

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**Т**еплотехника — это наука, занимающаяся проблемами получения, преобразования и использования энергии. Очевидно, что чем меньше потери будут при использовании или преобразовании энергии, тем выше будет эффективность производства и большую выгоду получит каждый человек.

Все большая энерговооруженность сельского хозяйства, необходимость ее рационального использования требуют от специалистов глубокого знания предмета теплотехники и ее составных частей: технической термодинамики, основ теплопередачи и применения тепла в сельском хозяйстве. Для решения именно этой задачи подготовлено настоящее учебное пособие.

Сжатые сроки изучения дисциплины (один семестр), необходимость изложения материала с достаточной математической строгостью, соответствующей высшему учебному заведению, а также практическая направленность материала, доступность и последовательность его изложения определили объем и структуру пособия. В плане практической направленности особое внимание уделено процессам образования пара, влажному воздуху, теплопередаче, отоплению и вентиляции, а также энергосбережению.

Структурно весь материал разбит на три раздела: основы технической термодинамики; основы теплопередачи и применение теплоты в сельском хозяйстве, что соответствует государственному общеобразовательному стандарту и учебной программе дисциплины «Теплотехника».

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Агроинженерия».

# ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

### 1.1.1. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Преобразование тепловой энергии в механическую энергию возможно только при посредстве какого-либо тела. Тело, с помощью которого тепловая энергия превращается в механическую, называется *рабочим*. Тела могут совершать работу только когда они расширяются. Способностью к существенному расширению (при подведении тепла) обладают тела, которые находятся в газообразном состоянии.

Для упрощения изучения свойств газообразных тел в технической термодинамике введено понятие так называемого *идеального газа*, в котором отсутствуют силы сцепления между молекулами, а их объем принимается настолько малым, что им можно пренебречь.

Водяной пар в технической термодинамике рассматривается как *реальный газ*, на который не распространяются законы и зависимости идеальных газов.

Основные параметры, характеризующие условия, в которых находится газообразное тело, — *давление, удельный объем, температура*.

*Давление* — результат ударов молекул газа о стенки сосуда; определяется силой, действующей по нормали на единицу поверхности.

В Международной системе единиц изменения СИ за единицу давления принят «паскаль»:  $1 \text{ Па} = \text{Н}/\text{м}^2$ . В практике используют обозначения «килопаскаль» (кПа), «мегапаскаль» (МПа) и др.:  $1 \text{ МПа} = 10^3 \text{ кПа} = 10^6 \text{ Па}$ .

В технике используют и внесистемные единицы измерения давления: техническая атмосфера  $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 =$

$= 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 1 \text{ бар} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па} = 10^4 \text{ мм вод. ст.} = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$

Давление в замкнутом пространстве называется *абсолютным*. Оно может быть больше или меньше атмосферного давления:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} + p_{\text{изб}}; \quad (1.1)$$

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}}, \quad (1.1a)$$

где  $p_{\text{абс}}$  — абсолютное давление;  $p_{\text{бар}}$  — барометрическое (атмосферное) давление;  $p_{\text{изб}}$  — избыточное давление;  $p_{\text{вак}}$  — вакуумметрическое давление.

Избыточное давление измеряется манометрами, разрежение (вакуум) — вакуумметрами.

*Удельный объем* — объем единицы массы рабочего тела ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ):

$$v = \frac{V}{M}, \quad (1.2)$$

где  $V$  — объем рабочего тела,  $\text{м}^3$ ;  $M$  — масса рабочего тела,  $\text{кг}$ .

Величина, обратная удельному объему, — *плотность* ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ):

$$\rho = \frac{1}{v}. \quad (1.3)$$

Если масса киломоля  $\mu$ , а его объем ( $\mu v$ ), тогда удельный объем и плотность одного киломоля:

$$v = \frac{(\mu v)}{\mu}; \quad (1.4)$$

$$\rho = \frac{\mu}{(\mu v)}. \quad (1.4a)$$

При нормальных условиях удельный объем и плотность одного киломоля ( $P_o = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па}$ ,  $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $\mu v_o = 22,4146 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ ):

$$v_o = \frac{22,4}{\mu}; \quad \rho_o = \frac{\mu}{22,4}. \quad (1.5)$$

*Температура* характеризует степень нагрева тела, т. е. степень интенсивности движения молекул или меру его средней кинетической энергии.

В термодинамике в качестве параметра состояния газа используется *термодинамическая* (абсолютная) *температура* ( $T$ ). Она измеряется в градусах Кельвина (К), пропорциональна средней кинетической энергии движения молекул и отсчитывается от абсолютного нуля.

Кроме термодинамической (абсолютной) шкалы Кельвина применяется и Международная (практическая) столбчатая шкала ( $t$ ), в которой единица измерения температуры — градус Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ). За ноль градусов ( $0^{\circ}\text{C}$ ) в этой шкале принята температура тающего льда, а за  $100^{\circ}\text{C}$  — температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении.

Величина градуса Цельсия равна градусу Кельвина. Связь между этими шкалами

$$T = t + 273,15. \quad (1.6)$$

*Закон Бойля–Мариотта* устанавливает зависимость удельного объема газа от его давления: при постоянной температуре он обратно пропорционален давлению:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{p_1}{p_2}, \quad (\text{при } p = \text{const}); \quad (1.7)$$

$$p_1 v_1 = p_2 v_2; \quad (1.7a)$$

$$pv = \text{const} \quad (\text{при } t = \text{const}), \quad (1.7b)$$

где  $v_1, v_2, p_1, p_2$  — удельные объемы и давления двух различных состояний газа.

*Закон Гей-Люссака* устанавливает зависимость удельного объема газа от его температуры: при постоянном давлении он прямо пропорционален абсолютным температурам:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (\text{при } p = \text{const}); \quad (1.8)$$

$$\frac{v_2}{T_2} = \frac{v_1}{T_1}; \quad (1.8a)$$

$$\frac{v}{T} = \text{const} \quad (\text{при } p = \text{const}), \quad (1.8b)$$

где  $T_1, T_2$  — температура двух различных состояний газа.

*Закон Шарля* устанавливает зависимость давления газа от его температуры: при постоянном удельном объеме аб-

солютное давление газа прямо пропорционально температуре:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (\text{при } v = \text{const}); \quad (1.9)$$

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_1}{T_1}; \quad (1.9a)$$

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad (\text{при } v = \text{const}). \quad (1.9б)$$

Связь между основными параметрами состояния идеального газа устанавливается уравнением Б. Клапейрона (1834 г.), которое он вывел на основе законов Бойля–Мариотта и Гей-Люссака. Это уравнение называется *характеристическим*, или уравнением *состояния* газа:

$$pv = RT, \quad (1.10)$$

где  $R$  — газовая постоянная данного газа, Дж/(кг·К).

Для  $M$  кг газа уравнение (1.10) имеет вид

$$pV = MRT. \quad (1.11)$$

Применив это уравнение к одному киломолю газа, Д. И. Менделеев получил следующее уравнение:

$$p\mu v = \mu RT, \quad (1.12)$$

где  $\mu R$  — универсальная газовая постоянная любого газа, кДж/(кмоль·К).

Эта величина представляет собой работу, совершаемую одним киломолем идеального газа при изменении его температуры на один градус при  $p = \text{const}$ .

По закону Авогадро при одинаковых значениях давления ( $p = \text{const}$ ) и температуры ( $T = \text{const}$ ) один киломоль любого газа занимает одинаковый объем, поэтому величина универсальной газовой постоянной ( $\mu R$ ) не зависит от вида газа. Ее значение при нормальных условиях:

$$\mu R = \frac{p\mu v}{T}, \quad (1.13)$$

$$\mu R = \frac{101320 \cdot 22,4}{273,1} = 8314 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Тогда газовая постоянная для любого газа  $R = 8314/\mu$ .

### 1.1.2. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

Газовая смесь определяется составом и количеством каждого из компонентов, входящего в смесь, и может быть задана массовыми или объемными долями.

*Массовая доля*  $m_i$  определяется отношением массы  $i$ -го компонента газа к массе всего газа:

$$m_i = \frac{M_i}{M}, \quad (1.14)$$

где  $M_i$  — масса  $i$ -го компонента, кг;  $M$  — масса всей смеси, кг.

*Объемная доля*  $r_i$  — это отношение объема  $i$ -го компонента, входящего в смесь, к объему всей смеси при условии, что объем каждого компонента отнесен к давлению и температуре смеси (приведенный объем):

$$r_i = \frac{V_i}{V}, \quad (1.15)$$

где  $V_i$  — приведенный объем  $i$ -го компонента смеси газа, м<sup>3</sup>;  $V$  — общий объем газовой смеси, м<sup>3</sup>.

Перевод массовых долей в объемные доли:

$$r_i = \frac{m_i / \mu_i}{\sum_{i=1}^n m_i / \mu_i}, \quad (1.16)$$

где  $\mu_i$  — масса киломоля  $i$ -го компонента смеси газа, кг.

Перевод объемных долей в массовые доли:

$$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}. \quad (1.17)$$

Плотность смеси  $\rho_{\text{см}}$ , кг/м<sup>3</sup>, определяется через объемные или массовые доли:

$$\rho_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i; \quad (1.18)$$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i / \rho_i}. \quad (1.19)$$

Удельный объем смеси  $v_{\text{см}}$ , м<sup>3</sup>/кг — величина, обратная плотности:

$$v_{\text{см}} = \frac{1}{\rho_{\text{см}}}. \quad (1.20)$$

Кажущуюся молекулярную массу смеси можно получить из уравнений (1.15) и (1.16):

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \mu_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i / \mu_i}. \quad (1.21)$$

Газовую постоянную данной смеси  $R_{\text{см}}$ , Дж/(кг·К), можно выразить через газовые постоянные отдельных ее компонентов:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n m_i R_i \quad (1.22)$$

или через кажущуюся молекулярную массу смеси:

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}. \quad (1.23)$$

Давление газовой смеси  $p_{\text{см}}$ , Па, по закону Дальтона равно сумме парциальных давлений отдельных компонентов смеси:

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (1.24)$$

где  $p_{\text{см}}$  — давление газовой смеси, Па;  $p_i$  — парциальное давление (при объеме газовой смеси) отдельного компонента, Па.

Парциальное давление  $p_i$  отдельных компонентов газовой смеси определяется через их объемные доли:

$$p_i = p_{\text{см}} r_i \quad (1.25)$$

или через массовые доли:

$$p_i = m_i \frac{r_i}{r_{\text{см}}} p_{\text{см}}. \quad (1.26)$$

### 1.1.3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

Количество теплоты, необходимое для нагревания единицы количества вещества на один градус, называется *удельной теплоемкостью*.

Различаются удельные теплоемкости:

- массовая  $c$ , Дж/(кг·К);
- объемная  $c'$ , Дж/(м<sup>3</sup>·К);
- мольная ( $\mu c$ ), Дж/(кмоль·К).

Широкое применение в термодинамике имеют теплоемкости при постоянном давлении  $c_p$  и при постоянном объеме  $c_v$ . Теплоемкость идеальных газов зависит от температуры газа и увеличивается при ее повышении. Зависимость теплоемкости от температуры нелинейная, но в практических расчетах ее принимают линейной:

$$c = a + bt, \quad (1.27)$$

где  $a$ ,  $b$  — опытные коэффициенты;  $t$  — температура газа, °С.

Для более точных расчетов в справочной литературе приводятся уточненные аналитические зависимости.

Согласно определению теплоемкость

$$c = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta T} = \frac{dq}{dT} \quad (1.28)$$

называется *истинной* и соответствует определенной температуре. При практических расчетах в широком температурном диапазоне используется *средняя теплоемкость*

$$c_m = \frac{c_m|_0^{t_2} t_2 - c_m|_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}, \quad (1.29)$$

где  $c_m|_0^{t_2}$ ,  $c_m|_0^{t_1}$  — средние значения теплоемкостей, приводимые в таблицах в интервале температур от 0°С до  $t_1$  и  $t_2$ °С.

В приближенных расчетах (или в интервале температур от минус 50 до плюс 150°С) зависимостью теплоемкости от температуры пренебрегают и считают ее постоянной, соответствующей температуре 0°С (табл. 1.1).

Т а б л и ц а 1.1

## Мольная теплоемкость идеальных газов

Газ	кДж/(кмоль·К)		ккал/(кмоль·°С)	
	$\mu c_v$	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_p$
Одноатомный	12,6	20,9	3	5
Двухатомный	20,9	29,3	5	7
Трех- и более	29,3	37,3	7	9

В термодинамике важное значение имеет соотношение теплоемкостей  $c_p$  и  $c_v$ , которое обозначается буквой  $k$  и называется *показателем адиабаты*:

$$k = \frac{c_p}{c_v}. \quad (1.30)$$

По значениям теплоемкостей идеальных газов (табл. 1.1) можно получить показатели адиабаты:

- для одноатомного газа  $k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = \frac{5}{3} = 1,67$ ;
- для двухатомного газа  $k = \frac{7}{5} = 1,4$ ;
- для трех- и многоатомного газа  $k = \frac{9}{7} = 1,29$ .

Количество теплоты  $q$ , Дж, подводимой или отводимой в термодинамическом процессе, можно вычислить по следующим формулам, которые справедливы и для истинной теплоемкости:

$$q = M c_m (t_2 - t_1); \quad (1.31)$$

$$q = V_0 c'_m (t_2 - t_1); \quad (1.32)$$

$$q = a \mu c_m (t_2 - t_1), \quad (1.33)$$

где  $V_0$  — объем газа при нормальных условиях, м<sup>3</sup>;  $a$  — количество киломолей.

Связь между различными теплоемкостями:

$$c_m = \frac{\mu c_m}{\mu}; \quad (1.34)$$

$$c'_m = \frac{\mu c_m}{22,4} = c_m \rho_0. \quad (1.35)$$

Тогда теплоемкости газовых смесей

$$c_m = \sum_{i=1}^n \mu c_i m_i; \quad (1.36)$$

$$c' = \sum_{i=1}^n c'_i r_i; \quad (1.37)$$

$$\mu c = \sum_{i=1}^n \mu c_i r_i. \quad (1.38)$$

#### 1.1.4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

При подводе (отводе) тепла к газу (рабочему телу), а также при приложении к газу внешней работы он проходит ряд состояний. Причем, как было сказано выше, эти состояния определяются параметрами  $p$ ,  $v$ ,  $T$ , а связь между ними — характеристическим уравнением  $pv = RT$ . Такой переход газа из начального состояния в конечное называется *термодинамическим процессом* изменения его состояния.

В общем случае, если к газу (рабочему телу) подводится тепло, то изменяются все его основные параметры:  $p$ ,  $v$ ,  $T$ . Уравнение, показывающее связь между параметрами идеального газа, характеризует то состояние, когда по всей его массе одни и те же *давление* и *температура*, а значит, и *удельный объем*. Такое состояние газа называется *равновесным*.

Термодинамика изучает в первую очередь равновесные состояния и процессы, представляющие собой цепь последовательных и непрерывных переходов от одного состояния к другому. Такие процессы, в которых изменения давления и температуры успевали бы распространяться по всему объему газа, должны протекать бесконечно медленно.

При соблюдении перечисленных условий процесс изменения состояния газа обладает свойством обратимости, т. е. проведения в обратном направлении. Такие процессы получили название *обратимых*. Причем параметры со-

стояния процессов, проходящих в прямом и обратном направлениях, должны совпадать.

Все процессы, протекающие в тепловых двигателях, происходят при конечных значениях скоростей и разности температур, поэтому обладают всеми признаками необратимости.

Ввиду сложности явлений, происходящих в *необратимых* процессах, термодинамика в первую очередь изучает обратимые процессы, а перенесение результатов их изучения на необратимые процессы, как правило, осуществляется при помощи коэффициентов, полученных опытным путем.

Процессы в термодинамике изучаются двумя методами:

- *аналитическим*;
- *графическим*.

Последний метод ценен своей простотой и наглядностью. В нем в основном используются две системы координат —  $p\nu$  (рис. 1.1) и  $Ts$  (рис. 1.2).

Координаты  $p\nu$  применяются для вычисления работы газа. В процессе 1–2 (рис. 1.1) давление все время меняется, поэтому используется следующий прием. Весь процесс разбивается на  $n$  очень малых элементов  $\Delta\nu$ , в каждом из которых давление  $p_i$  принимается постоянным. Поршень в одном из этих элементов процесса проходит отрезок  $\Delta h$ . Если

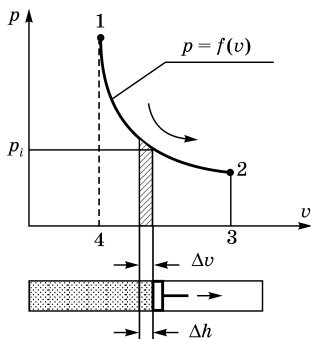


Рис. 1.1

Произвольный процесс изменения состояния газа в  $p\nu$ -координатах

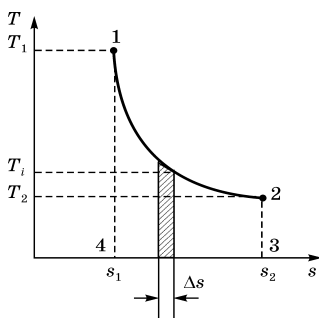


Рис. 1.2

Произвольный процесс изменения состояния газа в  $Ts$ -координатах

площадь поршня обозначим через  $f$ , то сила, действующая по нормали, будет равна  $p_i \cdot f$ , а элементарная работа  $\Delta l$  на  $\Delta h$  составит  $\Delta l = p_i f \Delta h$ . Произведение  $f \Delta h$  есть объем, описанный поршнем на пути  $\Delta h$ , так что  $\Delta l = p_i \Delta v$ . Стоящее справа произведение соответствует площади заштрихованного на рис. 1.1 прямоугольника, следовательно, этой площадью измеряется работа.

Сумма всех  $n$  элементарных работ процесса 1–2:

$$l = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n p_i \Delta v. \quad (1.39)$$

Поэтому площадь 1–2–3–4–1 на рис. 1.1, образованная кривой процесса, осью абсцисс и крайними ординатами, измеряет работу расширения в процессе 1–2.

Как известно, пределом приведенной выше суммы, если  $p = f(v)$ , является интеграл

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv. \quad (1.40)$$

Графическое изображение процессов в  $p$  $v$ -координатах наглядно иллюстрирует зависимость работы от пути процесса. Действительно, если процесс 1–2 пойдет по другой кривой, то и площадь под ней будет другая.

Рассмотрев произвольный процесс в  $T$  $s$ -координатах, аналогично предыдущему анализу получим, что площадь 1–2–3–4–1 (рис. 1.2) измеряет количество тепла в процессе.

В термодинамике в зависимости от характера протекающих различаются следующие процессы:

- изохорный — процесс при постоянном объеме ( $v = \text{const}$ );
- изобарный — процесс при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ );
- изотермический — процесс при постоянной температуре ( $T = \text{const}$ );
- адиабатный — процесс без теплообмена с внешней средой ( $q = 0$ );
- политропный — процесс обобщенный, в котором параметры изменяются согласно уравнению  $p v^n = \text{const}$ , где  $(-\infty \leq n \leq +\infty)$ .

### 1.1.5. КРУГОВОЙ ПРОЦЕСС

В процессе расширения рабочее тело, переходя из состояния 1 в состояние 3, выполняет работу. Для того чтобы процесс работы не ограничивался одним изменением рабочего тела (из состояния 1 в состояние 3), а продолжался неограниченно долго, необходимо рабочее тело из состояния 3 вернуть в состояние 1 (рис. 1.3).

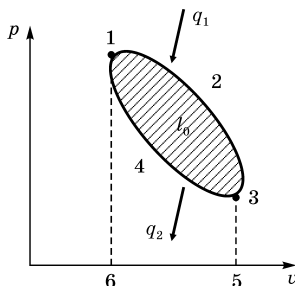


Рис. 1.3  
Круговой процесс  
в  $p$  $v$ -координатах

Для этого необходимо периодически после совершения газом (рабочим телом) процесса расширения (по линии 1–2–3), сжимать газ (по линии 3–4–1), возвращая его в первоначальное состояние. Такой процесс, в течение которого газ претерпевает ряд изменений своего состояния и вновь возвращается в исходное, называется круговым, или циклом.

В процессе 1–2–3 рабочее тело за счет тепла  $q_1$  совершает работу расширения, которая передается на вал машины. В  $p$  $v$ -координатах она измеряется площадью 1–2–3–5–6–1. В процессе 3–4–1 для совершения работы сжатия расходуется энергия  $q_2$ , отнятая от вала. За счет энергии  $q_2$  совершается работа сжатия, которая измеряется площадью 1–4–3–5–6–1.

В описанном цикле рабочее тело совершает работу, измеряемую разностью  $q_2 - q_1 = q_0$ , т. е. площадью 1–2–3–4–1. Эта площадь называется полезной работой цикла и обозначается  $l_0$ . Если работу расширения обозначить  $l_1$ , а работу сжатия  $l_2$ , то площадь 1–2–3–4–1 — полезная работа цикла  $l_0 = l_2 - l_1$ .

Из рис. 1.3 видно, что процесс сжатия необходимо провести таким образом, чтобы кривая линия 3–4–1 прошла ниже кривой 1–2–3, в противном случае машина не производит полезной работы. Изменение состояния рабочего тела по линии 3–4–1 достигается отдачей тепла в холодный источник.

Отношение количества полезной механической энергии, полученной за счет тепловой энергии ( $q_0 = q_1 - q_2$ ), к энергии, полученной от горячего источника ( $q_1$ ), называется *термодинамическим коэффициентом полезного действия* (КПД) кругового процесса (цикла):

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{q_0}{q_1} = \frac{l_0}{l_1}. \quad (1.41)$$

Описанный обратимый цикл, состоящий из ряда обратимых равновесных процессов, называется *идеальным*, а машина, совершающая его, — *идеальной*. Подсчет величины работы в реальных машинах осуществляется путем

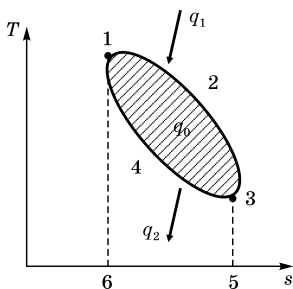


Рис. 1.4  
Круговой процесс  
в  $Ts$ -координатах

введения опытных коэффициентов, учитывающих различного рода потери.

В произвольном круговом процессе, изображенном в  $Ts$ -координатах (рис. 1.4), отношение площади диаграммы цикла к площади, измеряющей количество полученного тепла, определяет *термодинамический КПД* обратимого цикла:

$$\eta_T = \frac{q_1 - q_2}{q_1}.$$

Из проведенного рассмотрения обратимого кругового процесса можно сделать два важных вывода:

1) в  $pv$ - и  $Ts$ -координатах термодинамический КПД имеет одно и то же значение;

2) термодинамический КПД не может быть больше единицы.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)