

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Хоменко Елена Семеновна **Министерство образования и науки Республики Саха (Якутия)**

Должность: исполняющая обязанности заведующей филиалом, начальник отдела
ГБПОУ РС (Я) «Ленский технологический техникум»

учебно-производственной работы

Дата подписания: 03.11.2023 04:43:12

филиал «Пеледуйский»

Уникальный программный ключ:

03c04d4933a2307f9c20d0107fe3c7a0c84980be

Методические рекомендации по выполнению практических работ
по учебной дисциплине ОП.08 «Техническая термодинамика и теплопередача»
для студентов очного отделения среднего профессионального образования
по профессии 26.02.03 «Судовождение»

Фонд оценочных средств по дисциплине ОП.08 «Техническая термодинамика и теплопередача», разработан в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта. Основной профессиональной образовательной программы по специальности среднего профессионального образования 26.02.03 Судовождение и на основании Положения об организации практической работы в техникуме и методических рекомендаций по формированию фонда оценочных средств организации практической работы в условиях реализации ФГОС, утвержденных Методическим советом ГБПОУ РС (Я) «Ленский технологический техникум» филиал «Пеледуйский».

Организация-разработчик:

Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение Республики Саха (Якутия) «Ленский технологический техникум» филиал «Пеледуйский»

Разработчик: Филимонов Д.Б., мастер производственного обучения

Рассмотрена и рекомендована предметно – цикловой комиссией филиала «Пеледуйский»

Протокол № 2 «27» сентября 2023г.

Председатель ПЦК  /Вавилова Е.Ю. /

Методические рекомендации по дисциплине ОП.08 «Техническая термодинамика и теплопередача» по выполнению практических работ созданы в помощь для работы на занятиях, подготовки к практическим работам. Приступая к выполнению практической работы, студенты должны внимательно прочитать цель и задачи занятия, ознакомиться с требованиями к уровню подготовки в соответствии с ФГОС, краткими теоретическими и учебно-методическими материалами по теме практической работы ответить на вопросы для закрепления теоретического материала.

Все задания к практической работе необходимо выполнять в соответствии с инструкцией, анализировать полученные в ходе занятия результаты по приведенной методике.

Наличие положительной оценки по практическим работам необходимо для получения зачета по дисциплине ОП.08 «Техническая термодинамика и теплопередача», поэтому в случае отсутствия на уроке по любой причине или получения неудовлетворительной оценки за практическую работу необходимо найти время для ее выполнения.

СОДЕРЖАНИЕ

Название практических работ	Страницы
Определение основных параметров состояния газа, используя единицы измерений в системе СИ	6
Решение задач по теме Теплоемкость	3
Исследование газовых термодинамических процессов	7
Исследование цикла Карно теплового двигателя	9
Исследование цикла ГТУ при подводе теплоты при постоянном давлении	12
Исследование цикла Дизеля	14
Исследование цикла Ренкина.	17

Раздел 1. Законы газов и жидкостей. Основные параметры состояния.

Тема 1.1. Общие законы статики газов и жидкостей. Законы идеальных газов

Название практического занятия: Определение основных параметров состояния газа, используя единицы измерений в системе СИ

Учебная цель: Ознакомиться с основными параметрами состояния газа и единицами измерения системы СИ

Учебные задачи:

1. Ознакомиться с каждым параметром и как они зависят друг от друга.
2. Ознакомиться с единицами измерения основных параметров.

Требования к результатам усвоения учебной дисциплины:

Студент должен

уметь:

- определять основные параметры состояния газа используя формулы;
- пользоваться термодинамическими таблицами..

знать:

- параметры состояния газа;
- единицы в которых они измеряются в системе СИ.

Задачи практического занятия:

1. Получить представление о идеальном и реальном газах.
2. Получить представление о параметрах состояния газа.

Обеспеченность занятия:

1. Учебно-методическая литература:
 - Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача . — М.: Юрайт, 2018.-442 с.
 - Ерофеев, В. Л. Теплотехника . Термодинамика и теория теплообмена . — М.: Юрайт, 2017.-308 с.

Технические средства обучения:

- Мультимедийный проектор;
 - Ноутбук.
2. Рабочая тетрадь (*обычная в клетку*).
 3. Раздаточные материалы
 - термодинамические таблицы..
 4. Ручка.
 5. Карандаш простой

Краткие теоретические и учебно-методические материалы по теме практического занятия:

Расчет параметров и процессов идеального газа

Основными параметрами состояния являются: удельный объем, абсолютная температура, абсолютное давление.

Удельный объем v , м³/кг:

$$v = V/m = 1/\rho,$$

где V , м³ – объем, m , кг – масса, ρ , кг/м³ – плотность.

Абсолютная температура T , К:

$$T = 273,15 + t.$$

Абсолютное давление p , Па:

$$p = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}},$$

$$p = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}.$$

где: $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление,

$p_{\text{изб}}$ – избыточное давление,

$p_{\text{вак}}$ – вакуумное давление.

Связь между единицами измерения:

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; \quad 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па},$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 100 \text{ кПа},$$

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98000 \text{ Па} = 98 \text{ кПа},$$

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}.$$

Вопросы для закрепления теоретического материала к практическому занятию:

1. Какими параметрами характеризуется газ.
2. Дать определение давления.
3. Дать определение температуре
4. В каких единицах измеряется давление.
5. В каких единицах измеряется температура.
6. Дать определение удельного объема.
7. В каких единицах измеряется удельный объем.

Задания для практического занятия:

1. Изучить методы расчета и определения по термодинамическим таблицам основных параметров состояния газа..

Инструкция по выполнению практической работы:

1. Ознакомится с понятиями термодинамические параметры с использованием литературы.
2. Ознакомится с методами расчета параметров состояния газа
3. Решить задачи по теме.

Методика анализа и оценка результатов, полученных в ходе практического занятия

1. Полнота ответов на поставленные вопросы.
2. Решить задачу по теме
3. Умение пользоваться таблицами.
4. По результатам занятия сформулируйте вывод.
5. Оценка ставится общая, объективно по всем пунктам.

Порядок выполнения отчета по практическому занятию

1. Ответить на полученные вопросы
2. Решить задачу.

Раздел 1. Законы газов и жидкостей. Основные параметры состояния.

Тема 1.2. Теплоемкость газов.

Название практического занятия: Решение задач по теме.

Учебная цель:

Учебные задачи:

1. Ознакомится с каждым параметром и как они зависят друг от друга.
2. Ознакомится с единицами измерения основных параметров.

Требования к результатам усвоения учебной дисциплины:

Студент должен

уметь:

- определять основные параметры состояния газа используя формулы;
- пользоваться термодинамическими таблицами..

знать:

- параметры состояния газа;
- единицы в которых они измеряются в системе СИ.

Задачи практического занятия:

3. Получить представление о идеальном и реальном газах.
4. Получить представление о параметрах состояния газа.

Обеспеченность занятия:

6. Учебно-методическая литература:

- Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача . — М.: Юрайт, 2018.-442 с.
- Ерофеев, В. Л. Теплотехника . Термодинамика и теория теплообмена . — М.: Юрайт, 2017.- 308 с.

Технические средства обучения:

- Мультимедийный проектор;
 - Ноутбук.
7. Рабочая тетрадь(обычная в клетку).
8. Раздаточные материалы
- термодинамические таблицы..
9. Ручка.
10. Карандаш простой

Краткие теоретические и учебно-методические материалы по теме практического занятия

1.4 Теплоемкость газов

Теплоемкостью называют количество тепла, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какойлибо его количественной единицы на 1 °С. В зависимости от выбранной количественной единицы различают **мольную** теплоемкость [c_{μ} - Дж/(кмоль·К)], **массовую** теплоемкость [C - Дж/(кг·К)] и **объемную** теплоемкость [C' - Дж/(м³·К)]. Принято относить 1 м³ газа к нормальным условиям, поэтому в дальнейшем изложении объемная теплоемкость будет относиться к массе газа, заключенной в 1 м³ его, при нормальных условиях.

Пересчет джоулей в калории и обратно производится по соотношениям:

$$1 \text{ кал} = 4,1868 \text{ Дж}; 1 \text{ Дж} = 0,239 \text{ кал.}$$

Для определения значений перечисленных выше теплоемкостей достаточно знать величину одной какой-либо из них. Пересчет производится по следующим формулам:

$$C = \frac{c_{\mu}}{\mu} \quad (33)$$

$$C' = \frac{c_{\mu}}{22.4} \quad (34)$$

$$C' = C \rho_{\text{H}} \quad (35)$$

где μ - молекулярная масса газа, кг/кмоль;

ρ_{H} - плотность газа при нормальных условиях, кг/м³.

Теплоемкость газа зависит от его температуры. По этому признаку различают среднюю и истинную теплоемкость:

$$C = \frac{q}{t_2 - t_1} \quad 36$$

$$C = \frac{dq}{dt} \quad (37)$$

где C - средняя теплоемкость в пределах $t_1 - t_2$;

C – истинная теплоемкость;

q — количество тепла, сообщаемого единице количества газа (или отнимаемого от него) при изменении температуры газа от t_1 до t_2 .

Теплоемкость идеальных газов зависит не только от их температуры, но и от их атомности и характера процесса.

Теплоемкость реальных газов зависит от их природных свойств, характера процесса, температуры и давления. Таким образом, различают **истинную и среднюю теплоемкости**:

- а) мольную — при постоянном объеме ($C_{\mu v}$ и $\overline{C_{\mu v}}$) и постоянном давлении ($C_{\mu p}$ и $\overline{C_{\mu p}}$);
- б) массовую — при постоянном объеме (C_v и $\overline{C_v}$) и постоянном давлении (C_p и $\overline{C_p}$);
- в) объемную — при постоянном объеме (C'_v и $\overline{C'_v}$) и постоянном давлении (C'_p и $\overline{C'_p}$).

Между теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме существуют следующие зависимости:

$$C_p = C_v + R; \quad \frac{C_p}{C_v} = k \quad (38)$$

где k – **показатель адиабаты**, зависит от атомности молекул, для одноатомных газов $k = 1,67$ для двухатомных газов $k = 1,4$; для трех- и многоатомных газов $k = 1,33$.

Зависимость теплоемкости газов от температуры имеет криволинейный характер. В приложении Б приведены величины теплоемкостей для наиболее часто встречающихся в теплотехнических расчетах в интервале температур от 0°C до t . Расчеты средней теплоемкости в интервале температур от t_1 до t_2 производят по следующей формуле:

$$\overline{C}_{t_1}^{t_2} = \frac{C_0^{t_1} \cdot t_2 - C_0^{t_2} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (39)$$

где C_0 - теплоемкость газа в интервале от 0°C до t , значения берутся из таблиц Б.1-Б.6, в необходимых случаях производится интерполирование.

Для вычисления количества тепла, которое необходимо затратить в процессе нагревания m кг или V_n м³ газа в интервале температур от t_1 до t_2 , при постоянном объеме Q_v или постоянном давлении Q_p пользуются формулами:

$$Q_v = m (\overline{C}_{v0}^{t_2} t_2 - \overline{C}_{v0}^{t_1} t_1) = V_n (\overline{C}_{v0}^{t_2} t_2 - \overline{C}_{v0}^{t_1} t_1) \quad (40)$$

$$Q_p = m (\overline{C}_{p0}^{t_2} t_2 - \overline{C}_{p0}^{t_1} t_1) = V_n (\overline{C}_{p0}^{t_2} t_2 - \overline{C}_{p0}^{t_1} t_1) \quad (41)$$

Часто в теплотехнических расчетах нелинейную зависимость теплоемкости от температуры заменяют близкой к ней линейной зависимостью. В этом случае истинная теплоемкость определяется из уравнения

$$C = a + b t, \quad (42)$$

а для определения средней теплоемкости при изменении температуры от t_1 до t_2 пользуются уравнением

$$C = a + b \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (43)$$

где a и b — постоянные для данного газа (приложение В).

Для средней теплоемкости в пределах от 0°C до t эта формула принимает вид

$$C = a + \frac{b}{2} t \quad (44)$$

Для приближенных расчетов можно пользоваться следующими формулами:

$$C_v = \frac{R}{k-1}; \quad C_p = \frac{Rk}{k-1} \quad (45)$$

Примеры решения задач

Определить значение объемной теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая $C = \text{const}$.

Решение:

Массовую теплоемкость можно рассчитать по уравнению (45).

Показатель адиабаты для двухатомных газов равен 1,4. Газовая постоянная для кислорода приведена в приложении А.

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{259,8}{1,4-1} = 694,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$C_p = \frac{Rk}{k-1} = \frac{259,8 \cdot 1,4}{1,4-1} = 909,3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Для пересчета массовой теплоемкости в объемную необходимо знать плотность газа (см. приложение А):

$$C'_v = C_v \rho_H = 694,5 \cdot 1,429 = 928,1 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$$

$$C'_p = C_p \rho_H = 909,3 \cdot 1,429 = 928,1 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$$

Вычислить среднюю массовую и объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме для интервала температур от 0 до 12000С, если известно, что средняя молярная теплоемкость окиси углерода при постоянном давлении в этом интервале температур равна 32,192 кДж/(кмоль·К).

Решение:

На основании формулы (33) определим среднюю массовую теплоемкость окиси углерода при постоянном давлении:

$$C = \frac{C_\mu}{\mu} = \frac{32192}{28} = 1149,7 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Среднюю массовую теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме определяем по уравнению (38):

$$C_p = C_v + R = 1149,7 - 296,8 = 852,9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Среднюю объемную теплоемкость окиси углерода при постоянном объеме определяем по уравнению (35):

$$C' = C_p \rho_H = 852,9 \cdot 1,25 = 1066,1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Вычислить среднюю теплоемкость для воздуха при постоянном давлении в пределах 200-800 °С [в кДж/(кг·К)], считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Решение:

Среднюю теплоемкость для воздуха при постоянном давлении в пределах 200-800 °С можно рассчитать по уравнению (39). Пользуясь табл. Б.3, получаем для воздуха:

$$\overline{C}_{p_0}^{800} = 1,0710 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad \overline{C}_{p_0}^{200} = 1,0115 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Отсюда

$$\overline{C}_{p_{200}}^{800} = \frac{1,0710 \cdot 800 - 1,0115 \cdot 200}{800 - 200} = 1,091 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Решить предыдущую задачу, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Решение:

Средняя массовая теплоемкость для воздуха определяется из выражения (табл. В.1)

$$\overline{C_p} = 0,9952 + 0,00009349 \cdot t_1 - t_2/2 = 1,0419 \text{ кДж/(кг К)} .$$

Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном давлении для кислорода в пределах 350 – 1000 °С:

а) считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной;

б) считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Решение:

а) Исходя из уравнения (39) и данных табл. Б.3 определяем:

$$\overline{C_{p350}^{1000}} = \frac{1,035 \cdot 1000 - 0,9576 \cdot 350}{1000 - 350} = 1,077 \text{ кДж/(кг К)} .$$

б) Пользуясь формулой (43) и данными табл. В.1, получаем:

$$\overline{C_{p350}^{1000}} = 0,9127 + 0,00012724 \frac{350+1000}{2} = 0,9986 \text{ кДж/(кг · К)} .$$

Воздух в количестве 6 м³ при давлении 3 бар и температуре 25 °С нагревается при постоянном давлении до 130 °С. Определить количество подведенного к воздуху тепла, считая $C = \text{const}$.

Решение:

Количество теплоты можно определить по уравнению (41). Для этого необходимо вычислить массу и теплоемкость воздуха. Массу газа определяем по уравнению (15)

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 6}{287 \cdot 298} = 21 \text{ кг} .$$

На основании формулы (45) и данных приложения А имеем:

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287 \cdot 1,4}{1,4-1} = 1004,5 \text{ Дж/(кг К)} .$$

Следовательно,

$$Q_p = m C_p (t_2 - t_1) = 21 \cdot 1004,5 \cdot (130 - 25) = 2,2 \text{ МДж} .$$

В закрытом сосуде объемом 300 л находится воздух при давлении 8 бар и температуре 20 °С. Какое количество тепла необходимо подвести для того, чтобы температура воздуха поднялась до 120 °С? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной, а также учитывая зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, получаемую в первом случае.

Решение:

Пользуясь уравнением состояния (15), определяем массу воздуха, находящегося в сосуде:

$$m = \frac{VP}{RT} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 0,3}{287 \cdot 293} = 1,07 \text{ кг} .$$

Для воздуха (двухатомный газ), считая теплоемкость величиной постоянной, имеем:

$$C_v = \frac{R}{k-1} = \frac{287}{1,4-1} = 717,5 \text{ Дж/(кг · К)} .$$

Количество подведенного тепла согласно уравнению (40)

$$Q = m C_v (t_2 - t_1) = 1,07 \cdot 717,5 \cdot 100 = 76772 \text{ Дж} .$$

Теплоемкость воздуха с учетом ее зависимости от температуры определяем из табл. В.1. Пользуясь интерполяцией, находим:

$$C = 0,7209 \text{ кДж/(кг × К)} .$$

Относительная ошибка, следовательно, равна:

$$\frac{0,7209 - 0,7175}{0,7209} = 0,6\%$$

Незначительная величина ошибки объясняется малым интервалом температур. При большой разности температур относительная ошибка может достигнуть весьма большой величины.

В сосуде объемом 300 л находится кислород при давлении 2 бар и температуре 20 °С. Какое количество тепла необходимо подвести, чтобы температура кислорода повысилась до 300 °С? Какое давление установится при этом в сосуде? Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

Решение:

Количество тепла, сообщаемое газу при $v = \text{const}$, определяется на основании формулы (40). Объем газа, заключенного в сосуде, приведенный к нормальным условиям, определяется по уравнению (21):

$$V_H = \frac{pVT_H}{p_H T} = \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 373}{1,013 \cdot 293} = 0,552 \text{ м}^3.$$

Значения теплоемкостей определяем по табл. Б.6 и, следовательно,

$$Q = 0,552 \times (0,9852 \times 300 - 0,9374 \times 20) = 152,8 \text{ кДж}.$$

Конечное давление можно определить, если воспользоваться характеристическими уравнениями для начального и конечного состояний кислорода:

$$P_1 v = R T_1; \quad P_2 v = R T_2.$$

Следовательно,

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = 2 \frac{573}{293} = 3,9 \text{ бара}.$$

Задачи

Определить значение массовой теплоемкости кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая $C = \text{const}$.

$$\text{Ответ: } C_p = 0,916 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$C_v = 0,654 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Определить среднюю массовую теплоемкость углекислого газа при постоянном давлении в пределах 0 – 825 °С, считая зависимость от температуры нелинейной.

$$\text{Ответ: } \overline{C}_{p0}^{825} = 1,090 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Вычислить значение истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении для температуры 1000 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной. Определить относительную ошибку по сравнению с табличными данными.

$$\text{Ответ: } C_{\mu p} = 36,55 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}); \quad \varepsilon = 1,79\%.$$

Найти среднюю теплоемкость C_p и C'_v в пределах от 200 °С до 800 °С для СО, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

$$\text{Ответ: } C_p = 1,1216 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$C'_v = 1,0371 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Вопросы для закрепления теоретического материала к практическому занятию:

8. Какими параметрами характеризуется газ.
9. Дать определение давления.
10. Дать определение температуре
11. В каких единицах измеряется давление.
12. В каких единицах измеряется температура.
13. Дать определение удельного объема.
14. В каких единицах измеряется удельный объем.

Задания для практического занятия:

2. Изучить методы расчета и определения по термодинамическим таблицам основных параметров состояния газа..

Инструкция по выполнению практической работы:

4. Ознакомится с понятиями термодинамические параметры с использованием литературы.
5. Ознакомится с методами расчета параметров состояния газа
6. Решить задачи по теме.

Методика анализа и оценка результатов, полученных в ходе практического занятия

6. Полнота ответов на поставленные вопросы.
7. Решить задачу по теме
8. Умение пользоваться таблицами.
9. По результатам занятия сформулируйте вывод.
10. Оценка ставится общая, объективно по всем пунктам.

Порядок выполнения отчета по практическому занятию

3. Ответить на полученные вопросы
4. Решить задачу.

Раздел 2. Законы термодинамики.

Тема 2.2. Термодинамические процессы газов

Название практического занятия: Исследование газовых термодинамических процессов

Учебная цель: Ознакомиться с пятью газовыми термодинамическими процессами.

Учебные задачи:

1. Ознакомится со связью основных параметров в процессах.
2. Ознакомится с графическим изображением процессов в p - v и T -скоординатах..

Требования к результатам усвоения учебной дисциплины:

Студент должен

уметь:

- анализировать газовые термодинамические процессы;
- читать графические изображения процессов..

знать:

- особенности каждого газового термодинамического процесса;.

Задачи практического занятия:

1. Получить представление о пяти газовых термодинамических процессах.
2. Получить представление связях между основными параметрами в процессах.
3. Научиться читать графические изображения процессов.

Обеспеченность занятия:

1. Учебно-методическая литература:

- Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача . — М.: Юрайт, 2018.-442 с.
- Ерофеев, В. Л. Теплотехника . Термодинамика и теория теплообмена . — М.: Юрайт, 2017.- 308 с.

Технические средства обучения:

- Мультимедийный проектор;
- Ноутбук.
- 2. Рабочая тетрадь(обычная в клетку).

3. Раздаточные материалы
- термодинамические таблицы...
4. Ручка.
5. Карандаш простой

Краткие теоретические и учебно-методические материалы по теме практического занятия:

В технической термодинамике рассматривают следующие основные термодинамические процессы:

- изохорный* – при постоянном объеме ($v = \text{const}$),
- изобарный* - при постоянном давлении ($p = \text{const}$),
- изотермический* – при постоянной температуре ($T = \text{const}$),
- адиабатный* – без внешнего теплообмена ($\delta q = 0$),
- политропный* – при постоянной теплоемкости.

Характеристики, относящиеся к 1 кг вещества, называются удельными, они обозначаются строчными буквами, а характеристики, относящиеся к полной массе – заглавными. Полные характеристики получаются умножением удельных на величину массы:

$$Q = m \cdot q, L = m \cdot \ell.$$

Уравнение состояния идеального газа:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad \text{для 1 кг идеального газа;}$$

$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$ при расчетах с произвольной массой m ,
где R , Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная (таблица 1 Приложения).

$$R = R_{\mu} / \mu = 8,31451 \cdot 10^3 / \mu.$$

1 закон термодинамики:

$$q = \Delta u + \ell.$$

В таблице 1 приведены формулы для расчета процессов.

Таблица 1.

Процесс	Связь параметров	Работа изменения объема	Теплота
Изохорный	$p_2/p_1 = T_2/T_1$	$\ell = 0$	$q = c_v (T_2 - T_1)$
Изобарный	$v_2/v_1 = T_2/T_1$	$\ell = p (v_2 - v_1)$	$q = c_p (T_2 - T_1)$
Изотермический	$p_2/p_1 = v_1/v_2$	$\ell = RT \ln (v_2/v_1)$ $\ell = RT \ln (p_1/p_2)$	$q = \ell$
Адиабатный	$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^k$ $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1}$ $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k}$	$\ell = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$	$q = 0$

Поли тропны й	$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n$ $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}$ $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(n-1)/n}$	$\ell = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2)$	$q = c_v \frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1)$
---------------------	---	-----------------------------------	--------------------------------------

Изменение внутренней энергии идеального газа в термодинамическом процессе:

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1).$$

Изменение энтальпии идеального газа в термодинамическом процессе:

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1).$$

Массовые теплоемкости идеального газа c_p и c_v можно определить по формулам:

$$c_p = k \cdot R / (k-1); \quad c_v = R / (k-1),$$

или как отношение мольной теплоёмкости газов к молекулярной массе (таблица 2 Приложения):

$$c_v = \mu C_v / \mu, \quad c_p = \mu C_p / \mu,$$

$k = c_p / c_v$ - показатель адиабаты или коэффициент Пуассона.

Вопросы для закрепления теоретического материала к практическому занятию:

1. Что представляет собой изохорный процесс.
2. Что представляет собой изобарный процесс
3. Что представляет собой изотермический процесс
4. Что представляет собой адиабатный процесс.
5. Что представляет собой политропный процесс..

Задания для практического занятия:

- 1 Изучить газовые термодинамические процессы.
- 2 Изучить графические изображения процессов.

Инструкция по выполнению практической работы:

1. Ознакомится с понятиями термодинамический процесс.
2. Ознакомится с порядком анализа термодинамических процессов.

Методика анализа и оценка результатов, полученных в ходе практического занятия

1. Полнота ответов на поставленные вопросы.
2. Умение читать графики процессов.
3. По результатам занятия сформулируйте вывод.
4. Оценка ставится общая, объективно по всем пунктам.

Порядок выполнения отчета по практическому занятию

1. Ответить на полученные вопросы..

Раздел 3. Циклы тепловых двигателей..

Тема 3.1. Цикл Карно теплового двигателя

Название практического занятия: Исследование цикла Карно теплового двигателя

Учебная цель: Ознакомиться по учебной литературе с циклом Карно для теплового двигателя.

Учебные задачи:

1. Ознакомится графическим изображением цикла и определить из каких термодинамических процессов он состоит.
2. Ознакомится с анализом цикла термическим к.п.д..

Требования к результатам усвоения учебной дисциплины:

Студент должен

уметь:

-исследовать цикл Карно;

знать:

-основные формулы для определения к.п.д цикла;.

Задачи практического занятия:

1. Получить представление о круговых циклах тепловых двигателей.
2. Получить представление о к.п.д. цикла Карно.
3. Научиться читать графические изображения цикла Карно.

Обеспеченность занятия:

1. Учебно-методическая литература:

- Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача . — М.: Юрайт, 2018.-442 с.
- Ерофеев, В. Л. Теплотехника . Термодинамика и теория теплообмена . — М.: Юрайт, 2017.-308 с.

Технические средства обучения:

- Мультимедийный проектор;
 - Ноутбук.
2. Рабочая тетрадь(обычная в клетку).
 3. Раздаточные материалы
- термодинамические таблицы...
 4. Ручка.
 5. Карандаш простой

Краткие теоретические и учебно-методические материалы по теме практического занятия:

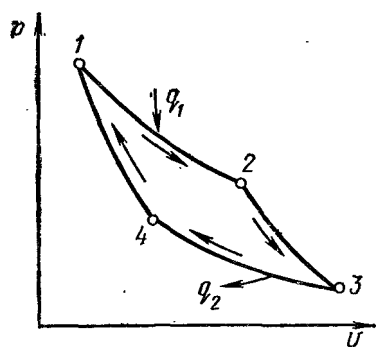


Рис. 8-2

Этот цикл впервые был рассмотрен Сади Карно в его работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», опубликованной в 1824 г. Указанный цикл изображен в *pV*-диаграмме на рис. 8-2.

Для лучшего уяснения порядка осуществления данного цикла представим себе тепловую машину, цилиндр которой может быть по мере надобности как абсолютно теплопроводным, так и абсолютно нетеплопроводным. Пусть в первом положении поршня начальные параметры рабочего тела будут p_1, v_1 , а температура T_1 равна температуре теплоотдатчика. Если в этот момент цилиндр будет абсолютно теплопроводным и если его привести в соприкосновение с теплоотдатчиком бесконечно большой емкости, сообщив рабочему телу теплоту q_1 по изотерме 1-2, то газ расширится до точки 2 и совершит работу. Параметры точки 2: p_2, v_2, T_1 . От точки 2 цилиндр должен быть абсолютно нетеплопроводным. Рабочее тело с температурой T_1 , расширяясь по адиабате 2-3 до температуры теплоприемника T_2 , совершит работу. Параметры точки 3: p_3, v_3, T_2 . От точки 3 делаем цилиндр абсолютно теплопроводным. Сжимая рабочее тело по изотерме 3-4, одновременно отводим теплоту q_2 в теплоприемник. В конце изотермного сжатия параметры рабочего тела будут p_4, v_4, T_2 . От точки 4 в абсолютно нетеплопроводном цилиндре адиабатным процессом сжатия 4-1 рабочее тело возвращается в первоначальное состояние.

Таким образом, за весь цикл рабочему телу от теплоотдатчика была сообщена теплота q_1 и отведена в теплоприемник теплота q_2 .

Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = q_1 - q_2 / q_1 = 1 - q_2 / q_1.$$

Подведенную теплоту по изотерме 1-2 определяем так:

$$q_1 = RT_1 \ln v_2 / v_1.$$

Абсолютное значение отведенной теплоты по изотерме 3-4 находим так:

$$|q_2| = RT_2 \ln v_3 / v_4.$$

Подставляя найденные значения q_1 и q_2 в уравнение для термического к. п. д., получаем

$$\eta_t = 1 - \frac{RT_2 \ln v_3 / v_4}{RT_1 \ln v_2 / v_1} = 1 - \frac{T_2 \ln v_3 / v_4}{T_1 \ln v_2 / v_1}.$$

Для адиабатного процесса расширения и сжатия соответственно имеем

$$(T_2 / T_1)^{1/(k-1)} = v_2 / v_3 \text{ и } (T_2 / T_1)^{1/(k-1)} = v_1 / v_4,$$

откуда

$$v_2 / v_3 = v_1 / v_4 \text{ или } v_2 / v_1 = v_3 / v_4.$$

Следовательно, уравнение термического к. п. д. цикла Карно после сокращения принимает вид

$$\eta_t = 1 - T_2 / T_1. \quad (8-2)$$

Вопросы для закрепления теоретического материала к практическому занятию:

1. Что представляет собой цикл Карно для теплового двигателя
2. Из каких термодинамических процессов состоит цикл Карно
3. Что такое термический к.п.д. цикла.
4. Как по графикам цикла Карно определить количества работы и теплоты
5. Что такое идеальный цикл.

Задания для практического занятия:

1. Изучить цикл Карно и его анализ.

2. Научится читать графические изображения цикла Карно в p - v - T - s координатах.

Инструкция по выполнению практической работы:

1. Ознакомится с понятиями прямой цикл и обратный цикл Карно
2. Ознакомится с порядком анализа цикла Карно.

Методика анализа и оценка результатов, полученных в ходе практического занятия

1. Полнота ответов на поставленные вопросы.
2. Умение читать графики цикла.
3. По результатам занятия сформулируйте вывод.
4. Оценка ставится общая, объективно по всем пунктам.

Порядок выполнения отчета по практическому занятию

1. Ответить на полученные вопросы..

Раздел 3. Циклы тепловых двигателей..

Тема 3.3. Процессы газовых турбин ГТУ

Название практического занятия: Исследование цикла ГТУ при подводе теплоты при постоянном давлении.

Учебная цель: Ознакомиться по учебной литературе с методами исследования цикла ГТУ

Учебные задачи:

1. Ознакомится графическим изображением цикла и определить из каких термодинамических процессов он состоит.
2. Ознакомится с анализом цикла термическим к.п.д..

Требования к результатам усвоения учебной дисциплины:

Студент должен

уметь:

-исследовать цикл ГТУ;

знать:

-основные формулы для определения к.п.д цикла;.

Задачи практического занятия:

1. Получить представление о анализе круговых циклах ГТУ.
2. Получить представление о к.п.д. цикла ГТУ.
3. Научиться читать графические изображения цикла ГТУи определять работу и теплоту.

Обеспеченность занятия:

1. Учебно-методическая литература;

- Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача . — М.: Юрайт, 2018.-442 с.
- Ерофеев, В. Л. Теплотехника . Термодинамика и теория теплообмена . — М.: Юрайт, 2017.- 308 с.

Технические средства обучения:

– Мультимедийный проектор;

– Ноутбук.

6. Рабочая тетрадь(обычная в клетку).

7. Раздаточные материалы

- термодинамические таблицы...

8. Ручка.
9. Карандаш простой

Краткие теоретические и учебно-методические материалы по теме практического занятия:

§ 18-2. Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$

На рис. 18-1 дана схема простейшей ГТУ со сгоранием топлива при $p = \text{const}$. В камеру сгорания 1 через форсунки 6 и 7 непрерывно поступает воздух из турбокомпрессора 4 и топливо из топливного насоса 5. Из камеры продукты сгорания направляются в комбинированные сопла 2, в которых рабочее тело расширяется до давления, близкого к атмосферному. Из сопел продукты сгорания поступают на лопатки газовой турбины 3, а затем выбрасываются в атмосферу через выхлопной патрубок.

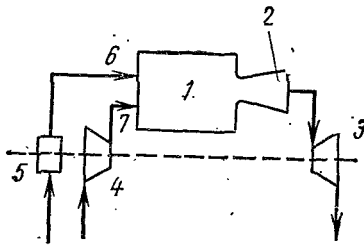


Рис. 18-1

На рис. 18-2 и 18-3 представлен идеальный цикл газотурбинной установки на $p-v$ -и Ts -диаграммах с подводом теплоты при $p = \text{const}$. В этом цикле отвод теплоты от рабочего тела производится не по изохоре, как это имеет место в двигателях внутреннего сгорания, а по изобаре.

В поршневых двигателях объем газов при расширении ограничен объемом цилиндра. В газовых турбинах такого ограничения нет и газы могут расширяться до атмосферного давления.

Рабочее тело с начальными параметрами p_1, v_1, T_1 сжимается по адиабате 1-2 до точки 2. От точки 2 к рабочему телу подводится некото-

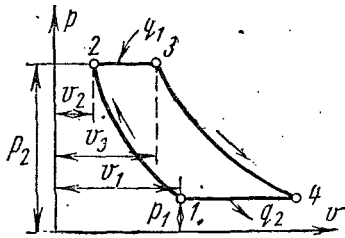


Рис. 18-2

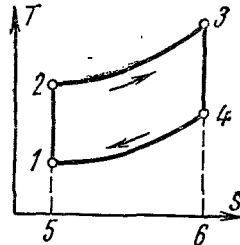


Рис. 18-3

рое количество теплоты q_1 по изобаре 2-3. Затем рабочее тело расширяется по адиабате 3-4 до начального давления и возвращается по изобаре 4-1 в первоначальное состояние, при этом отводится теплота q_2 .

Характеристиками цикла являются: степень повышения давления в компрессоре $\beta = p_2/p_1$ и степень изобарного расширения $\rho = v_3/v_2$.

Количество подводимой теплоты определяется по формуле

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2),$$

а количество отводимой теплоты — по следующей формуле:

$$q_2 = c_p (T_4 - T_1).$$

Термический к. п. д. цикла равен

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1 = 1 - c_p(T_4 - T_1)/c_p(T_3 - T_2) = 1 - (T_4 - T_1)/(T_3 - T_2).$$

Вопросы для закрепления теоретического материала к практическому занятию:

1. Что представляет собой цикл ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении.
2. Из каких термодинамических процессов состоит цикл ГТУ.
3. Что такое термический к.п.д. цикла.
4. Как по графикам цикла ГТУ определить количества работы и теплоты
5. Какие достоинства и недостатки цикла ГТУ.

Задания для практического занятия:

1. Изучить цикл ГТУ и его анализ.
2. Научиться читать графические изображения цикла ГТУ в p - v и T - s координатах.

Инструкция по выполнению практической работы:

1. Ознакомится с схемой ГТУ и принципом ее работы.
2. Ознакомится с порядком анализа цикла ГТУ.

Методика анализа и оценка результатов, полученных в ходе практического занятия

1. Полнота ответов на поставленные вопросы.
2. Умение читать графики цикла.
3. По результатам занятия сформулируйте вывод.
4. Оценка ставится общая, объективно по всем пунктам.

Порядок выполнения отчета по практическому занятию

1. Ответить на полученные вопросы..

Раздел 3. Циклы тепловых двигателей.

Тема 3.4. Термодинамические циклы ДВС

Название практического занятия: Исследование цикла Дизеля .

Учебная цель: Ознакомиться по учебной литературе с методами исследования цикла Дизеля.

Учебные задачи:

1. Ознакомиться графическим изображением цикла и определить из каких термодинамических процессов он состоит.
2. Ознакомиться с анализом цикла термическим к.п.д..

Требования к результатам усвоения учебной дисциплины:

Студент должен

уметь:

-исследовать цикл Дизеля;

знать:

-основные формулы для определения к.п.д цикла;

Задачи практического занятия:

1. Получить представление о анализе цикла Дизеля в p - v и T - s координатах.
2. Получить представление о к.п.д. цикла Дизеля.
3. Научиться читать графические изображения цикла Дизеля и определять работу и теплоту.

Обеспеченность занятия:

1. Учебно-методическая литература:

- Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача . — М.: Юрайт, 2018.-442 с.
- Ерофеев, В. Л. Теплотехника . Термодинамика и теория теплообмена . — М.: Юрайт, 2017.-308 с.

Технические средства обучения:

- Мультимедийный проектор;
- Ноутбук.
- 10. Рабочая тетрадь(*обычная в клетку*).
- 11. Раздаточные материалы
 - термодинамические таблицы...
- 12. Ручка.
- 13. Карандаш простой

Краткие теоретические и учебно-методические материалы по теме практического занятия:

Цикл Дизеля.

Изучение циклов с подводом теплоты при постоянном объеме показало, что для повышения экономичности двигателя, работающего по этому циклу, необходимо применять высокие степени сжатия. Но это увеличение ограничивается температурой самовоспламенения горючей смеси. Если же производить раздельное сжатие воздуха и топлива, то это ограничение отпадает. Воздух при большом сжатии имеет на-

столько высокую температуру, что подаваемое топливо в цилиндр самовоспламеняется без всяких специальных запальных приспособлений. И наконец, раздельное сжатие воздуха и топлива позволяет использовать любое жидкое тяжелое и дешевое топливо — нефть, мазут, смолы, каменноугольные масла и пр.

Таковыми высокими достоинствами обладают двигатели, работающие с постепенным сгоранием топлива при постоянном давлении. В них воздух сжимается в цилиндре двигателя, а жидкое топливо распыляется сжатым воздухом от компрессора. Раздельное сжатие позволяет применять высокие степени сжатия (до $\epsilon = 20$) и исключает преждевременное самовоспламенение топлива. Процесс горения топлива

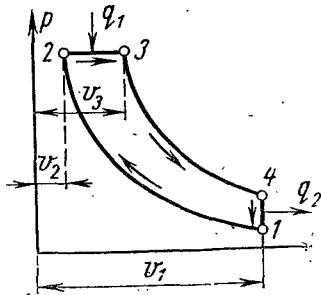


Рис. 17-4

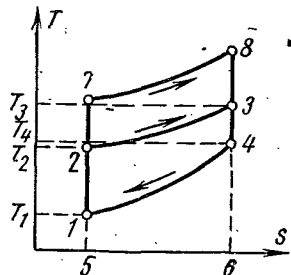


Рис. 17-5

при постоянном давлении обеспечивается соответствующей регулировкой топливной форсунки. Создание такого двигателя связывают с именем немецкого инженера Дизеля, впервые разработавшего конструкцию подобного двигателя.

Рассмотрим идеальный цикл двигателя с постепенным сгоранием топлива при постоянном давлении, т. е. цикл с подводом теплоты при постоянном давлении. На рис. 17-4 и 17-5 изображен этот цикл в p - v - и T - s -диаграммах. Осуществляется он следующим образом. Газообразное рабочее тело с начальными параметрами p_1, v_1, T_1 сжимается по адиабате 1-2; затем телу по изобаре 2-3 сообщается некоторое количество теплоты q_1 . От точки 3 рабочее тело расширяется по адиабате 3-4. И наконец, по изохоре 4-1 рабочее тело возвращается в первоначальное состояние, при этом в теплоприемник отводится теплота q_2 .

Характеристиками цикла являются: степень сжатия $\epsilon = v_1/v_2$ и степень предварительного расширения $\rho = v_3/v_2$.

Определим термический к. п. д. цикла, полагая, что теплоемкости c_v и c_p и их отношение $k = c_p/c_v$ постоянны.

Термический к. п. д. цикла равен

$$\eta_t = (q_1 - q_2)/q_1 = 1 - (q_2/q_1).$$

Количество подведенной теплоты будет

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2),$$

количество отведенной теплоты равно

$$q_2 = c_v (T_4 - T_1).$$

Термический к. п. д. цикла

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - (q_2/q_1) = 1 - [c_v (T_4 - T_1)/c_p (T_3 - T_2)] = \\ &= 1 - [(T_4 - T_1)/k (T_3 - T_2)]. \end{aligned}$$

Вопросы для закрепления теоретического материала к практическому занятию:

1. Что представляет собой цикл Дизеля с подводом теплоты при постоянном давлении.
2. Из каких термодинамических процессов состоит цикл Дизеля.
3. Что такое термический к.п.д. цикла.
4. Как по графикам цикла Дизеля определить количества работы и теплоты
5. Какие достоинства и недостатки цикла Дизеля.

Задания для практического занятия:

1. Изучить цикл Дизеля и его анализ.
2. Научится читать графические изображения цикла Дизеля в p - v - T - s координатах.

Инструкция по выполнению практической работы:

1. Ознакомится с индикаторной диаграммой цикла Дизеля.
2. Ознакомится с порядком анализа цикла Дизеля.

Методика анализа и оценка результатов, полученных в ходе практического занятия

1. Полнота ответов на поставленные вопросы.
2. Умение читать графики цикла.
3. По результатам занятия сформулируйте вывод.
4. Оценка ставится общая, объективно по всем пунктам.

Порядок выполнения отчета по практическому занятию

1. Ответить на полученные вопросы..

Раздел 4. Водяные пары.

Тема 4.4. Термодинамические циклы парознергетических установок

Название практического занятия: Исследование цикла Ренкина .

Учебная цель: Ознакомиться по учебной литературе с методами исследования цикла Ренкина.

Учебные задачи:

1. Ознакомится графическим изображением цикла в p - v , T - si - h -сдиаграммах.
2. Ознакомится с анализом цикла и термическим к.п.д..

Требования к результатам усвоения учебной дисциплины:

Студент должен

уметь:

-исследовать цикл Ренкина;

знать:

-основные формулы для определения к.п.д цикла;

Задачи практического занятия:

1. Получить представление о анализе цикла Ренкина в p - v , T - si h -сдиаграммах.
2. Получить представление о к.п.д. цикла Ренкина.
3. Ознакомится со способами повышения к.п.д. цикла Ренкина.

Обеспеченность занятия:

1. Учебно-методическая литература:

- Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача . — М.: Юрайт, 2018.-442 с.
- Ерофеев, В. Л. Теплотехника . Термодинамика и теория теплообмена . — М.: Юрайт, 2017.-308 с.

14. Технические средства обучения:

– Мультимедийный проектор;
– Ноутбук.

15. Рабочая тетрадь(обычная в клетку).

16. Раздаточные материалы

- термодинамические таблицы..

17. Ручка.

Краткие теоретические и учебно-методические материалы по теме практического занятия:

На рис. 19-4 изображен идеальный цикл Ренкина в p - v -диаграмме. Точка 4 характеризует состояние кипящей воды в котле при давлении p_1 . Линия 4-5 изображает процесс парообразования в котле; затем пар подсушивается в перегревателе — процесс 5-6, 6-1 — процесс перегрева пара в перегревателе при давлении p_1 . Полученный пар по адиабате 1-2 расширяется в цилиндре парового двигателя до давления p_2 в конденсаторе. В процессе 2-2' пар полностью конденсируется до состояния кипящей жидкости при давлении p_2 , отдавая теплоту парообразования охлаждающей воде. Процесс сжатия воды 2'-3 осуществляется в насосе; получающееся при этом повышение температуры воды ничтожно мало, и им в исследованиях при давлениях до 30—40 бар

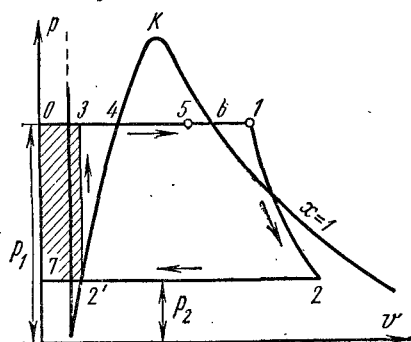


Рис. 19-4

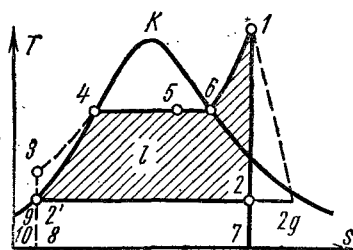


Рис. 19-5

пренебрегают. Линия 3-4 изображает изменение объема воды при нагревании от температуры в конденсаторе до температуры кипения. Работа насоса изображается заштрихованной пл. 2'34617. Энтальпия пара при выходе из перегревателя в точке 1 равна i_1 и на Ts -диаграмме (рис. 19-5)* изображается пл. 92'34617109. Энтальпия пара при входе в конденсатор в точке 2 равна i_2 и на Ts -диаграмме изображается пл. 92'27109. Энтальпия воды при выходе из конденсатора в точке 2' равна i_2 и на Ts -диаграмме изображается пл. 92'8109. Полезная работа пара в цикле Ренкина изображается на p - v -диаграмме пл. 2'346122' (рис. 19-5).

Если в цикле Ренкина учитывать работу насоса, то процесс адиабатного сжатия воды в нем представится на Ts -диаграмме (рис. 19-5) адиабатой 2'-3, а изобара 3-4 соответствует нагреванию воды в котле при давлении p_1 до соответствующей температуры кипения.

Термический к. п. д. цикла Ренкина определяется по уравнению

$$\eta_t = (q_1 - q_2)/q_1.$$

Теплота q_1 в цикле подводится при $p = \text{const}$ в процессах 3-4 (подогрев воды до температуры кипения), 4-6 (парообразование) и 6-1 (перегрев пара) (см. рис. 19-5).

Для 1 кг пара q_1 равно разности энтальпий начальной и конечной точек процесса

$$q_1 = i_1 - i_3.$$

Это количество теплоты изображается на Ts -диаграмме пл. 82'346178. Отвод теплоты q_2 осуществляется в конденсаторе по изобаре 2-2', следовательно,

$$q_2 = i_2 - i_2'.$$

Отводимая теплота изображается на Ts -диаграмме пл. 2'2782'. Термический к. п. д. цикла Ренкина определяем по уравнению

$$\eta_t = [(i_1 - i_2) - (i_3 - i_2')] / (i_1 - i_3). \quad (19-1)$$

Термический к. п. д. цикла может быть также получен по уравнению

$$\eta_t = l / q_1,$$

где l — полезная работа цикла.

Полезная работа цикла равна работе паровой турбины без работы, затраченной на привод насоса. Работа паровой турбины равна уменьшению энтальпии в процессе 1-2

$$l_T = i_1 - i_2.$$

При адиабатном сжатии воды в насосе и подаче ее в котел затрачивается работа

$$l_H = i_3 - i_2'.$$

Тогда

$$l = l_T - l_H = (i_1 - i_2) - (i_3 - i_2'),$$

отсюда к. п. д. цикла Ренкина равен

$$\eta_t = [(i_1 - i_2) - (i_3 - i_2')] / (i_1 - i_3).$$

Учитывая, что вода практически несжимаема, уравнение (19-1) можно представить в ином виде.

При адиабатном сжатии воды в насосе и $v = \text{const}$

$$l_H = i_3 - i_2' = \int_{p_2}^{p_1} v dp = v (p_1 - p_2),$$

где v — удельный объем воды при давлении p_2 .

Работа на привод насоса изображается на pv -диаграмме пл. 032'70 (см. рис. 19-4).

Заменив в уравнении (19-1) разность $(i_3 - i_2')$ на $v (p_1 - p_2)$, получим

$$\eta_t = [(i_1 - i_2) - v (p_1 - p_2)] / (i_1 - i_3),$$

но

$$i_3 = i_2' + v (p_1 - p_2),$$

поэтому

$$\eta_t = [(i_1 - i_2) - v (p_1 - p_2)] / [i_1 - i_2' - v (p_1 - p_2)]. \quad (19-2)$$

В таком виде уравнение для термического к. п. д. цикла Ренкина применяется в технических расчетах.

Напомним, что при невысоких давлениях в расчетах цикла Ренкина делают следующие допущения: не учитывают повышения температуры воды при адиабатном сжатии в насосе (практически точки 3 и 2' в T-s-диаграмме сливаются); полагают, что изобары жидкости сливаются с пограничной кривой жидкости вследствие того, что удельный объем воды весьма мал по сравнению с объемом пара; пренебрегают работой насоса. Поэтому цикл Ренкина с учетом этих допущений принимает вид, изображенный на рис. 19-6, а термический к. п. д. паротурбинного цикла определяется по приближенной формуле

$$\eta_t = (i_1 - i_2)/(i_1 - i_{2'}) \quad (19-3)$$

Термический к. п. д. цикла Ренкина равен отношению адиабатного теплопадения к энтальпии перегретого пара минус энтальпия кипящей воды при давлении в конденсаторе и вычисляется по таблицам или по i-s-диаграмме водяного пара.

При расчетах паротурбинных установок и отдельных элементов в ней требуется знание массового удельного расхода пара, обычно обозначаемого буквой d .

Теоретический массовый удельный расход пара в килограммах на 1 Мдж составляет

$$d_{\text{теор}} = 1000/(i_1 - i_2),$$

где i_1 и i_2 — энтальпия, кДж/кг.

Потери от необратимого расширения пара в двигателе учитываются внутренним относительным к. п. д. турбины

$$\eta_{\text{от}} = (i_1 - i_{2\text{д}})/(i_1 - i_2),$$

где $i_{2\text{д}}$ — энтальпия в конце действительного расширения пара в турбине.

Потери от необратимости, уменьшая полезную работу, увеличивают удельный расход пара:

$$d_{\text{н}} = 1000/(i_1 - i_{2\text{д}}).$$

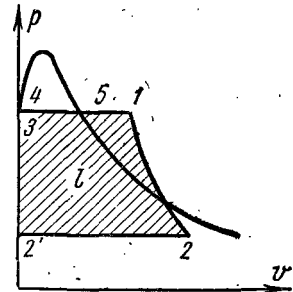


Рис. 19-6

Вопросы для закрепления теоретического материала к практическому занятию:

1. Что представляет собой цикл Ренкина.
2. Как выглядит схема ПСУ.
3. Что такое термический к.п.д. цикла.
4. Как по графикам цикла Ренкина определить количества работы и теплоты
5. Какие достоинства и недостатки цикла Ренкина.

Задания для практического занятия:

1. Изучить цикл Ренкина и его анализ.
2. Научится читать графические изображения цикла Ренкина в p-v и T-s и h-s-диаграммах.

Инструкция по выполнению практической работы:

1. Ознакомится циклом Ренкина в p-v, T-s и h-s-диаграммах.
2. Ознакомится с порядком анализа цикла Ренкина.

Методика анализа и оценка результатов, полученных в ходе практического занятия

1. Полнота ответов на поставленные вопросы.

2. Умение читать диаграммы цикла.
3. По результатам занятия сформулируйте вывод.
4. Оценка ставится общая, объективно по всем пунктам.

Порядок выполнения отчета по практическому занятию

1. Ответить на полученные вопросы.