



**ЗДРАВСТВУЙТЕ!**

# Лекция 16. КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

1. Круговые обратимые и необратимые процессы.
2. Тепловые машины.
3. Цикл Карно (обратимый).
4. Работа и КПД цикла Карно.
5. Необратимый цикл. Холодильная машина.

# 1. Круговые обратимые и необратимые процессы

Прежде, чем переходить к изложению второго закона термодинамики, рассмотрим круговые процессы. **Круговым процессом, или циклом, называется такой процесс, в результате которого термодинамическое тело возвращается в исходное состояние.** В диаграммах состояния  $P$ ,  $V$  и других круговые процессы изображаются в виде замкнутых кривых (рис. 16.1). Это связано с тем, что в любой диаграмме два тождественных состояния (начало и конец кругового процесса) изображаются одной и той же точкой на плоскости. **Цикл, совершаемый идеальным газом, можно разбить на процессы расширения (1–2) и сжатия (2–1) газа.**

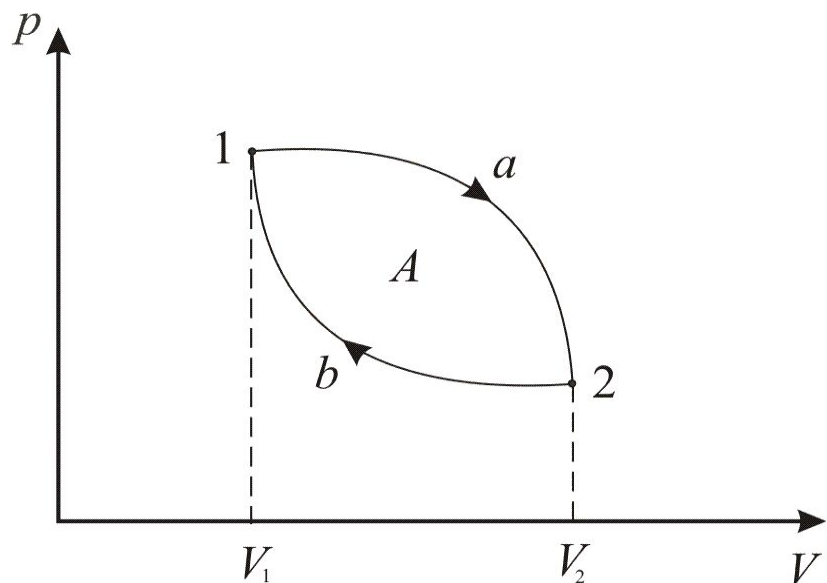


Рис. 16.1

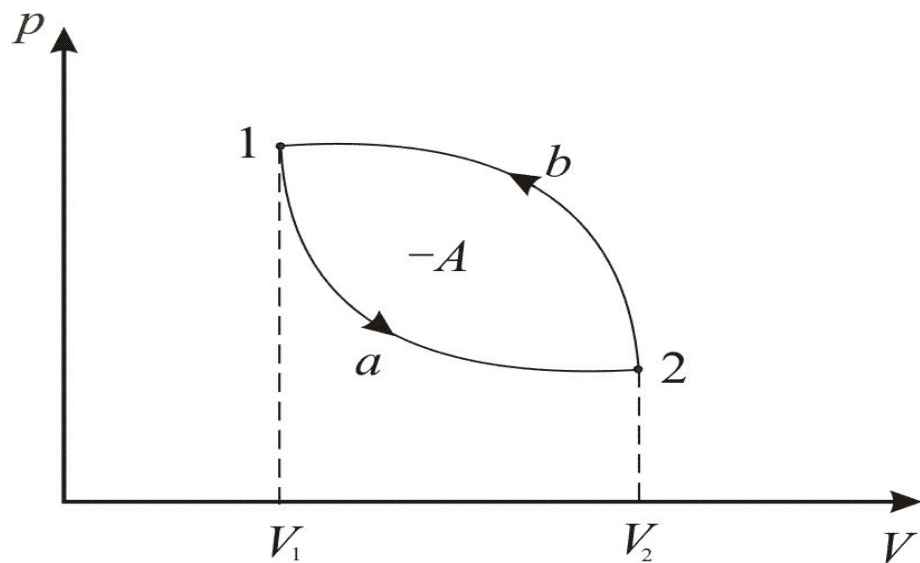


Рис. 16.2

Работа расширения (определяется площадью фигуры  $1a2V_2V_11$ ) положительна ( $dV > 0$ ),

работа сжатия (определяется площадью фигуры  $2b1V_1V_22$ ) отрицательна ( $dV < 0$ ). Следовательно, работа, совершаемая за цикл, определяется площадью, охватываемой кривой.

Если за цикл совершается положительная работа

$$A = \oint p dV > 0 \quad (16.1)$$

(цикл протекает по часовой стрелке), то он называется **прямым** (рис. 16.1), если за цикл совершается

отрицательная работа

$$A = \oint p dV < 0 \quad (16.2)$$

(цикл протекает против часовой стрелки), то он называется **обратным** (рис.

16.2).

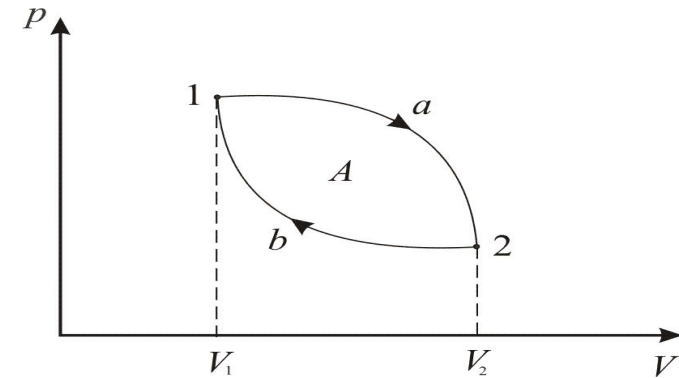


рис. 16.1

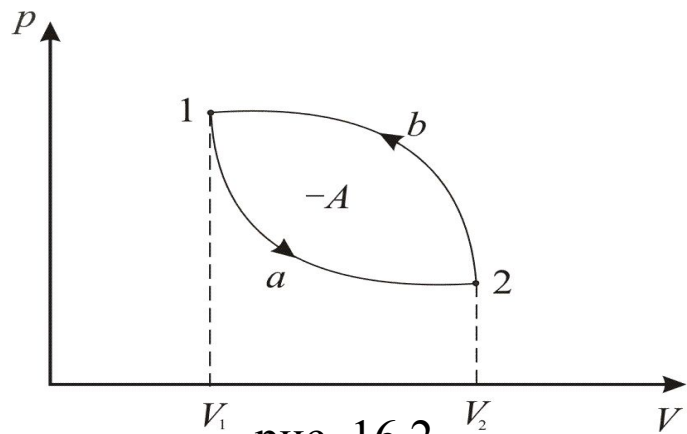


рис. 16.2

Круговые процессы лежат в основе всех тепловых машин: двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин, паровых и холодильных машин и т. д.

В результате кругового процесса система возвращается в исходное состояние и, следовательно, полное изменение внутренней энергии газа равно нулю.

Поэтому первое начало термодинамики для кругового процесса

$$Q = \Delta U + A = A, \quad (16.3)$$

т.е. работа, совершаемая за цикл, равна количеству полученной извне теплоты. Однако в результате кругового процесса система может теплоту как получать, так и отдавать, поэтому

$$Q = Q_1 - Q_2, \quad (16.4)$$

где  $Q_1$  – количество теплоты, полученное системой;  $Q_2$  – количество теплоты, отданное системой.

Поэтому термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (16.5)$$

Все термодинамические процессы, в том числе и круговые, делят на две группы: обратимые и необратимые.

**Процесс называют обратимым, если он протекает таким образом, что после окончания процесса он может быть проведен в обратном направлении через все те же промежуточные состояния, что и прямой процесс.**

*После проведения кругового обратимого процесса никаких изменений в среде, окружающей систему, не произойдет. При этом под средой понимается совокупность всех, не входящих в систему тел, с которыми система непосредственно взаимодействует.*



**Процесс называется необратимым, если он протекает так, что после его окончания систему нельзя вернуть в начальное состояние через прежние промежуточные состояния. *Нельзя осуществить необратимый круговой процесс, чтобы нигде в окружающей среде не осталось никаких изменений.***

**Свойством обратимости обладают только равновесные процессы.**

Каждое промежуточное состояние является состоянием термодинамического равновесия, нечувствительного к тому, идет ли процесс в прямом или обратном направлении.

Например, обратимым можно считать процесс адиабатического расширения или сжатия газа. При адиабатическом процессе условие теплоизоляции системы исключает непосредственный теплообмен между системой и средой. Поэтому, производя адиабатическое расширение газа, а затем сжатие, можно вернуть газ в исходное состояние так, что в окружающей среде никаких изменений не произойдет. Конечно, в реальных условиях и в этом случае всегда имеется некоторая необратимость процесса, обусловленная, например, несовершенством теплоизоляции, трением при движении поршня и т.д.

Только в обратимых процессах теплота используется по назначению, не расходуется зря. Если процесс неравновесный, то будет необратимый переход, т.е. часть энергии уйдет (необратимо).

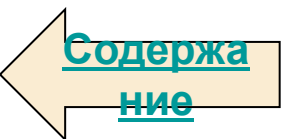
**Максимальным КПД обладают машины у которых только обратимые процессы.**

Реальные процессы сопровождаются диссипацией энергии (из-за трения, теплопроводности и т.д.), которая нами не рассматривается.

**Обратимые процессы – это в какой-то степени идеализация реальных процессов.**

Рассмотрение обратимых процессов важно по двум причинам:

- 1) **многие процессы в природе и технике практически обратимы;**
- 2) **обратимые процессы являются наиболее экономичными и приводят к максимальному значению термического коэффициента полезного действия тепловых двигателей, что позволяет указать пути повышения КПД реальных тепловых двигателей.**



## 2. Тепловые машины

**Тепловой машиной** называется периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет получаемого извне тепла.

Любая тепловая машина работает по принципу кругового (циклического) процесса, т.е. возвращается в исходное состояние (рис. 16.1). Но чтобы при этом была совершена полезная работа, возврат должен быть произведен с наименьшими затратами.

Полезная работа равна разности работ расширения и сжатия, т.е. равна площади, ограниченной замкнутой кривой.

**Обязательными частями тепловой машины являются нагреватель (источник энергии), холодильник, рабочее тело (газ, пар).**

Зачем холодильник? Вернуться в исходное состояние можно с меньшими затратами, если отдать часть тепла. Или, если охладить пар, то его легче сжать, следовательно, работа сжатия будет меньше работы расширения.

**Прямой цикл используется в тепловом двигателе – периодически действующем двигателе, совершающем работу за счет полученной извне теплоты.**

Рассмотрим схему теплового двигателя (рис. 16.3).

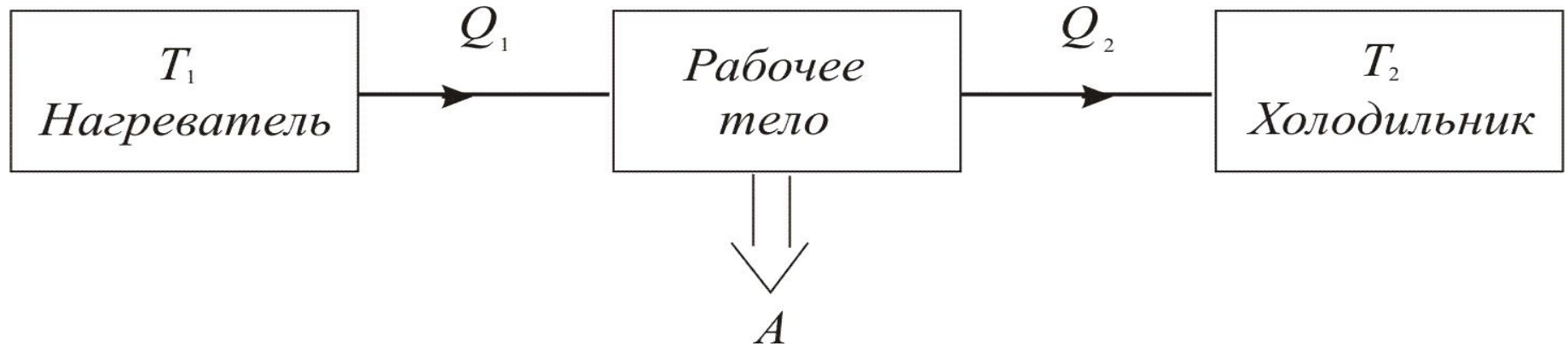


Рис. 16.3

От термостата с более высокой температурой  $T_1$ , называемого нагревателем, за цикл отнимается количество теплоты  $Q_1$ , а термостату с более низкой температурой  $T_2$ , называемому холодильником, за цикл передается количество теплоты  $Q_2$  и совершается работа  $A$ :

$$A = Q_1 - Q_2 \quad (16.6)$$

Обратный цикл используется в **ХОЛОДИЛЬНЫХ машинах** – периодически действующих установках, в которых за счет работы внешних сил теплота переносится к телу с более высокой температурой. Принцип действия холодильной машины представлен на (рис. 16.4).

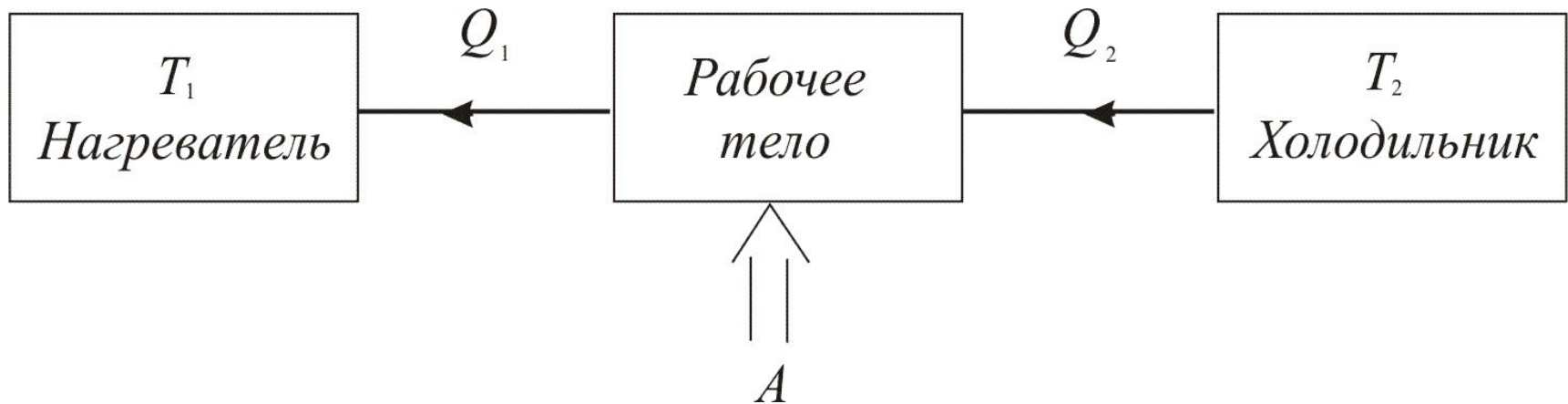


Рис. 16.4



Системой за цикл поглощается при низкой температуре  $T_2$  количество теплоты  $Q_2$  и отдается при более высокой температуре  $T_1$  количество теплоты  $Q_1$ .

### **3. Цикл Карно (обратимый)**

Никола Леонард Сади КАРНО – блестящий французский офицер инженерных войск в 1824 г. опубликовал сочинение «Размышления о движущей силе огня и о машинах способных развить эту силу». Впервые показал, что работу можно получить в случае, когда тепло переходит от нагретого тела к более холодному (второе начало термодинамики). Ввел понятие кругового и обратимого процессов, идеального цикла тепловых машин, заложил тем самым основы их теории. Пришел к понятию механического эквивалента теплоты.

Карно вывел теорему, носящую теперь его имя:

**1. Из всех периодически действующих тепловых машин, имеющих одинаковые температуры нагревателей и холодильников, наибольшим КПД обладают обратимые машины.**

**2. Причем, КПД обратимых машин, работающих при одинаковых температурах нагревателей и холодильников, равны друг другу и не зависят от конструкции машины.**

**3. При этом КПД меньше единицы.**

Цикл, изученный Карно, является самым экономичным и представляет собой круговой процесс, состоящий из двух изотерм и двух адиабат (рис. 16.5).

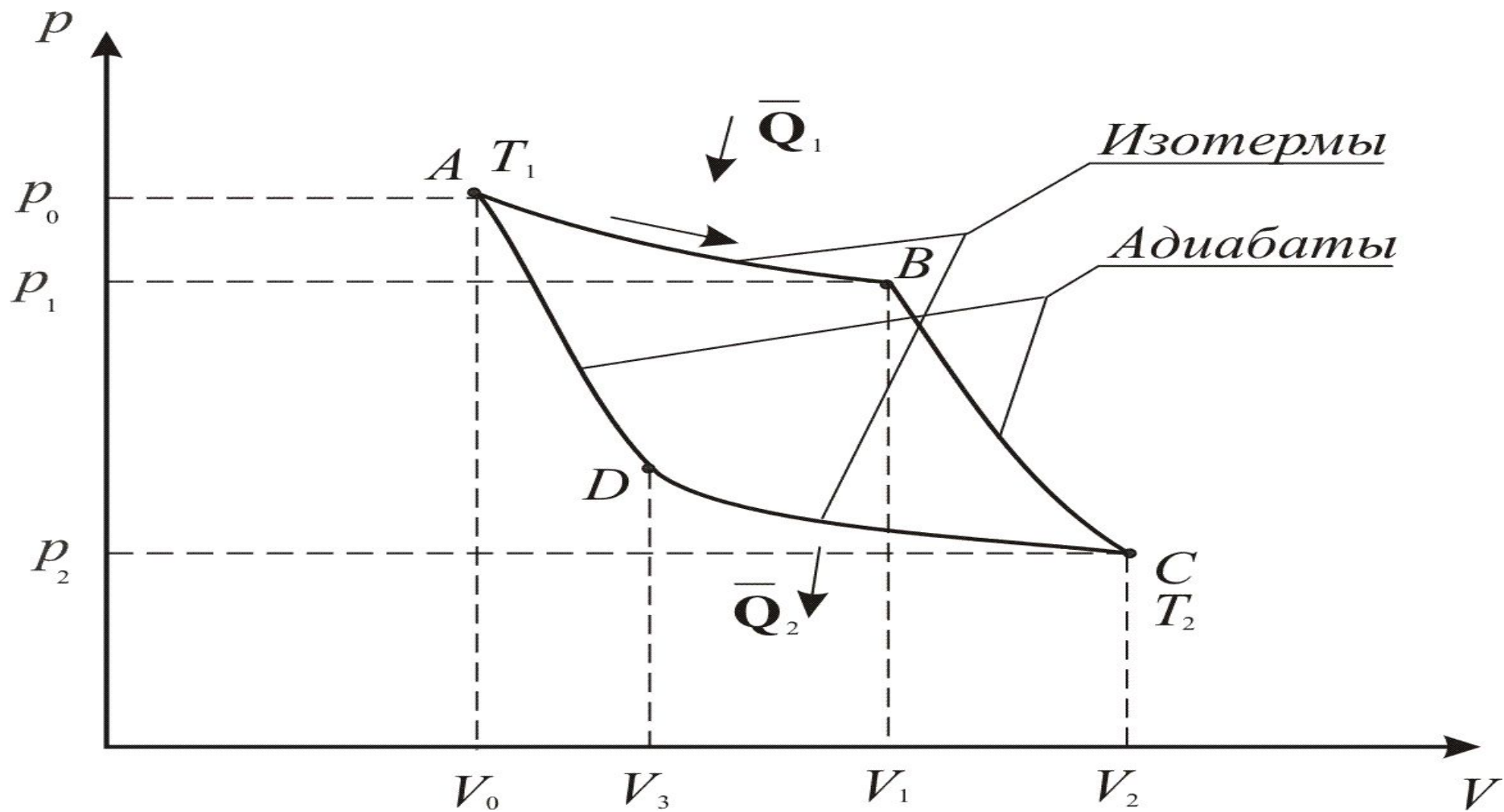


Рис. 16.5

1. Рассмотрим прямой цикл Карно, в котором в качестве рабочего тела используется идеальный газ, заключенный в сосуд с подвижным поршнем. Определим его КПД.

2. Рассмотрим круговой процесс, при котором тепло можно превратить в работу, при том, наилучшим образом, т.е. чтобы работа была максимальна. Напомню вам, что **тепловой машиной** называется периодически действующий двигатель, совершающий работу за счет, получаемого извне тепла, и имеет она нагреватель, холодильник и рабочее тело.

3. Будем считать, что нагреватель и холодильник имеют бесконечную теплоемкость, т.е. их температуры не изменяются в процессе передачи тепла.

Рассмотрим процесс сначала качественно. Начнем процесс из т.  $A$ . Газ сжат до давления  $p_0$  и находится в контакте с нагревателем при  $T_1$ . Расширение газа при каком процессе даст максимальную работу? Вспомним

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (16.7)$$

В изотермическом процессе  $dU = 0$ , значит все тепло перейдет в работу

$$\delta Q = \delta A \quad (16.8)$$

Итак, на участке  $AB$  – **изотермическое расширение при температуре  $T_1$**  (процесс теплопередачи не происходит, т.к. **а) нет разности температур, б) не происходит и передача тепла без совершения работы**, т. е. процесс обратимый).

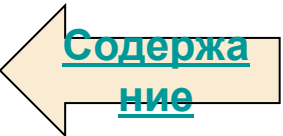
Полученное рабочим телом тепло нужно передать холодильнику. Но если просто привести к соприкосновению с холодильником, то будет передача тепла без совершения работы. Поэтому нужно сначала рабочее тело охладить до  $T_2$ , (а охладить без затрат тепла — это **адиабатическое расширение** — участок  $BC$ ), а затем, уже присоединять к холодильнику. Адиабатическим расширением заканчивается первая половина цикла — **совершение полезной работы**.

Теперь необходимо вернуть тело в исходное состояние, т.е. сжать газ до  $p_0$ . Контакт с нагревателем опять не следует делать, пока рабочее тело не примет температуру нагревателя ( $T_1$ ).

Возвращение в т.  $A$ . опять происходит в два этапа: сначала рабочее тело сжимают не прерывая контакта с холодильником, при этом холодильнику отдается тепло  $Q_2$  (изотермическое сжатие  $CD$ ). Затем изолируют тело от холодильника, адиабатно сжимают его, при этом, понятно, что температура повышается до  $T_1$  ( $DA$ ). Почему оно нагревается? Потому что **при адиабатическом сжатии тело нагревается за счет внешней работы, совершенной над ним.**



Как видим на всех стадиях кругового процесса нигде не допускается соприкосновение тел с разной температурой, т.е. нет необратимых процессов теплопроводности. Весь цикл проводится обратимо (бесконечно медленно). Вот такой круговой процесс и был впервые проанализирован Сади Карно!



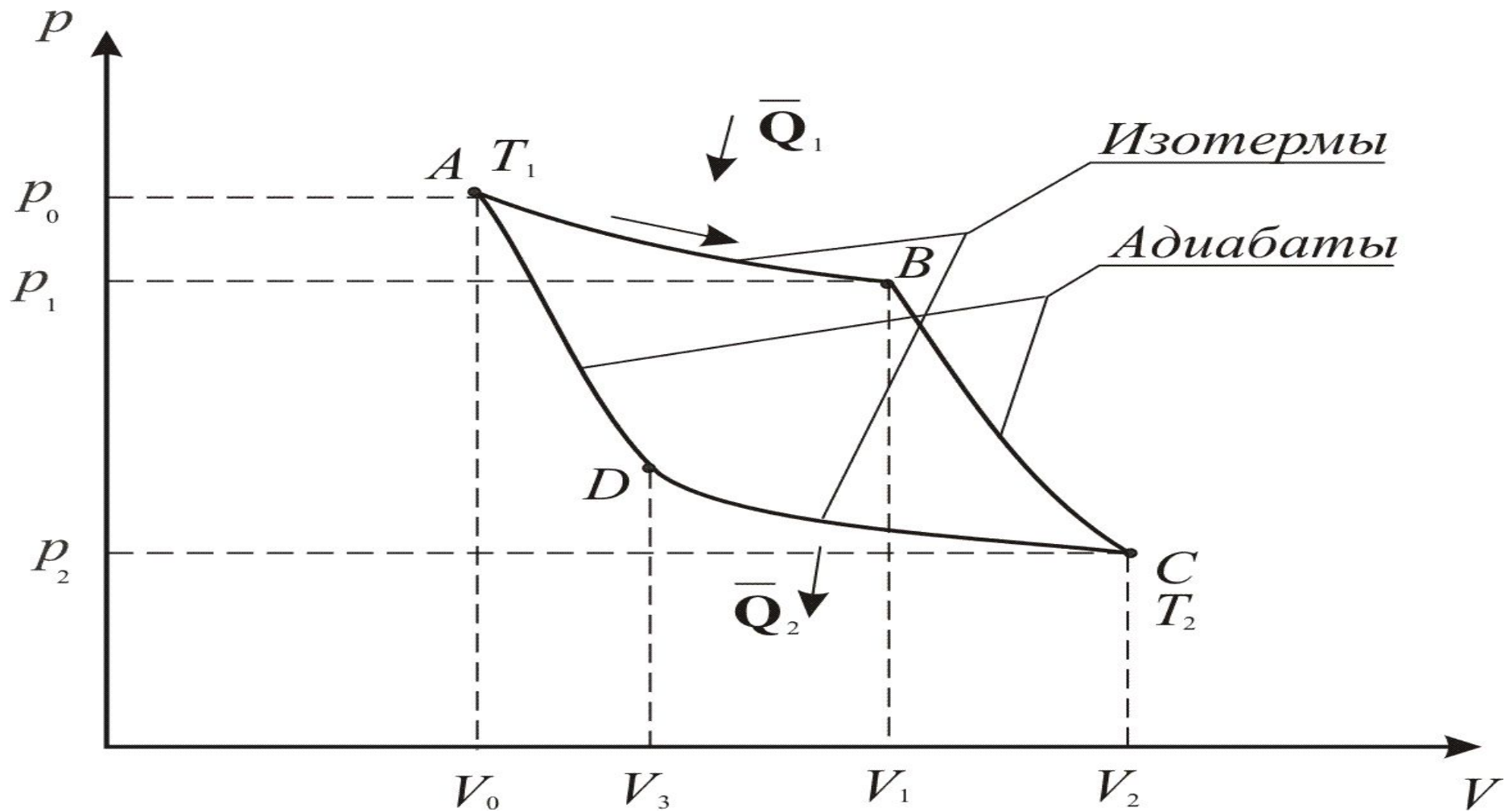


Рис. 16.5

## 4. Работа и КПД цикла Карно

Найдем полезную работу цикла Карно.

Процесс  $A-B$ . Положительная работа, совершенная газом при изотермическом расширении одного моля газа от  $V_0$  до  $V_1$ . Тепло, полученное от нагревателя  $Q_1$ , газ изотермически расширяется, совершая при этом работу  $A_1$ :

$$A_1 = RT_1 \ln \frac{V_1}{V_0} = Q_1, \quad (16.9)$$

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

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

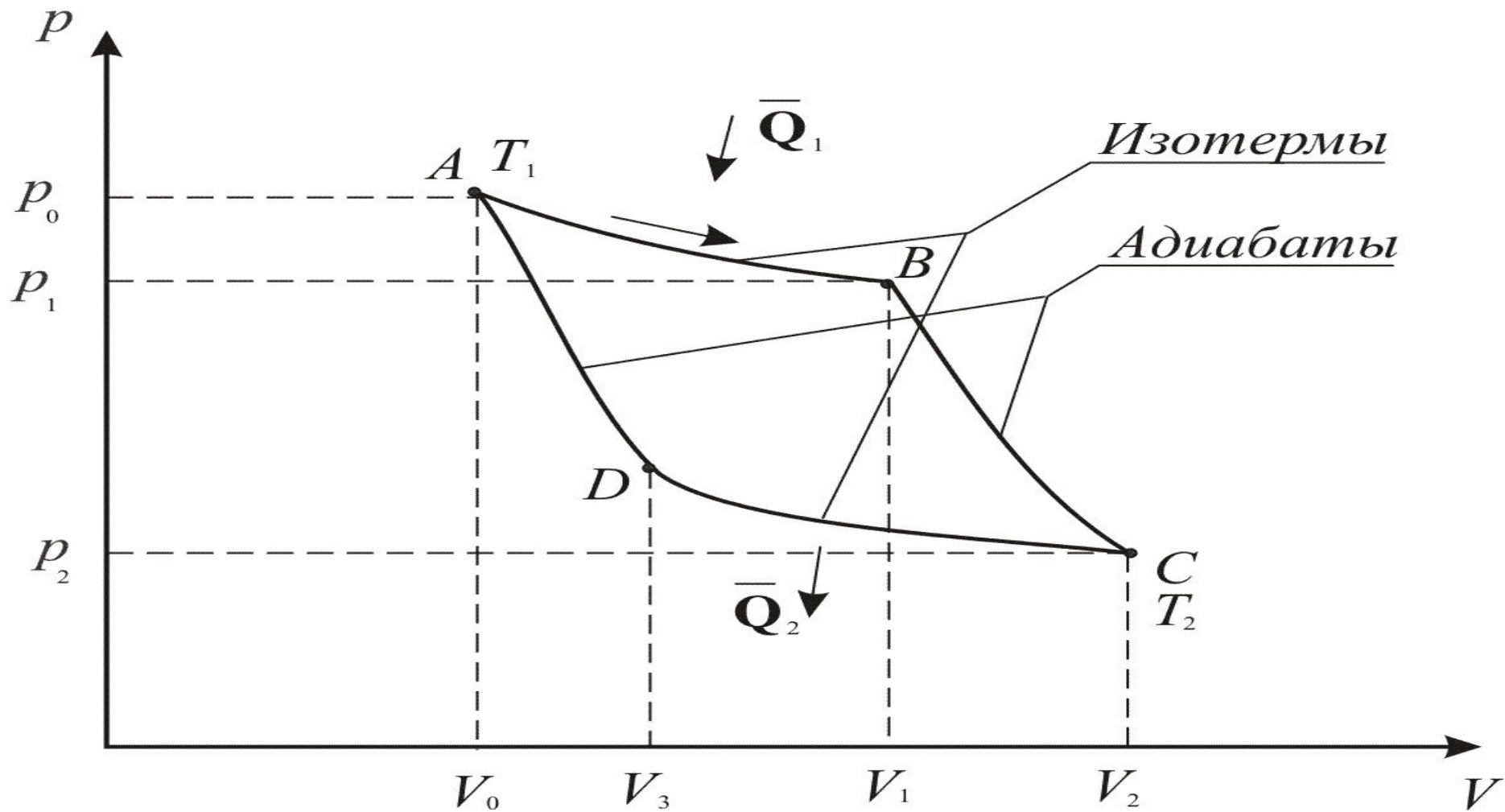


Рис. 16.5

Уравнение адиабаты:

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

где  $\gamma$  – коэффициент Пуассона

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (16.11)$$

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

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

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:

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

А работа сжатия на последнем этапе:

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

Тогда

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

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,а)

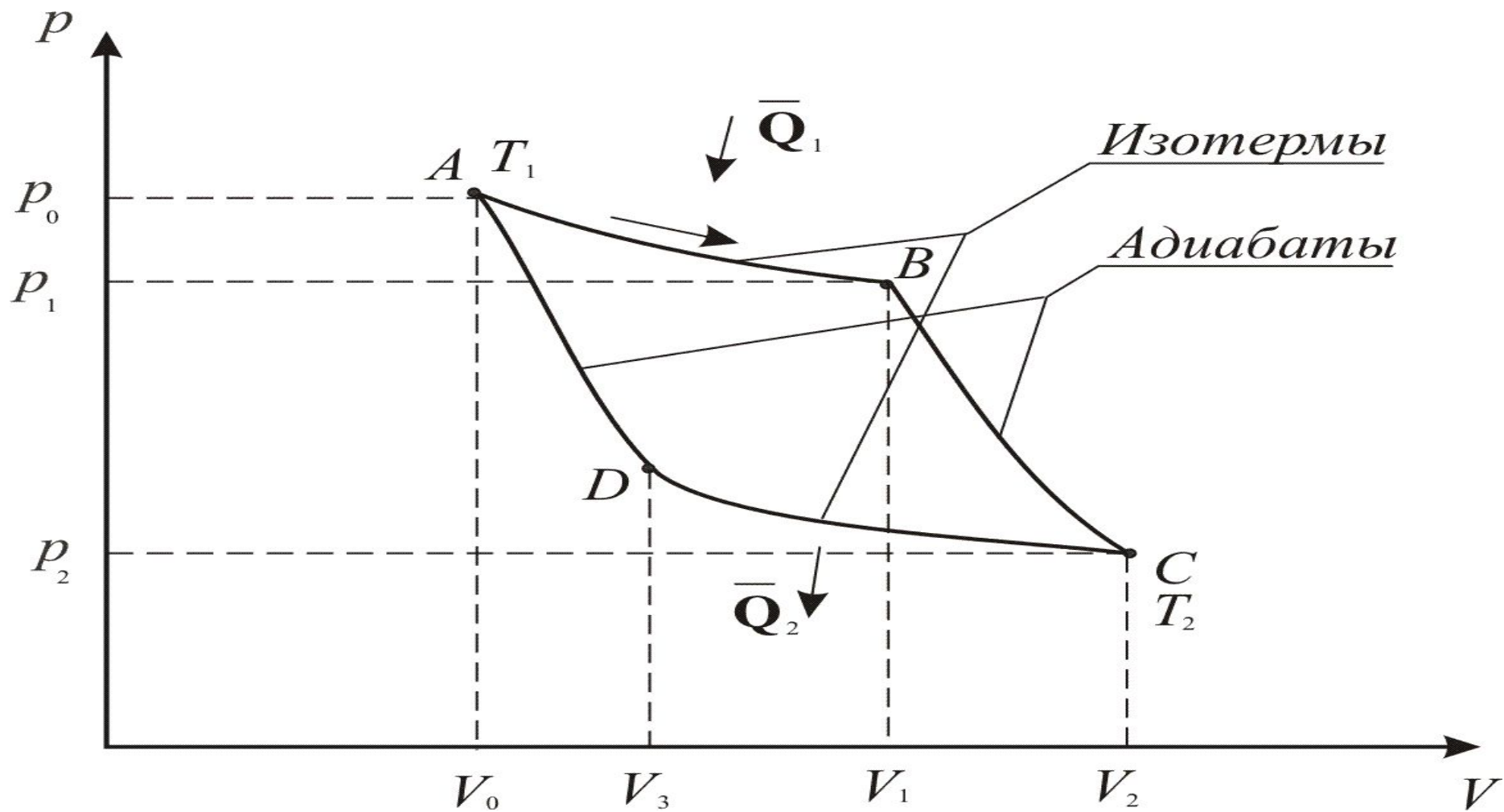


Рис. 16.5

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

$$T_2 V_3^{\gamma-1} = T_1 V_0^{\gamma-1} \quad (16.15,б)$$

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

Обозначим

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

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



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

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

Итак, полезная работа

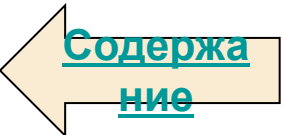
$$A = Q_1 - Q_2. \quad (16.18)$$

КПД  $\eta$  равен:

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

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.



## 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  $\Delta T$ , а холодильник нагревается на  $\Delta T$ .

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  $\Delta T$ .

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

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

Для необратимого цикла

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

Т.е. всегда  $\eta_{\text{обр}} > \eta_{\text{необр}}$  — ЭТОТ ВЫВОД СПРАВЕДЛИВ НЕЗАВИСИМО ОТ ПРИЧИН НЕОБРАТИМОСТИ ЦИКЛА КАРНО.

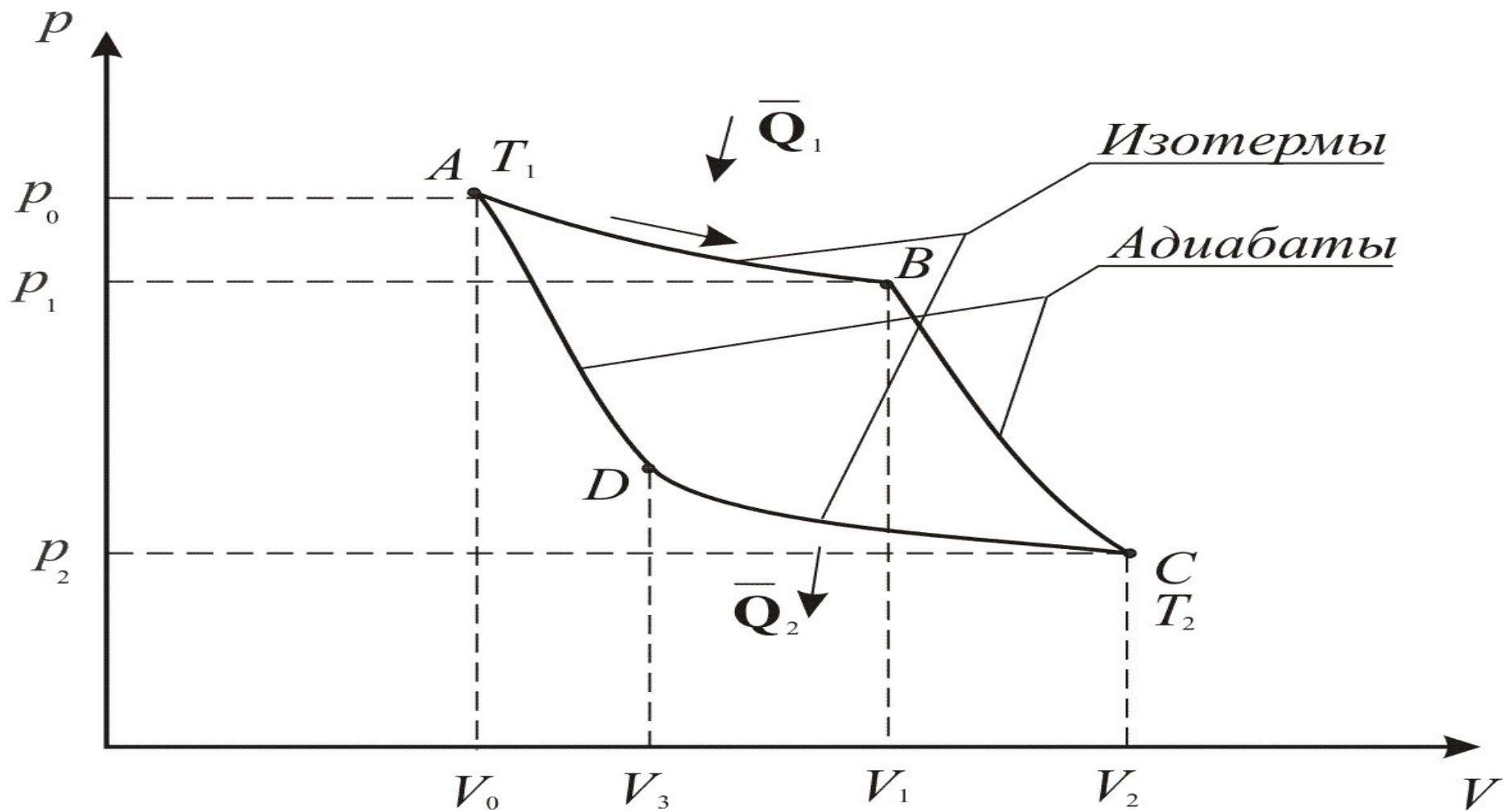


Рис. 16.5

## 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.

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

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

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (16.23)$$

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).





