

# ТЕМА 2. ПЕРВЫЙ И ВТОРОЙ ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Вопрос 1. Аналитические выражения для работы  $l$  и теплоты  $q$

Фундаментальный закон природы формулируется следующим образом: **в изолированной системе энергия не пропадает бесследно и не возникает вновь, она лишь переходит из одного вида в другой. Общая сумма всех видов энергий остается постоянной.**



Баланс энергии системы, выделенной контрольной оболочкой, имеет вид (рис. 2.1)

$$E_{\text{п}} = \Delta E_c + E_{\text{от}}, \quad (2.8)$$

где  $E_{\text{п}}$ ,  $E_{\text{от}}$  — соответственно подведенная к системе и отведенная от системы энергия;  $\Delta E_c$  — прирост энергии системы.

**Первый закон термодинамики** является частным случаем **всеобщего закона превращения и сохранения энергии** применительно к тепловым явлениям.

В 1842 г. немецкий ученый Р. Майер впервые установил эквивалентность между подводимой теплотой и производимой работой и тем обосновал **первый закон термодинамики**.

УРАВНЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ ИМЕЕТ ВИД

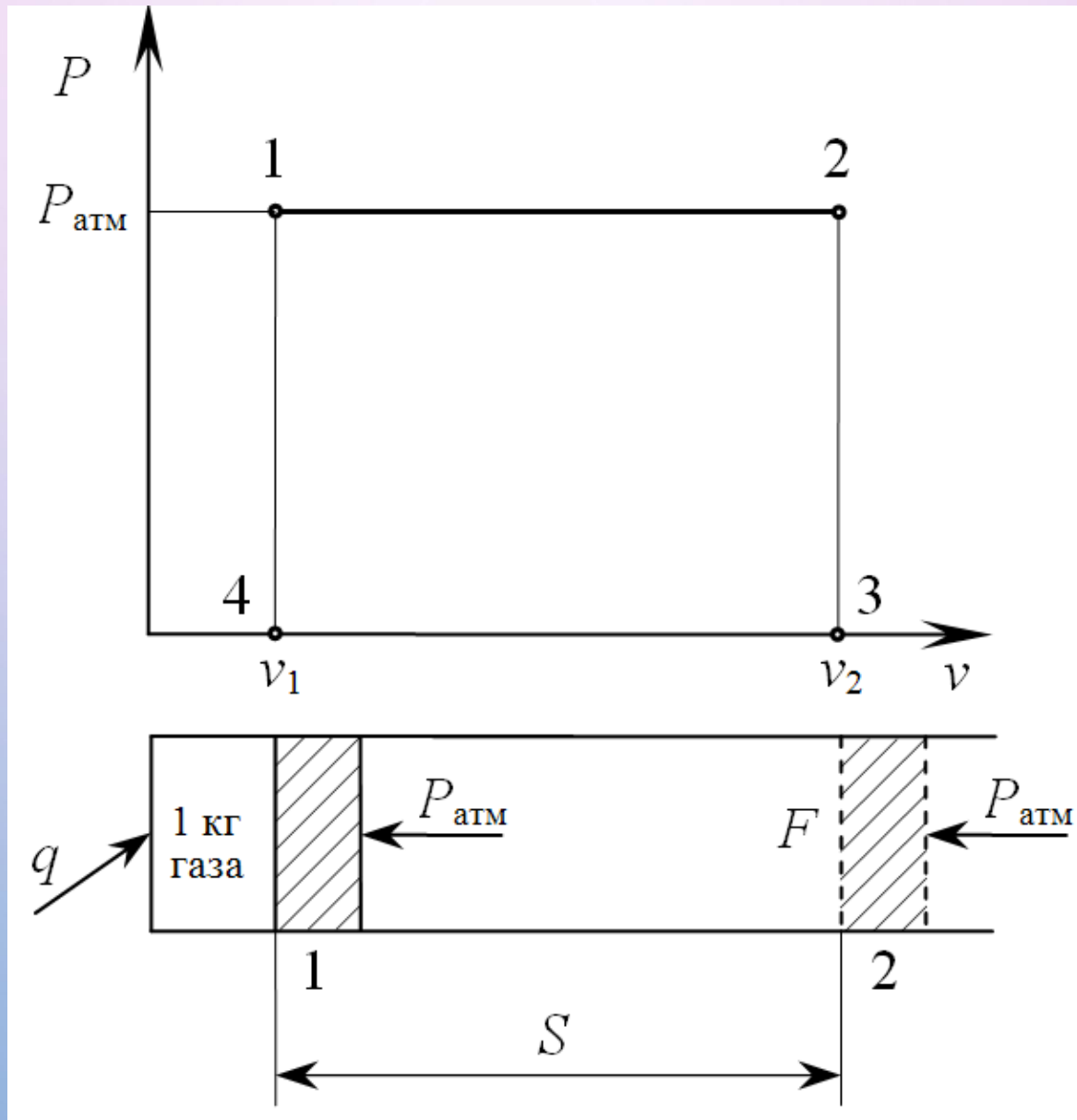
$$q = \Delta u + l ,$$

или в дифференциальной форме

$$dq = du + dl .$$

Существует несколько формулировок первого закона термодинамики, одна из которых: «**теплота  $q$ , подводимая к термодинамической системе, затрачивается на изменение ее внутренней энергии  $\Delta u$  и совершение работы  $l$  против внешних сил**».

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ РАСШИРЕНИЯ 1 КГ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ПРОЦЕССЕ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

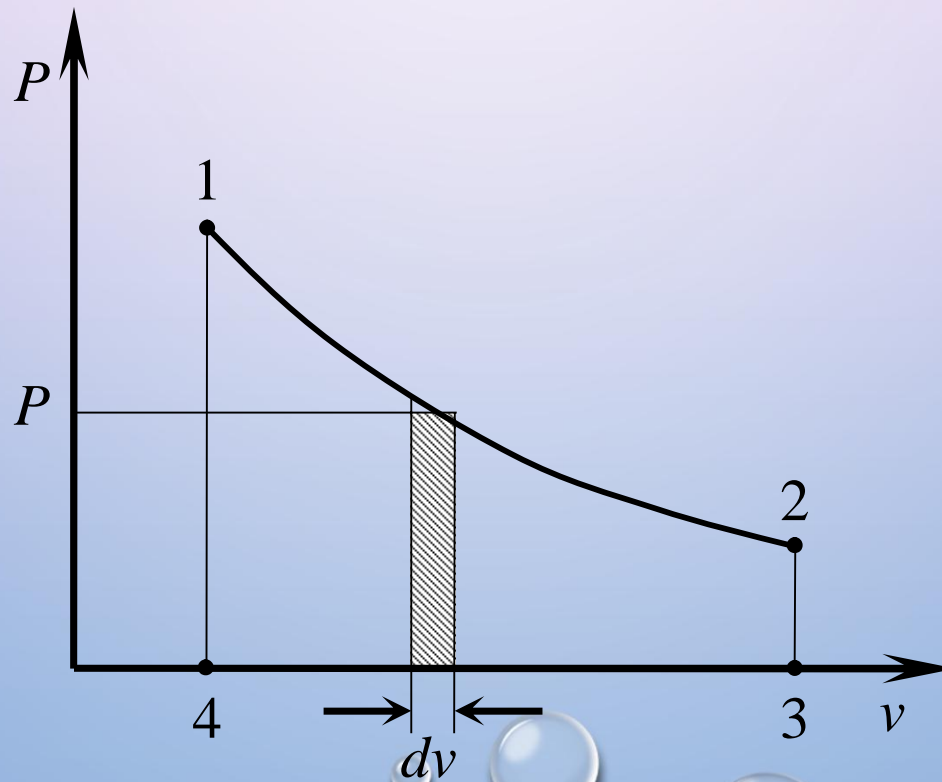


РАБОТА РАВНА ПРОИЗВЕДЕНИЮ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА ТЕЛО, НА ПУТЬ, ПРОЙДЕННЫЙ ТЕЛОМ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЭТОЙ СИЛЫ.

ТОГДА СОВЕРШАЕМАЯ ГАЗОМ РАБОТА

$$l = P \cdot F \cdot S , \quad l = P(v_2 - v_1) = P \Delta v .$$

Рассмотрим процесс расширения идеального газа в произвольном термодинамическом процессе 1-2.



Выделим элементарный участок изменения удельного объёма  $dv$ , изменением давления на этом участке можно пренебречь ввиду его малости и считать давление постоянным и равным  $P$ . Тогда элементарная работа  $dl$  на данном участке определится из выражения

$$dl = Pdv,$$

а полная работа расширения газа в процессе 1-2

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} Pdv = \text{пл. } 12341.$$

т.е. работа расширения в координатах  $Pv$  равна площади, ограниченной линией процесса расширения 1-2, двумя крайними ординатами 1-4 и 2-3 и осью абсцисс.

При расширении газа не вся работа может быть полезно использована, так как часть её затрачивается на вытеснение газа из надпоршневого пространства.

Поэтому в теплотехнике используют понятие **полезной (располагаемой)** работы  $l'$ , определяемой как разность между работой расширения  $l$  и работой вытеснения  $l_{\text{ВЫТ}}$ :

$$l' = l - l_{\text{ВЫТ}}$$

$$l_{\text{ВЫТ}} = P_2 v_2 - P_1 v_1.$$

Тогда полезная (располагаемая) работа

$$l'_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} P dv - (P_2 v_2 - P_1 v_1).$$

ПОДЫНТЕГРАЛЬНОЕ ВЫРАЖЕНИЕ  $Pdv$  ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ЧАСТЬ ДИФФЕРЕНЦИАЛА

$$d(Pv) = Pdv + vdP,$$

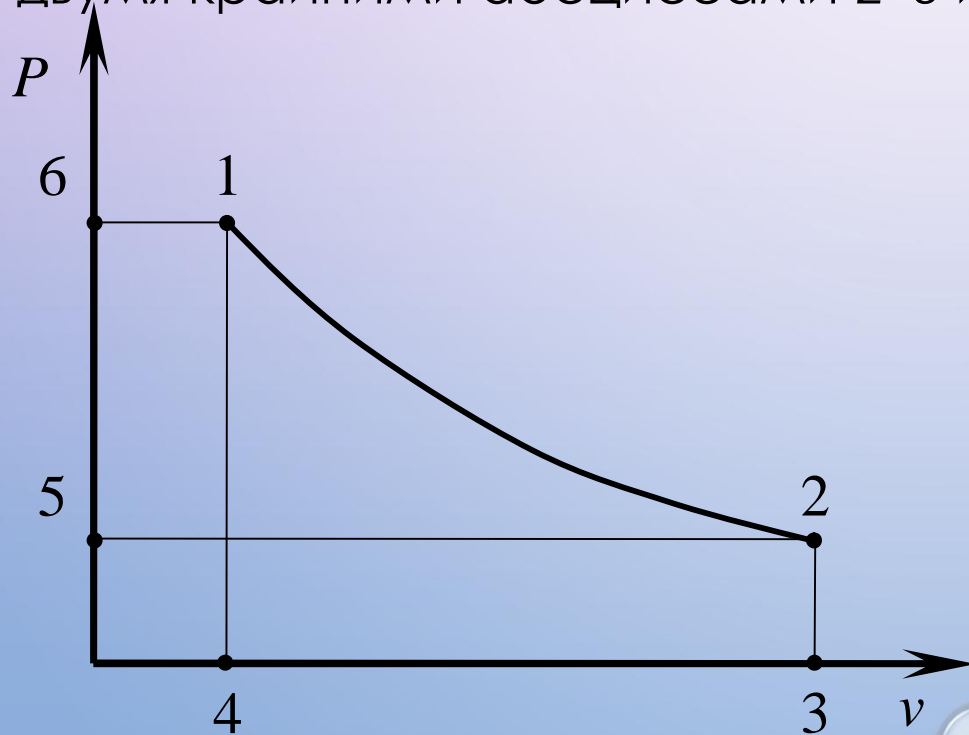
ОТКУДА

$$Pdv = d(Pv) - vdP.$$

Выполнив ряд преобразований, получим

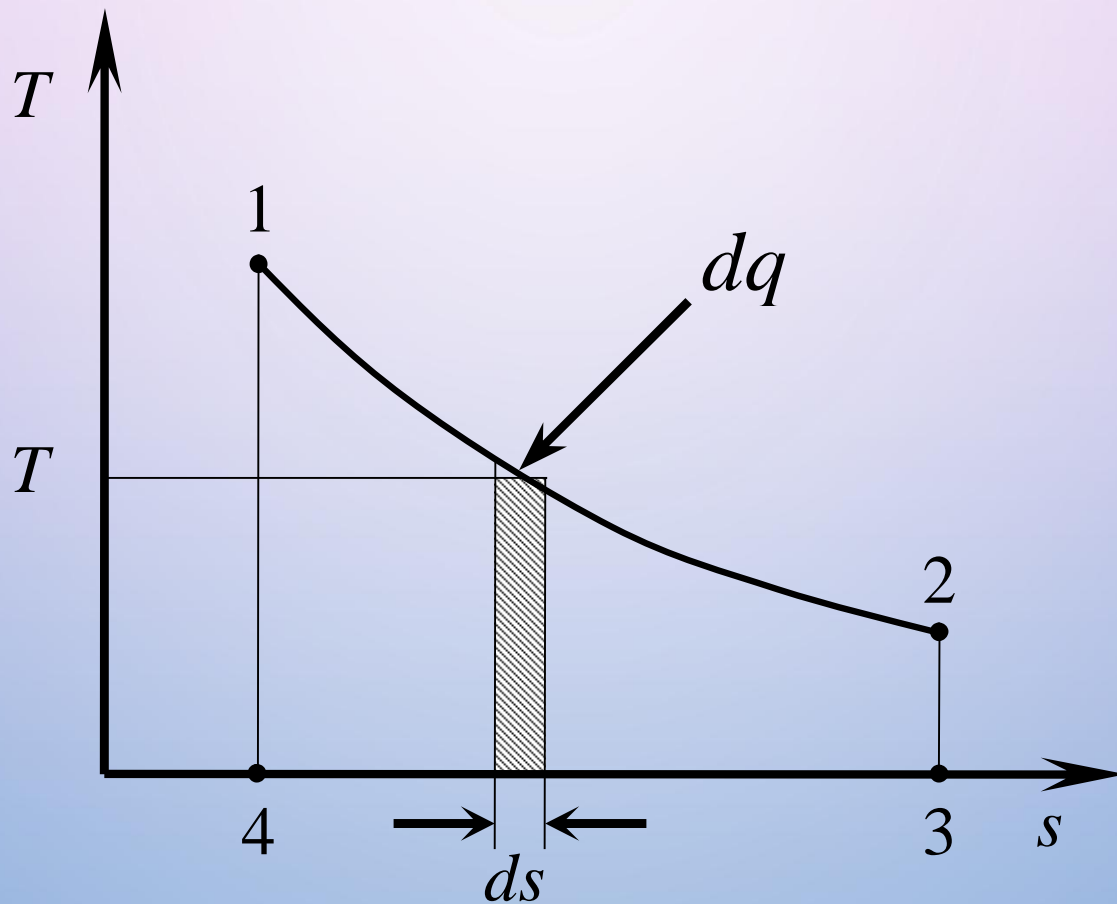
$$l'_{1-2} = - \int_{P_1}^{P_2} v dP = \text{пл. } 12561.$$

т.е. полезная (располагаемая) работа в системе координат  $Pv$  равна площади, ограниченной линией процесса расширения 1-2, двумя крайними абсциссами 2-5 и 6-1 и осью ординат.



Диаграмму в системе координат  $Pv$  часто называют **рабочей** диаграммой, так как площадь в ней выражает **работу**.

В теплотехнике также находит широкое применение диаграмма в системе координат  $Ts$ . Рассмотрим произвольный процесс изменения состояния 1 кг идеального газа 1-2 в координатах  $Ts$ .



Выделим элементарный участок изменения энтропии  $ds$ , изменением температуры на этом участке можно пренебречь ввиду его малости и считать температуру постоянной и равной  $T$ . Тогда элементарное количество теплоты  $dq$ , подведенное на данном участке, определится из выражения

$$dq = T ds$$

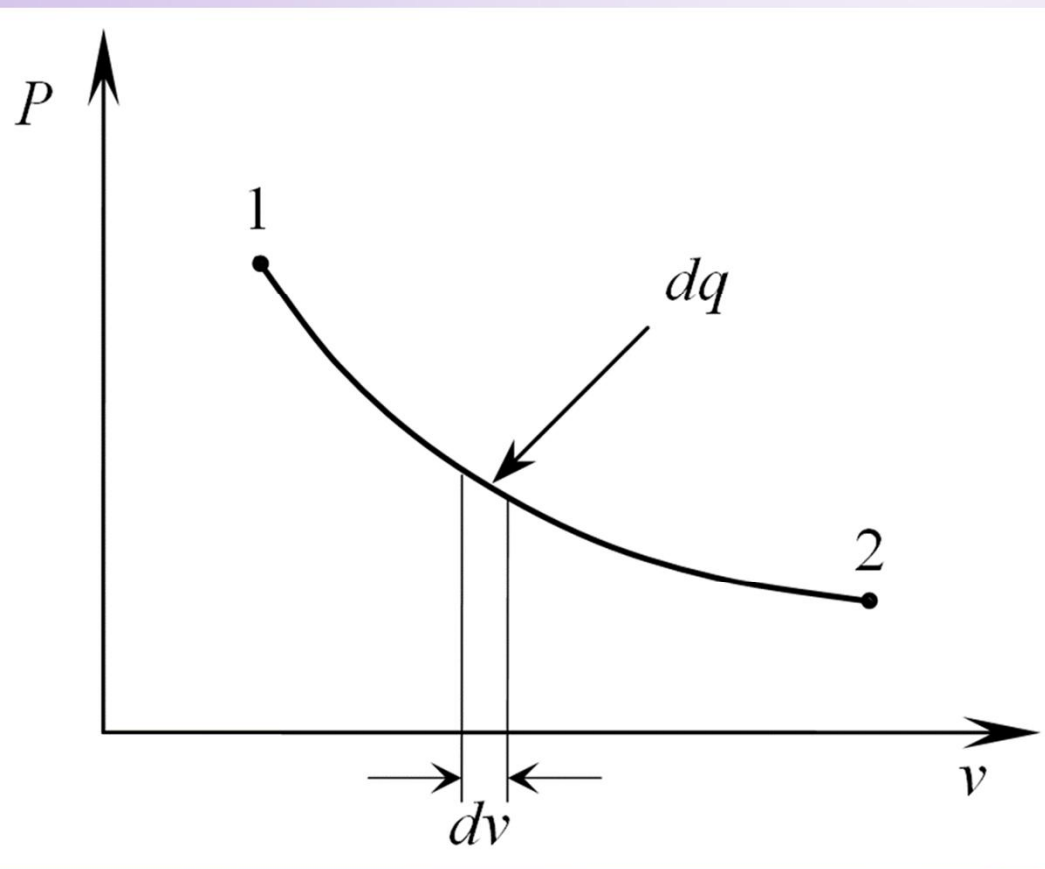
а полное количество теплоты  $q_{1-2}$ , подведённой в процессе 1-2

$$q_{1-2} = \int_{s_1}^{s_2} T ds = \text{пл. } 1234.$$

Диаграмму в системе координат  $Ts$  часто называют **тепловой диаграммой**, так как площадь в ней выражает **количество теплоты**.

## Вопрос 2. Аналитические выражения первого закона термодинамики

Пусть 1 кг идеального газа совершает произвольный термодинамический процесс 1-2, на элементарном участке которого подводится бесконечно малое количество теплоты  $dq$ , при этом температура и удельный объём газа увеличиваются соответственно на бесконечно малые величины  $dT$  и  $dv$ .



$$dq = du + dl$$

$$dq = du + dl = du + Pdv$$

$$dq = C_v dT + Pdv.$$

Уравнение представляет собой одну из форм записи **аналитического выражения первого закона термодинамики**, где теплота, подводимая к термодинамической системе, выражена через изменение внутренней энергии системы и совершаемую ей работу расширения.

$$H = U + PV$$

Продифференцировав и преобразовав выражение , получим

$$dq = du + dl = du + Pdv = C_v dT + Pdv.$$

Уравнение представляет собой другую форму записи **аналитического выражения первого закона термодинамики**, где теплота, подводимая к термодинамической системе, выражена через изменение энтальпии системы и полезную (располагаемую) работу.

# Вопрос 3. Анализ термодинамических процессов идеальных газов

Основными **термодинамическими процессами**, имеющими большое значение в технике, являются:

- **изохорный**, протекающий при постоянном объёме;
- **изобарный**, протекающий при постоянном давлении;
- **изотермический**, протекающий при постоянной температуре;
- **адиабатный**, протекающий без теплообмена с окружающей средой.

Кроме того, имеется группа процессов, являющихся обобщающими для основных процессов, которые называются **политропными**.

Задачами анализа термодинамических процессов являются:

- 1) определение закономерностей изменения параметров состояния термодинамической системы;
- 2) выявление особенностей превращения и перераспределения энергии в процессе.

Анализ всех процессов осуществляется общим термодинамическим методом в следующей последовательности:

1. формулируется закон и выводятся уравнения процесса;
2. по имеющимся уравнениям строятся графики процесса в координатах  $Pv$  и  $Ts$ ;
3. определяется зависимость между начальными и конечными параметрами состояния системы;
4. определяется работа расширения  $l$

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} P dv;$$

5. определяется полезная (располагаемая) работа  $l'$

$$l'_{1-2} = - \int_{P_1}^{P_2} v dP;$$

6. определяется изменение внутренней энергии  $\Delta u$

$$\Delta u_{1-2} = C_v (T_2 - T_1);$$

7. определяется изменение энтальпии  $\Delta h$

$$\Delta h_{1-2} = C_p (T_2 - T_1);$$

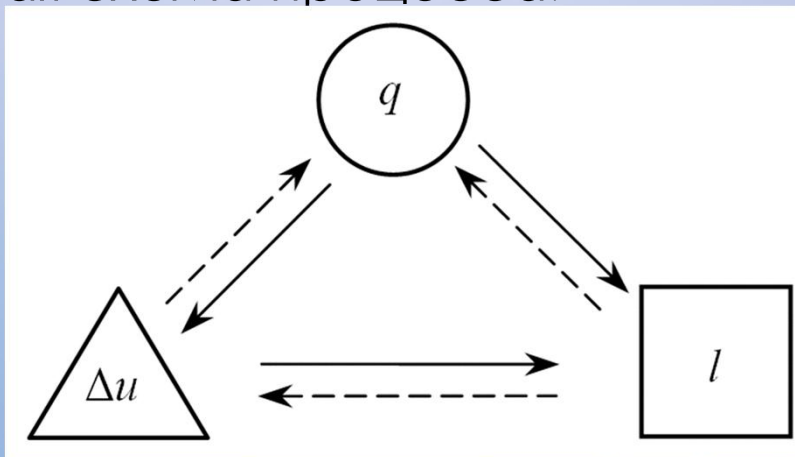
8. определяется изменение энтропии  $\Delta s$

$$\Delta s_{1-2} = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1};$$

9. определяется количество теплоты  $q$ , участвующей в процессе, на основании первого закона термодинамики

$$q = \Delta u + l;$$

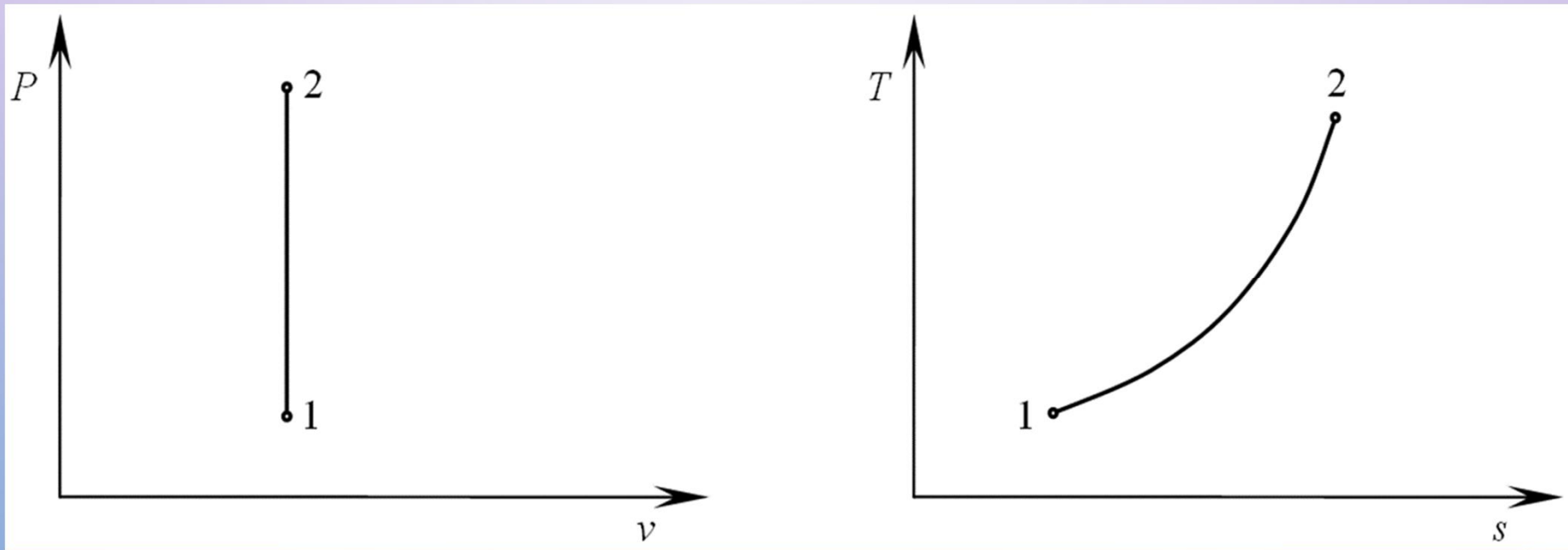
10) строится тепловая схема процесса.



# Изохорный процесс

Изохорным процессом называется процесс подвода или отвода теплоты от газа, происходящий при **постоянном объёме**, следовательно, уравнение процесса можно записать в виде  $v = \text{const}$ .

Графиком изохорного процесса в координатах  $Pv$  является вертикальный отрезок 1–2, а в координатах  $Ts$  – логарифмическая кривая 1–2.



Для определения соотношения между начальными и конечными параметрами состояния системы в изохорном процессе запишем уравнение состояния 1 кг идеального газа для точек 1 и 2:

$$P_1 \nu = RT_1, \quad P_2 \nu = RT_2.$$

Разделив второе выражение на первое, получим

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

т.е. в изохорном процессе давление газа прямо пропорционально его абсолютной температуре.

Работа расширения  $l$  определяется по формуле, однако так как **изохорный процесс протекает при постоянном объёме**, следовательно, элементарное изменение объёма  $dv = 0$ , поэтому и работа в процессе

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} P dv = 0, \quad l_v = 0.$$

Полезная (располагаемая) работа  $l'$  в изохорном процессе определяется по формуле

$$l'_{1-2} = - \int_{P_1}^{P_2} v dP = -v(P_2 - P_1),$$

$$l'_{1-2} = -v(P_2 - P_1).$$

Изменение внутренней энергии  $\Delta u$  и энтальпии  $\Delta h$  в изохорном процессе определяется по общим формулам

$$\Delta u_{1-2} = C_v (T_2 - T_1).$$

$$\Delta h_{1-2} = C_p (T_2 - T_1).$$

Изменение энтропии  $\Delta s$  в изохорном процессе определяется по формуле

$$\Delta s_{1-2} = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1},$$

НО, Т.К.  $v_1 = v_2$ ,

$$\Delta s_v = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} = C_v \ln \frac{P_2}{P_1}.$$

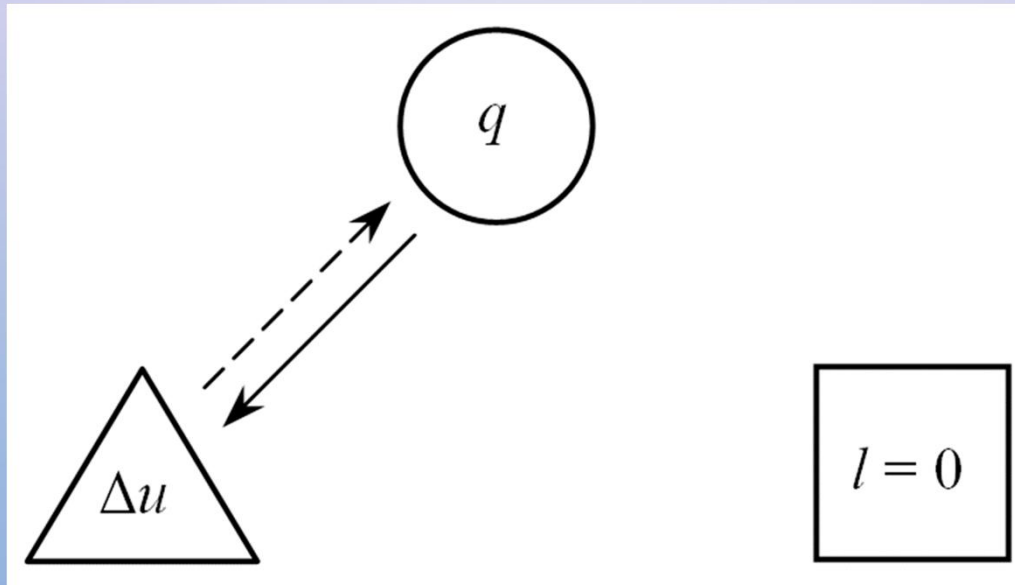
При определении количества теплоты  $q$ , участвующей в процессе, по уравнению первого закона термодинамики получим

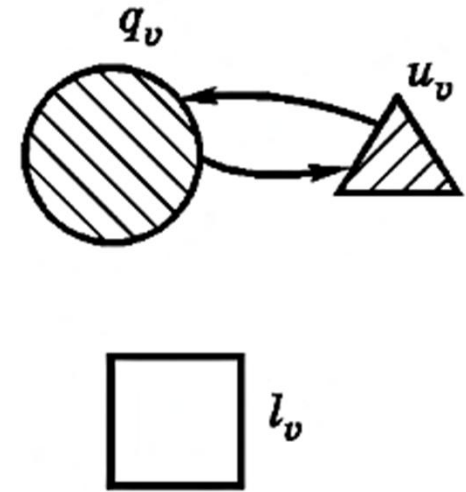
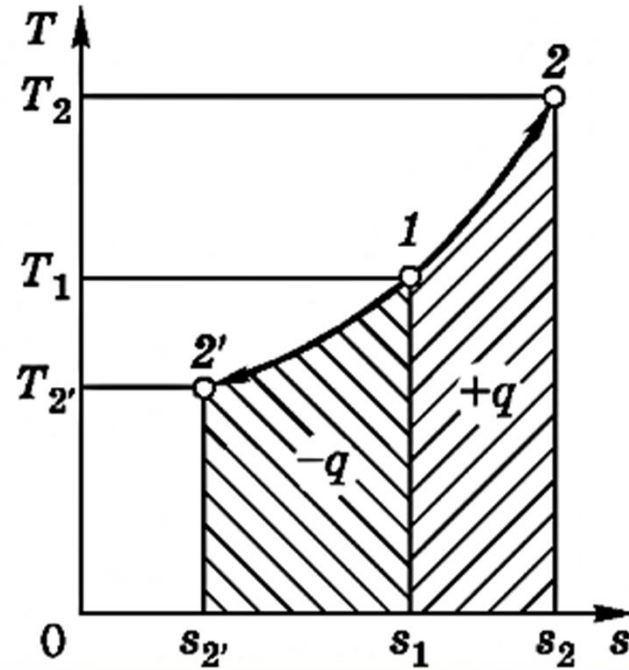
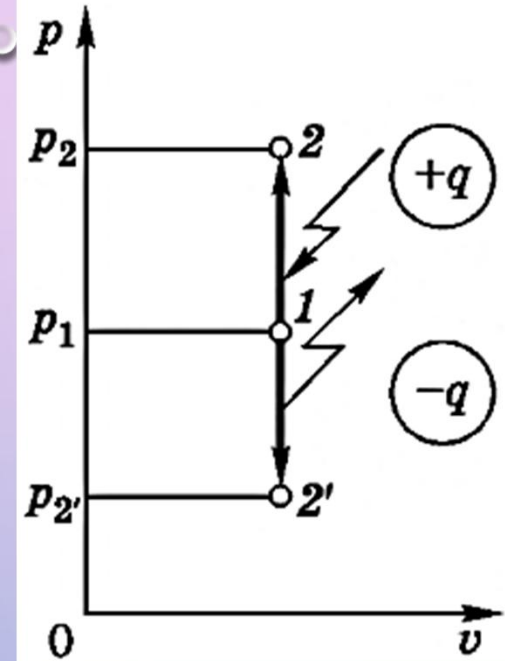
$$q_{1-2} = \Delta u + l,$$

НО, Т.К.  $l = 0$ ,

$$q_v = \Delta u.$$

Тепловая схема изохорного процесса



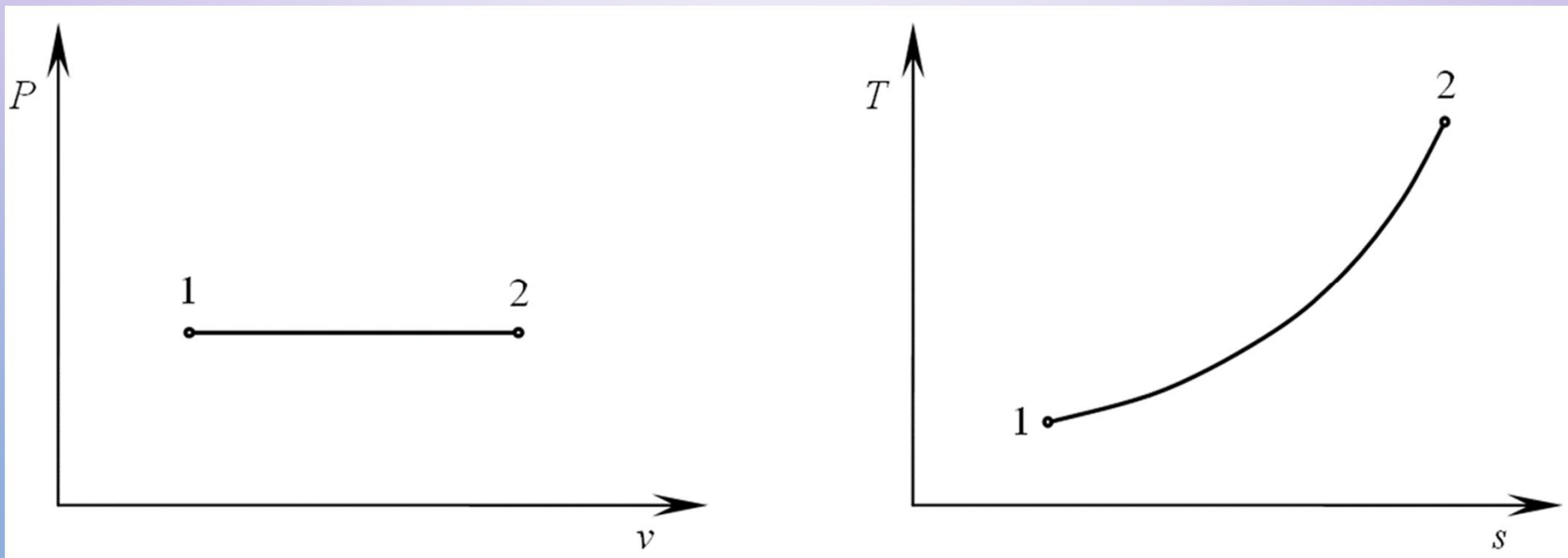


**Вся подведенная (отведенная) теплота идет на изменение внутренней энергии тела.**

# Изобарный процесс

Изобарным процессом называется процесс подвода или отвода теплоты от газа, происходящий **при постоянном давлении**, следовательно, уравнение процесса можно записать в виде  **$P = const$** .

Графиком изобарного процесса в координатах  $Pv$  является горизонтальный отрезок 1–2, а в координатах  $Ts$  – логарифмическая кривая 1–2.



Для определения соотношения между начальными и конечными параметрами состояния системы в изобарном процессе запишем уравнение состояния 1 кг идеального газа для точек 1 и 2:

$$Pv_1 = RT_1, \quad Pv_2 = RT_2.$$

Разделив второе выражение на первое, получим

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

т.е. в изобарном процессе объём газа прямо пропорционален его абсолютной температуре.

Работу расширения  $l$  в изобарном процессе определяем, вынеся давление  $P$  как постоянную величину за знак интеграла по формуле

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} P dv = P(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1).$$

Полезную (располагаемую) работу  $l'$  в изобарном процессе определим при постоянном давлении, следовательно, элементарное изменение давления  $dP = 0$ , поэтому и полезная работа в процессе

$$l'_{1-2} = - \int_{P_1}^{P_2} v dP = 0, \quad l'_p = 0.$$

Изменение внутренней энергии  $\Delta u$  и энтальпии  $\Delta h$  в изобарном процессе определяется по общим формулам

$$\Delta u_{1-2} = C_v (T_2 - T_1).$$

$$\Delta h_{1-2} = C_p (T_2 - T_1).$$

Изменение энтропии  $\Delta s$  в изобарном процессе определяется по формуле

$$\Delta s_{1-2} = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1},$$

НО, Т.К.  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$ , ПОЛУЧИМ  $\Delta s_{1-2} = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{T_2}{T_1} = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$ ,

ИЛИ ОКОНЧАТЕЛЬНО

$$\Delta s_p = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = C_p \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

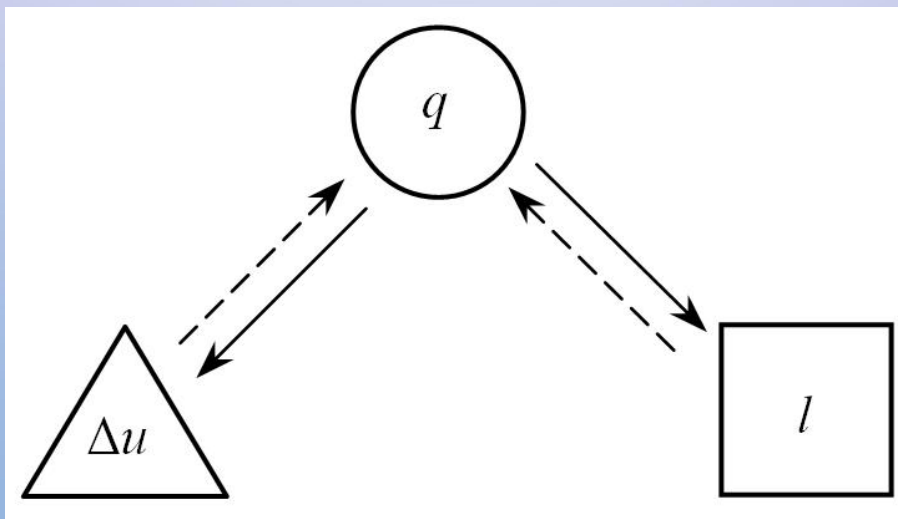
Количество теплоты, участвующей в изобарном процессе, определим на основании первого закона термодинамики

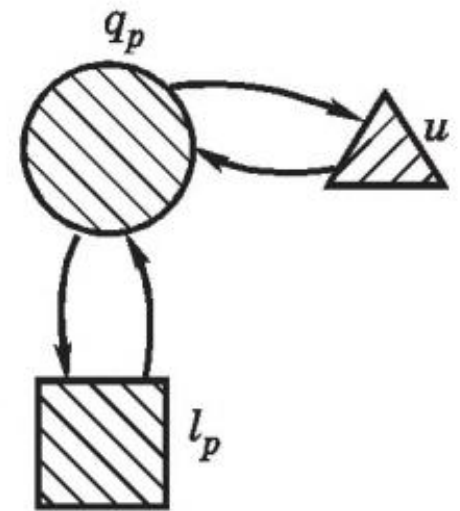
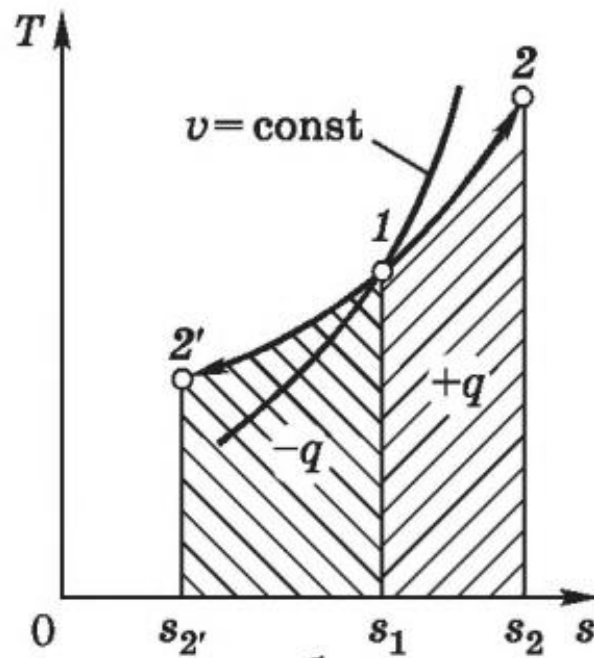
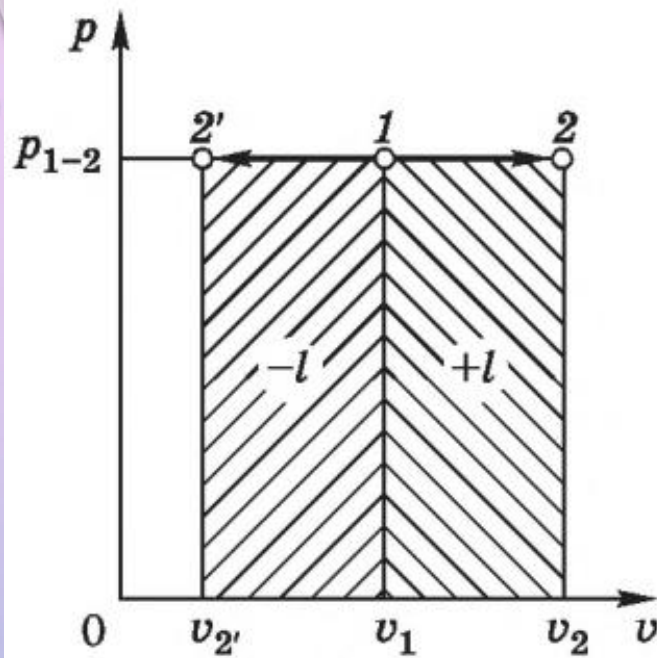
$$q_{1-2} = \Delta u + l = C_v(T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) = \\ = C_p(T_2 - T_1) = \Delta h,$$

или  $q_p = \Delta h.$

т.е. теплота, подводимая к термодинамической системе в изобарном процессе, равна изменению ее энтальпии  $\Delta h$ .

Тепловая схема изобарного процесса





Теплота в данном случае расходуется как на совершение работы, так и на изменения внутренней энергии

В изохорном и изобарном процессах графиками в Ts-диаграмме являются логарифмические кривые.

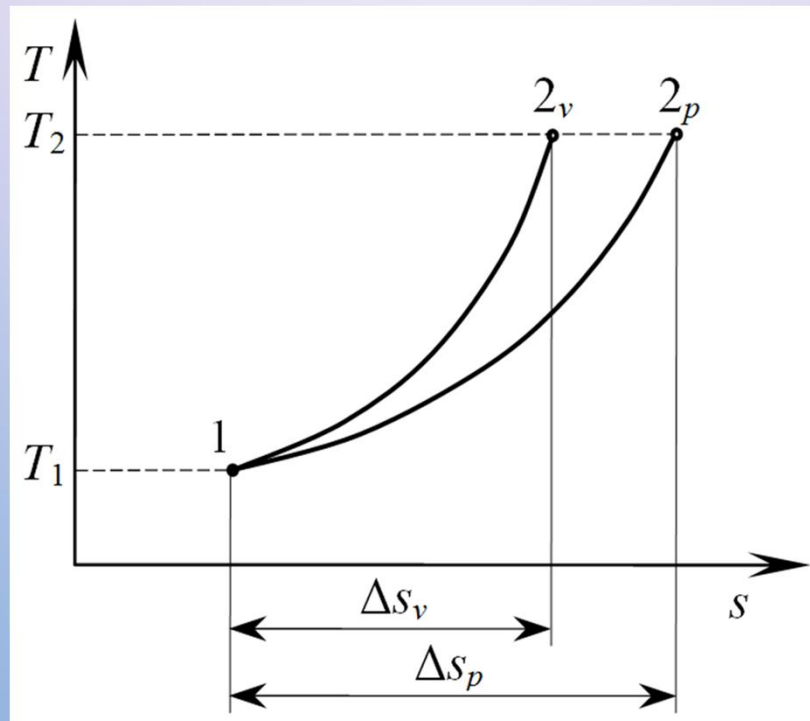
$$\Delta s_v = C_v \ln \frac{T_2}{T_1},$$

$$\Delta s_p = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Из уравнения Майера

$$C_p = R + C_v,$$

$$C_p > C_v.$$

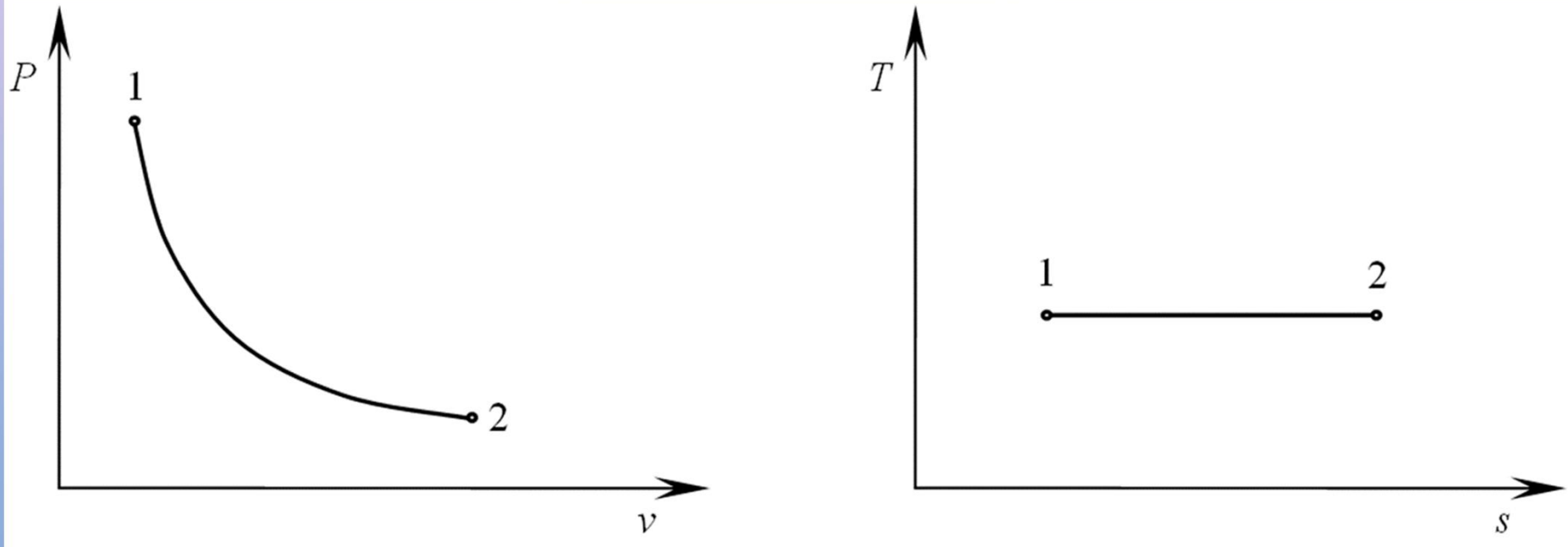


# Изотермический процесс

Изотермическим называется процесс подвода или отвода теплоты от газа, протекающий при **постоянной температуре**.

$$T = \text{const}, \quad Pv = \text{const}.$$

Графиком изотермического процесса в координатах  $Pv$  является равнобокая гипербола 1-2, а в координатах  $Ts$  – горизонтальный отрезок 1-2.



Для определения соотношения между начальными и конечными параметрами состояния системы в изотермическом процессе запишем уравнение состояния 1 кг идеального газа для точек 1 и 2

$$P_1 v_1 = RT, \quad P_2 v_2 = RT.$$

$$P_1 v_1 = P_2 v_2,$$

откуда, разделив переменные, получим

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

т.е. в изотермическом процессе давление идеального газа обратно пропорционально его объёму.

Работа расширения в процессе

$$l_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} P dv = \int_{v_1}^{v_2} RT \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{P_1}{P_2} =$$

$$= P_1 v_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = P_2 v_2 \ln \frac{P_1}{P_2} = P_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = P_2 v_2 \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

## Полезная работа в изотермическом процессе

$$l'_{1-2} = - \int_{P_1}^{P_2} v dP = - \int_{P_1}^{P_2} RT \frac{dP}{P} = -RT \ln \frac{P_2}{P_1} = RT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

$$l'_{1-2} = l_{1-2}.$$

Изменения внутренней энергии  $\Delta u$  и энтальпии  $\Delta h$  в изотермическом процессе не происходит, так как  $T = \text{const}$ , следовательно

$$\Delta u_{1-2} = C_v (T_2 - T_1) = 0.$$

$$\Delta h_{1-2} = C_p (T_2 - T_1) = 0.$$

Изменение энтропии  $\Delta s$  в изотермическом процессе определим по формуле

$$\Delta s_{1-2} = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1},$$

НО, т.к.  $T_1 = T_2$ ,

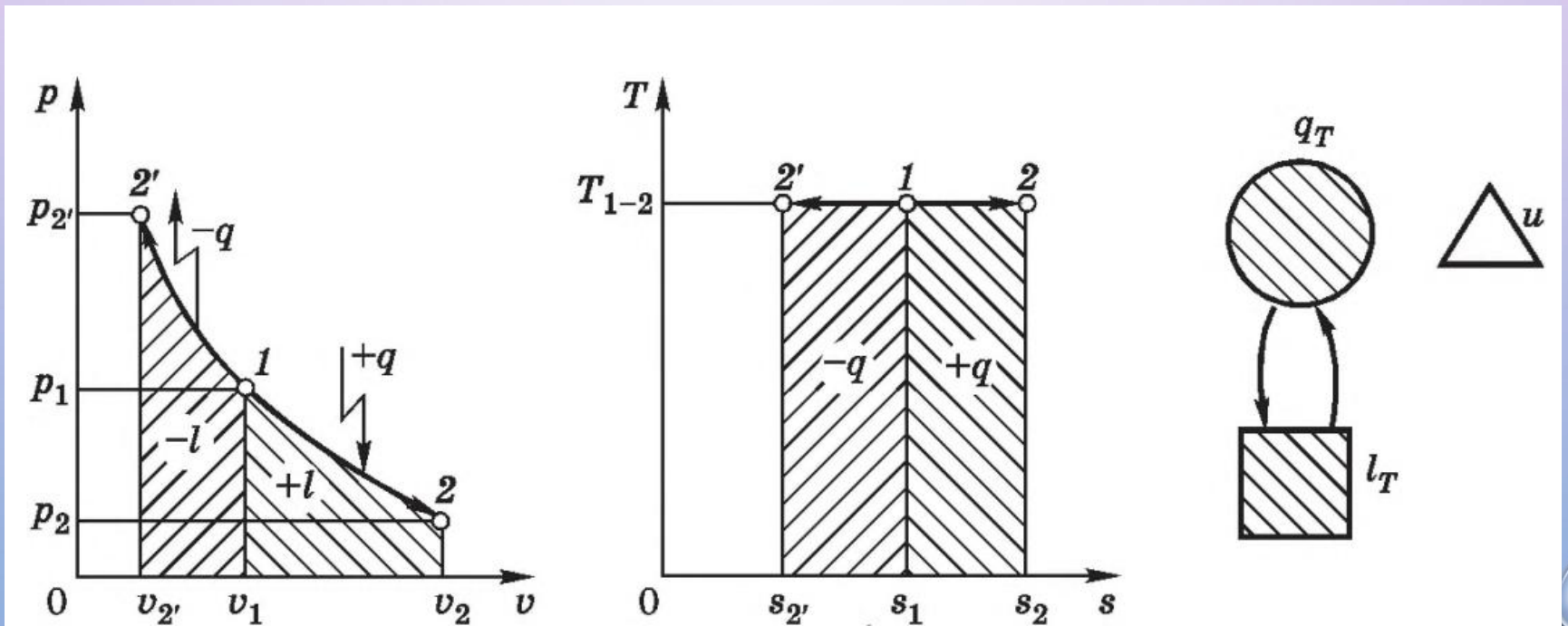
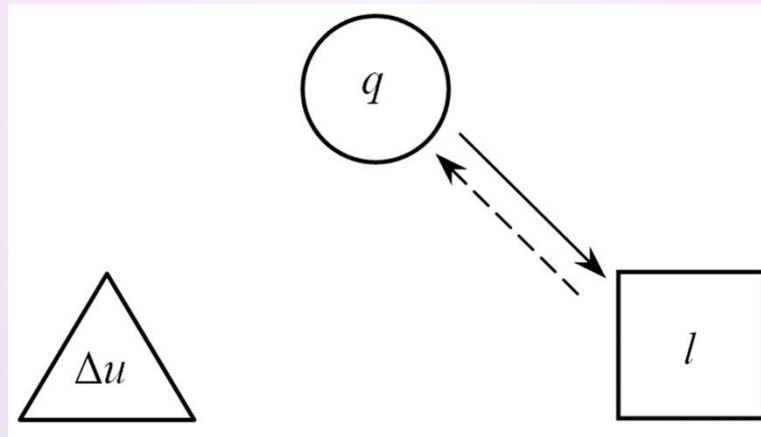
$$\Delta s_{1-2} = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

Количество теплоты, участвующей в изотермическом процессе, на основании первого закона термодинамики

$$q_{1-2} = \Delta u + l = l,$$

$$q_T = l.$$

# Тепловая схема изотермического процесса



т.е. вся теплота, подводимая в изотермическом процессе, затрачивается на совершение работы.

# Адиабатный процесс

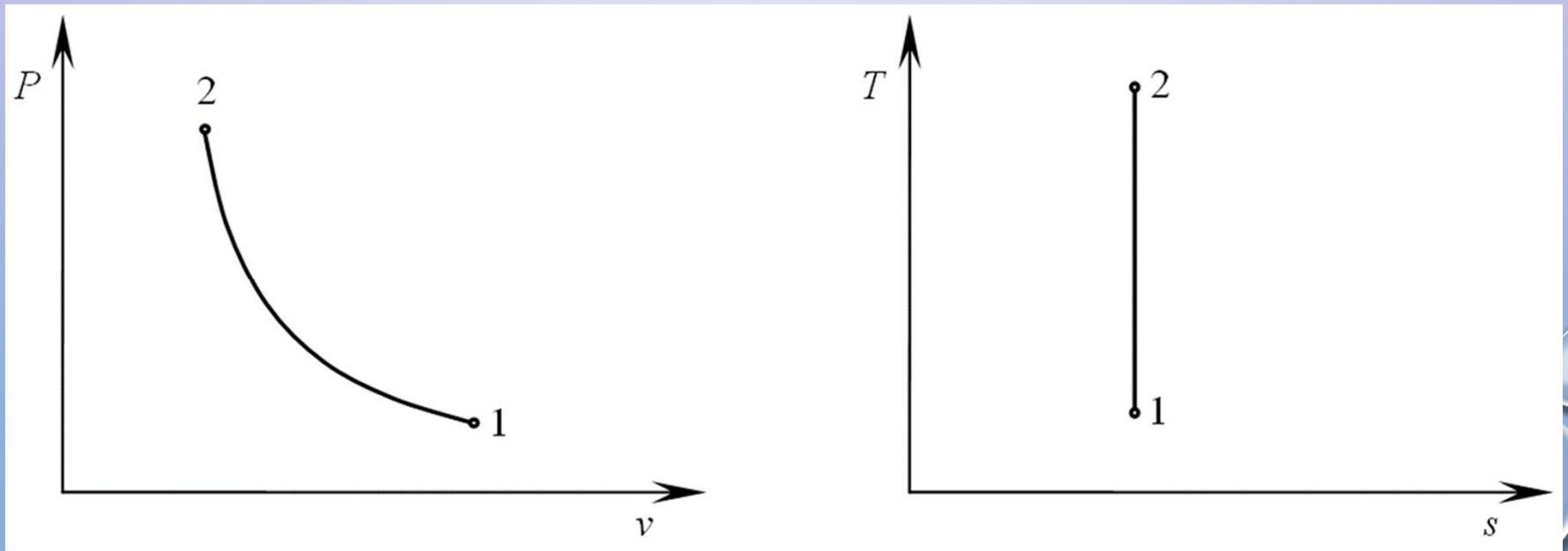
Адиабатным называется процесс, протекающий при отсутствии теплообмена термодинамической системы с окружающей средой, необходимым условием адиабатного процесса является  $dq = 0$  и  $q = 0$ .

Основное уравнение адиабатного процесса имеет вид

$$Pv^k = \text{const}, \text{ где } k \text{ – показатель адиабаты}$$

Графиком адиабатного процесса в координатах  $Pv$  является неравнобокая гипербола 1–2, а в координатах  $Ts$  – вертикальный отрезок 1–2.

Поскольку адиабатный процесс протекает при постоянной энтропии, его часто называют *изоэнтропным* процессом.



В адиабатном процессе **изменяются все три параметра** состояния системы – давление, удельный объём и температура, поэтому и соотношений между начальными и конечными параметрами состояния системы будет три пары.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k.$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}.$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Работу расширения в адиабатном процессе определим на основании первого закона термодинамики

$$q = \Delta u + l = 0, \quad \text{откуда} \quad l = -\Delta u = C_v (T_1 - T_2).$$

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2).$$

Полезная (располагаемая) работа  $l'$

$$l' = kl,$$

$$l' = \frac{kR}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{k}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2).$$

Изменение внутренней энергии  $\Delta u$  и энтальпии  $\Delta h$  в адиабатном процессе может быть найдено по общим формулам

$$\Delta u_{1-2} = C_v (T_2 - T_1).$$

$$\Delta h_{1-2} = C_p (T_2 - T_1).$$

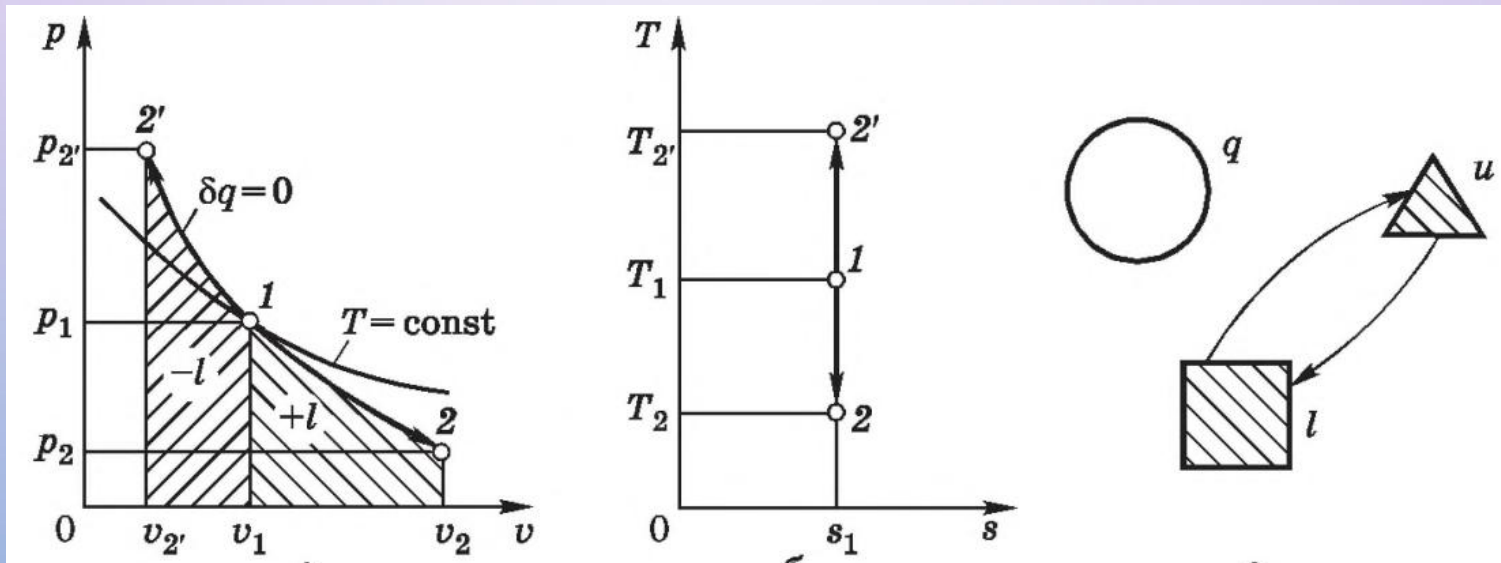
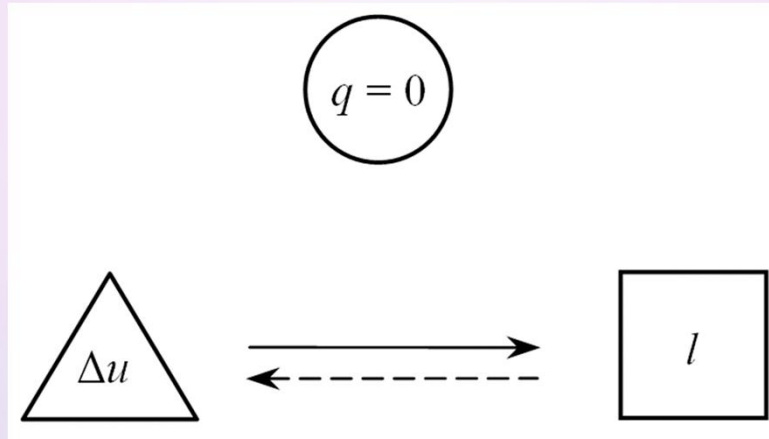
Изменения энтропии  $\Delta s$  в адиабатном процессе не происходит, так как, как было отмечено ранее, адиабатный процесс является изоэнтропным, т.е. протекает при постоянной энтропии и

$$\Delta s_{1-2} = 0.$$

Поскольку адиабатный процесс протекает без теплообмена с окружающей средой, следовательно,

$$q_s = 0.$$

# Тепловая схема адиабатного процесса



Адиабатный обратимый процесс является изоэнтропийным, т. е. протекает при **постоянном значении энтропии**.

# Политропный процесс

Политропным называется процесс, в котором возможно изменение всех термодинамических параметров состояния и может осуществляться теплообмен, но теплоёмкость в процессе остаётся постоянной.

$$Pv^n = \text{const},$$

где  $n$  – показатель политропы,  $-\infty \leq n \leq +\infty$ .

Показатель политропы определяется по формуле

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v},$$

где  $C$  – теплоёмкость в данном политропном процессе.

$$-\infty \leq C \leq +\infty$$

$$C = C_v \frac{n - k}{n - 1}.$$

Обобщающее значение политропного процесса заключается в том, что все рассмотренные ранее процессы являются **частными случаями политропного процесса в зависимости от показателя политропы  $n$** .

Уравнение процесса и величина теплоёмкости в нём в зависимости от показателя политропы  $n$

Показатель политропы в процессе	Уравнение процесса	Теплоёмкость в процессе
$n = 0$	$Pv^n = \text{const}; P = \text{const}$	$C = C_v \cdot k = C_p$
$n = 1$	$Pv^n = \text{const}; Pv = \text{const}$	$C = \pm \infty$
$n = k$	$Pv^n = \text{const}; Pv^k = \text{const}$	$C = 0$
$n = \pm \infty$	$Pv^n = \text{const}; v = \text{const}$	$C = C_v$

$$Pv^n = \text{const},$$

$$Pv^k = \text{const}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n,$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1},$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Работа расширения в политропном процессе может быть найдена по аналогии с адиабатным процессом

$$l_{1-2} = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{1}{n-1}(P_1 v_1 - P_2 v_2).$$

Полезная (располагаемая) работа  $l'$

$$l'_{1-2} = \frac{nR}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{n}{n-1}(P_1 v_1 - P_2 v_2).$$

Изменение внутренней энергии  $\Delta u$

$$\Delta u_{1-2} = C_v(T_2 - T_1).$$

Изменение энтальпии  $\Delta h$

$$\Delta h_{1-2} = C_p(T_2 - T_1).$$

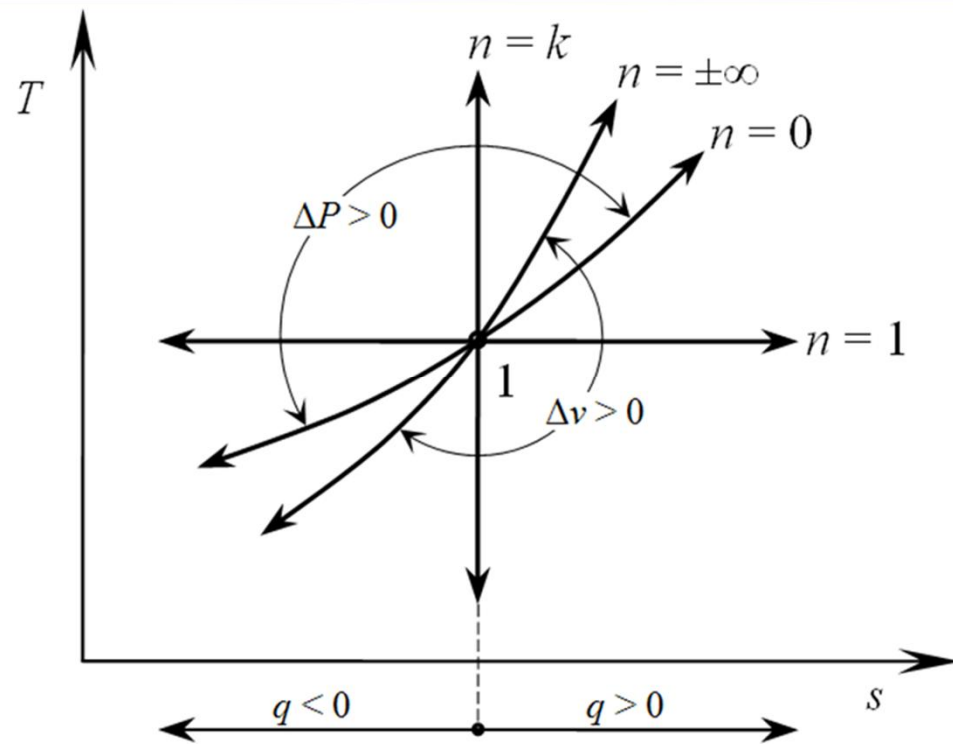
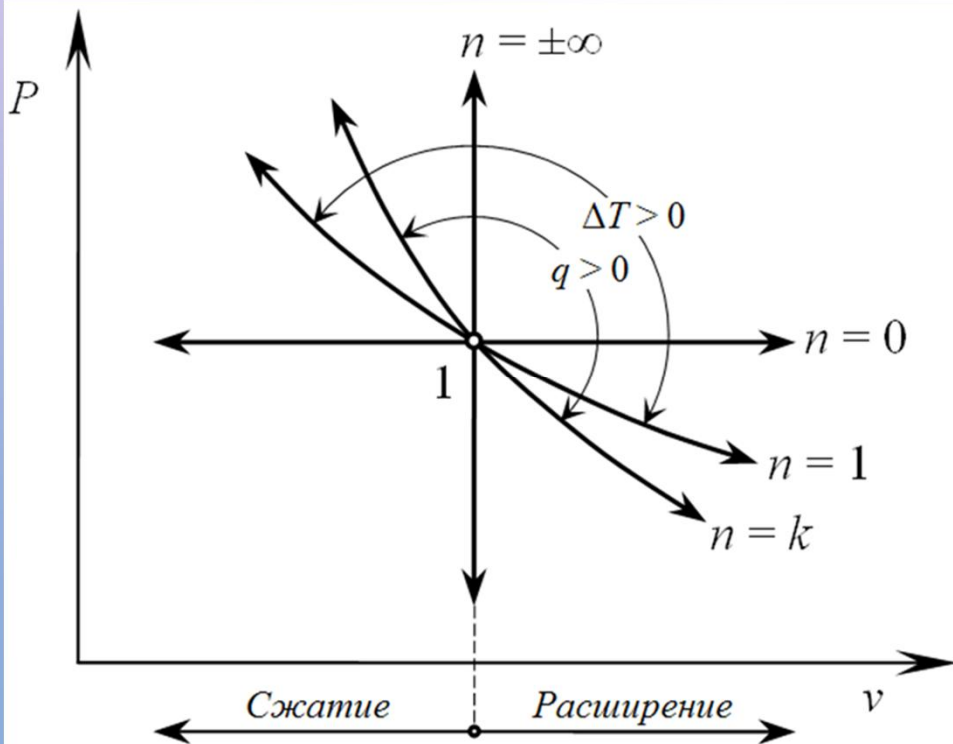
## Изменение энтропии $\Delta s$

$$\Delta s_{1-2} = C_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Количество теплоты  $q$

$$q = C\Delta T,$$

$$q_{1-2} = C_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1).$$



Все политропные процессы разделяют на три характерные группы:

1)  $-\infty < n < 1$  (располагаются между изохорой и изотермой).

$$dT > 0; \quad du > 0; \quad dh > 0; \quad dq > 0; \quad ds > 0.$$

Подведенное к газу количество теплоты расходуется на совершение работы расширения и на увеличение внутренней энергии

2)  $1 < n < k$  (располагаются между изотермой и адиабатой).

$$dT < 0; \quad du < 0; \quad dh < 0; \quad dq > 0; \quad ds > 0.$$

Работа совершается как за счет подводимого количества теплоты, так и за счет внутренней энергии.

3)  $k < n < +\infty$  (располагаются между адиабатой и изохорой).

$$dT < 0; \quad du < 0; \quad dh < 0; \quad dq < 0; \quad ds < 0.$$

Работа расширения совершается за счет внутренней энергии. В то же время теплота от рабочего тела отводится в окружающую среду.

# Вопрос 4. Второй закон термодинамики

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ РАССМАТРИВАЕТ КОЛИЧЕСТВЕННОЕ СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ТЕПЛОТОЙ  $q$  И РАБОТОЙ  $l$  И НЕ РАССМАТРИВАЕТ КАЧЕСТВЕННУЮ СТОРОНУ ПРОЦЕССА:

- а не указывает условий превращения теплоты в работу;
- а не указывает направления процесса, нельзя определить его характер и конечный результат;
- а не указывает, передаётся ли теплота от горячего источника к холодному или наоборот.

Второй закон термодинамики определяет **направление**, по которому протекают термодинамические процессы и устанавливает **возможные пределы превращения теплоты в работу при круговых процессах**, поэтому он дополняет первый закон термодинамики.

Существует много формулировок второго закона термодинамики.

Французский физик **Сади Карно** в 1824 г. сформулировал второй закон термодинамики следующим образом: «**Повсюду, где имеется разность температур, может происходить возникновение работы**».

Немецкий физик **Рудольф Клаузиус** в 1850 г. дал следующую формулировку: **«Теплота не может переходить сама по себе от одного тела к другому, имеющему температуру более высокую, чем первое тело».**

Австрийский физик **Людвиг Больцман** сформулировал второй закон термодинамики так: **«Природа стремится к переходу от менее вероятных состояний к более вероятным».**

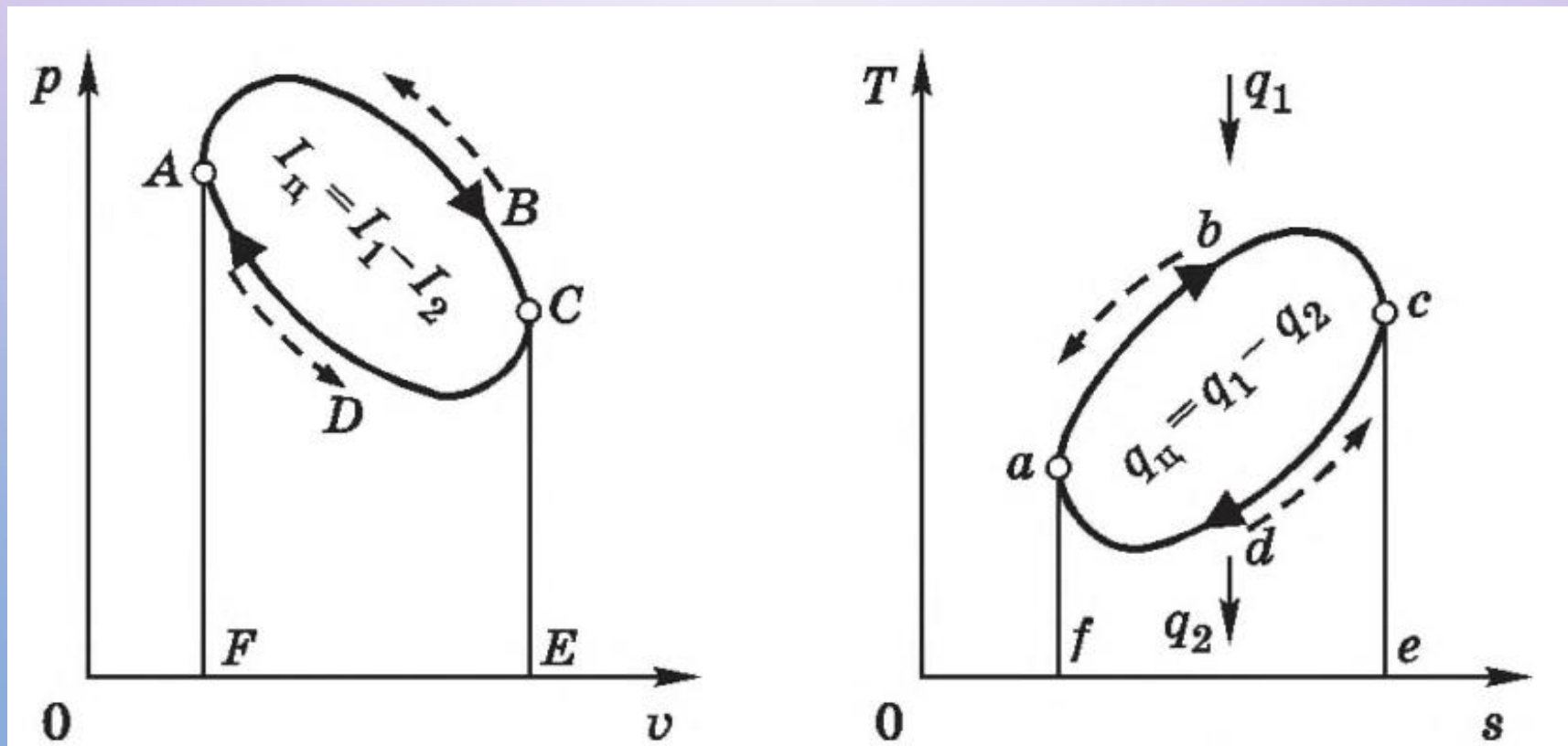
**Невозможно построить периодически действующую машину, совершающую механическую работу и соответственно охлаждающую источник теплоты** (формулировка В. Томсона);

Современная формулировка второго закона термодинамики звучит следующим образом: **«Любой реальный самопроизвольный процесс является необратимым».**

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ВТОРОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ  
МОЖЕТ БЫТЬ ПОЯСНЕН ПРИ ПОМОЩИ ВЫРАЖЕНИЯ

$$dS \geq 0,$$

т.е. энтропия изолированной термодинамической системы может оставаться постоянной, если в системе протекают обратимые процессы, или возрастать при протекании в ней необратимых процессов, но ни при каких условиях не может уменьшаться.

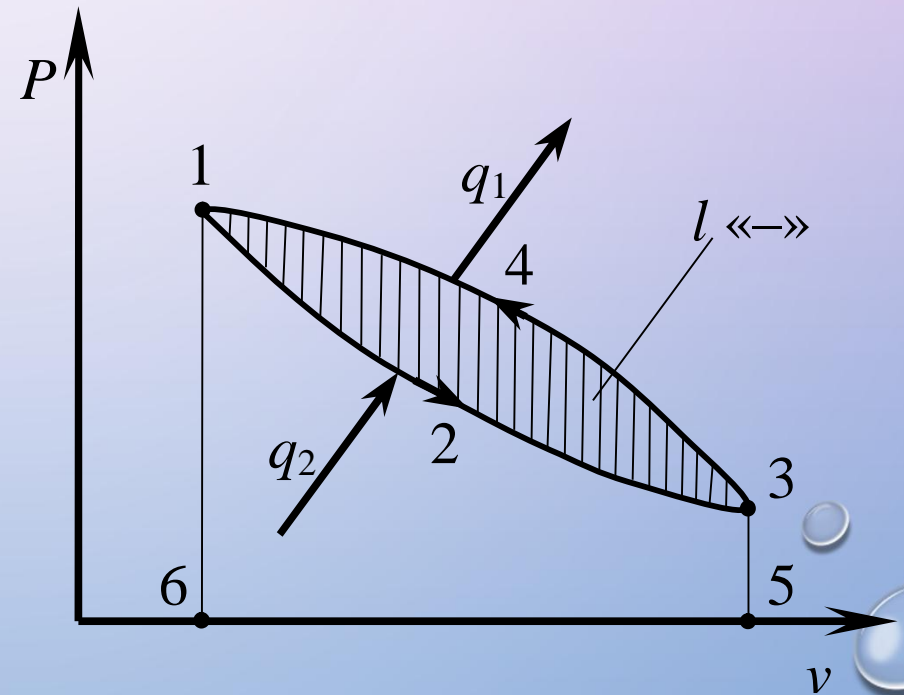
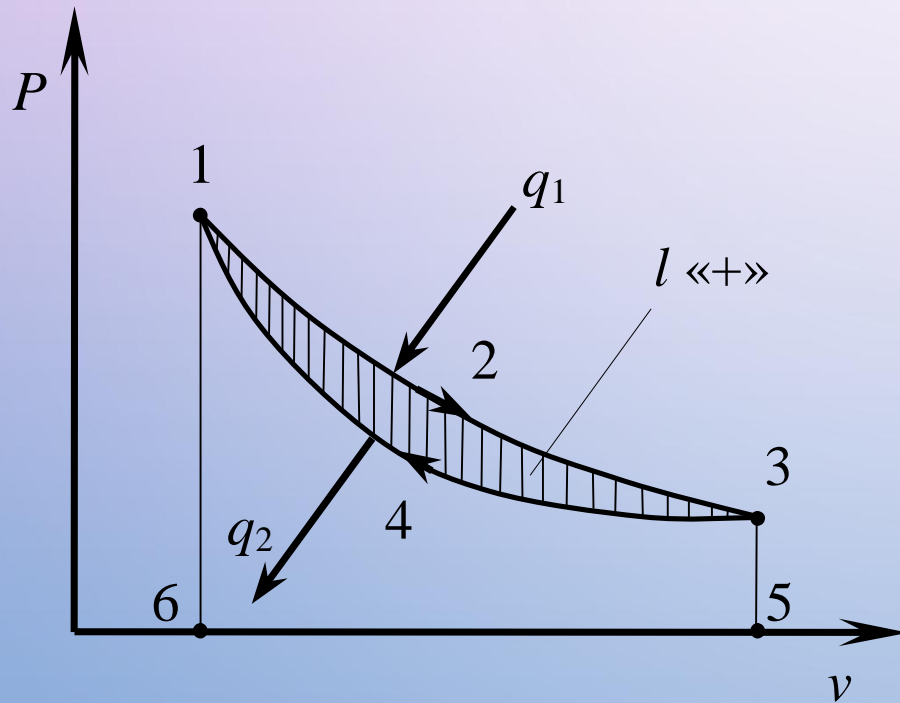


Из выполненного анализа можно сделать вывод, что для осуществления кругового процесса необходимо наличие трех элементов: источника теплоты (нагревателя) с температурой  $T_1$ , охладителя с температурой  $T_2 < T_1$  и рабочего тела, которое последовательно вступает в теплообмен с нагревателем и охладителем



Совокупность последовательно происходящих термодинамических процессов, в результате которых рабочее тело возвращается в первоначальное состояние, называется **круговым процессом**, или **циклом**.

Циклы бывают **прямые** и **обратные**. Цикл, в результате которого получается **положительная работа**, называется **прямым циклом**. По **прямым циклам** работают все тепловые двигатели. Цикл, для осуществления которого необходимо **затрачивать работу**, называется **обратным циклом**. По **обратным циклам** работают холодильные машины.



Полезно используемое количество теплоты  $q$  может быть найдено как разность между подведенной и отведенной теплотой:

$$q = q_1 - q_2$$

Изменение внутренней энергии в цикле  $\Delta u = 0$ , так как рабочее тело возвращается в первоначальное состояние. В соответствии с первым законом термодинамики

$$q = l$$

**т.е. вся полезно используемая в цикле теплота преобразуется в работу.**

Эффективность прямого термодинамического цикла (цикла ДВС) оценивается термическим к.п.д. –  $\eta_t$ , определяемым из выражения

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \frac{l}{q_1} \quad \eta_t < 1$$

Эффективность обратного цикла оценивается холодильным коэффициентом  $\epsilon$ , который определяется из выражения

$$\epsilon = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{q_2}{l}$$