

# Лекция 5

## ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

- 1. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ**
- 2. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ**
- 3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ РАБОТЫ ПРОЦЕССА**
- 4. ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ**
- 5. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ**
- 6. ЭНТАЛЬПИЯ**

# 5.1. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ

- Первый закон термодинамики является **частным случаем** всеобщего закона сохранения и превращения энергии применительно к тепловым явлениям, протекающим в термодинамических системах.
- Закон сохранения и превращения энергии гласит, что **в изолированной системе сумма всех видов энергии является величиной постоянной.**

К концу **XVIII в.** процесс превращения теплоты в работу был осуществлен, но без всяких теоретических расчетов и обоснований. Общую формулировку закона сохранения и превращения энергии дал великий русский ученый ***М. В. Ломоносов.***

Однако ***Ломоносов*** не мог установить эквивалентность различных форм движения материи и дать количественную связь между ними, так как не имел необходимых для этого фактических данных.

$$Q = AL$$

Роберт Майер (1842 г.)

- **$A$**  — постоянная величина, называемая **тепловым эквивалентом работы**.

Тепловой эквивалент единицы работы — величина размерная и зависит от системы единиц, выбранных для измерения теплоты и работы. Если теплота и работа выражаются в одних единицах (**джоулях**), то эквивалент равен **единице** и тогда

$$Q = L \quad (5.1)$$

- В 1843 г. англичанин *Джоуль*, а в 1844 г. русский академик *Ленц* установили соотношение между электрической энергией и теплотой. Доказали эквивалентность электрической работы и теплоты. Этот закон вошел в физику под названием закона *Джоуля — Ленца*.
- В 1847 г. была опубликована работа *Гельмгольца* «О сохранении силы». В ней научно излагался закон сохранения энергии.
- В 1850 г. была опубликована работа *Клаузиуса* «О движущей силе теплоты», в которой давалось математическое обоснование закона сохранения энергии, разбирались особенности теплоты при идеальных и реальных процессах, объяснялось не только количественное, но и качественное содержание открытого закона.

Таким образом, закон сохранения и превращения энергии, открытый *М. В. Ломоносовым*, но не получивший широкого развития при его жизни, во второй половине XIX в. получил полное признание.

## 5.2. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Под внутренней энергией газа понимается вся энергия, заключенная в теле или системе тел:

- 1) кинетической энергии молекул, включающей энергию поступательного и вращательного движения молекул;
- 2) колебательного движения атомов в самой молекуле;
- 3) энергии электронов;
- 4) внутриядерной энергии;
- 5) энергии взаимодействия между ядром молекулы и электронами;
- 6) потенциальной энергии или энергии положения молекул в каком-либо внешнем поле сил;
- 7) энергии электромагнитного излучения.

Полную внутреннюю энергию тела принято обозначать  $U$  (Дж), а удельную внутреннюю энергию —  $u$  (Дж/кг)

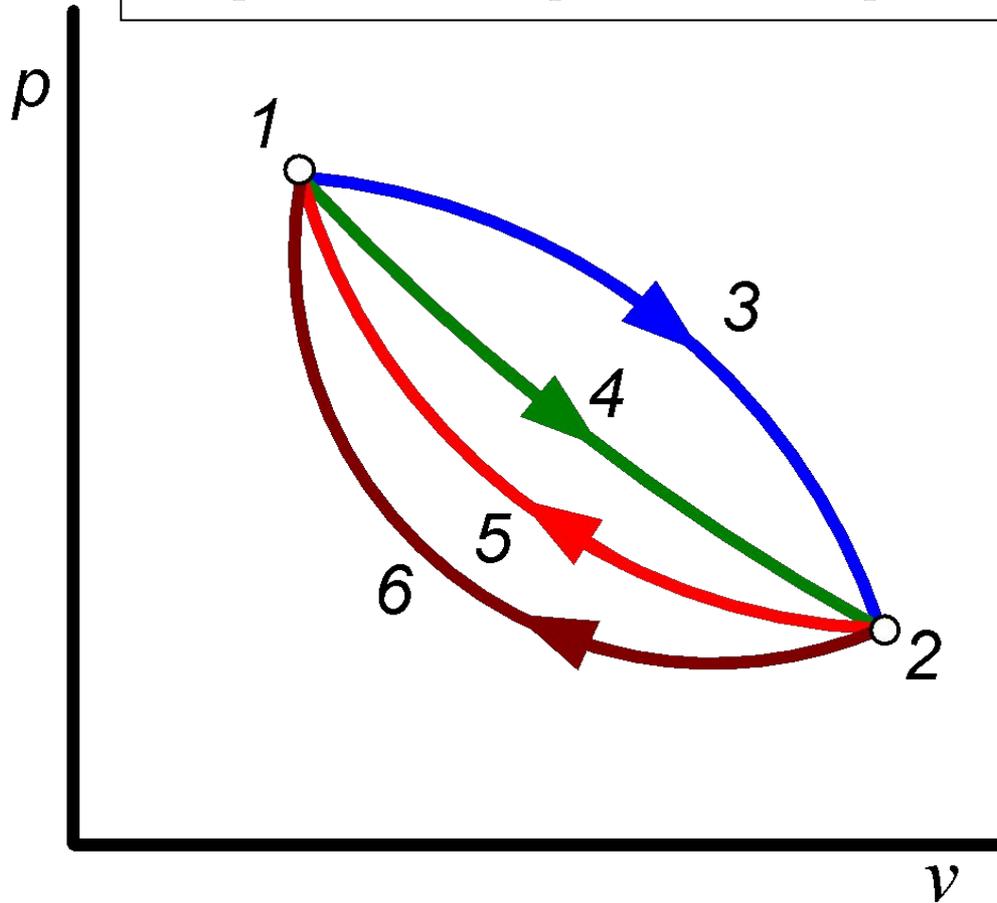
$$U = U_{\text{кин}} + U_{\text{пот}} + U_0$$

$$U_{\text{кин}} = U_{\text{кин.пост}} + U_{\text{кин.вр}} + U_{\text{кол}}$$

$$u = u_1 + u_2 + \dots + u_n = \sum_{i=1}^n u_i$$

$$u_2 - u_1 = f(p_2, v_2, T_2) - f(p_1, v_1, T_1) \quad (5.2)$$

$$(3) \int_1^2 du = (4) \int_1^2 du = (5) \int_1^2 du = -(6) \int_2^1 du = (6) \int_1^2 du$$



$$u_2 - u_1 = \oint du = 0$$

Рис. 5.1

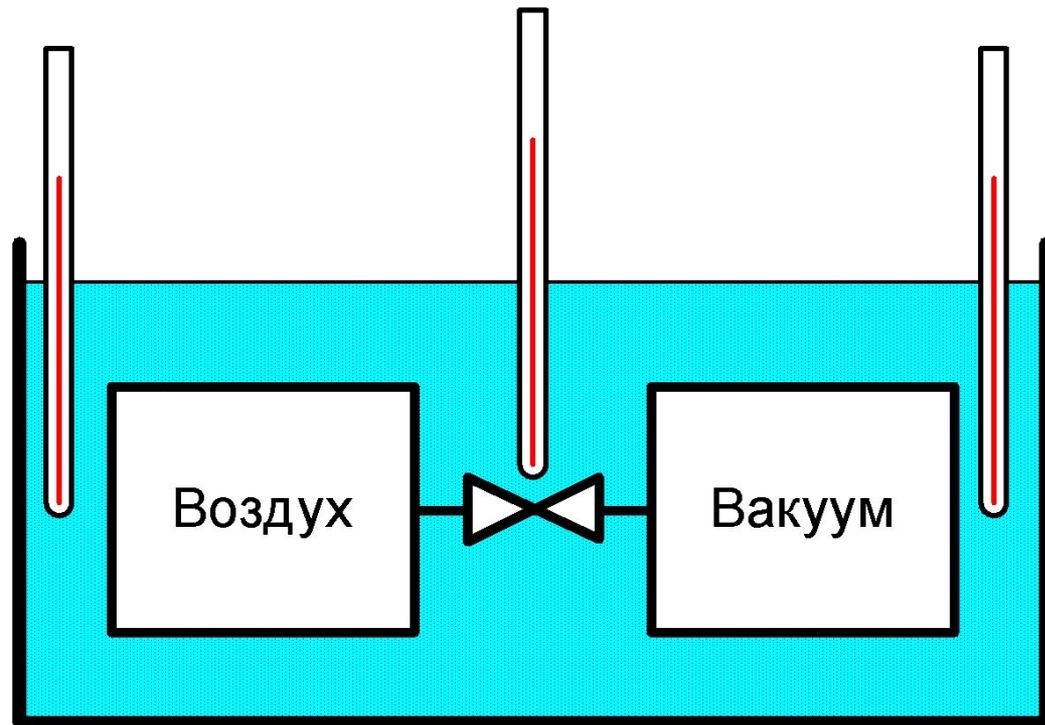
$$u = f(T, v); u = f_1(T, p); u = f_2(p, v)$$

$$\left. \begin{aligned} du &= \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv, \\ du &= \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T dp, \\ du &= \left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_v dp + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_p dv. \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Удельная внутренняя энергия идеального газа, в котором отсутствуют силы взаимодействия между молекулами, не зависит от объема или давления

$\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_T = 0$   
и  $\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0$   
температуры  $u = f(T)$ , а **ЗАВИСИТ ТОЛЬКО ОТ**

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = du / dT$$

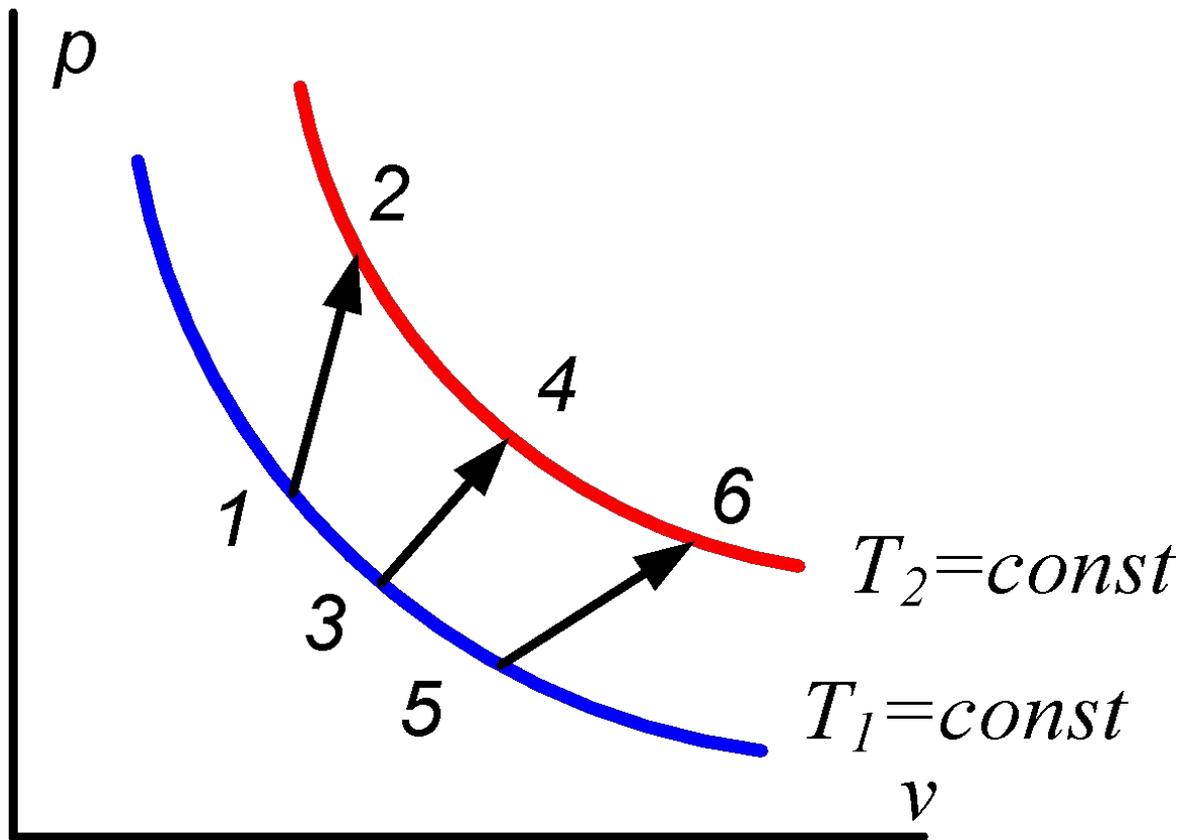


Опыт Джоуля (1845 г.)

$$Q = 0 \quad L = 0 \quad \longrightarrow \quad U = f(T)$$

Для приближенных расчетов можно считать, что внутренняя энергия реальных газов при высоких температурах и малых давлениях является функцией только одной температуры.

Это положение в точности справедливо только для идеальных газов



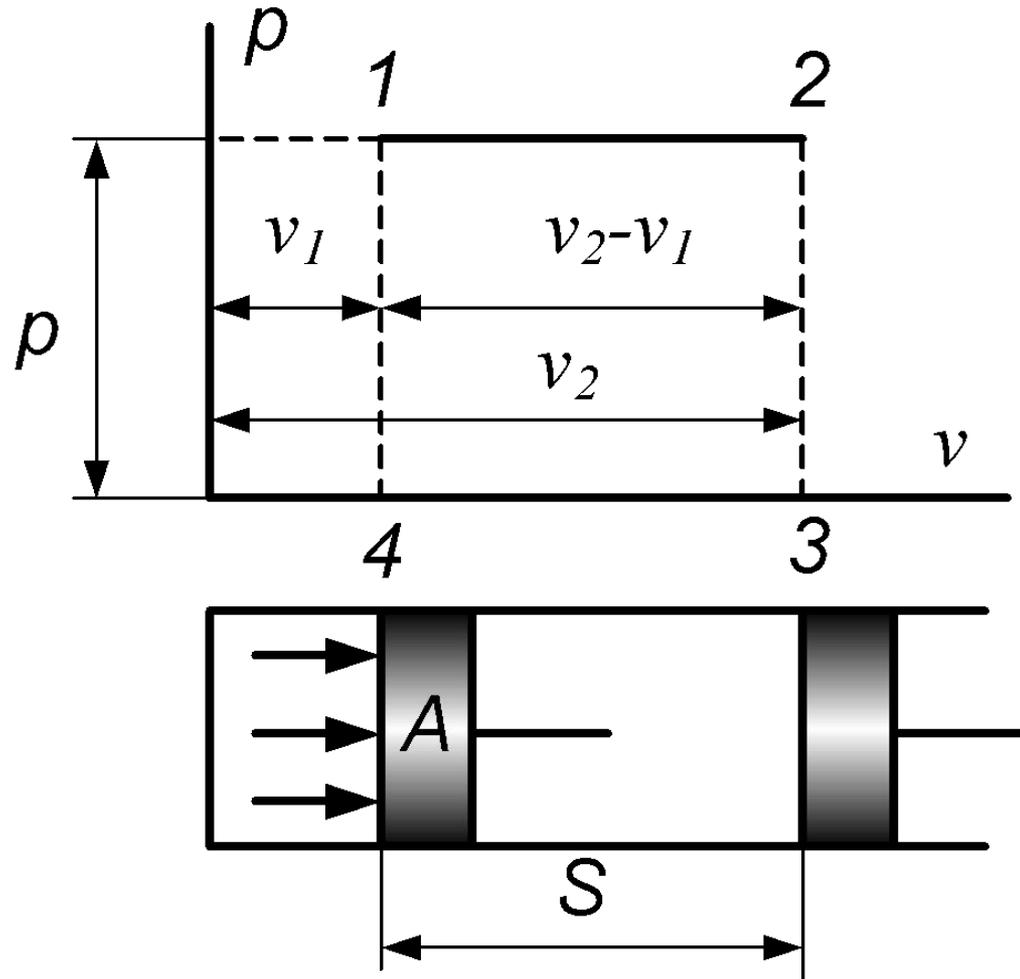
$$\Delta u = u_2 - u_1 = u_4 - u_3 = u_6 - u_5 = f(T_2) - f(T_1)$$

## 5.3. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ РАБОТЫ ПРОЦЕССА

Передачу энергии от одного тела к другому, связанную с изменением объема рабочего тела, с перемещением его во внешнем пространстве или с изменением его положения, называют *работой*.

В производстве работы всегда участвуют два тела или больше. *Первое* тело, производящее работу, *отдает* энергию, *второе* тело *получает* энергию.

$$l = p \cdot A \cdot S \quad l = p(v_2 - v_1) = p\Delta v \quad (5.4)$$



$$\delta l = p dv \quad (5.5)$$

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (5.6)$$

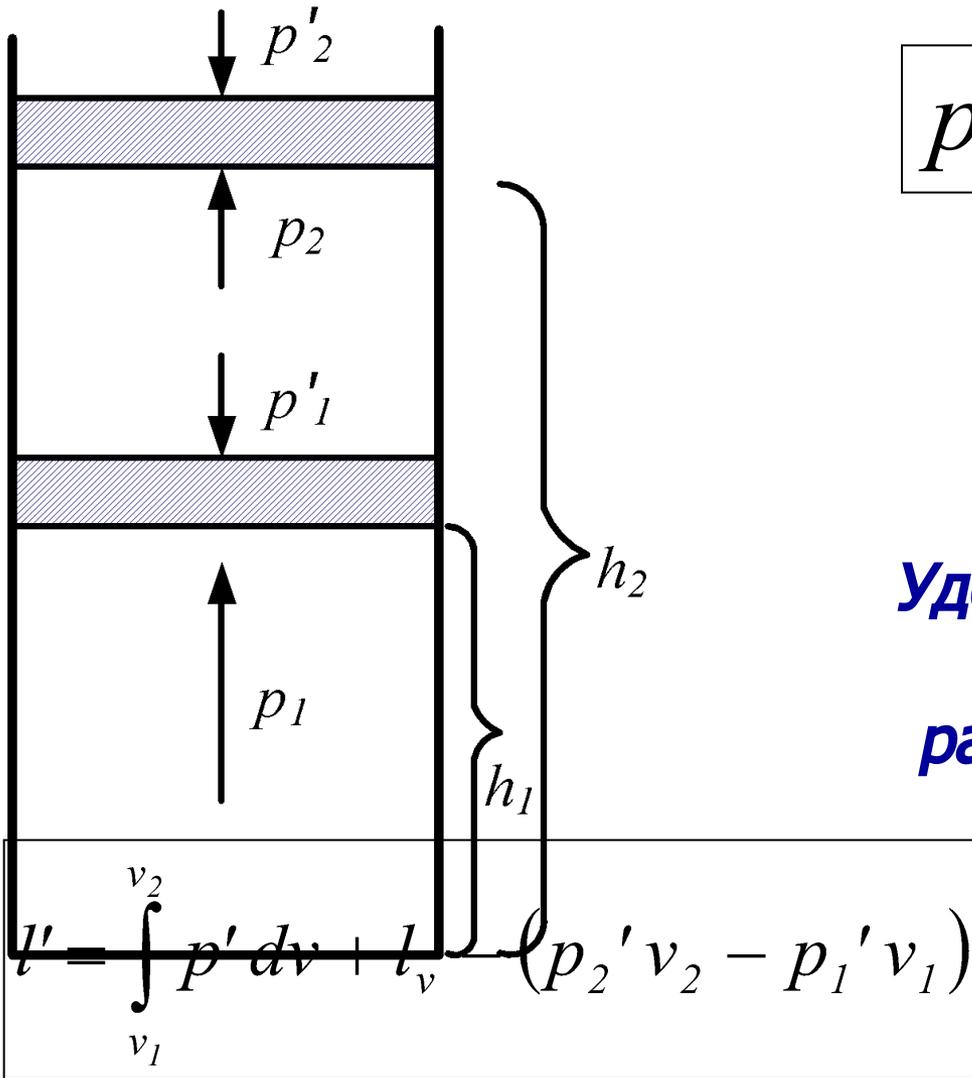
**Работа системы**, в общем случае складывается из **удельной работы расширения** и **работы, совершаемой без изменения объема**

$$\delta l = p' dv$$

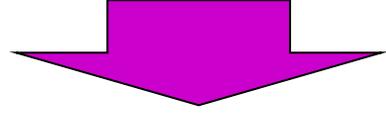
$$(5.7)$$



$$\int_{v_1}^{v_2} p' dv = 0$$



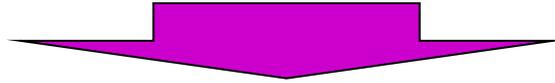
$$p_2' Ah_2 - p_1' Ah_1$$



$$p_2' v_2 - p_1' v_1$$

**Удельная полезная** (или, как ее  
 обычно называют,  
**располагаемая**) работа равна  
 разности между работой  
 расширения и работой  
 вытеснения

$$p' dv = (p' dv + v dp') - v dp' = d(p' v) - v dp'$$



Если  $v_2 > v_1$  — газ расширяется, тогда  $\Delta v > 0$  и  $dv > 0$  — работа газа есть величина **положительная**.

Если  $v_2 < v_1$  — газ сжимается, тогда  $\Delta v < 0$  и  $dv < 0$ , при этих условиях работа газа величина **отрицательная**.

Уравнение работы изменения объема с  
 $m$  (кг) газа:

$$\int_{p_1}$$

$$L = m \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

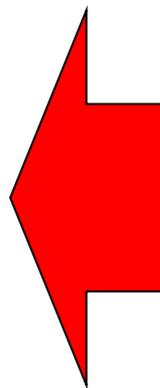
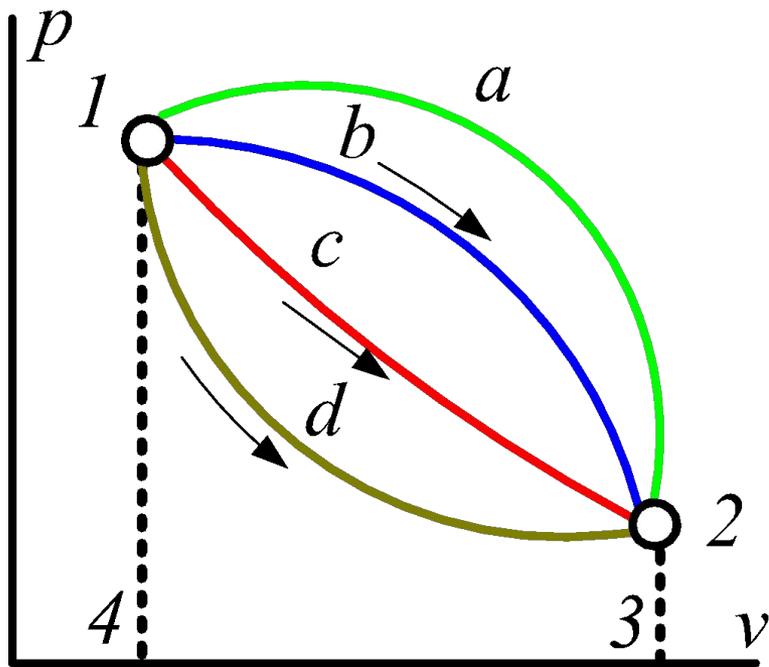
Работа расширения при равновесном процессе, пл.  $ABv_2v_1$ :

$$l = l' + p_2 v_2 - p_1 v_1 = \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

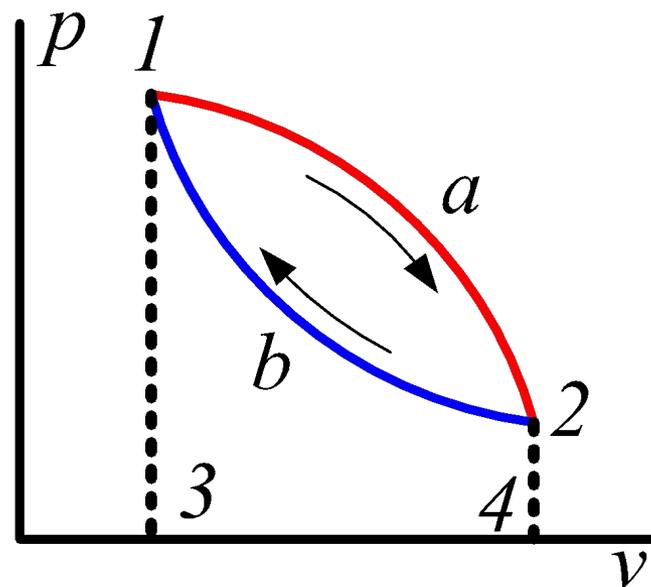
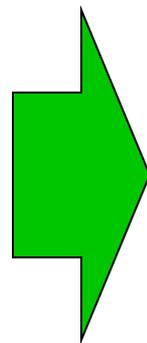
Располагаемая внешняя работа газа

**Располагаемая (полезная) работа может быть как больше, так и меньше работы расширения; она зависит от наклона кривой процесса в  $pV$  - диаграмме.**



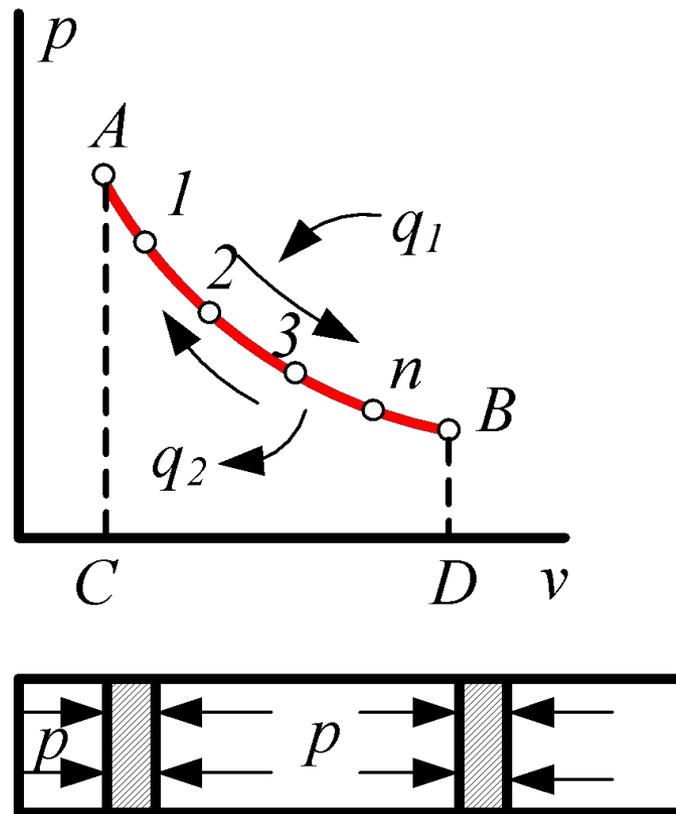


Работа расширения (или сжатия) зависит **не только** от начального и конечного состояний тела, но и **от характера процесса**, в котором рабочее тело переходит из одного состояния в другое.



Работа расширения (1-а-2) и сжатия (2-б-1) при круговом процессе:

# 4. ОБРАТИМЫЕ И НЕОБРАТИМЫЕ ПРОЦЕССЫ



- Процессы, протекающие в прямом и обратном направлениях без остаточных изменений, как в самом рабочем теле, так и в окружающей среде, называют **обратимыми**
- Всякий термодинамический процесс, который проходит через неравновесные состояния, называют **необратимым** термодинамическим процессом
- В результате протекания необратимых процессов в прямом и обратном направлениях термодинамическая система не возвращается в первоначальное состояние **без затраты извне энергии.**

***Необратимыми*** термодинамическими процессами являются:

- процессы расширения и сжатия с конечными скоростями
- всякий процесс, сопровождающийся трением
- процессы, протекающие при конечной разности температур между рабочим телом и источниками теплоты
- процессы диффузии
- процесс расширения в пустоту и ряд других.

$$l_{\text{обр}} = \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

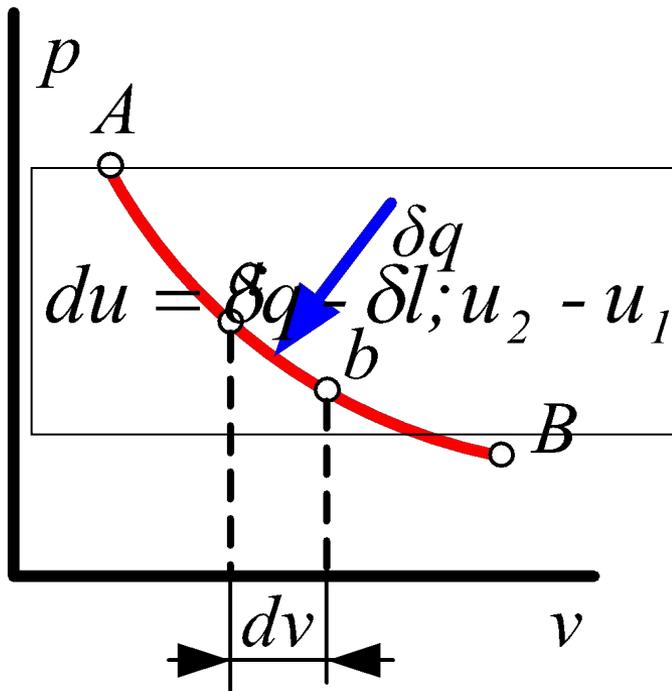
$$l_{\text{необр}} = \int_{v_1}^{v_2} p' dv$$

При расширении газа всегда -  $l_{\text{обр}} > l_{\text{необр}}$

При сжатии газа -  $l_{\text{обр}} < l_{\text{необр}}$

Обратимый процесс представляет собой некоторый предельный случай действительного процесса

# 5. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ПЕРВОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ



Сумма изменений внутренней кинетической и внутренней потенциальной энергии представляет полное изменение удельной внутренней энергии  $du$ .

$$\int \delta q - \int \delta l = q_{1-2} - l_{1-2} \quad (5.8)$$

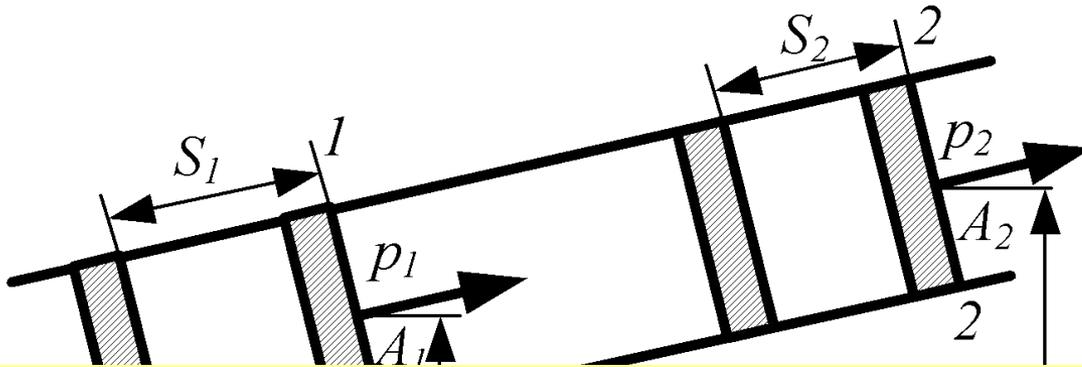
С увеличением объема на  $dv$  тело совершает внешнюю работу по преодолению внешних сил, которую обозначают  $\delta l$

## Математическое выражение первого закона термодинамики :

$$\delta q = du + p dv; q_{1-2} = u_2 - u_1 + \int_1^2 p dv \quad (5.9)$$

- изменение удельной внутренней энергии термодинамической системы равно алгебраической сумме полученной системой энергии в форме удельной теплоты  $\delta q$  и совершенной ею внешней удельной работой  $\delta l$ , или подведенная к рабочему телу энергия в форме удельной теплоты расходуется на изменение удельной внутренней энергии тела и на совершение телом внешней работы

# Уравнение первого закона термодинамики для потока:



$$p_2 A_2 S_2 \quad p_2 v_2$$

$$p_1 A_1 S_1 \quad p_1 v_1$$

Работа

**проталкивания:**

Приращение внешней кинетической энергии потока в канале называется **располагаемой работой** и может быть использовано на валу машины

$$l_{кин} = w_2^2 / 2 - w_1^2 / 2$$

$$\delta l_{кин} = dw^2 / 2$$

$$\delta l' = d(pv)$$

Работа на изменение **внешней потенциальной энергии потока** в канале:

$$l_{\text{ном}} = g(h - h_1), \quad \delta l_{\text{ном}} = d(gh)$$

В общем случае поток между сечениями канала 1-1 и 2-2 может совершать различные виды полезной работы в тепловых аппаратах: и паровых или газовых турбинах, в компрессорах, вентиляторах, дымососах и др. Все эти виды работы называются **технической работой** :

$$l_{\text{техн}} \quad \delta l_{\text{техн}}$$

При прохождении газа через канал затрачивается **работа на преодоление сил трения о стенки канала**:

$$l_{\text{тр}} \quad \delta l_{\text{тр}}$$

$$l_{1-2} = (p_2 v_2 - p_1 v_1) + (w_2^2 / 2 - w_1^2 / 2) + g(h - h_1) + l_{\text{техн}} + l_{\text{тр}}$$

$$\delta l_{1-2} = d(pv) + dw^2 / 2 + d(gh) + \delta l_{\text{техн}} + \delta l_{\text{тр}}$$

Полученное уравнение первого закона термодинамики справедливо для любых рабочих тел и, в частности, для идеальных газов. Уравнения (5.8), (5.9) и (5.10) описывают как обратимые, так и необратимые процессы.

$$\delta q_{1-2} = du + d(pv) + dw^2 / 2 + d(gh) + \delta l_{\text{техн}} + \delta l_{\text{тр}}$$

$$\delta q = du + d(pv) + dw^2 / 2 + d(gh) + \delta l_{\text{техн}} \quad (5.11)$$

Уравнения (5.9) и (5.11) выражают первый закон термодинамики, а величину работы  $p dv$  можно приравнять правой части уравнения (5.11):

$$p dv = d(pv) + dw^2 / 2 + d(gh) + \delta l_{\text{техн}}$$

Из этого уравнения следует, что все виды работ в потоке совершаются за счет работы расширения рабочего тела  $p dv$ .

Величины, входящие в уравнение (5.8), могут быть как положительными, так и отрицательными и в некоторых случаях могут принимать нулевые значения.

# 6. ЭНТАЛЬПИЯ

В прошлом столетии известный физик *Гиббс* ввел в практику тепловых расчетов новую функцию, которая по предложению *Каммерлинга-Оннеса* названа *энтальпией*.

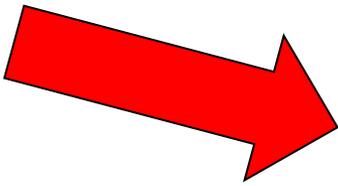
- **Удельная энтальпия**, т.е. отношение энтальпии к массе тела, обозначается  $h$  и выражается в джоулях на килограмм (Дж/кг); она представляет собой сложную функцию вида:

$$h = u + pv \quad (5.12)$$

$$\delta q = du + pdv = du + d(pv) - vdp = d(u + pv) - vdp$$

$$d(pv) = pdv + vdp$$

$$q_{1-2} = h_2 - h_1 - \int_{p_1}^{p_2} vdp \quad (5.14)$$


$$\delta q = dh - vdp \quad (5.13)$$

$$h = \int (\delta q + v dp) + h_0 \quad (5.15)$$

Удельная энтальпия системы определяется с точностью до некоторой аддитивной постоянной  $h_0$ . Эту постоянную выбирают произвольно, и в большинстве случаев удельную энтальпию идеального газа (при  $p \rightarrow 0$ ) считают равной нулю при  $0^\circ\text{C}$ , а константу интегрирования не учитывают

$$\delta q = du + p dv + \delta l_v; \quad (5.16)$$

$$\delta q = dh - v dp + \delta l_v. \quad (5.17)$$

**Уравнения (5.16) и (5.17) являются наиболее общим аналитическим выражением первого закона термодинамики для обратимых процессов изменения состояния термодинамической системы.**

При  $p = \text{const}$  уравнение (5.13) превращается в  $\delta q_p = dh$  (5.18)

Дифференциал удельной энтальпии  $dh$  есть элементарное количество теплоты, участвующее в процессе при постоянном давлении. Вся теплота в процессе при постоянном давлении расходуется на изменение энтальпии:

$$q_p = \int_1^2 dh = h_2 - h_1 \quad (5.19)$$

$$\boxed{dh = \delta q + v dp} \quad \longrightarrow \quad \boxed{h_2 - h_1 = q + \int_{p_1}^{p_2} v dp} \quad (5.20)$$

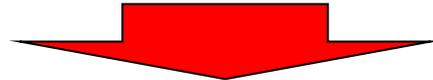
$$\left. \begin{aligned} dh &= \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_v dp + \left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_p dv, \\ dh &= \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_T dv, \\ dh &= \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp. \end{aligned} \right\} \quad (5.21)$$

**Физический смысл энтальпии** - удельная энтальпия  $h$  равна энергии расширенной системы — тела и окружающей среды.

Энтальпия имеет большое значение и применение при расчетах тепловых и холодильных установок и как параметр состояния рабочего тела значительно упрощает тепловые расчеты. Она позволяет применять графические методы при исследовании всевозможных термодинамических процессов и циклов.

Энтальпия идеального газа, так же как и внутренняя энергия, является функцией температуры и не зависит от других параметров.

$$h = u(T) + pv = u(T) + RT$$



$$h = f(T)$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_v = dh / dT \quad (5.22)$$

т. е. в любом процессе изменения состояния идеального газа производная от изменения энтальпии по температуре будет полной производной.