

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «МГТУ»)

Кафедра технологического и  
холодильного оборудования

**Методические указания  
к самостоятельной работе обучающихся**

**По дисциплине:** Б1.Б.16 Термодинамика  
код и наименование дисциплины

**Направление подготовки/специальность** 15.03.02 Технологические машины и оборудование  
код направления/специальности

**Направленность/специализация** Пищевая инженерия малых предприятий  
наименование направленности (профиля) /специализации образовательной программы

**Квалификация выпускника** академический бакалавр  
указывается квалификация (степень) выпускника в соответствии с ФГОС ВО

**Кафедра-разработчик:** кафедра технологического и холодильного оборудования  
название кафедры-разработчика рабочей программы

**Мурманск**

**2020**

Разработчик – Голубева Ольга Алексеевна, кандидат технических наук,  
доцент, доцент кафедры ТХО.

МУ к СР рассмотрены и одобрены на заседании кафедры - разработчика  
технологического и холодильного оборудования, «23» июня 2020 г., протокол  
№ 8

**СОДЕРЖАНИЕ**

I ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	4
II ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН	5
III СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	6
IV СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ	7

## І ОБЩИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Целью дисциплины «Термодинамика» является формирование компетенций в соответствии с ФГОС по направлению подготовки бакалавра и учебным планом для направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» направленности «Пищевая инженерия малых предприятий»

Задачи дисциплины:

- формирование у студентов методологического подхода к оценке термодинамических и теплообменных процессов;
- выработка навыков решения инженерных задач, в том числе в рамках самостоятельной работы.

В результате изучения дисциплины студент должен:

*Знать:*

- основные законы термодинамики;
- термодинамические процессы;
- способы получения, преобразования, передачи и использования теплоты;
- термодинамические процессы;
- тепловые диаграммы.

*Уметь:*

- проводить термодинамический анализ основных процессов;
- разрабатывать технологические процессы с обеспечением высокого уровня энергосбережения;
- выполнять инженерные расчёты теплоэнергетического оборудования; - анализировать, обобщать и делать выводы по результатам исследований;
- проводить измерения и наблюдения, составлять описания проводимых исследований, готовить данные для составления отчётов и научных публикаций; внедрять результаты исследований в практику производственного процесса;
- применять достижения новых технологий.

*Владеть:*

- терминологией, определениями и положениями термодинамики

Методические указания предназначены для оказания помощи обучающимся в самостоятельном постижении программы дисциплины. Для успешного освоения материала следует изучить теоретический материал по литературным источникам, указанным в каждой теме. Подтвердить полученные знания следует практическими расчётами.

## II ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Таблица 1

№ п/п	Содержание разделов (модулей), тем дисциплины	Количество часов, выделяемых на самостоятельную работу по формам обучения	
		очная	заочная
1	2	3	4
1	Термодинамика. Предмет термодинамики. Связь с другими отраслями знаний	2	5
2	<b>Основные понятия и определения термодинамики.</b> Термодинамическая система и окружающая среда. Виды термодинамических систем. Термодинамические параметры состояния. Нулевое начало термодинамики. Равновесные и неравновесные системы. Общее уравнение состояния. Понятие термодинамического процесса. $v$ - $P$ - диаграмма и термодинамические процессы в ней. Уравнение состояния идеальных газов. Удельная и универсальная газовые постоянные. Газовые смеси. Закон Дальтона. Способы задания газовых смесей, их взаимосвязь	12	17
3	<b>Основные законы термодинамики.</b> Первый закон термодинамики. Работа и теплота процесса. Внутренняя энергия системы. Энтальпия. Энтропия. $s$ - $T$ -диаграмма и ее свойства	8	15
4	<b>Теплоемкость.</b> Уравнение Майера для идеальных и реальных газов. Теплоемкость смеси газов	6	15
5	<b>Термодинамические процессы.</b> Классификация процессов изменения состояния рабочего тела. Общие методы исследования и определения термодинамических параметров тепловых процессов изменения состояния рабочих тел. Изображение процессов в $v$ - $P$ - и $s$ - $T$ - диаграммах	9	16
6	<b>Обратимые и необратимые процессы.</b> Второй закон термодинамики. Термодинамические циклы. Термический КПД и холодильный коэффициент. Прямой и обратный циклы Карно и их свойства. Обобщенный цикл. Максимальная работа. Работоспособность системы. Понятие об эксергии. Эксергия потока. Эксергический КПД	8	16
7	<b>Термодинамические процессы реальных газов.</b> Реальные газы и пары. Свойства реальных газов. Коэффициент сжимаемости. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Фазовые переходы веществ. Фазовая диаграмма вещества. Водяной пар. Процессы парообразования, конденсации и перегрева пара. Определение параметров воды и водяного пара. $v$ - $P$ - и $s$ - $T$ -диаграммы водяного пара. $s$ - $i$ - диаграмма	12	17
8	<b>Дросселирование газов и паров.</b> Эффект Джоуля- Томсона. Изменение параметров потока при дросселировании. Кривые инверсии. Их свойства	5	15
9	<b>Влажный воздух.</b> Основные определения. $d$ - $i$ - диаграмма. Ее свойства. Определение параметров состояния влажного воздуха в технологических процессах с использованием $d$ - $i$ - диаграммы	8	15

## Продолжение таблицы 1 - II ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

1	2	3	4
10	<p><b>Прикладные вопросы термодинамики</b></p> <p>Сжатие газов. Процессы сжатия в одно- и многоступенчатых компрессорах. Работа в двухступенчатых компрессорах при различных процессах сжатия.</p> <p>Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме и при постоянном давлении. Обобщенный термодинамический цикл тепловых двигателей. Его основные параметры. Способы повышения термического КПД тепловых двигателей.</p> <p>Термодинамические циклы тепловых установок. ГТУ. Принципы работы ГТУ. Термодинамические циклы ГТУ. Характеристики циклов ГТУ</p> <p>Паросиловая установка. Принцип её работы. Изображение теоретического цикла паросиловой установки в <math>v</math>-<math>P</math>- , <math>s</math>-<math>T</math>- и <math>s</math>-<math>i</math> диаграммах. Термический КПД цикла паросиловой установки.</p> <p>Промышленная теплоэнергетика. Топливо. Энергетическое топливо. Виды и назначение топлив. Элементарный состав топлива. Теплотехнические характеристики топлив. Мероприятия по экономии топлива и тепловой энергии на предприятиях пищевой промышленности. Классификация вторичных энергоресурсов. Защита атмосферы от вредных выбросов энергетических установок.</p>	8	20
Итого		74	131

## III СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

## Основная литература

1. Гнатюк, В. С. Опорный конспект лекций по механике, молекулярной физике и термодинамике : учеб. пособие по дисциплине "Физика" для студентов естеств.-науч. и техн. направлений подгот. и специальностей / В. С. Гнатюк, Н. Н. Морозов, З. Ф. Мурашова; М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВО "Мурман. гос. техн. ун-т". - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2018. - 243 с. : ил. ( 60 экз.) - Имеется электрон. аналог 2018 г.
2. Круглов Г.А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 208 с. ( 5 экз.) <https://e.lanbook.com/reader/book/3900/#4>
3. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике : учеб. пособие для техникумов / О. М. Рабинович. - Изд. 5-е, перераб. - Москва : Альянс, 2015. - 344 с (49 экз.)
4. Теплотехника [Электронный ресурс] : метод. указания к выполнению расчет.-граф. заданий всех форм обучения / Федер. агентство по рыболовству, Мурман. гос. техн. ун-т, Каф. технол. и холодиль. оборудования ; сост. О. А Голубева, А. С. Никонова. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 1.8 Мб). - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2012
5. Теплотехника [Электронный ресурс] : метод. указания к решению задач для всех форм обучения / Федер. агентство по рыболовству, Мурман. гос. техн. ун-т, Каф. технол. и холодиль. оборудования ; сост. О. А Голубева, А. С. Никонова. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 1.2 Мб). - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2012

## Дополнительная литература

6. Комаров, Г. А. Лабораторный практикум по тепло- и хладотехнике : учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлению 552400 "Технология продуктов

общественного питания" и специальностям 271000" Технология рыбы и рыбных продуктов", 170600 "Машины и аппараты пищевых производств", 271300 "Пищевая инженерия малых предприятий", 070200 "Техника и физика низких температур" / Г. А. Комаров, О. А. Голубев; М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВО "Мурман. гос. техн. ун-т". - Мурманск : МГТУ, 2001, 2018. - 139 с. (184 экз.)

7. Краев А.А. Проверочные работы по курсу общей физики. Ч. 1. Физические основы механики. Молекулярная физика. Термодинамика : [сб. задач] для студентов естественно-техн. фак. МГТУ / А. А. Краев; М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ ВО "Мурман. гос. техн. ун-т". - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2000, 2018. - 77 с. (117 экз.)

8. Теплоэнергетические расчеты [Электронный ресурс] : метод. указания для диплом. проектирования студентов специальности 260602.65 "Пищевая инженерия малых предприятий" / Федер. агентство по рыболовству, Мурман. гос. техн. ун-т, Каф. технол. и холодиль. оборудования ; сост. О. А. Голубева. - Электрон. текстовые дан. (1 файл : 780 Кб). - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2012

9. Толтов В.М. Теплотехника : метод. указания к лаб. работам студентов для техн. направлений и специальностей / В. М. Толтов; Федер. агентство по рыболовству, ФГБОУ ВПО "Мурман. гос. техн. ун-т", Каф. энергетики и трансп. - Мурманск : Изд-во МГТУ, 2013. - 107 с. (99 экз.)

10. Цирельман Н.М. Техническая термодинамика: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 352 с. <https://e.lanbook.com/reader/book/107965/#2>

## IV СОДЕРЖАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ТЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

### ТЕМА 1

Термодинамика. Предмет термодинамики. Связь с другими отраслями знаний

#### Целевая установка

В результате изучения данной темы обучающийся должен:

**знать** роль термодинамики в отраслях промышленности, а также современное состояние и направления развития термодинамики;

**уметь** анализировать современное состояние и направления развития термодинамики

#### Методические указания

При изучении материала студенту следует обратить внимание на роль отечественных ученых в развитии термодинамики.

Значение термодинамики для развития исследований термодинамических процессов трудно переоценить. Нет такой области техники, где в той или иной мере не приходилось бы решать теплотехнические вопросы. В металлургии, машиностроении, химической и пищевой промышленности большое значение имеют вопросы подвода, отвода и превращения теплоты, а также вопросы применения машин, работа которых либо непосредственно, либо косвенно связана с протекающими в них тепловыми процессами.

В пищевой промышленности тепловые машины, аппараты и установки используются, например, для получения технологического пара и горячей воды, для выработки тепловой и электрической энергии, для получения искусственного холода и т. д.

При рассмотрении современного состояния и направлений развития термодинамики обучающемуся следует обратить внимание на повышение эффективности использования теплоты

Литература: [1], с. 144; [2], с. 5-6; [5], с. 5-12; [6], с. 4-8; [10], с. 11-16.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Какое значение имеет термодинамика для развития науки и промышленности?
2. Назовите области применения теплоты и холода.
3. Приведите примеры использования в промышленности термодинамических процессов

## ТЕМА 2

### Основные понятия и определения термодинамики.

Термодинамическая система и окружающая среда. Виды термодинамических систем. Термодинамические параметры состояния. Нулевое начало термодинамики. Равновесные и неравновесные системы. Общее уравнение состояния. Понятие термодинамического процесса.  $v$ - $P$ - диаграмма и термодинамические процессы в ней. Уравнение состояния идеальных газов. Удельная и универсальная газовые постоянные. Газовые смеси. Закон Дальтона. Способы задания газовых смесей, их взаимосвязь

### Целевая установка

В результате изучения данной темы обучающийся должен:

**знать** основные термины и определения, применяемые в технической термодинамике, классификацию термодинамических систем и термодинамических процессов идеальных газов, основные термические параметры состояния, уравнения состояния идеальных газов и физический смысл всех входящих в них величин, свойства и способы задания газовых смесей;

**уметь** вычислять значение любого из трех параметров состояния идеального газа по известным двум параметрам для 1 кг и произвольного количества газа, рассчитывать параметры газовых смесей.



## Методические указания

При изучении данной темы необходимо усвоить терминологию и основные понятия, используемые при рассмотрении процессов взаимодействия термодинамической системы и окружающей среды, взаимного превращения теплоты и работы, при вычислении параметров состояния идеального газа и газовых смесей.

Изучая материалы данной темы, следует обратить внимание на принципиальные отличия идеальных газов от реальных. При этом следует иметь в виду, что общее уравнение состояния справедливо как для идеальных, так и для реальных газов. Однако в виду больших трудностей до сих пор не удалось получить универсального уравнения для реальных газов, которое охватывало бы все области изменения их состояний.

Для закрепления изученного материала рекомендуется ответить на вопросы и решить предложенные задачи. При выполнении расчетов следует иметь в виду, что за нормальные условия в технической термодинамике принимаются следующие:  $P_{\text{му}} = 101326 \text{ Па}$ ,  $T_{\text{му}} = 273,15 \text{ К}$ .

Литература: [1], с.145-146; [2], с. 6-18; [3], с. 3-50; [5], с. 5-12; [7], с. 41-49.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что понимают под термодинамической системой? Дайте классификацию термодинамических систем.
2. Назовите основные термодинамические параметры состояния рабочего тела и напишите их размерности.
3. Назовите параметры, входящие в уравнение состояния идеального газа.
4. Объясните физический смысл удельной и универсальной газовых постоянных и напишите их размерности.
5. Напишите уравнение состояния для 1 кг, n кг, 1 кмоль, n кмоль идеального газа.
6. Что такое газовая смесь? В чём сущность закона Дальтона?
7. Как определить среднюю молярную массу и удельную газовую постоянную смеси?
8. Для пуска дизелей используется сжатый воздух. Определить отношение абсолютных давлений в баллоне, если до пуска манометр показывал 5,4 МПа, а после пуска - 2,94 МПа. Давление окружающей среды 742 мм рт. ст. при температуре 293,15 К.
9. В сосуде находится воздух под разрежением 10 кПа при температуре 0 °С. Ртутный барометр показывает 99725 Па при температуре ртути 20 °С. Определить удельный объём воздуха в баллоне при этих условиях.
10. Смесь двух объёмов водорода и одного объёма кислорода называется гремучим газом. Определить газовую постоянную гремучего газа.

### ТЕМА 3

**Основные законы термодинамики.** Первый закон термодинамики. Работа и теплота процесса. Внутренняя энергия системы. Энтальпия. Энтропия. s-T-диаграмма и ее свойства

#### Целевая установка

В результате изучения данной темы обучающийся должен:

**знать** сущность первого закона термодинамики и его основные формулировки, определения внутренней энергии, энтальпии и энтропии, их физический смысл и размерности, тепловую диаграмму и ее свойства;

**уметь** определять работу и теплоту процесса соответственно на v-P- и s-T – диаграммах, рассчитывать удельную работу изменения объема и располагаемую работу в термодинамическом процессе, изменения энтальпии и энтропии в процессе

#### Методические указания

При изучении данной темы следует обратить внимание на различную природу величин  $du$ ,  $di$ , и  $ds$ , с одной стороны, и  $d\theta$ ,  $dl$ ,  $dl'$  - с другой, так как внутренняя энергия, энтальпия и энтропия являются функциями состояния, изменения которых определяются начальным и конечным состояниями рабочего тела независимо от совершающегося при этом процесса. В связи с этим  $du$ ,  $di$ , и  $ds$  представляют собой положительные или отрицательные бесконечно малые изменения соответственно удельной внутренней энергии, удельной энтальпии рабочего тела и удельной энтропии и являются полными дифференциалами. Величины  $\theta$ ,  $l$ ,  $l'$  являются функциями не состояния, а процесса, характер протекания которого определяет их числовые значения. В связи с этим величины  $d\theta$ ,  $dl$  и  $dl'$  представляют собой соответственно бесконечно малые количества удельной теплоты, удельной работы расширения и удельной располагаемой работы, затраченные или полученные в элементарном процессе изменения состояния рабочего тела, т. е. теплота и работа не являются параметрами состояния рабочего тела и не имеют полных дифференциалов.

Успешное освоение данной темы важно, прежде всего, для последующего изучения термодинамических процессов, протекающих в тепловых аппаратах, машинах и установках, понимания сущности процессов при расчете к сравнительной оценке эффективности тепловых агрегатов.

Литература: [1], с.149-158; с. 168-175; [2], с.19-21; [3], с.51-66; [5], с.13-20; [7], с. 50-52; [10], с. 17-31.

## Вопросы и задачи для самопроверки

1. Сформулируйте первый закон термодинамики и напишите его аналитическое выражение.
2. Что такое энтальпия и энтропия? В чём их физический смысл?
3. Энтальпия является функцией состояния или функцией процесса?
4. От каких параметров зависит внутренняя энергия термодинамической системы, энтропия, энтальпия?
5. Что называется равновесным и неравновесным термодинамическим процессом?
6. В каких случаях теплота, работа, изменение внутренней энергии и энтропии считаются положительными, а в каких – отрицательными?
7. Как определить работу процесса на  $s - T$  и  $v - P$ -диаграммах?
8. Как определить теплоту процесса на  $s - T$  и  $v - P$ -диаграммах?
9. Что характеризует коэффициент эквивалентности работы?

## ТЕМА 4

**Теплоемкость.** Уравнение Майера для идеальных и реальных газов. Теплоемкость смеси газов

### Целевая установка

В результате изучения данной темы обучающийся должен:

**знать** определения различных видов теплоёмкости и взаимосвязь между ними;

**уметь** вычислять  $c$  с использованием таблиц средние значения теплоемкостей в заданном интервале температур, находить различные виды теплоёмкости, пользуясь их взаимосвязью

### Методические указания

Для определения количества теплоты необходимо знать теплоемкость рабочего тела, участвующего в термодинамическом процессе. Как известно, **теплоемкость** равна отношению количества теплоты бесконечно малого процесса к изменению температуры рабочего тела в этом процессе, или отношению элементарного количества теплоты, полученного телом при бесконечно малом изменении его состояния, к изменению температуры называется теплоемкостью тела в данном процессе

$$c = dq/dT$$

Поскольку количество теплоты зависит от характера процесса, то и теплоемкость также зависит от условий протекания процессов. Одна и та же термодинамическая система в зависимости от характера процесса обладает различными теплоемкостями, числовое значение которых изменяется в пределах от “ $-\infty$ ”, до “ $+\infty$ ”.

Литература: [1], с.152-154. [2], с.10-13; [3], с.36-50; [6], с.24-34; [7], с. 49; [10], с. 61-73.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Дайте определение теплоёмкости
2. На какие группы и по каким признакам классифицируют теплоёмкость?
3. Как связаны между собой массовая, объёмная и мольная теплоёмкости?
4. Объясните физический смысл величин, входящих в уравнение Майера.
5. Что такое средняя теплоёмкость?
6. Как определить среднюю теплоёмкость в заданном интервале температур, пользуясь таблицами теплоёмкостей?
7. Что такое истинная теплоёмкость?
8. Как, имея график зависимости истинной удельной массовой теплоёмкости от температуры, определить среднее значение указанной теплоёмкости на изучаемом интервале?
9. Определить средние массовую, объёмную и мольную теплоёмкости в процессах при постоянном давлении в интервале температур от 0 °С до 1300 °С для смеси газов, имеющей следующий объёмный состав: CO<sub>2</sub> - 8 %; CO – 2 %; N<sub>2</sub> – 85 %; H<sub>2</sub> – 5 %.
10. Определить среднюю массовую теплоёмкость при постоянном давлении и среднюю объёмную теплоёмкость при постоянном объёме в пределах от 200 до 800 °С для окиси углерода (CO), считая зависимость теплоёмкости от температуры: а) нелинейной; б) линейной.

## ТЕМА 5

### Термодинамические процессы.

Классификация процессов изменения состояния рабочего тела. Общие методы исследования и определения термодинамических параметров тепловых процессов изменения состояния рабочих тел. Изображение процессов в  $v$ - $P$ - и  $s$ - $T$ - диаграммах

### Целевая установка

При изучении этой темы обучающийся должен:

**знать** последовательность анализа термодинамических процессов и расчета параметров изменения состояния рабочего тела, изображения конкретного процесса в  $v$ - $P$  – и  $s$ - $T$ - диаграммах;

**уметь** составлять уравнения процессов, устанавливающих закономерность изменения параметров состояния рабочего тела в процессах,

рассчитывать изменения внутренней энергии, энтальпии, энтропии в любом термодинамическом процессе, вычислять количество подведенной или отведенной теплоты, внешнюю и располагаемую работу в процессе как аналитически, так и по  $v$ - $P$  – и  $s$ - $T$ - диаграммам.

### Методические указания

При изучении термодинамических процессов идеальных газов следует иметь в виду, что во всех процессах, протекающих в одном и том же интервале температур, внутренняя энергия идеального газа изменяется на одно и то же значение и поэтому площадь под изохорным процессом в  $S$ - $T$ - координатах численно равна внутренней энергии любого другого термодинамического процесса, протекающего в том же интервале температур. Если температура рабочего тела в процессе возрастает, то внутренняя энергия увеличивается; если температура снижается, то внутренняя энергия уменьшается.

При изучении изобарных процессов необходимо иметь в виду, что площадь под изобарным процессом в  $S$ - $T$ - координатах численно равна изменению энтальпии. Если учесть, что изменение энтальпии определяется только изменением температуры, то в любых термодинамических процессах, протекающих в одном и том же интервале температур, изменение энтальпии одинаково. Поэтому площадь под изобарным процессом в  $S$  –  $T$ - координатах в заданном интервале температур численно равна изменению энтальпии в любом другом термодинамическом процессе, протекающем в этом же интервале температур. При увеличении температуры рабочего тела изменение энтальпии в процессе будет положительной величиной, при уменьшении температуры – отрицательной.

Изучая материал данной темы, студент должен обратить особое внимание на исследование политропных процессов. Стремление описать разнообразные термодинамические процессы единой простой математической формулой, справедливой для любого рассматриваемого процесса (изохорного, изотермического, изобарного и адиабатического), привело к понятию политропного процесса. Политропный процесс характеризуется одной и той же долей количества подводимой теплоты, расходуемой на изменение внутренней энергии системы, и является обобщающим по отношению к другим термодинамическим процессам. Из уравнения политропного процесса при определенном значении показателя политропы может быть получено уравнение изохоры ( $n = \pm \infty$ ), изобары ( $n = 0$ ), изотермы ( $n = 1$ ) и адиабаты ( $n = k$ ).

Важность изучения термодинамических процессов идеальных газов объясняется тем, что рабочие тела во многих реальных технических устройствах, в том числе в системах теплогазоснабжения, вентиляции, отопления, кондиционирования воздуха, можно с некоторым допущением считать идеальным газом, получая при этом приемлемую точность расчетов.

Литература: [1], с.146-148; [2], с.25-38; [3], с.67-108; [5], с. 21-26.

## Вопросы и задачи для самопроверки

1. Перечислите термодинамические процессы идеальных газов. Дайте им определения.
2. Изобразите все процессы в тепловой и рабочей диаграммах.
3. Напишите уравнения и укажите связь основных параметров в каждом термодинамическом процессе.
4. Напишите формулы для вычисления теплоты, работы, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии для каждого из процессов.
5. В каком процессе вся подведённая теплота идет на увеличение внутренней энергии?
6. В каком термодинамическом процессе работа совершается только за счёт уменьшения внутренней энергии?
7. В чём заключается обобщающее значение политропного процесса?
8. При каких значениях показателя политропы из уравнения политропного процесса можно получить уравнения основных термодинамических процессов?
9. При изотермическом сжатии  $2 \text{ м}^3$  азота с начальным давлением  $0,1 \text{ МПа}$  отводится  $50 \text{ кДж}$  теплоты. Найти конечные объём и давление, затраченную работу.
10. Воздух, объёмом  $5 \text{ м}^3$ , с начальной температурой  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  сжимается по политропе ( $n = 1,25$ ) от абсолютного давления  $0,05 \text{ МПа}$  до давления  $0,5 \text{ МПа}$ . Найти конечные значения температуры и объёма, затраченную работу

## ТЕМА 6

### Обратимые и необратимые процессы.

Второй закон термодинамики. Термодинамические циклы. Термический КПД и холодильный коэффициент. Прямой и обратный циклы Карно и их свойства. Обобщенный цикл. Максимальная работа. Работоспособность системы. Понятие об эксергии. Эксергия потока. Эксергический КПД

### Целевая установка

При изучении этой темы обучающийся должен:

**знать** условия обратимости термодинамических процессов и условия превращения теплоты в работу в тепловых двигателях, прямой и обратный цикл Карно и их свойства, обобщенный цикл в V-P- и S-T- диаграммах, эксергетический метод исследования процессов;

**уметь** вычислять термический КПД цикла Карно.

## Методические указания

При изучении этой темы студенту необходимо обратить особое внимание на то, что термический КПД цикла Карно всегда меньше единицы, не зависит от свойств рабочего тела, определяется только температурами горячего и холодного источников и имеет наибольшее значение по сравнению с термическим КПД любых других циклов. Поэтому никакими новыми конструкциями тепловых двигателей или применением новых рабочих тел нельзя в цикле всю подведенную теплоту превратить в полезную работу, для увеличения термического КПД необходимо стремиться к таким процессам, образующим цикл, чтобы средняя температура подвода теплоты была как можно больше, а средняя температура отвода теплоты как можно меньше.

Рассматривая эксергетический метод исследования, студент должен четко усвоить, что в общем случае эксергией называется удельная работоспособность теплоты, или потока рабочего тела, в обратимом термодинамическом процессе изменения состояния системы от начальных параметров ее состояния до постоянных параметров внешней среды. Эксергетический анализ удобен при исследовании сложных технических устройств, в которых используется энергия в различных формах, - работа, теплота, энергия химических превращений и т. д.

Литература: [1], с.146-148, с. 159-167, с. 176-180; [2], с.20-24, с.39-62; [3], с.109-164; [4], с.5-30; [5], с. 22-32; [7], с. 53-56; [10], с. 36-47, с. 164-174.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Какой процесс называется обратимым, а какой необратимым? Дайте им определения, приведите примеры.
2. Какой термодинамический цикл называется прямым, а какой обратным?
3. Из каких термодинамических процессов состоит прямой, обратный и регенеративный циклы Карно?
4. Для чего служат тепловые машины, работающие по прямому и обратному циклам?
5. Сформулируйте второй закон термодинамики.
6. Для обратимого или необратимого цикла термический КПД будет меньше? Почему?
7. Как получить максимальную полезную работу термодинамического цикла?
8. Что такое эксергия? Что характеризует эксергетический КПД?
9. Определить термический КПД кругового процесса, если газ в этом процессе получает 160 кДж теплоты и совершает при этом работу, равную 68 кДж.
10. Идеальный двигатель работает по циклу Карно в пределах температур от 873 до 300 К. При этом воздух массой 1 кг изотермически расширяется в пять

раз. Определить количество подведённой и отведённой теплоты, полезную работу и термический КПД цикла.

## ТЕМА 7

### Термодинамические процессы реальных газов.

Реальные газы и пары. Свойства реальных газов. Коэффициент сжимаемости. Уравнение Ван-дер-Ваальса.

Фазовые переходы веществ. Фазовая диаграмма вещества.

Водяной пар. Процессы парообразования, конденсации и перегрева пара. Определение параметров воды и водяного пара.  $v$ - $P$ - и  $s$ - $T$ - диаграммы водяного пара.  $s$ - $i$ - диаграмма

### Целевая установка

При изучении этой темы обучающийся должен:

**знать** принципиальные отличия реальных газов и паров от идеальных, фазовые переходы веществ, процессы парообразования и конденсации;

**уметь** вычислять параметры состояния воды и водяного пара с использованием таблиц и диаграмм в  $v$ - $P$ ,  $s$ - $T$ ,  $s$ - $i$  –координатах.

### Методические указания

Приступая к изучению этой темы, обучающийся должен четко уяснить, что расчетные формулы, применявшиеся при изучении идеальных газов, в данном случае, как правило, недействительны и только при очень низких давлениях и высоких температурах реальные газы по своим свойствам приближаются к идеальным.

При рассмотрении отдельных уравнений реального газа (уравнение Ван – дер – Ваальса, уравнение Вакуловича – Новикова и др.) необходимо ясно представлять, на каких физических принципах строятся эти уравнения и как из них получаются уравнения состояния идеальных газов.

Изучая диаграммы воды и водяного пара в  $v$ - $P$ ,  $s$ - $T$  и  $s$ - $i$  координатах, необходимо разобраться в возможностях применения той или иной диаграммы для практических расчетов параметров состояния воды, влажного насыщенного, сухого насыщенного и перегретого пара.

Литература: [1], с.181-191; [2], с.61-73; [3], с.170-208; [5], с. 33 – 37; [6], с. 35-60; [7], с. 60-62; [10], с. 127-143.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Дайте определение процессов кипения, испарения, парообразования и конденсации.



2. Какой пар называется сухим насыщенным, влажным насыщенным, перегретым?
3. Как изменяется теплота парообразования при изменении давления?
4. Какие параметры характеризуют состояние влажного, сухого и перегретого пара?
5. Покажите на  $v$ - $P$ ,  $s$ - $T$ ,  $s$ - $i$  диаграммах воды и водяного пара характерные области и линии фазовых переходов.
6. Покажите на  $v$ - $P$ ,  $s$ - $T$ ,  $s$ - $i$  диаграммах воды и водяного пара удельную теплоту парообразования.
7. Напишите формулы для вычисления удельного объёма, энтропии, энтальпии и внутренней энергии влажного водяного пара.
8. Изобразите на фазовой диаграмме вещества процессы сублимации и конденсации
9. Что такое тройная точка?
10. Чем отличается  $s$ - $i$ - диаграмма от других тепловых диаграмм?

## ТЕМА 8

### Дросселирование газов и паров.

Эффект Джоуля- Томсона. Изменение параметров потока при дросселировании. Кривые инверсии. Их свойства

### Целевая установка.

В результате изучения данной темы обучающийся должен:

**знать** принципиальную разницу между адиабатным дросселированием и адиабатным обратимым процессом расширения, примеры практического использования эффекта дросселирования;

**уметь** строить процессы дросселирования в  $i - \lg P$ ,  $s - T$  и  $s - i$ -координатах.

### Методические указания

При изучении данной темы обучающемуся следует особое внимание уделить процессам дросселирования, которые широко используются для понижения температуры сжиженных паров хладагентов в парокомпрессионных холодильных установках. При этом необходимо понять смысл температуры инверсии и инверсионной кривой. Последняя делит всю область диаграммы изменения температуры вещества от давления на две части. Область внутри кривой инверсии имеет положительное значение коэффициента дросселирования, и процесс адиабатного дросселирования сопровождается охлаждением вещества. Такие процессы используют для получения низких и криогенных температур путем применения в схемах холодильных машин регулируемых клапанов или дроссельных вентилялей.

Литература: [3], с.209-229; [9], с.39-46; [10], с.118-126.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Дайте определение процесса дросселирования.
2. Опишите процесс дросселирования газов и паров.
3. В чём особенность адиабатного дросселирования?
4. Приведите примеры положительного и отрицательного дроссельного эффекта.
5. Как изменяются параметры потока при дросселировании?
6. Изобразите изменение параметров потока при дросселировании
7. Что такое инверсия газа?
8. Что называется коэффициентом дросселирования?
9. В каком диапазоне изменяется коэффициент дросселирования?
10. Где применяется положительный эффект Джоуля-Томсона.

## ТЕМА 9

### Влажный воздух.

Основные определения.  $d-i$ - диаграмма. Её свойства. Определение параметров состояния влажного воздуха в технологических процессах с использованием  $d-i$ - диаграммы

### Целевая установка

В результате изучения данной темы обучающийся должен:

**знать** основные свойства влажного воздуха и процессы, происходящие с ним;

**уметь** вычислять параметры состояния влажного воздуха с использованием таблиц и диаграммы  $d-i$ , строить процессы изменения состояния влажного воздуха в диаграмме Рамзина

### Методические указания

Влажный воздух, представляющий собой смесь сухого воздуха с водяным паром, широко используется в технологических процессах обработки пищевой продукция и в качестве рабочего тела теплоэнергетических машин.

Водяной пар во влажном воздухе может находиться в насыщенном или перегретом состоянии. Смесь сухого воздуха и насыщенного водяного пара называют насыщенным влажным воздухом. Если в воздухе содержится перегретый пар, то влажный воздух получается ненасыщенным.

Рассматривая изменение параметров состояния влажного воздуха в  $d-i$  – диаграмме, следует ясно представлять, почему процессы нагревания и охлаждения влажного воздуха протекают при постоянном влагосодержании, а процессы сушки в идеальной сушильной установке - при неизменной энтальпии.

Литература: [2], с.80-93; [3], с.280-295; [5], с.38-84; [6], с.48-59.

### Вопросы и задачи для самопроверки

1. Дайте определение влажного воздуха
2. Что называется абсолютной и относительной влажностью?
3. Что такое точка росы?
4. Опишите диаграмму Рамзина для влажного воздуха.
5. Какое минимальное количество параметров необходимо знать для построения рабочей точки, характеризующей состояние ненасыщенного влажного воздуха?
6. Какое минимальное количество параметров необходимо знать для построения рабочей точки, характеризующей состояние насыщенного влажного воздуха?
7. Покажите на  $d-i$  – диаграмме изображение основных процессов изменения состояния влажного воздуха.
8. Как определить состояние влажного воздуха с помощью  $d-i$  – диаграммы, если известны показания сухого и мокрого термометров психрометра?
9. В сушилку помещён материал, от которого необходимо отвести 3000 кг воды. Температура наружного воздуха  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  при относительной влажности 0,4. Перед входом в сушилку воздух подогревается в калорифере и входит в неё при температуре  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности 0,85. Определить количество воздуха, которое необходимо пропустить через сушилку.
10. Чем отличается реальная сушилка от идеальной?

## ТЕМА 10

### Прикладные вопросы термодинамики

Сжатие газов. Процессы сжатия в одно- и многоступенчатых компрессорах. Работа в двухступенчатых компрессорах при различных процессах сжатия.

Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объёме и при постоянном давлении. Обобщённый термодинамический цикл тепловых двигателей. Его основные параметры. Способы повышения термического КПД тепловых двигателей.

Термодинамические циклы тепловых установок. ГТУ. Принципы работы ГТУ. Термодинамические циклы ГТУ. Характеристики циклов ГТУ

Паросиловая установка. Принцип её работы. Изображение теоретического цикла паросиловой установки в  $v$ - $P$ -,  $s$ - $T$ - и  $s$ - $i$  диаграммах. Термический КПД цикла паросиловой установки.

Промышленная теплоэнергетика. Топливо. Энергетическое топливо. Виды и назначение топлив. Элементарный состав топлива. Теплотехнические

характеристики топлив. Мероприятия по экономии топлива и тепловой энергии на предприятиях пищевой промышленности. Классификация вторичных энергоресурсов. Защита атмосферы от вредных выбросов энергетических установок.

### Целевая установка

При изучении этой темы обучающийся должен:

**знать** схему паросиловой установки и назначение ее функциональных элементов, изображение цикла Ренкина с перегревом пара, теплофикационного и бинарного циклов, способы повышения термического КПД паросиловых установок;

**уметь** рассчитывать термический КПД цикла Ренкина с перегревом пара, определять графоаналитическим методом количества подведенной и отведенной теплоты, работу расширения пара в турбине, затраченную работу в насосе.

### Методические указания

При рассмотрении термодинамических циклов паросиловых установок следует иметь в виду, что для цикла Карно не применяется, так как высокая конечная влажность пара в этом цикле при адиабатном расширении создает крайне неблагоприятные гидродинамические условия работы двигателя, в котором реализовался бы цикл Карно. Кроме того, компрессор, сжимающий насыщенный пар до его полной конденсации, имел бы большие габариты из-за больших объемов пара, работа, затрачиваемая на сжатие, была бы слишком велика, а гидродинамические условия работы компрессора были бы крайне тяжелыми.

Изучая цикл Ренкина, обучающийся должен обратить внимание на процесс расширения пара в турбине, который в действительном цикле является необратимым вследствие трения и внутренних потерь, этот процесс сопровождается увеличением энтропии. Необратимость процесса расширения пара снижает мощность турбины, и это необходимо учитывать в тепловых расчетах.

При рассмотрении способов повышения термического КПД паросиловой установки студент должен проанализировать: влияние на термический КПД начальных параметров пара и давления в конденсаторе; применение регенеративного и бинарного циклов; использование перегрева пара.

При изучении идеальных термодинамических циклов газовых тепловых двигателей следует обратить внимание на большую скорость протекания процессов, в связи с чем процессы расширения и сжатия, поршневых ДВС и ГТУ можно принять адиабатными. В газотурбинных установках осуществляется расширение газа до давления окружающей среды, поэтому процесс отвода теплоты принимается изобарным. В поршневых двигателях газы выбрасываются из камеры сгорания с давлением, превышающим атмосферное от двух до четырёх раз, поэтому процесс отвода теплоты принимается изохорным.

При сравнительной оценке эффективности циклов тепловых двигателей необходимо рассмотреть два способа оценки: 1) сравнение термодинамических циклов с прямым циклом Карно, который имел бы те же температуры горячего и холодного источников, что и рассматриваемые циклы; 2) сравнение рассматриваемых циклов при реализации различных способов подвода и отвода теплоты при прочих одинаковых условиях.

Литература: [2], с.112-203; [8], с.4-39; [10], с.215-246, с. 175-203.

### **Вопросы и задачи для самопроверки**

1. Почему для нормальной работы паросиловой установки требуется пар с высокой степенью сухости?
2. Для чего применяется вторичный перегрев пара?
3. Каковы функции конденсатора в схеме паросиловой установки?
4. Чем оценивается степень совершенства теплофикационного цикла?
5. Как изображается работа насоса в V-P диаграмме для цикла Ренкина и цикла Карно?
6. Опишите способы повышения термического КПД паросиловой установки.
7. Нарисуйте в V – P и S –T диаграммах обобщённый цикл ДВС. Какие параметры его характеризуют?
8. Проанализируйте влияние степени сжатия на термический КПД тепловых двигателей?
9. В чём преимущества и недостатки газотурбинной установки по сравнению с поршневым двигателем внутреннего сгорания?
10. Чем ограничивается степень сжатия у различных типов поршневых двигателей?
11. Какие применяются методы сравнительной оценки эффективности циклов тепловых двигателей? В чём их сущность?