

Т а б л и ц а 1.2

## Расчетные формулы

| Процесс        | Уравнение процесса                        | Соотношение между параметрами                                 | Механическая работа, Дж   | Теплота, Дж  |
|----------------|---|---|---|--|
| Изохорный      | $v = \text{const}$                        | $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$                           | $l = 0$   | $q = c_v(T_2 - T_1)$                                     |
| Изобарный      | $p = \text{const}$                        | $\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$                           | $l = p(v_2 - v_1) =$<br>$= R(T_2 - T_1)$                            | $q = c_p(T_2 - T_1)$                                     |
| Изотермический | $T = \text{const}$<br>$pv = \text{const}$ | $p_1v_1 = p_2v_2$   | $l = RT \ln \frac{v_1}{v_2} =$<br>$= RT \ln \frac{p_1}{p_2}$        | $q = l$  |
| Адиабатный     | $pv^k = \text{const}$                     | $p_1v_1^k = p_2v_2^k$<br>$T_1v_1^{k-1} =$<br>$= T_2v_2^{k-1}$ | $l = \frac{p_1v_1 - p_2v_2}{k-1} =$<br>$= \frac{R(T_1 - T_2)}{k-1}$ | $q = 0$  |
| Политропный    | $pv^n = \text{const}$                     | $p_1v_1^n = p_2v_2^n$<br>$T_1v_1^{n-1} =$<br>$= T_2v_2^{n-1}$ | $l = \frac{p_1v_1 - p_2v_2}{n-1} =$<br>$= \frac{R(T_1 - T_2)}{n-1}$ | $q = c_v \frac{n-k}{n-1} \times$<br>$\times (T_2 - T_1)$ |

На рис. 1.17 представлены основные термодинамические процессы в  $Ts$ -координатах.

В табл. 1.2 сведены расчетные формулы всех термодинамических процессов. В таблице  $k$  и  $n$  — соответственно показатели адиабаты и политропы.

### 1.3. КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ (ЦИКЛЫ)

#### 1.3.1. ЦИКЛ КАРНО

Для практики важна степень использования затрачиваемого в круговом процессе тепла. Поэтому представляют интерес именно те идеальные циклы, которые являются наиболее совершенными, т. е. имеют наибольший термодинамический КПД.



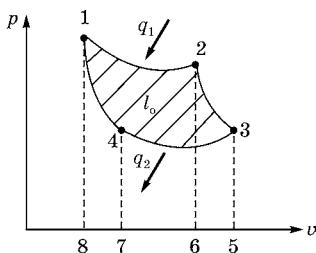


Рис. 1.18  
Прямой цикл Карно  
в  $p$ - $v$ -координатах

Одним из таких идеальных круговых процессов является обратимый цикл, исследованный французским ученым и инженером Сади Карно (1824 г.), впоследствии названный его именем. Цикл Карно, который осуществляется как обратимый, состоит в следующем. Рабочее тело находится в теплонепроводящем цилиндре, имея, однако,

возможность в необходимых случаях (путем, например, временного снятия изоляции) приходить в соприкосновение и обмениваться теплом с двумя источниками тепла, из которых один имеет температуру  $T_1$ , а другой — температуру  $T_2$ .

Начальное состояние рабочего тела в  $p$ - $v$ -координатах характеризуется точкой 1 (рис. 1.18). От него начинается *изотермический* процесс расширения, который в  $p$ - $v$ -координатах изображается кривой 1–2. Этот процесс может протекать при условии подвода тепла  $q_1$  рабочему телу.

Так как процесс изотермический, то рабочее тело все время имеет одну и ту же температуру, равную температуре источника тепла, и, следовательно, для соблюдения обратимости процесса 1–2 достаточно иметь только один верхний источник. Площадь фигуры 1–2–6–8–1 на диаграмме в  $p$ - $v$ -координатах равна работе газа в процессе.

После осуществления процесса 1–2 от рабочего тела отключается источник тепла, и тело продолжает расширяться без теплообмена с окружающей средой — *адиабатически* по линии 2–3. Работа газа в этом процессе отражена площадью 2–3–5–6–2. На этом расширение рабочего тела завершается.

Дальнейшее изменение состояния рабочего тела связано с возвращением газа в начальное состояние. От точки 3 начинается *изотермическое сжатие*, во время которого рабочее тело, находясь в соприкосновении с источником тепла  $T_2$ , отдает ему  $q_2$  единиц тепла и приходит в состояние, определяемое точкой 4. При этом на сжатие затрачивается работа, измеряемая площадью 3–4–7–5–3.

В точке 4 от рабочего тела отключается источник тепла, и дальнейшее сжатие происходит без теплообмена с внешней средой — *адиабатически*. Важно точку 4 в изотермическом процессе 3–4 выбрать таким образом, чтобы в последующем адиабатическом процессе рабочее тело вернулось в состояние 1, т. е. чтобы адиабата 1–4 прошла через точку 1.

В адиабатическом процессе на сжатие тратится количество работы, измеряемой площадью 1–4–7–8–1.

Если взять в этом круговом процессе сумму площадей расширения и вычесть сумму площадей сжатия, то результирующая площадь 1–2–3–4–1 определит полезную работу:

$$l_0 = q_0 = q_1 - q_2. \quad (1.100)$$

Отношение полезной работы ко всей энергии, затрачиваемой в цикле, есть *термодинамический КПД* цикла Карно:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}. \quad (1.101)$$

Зная, как изображаются изотермический и адиабатный процессы в  $Ts$ -координатах, можно построить в них цикл Карно — в виде прямоугольника (рис. 1.19). Здесь 1–2 — процесс изотермического расширения, во время которого подводится тепло  $q_1$ , измеряемое площадью 1–2–5–6–1. Линия 2–3 — адиабатическое расширение, а линия 3–4 — изотермическое сжатие, при котором отводится  $q_2$  тепла, измеряемое площадью 3–4–6–5–3. Линия 4–1 — адиабата сжатия. Количество тепла  $q_0$ , перешедшее в полезную работу  $l_0$ , отражено в площади 1–2–3–4–1, представляющей собой разность площадей 1–2–5–6–1 и 3–4–6–5–3.

Из рис. 1.19 видно, что величина КПД цикла Карно определяется только значениями температур  $T_1$  и  $T_2$ , в интервале которых он протекает. Чем выше будет начальная температура цикла  $T_1$  и чем ниже

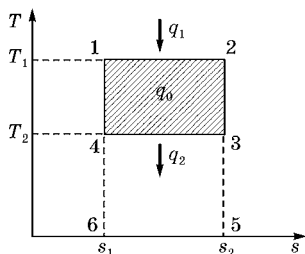


Рис. 1.19  
Прямой цикл Карно  
в  $Ts$ -координатах

конечная температура  $T_2$ , тем больше будет термодинамический КПД.

Термодинамический КПД определится как отношение площадей 1–2–3–4–1 и 2–5–6–1–2:

$$\eta_t = \frac{(T_1 - T_2)(s_2 - s_1)}{T_1(s_2 - s_1)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (1.102)$$

Однако в любом случае он будет меньше единицы. Для того чтобы получить значение КПД равным единице, необходимо, чтобы отношение  $T_2/T_1$  было нулевым. Но это условие может быть соблюдено либо при  $T_2 = 0$ , либо при  $T_1 = \infty$ . Поскольку оба условия являются практически неосуществимыми, достичь значения термодинамического КПД, равного единице, невозможно.

### 1.3.2. ОБРАТНЫЙ ЦИКЛ КАРНО

Если заставить рабочее тело пройти цикл изменений состояния в направлении, обратном тому, которое было осуществлено в цикле Карно, то получится так называемый *обратный цикл Карно*. В этом случае газ сначала по адиабате расширяется от точки 1 до точки 2 (рис. 1.20), затем расширение идет изотермически с получением тепла  $q_2$  от холодного источника (линия 2–3). После этого начинается сжатие газа сначала по адиабате (3–4), затем — по изотерме (4–1) с передачей тепла  $q_1$  горячему источнику. В результате всего цикла за счет затрат извне ( $l_1 - l_2$ ) единиц механической энергии и  $q_2$  единиц тепла, взятых

из нижнего источника,  $q_1$  тепла переходят в верхний источник. Причем,

$$q_1 = q_2 + (l_2 - l_1) = q_2 + l_0.$$

Машины, служащие для передачи тепла от холодного источника к горячему и работающие по аналогичному принципу, называются *холодильными машинами и тепловыми насосами*.

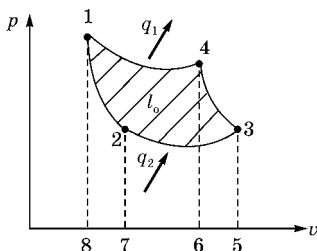


Рис. 1.20  
Обратный цикл Карно  
в  $p$ - $v$ -координатах

Различаются они только по пределам температур: у холодильных машин окружающая среда является верхним источником, у тепловых насосов — нижним источником. Таким образом, у первых теплота отнимается от тел, имеющих температуру ниже окружающей среды, у вторых — отнимается от окружающей среды и отдается источнику с более высокой температурой. Первые служат целям производства холода, вторые находят применение в так называемом «механическом» отоплении зданий.

В соответствии со вторым законом термодинамики (в формулировке Клаузиуса) теплота сама по себе не может переходить от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой. В обратном цикле процесс перехода тепла от холодного тела к горячему происходит не «сам по себе», а с затратой механической энергии.

Характеристикой обратного цикла Карно служит отношение количества отнятого тепла  $q_2$  к затраченной механической энергии ( $l_1 - l_2 = q_1 - q_2$ ), называемое *холодильным коэффициентом*  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (1.103)$$

Как и КПД для прямого цикла Карно, так и холодильный коэффициент для обратного цикла Карно при данном интервале температур имеет наибольшее значение по сравнению с другими циклами.

### 1.3.3. ЦИКЛЫ ДВС

К *двигателям внутреннего сгорания* (ДВС) относятся поршневые двигатели, в которых сжигание топлива осуществляется внутри рабочего цилиндра. Циклы, по которым работают ДВС, различаются по способу подвода в них тепла:

- изохорный ( $v = \text{const}$ ); идеальный цикл карбюраторных и газовых двигателей;
- изобарный ( $p = \text{const}$ ); идеальный цикл компрессорных дизельных двигателей;
- смешанный ( $v = \text{const}$  и  $p = \text{const}$ ); идеальный цикл бескомпрессорных дизельных двигателей.

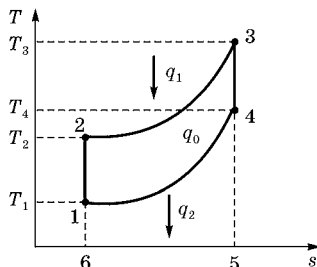
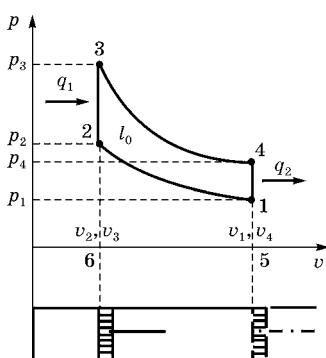


Рис. 1.21  
Цикл ДВС в  $p$  $v$ -  
и  $T$  $s$ -координатах с подводом  
тепла при  $v = \text{const}$

Цикл с подводом тепла при  $v = \text{const}$  начинается от состояния рабочего тела в  $p$  $v$ - и  $T$  $s$ -координатах (рис. 1.21), характеризующегося точкой 1, сжатием рабочего тела, которое происходит при движении поршня справа налево до точки 2. Этот процесс протекает без теплообмена с внешней средой, т. е. по *адиабате*. Затем осуществляется подвод тепла при постоянном объеме — по *изохоре* 2–3, что приблизительно соответствует условию подвода тепла при сгорании горючей смеси в реальных двигателях, использующих легкоиспаряющееся топливо.

От состояния, характеризуемого точкой 3, начинается процесс расширения рабочего тела при отсутствии теплообмена с окружающей средой, т. е. по *адиабате* 3–4. Для того чтобы рабочее тело пришло в первоначальное состояние, от него отводится тепло (процесс 4–1). Термодинамический КПД цикла в  $T$  $s$ -координатах

$$\eta_t = \frac{q_o}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{\text{пл. } 1-2-3-4-1}{\text{пл. } 2-3-5-6-2}. \quad (1.104)$$

Характеристики цикла ДВС:

- степень сжатия  $\varepsilon = v_1/v_2$ ;
- степень повышения давления  $\lambda = p_3/p_1$ ;
- степень предварительного расширения  $\rho = v_4/v_3$  (при подводе тепла в процессе  $p = \text{const}$ ).

Количество подведенного тепла:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2). \quad (1.105)$$

Количество отведенного тепла

$$q_2 = c_p(T_4 - T_1). \quad (1.106)$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2. \quad (1.107)$$

В цикле с подводом тепла при  $p = \text{const}$  первоначальное состояние рабочего тела в  $p\nu$ -координатах характеризуется точкой 1 (рис. 1.22). В течение первого хода поршня справа налево совершается сжатие воздуха, которое происходит без теплообмена с внешней средой (линия 1–2). На участке 2–3 к рабочему телу подводится тепло  $q_1$  таким образом, что давление при этом остается постоянным (так как увеличивается объем). Это приближенно соответствует реальным условиям сгорания трудносгораемого топлива.

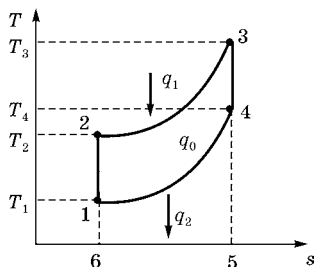
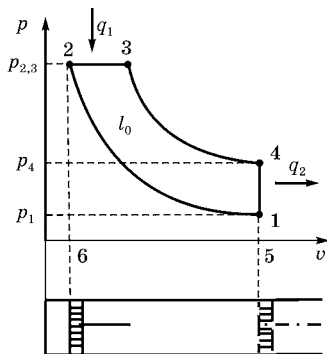
Дальнейшее расширение рабочего тела (линия 3–4) происходит без теплообмена с внешней средой (по адиабате). Для приведения рабочего тела в первоначальное состояние 1, от него отводится тепло  $q_2$  при  $\nu = \text{const}$  (линия 4–1).

Термодинамический КПД этого вида цикла по диаграмме в  $Ts$ -координатах (рис. 1.22)

$$\eta_t = \frac{q_o}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{\text{пл. } 1-2-3-4-1}{\text{пл. } 2-3-5-6-2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = \frac{\rho^{k-1}}{k(\rho-1)}. \quad (1.108)$$

Количество подведенной теплоты

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2). \quad (1.109)$$



**Рис. 1.22**  
Цикл ДВС  
в  $p\nu$ - и  $Ts$ -координатах  
с подводом тепла при  $p = \text{const}$

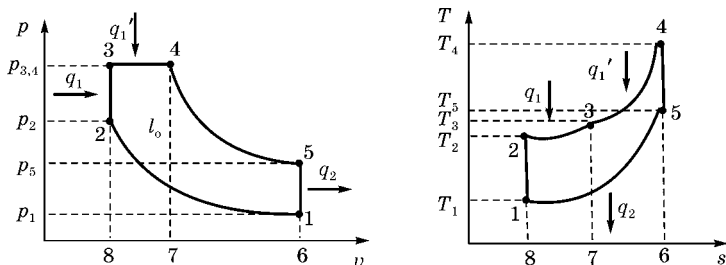


Рис. 1.23  
Смешанный цикл ДВС в  $p$ - $v$ - и  $T$ - $s$ -координатах

Количество отведенной теплоты (абсолютное значение)

$$q_2 = c_p(T_4 - T_1). \quad (1.110)$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2.$$

Смешанный цикл, в котором подвод теплоты осуществляется частично при  $v = \text{const}$ , а частично при  $p = \text{const}$ , был предложен советским инженером Г. В. Тринклером. Работавшие по этому циклу двигатели называются *дизелями*, как и двигатели с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ . В настоящее время они строятся только с комбинированным подводом тепла.

В этом виде цикла (рис. 1.23) в процессе 1–2 происходит адиабатное сжатие рабочего тела, после чего подводится тепло сначала при  $v = \text{const}$  (линия 2–3), а затем при  $p = \text{const}$  (линия 3–4). Далее происходит адиабатное расширение (линия 4–5) и, наконец, отвод теплоты при  $v = \text{const}$  (линия 5–1).

Термодинамический КПД смешанного цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\lambda \rho^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)}. \quad (1.111)$$

Количество отведенной теплоты (абсолютное значение)

$$q_2 = c_v(T_5 - T_1). \quad (1.112)$$

Сравнивая все три вида циклов при одинаковой степени сжатия ( $\varepsilon_v = \varepsilon_{vp} = \varepsilon_p$ ), можно сделать вывод, что их тер-



модинамические КПД находятся в следующем соотношении:  $\eta_{tv} > \eta_{tvp} > \eta_{tp}$ . Однако, учитывая то обстоятельство, что все виды циклов в реальных двигателях работают при разных степенях сжатия ( $\varepsilon_v = 6 \dots 10$ ;  $\varepsilon_{vp} = 14 \dots 16$ ), сравнивать термодинамические КПД следует при одинаковых условиях их осуществления, т. е. одинаковых максимальных давлениях и температурах. В этих условиях —  $\eta_{tp} > \eta_{tvp} > \eta_{tv}$ .

Рабочий процесс реального двигателя внутреннего сгорания принципиально отличается от теоретического цикла идеального двигателя. Цикл — замкнутый круговой процесс, составленный из отдельных термодинамических процессов. Рабочий цикл ДВС *не замкнут* — после совершения работы в результате расширения рабочее тело удаляется из двигателя, а на его место поступает свежая порция горючей смеси. Процессы всасывания и выхлопа рабочего тела не являются термодинамическими.

Рабочий цикл теплового двигателя есть совокупность отдельных процессов, протекающих последовательно в реальном двигателе за два или один полный оборот коленчатого вала.

Рабочий цикл графически представляется индикаторной диаграммой, т. е. линией изменения давления внутри цилиндра при перемещении поршня (рис. 1.24).

При движении поршня I слева направо (линия 1–2) в цилиндр двигателя II втекает через открытый всасывающий клапан «вс» смесь воздуха с парами топлива (первый такт). В крайнем правом положении поршня (нижняя мертвая точка — «нмт») всасывающий клапан «вс» закрывается. Следует отметить, что всасывание происходит при некотором разрежении, поэтому линия 1–2 проходит ниже линии атмосферного давления (пунктир). При закрытых клапанах «вс» и «вх» поршень движется

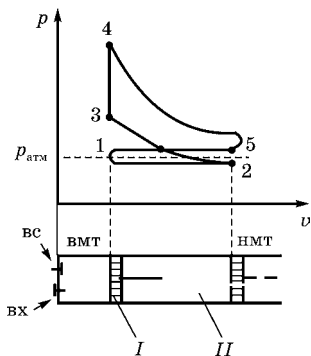


Рис. 1.24

Индикаторная диаграмма четырехтактного карбюраторного ДВС:

I — поршень; II — цилиндр.

справа налево и сжимает горючую смесь (второй такт) по линии 2–3.

Вблизи левого крайнего положения поршня (верхняя мертвая точка — «вмт») начинается процесс горения топлива, в результате чего давление резко возрастает (линия 3–4). Горячие продукты горения расширяются и перемещают поршень I слева направо из «вмт» в «нмт» (линия 4–5) — так осуществляется рабочий ход, т. е. совершается полезная работа (третий такт).

Вблизи «нмт» открывается выхлопной клапан «вх», поршень начинает двигаться справа налево и выталкивает продукты горения из цилиндра в атмосферу по линии 5–1 (четвертый такт) при давлении несколько выше атмосферного. Далее рабочий процесс повторяется.

Описанный процесс работы двигателя происходит за четыре хода поршня (два оборота вала), поэтому такой *двигатель* называется *четырёхтактным*. Существуют двигатели, в которых описанный процесс осуществляется за два хода поршня (один оборот вала), их называют *двухтактными*.

### 1.3.4. ЦИКЛ ГАЗОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ (ГТУ)

Газотурбинная установка (ГТУ) — тепловой двигатель, в котором получение механической энергии вращения вала происходит при отсутствии возвратно-поступательного движения непосредственно за счет использования кинетической энергии газа (рис. 1.25).

В ГТУ на одном валу располагаются топливный насос, компрессор, рабочая турбина и потребитель механической энергии (электрогенератор, насос, вал отбора мощности и т. п.). Компрессор всасывает воздух из атмосферы, сжимает его до заданного давления и подает в камеру сгорания. Туда же топливным насосом подается горючее. Из камеры сгорания газы поступают в сопловый аппарат, из которого они с большой скоростью подаются на рабочие лопатки турбины, а затем выпускаются в атмосферу. Иногда для увеличения КПД воздух подогревается в теплообменнике отработавшими газами.



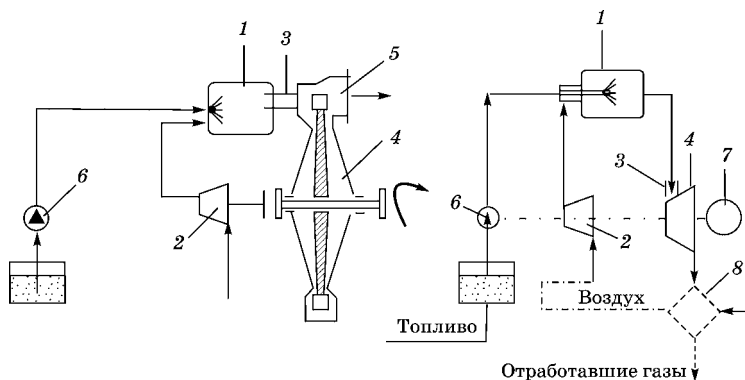


Рис. 1.25

Схема ГТУ с изобарным подводом теплоты:

1 — камера сгорания; 2 — компрессор; 3 — сопловый аппарат; 4 — турбина; 5 — выпускной патрубок; 6 — топливный насос; 7 — электрогенератор; 8 — теплообменник.

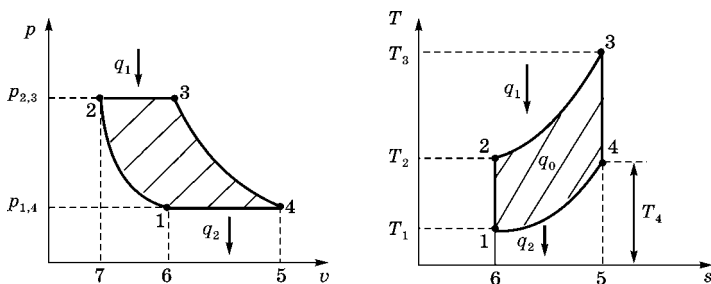


Рис. 1.26

Цикл ГТУ в  $p-v$  и  $Ts$ -координатах при  $p = \text{const}$ :

1-2 — адиабатное сжатие воздуха в компрессоре; 2-3 — изобарный подвод теплоты  $q_1$  к сжатому газу (сгорание топлива в камере сгорания); 3-4 — адиабатное расширение газов в турбине; 4-1 — условный изобарный процесс (отвод теплоты  $q_2$  в атмосферу).

В ГТУ могут осуществляться циклы с подводом теплоты по изохоре и изобаре, в практике чаще применяется последний, т. е. цикл с подводом тепла при  $p = \text{const}$  (рис. 1.26). Процесс сжатия воздуха (1-2) осуществляется в компрессоре.

Сжатый воздух оттуда подается в камеру сгорания, туда же через форсунку с помощью насоса подается топливо. Процесс (2-3) протекает в камере сгорания. Процесс расширения

рабочего тела (3–4) протекает в сопловом аппарате и частично на лопатках турбины, а отработавшие газы выбрасываются в атмосферу. Как видно из диаграммы в  $p$  $v$ - и  $T$  $s$ -координатах, цикл состоит из двух адиабат и двух изохор.

Термодинамический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}; \quad (1.113)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}. \quad (1.114)$$

Для адиабаты 1–2 можно записать

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}, \quad (1.115)$$

а для адиабаты 3–4

$$\frac{T_3}{T_4} = \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left( \frac{v_4}{v_3} \right)^{k-1}. \quad (1.116)$$

Из уравнений (1.115) и (1.116) следует, что для адиабатного сжатия и расширения

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \quad \text{и} \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3} = \varepsilon, \quad (1.117)$$

а также

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad \text{и} \quad \frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (1.118)$$

Подставив соотношение (1.118) в формулу (1.114), получим

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (1.119)$$

Из уравнения (1.119) следует, что при одинаковых степенях сжатия КПД ГТУ равен КПД поршневого двигателя, но при существенно меньшем максимальном давлении цикла. КПД ГТУ больше КПД поршневого двигателя с подводом теплоты при  $p = \text{const}$ .

