

энергомашиностроение.

6

Лекция №7

Термодинамические процессы

- Термодинамическая система и процессы в ней.
- Обратимые и необратимые процессы.
- Основные процессы идеального газа.

Термодинамическая система и процессы в ней

Термодинамическим процессом называется последовательное изменение состояния тела или группы тел при переходе из одного равновесного состояния в другое. При этом параметры, характеризующие состояние тел, будут непрерывно изменяться. Однако в частных случаях отдельные параметры при протекании термодинамического процесса могут оставаться неизменными.

Состояние рабочего тела, при котором давление в любой его точке имеет одно и то же значение, называется **состоянием механического равновесия**. Если же по объему рабочего тела остается неизменной его температура, то говорят о **термическом равновесии тела**.

Пользуясь этими понятиями, можно следующим образом сформулировать условия равновесного состояния рабочего тела: для **равновесного состояния рабочего тела необходимо и достаточно, чтобы в нем соблюдались механическое и термическое равновесия**.

Состояние рабочего тела или происходящий в нем процесс определяются только характером его взаимодействия с окружающей средой, т. е. с другими телами. В связи с этим вводится понятие **термодинамической системы** (в дальнейшем просто системы) как совокупности различных физических тел, имеющих возможность вступать в термические и механические взаимодействия, т. е. обмениваться энергией в форме теплоты или работы между собой и окружающими систему телами.

Рассмотрим одну из термодинамических систем. Газообразное рабочее тело помещено в цилиндр, плотно закрытый подвижным поршнем с площадью сечения $F \text{ м}^2$ (рис. 1). На поршень во взаимно противоположных направлениях действуют сила давления газа pF и сила P' некоторого тела, которое будем называть **источником работы** (*и. р.*). Между источником работы и рабочим телом может происходить обмен энергией в форме работы. Кроме того, в систему входит один или несколько **источников теплоты** (*и. т.*), т. е. тел, с которыми рабочее тело может обмениваться энергией в форме теплоты. При некоторых условиях каждый источник может отдавать рабочему телу или получать от него теплоту. Если при таком теплообмене рабочее тело не будет деформироваться, т. е. поршень останется неподвижным, то согласно уравнению непосредственным результатом теплообмена явится увеличение (подвод теплоты) или уменьшение (отвод теплоты) внутренней энергии рабочего тела на величину, соответственно равную количеству подводимой или отводимой теплоты.

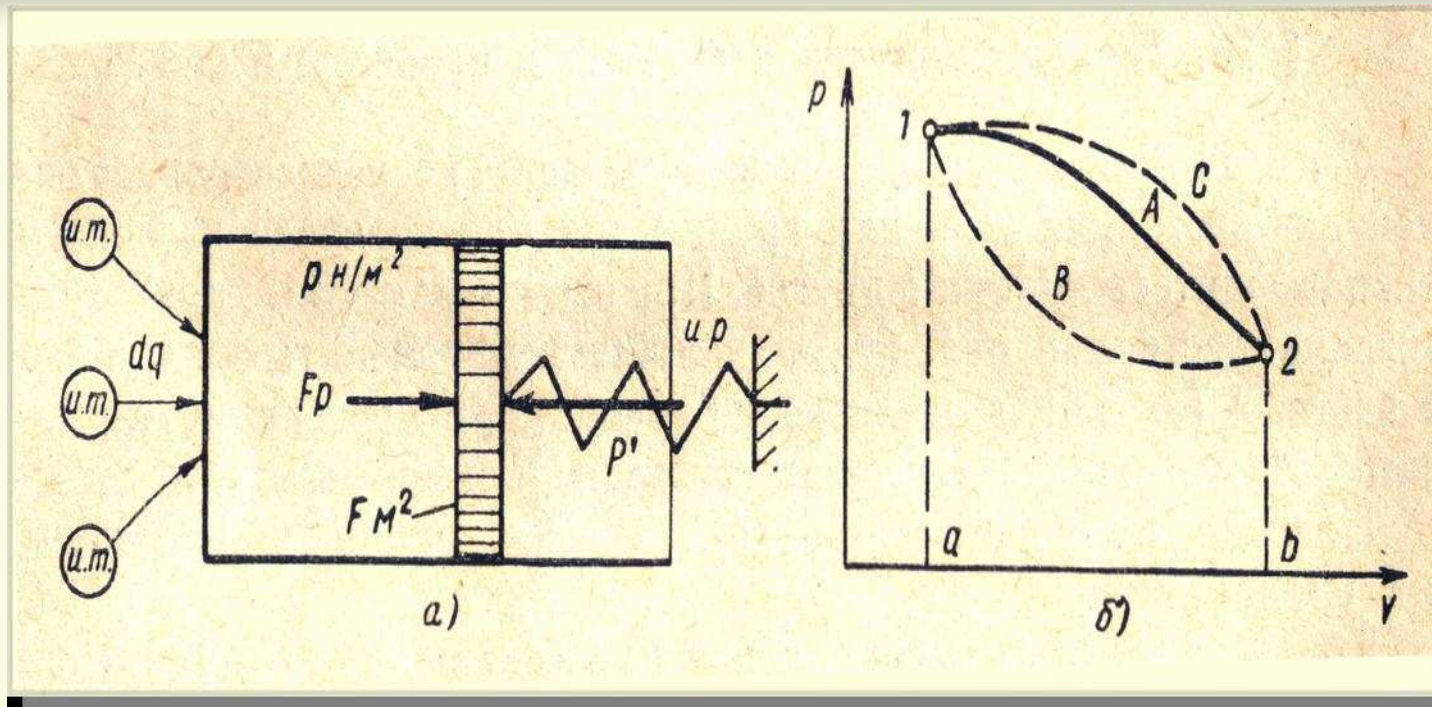


Рис. 1. Пример термодинамической системы

Обратимые и необратимые процессы

Более подробное рассмотрение свойств равновесных и неравновесных процессов приводит к установлению понятия об **обратимых и необратимых процессах**.

Процесс 1—2 (рис. 1, б) будет обратимым, если при протекании его в прямом направлении (от состояния 1 к состоянию 2) в системе происходят такие изменения, которые обеспечивают возможность протекания процесса в обратном направлении (от состояния 2 к состоянию 1), так что в результате его все элементы системы пройдут через те же состояния, через которые они проходили в прямом процессе, но в обратном порядке, а в конце обратного процесса вся система придет в то состояние, которое было в начале прямого процесса.

Необратимый процесс в общем случае также можно провести в обратном направлении, но не через те же состояния, через которые система проходила в прямом направлении, и в результате необратимого процесса система не восстановит начального состояния.

Обратимыми процессами могут быть только равновесные.

Все неравновесные процессы — необратимые.

Основные процессы идеального газа

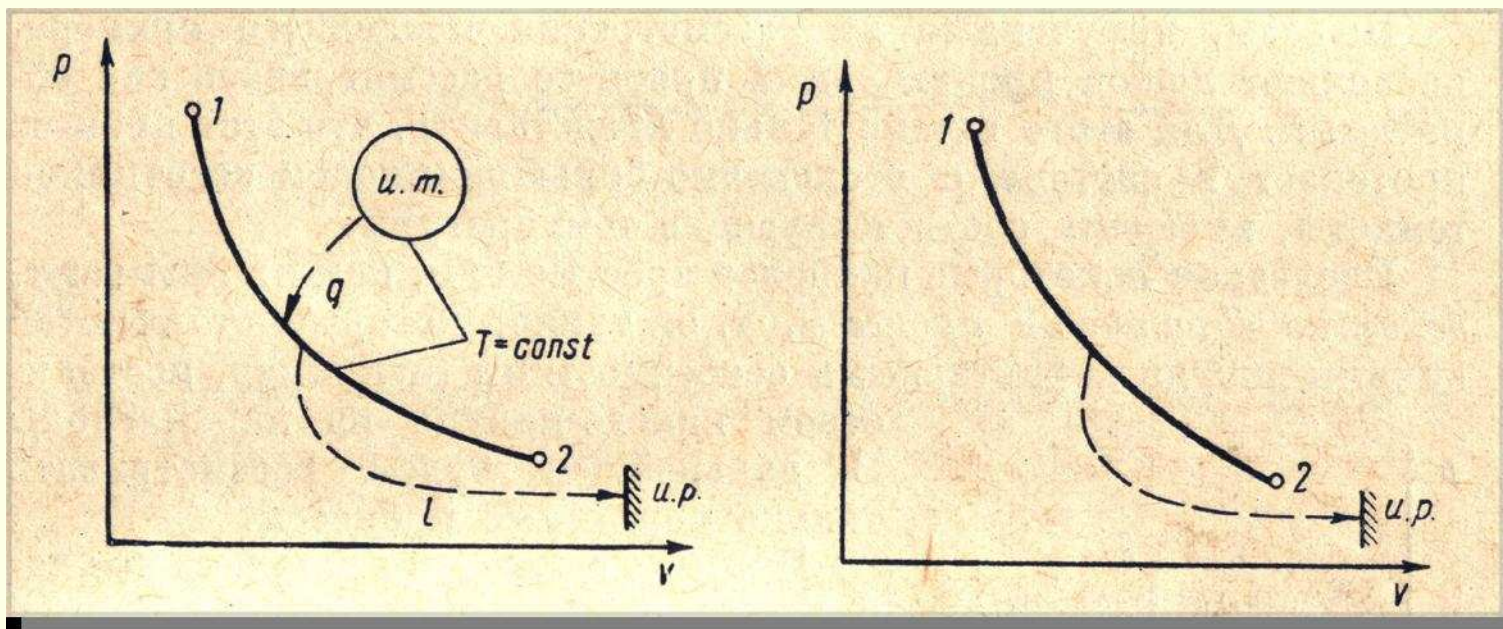


Рис. 2. Обратимый процесс в системе с одним источником теплоты постоянной температуры ($T = \text{const}$)

Рис. 3. Обратимый процесс в системе без источников теплоты (адиабатный процесс)

Характер возможного обратимого процесса в данной системе определяется ее свойствами. Рассмотрим некоторые обратимые процессы в различных системах.

1. Система включает в себя один источник теплоты постоянной температуры. В такой системе единственно возможным обратимым процессом явится процесс, в течение которого температура Рабочего тела остается постоянной и равной температуре источника (рис. 2). Такой процесс называется **изотермическим**. Все остальные процессы в этой системе могут протекать только с нарушением термического равновесия в ней, т.е. необратимо.

2. В системе нет источников теплоты. Обратимым процессом этом случае может быть только процесс бесконечно медленного превращения внутренней энергии рабочего тела в работу (или наоборот). Такой процесс называется **адиабатным** (рис. 3).

3. Система включает в себя бесконечно большое число источников теплоты, причем при последовательном переходе от источника к источнику осуществляется плавное, непрерывное изменение температуры; другими словами, разность температур любых двух соседних источников есть величина бесконечно малая, т.е. $T_n - T_{n-1} = dT$.

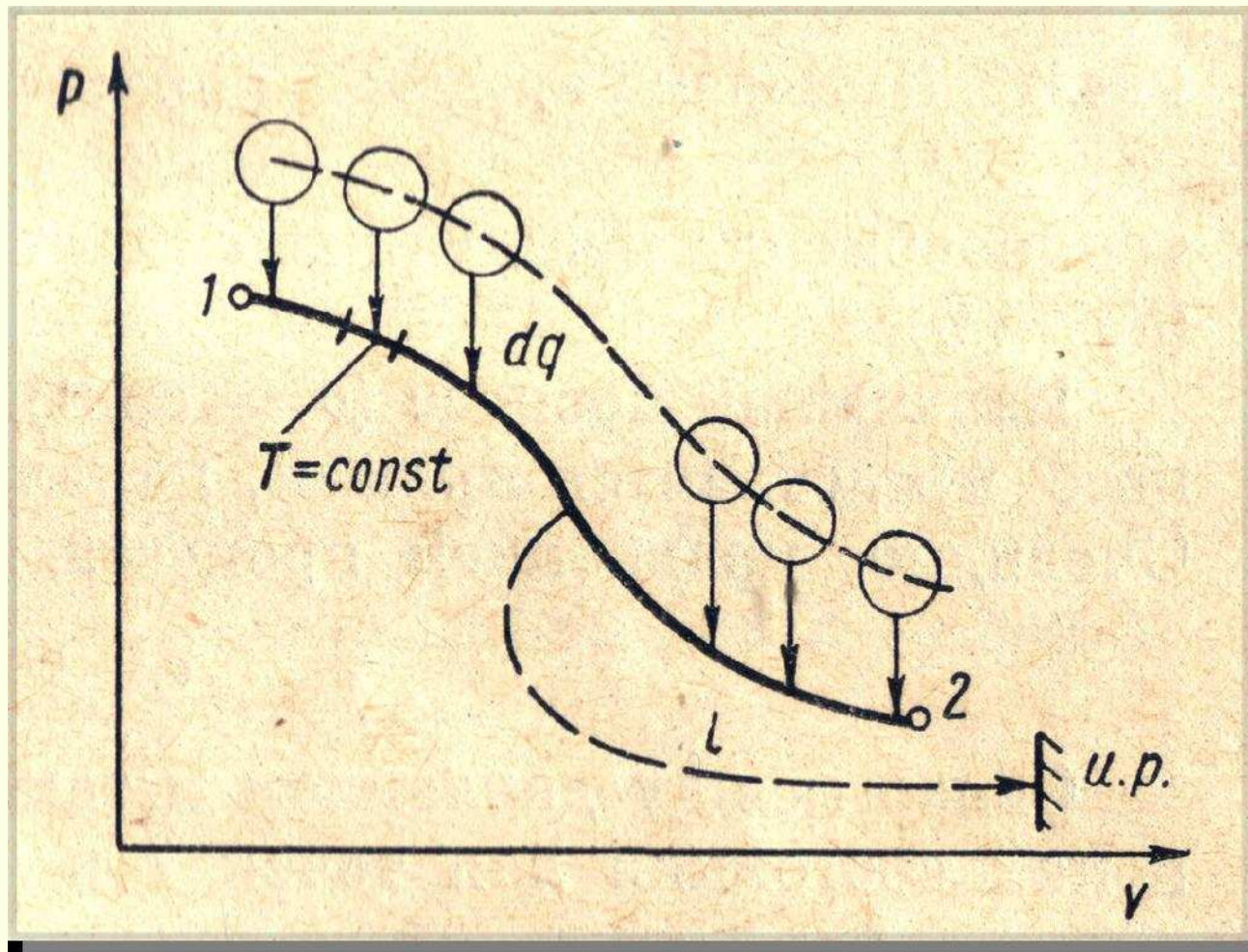


Рис. 4. Обратимый процесс в системе с бесконечно большим числом источников теплоты

Изохорный процесс

В координатах v - p этот процесс представится прямой, параллельной оси ординат (рис. 5).
Очевидно, уравнением процесса является зависимость

$$v = const \quad (1)$$

$$p_1 v = RT_1$$

$$p_2 v = RT_2$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (2)$$

Между давлением и температурой в процессе $v = const$ существует прямая зависимость.
Уравнение первого закона термодинамики для бесконечно малого участка процесса:

$$dq = c_v dT + p dv$$

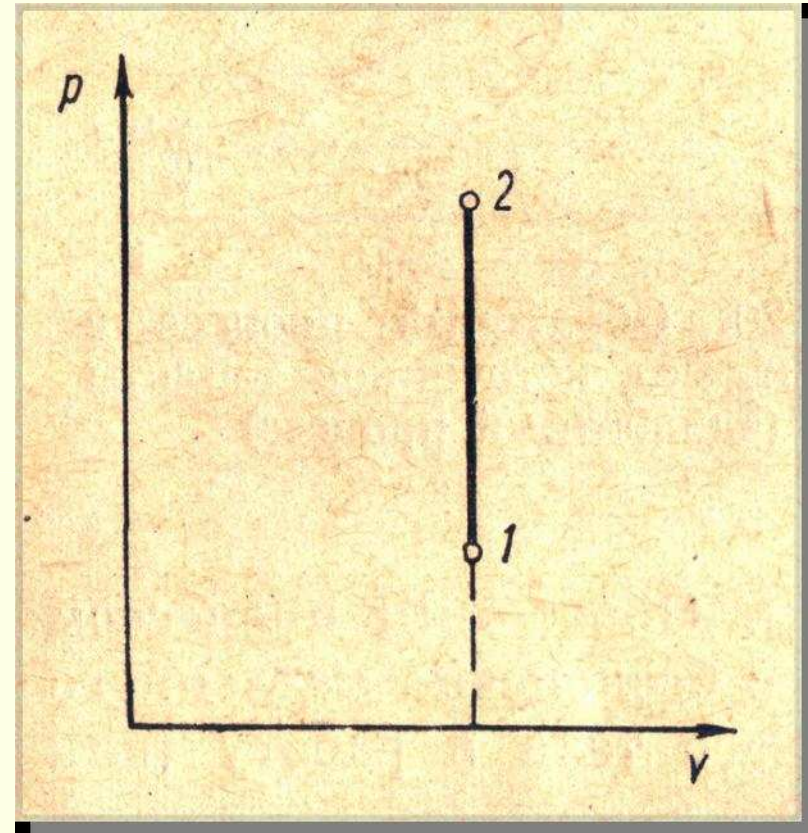


Рис. 5. Изохорный процесс

Так как $v = \text{const}$, то $dv = 0$, т. е. работа газа в процессе равна нулю и

$$dq = c_v dT \quad (3)$$

подводимая энергия

$$q = c_{vm}(T_2 - T_1) = u_2 - u_1 \quad (4)$$

изменение энтальпии

$$\Delta h = (u_2 - u_1) + (p_2 v - p_1 v) = \Delta u + v(p_2 - p_1) \quad (5)$$

$$\Delta h = c_{pm}(T_2 - T_1) \quad (6)$$

Изобарный процесс

В координатах v - p он представится прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 6). Связь между удельными объемами и температурами определится из уравнений

$$p = \text{const} \quad (7)$$

$$p v_2 = RT_2$$

$$p v_1 = RT_1$$

отсюда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

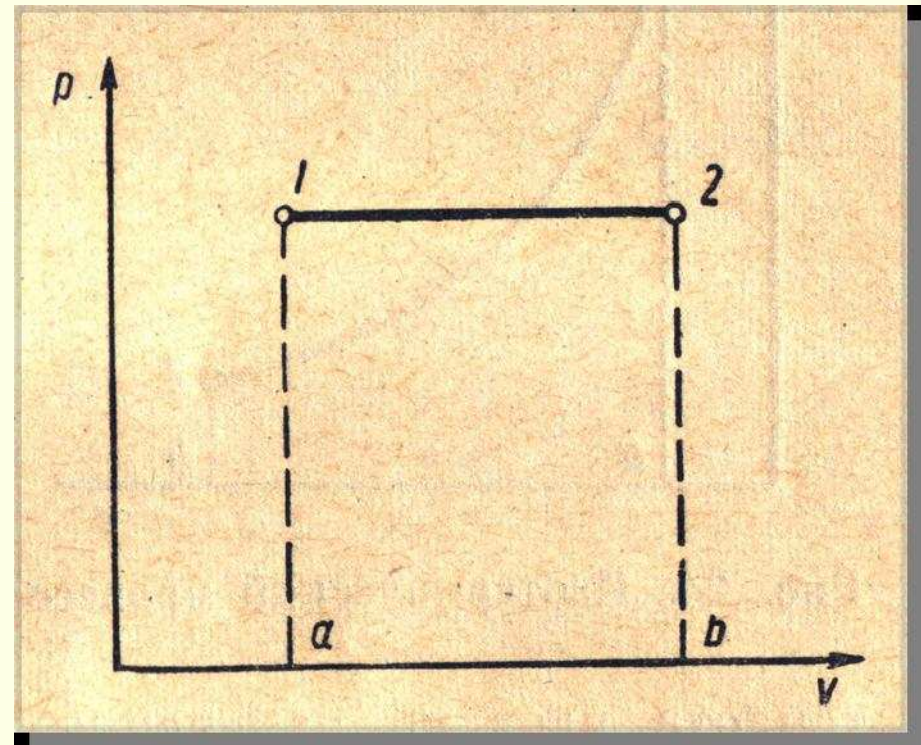


Рис. 6. Изобарный процесс

Уравнение первого закона термодинамики для бесконечно малого элемента процесса:

$$dq = c_v dT + p dv \quad (9)$$

$$l = p(v_2 - v_1)$$

$$q = c_{vm} (T_2 - T_1) + p(v_2 - v_1) \quad (10)$$

$$dq = c_p dT - v dp$$

$$dq = dh$$

$$dq = c_{pm} (T_2 - T_1) = h_2 - h_1 = \Delta h \quad (11)$$

Изотермический процесс

Изотермический процесс ($T = \text{const}$). В координатах v - p этот процесс представится известной кривой Мариотта (рис. 7), а его уравнением будет уравнение закона Бойля — Мариотта:

$$p v = \text{const}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

$$dq = c_v dT + p dv$$

$$dq = p dv$$

$$l = \int_1^2 p dv$$

$$p = \frac{RT}{v}; l = RT \int_1^2 \frac{dv}{v}$$

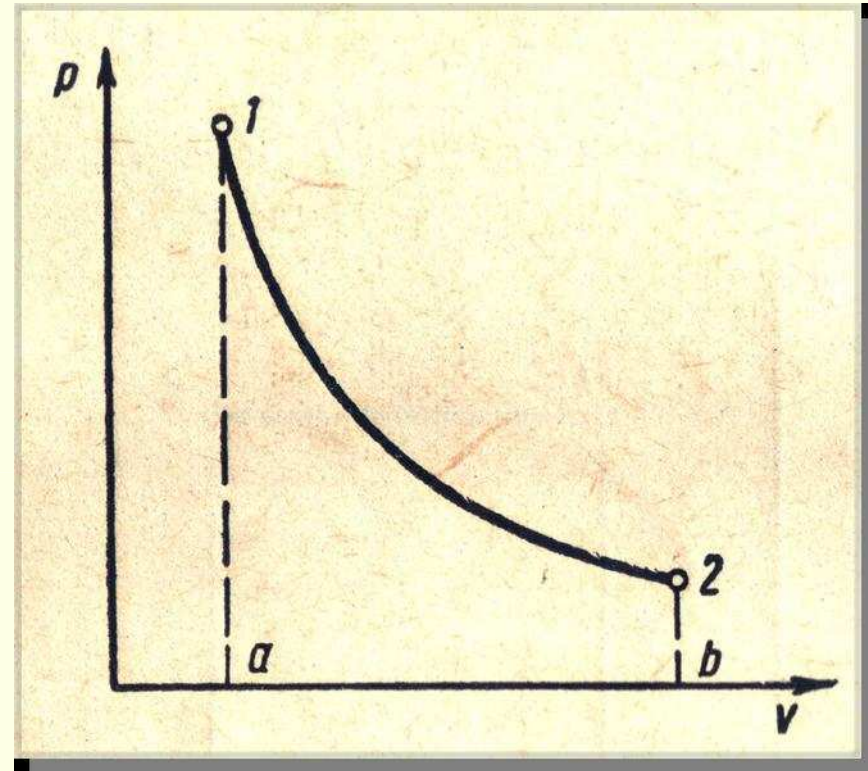


Рис. 7. Изотермический процесс

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1}; l = 2,3RT \lg \frac{v_2}{v_1}; l = 2,3RT \lg \frac{p_1}{p_2}; q = 2,3RT \lg \frac{v_2}{v_1}; q = 2,3RT \lg \frac{p_1}{p_2} \quad (14)$$

Адиабатный процесс

$$0 = c_p dT - v dp$$

$$T = \frac{p v}{R}$$

$$c_p p dv + (c_p - R) v dp = 0$$

$$c_p - R = c_v$$

$$c_p p dv + c_v v dp = 0$$

$$\frac{c_p}{c_v} p dv + v dp = 0$$

$$\frac{c_p}{c_v} = k$$

$$kpv + vdp = 0$$

$$k \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0$$

$$k \ln v + \ln p = \text{const}$$

$$pv^k = \text{const} \quad (15)$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k ;$$

$$p_2' = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)$$

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k < \left(\frac{v_1}{v_2} \right)$$

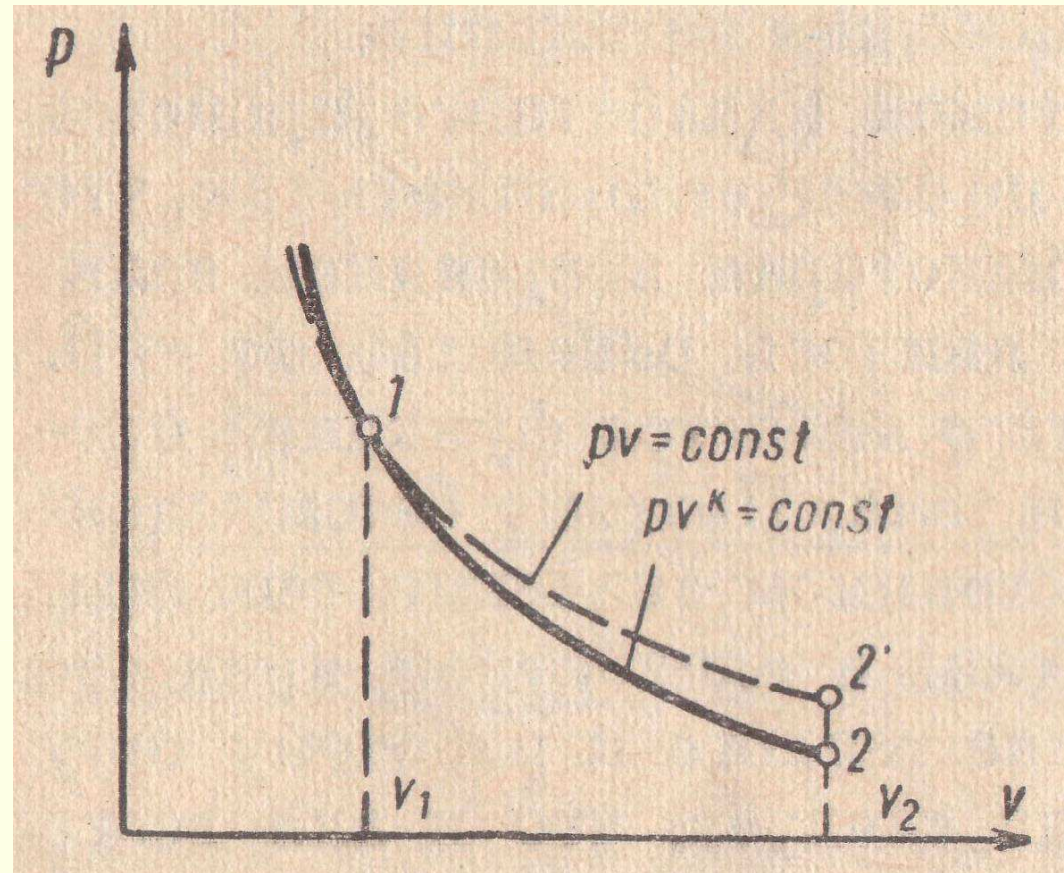


Рис. 8. Совместное изображение адиабаты и изотермы

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k; \quad \frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/k} \quad (16) \quad (17)$$

$$0 = c_v dT + dl; \quad dl = -c_v dT$$

$$c_p - c_v = R; \quad k - 1 = \frac{R}{c_v}; \quad c_v = \frac{R}{k - 1}$$

$$dl = -\frac{R}{k - 1} dT; \quad l = -\frac{R}{k - 1} \int_1^2 dT = -\frac{R}{k - 1} (T_2 - T_1)$$

$$l = \frac{R}{k - 1} (T_1 - T_2); \quad l = \frac{RT}{k - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \quad (18) \quad (19)$$

$$l = \frac{1}{k - 1} (p_1 v_1 - p_2 v_2); \quad l = \frac{p_1 v_1}{k - 1} \left(1 - \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} \right) \quad (20) \quad (21)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k - 1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right] \quad (22)$$

$$l = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (23)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (24)(25)$$

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_{vm} (T_2 - T_1) \quad (26)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_{pm} (T_2 - T_1) \quad (27)$$

Контрольные вопросы

- Условия равновесного состояния рабочего тела
- Термодинамическая система, степени свободы системы.
- Изохорный процесс
- Изобарный процесс
- Изотермический процесс
- Адиабатный процесс
- Связь отношений V и T в адиабатном процессе.
- Связь отношений P и T в адиабатном процессе.
- Обратимые и необратимые процессы.