которой они осуществляются, может быть однокомпонентной (чистое вещество) и многокомпонентной (смесь, раствор, расплав), однородной и неоднородной, однофазной и многофазной, в этих процессах может изменяться и агрегатное состояние вещества. Процессы теплообмена часто сопровождаются переносом массы вещества, например, при конденсации пара и при испарении жидкости. Совместные процессы тепло- и массообмена являются еще более сложными.

С целью упрощения решения задачи процессы тепло- и массообмена принято рассматривать как независимые. А в самом теплообмене выделяют три

основных элементарных способа распространения теплоты – теплопроводность, конвекцию и излучение. На практике эти элементарные процессы действуют, как правило, одновременно. Поэтому наряду с элементарными будет рассмотрены и сложные процессы, протекающие при совместном участии двух или трех элементарных. Наиболее распространенными из сложных процессов теплообмена являются конвективный теплообмен (теплоотдача) и теплопередача. Поскольку конвекция в чистом виде практически не встречается, в этом курсе подробно рассматриваются четыре процесса (два элементарных и два сложных) – теплопроводность, излучение, теплоотдача и теплопередача.

Необходимо обратить внимание на различие в обозначениях для теплоты в термодинамике и в теории теплообмена. В первом случае через Q обозначалось подведенное к системе количество теплоты (в Дж), а через q – удельное количество теплоты (в Дж/кг). В теории теплообмена через Q обозначается тепловой поток (в Вт), т.е. количество теплоты, подведенное в единицу времени, так как $Вт = Дж/с$; через q обозначается плотность теплового потока (в $Вт/м^2$).

Вопросы для самопроверки

1. Каков механизм элементарных способов распространения теплоты – теплопроводности, конвекции, излучения?
2. Что такое конвективный теплообмен?
3. Какой процесс называют теплоотдачей?
4. В каких промышленных установках имеет место радиационно-кондуктивный теплообмен?
5. Что такое теплопередача?
6. Какими способами может осуществляться перенос массы вещества?
7. Что такое массоотдача?
8. Что называется температурным полем?
9. Какие бывают типы температурных полей?
10. Что такое изотермическая поверхность?
11. Как определить градиент температуры?
12. Что такое тепловой поток и его плотность?

Тема 11. Теплопроводность

Ключевые вопросы темы:

1. Закон Фурье.
2. Коэффициент теплопроводности.
3. Дифференциальное уравнение теплопроводности.

4. Условия однозначности.

5. Теплопроводность плоской и цилиндрической стенок при стационарном режиме.

6. Многослойные стенки.

Целевая установка: Студент должен понять сущность процесса теплопроводности, познакомиться с основным законом и дифференциальным уравнением теплопроводности, научиться производить расчеты конкретных процессов теплопроводности.

Рекомендуемая литература: [7, с. 150–152, 159–163; 12, с. 17–18, 24–39, 42–46].

Методические указания

В процессе теплопроводности тепловой поток определяется на основании закона Фурье, согласно которому плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры. Этот закон лежит в основе всех теоретических и экспериментальных исследований процессов теплопроводности.

Коэффициент пропорциональности в законе Фурье называется коэффициентом теплопроводности, который является физическим свойством вещества и характеризует его способность проводить тепло. Для различных веществ коэффициент теплопроводности различен и в общем случае зависит от множества факторов. Так как при распространении тепла температура в различных частях тела различна, то в первую очередь важно знать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры. Для большого числа материалов эта зависимость оказывается почти линейной.

Одним из основных уравнений, описывающих процессы теплообмена, является дифференциальное уравнение энергии, вывод которого базируется на использовании первого закона термодинамики. На его основе может быть получено дифференциальное уравнение теплопроводности, описывающее температурное поле и необходимое для определения градиента температуры.

Интегрированием дифференциального уравнения теплопроводности при стационарном режиме в заданных граничных условиях можно получить выражения для определения теплового потока в различных по конфигурации стенках – плоской, цилиндрической. В общем случае плотность теплового потока определяется как отношение температурного напора к термическому сопротивлению стенки.

Вопросы для самопроверки

1. Как формулируется закон Фурье для теплопроводности?

2. От чего зависит коэффициент теплопроводности?
3. Что такое температурный напор? Как он определяется для теплопроводности?
4. Что такое граничные условия 1-го рода?
5. Напишите дифференциальное уравнение теплопроводности однослойной плоской стенки.
6. По какому закону изменяется температура в однородной плоской стенке?
7. Как определить плотность теплового потока для плоской стенки?
8. Что такое термическое сопротивление и как оно определяется для плоской стенки?
9. Как определяется термические сопротивления многослойной плоской стенки?
10. Напишите дифференциальное уравнение теплопроводности однослойной цилиндрической стенки.
11. Каков закон изменения температуры в цилиндрической стенке?
12. Что такое линейная плотность теплового потока и как ее определить?
13. Что такое линейное термическое сопротивление и как оно определяется для цилиндрической стенки?
14. Как определяется температура между слоями в многослойной цилиндрической стенке?

Тема 12. Конвективный теплообмен

Ключевые вопросы темы:

1. Теплоотдача.
2. Закон Ньютона-Рихмана.
3. Коэффициент теплоотдачи.
4. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена. Условия однозначности.
5. Основы теории подобия. Уравнение подобия.
6. Частные задачи конвективного теплообмена: вынужденное движение в трубах, поперечное обтекание труб, свободное движение в большом объеме и ограниченном пространстве, кипение жидкости, конденсация пара.

Целевая установка: Студент должен понять сущность процесса теплоотдачи, познакомиться с основным законом и дифференциальными уравнениями, уяснить основы теории подобия. Также необходимо изучить ряд частных процессов теплоотдачи, разобраться в их физической сущности и научиться производить их расчет по уравнениям подобия.

Рекомендуемая литература: [7, с. 150, 152–158, 165–177; 12, с. 126–127, 132–154, 188–196, 219–234, 239–264, 267–278, 289–298, 301–326, 334–352].

Методические указания

Конвективным теплообменом, или теплоотдачей, называется процесс переноса тепла между поверхностью твердого тела и теплоносителем (жидкостью или газом). При этом перенос тепла осуществляется одновременным действием теплопроводности и конвекции. При конвекции процесс переноса тепла неразрывно связан с переносом самой среды, поэтому конвекция возможна лишь в жидкостях и газах, частицы которых легко могут перемещаться.

Интенсивность конвективного теплообмена характеризуется коэффициентом теплоотдачи α , который определяется на основании гипотезы Ньютона–Рихмана. Процесс теплоотдачи является сложным процессом, а коэффициент теплоотдачи – сложной функцией различных величин, характеризующих этот процесс.

Для описания процесса теплоотдачи необходима система дифференциальных уравнений, которая наряду с уравнением теплоотдачи включает в себя дифференциальные уравнения энергии, движения в направлении трех координатных осей и сплошности. Дополняют полное математическое описание задачи условия однозначности.

Вследствие сложности математического описания процесса теплоотдачи аналитическое определение коэффициента теплоотдачи чаще всего невозможно. Это приводит к необходимости экспериментального исследования процесса на моделях. Однако из-за многообразия частных особенностей каждого конкретного процесса значения α , полученные экспериментально, не могут быть непосредственно использованы при расчете промышленных установок. Пересчет значений коэффициента теплоотдачи осуществляется на основании теории подобия.

При рассмотрении каждой частной задачи конвективного теплообмена необходимо установить характер вынужденного или свободного движения теплоносителя у стенки, характер изменения коэффициента теплоотдачи α по поверхности стенки и общий вид уравнения подобия. При этом необходимо помнить, что все результаты этого рассмотрения получены экспериментально. Следует научиться выбирать нужное уравнение подобия для расчета заданного процесса.

Сложность конвективного теплообмена легко проиллюстрировать на примере теплоотдачи при вынужденном движении в трубах. Здесь при переменной по сечению температуре (и, следовательно, вязкости) характер и

режим движения теплоносителя изменяется в зависимости от расположения трубы (горизонтальное, вертикальное, наклонное) и направления движения (вверх, вниз). На интенсивность теплообмена влияет даже направленность теплового потока (от стенки или к стенке), которая для капельных жидкостей учитывается комплексом $(Pr_{ж}/Pr_{с})^{0,25}$.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте гипотезу Ньютона–Рихмана.
2. Чем определяется коэффициент теплоотдачи?
3. Какие дифференциальные уравнения входят в систему описания процесса теплоотдачи?
4. Что такое условия однозначности?
5. Под действием каких сил происходит свободное движение? Вынужденное движение?
6. Что такое пограничный слой – гидродинамический, тепловой?
7. В чем сущность подобия физических явлений?
8. Что такое числа подобия?
9. Каков физический смысл чисел Re , Gr , Pr , Nu ?
10. Как записать уравнение подобия?
11. Как определить коэффициент теплоотдачи с использованием теории подобия?
12. Как учитывается влияние на теплообмен в трубах направления теплового потока?
13. Как изменяется коэффициент теплоотдачи по длине трубы?
14. Какой вид имеет уравнение подобия для вынужденного ламинарного движения в трубах?
15. Как влияет на теплообмен в трубе ее длина и кривизна?
16. Какой вид имеет уравнение подобия для вынужденного турбулентного движения в трубах?
17. Как изменяется коэффициент теплоотдачи по периметру одиночной трубы при ее поперечном обтекании невозмущенным потоком?
18. Какой вид имеет уравнение подобия при поперечном обтекании пучка труб?
19. В каком пучке (шахматном или коридорном) интенсивность теплообмена выше и почему?
20. При каком обтекании труб (поперечном или продольном) интенсивность теплообмена выше и почему?
21. Какой вид имеет уравнение подобия при свободном движении в большом объеме?

22. Почему уравнение подобия упрощается, когда теплоносителем является газ?
23. Как ведется расчет теплообмена при свободном движении в ограниченном пространстве?
24. Что такое центр парообразования?
25. Как зависят величины коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока от величины перегрева жидкости при кипении?
26. Какие режимы кипения вы знаете?
27. Что такое кризисы кипения?
28. Какой режим кипения наиболее благоприятен для теплообменных аппаратов и почему?
29. Приведите примеры расчетных уравнений для процесса кипения.
30. При какой температуре возможна конденсация пара на поверхности стенки?
31. Какая конденсация эффективнее – пленочная или капельная и почему?
32. По каким уравнениям ведется расчет процесса конденсации на вертикальных и горизонтальных трубах?
33. Как влияет на интенсивность конденсации наличие в паре примесей неконденсирующихся газов?
34. Как влияют на процесс конденсации на горизонтальных трубах число труб в пучке, скорость и направление движения пара?

Тема 13. Лучистый теплообмен

Ключевые вопросы темы:

1. Физическая природа лучистого теплообмена.
2. Интегральные и спектральные характеристики энергии излучения.
3. Классификация потоков излучения.
4. Коэффициенты поглощения, отражения, пропускания. Серые тела.
5. Основные законы лучистого теплообмена: Планка, Вина, Стефана–Больцмана, Кирхгофа, Ламберта.
6. Лучистый теплообмен между телами. Экранирование.
7. Особенности излучения и поглощения энергии газами.

Целевая установка: Студент должен понять физическую природу лучистого теплообмена, изучить его основные законы и научиться производить его расчет.

Рекомендуемая литература: [7, с. 186–193; 12, с. 425–441, 445–452, 472–480].

Методические указания

Прежде всего, надо уяснить принципиальную разницу между теплообменным излучением и двумя уже известными видами теплообмена – теплопроводностью и конвекцией. Все тела непрерывно излучают часть своей внутренней энергии в окружающее пространство и непрерывно поглощают энергию излучения других тел, поэтому процесс лучистого теплообмена между телами в системе происходит непрерывно независимо от их температур. Этот процесс характеризуется таким образом: двойным преобразованием энергии – внутренней в лучистую и лучистой во внутреннюю. В общем случае тела могут излучать и поглощать энергию всех длин волн от 0 до ∞ . Излучение и поглощение тепловой энергии характеризуется длинами волн светового и инфракрасного излучения.

Основные законы лучистого теплообмена справедливы лишь для абсолютно черного тела. Введение понятия степени черноты для серых тел и газов позволяет использовать некоторые из этих законов, например, Стефана–Больцмана, для расчета лучистого теплообмена между реальными телами.

Необходимо разобраться в особенностях излучения и поглощения энергии газами и научиться производить расчет теплообмена между газом и оболочкой. Такой теплообмен имеет место, например, в топке котла, камере сгорания ГТУ и ДВС.

Вопросы для самопроверки

1. Какие длины волн характерны для тепловых лучей?
2. Что такое абсолютно черное, абсолютно белое, абсолютно прозрачное тело?
3. Какой спектр излучения у твердых, жидких и газовых тел?
4. Что такое лучистый поток, поверхностная и интегральная плотности потока излучения?
5. Что такое падающее, собственное, результирующее и эффективное излучение?
6. Как сформулировать основные законы теплового излучения Планка, Стефана–Больцмана, Кирхгофа, Ламберта?
7. Дайте графическую интерпретацию закона Планка.
8. Как формулируется закон Вина?
9. Как определяется лучистый поток между двумя параллельными плоскими стенками?
10. Что такое приведенная степень черноты?
11. Для чего нужны экраны?
12. Каковы особенности излучения и поглощения энергии газами?

Тема 14. Теплопередача и теплообменные аппараты

Ключевые вопросы темы:

1. Теплопередача как вид сложного теплообмена.
2. Уравнение теплопередачи.
3. Коэффициент теплопередачи.
4. Термическое сопротивление теплопередачи.
5. Теплообменных аппараты и их классификация.
6. Принципы расчета теплообменных аппаратов.
7. Интенсификация теплопередачи.

Целевая установка: Студент должен понять сущность процесса теплопередачи, познакомиться с основными уравнениями, изучить принцип действия современных теплообменных аппаратов и научиться производить их расчет.

Рекомендуемая литература: [7, с. 151, 195–202; 12, с. 40–42, 46–50, 512–536].

Методические указания

В промышленных теплообменных аппаратах процессы передачи теплоты чаще всего являются сложными, т. е. осуществляются при совместном действии теплопроводности, конвекции и излучения. Одним из наиболее распространенных сложных процессов теплообмена является теплопередача, под которой понимают передачу теплоты от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку. Этот сложный процесс состоит из трех более простых процессов, рассмотренных ранее, – двух процессов теплоотдачи по обе стороны стенки и теплопроводности в самой стенке.

При расчете рекуперативных теплообменных аппаратов используются два основных уравнения – теплопередачи и теплового баланса. Средний температурный напор теплообменного аппарата определяется как среднелогарифмический как при прямотоке, так и при противотоке.

Здесь основное внимание надо обратить на способы интенсификации теплопередачи, которые позволяют сделать теплообменник более легким, компактным и дешевым.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое процесс теплопередачи?
2. Что такое температурный напор в процессе теплопередачи?

3. Как определяется коэффициент теплопередачи и термическое сопротивление теплопередачи через плоскую стенку?
4. Что такое линейный коэффициент теплопередачи и линейное термическое сопротивление теплопередачи?
5. От чего зависит критический диаметр тепловой изоляции?
6. Какие существуют способы интенсификации теплопередачи?
7. Какие существуют типы теплообменных аппаратов?
8. Какие существуют схемы движения теплоносителей в теплообменных аппаратах?
9. Какие уравнения используются при расчетах теплообменных аппаратов?
10. В чем отличие конструкторского расчета от поверочного?
11. Как определяется средний температурный напор теплообменного аппарата?
12. Почему при противотоке средний температурный напор выше, чем при прямотоке?
13. Какие гидромеханические потери имеют место в теплообменных аппаратах?
14. Как определить КПД теплообменного аппарата?

Тема 15. Массоотдача

Ключевые вопросы темы:

1. Массообмен.
2. Поток массы вещества и его плотность.
3. Концентрационная диффузия.
4. Закон Фика. Коэффициент диффузии.
5. Массоотдача. Коэффициент массоотдачи.
6. Теория подобия. Диффузионные числа подобия.
7. Тройная аналогия.

Целевая установка: Студент должен понять сущность процесса массообмена, познакомиться с основными законами, теорией подобия и диффузионными числами подобия, уяснить аналогию процессов тепло- и массообмена.

Рекомендуемая литература: [7, с. 177–181; 12, с. 371–399].

Методические указания

Процессы теплообмена в природе и технике часто сопровождаются переносом массы вещества – массообменом. Такие процессы могут протекать как в однокомпонентной среде, так и в бинарных и многокомпонентных смесях.

По аналогии с понятием теплового потока и его плотности в теории массообмена вводится понятие потока массы вещества (компонента) J , кг/с и плотности потока массы j , кг/(м²·с).

Математическое описание процесса тепломассообмена является сложным и содержит $(n+6)$ дифференциальных уравнений, где n – число компонентов, которые включают в себя n уравнений диффузии, уравнение неразрывности, три уравнения движения, уравнение энергии, уравнение состояния, зависимость энтальпии от температуры.

Практический расчет массо- и теплообмена основывается на аналогии процессов массо- и теплообмена (по формулам конвективного теплообмена определяют коэффициент массоотдачи) и уравнениях баланса массы и энергии на межфазной границе.

Вопросы для самопроверки

1. Как определить поток массы вещества и плотность потока массы?
2. Что такое массовая концентрация компонента?
3. Что такое диффузия?
4. Что является движущей силой при переносе массы вещества?
5. Сформулируйте закон Фика.
6. Как записывается уравнение массоотдачи?
7. Какие числа подобия характеризуют процесс массоотдачи?
8. Что такое диффузионный пограничный слой?
9. Что такое тройная аналогия?
10. Как в общем виде записывается уравнение подобия для процесса массоотдачи?

Формами, направленными на практическую подготовку, являются практические и лабораторные занятия, выполнение индивидуальных заданий и контрольной работы 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 способствует закреплению 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 на это преподавателя. По завершении работы необходимо показать её результаты преподавателю, и в случае их одобрения можно приступать к ее оформлению 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.

В процессе освоения дисциплины студентом составляется портфолио дисциплины, которое формируется к окончанию курса обучения. В портфолио 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.

3 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 – индивидуального задания для студентов очной формы обучения и выполнение контрольной работы студентами заочной формы обучения.

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.

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 В.

При выполнении *контрольной работы* исходные данные для решения задач и вопросы выбираются студентом в зависимости от номера зачетной книжки. При выполнении контрольной работы следует придерживаться следующих правил:

– условия задач и формулировки вопросов 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, дать ссылку на литературу, откуда эта формула взята. После записи формулы с буквенными обозначениями в таком же порядке подставляются 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;

– ответы на вопросы должны быть исчерпывающими, но без лишней и загромождающей смысл информации;

– завершается работа списком использованных источников.

Ответы на вопросы и решение 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 шириной около 4 см.

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 –

«Контрольная работа»; название учебной дисциплины; шифр учебной группы; фамилию и инициалы студента; ученую степень, научное звание (при наличии), инициалы и фамилия преподавателя; место и год выполнения работы. Образец оформления титульного листа контрольной работы приведен в Приложении В.

Полученные индивидуальные задания на дом или контрольную работу 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.

Библиографический список

1. Александров, А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. – Москва: МЭИ, 1999. – 164 с.
2. Аметистов, Е. В. Основы теории теплообмена: учеб. пособие / Е. В. Аметистов. – Москва: Изд-во МЭИ, 2000. – 247 с.
3. Зубарев, В. Н. Практикум по технической термодинамике: учеб. пособие / В. Н. Зубарев. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 303 с.
4. Кириллин, В. А. Техническая термодинамика: учеб. для вузов / В. А. Кириллин, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: МЭИ, 2008. – 495 с.
5. Краснощёков, Е. А. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие / Е. А. Краснощёков, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – Москва: Энергия, 1980. – 287 с.
6. Сборник задач по технической термодинамике: учеб. пособие для студентов вузов / Т. Н. Андрианова [и др.]. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: МЭИ, 2000. – 354 с.
7. Селин, В. В. Теплотехника: учеб. для вузов / В. В. Селин. – Калининград: ОГУП «Калининград. кн. изд-во», 2001. – 381 с.
8. Теоретические основы теплотехники: метод. указания и индивид. задания для самост. работы студентов спец. 140101.65 Тепловые электрические станции, 180403.65 Эксплуатация судовых энергетических установок и 270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция / В. В. Селин, Е. А. Беркова. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2007. – 38 с.
9. Тепломассообмен: метод. указания с контрольн. заданиями для студентов спец. 290700 Теплогазоснабжение и вентиляция / сост. В. В. Пухов. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2003. – 45 с.
10. Пухов, В. В. Техническая термодинамика: метод. указания с контрольн. заданиями для студентов-заочников, обучающихся по спец. 270109.65 Теплогазоснабжение и вентиляция / В. В. Пухов. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2008. – 49 с.
11. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену: учеб. пособие / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. – 2-е изд., исп. и доп. – Москва: МЭИ, 2008. – 195 с.
12. Цветков, Ф. Ф. Тепломассообмен: учеб. для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – Москва: МЭИ, 2011. – 559 с.

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. 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 № 3. 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 № 4. 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 № 5. Определение коэффициента теплопроводности твёрдого материала методом цилиндрического слоя.

Задание по лабораторной работе: Определить экспериментально значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала и установить его зависимость от температуры.

Контрольные вопросы:

1. Какова физическая сущность процесса теплопроводности?
2. Что такое коэффициент теплопроводности? От чего он зависит? Какие материалы можно считать теплоизоляционными?
3. Что называется температурным полем? Какие бывают типы температурных полей? Как определяется градиент температуры?
4. Как формулируется закон Фурье для теплопроводности?

5. Что такое линейная плотность теплового потока?

6. Как определяется линейное термическое сопротивление теплопроводности для цилиндрической стенки?

Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции на обогреваемом цилиндре

Задание по лабораторной работе: Определить значение среднего коэффициента теплоотдачи для горизонтальной трубы при свободном движении воздуха и установить его зависимость от температурного напора.

Контрольные вопросы:

1. Что такое конвективный теплообмен? Какой процесс называется теплоотдачей?

2. Как определяется плотность теплового потока в процессе теплоотдачи?

3. Дайте определения коэффициента теплоотдачи и температурного напора. От чего зависит коэффициент теплоотдачи?

4. Каков физический смысл чисел Грасгофа, Прандтля, Нуссельта?

5. Что такое свободная конвекция? Какие факторы влияют на теплоотдачу при свободной конвекции?

6. Какой вид имеет уравнение подобия при свободном движении жидкости в большом объеме?

Лабораторная работа № 7. Исследование теплообмена излучением

Задание по лабораторной работе: Определить экспериментально коэффициент излучения электропроводящего материала при различных температурах калориметрическим методом. Сравнить с табличными значениями.

Контрольные вопросы:

1. Какой диапазон длин волн характеризует тепловое излучение?

2. Что такое «абсолютно чёрное» тело и «серое» тело?

3. По какому закону определяется поверхностная плотность потока излучения абсолютно чёрного тела?

4. Что такое интегральная степень черноты серого тела?

5. Что такое коэффициент излучения серого тела? От чего он зависит?

6. Сформулируйте закон Кирхгофа для лучистого теплообмена.

Типовые экзаменационные вопросы по дисциплине

1. Предмет и метод термодинамики. Энергия и её виды. Работа и теплота как формы преобразования энергии. 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 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. Графическое определение работы. Рабочая диаграмма.
6. Вычисление теплоты процесса. Теплоёмкость. Энтропия. Тепловая диаграмма.
7. Идеальный газ и его свойства. Уравнение состояния идеального газа. Вид калорических уравнений состояния. Отношение теплоёмкостей. Энтропия идеального газа. Смеси идеальных газов.
8. Политропные процессы для идеального газа. Частные случаи политропных процессов: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный. Графическое представление процессов в рабочей и тепловой диаграммах.
9. Основные положения и формулировки второго закона термодинамики. Прямые и обратные циклы. Термический КПД и холодильный коэффициент. Прямой обратимый цикл Карно. Обратный обратимый цикл Карно. Регенеративный цикл.
10. Математические выражения второго закона термодинамики. Интегралы Клаузиуса. Изменение энтропии в обратимых и необратимых процессах.
11. Уравнение состояния реальных газов. Основные свойства чистых веществ. Фазовые переходы. Критические параметры вещества. Тройная точка. Таблицы и диаграммы термодинамических свойств веществ.
12. Диаграмма $p-v$ для воды и пара. Теплота парообразования и теплота конденсации. Теорема Клапейрона–Клаузиуса.
13. Определение параметров жидкости, сухого насыщенного, влажного и перегретого паров с помощью таблиц. Степень сухости и степень влажности.
14. Диаграмма $T-s$ для воды и пара. Диаграмма $h-s$ для водяного пара.

15. Расчёт процессов изменения состояния водяного пара с помощью таблиц и диаграмм.

16. Влажный воздух. Абсолютная и относительная влажности. Точка росы. Влагосодержание. Энтальпия влажного воздуха. Диаграмма «энтальпия–влагосодержание».

17. Термодинамика потока. Располагаемая работа в потоке. Сопла и диффузоры. Адиабатное течение. Расходная характеристика сопла. Критическое давление. Критическая скорость. Профилирование сопел и диффузоров. Учёт трения при истечении.

18. Расчёт истечения водяного пара с помощью h - s диаграммы. Параметры торможения. Дросселирование газов и паров.

19. Теоретические циклы ДВС с подводом теплоты при постоянном объёме, при постоянном давлении и комбинированном. Термический и индикаторный КПД. Эффективный КПД установки.

20. Тепловая схема и теоретический цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении. Регенерация. Эффективный КПД установки. Сложные схемы ГТУ.

21. Теоретический цикл паросиловой установки. Термический КПД и его зависимость от начальных и конечных параметров. Эффективный КПД установки.

22. Методы повышения эффективности паросиловых циклов: регенерация, вторичный перегрев пара, теплофикация.

23. Методы получения холода. Теоретический цикл воздушной холодильной установки. Теоретический цикл парокомпрессорной холодильной установки. Действительный холодильный коэффициент.

24. Элементарные способы распространения теплоты. Сложный теплообмен. Теплоотдача. Теплопередача. Понятие о массопереносе. Массоотдача.

25. Температурное поле. Градиент температуры. Определение тепловых потоков. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Закон Ньютона–Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Температурный напор. Уравнение теплопередачи. Коэффициент теплопередачи.

26. Полное математическое описание процессов теплообмена. Система дифференциальных уравнений и условия однозначности. Дифференциальное уравнение теплопроводности.

27. Теплопроводность плоской стенки при стационарном режиме. Многослойная стенка.

28. Теплопроводность цилиндрической стенки при стационарном режиме. Многослойная стенка.

29. Общая характеристика процесса теплоотдачи. Гидродинамический пограничный слой. Тепловой пограничный слой. Дифференциальное уравнение

теплообмена. Полное математическое описание процессов конвективного теплообмена. Условия однозначности.

30. Основы теории подобия. Числа подобия. Теоремы подобия. Уравнение подобия. Частные задачи конвективного теплообмена.

31. Теплоотдача при вынужденном движении в трубах.

32. Теплоотдача при вынужденном обтекании одиночной трубы и пучков труб.

33. Теплоотдача при свободном движении в большом объеме и в ограниченном пространстве.

34. Теплоотдача при кипении жидкости. Кризисы кипения.

35. Теплообмен при конденсации пара.

36. Общие сведения о тепловом излучении. Интегральный лучистый поток и его плотность. Спектральная плотность потока излучения. Собственное, эффективное и результирующее излучение.

37. Законы лучистого теплообмена: Планка, Вина, Стефана–Больцмана, Кирхгофа, Ламберта. Серые тела. Степень черноты.

38. Особенности излучения и поглощения энергии газами. Лучистый теплообмен между газом и оболочкой.

39. Лучистый теплообмен между серыми телами в прозрачной среде. Экранирование.

40. Теплопередача через плоскую стенку. Коэффициент теплопередачи. Термическое сопротивление теплопередачи. Многослойная стенка.

41. Теплопередача через цилиндрическую стенку. Линейный коэффициент теплопередачи. Многослойная стенка.

42. Теплообменные аппараты и их классификация. Конструкторский расчёт рекуперативного теплообменного аппарата. Прямоток и противоток. Средний температурный напор.

**Образец оформления титульного листа индивидуального задания
(контрольной работы)**

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 /

/ Контрольная работа /

допущено к защите:

должность (звание), ученая степень

_____ Фамилия И.О.

(подпись)

«__» _____ 202__ г.

Индивидуальное задание

/ Контрольная работа /

защищено:

должность (звание), ученая степень

_____ Фамилия И.О.

(подпись)

«__» _____ 202__ г.

**ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ
/ КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА /**

по дисциплине

«Техническая термодинамика и тепломассообмен»

Вариант № ____
/ Шифр ____ /

Работу выполнил:

студент гр. _____

_____ Фамилия И.О.

(подпись)

«__» _____ 202__ г.

Калининград,
202__

Локальный электронный методический материал

Елена Анатольевна Беркова

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА И ТЕПЛОМАСООБМЕН

Редактор Э. С. Круглова

Локальное электронное издание

Уч.-изд. л 3,0. Печ. л. 2,8

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1