ЗДРАВСТВУЙТЕ!

4. Работа и КПД цикла Карно

Найдем полезную работу цикла Карно.

Процесс *A-B*. Положительная работа, совершен-ная газом при изотермическом расширении одного моля газа от V_0 до V_1. Тепло, полученное от нагре-вателя Q_1, газ изотермически расширяется, совершая при этом работу A_1:

$$A_1 = RT_1 ln\frac{V_1}{V_2} = Q_1, \tag{16.9}$$

где R – универсальная газовая постоянная равная R=8,31 · 10^3 Дж/кмоль · К

Процесс *B-C* – адиабатическое расширение. При адиабатическом расширении теплообмен с окру-жающей средой отсутствует и работа расширения A_2 совершается за счет изменения внутренней энергии.

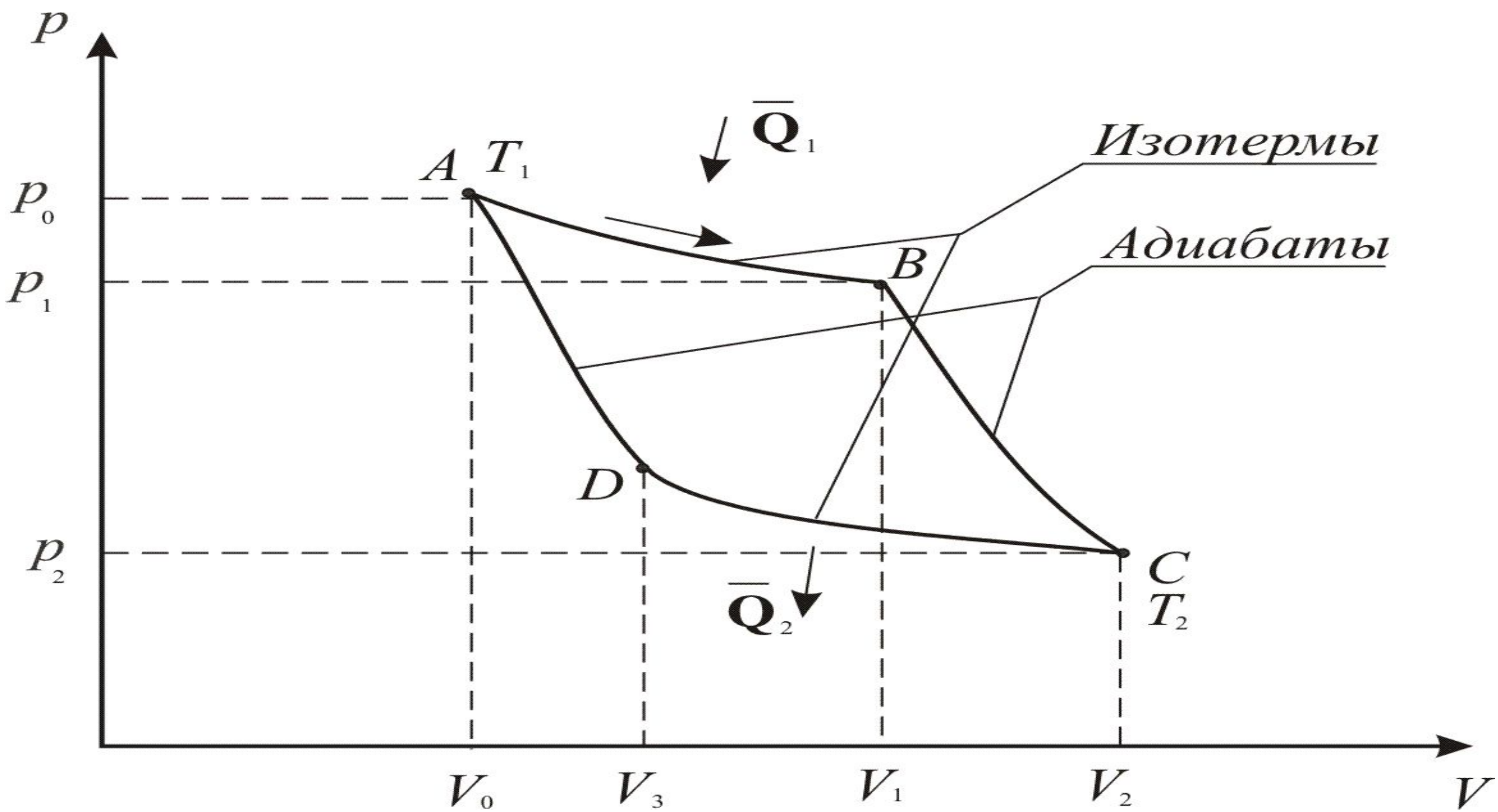

p
$\overline{\mathbf{Q}}_1$
Изотермы
A T_1
p_0
Адиабаты
B
p_1
D
p_2
C
T_2
$\overline{\mathbf{Q}}_2$
V_0
V_3
V_1
V_2
V

Рис. 16.5

Уравнение адиабаты:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}, \tag{16.10}$$

где γ – коэффициент Пуассона

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \tag{16.11}$$

Давление при этом изменится до p_2. Полученная работа на этой стадии

$$A_2 = \frac{R(T_1 - T_2)}{i-1} \tag{16.12}$$

Процесс CD изотермический и работа равна

$$A_3 = -RT_2 ln\frac{V_2}{V_3} = -Q_2$$

где Q_2 – тепло, отданное холодильнику.

Процесс *D-A* – адиабатическое сжатие. Уравнение адиабаты:

$$\left(\frac{V_3}{V_0}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_1}{T_2} \qquad (16.13)$$

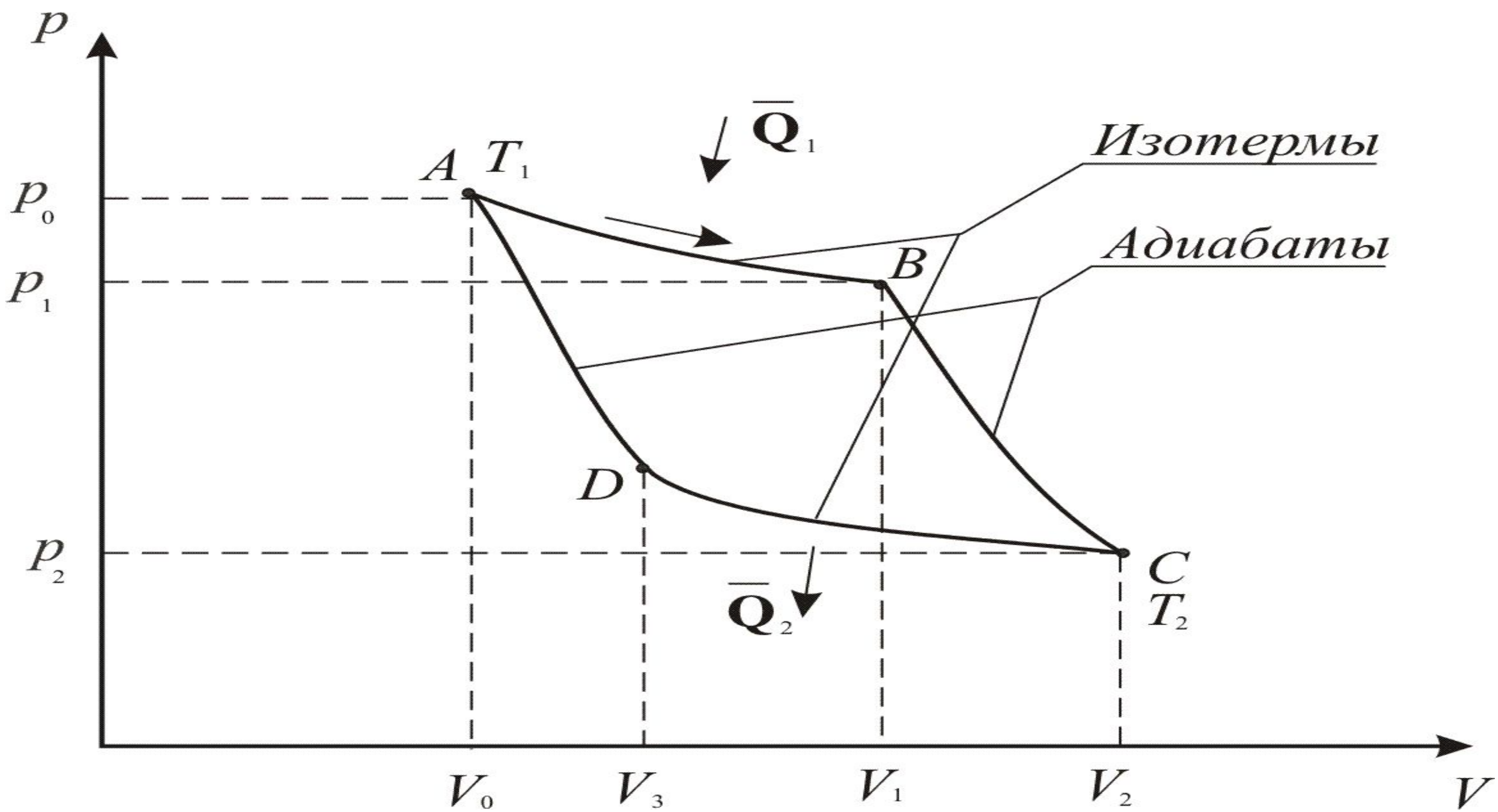
А работа сжатия на последнем этапе:

$$A_4 = -\frac{R}{\gamma-1}(T_1 - T_2) \qquad (16.14)$$

Тогда

$$A = RT_1 \ln\frac{V_1}{V_0} + \frac{R(T_1 - T_2)}{i-1} - RT_2 \ln\frac{V_2}{V_3} - \frac{R(T_1 - T_2)}{i-1} \qquad (16.15)$$

Для того чтобы цикл был замкнутым, состояния 0 и 3 должны лежать на одной и той же адиабате. Отсюда вытекает условие $T_1 V_0^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$ (16.15,*a*)



p
$\overline{\mathbf{Q}}_1$
Изотермы
A
T_1
p_0
Адиабаты
B
p_1
D
p_2
C
T_2
$\overline{\mathbf{Q}}_2$
V_0
V_3
V_1
V_2
V

Рис. 16.5

Аналогично, поскольку состояния 2 и 1 лежат на одной и той же адиабате, выполняется условие

$$T_1 V_2^{\gamma - 1} = T_2 V_3^{\gamma - 1} \qquad (16.15,б)$$

Разделив (16.15,*б*) на (16.15,а), приходим к условию $\frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_0}$

Обозначим ,

$$T_1 V_0^{\gamma - 1} = T_2 V_3^{\gamma - 1}$$

тогда

$$A = Q_1 - Q_2 = R(T_1 - T_2)\ln\beta > 0 \qquad (16.16)$$

$$\ln\beta = \ln\frac{V_2}{V_3} = \ln\frac{V_1}{V_0}$$

Значит работа совершаемая газом больше работы внешних сил. Работа равна площади ограниченной кривой $ABCDA$. Из равенств следует:

$$\left|\frac{Q_1}{Q_2}\right| = \left|\frac{T_1}{T_2}\right| \qquad (16.17)$$

Итак, полезная работа

$$A = Q_1 - Q_2. \qquad (16.18)$$

КПД η равен:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (16.19)$$

Из (16.19) видно, что $\eta < 1$ и зависит от разности температур между нагревателем и холодильником (и не зависит от конструкции машины и рода рабочего тела). Это ещё одна формулировка теоремы Карно.

Цикл Карно, рассмотренный нами был на всех стадиях проведен так, что не было необратимых процессов, (не было соприкосновения тел с разными температурами). Поэтому здесь самый большой КПД. Больше получить в принципе невозможно.

Содержание

5. Необратимый цикл. Холодильная машина

Предположим, для простоты, что необратимость цикла обусловлена тем, что теплообмен между рабочим телом и источником теплоты (считаем холодильник тоже “источником”, только отрицательной температуры) происходит при конечных разностях температур, т.е. нагреватель, отдавая тепло, охлаждается на ΔT, а холодильник нагревается на ΔT.

Любой процесс, не удовлетворяющий условию обратимости, мы называем необратимым процессом. Примером необратимого процесса является процесс торможения тела под действием сил трения. При этом скорость тела уменьшается и оно останавливается.

Энергия механического движения тела расходуется на увеличение энергии хаотического движения частиц тела и окружающей среды. Происходит диссипация энергии. Для продолжения движения необходим компенсирующий процесс охлаждения тела и среды. В нашем случае тепловых машин, нагреватель и холодильник – не идеальны, они не обладают бесконечной теплоёмкостью и в процессе работы получают или отдают добавочную температуру ΔT.

На рис. 16.5 изображен один их таких необратимых циклов. Для обратимого цикла Карно

$$\eta_{\text{обр}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \qquad (16.20)$$

Для необратимого цикла

$$\eta_{\text{необр}} = 1 - \frac{T_2 - \Delta T}{T_1 - \Delta T} < 1 - \frac{T_2}{T_1}. \qquad (16.21)$$

Т.е всегда $\eta_{\text{обр}} > \eta_{\text{необр}}$ – этот вывод справедлив независимо от причин необратимости цикла Карно.

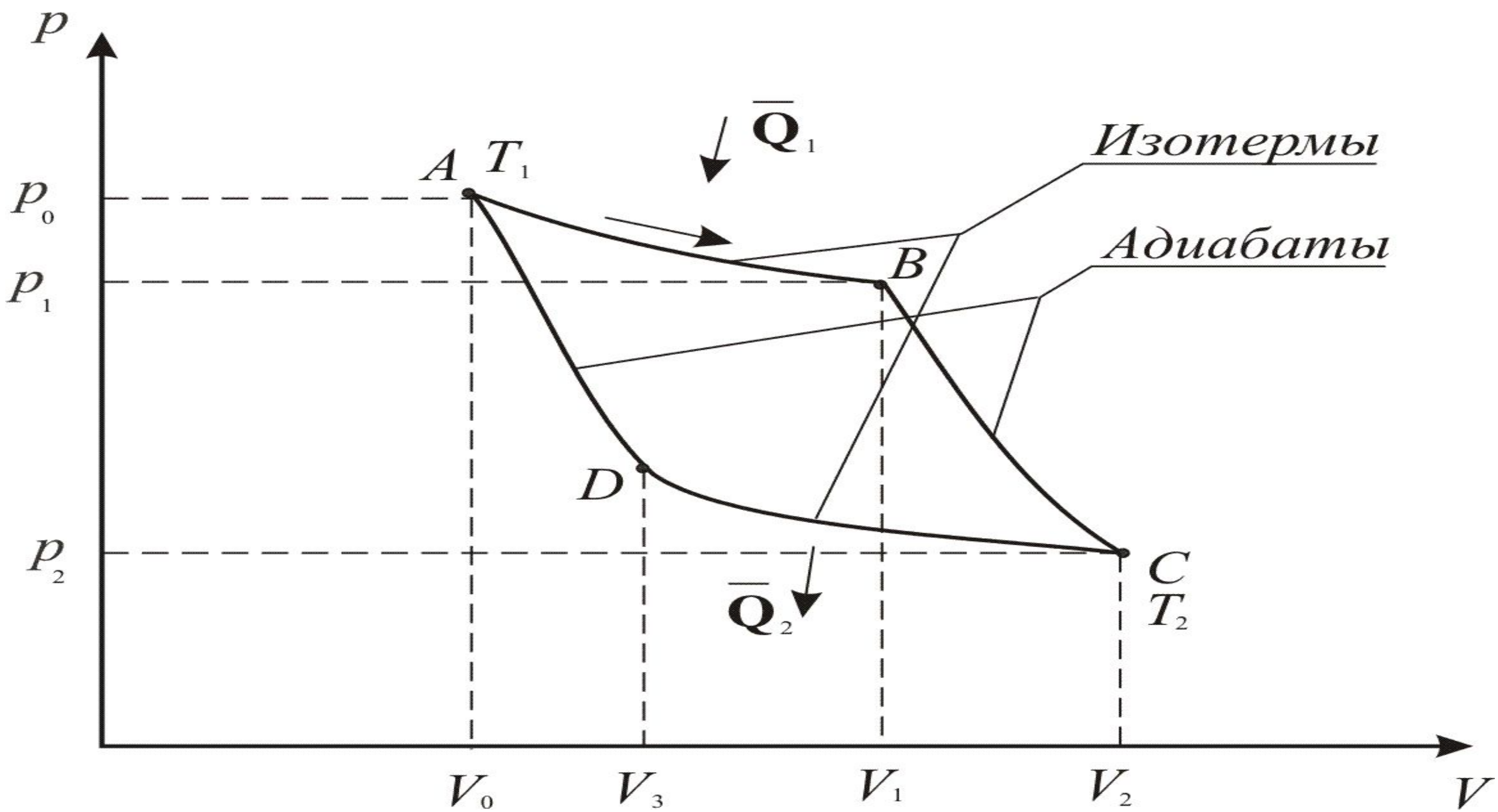


Рис. 16.5

Холодильная машина

Обратный цикл Карно можно рассмотреть на примере рисунка 16.5. При изотермическом сжатии B–A от газа отводится количество теплоты Q_1 при T_1. В процессе D–C – изотермического расширения к газу подводится количество теплоты Q_2.

В этом цикле $Q_1<0$, $Q_2>0$ и работа совершаемая над газом – отрицательна, т.е.

$$A=(Q_1+Q_2)<0. \qquad (16.22)$$

Если рабочее тело совершает обратный цикл, то при этом можно переносить энергию в форме тепла от холодного тела к горячему за счет совершения внешними силами работы.

Для холодильных машин Карно

$$\eta = \frac{A}{\mathrm{Q}_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (16.23)$$

Эта машина работающая по обратному циклу Карно (рис. 16.4), т. е., если проводить цикл в обратном направлении, тепло будет забираться у холодильника и передаваться нагревателю (за счет работы внешних сил).