

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Как уже говорилось если первый закон термодинамики характеризует процессы с количественной стороны, то второй закон термодинамики даёт качественную сторону этих процессов.

Первый закон термодинамики, выражающий всеобщий закон сохранения и превращения энергии, не позволяет определить направление протекания термодинамических процессов. Например, основываясь на этом законе, можно было бы пытаться построить *вечный двигатель второго рода*, т. е. двигатель, рабочее тело которого, совершая круговой процесс, получало бы энергию в форме теплоты от одного внешнего тела и целиком передавало ее в форме работы другому внешнему телу.

Обобщение результатов многочисленных экспериментов привело к выводу о невозможности построения вечного двигателя второго рода. **Этот вывод называют вторым законом термодинамики**; он имеет ряд формулировок, различных по форме, но эквивалентных по существу, в частности:

- а) невозможен процесс, единственным результатом которого является совершение работы, эквивалентной количеству теплоты, полученному от нагревателя;
- б) невозможен процесс, единственным результатом которого является передача энергии в форме теплоты от холодного тела к горячему.

В наиболее общем виде второй закон термодинамики на основании многочисленных экспериментальных исследований сформулирован следующим образом:

Любой реальный самопроизвольный процесс является необратимым.

движения тела как целого в неупорядоченное движение частиц самого тела и внешней среды является необратимым. Упорядоченное движение может переходить в неупорядоченное без каких-либо дополнительных (компенсирующих) процессов, например при трении. В то же время обратный переход неупорядоченного движения в упорядоченное, или, как часто говорят, «переход теплоты в работу», не может являться единственным результатом термодинамического процесса, т. е. всегда должен сопровождаться каким-либо компенсирующим процессом. Например, при равновесном изотермическом расширении идеальный газ совершает работу, которая полностью эквивалентна количеству теплоты, переданному газу нагревателем. Однако плотность газа при этом уменьшается, т. е. «превращение теплоты в работу» не является единственным результатом рассматриваемого процесса. Тепловой двигатель, работающий по прямому циклу Карно, совершает работу, эквивалентную лишь части полученного от нагревателя количества теплоты, так как

Однако плотность газа при этом уменьшается, т. е. «превращение теплоты в работу» не является единственным результатом рассматриваемого процесса. Тепловой двигатель, работающий по прямому циклу Карно, совершает работу, эквивалентную лишь части полученного от нагревателя количества теплоты, так как остальная часть отдается холодильнику, состояние которого вследствие этого изменяется. Следовательно, все реальные процессы протекают с конечной скоростью. Они сопровождаются трением, диффузией и теплообменом при конечной разности между температурами системы и внешней среды, поэтому, поэтому все они неравновесны и необратимы. Всякий необратимый процесс в одном направлении (прямом) протекает самопроизвольно, а для осуществления его в обратном направлении так, чтобы система вернулась в первоначальное состояние, требуется *компенсирующий процесс* во внешних телах, в результате которого состояния этих тел оказываются отличными от первоначальных.

5

Например, процесс выравнивания температур двух соприкасающихся различно нагретых тел идет самопроизвольно, т. е. не связан с необходимостью одновременного существования каких-либо процессов в других (внешних) телах. Однако для осуществления обратного процесса увеличения разности температур тел до первоначальной нужны компенсирующие процессы во внешних телах, обуславливающие, например, работу холодильной машины.

Необратимые процессы в силу их неравновесности нельзя изобразить в термодинамических диаграммах. Обычно на практике нужно знать интегральные характеристики необратимого процесса перехода системы из равновесного состояния 1 в равновесное состояние 2, т. е. работу - $A_{\text{необр}}$, совершенную системой, и сообщенное ей количество теплоты $Q_{\text{необр}}$.

6

Поэтому необратимый процесс может быть заменен «эквивалентным» ему обратимым процессом 1—2, который переводит систему из состояния 1 в состояние 2 таким образом, совершаемая при этом работа

$$A = A_{\text{необр}}$$

и получаемое системой количество теплоты

$$Q = Q_{\text{необр.}}$$

Эквивалентный обратимый процесс может быть представлен в любой термодинамической диаграмме.

Таким образом, удастся условно изобразить графически необратимые процессы. Условность этого «изображения» состоит в том, что в действительном необратимом процессе система проходит вовсе не через те состояния, которым соответствуют промежуточные точки кривой «эквивалентного» обратимого процесса.

КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ (ЦИКЛЫ).

- Круговые процессы изображают в термодинамических диаграммах в виде замкнутых кривых. Работа против внешнего давления, совершаемая системой в обратимом круговом процессе, пропорциональна площади, ограниченной кривой этого процесса в диаграмме V - p .
- *Прямым циклом* называют круговой процесс, в котором система совершает положительную работу: $A = \nu p \, dF > 0$. В диаграмме v — p прямой цикл изображают в виде замкнутой кривой, проходимой рабочим телом по часовой стрелке.
- *Обратным циклом* называют круговой процесс, в котором работа, совершаемая системой, отрицательна: $A = \nu p \, dF < 0$. В диаграмме v — p обратный цикл изображают в виде замкнутой кривой, проходимой рабочим телом против часовой стрелки.

8

В тепловом двигателе рабочее тело совершает прямой цикл, а в холодильной установке — обратный цикл.

Термическим (термодинамическим) коэффициентом полезного действия (КПД) η (называют отношение работы A , совершенной рабочим телом в рассматриваемом **прямом круговом процессе**, к сумме Q_1 всех количеств теплоты, сообщенных при этом рабочему телу нагревателями:

$$\eta_t = A / Q_1$$

$$A = Q_1 - Q_2$$

где Q_2 — сумма количеств теплоты, отданных рабочим телом холодильникам.

Термический КПД характеризует степень совершенства преобразования внутренней энергии в механическую, происходящего в тепловом двигателе, который работает по рассматриваемому циклу.

Нагревателем (теплоотдатчиком) называют тело, сообщающее рассматриваемой термодинамической системе энергию в форме теплоты.

Холодильником (теплоприемником) называют тело, получающее от рассматриваемой термодинамической системы энергию в форме теплоты.

Рабочим телом (рабочим агентом) называют термодинамическую систему, совершающую круговой процесс в тепловой установке.

В тепловом двигателе рабочее тело, получая энергию в форме теплоты, часть этой энергии отдает в форме работы. В холодильной установке рабочее тело, получая энергию в форме работы, осуществляет передачу энергии в форме теплоты от холодного тела к телу, более нагретому.

10

Цикл Карно

- Циклом Карно называют прямой круговой процесс, состоящий из двух изотермических процессов $1—1'$ и $2—2'$ и двух адиабатических процессов $1'—2$ и $2'—1$. В процессе $1—1'$ рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты Q_1 , а в процессе $2—2'$ рабочее тело отдает холодильнику количество теплоты Q_2 .
Теорема Карно: термический КПД обратимого цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и является функцией только термодинамических температур нагревателя (T_1) и холодильника (T_2).
- Доказательство теоремы Карно основано на втором законе термодинамики.

Цикл Карно прямой (3.5.) и обратный (3.6.)

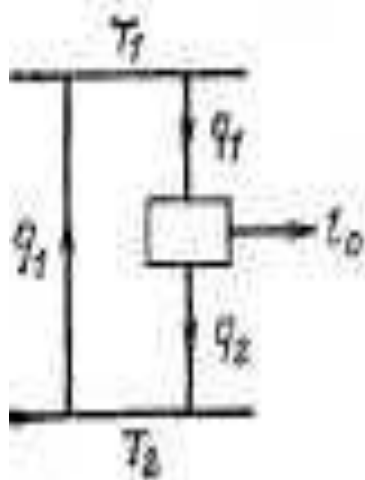


Рис. 3.4

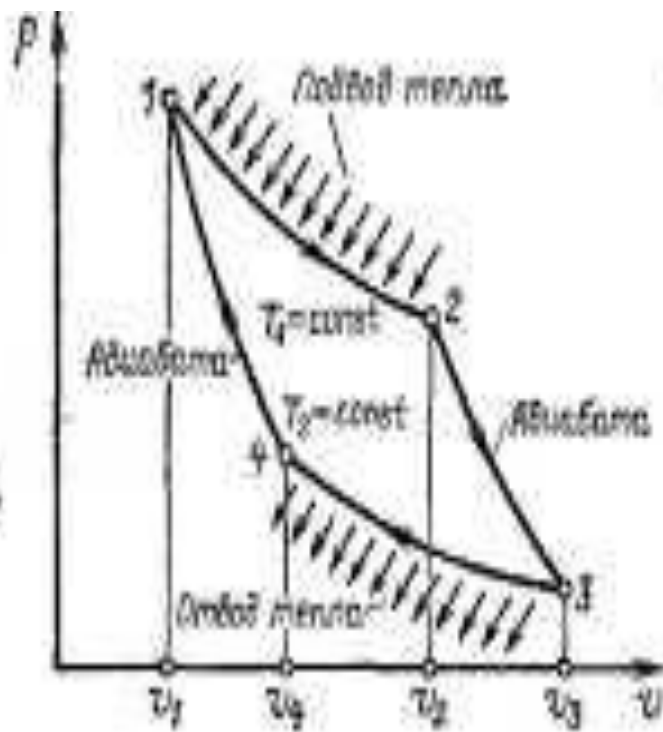


Рис. 3.5

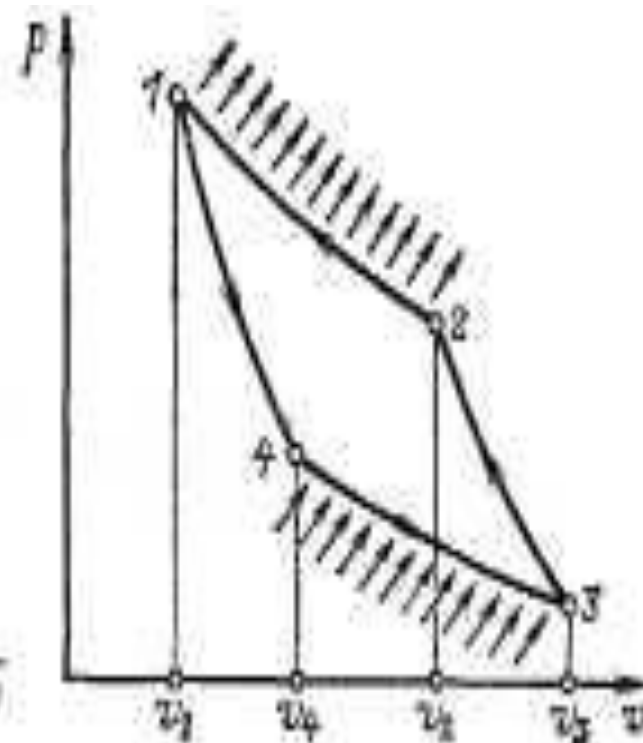
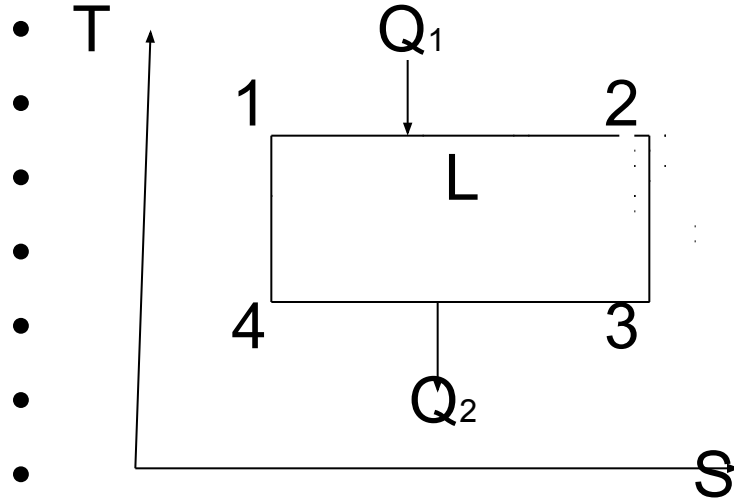


Рис. 3.6

Цикл Карно в TS - диаграмме

- В прямом цикле Карно горячий источник отдаёт тепло Q_1 при постоянной температуре T_1 , а рабочее тело получает



это количество тепла, изменяя своё состояние по линии 1-2 так, при этом его температура не меняется, оставаясь на бесконечно малую величину меньше T_1 .

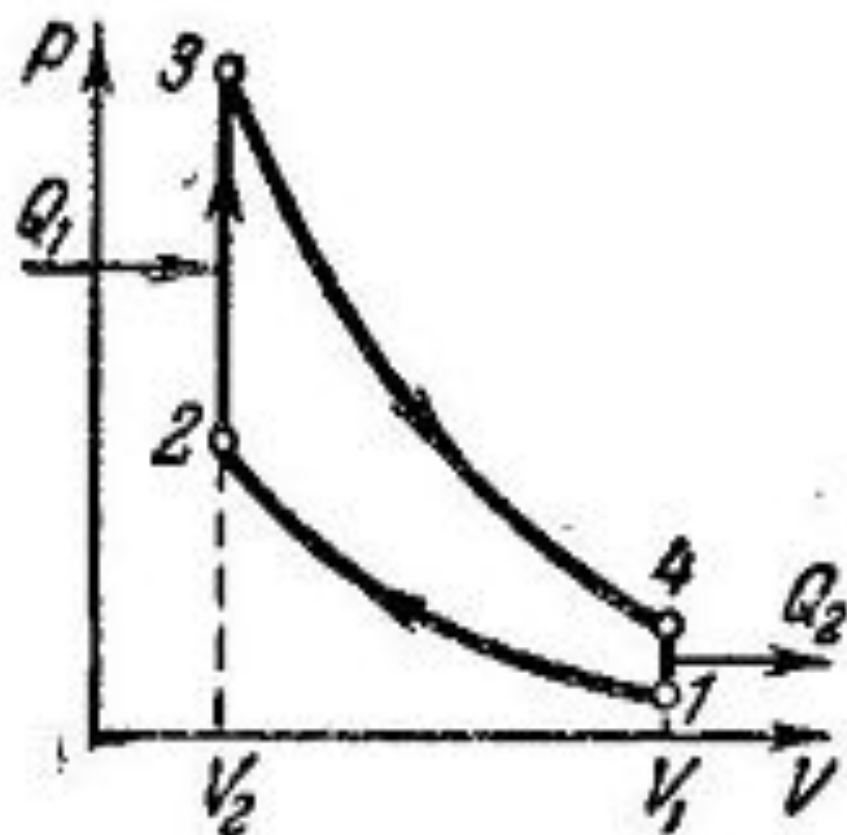
- Такая же картина наблюдается при теплообмене между рабочим телом и холодным источником.

Из сопоставления выражений для термического КПД произвольного цикла и обратимого цикла Карно следует, что в обратимом цикле Карно отношение температур нагревателя и холодильника равно отношению количеств теплоты, соответственно отданной и полученной ими за цикл. Таким образом, для сравнения температур двух тел нужно осуществить обратимый цикл Карно, в котором эти тела используются в качестве нагревателя и холодильника, и измерить Q_1 и Q_2 . Устанавливаемую таким образом шкалу температур называют *термодинамической шкалой температур*. Ее преимущество состоит в том, что в соответствии с теоремой Карно она не связана со свойствами какого-либо конкретного термометрического тела. Однако вследствие невозможности осуществления обратимого цикла Карно указанный способ сравнения температур нельзя практически реализовать, и он имеет лишь принципиальное значение.

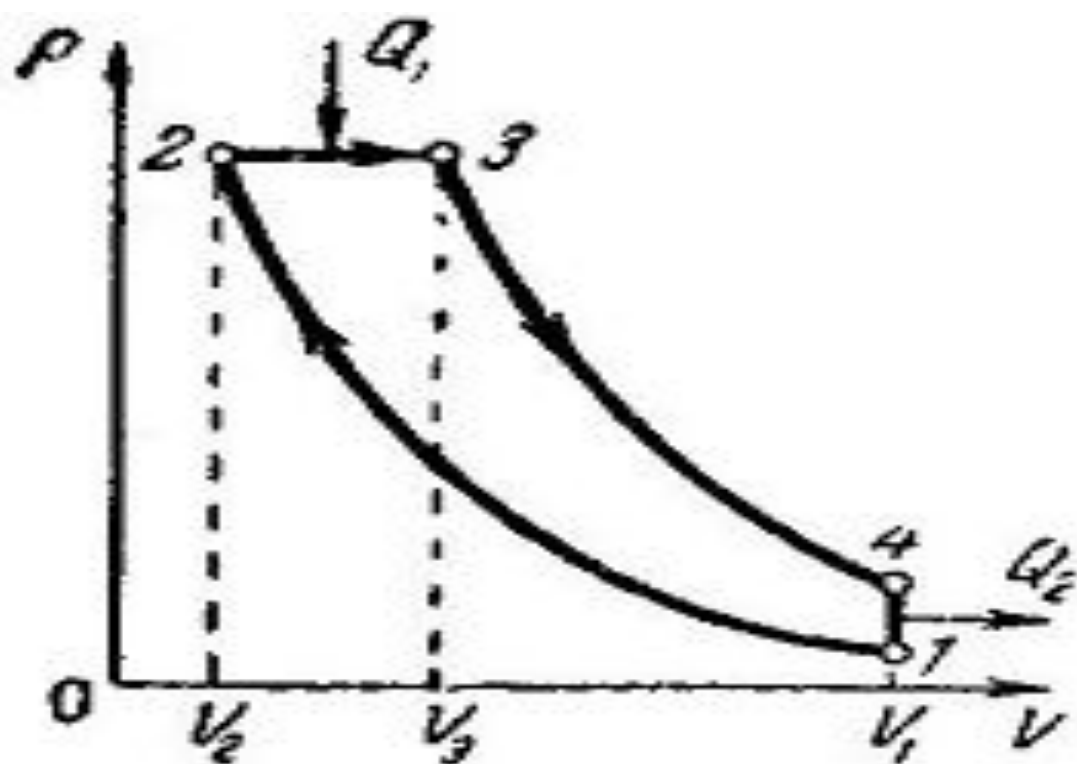
14

Термический КПД произвольного обратимого цикла не может превосходить термический КПД обратимого цикла Карно, проведенного между температурами $T_{\text{макс}}$ и $T_{\text{мин}}$. Термический КПД произвольного необратимого цикла всегда меньше термического КПД обратимого цикла Карно, проведенного между экстремальными температурами $T_{\text{макс}}$ и $T_{\text{мин}}$.

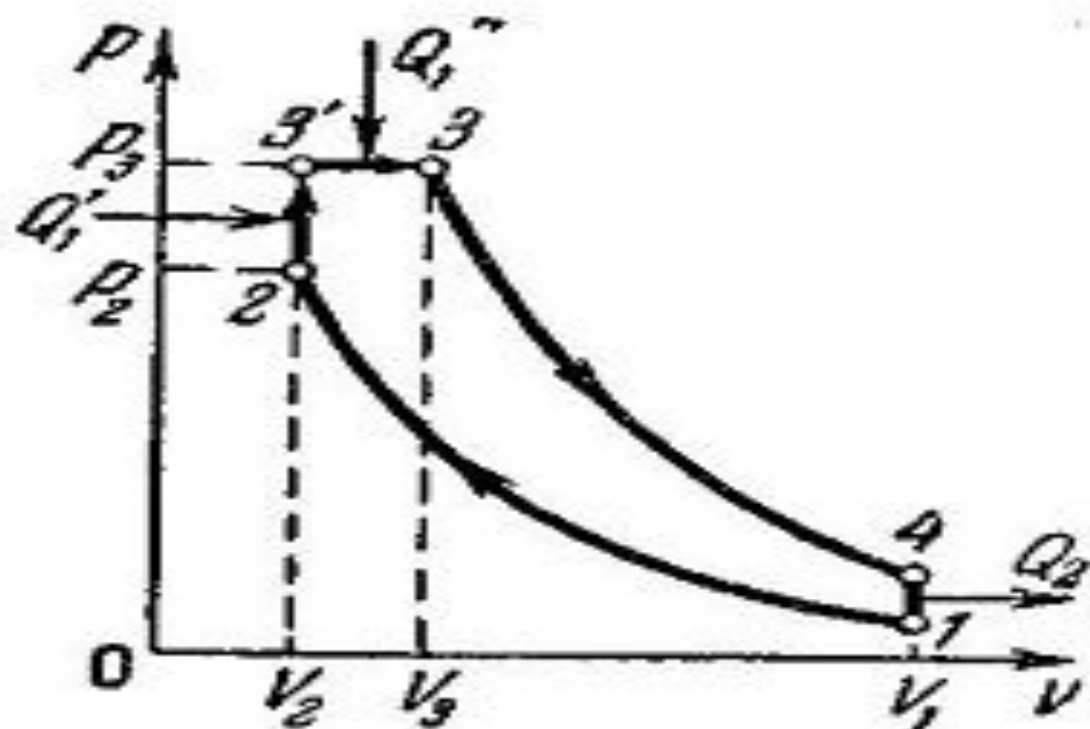
1. Цикл со сгоранием при $V = \text{const}$
(цикл Отто) (рис. II. 4. 2)



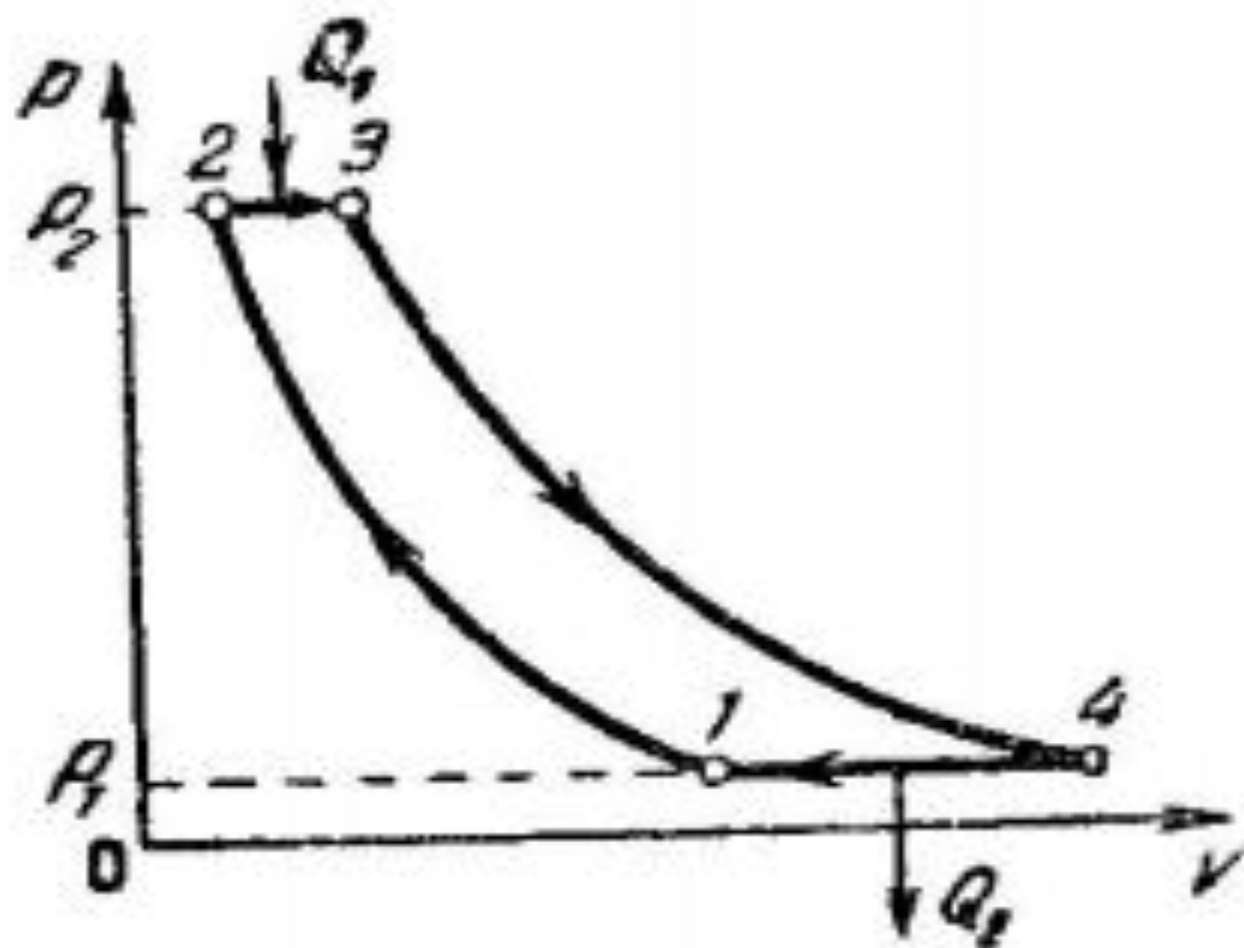
2. Цикл со сгоранием при $p = \text{const}$
(цикл Дизель) (рис. II. 4. 3)



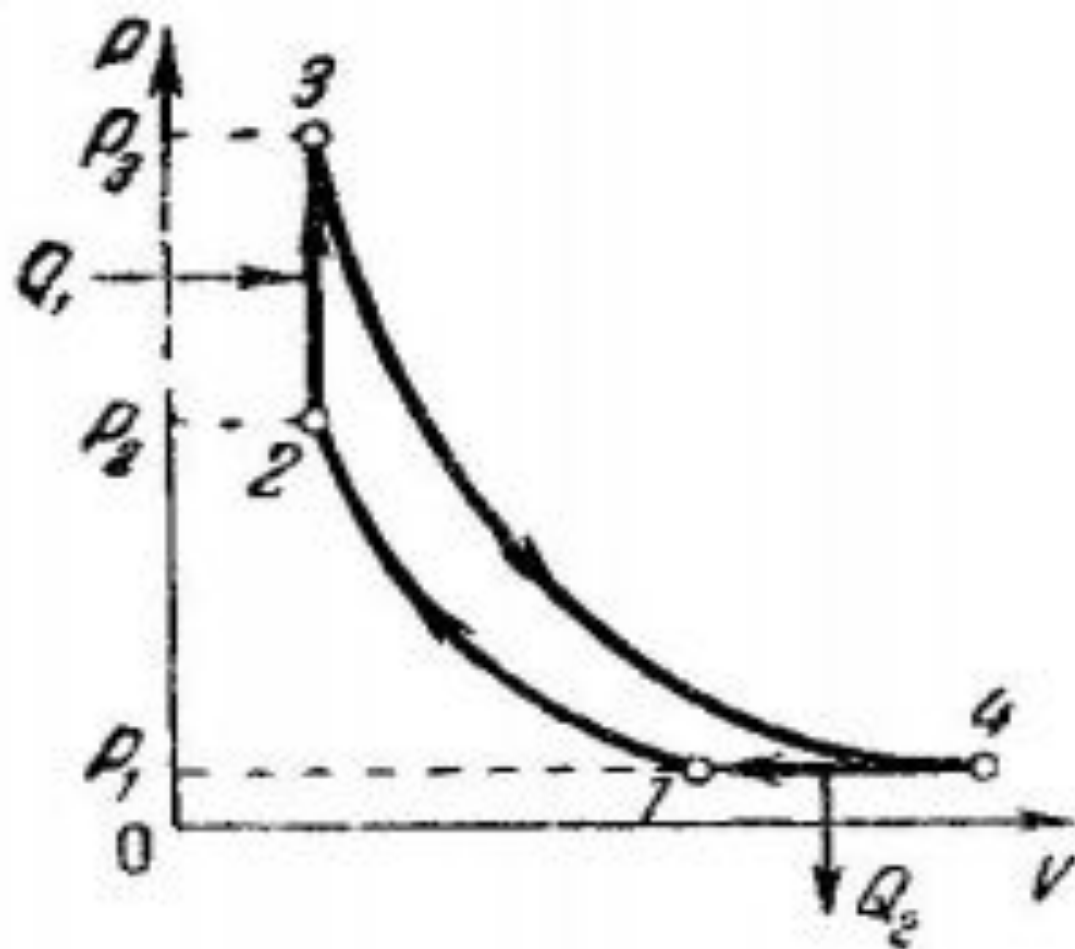
3. Смешанный цикл со сгоранием при $V = \text{const}$ и $p = \text{const}$ (цикл Тринклера–Сабатэ) (рис. II. 4. 4)



1. Цикл со сгоранием при $p = \text{const}$
(рис. II. 4, 5)



2. Цикл со сгоранием при $V = \text{const}$
(рис. II. 4. 6)



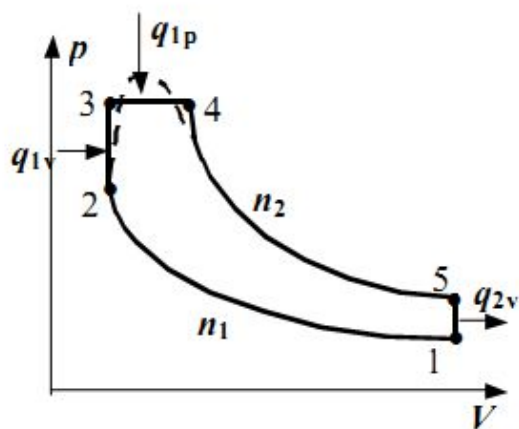


Рис. 4.5. Индикаторная диаграмма идеализированного цикла поршневого ДВС:

- 1–2 – процесс политропного сжатия;
- 2–3 – фаза подвода теплоты при $v = \text{const}$;
- 3–4 – фаза подвода теплоты при $p = \text{const}$;
- 4–5 – политропное расширение;
- 5–1 – изохорный отвод теплоты в окружающую среду

Для описания и расчётов цикла используют следующие безразмерные характеристики:

- степень сжатия

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_h + V_{\text{кв}}}{V_h} = 1 + \frac{V_{\text{кв}}}{V_h};$$

- степень повышения давления

$$\lambda = \frac{p_3}{p_2};$$

- степень предварительного расширения

$$\rho = \frac{V_4}{V_3}.$$