

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.В. ЩЕРБИНИН, В.В. ПАВЛЕНКО

ТЕПЛОТЕХНИКА

***Учебно-методическое пособие по курсу «Теплотехника»
для самостоятельной работы студентов***

Барнаул 2018

УДК 621.1 (075.2)

Рецензент – д.б.н., профессор, зав. кафедрой физики Алтайского государственного аграрного университета С.В. Макарычев

Теплотехника: учебно-методическое пособие по курсу «Теплотехника» для самостоятельной работы студентов / В.В. Щербинин, В.В. Павленко. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2018. – 43 с.

В учебно-методическом издании изложены основы технической термодинамики, приведены основные сведения о процессах, протекающих в термодинамических системах и их влиянии на работу теплоэнергетического оборудования. Рассмотрены основы расчёта теплообменных аппаратов. Даны примеры решения задач.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям «Агроинженерия», «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов».

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерного факультета Алтайского государственного аграрного университета (протокол № 3 от 20.11.2018 г.)

© Щербинин В.В., Павленко В.В., 2018
© ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Основные понятия и положения	5
Термодинамические процессы	7
Термодинамические циклы	18
Водяной пар	30
Расчёт теплообменных аппаратов	36
Библиографический список	42

ПРЕДИСЛОВИЕ

Целью изучения дисциплины «Теплотехника» является формирование у студентов совокупности знаний по методам получения, преобразования, передачи и использования тепловой энергии.

В результате изучения студент приобретает знания, умения и навыки в выполнении расчётов состояния рабочих тел, термодинамических процессов и циклов, теплообменных процессов, аппаратов и других теплотехнических устройств и оборудования, а также по рациональному использованию теплоэнергетических установок.

Неотъемлемым и важнейшим фактором в подготовке специалиста является самостоятельная работа студента, направленная на углубление и закрепление знаний, развитие творческого подхода в решении профессиональных задач и их анализ, приобретение исследовательских навыков.

Для самоконтроля в процессе изучения теоретического материала следует ответить на контрольные вопросы, приведённые в конце каждого раздела. Решение задач по предложенной методике позволит закрепить полученные знания на практике.

Контроль самостоятельной работы студентов осуществляется в форме устного опроса, выполнения индивидуальных заданий и контрольных работ.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Теплотехника – общетехническая дисциплина, изучающая методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принципы действия и конструктивные особенности тепло- и парогенераторов, тепловых машин, аппаратов и устройств. Имеет два раздела: техническая термодинамика и теплопередача; общая теплотехника.

Термодинамика – теоретический раздел, изучающий энергию и ее свойства. **Техническая термодинамика**, используя законы термодинамики, изучает взаимные превращения теплоты и механической работы.

Техническая термодинамика является основой теории тепловых двигателей (ДВС)

Термодинамическая система представляет собой совокупность материальных тел, находящихся в механическом и тепловом взаимодействии друг с другом и с окружающей средой. Систему отделяют от окружающей среды контрольной поверхностью (оболочкой). Простейшей термодинамической системой является рабочее тело (идеальный газ), осуществляющее взаимное превращение теплоты и работы.

Качественное различие понятий «теплота» и «работа» заключается в том, что **теплота** есть такая форма передачи энергии, которая представляет собой **совокупность микрофизических процессов** (хаотическое движение атомов и молекул). **Работа** есть **макрофизическая** форма передачи энергии в процессе, где перемещение точек приложения сил доступно нашему непосредственному восприятию.

Количественную зависимость перехода теплоты в механическую работу определяет **первый закон термодинамики: теплота, подведённая к термодинамической системе, расходуется на изменение внутренней энергии**

системы и совершение механической работы против внешних сил.

$$dq = du + dl,$$
$$q = \Delta u + l.$$

Свойства каждой системы характеризуются **термодинамическими параметрами**: абсолютное давление, абсолютная температура, удельный объём. Если все термодинамические параметры постоянны во времени и одинаковы во всех точках системы, то система называется **равновесной**. В термодинамике рассматривают равновесные системы.

Вопросы для самопроверки

1. Что изучает техническая термодинамика?
2. В чём заключается сущность метода идеализации?
3. Что называется рабочим телом?
4. Что называется идеальным газом?
5. Что представляет собой термодинамическая система?
6. Какая система называется равновесной?
7. Назовите основные параметры состояния рабочего тела.
8. Что называют уравнением состояния?
9. Что подразумевают под понятием «внутренняя энергия»?
10. Что характеризует температура рабочего тела?
11. Что понимают под термином «давление»?
12. В чём заключается качественное различие понятий «теплота» и «работа»?
13. В чём отличие реального газа от идеального?
14. Назовите определение первого закона термодинамики.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Изменение состояния термодинамической системы вследствие воздействия на неё внешней среды называется **термодинамическим процессом**. При этом происходит последовательное изменение параметров рабочего тела.

Так при перемещении поршня в цилиндре объём, а с ним давление и температура находящегося внутри газа будут изменяться, будет совершаться процесс расширения или сжатия.

Процессы, под которыми понимают непрерывную последовательность равновесных состояний, через которые проходит рассматриваемая система при изменении своего состояния, называются **равновесными**. Термодинамический процесс, который может протекать через одни и те же равновесные состояния как в прямом 1-2, так и в обратном 2-1 направлении, называется **обратимым** (рис. 1). При этом не происходит остаточных изменений ни в самой системе, ни в окружающей среде. Равновесные процессы – обратимые.

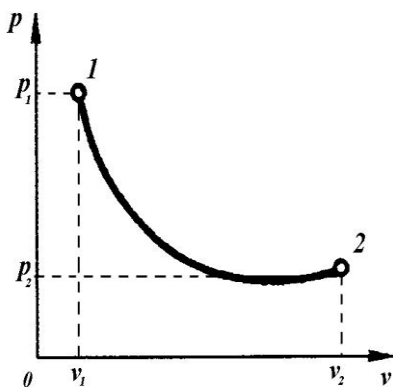


Рис. 1. Термодинамический процесс в координатах P - v

Любой реальный процесс в той или иной степени неравновесный. В термодинамике в отдельных случаях процессы **идеализируют** путём допущений. Идеализация процессов упрощает термодинамические исследования. Такой процесс является образцом, к которому следует стремиться на практике.

Термодинамические процессы математически выражаются уравнениями, связывающими между собой основные термодинамические параметры состояния рабочего тела $f(P, v, T) = 0$. В зависимости от характера и условий протекания процесса математическое выражение первого закона термодинамики $q = \Delta u + l$ приобретает то или иное частное значение.

Параметры состояния рабочего тела находятся в функциональной зависимости:

$$P = f(T, v); \quad T = f(P, v); \quad v = f(P, T).$$

Если хотя бы один из параметров состояния меняется, то изменяется состояние самой системы, т.е. происходит термодинамический процесс.

Практический интерес представляют частные термодинамические процессы: **изохорный** ($dv = 0$), протекающий при постоянном объёме; **изобарный** ($dp = 0$) – при постоянном давлении; **изотермический** ($dT = 0$) – при постоянной температуре; **адиабатный** ($dq = 0$), протекающий без теплообмена с окружающей средой. Обобщающим процессом, охватывающим всю совокупность основных термодинамических процессов, является **политропный** процесс.

Для анализа термодинамических процессов широко используется система координат T - s . Параметр s называется **энтропией** (мера рассеивания энергии). Изменение энтропии отражает степень необратимости реального процесса в замкнутой системе.

Задача анализа термодинамического процесса заключается в установлении закономерности изменения параметров состояния рабочего тела и особенности превращения энергии в данном процессе.

Изохорный процесс определяется условием $dv = 0$, т.е. постоянством объёма. Уравнение процесса принимает вид

$v = \text{const}$. Графики процесса представлены на рис. 2. Из уравнения состояния $Pv = RT$ следует, что

$$R/v = p/T = \text{const},$$

т.е. давление идеального газа прямо пропорционально его абсолютной температуре. Так как $dv = 0$, то работа расширения (сжатия) в данном процессе не совершается, а вся подведённая (отведенная) теплота, согласно первому закону термодинамики, расходуется на изменение внутренней энергии тела:

$$dq = du.$$

Изобарный процесс характеризуется постоянным значением давления, $dp = 0$. Уравнение процесса имеет вид $p = \text{const}$. Графики процесса представлены на рис. 2. Из уравнения состояния идеального газа получим:

$$v/T = R/p = \text{const},$$

т.е. объём идеального газа прямо пропорционален его абсолютной температуре. Подведённая (отведенная) теплота, расходуется как на изменение внутренней энергии тела, так и на совершение работы:

$$dq = du + dl.$$

Изотермический процесс протекает при постоянной температуре, $dT = 0$. Уравнение процесса – $pv = \text{const}$. Графики процесса представлены на рис. 2. Из уравнения состояния следует, что

$$p_1/p_2 = v_2/v_1 = \text{const},$$

т.е. объём и давление идеального газа обратно пропорциональны. Так как температура постоянна, то изменение внутренней энергии равно нулю, $du = 0$. Первый закон термодинамики примет вид:

$$dq = dl.$$

Поэтому вся подведённая к рабочему телу теплота расходуется на совершение работы.

Адиабатный процесс – это процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой: $dq = 0$. Уравнение процесса $pv^k = \text{const}$, где k – показатель адиабаты (для одноатомных газов $k = 1,67$; двухатомных – $k = 1,41$; трех- и более – $k = 1,33$). Поскольку $k > 1$, то на графике в координатах P - v линия адиабаты идет круче изотермы.

Согласно первому закону термодинамики работа в адиабатном процессе совершается за счет изменения внутренней энергии рабочего тела:

$$dl = - du.$$

Полиτροпный процесс описывается уравнением $pv^n = \text{const}$. Показатель политропы n может принимать любое численное значение в пределах от $-\infty$ до $+\infty$, но для данного процесса он является величиной постоянной.

Политропный процесс имеет обобщающее значение, так как охватывает всю совокупность основных термодинамических процессов. Не трудно убедиться, что:

- при $n = 0$, $pv^n = \text{const}$ и $p = \text{const}$ (изобарный процесс);
- при $n = 1$, $pv^n = \text{const}$ и $pv = \text{const}$ (изотермический процесс);
- при $n = k$, $pv^n = \text{const}$ и $pv^k = \text{const}$ (адиабатный процесс);
- при $n = \pm\infty$, $pv^n = \text{const}$ и $v = \text{const}$ (изохорный процесс).

На рис. 2 показано взаимное расположение графиков термодинамических процессов с разными значениями показателя политропы в координатах P - v и T - s . Все процессы начинаются в одной точке.

Изохора ($n = \pm\infty$) делит поле диаграммы на две области: процессы, находящиеся правее изохоры, характеризуются положительной работой, так как сопровождаются расширением рабочего тела; для процессов, расположенных левее изохоры, характерна отрицательная работа.

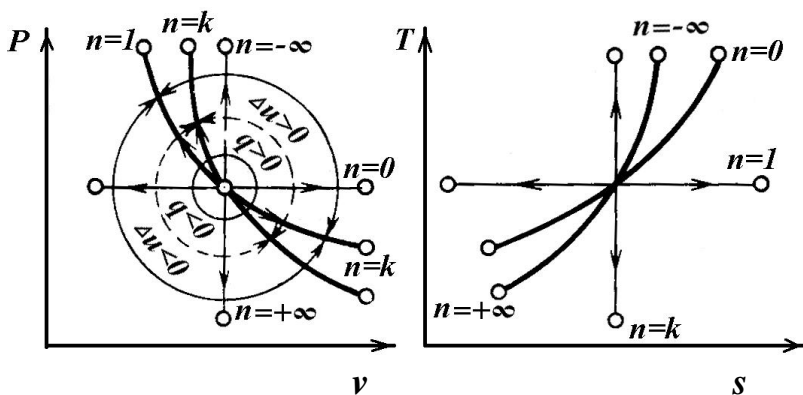


Рис. 2. Изображение основных термодинамических процессов идеального газа в координатах P - v и T - s

Процессы, расположенные правее и выше адиабаты, идут с подводом теплоты к рабочему телу; процессы, лежащие левее и ниже адиабаты, протекают с отводом теплоты.

Для процессов, расположенных над изотермой ($n = 1$), характерно увеличение внутренней энергии газа; процессы, расположенные под изотермой, сопровождаются уменьшением внутренней энергии.

Процессы, расположенные между адиабатой и изотермой, имеют отрицательную теплоемкость, так как dq и du (а следовательно и dT) имеют в этой области противоположные знаки. В таких процессах $|l| > |q|$, поэтому на совершение работы при расширении тратится не только подводимая теплота, но и часть внутренней энергии рабочего тела.

Задача 1

Для ее решения необходимо изучить разделы по газовым законам, теплоемкости газов, первому закону термодинамики, термодинамическим процессам, энтальпии и энтропии.

Условия задачи:

В процессе изменения состояния 1 кг газа его внутренняя энергия увеличивается на Δu . При этом над газом совершается работа, равная l . Начальная температура газа t_1 , конечное давление P_2 .

Определить для заданного газа показатель политропы n , начальные и конечные параметры, изменение энтропии Δs и изменение энтальпии Δi . Представить график процесса в P - v и T - s координатах. Изобразить здесь же (без расчета) изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный процессы, проходящие через начальную точку, и дать их сравнительный анализ.

Дано:

$$\Delta u = 200 \text{ кДж/кг};$$

$$l = -63 \text{ кДж/кг};$$

$$t_1 = 27^\circ\text{C};$$

$$P_2 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

Углекислый газ (CO_2)

Определить:

$$n;$$

$$P_1;$$

$$v_1; v_2;$$

$$t_2;$$

$$\Delta s; \Delta i.$$

Решение:

Конечная температура процесса определяется из выражения для изменения внутренней энергии, $^\circ\text{C}$:

$$t_2 = \frac{\Delta U}{C_v} + t_1 = \frac{200}{0,666} + 27 = 327,$$

где C_v – удельная массовая теплоемкость в процессе постоянного объема ($\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$), вычисляемая из соотношения:

$$C_v = \frac{C_{\mu v}}{\mu} = \frac{29,31}{44} = 0,666.$$

Значения удельной мольной теплоемкости $C_{\mu v}$ представлены в таблице 1, а молярной массы μ – в таблице 2.

Таблица 1

Средние теплоемкости газов, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$

Газы	$C_{\mu V}$	$C_{\mu P}$
Одноатомные	12,56	20,93
Двухатомные	20,93	29,31
Трех- и многоатомные	29,31	37,68

Таблица 2

Молярные массы газов, $\text{кг}/\text{кмоль}$

Наименование газов	Формула	Молярная масса
Воздух	-	28,970
Углекислый газ	CO_2	44,010
Кислород	O_2	32,000
Азот	N_2	28,016
Метан	CH_4	16,043
Гелий	He	4,003
Водород	H_2	2,016
Оксид углерода	CO	28,010
Водяной пар	H_2O	18,016
Аммиак	NH_3	17,032
Сернистый газ	SO_2	64,060

Показатель политропы определяется из выражения для работы процесса:

$$n = \frac{R}{l}(T_1 - T_2) + 1 = \frac{189}{-63000}(300 - 600) + 1 = 1,9,$$

где $T_1 = t_1 + 273 = 27 + 273 = 300 \text{ К}$;

$T_2 = t_2 + 273 = 327 + 273 = 600 \text{ К}$;

R – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К), определяемая выражением:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{44} = 189.$$

Здесь $R_\mu = 8314$ Дж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная.

По значению показателя политропы определяем процесс. Если $n = \infty$ ($l = 0$), то процесс изохорный. Для изохорного процесса начальное давление газа можно найти из соотношения параметров, Па:

$$P_1 = P_2 \cdot \frac{T_1}{T_2}.$$

Если $n = 1$, процесс изотермический. Для изотермического процесса:

$$P_1 = P_2 \cdot e^{\frac{l}{RT}} = P_2 \cdot 2,72^{\frac{l}{RT}}.$$

При других значениях показателя политропы применяем формулы для политропного процесса.

$$P_1 = P_2 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 4 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{300}{600} \right)^{\frac{1,9}{1,9-1}} = 92587.$$

Начальный и конечный объём определяются из характеристического уравнения состояния газа, м³/кг:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{189 \cdot 300}{92587} = 0,612;$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{P_2} = \frac{189 \cdot 600}{4 \cdot 10^5} = 0,284.$$

Изменение энтропии составит, кДж/(кг·К):

$$\begin{aligned}\Delta s &= s_2 - s_1 = C_V \cdot k \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} = \\ &= 0,666 \cdot 1,29 \cdot \ln \frac{600}{300} - 0,189 \cdot \ln \frac{4 \cdot 10^5}{92587} = 0,318,\end{aligned}$$

где R – индивидуальная газовая постоянная, $\kappa \text{Дж}/(\kappa \text{г} \cdot \text{К})$;
 k – показатель адиабаты, определяемый зависимостью:

$$k = \frac{C_{\mu P}}{C_{\mu V}} = \frac{37,68}{29,31} = 1,29.$$

$C_{\mu P}$, $C_{\mu V}$ – выбираются из таблицы 1.

Изменение энтальпии в процессе, $\kappa \text{Дж}/\kappa \text{г}$:

$$\begin{aligned}\Delta i &= i_2 - i_1 = C_P (T_2 - T_1) = \frac{C_{\mu P}}{\mu} (T_2 - T_1) = \\ &= \frac{37,68}{44} \cdot (600 - 300) = 256,9.\end{aligned}$$

Для построения графика процесса в координатах T - s (рис. 3) следует вычислить значение энтропии газа в начальном состоянии по формуле, $\kappa \text{Дж}/(\kappa \text{г} \cdot \text{К})$:

$$\begin{aligned}s_1 &= C_V \cdot k \cdot \ln \frac{T_1}{273} - R \cdot \ln \frac{P_1}{1,01 \cdot 10^5} = \\ &= 0,666 \cdot 1,29 \cdot \ln \frac{300}{273} - 0,189 \cdot \ln \frac{92587}{1,01 \cdot 10^5} = \\ &= 0,0817 - 0,129 = 0,097.\end{aligned}$$

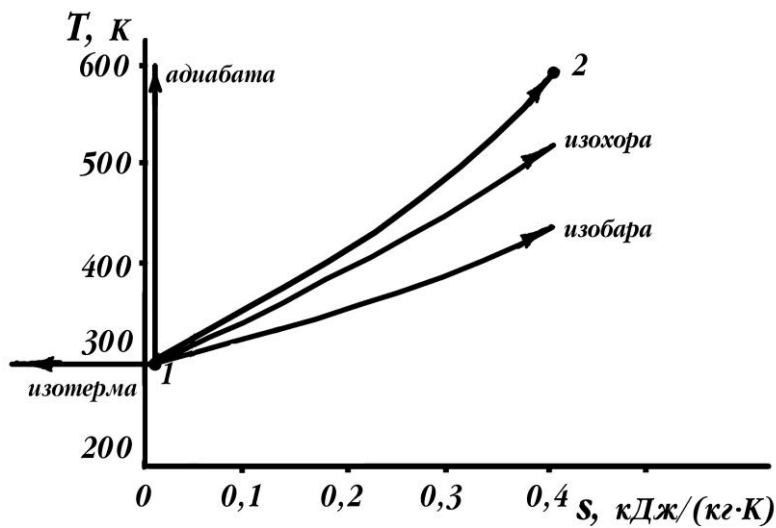
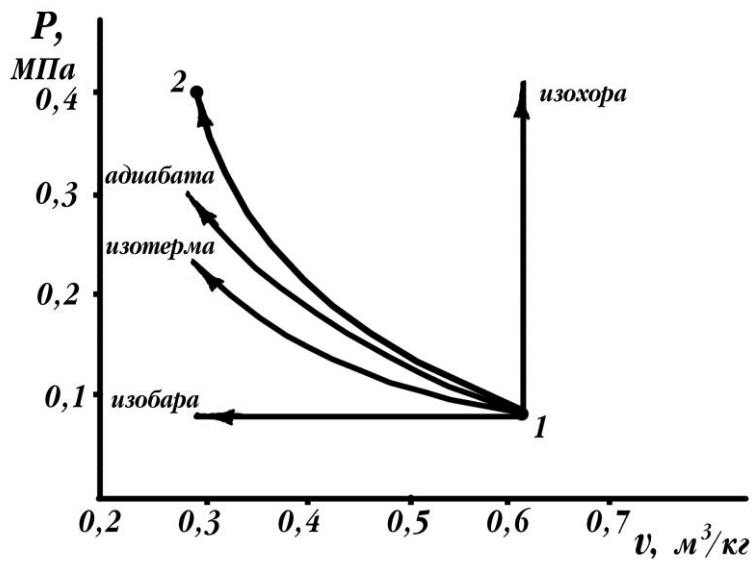


Рис. 3. Изображение термодинамических процессов

Вопросы для самопроверки

1. Что называется термодинамическим процессом?
2. Какие процессы называют обратимыми?
3. Назовите термодинамические процессы для идеального газа.
4. При каких условиях протекают термодинамические процессы?
5. Изобразите графики термодинамических процессов в координатах P - v и T - s .
6. Приведите выражение для определения количества теплоты, участвующего в каждом из четырёх основных термодинамических процессах.
7. В каком процессе вся подведённая теплота расходуется на совершение внешней работы, а в каком на изменение внутренней энергии?
8. В каком термодинамическом процессе для совершения работы не требуется подводить теплоту к рабочему телу?
9. Каковы показатели политропы для основных термодинамических процессов изменения состояния идеального газа и на что они влияют?
10. Приведите выражение для определения внутренней энергии рабочего тела.
11. Что такое работа расширения и от чего она зависит?
12. Что такое теплоёмкость газа и от чего она зависит?
13. Какая бывает теплоёмкость и в чём измеряется?
14. Что такое энтальпия и чем она отличается от внутренней энергии?
15. Поясните физический смысл энтропии.
16. Как изменяется энтропия в необратимых процессах?

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

Для осуществления непрерывно действующей тепловой машины не один из термодинамических процессов в отдельности не может быть использован, несмотря на его термодинамические преимущества. Все процессы требуют непрерывного движения поршня в одном направлении. В реальных машинах требуется постоянное повторение рабочим телом процесса расширения, т.е. возвращение тела после расширения в начальное состояние, что может быть выполнено при помощи процесса сжатия.

Таким образом, в непрерывно действующей тепловой машине в дополнение к процессу расширения необходимо осуществить обратный процесс – процесс сжатия, в результате которого рабочее тело будет возвращено в начальное работоспособное состояние. Такой замкнутый процесс называется **круговым процессом** или **циклом**.

Для превращения тепловой энергии в механическую работу тепловые двигатели должны иметь **горячий источник**

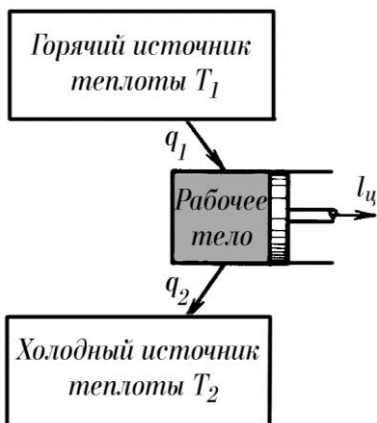


Рис. 4. Термодинамическая схема теплового двигателя

ник теплоты, рабочее тело, совершающее замкнутый круговой процесс (цикл), и **холодный источник теплоты** (рис. 4). Горячим источником служит химическая реакция сжигания топлива, а в качестве холодного источника используется окружающая среда – атмосфера.

На рис. 5. площадь фигуры $ABCEFA$ эквивалентна работе расширения, площадь фигуры $CEFADC$ – работе сжатия. В результате каждый

килограмм рабочего тела совершает за цикл полезную работу l_u , эквивалентную площади $ABCD$, ограниченной контуром цикла. Теплота, полезно используемая в цикле, равна разности подведенной и отведенной теплоты и эквивалентна площади $abcd$ (рис.5).

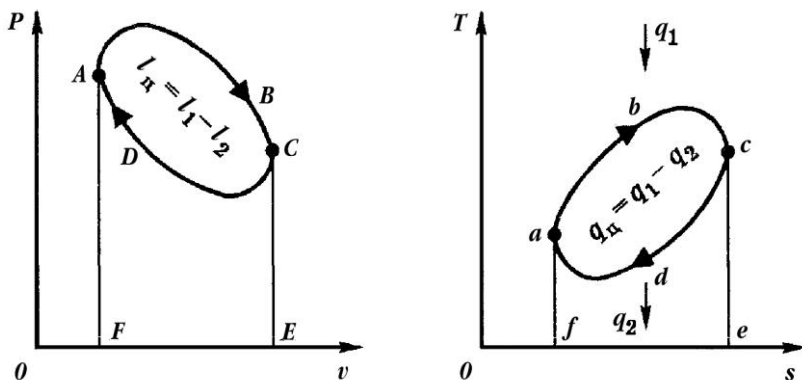


Рис. 5. Графическое изображение циклов

Совершенство прямого цикла оценивается термическим коэффициентом полезного действия (КПД) и определяется отношением работы цикла к количеству теплоты, подведённого к рабочему телу от горячего источника.

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Техническая термодинамика рассматривает процессы и наиболее выгодное их комбинирование, при которых должен был бы работать тепловой двигатель (в частности двигатель внутреннего сгорания (ДВС)) в идеальных условиях, чтобы дать наибольший рабочий эффект. При рассмотрении идеальных циклов исследуют процессы, происходящие в цилиндре ДВС, и оценивают факторы, влияющие на термический КПД. Наибольшее значение термического КПД в рассматриваемом интервале температур имеет цикл

Карно, состоящий из двух адиабатных и двух изотермических процессов (в реальных условиях не осуществим).

Изучение идеальных циклов ДВС имеет большое практическое значение, так как дает возможность при помощи опытных данных перенести результаты их изучения на действительные рабочие процессы машин.

В зависимости от способа подведения теплоты различают три термодинамических цикла, определяющие рабочий процесс двигателей внутреннего сгорания:

- с подводом теплоты **при постоянном объёме** – **цикл Отто** ($v = const$). Цикл характерен для двигателей с искровым зажиганием смеси (бензиновые, газовые);

- с подводом теплоты **при постоянном давлении** – **цикл Дизеля** ($p = const$). По данному циклу работают компрессорные дизельные двигатели, в которых топливо в цилиндрах распыляется сжатым воздухом;

- со **смешанным подводом теплоты**, т.е. с подводом теплоты как при постоянном объёме, так и при постоянном давлении – **цикл Тринклера** ($v = const, p = const$). Цикл характерен для бескомпрессорных дизелей с распылением топлива в цилиндрах от механического сжатия.

Два последних цикла характерны для двигателей с внутренним смесеобразованием.

Цикл Отто состоит из двух изохор и двух адиабат (рис. 6). Имея начальное давление p_1 и объём v_1 (положение поршня *I*), горючая смесь подвергается в цилиндре адиабатному сжатию (линия 1-2) до объёма v_2 (положение поршня *II*), вследствие чего его давление возрастает до p_2 . Далее при постоянном объёме, обусловленном остановкой поршня в верхней мертвой точке, (линия 2-3) к горючей смеси подводится некоторое количество тепла q_1 (горение), вследствие чего его давление возрастает до p_3 . Постоянство объёма объясняется практически мгновенной скоростью сгорания топлива, находящегося в составе го-

рючей смеси в цилиндре двигателя. После этого газ (продукты горения) адиабатно расширяется до объема $v_4 = v_1$ (положение поршня l). От газа в изохорном процессе (линия $4-1$) отводится в холодильник тепло q_2 (происходит мгновенное падение давления продуктов горения с p_4 до p_1 при открытом выпускном клапане) и рабочее тело приходит в первоначальное состояние (точка 1). Процесс падения давления в цилиндре вследствие выхлопа продуктов сгорания в атмосферу условно принимается за изохорный процесс $4-1$, так как работа при выхлопе равна нулю.

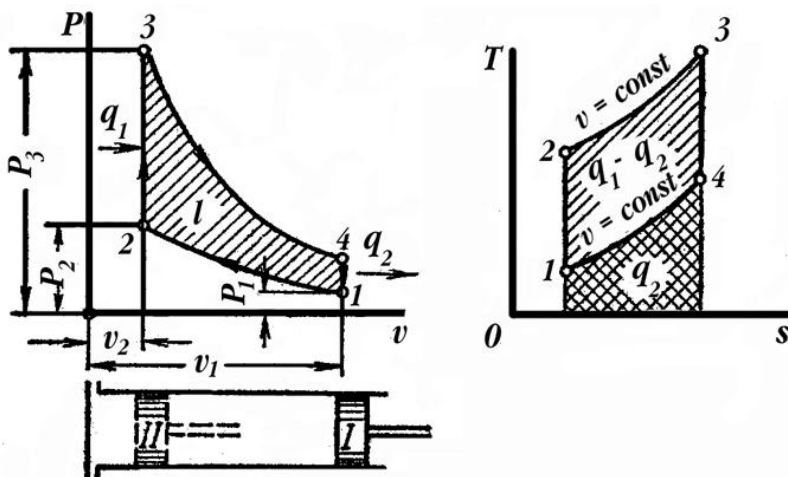


Рис. 6. Термодинамический цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном объёме (цикл Отто)

Процессы впуска и выпуска, осуществляемые при изменяющемся количестве газа и не являющиеся термодинамическими, в цикле не рассматриваются.

Основное отличие **цикла Дизеля** (рис. 7) заключается в том, что подача топлива в цилиндр и, соответственно, его сгорание растянуто во времени. А так как в результате пневматического распыления в цилиндр поступает практически готовая горючая смесь, воспламеняется мгновенно и

горит по мере поступления, то рост давления компенсируется увеличением объёма цилиндра в результате движения поршня в нижнюю мертвую точку. В итоге подвод теплоты происходит при постоянном давлении.

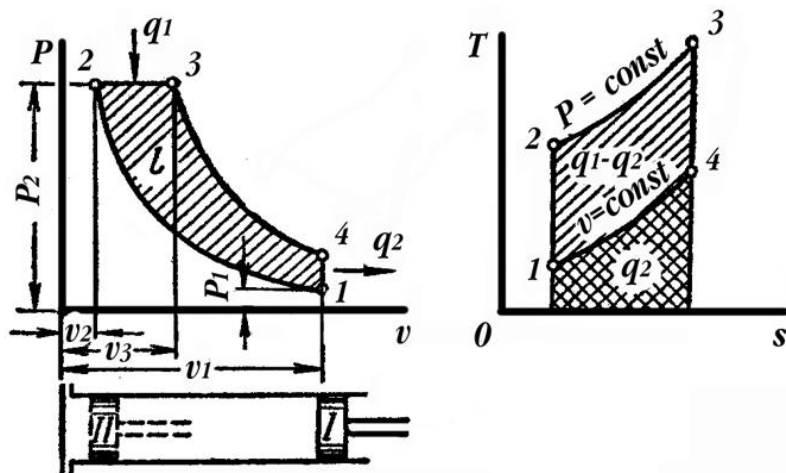


Рис. 7. Термодинамический цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении (цикл Дизеля)

Цикл Тринклера (рис. 8) предусматривает механический распыл топлива при поступлении его в цилиндр через форсунку. Это приводит к задержке воспламенения, во время которой происходит смесеобразование. К моменту воспламенения горючей смеси в цилиндре накапливается некоторое количество топлива и его сгорание происходит в условиях постоянного объёма, как и в карбюраторном двигателе. Но так как подача топлива растянута во времени, горение продолжается при движении поршня на такте расширения и давление в цилиндре при этом, как и в цикле Дизеля, остаётся постоянным.

Процессы сжатия, расширения и отвода теплоты во всех трёх циклах одинаковы.

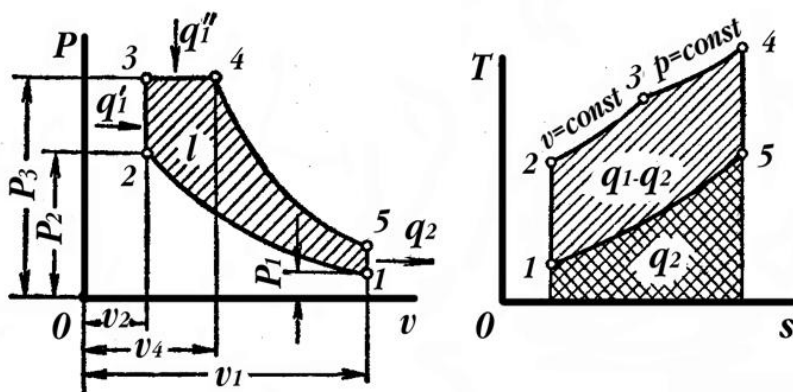


Рис. 8. Термодинамический цикл ДВС со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера)

Циклы ДВС характеризуются параметрами цикла: степенью сжатия ϵ , степенью повышения давления λ и степенью предварительного расширения ρ .

Совершенство цикла оценивается термическим КПД:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)}.$$

Цикл со смешанным подводом теплоты при практическом применении имеет несколько больший термический КПД и находит широкое применение в современных двигателях внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия.

Задача 2

Для решения задачи необходимо использовать теоретический материал по термодинамическим процессам, теплоемкости и энтропии газов, а также первый и второй законы термодинамики.

Условия задачи:

Определить параметры рабочего тела в характерных точках идеального цикла поршневого двигателя внутренне-

го сгорания если известны давление P_1 и температура t_1 рабочего тела в начале сжатия.

Степень сжатия ε , степень повышения давления λ , степень предварительного расширения ρ – заданы индивидуально.

Определить работу, получаемую от цикла, его термический КПД и изменение энтропии отдельных процессов цикла. За рабочее тело принять воздух, считая теплоемкость его в расчетных интервалах температур постоянной, построить на миллиметровой бумаге в масштабе этот цикл в координатах P - v и T - s . Дать к полученным графикам соответствующие пояснения.

Таблица 3.

Исходные данные и искомые показатели

Дано:	Определить:	
$P_1 = 0,09 \text{ МПа};$	$v_1, v_2, v_3, v_4, v_5,$	$s_2-s_1,$
$t_1 = 40^\circ\text{C};$	$P_2, P_3, P_4, P_5,$	$s_3-s_2,$
$\varepsilon = 17;$	$T_2, T_3, T_4, T_5,$	$s_4-s_3,$
$\lambda = 1,6;$	$l,$	$s_5-s_4,$
$\rho = 1,2.$	$\eta_t,$	$s_1-s_5.$

Решение:

Удельный объем воздуха ($\text{м}^3/\text{кг}$) в точке 1 цикла, соответствующей начальному состоянию, находится из характеристического уравнения:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \cdot (273 + 40)}{0,09 \cdot 10^6} = 1,0,$$

где $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ – индивидуальная газовая постоянная воздуха.

Так как сжатие происходит по адиабатному процессу (рис. 6-8), то параметры состояния рабочего тела в точке 2 цикла определяются выражениями:

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{1,0}{17} = 0,0588 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 313 \cdot 17^{1,41-1} = 1000 \text{ К},$$

где k – показатель адиабаты, для воздуха равен 1,41.

$$P_2 = \frac{RT_2}{v_2} = \frac{287 \cdot 1000}{0,0588} = 4880952 \text{ Па} = 4,88 \text{ МПа}.$$

В процессе 2-3 цикла осуществляется изохорный подвод теплоты в количестве q'_1 . Исходя из этого, параметры рабочего тела в точке 3 будут иметь следующие значения:

$$v_3 = v_2 = 0,0588 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = 1000 \cdot 1,6 = 1600 \text{ К};$$

$$P_3 = P_2 \cdot \lambda = 4,88 \cdot 1,6 = 7,81 \text{ МПа}$$

Линия 3-4 на диаграмме изображает изобарный процесс подвода теплоты в количестве q''_1 . Исходя из условий изобарного процесса, параметры рабочего тела в точке 4 составят:

$$P_4 = P_3 = 7,81 \text{ МПа};$$

$$v_4 = v_3 \cdot \rho = 0,0588 \cdot 1,2 = 0,0705 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$T_4 = T_3 \cdot \rho = 1600 \cdot 1,2 = 1920 \text{ К}.$$

Дальнейший процесс расширения происходит по адиабате 4-5. Параметры состояния рабочего тела в точке 5 определяются выражениями:

$$v_5 = v_1 = 1,0 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$T_5 = T_1 \cdot \lambda \cdot \rho^k = 313 \cdot 1,6 \cdot 1,2^{1,41} = 648 K;$$

$$P_5 = \frac{R \cdot T_5}{v_5} = \frac{287 \cdot 648}{1,0} = 185976 \text{ Па} = 0,186 \text{ МПа}.$$

Количество подведенной теплоты в цикле ($\kappa\text{Дж}/\kappa\text{г}$) составит:

$$\begin{aligned} q_1 &= q_1' + q_1'' = C_v \cdot (T_3 - T_2) + C_p \cdot (T_4 - T_3) = \\ &= 0,722 \cdot (1600 - 1000) + 1,012 \cdot (1920 - 1600) = 757, \end{aligned}$$

где $C_v = C_{\mu v} / \mu = 0,722 \text{ кДж}/(\kappa\text{г} \cdot K)$,

$C_p = C_{\mu p} / \mu = 1,012 \text{ кДж}/(\kappa\text{г} \cdot K)$ – соответственно удельные массовые теплоемкости воздуха в процессах постоянного объема и постоянного давления.

Отведенная теплота цикла (процесс 5-1) равна, $\kappa\text{Дж}/\kappa\text{г}$:

$$q_2 = C_v (T_5 - T_1) = 0,722 \cdot (648 - 313) = 242.$$

Полезная работа цикла составит, $\kappa\text{Дж}/\kappa\text{г}$:

$$l = q_1 - q_2 = 757 - 242 = 515.$$

Термический КПД цикла равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{242}{757} = 0,68 \text{ (68\%)}. \quad \square$$

Изменение энтропии в процессах цикла определяется по формуле:

$$\Delta s = C_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Адиабатные процессы 1-2 и 4-5:

$$s_2 - s_1 = s_5 - s_4 = 0.$$

Изохорный процесс 2-3:

$$s_3 - s_2 = C_V \cdot \ln \frac{T_3}{T_2} = 0,722 \cdot \ln \frac{1600}{1000} = 0,339 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Изобарный процесс 3-4:

$$s_4 - s_3 = C_P \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} = 1,012 \cdot \ln \frac{1920}{1600} = 0,185 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Изохорный процесс 5-1:

$$s_1 - s_5 = C_V \cdot \ln \frac{T_1}{T_5} = 0,722 \cdot \ln \frac{313}{648} = -0,525 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

В зависимости от значений параметров цикла λ и ρ в результате расчетов будет получен один из трёх циклов ДВС. По результатам вычислений, приведённых в таблице 4, строится в масштабе диаграмма цикла в координатах P - v и T - s (рис. 9).

Для построения цикла в координатах T - s необходимо вычислить значение энтропии газа в начальном состоянии по формуле, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$:

$$\begin{aligned} s_1 &= C_P \cdot \ln \frac{T_1}{273} - R \cdot \ln \frac{P_1}{1,01 \cdot 10^5} = \\ &= 1,012 \cdot \ln \frac{313}{273} - 0,287 \cdot \ln \frac{0,9 \cdot 10^5}{1,01 \cdot 10^5} = 0,172. \end{aligned}$$

Таблица 4.

Расчетные данные для построения цикла ДВС

Параметр	Координаты характерных точек цикла				
	1	2	3	4	5
$P, \text{МПа}$	0,09	4,88	7,81	7,81	0,186
$v, \text{м}^3/\text{кг}$	1,0	0,0588	0,0588	0,0705	1,0
$T, \text{К}$	313	1000	1600	1920	648
$s, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	0,172	0,172	0,511	0,696	0,696

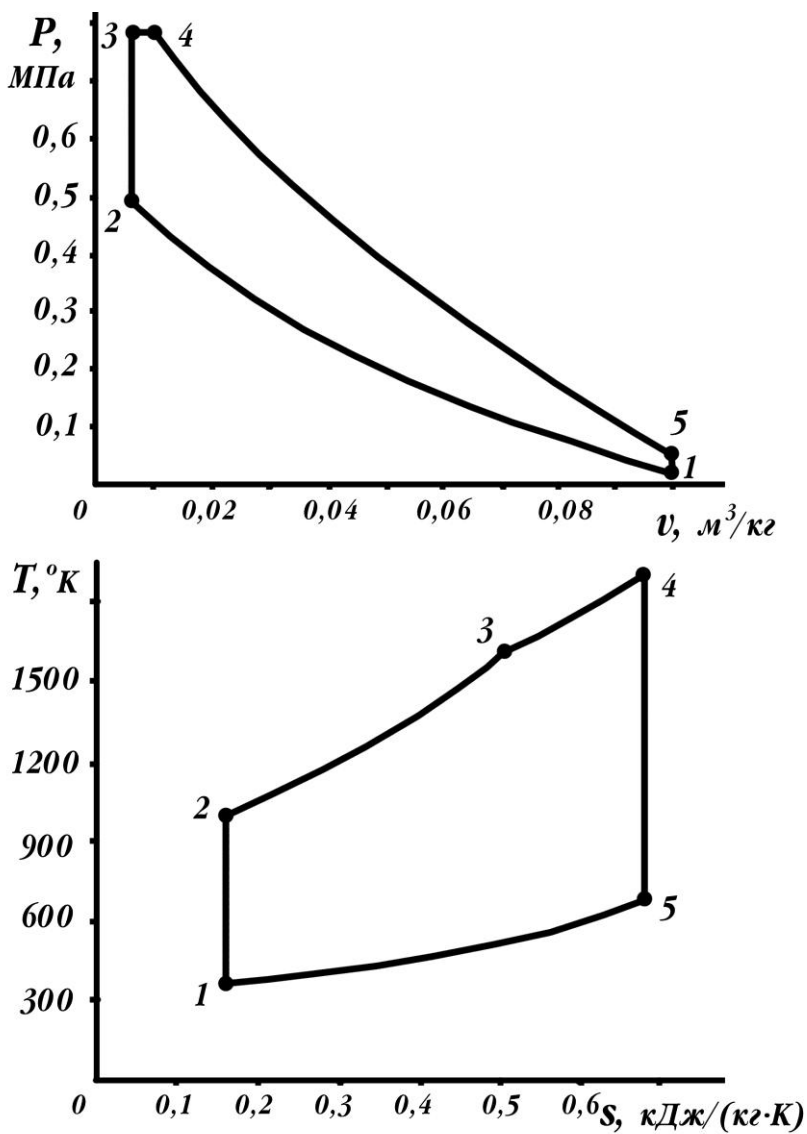


Рис. 9. Расчетная диаграмма термодинамического цикла ДВС

Проверка:

Для цикла двигателя должно быть:

$$\sum_{i=1}^n (\Delta s)_i = 0,$$

где n – число участков в цикле.

$$\begin{aligned} (s_2 - s_1) + (s_3 - s_2) + (s_4 - s_3) + (s_5 - s_4) + (s_1 - s_5) = \\ = 0 + 0,339 + 0,185 + 0 - 0,525 = 0, \end{aligned}$$

следовательно, вычисления выполнены правильно.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите формулировку второго закона термодинамики.
2. Что называется круговым процессом (циклом)?
3. Чем определяется работа газа в процессе (и за цикл) на p - v -диаграмме?
4. От чего зависит работа цикла?
5. Чем оценивается эффективность прямого и обратного термодинамического циклов?
6. Назовите область применения прямого и обратного цикла.
7. Приведите термодинамическую схему теплового двигателя внутреннего сгорания.
8. Из каких процессов состоит цикл Карно и в чём его особенность?
9. Как можно увеличить КПД цикла Карно?
10. Назовите термодинамические циклы ДВС, их особенности и практическое применение.
11. Изобразите циклы ДВС в координатах P - v и T - s .
12. Назовите параметры циклов ДВС, их определение и влияние на эффективность цикла.
13. При каких условиях сравнивают эффективность циклов ДВС?
14. Какой термодинамический цикл ДВС имеет наибольший термический КПД?

ВОДЯНОЙ ПАР

Водяной пар широко используется во многих отраслях техники и, прежде всего, в теплоэнергетике. Это реальный газ, который является основным рабочим телом в паросиловых установках. На производстве водяной пар получают в котельных установках в условиях постоянного давления.

Процесс парообразования условно делят на три стадии: нагрев воды до температуры кипения, превращение воды в пар в результате кипения (насыщения), перегрев пара.

При подводе теплоты к воде её температура постепенно повышается, пока не достигнет температуры кипения при данном давлении. При этом удельный объём жидкости сначала уменьшается (при нагреве от 0°C до 4°C), а затем возрастает. При дальнейшем подводе теплоты начинается кипение воды с сильным увеличением объёма. Образуется двухфазная среда – смесь воды и пара, называемая **влажным насыщенным паром**. По мере подвода теплоты количество жидкой фазы уменьшается, а паровой – растёт. Температура смеси при этом остается неизменной, так как вся теплота расходуется на испарение жидкой фазы. Процесс является одновременно и **изобарным**, и **изотермическим**. После полного испарения жидкой фазы пар становится **сухим насыщенным**, его температура остается равной температуре насыщения (кипения) при данном давлении. При сообщении сухому насыщенному пару теплоты его температура будет увеличиваться, а пар станет **перегретым**.

Водяной пар – это реальный газ, и его свойства отличаются от свойств идеального газа. Поэтому на практике при проведении теплотехнических расчетов пользуются диаграммой водяного пара в координатах $i-s$, фрагмент которой представлен на рис. 10.

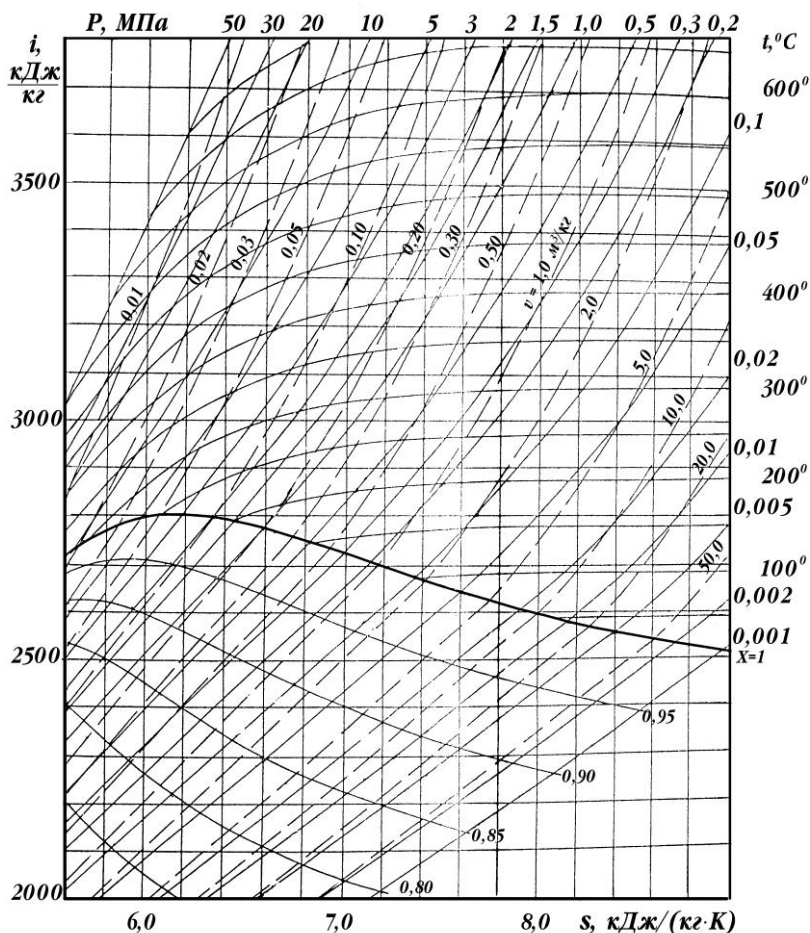


Рис. 10. Диаграмма i - s водяного пара

Общий метод расчёта по диаграмме состоит в следующем: по известным параметрам наносят точку, соответствующую начальному состоянию рабочего тела (рис. 11), затем проводят линию процесса и определяют его параметры в конечном состоянии. Далее вычисляются требуемые показатели.

Задача 3

Для решения задачи необходимо изучить общие понятия о паре, как реальном газе, процессы парообразования, таблицы и диаграммы $P-v$, $T-s$ и $i-s$ водяного пара, циклы Карно и Ренкина для паросиловых установок.

Задачу решают с помощью диаграммы $i-s$ для водяного пара, после чего следует представить ее графическое решение в координатах $i-s$.

Условия задачи:

Показать сравнительным расчетом целесообразность применения пара высоких начальных параметров и низкого конечного давления на примере паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина, определив располагаемый теплоперепад, термический КПД цикла и удельный расход пара для двух различных значений начальных и конечных параметров пара. Указать конечное значение степени сухости пара x_2 (при давлении P_2).

Дано:

I вариант

$$P_1 = 1,0 \text{ МПа};$$

$$t_1 = 280^\circ\text{C};$$

$$P_2 = 0,08 \text{ МПа};$$

II вариант

$$P_1 = 10 \text{ МПа};$$

$$t_1 = 550^\circ\text{C};$$

$$P_2 = 0,004 \text{ МПа}.$$

Определить:

$$i_1 - i_2;$$

$$\eta_i;$$

$$d;$$

$$x_2;$$

$$i_1 - i_2;$$

$$\eta_i;$$

$$d;$$

$$x_2.$$

Решение:

Термический КПД цикла Ренкина выражается формулой:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'},$$

где i_1 – энтальпия перегретого пара, кДж/кг ;

i_2 – энтальпия пара в конце расширения, кДж/кг ;

i_2' – энтальпия конденсата (кДж/кг), определяется выражением:

$$i_2' = C_p \cdot t_2,$$

где $C_p = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ – теплоемкость конденсата;

t_2 – температура конденсата при давлении P_2 , $^{\circ}\text{C}$.

Величину $(i_1 - i_2)$ называют располагаемым теплоспадом, за счет которого производится полезная работа в цикле Ренкина. Величина $(i_1 - i_2')$ отражает количество теплоты, затраченной в цикле.

Для определения значения энтальпии i_1 , находят на диаграмме i - s водяного пара изобару P_1 и изотерму t_1 (рис. 10). Пересечение этих линий образует точку 1 (рис. 11), которая соответствует состоянию перегретого пара. По этой точке на оси ординат определяется величина i_1 .

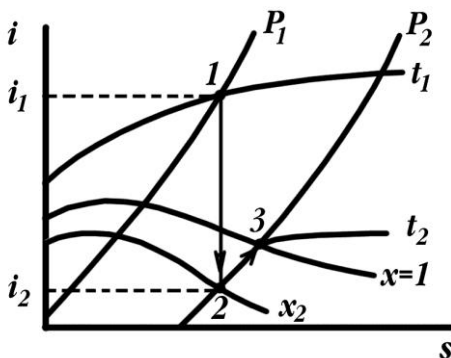


Рис. 11. Схема графического решения задачи по диаграмме i - s

Так как в цикле Ренкина процесс расширения пара осуществляется по адиабате, то на диаграмме i - s он изо-

бражается вертикальной линией 1-2. В свою очередь, при пересечении адиабаты расширения, проведённой из точки 1, с изобарой P_2 получаем точку 2, соответствующую состоянию пара в конце расширения. По этой точке на оси ординат определяется величина энтальпии i_2 .

После этого отработавший пар конденсируется при неизменном давлении P_2 и соответствующей этому давлению температуре t_2 . Так как в области влажного насыщенного пара изотермы и изобары совпадают, для определения температуры отработанного пара из точки 2 диаграммы движемся по изобаре до пограничной линии $x = 1$. При степени сухости $x = 1$ (точка 3) изотерма отклоняется вправо от изобары. Эта изотерма соответствует значению t_2 .

Линия постоянной степени сухости, проходящая через точку 2, соответствует величине x_2 .

По заданным значениям параметров из диаграммы $i-s$ (рис. 10) следует:

I вариант	II вариант
$i_1 = 3010 \text{ кДж/кг};$	$i_1 = 3510 \text{ кДж/кг};$
$i_2 = 2520 \text{ кДж/кг};$	$i_2 = 2040 \text{ кДж/кг};$
$t_2 = 95^\circ\text{C};$	$t_2 = 30^\circ\text{C};$
$x_2 = 0,94;$	$x_2 = 0,79;$
$i_1 - i_2 = 3010 - 2520 =$ $= 490 \text{ кДж/кг};$	$i_1 - i_2 = 3510 - 2040 =$ $= 1470 \text{ кДж/кг};$
$i_1 - i'_2 = 3010 - 4,19 \cdot 95 =$ $= 2612 \text{ кДж/кг};$	$i_1 - i'_2 = 3510 - 4,19 \cdot 30 =$ $= 3390 \text{ кДж/кг};$
$\eta_t = \frac{490}{2612} = 0,188 (18,8\%);$	$\eta_t = \frac{1470}{3390} = 0,434 (43,4\%);$
$d = \frac{3600}{i_1 - i_2} = \frac{3600}{3010 - 2520} =$ $= 7,34 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}).$	$d = \frac{3600}{i_1 - i_2} = \frac{3600}{3510 - 2040} =$ $= 2,45 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}).$

Здесь 3600 – эквивалент 1 кВт·ч в кДж.

Схему графического решения задачи по диаграмме водяного пара (рис. 11) изобразить для обоих вариантов. Дополнительно к решению задачи изобразить схему простейшей паросиловой установки и дать краткое описание ее работы. Представить цикл Ренкина в координатных осях $P-v$ и $T-s$.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют водяным паром?
2. В каких тепловых установках водяной пар используется в качестве рабочего тела?
3. Что представляет собой влажный насыщенный пар?
4. Что такое сухой насыщенный пар?
5. Что называют перегретым паром?
6. Каким параметром оценивается качество влажного пара?
7. Что называется степенью сухости пара?
8. Что понимают под критическими параметрами водяного пара?
9. Какие термодинамические процессы характерны для процессов парообразования и конденсации?
10. Что называют пограничной линией на is -диаграмме?
11. В какой области is -диаграммы изобары и изотермы совпадают?
12. Изобразите на is -диаграмме процессы расширения, перегрева и дросселирования пара?
13. Изобразите принципиальную схему паросиловой установки, работающей по циклу Ренкина.
14. В чём принципиальные отличия паросиловых установок, работающих по циклу Ренкина и циклу Карно?
15. Изобразите термодинамический цикл Ренкина и назовите образующие его процессы.
16. Как определить КПД цикла Ренкина?
17. Как влияют на термический КПД паросиловой установки начальные и конечные параметры пара?
18. Назовите пути повышения термического КПД паросиловой установки.

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Теплообмен – это самопроизвольный процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры.

Различают три основных вида передачи теплоты: **теплопроводность, конвекция, тепловое излучение**.

Теплопроводностью называется молекулярный перенос теплоты в сплошной среде. В этом случае теплота передается за счет непосредственного соприкосновения частиц, имеющих различную температуру. Это приводит к обмену энергией между молекулами, атомами или свободными электронами. Теплопроводность возможна в твердых, жидких и газообразных средах.

Конвекцией называется перенос теплоты при перемещении объемов газа или жидкости в пространстве. Теплообмен между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела называется **конвективным теплообменом**. Это теплообмен, обусловленный совместным действием конвективного и молекулярного переносов теплоты. Конвективный теплообмен между движущейся средой и поверхностью ее раздела с другой средой – твердым телом, жидкостью или газом называется **теплоотдачей**.

Теплообмен излучением (лучистый теплообмен) – процесс передачи теплоты в виде электромагнитных волн.

Все рассмотренные виды переноса энергии (теплопроводность, конвекция и излучение) во многих случаях осуществляются совместно. В этом случае теплообмен называется **сложным** или **комбинированным**.

Устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя или несколькими теплоносителями, называется **теплообменным аппаратом** или **теплообменником**. Чаще всего в теплообменных аппаратах осуществляется передача теплоты от одного теплоносителя к другому, т.е.

нагревание одного теплоносителя происходит за счёт охлаждения другого.

Теплообменники с двумя теплоносителями разделяют на **смесительные, рекуперативные, регенеративные и с промежуточным теплоносителем.**

Наиболее простыми и компактными являются смесительные теплообменники. Регенеративные теплообменники и теплообменники с промежуточным теплоносителем используют для переноса теплоты вспомогательное вещество (промежуточный теплоноситель). В рекуперативных теплообменниках теплота от одного теплоносителя к другому передаётся через разделяющую их стенку.

Среди рекуперативных наиболее распространены трубчатые теплообменники, в которых один из теплоносителей движется в трубах, а другой – в межтрубном пространстве. В таких теплообменниках смешения теплоносителей не происходит, и они используются для самых разнообразных сочетаний греющего и нагреваемого веществ.

В зависимости от взаимного направления движения теплоносителей теплообменные аппараты могут быть прямоточными или противоточными (рис. 12).

В процессе расчёта рекуперативного теплообменника обычно задаются расходом нагреваемого теплоносителя, начальной и конечной температурой обоих теплоносителей. Выбирают тип теплообменника, определяют его тепловую мощность, расход горячего теплоносителя и площадь поверхности теплообмена, по которой устанавливают габаритные размеры аппарата.

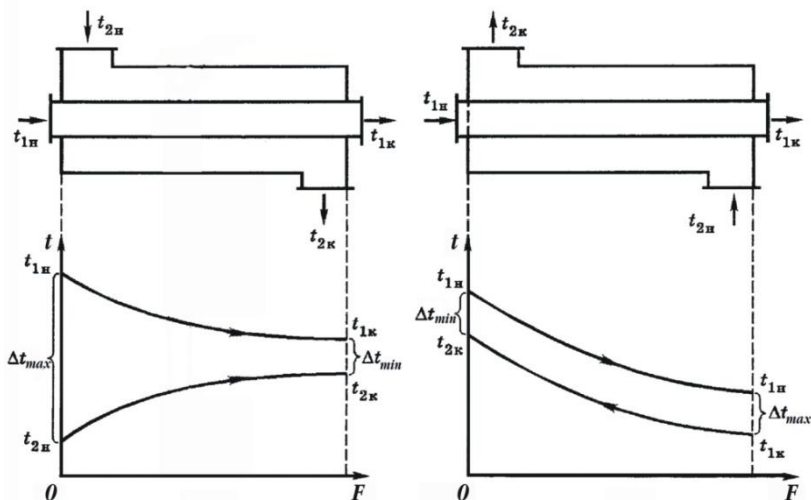


Рис. 12. Характер изменения температур теплоносителей в прямоточном и противоточном теплообменных аппаратах

Задача 4

Для решения задачи требуется проработать разделы по теплопередаче и теплообменным аппаратам в стационарном режиме.

Условия задачи:

Определить площадь поверхности нагрева газовойводяного рекуперативного теплообменника, работающего по противоточной схеме. Греющий теплоноситель – дымовые газы с начальной температурой t'_2 и конечной t''_2 . Расход воды через теплообменник G_6 , начальная температура воды t'_6 , конечная t''_6 . Коэффициент теплоотдачи от газов к стенке трубы α_2 и от стенки трубы к воде α_6 . Теплообменник выполнен из стальных труб с наружным диаметром $d = 50$ мм и толщиной стенки $\delta = 4$ мм. Коэффициент теплопроводности стали $\lambda = 62 \text{ Вт/(м·К)}$. Стенку считать чистой с обеих сторон.

Определить также площадь поверхности теплообмена при выполнении теплообменника по прямоточной схеме и сохранении остальных параметров неизменными.

Для обеих схем движения теплоносителей (противоточной и прямоточной) показать (без расчета) графики изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена (рис.12). Указать преимущества противоточной схемы.

Дано:

$$\alpha_2 = 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\alpha_6 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$G_6 = 100 \text{ кг/ч};$$

$$\lambda = 62 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$$

$$\delta = 4 \text{ мм};$$

$$t'_6 = 10^\circ \text{С};$$

$$t''_6 = 70^\circ \text{С};$$

$$t'_2 = 300^\circ \text{С};$$

$$t''_2 = 120^\circ \text{С};$$

$$d = 50 \text{ мм}.$$

Определить: $F, \text{ м}^2$.

Решение:

Учитывая, что по условиям задачи отношение наружного диаметра к внутреннему меньше двух, расчет можно вести по формулам теплопередачи для плоской стенки в стационарном режиме, т.е.:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{cp}},$$

где F – площадь поверхности теплообмена, исходя из среднего диаметра трубы, м^2 ;

Q – тепловой поток, Вт ;

k – коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

Δt_{cp} – средний температурный перепад между теплоносителями (средний температурный напор), $^\circ \text{С}$.

Тепловой поток определяется выражением, Вт:

$$Q = \frac{G_6 \cdot c \cdot (t_6'' - t_6')}{3600} = \frac{100 \cdot 4190 \cdot (70 - 10)}{3600} = 6983,$$

где $C = 4190$ Дж/(кг·К) – теплоемкость воды.

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_z} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_6}} = \frac{1}{\frac{1}{40} + \frac{0,004}{62} + \frac{1}{1000}} = 38,4.$$

Средний температурный напор определяется исходя из схемы противоточного движения теплоносителей, °С:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}} = \frac{(230 - 110)}{\ln \frac{230}{110}} = 163,$$

где $\Delta t_{\max} = t_z' - t_6'' = 300 - 70 = 230^\circ\text{C}$;

$\Delta t_{\min} = t_z'' - t_6' = 120 - 10 = 110^\circ\text{C}$.

Площадь поверхности теплообмена, м²:

$$F = \frac{6983}{38,4 \cdot 163} = 1,12.$$

В случае применения прямоточной схемы теплообменного аппарата средний температурный напор, °С:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln \frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}}} = \frac{(290 - 50)}{\ln \frac{290}{50}} = 136,$$

где $\Delta t_{\max} = t_z' - t_6' = 300 - 10 = 290^\circ\text{C}$;

$\Delta t_{\min} = t_z'' - t_6'' = 120 - 70 = 50^\circ\text{C}$.

Площадь поверхности теплообмена в данном случае составит, м^2 :

$$F = \frac{6983}{38,4 \cdot 136} = 1,34.$$

В соответствии с принятыми в задаче обозначениями построить графики изменения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена в произвольном масштабе.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется теплообменом?
2. Назовите основные виды передачи теплоты.
3. Что называется теплопроводностью?
4. Что называют конвекцией?
5. Что представляет собой лучистый теплообмен?
6. Что называют теплообменным аппаратом и каково его назначение?
7. Назовите виды теплообменных аппаратов.
8. По каким схемам движения теплоносителей выполняют рекуперативные теплообменные аппараты?
9. В чём заключается расчет рекуперативного теплообменного аппарата?
10. Какой физический смысл коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, от каких факторов зависит их величина?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Амерханов Р.А. Теплотехника: учебник для вузов / Р.А. Амерханов, Б.Х. Драганов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 432 с.

2. Круглов Г.А. Теплотехника: учебное пособие для вузов / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. – 2-е изд., стер. – СПб.: Лань, 2012. – 208 с.

3. Круглов Г.А. Теплотехника [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. – 2-е изд., стер. – Электрон. текстовые дан. (1 файл). – СПб.: Лань, 2012. – 208 с.: ил. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/3900>

4. Теплотехника. Практический курс [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов / Г.А. Круглов [и др.]. – Электрон. текстовые дан. – СПб.: Лань, 2017. – 192 с.: ил. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/96253>

Учебное издание

ТЕПЛОТЕХНИКА

*Учебно-методическое пособие
по курсу «Теплотехника»
для самостоятельной работы студентов*

Составители:
Щербинин Владимир Владимирович
Павленко Вадим Витальевич

Подписано в печать 22.11.2018 г. Формат 60х84/16.
Бумага для множительных аппаратов. Печать ризографная.
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 2,7. Уч.-изд. л. 2,2.
Тираж 50 экз. Заказ № ____

РИО Алтайского ГАУ
656049, г. Барнаул, пр. Красноармейский, 98,
тел. 203-299