

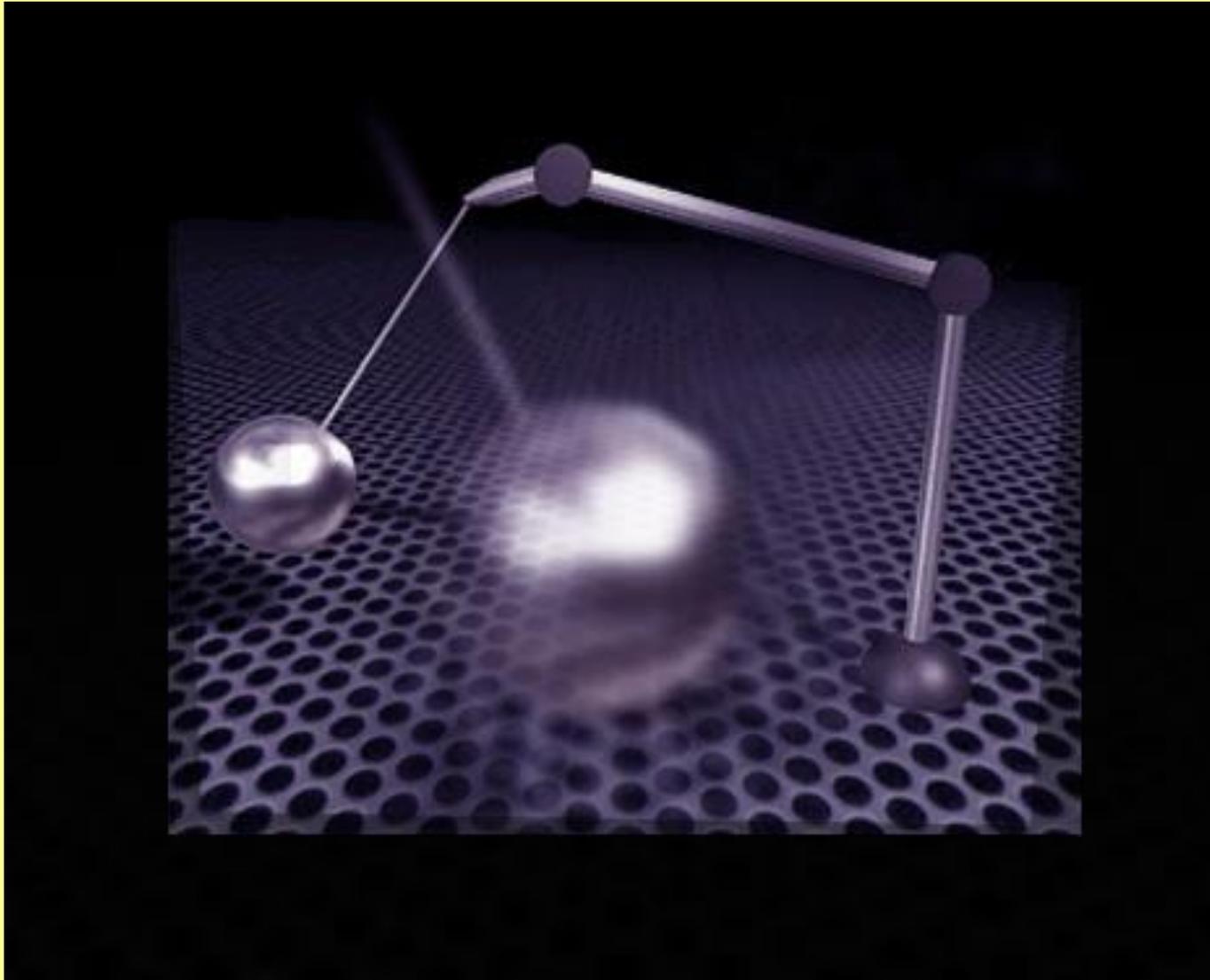
## Часть 1

# Техническая термодинамика

### Занятие 2

Внутренняя энергия. Работа расширения. Теплота.  
Аналитическое выражение первого закона  
термодинамики. Теплоемкость газов. Энтальпия.

# Внутренняя энергия (U)



Фильм 21

# Внутренняя энергия (U)

$$U = U_K + U_{\Pi} + U_0 + U_{\text{Я}}$$

$$U_K = f(T)$$

$$U_{\Pi} = f(V)$$

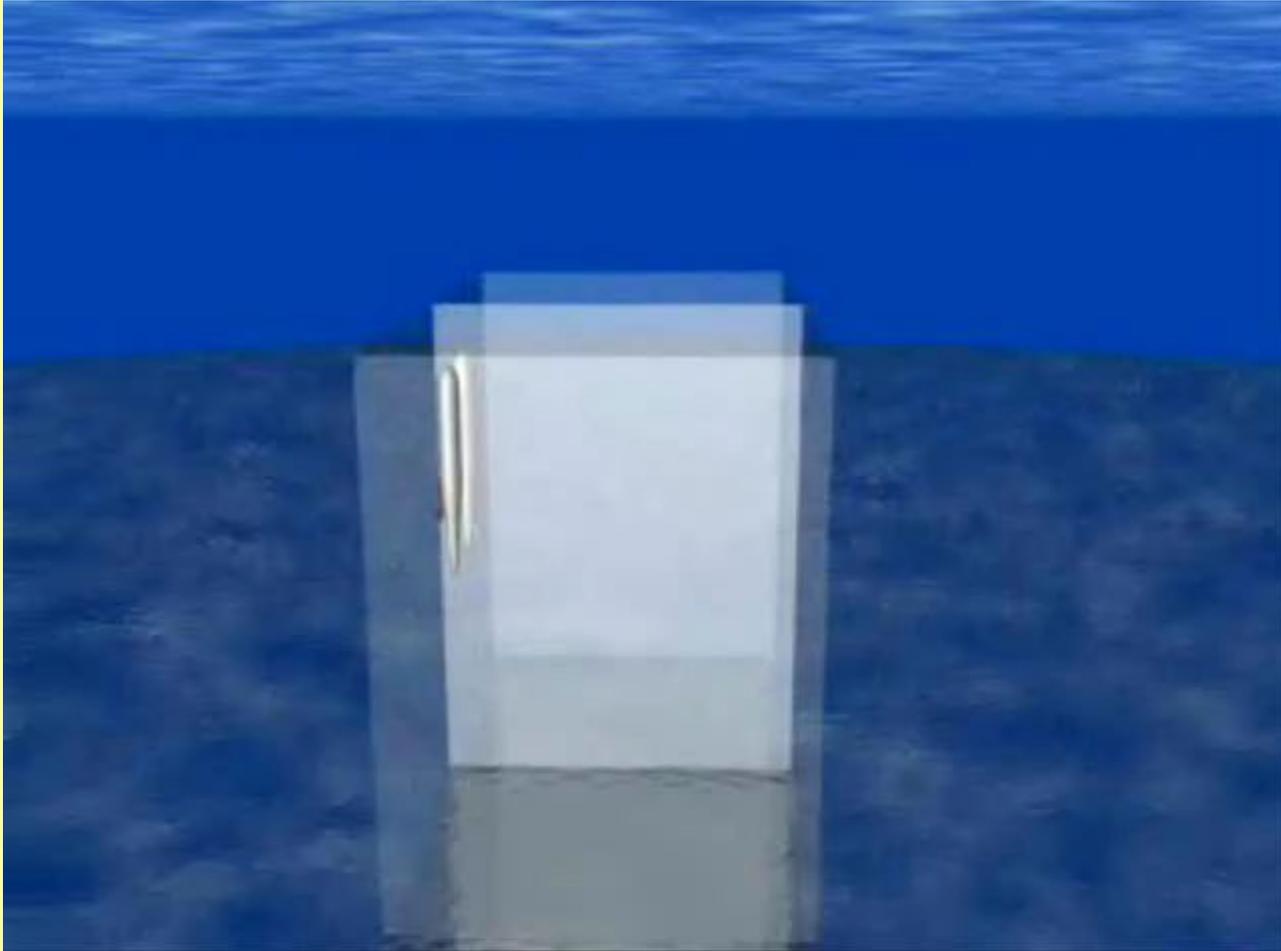
$$U_0 = 0$$

$$U_{\text{Я}} = 0$$



**Фильм 22**

# Внутренняя энергия (U)



Фильм 23

# Свойства внутренней энергии

1.  $U=f(\text{состояния тела}) \Rightarrow U=f(V,P,T)$

2. свойство аддитивности.  $U=U_1+U_2+\dots$

3.  $u=U/M$  [Дж/кг]

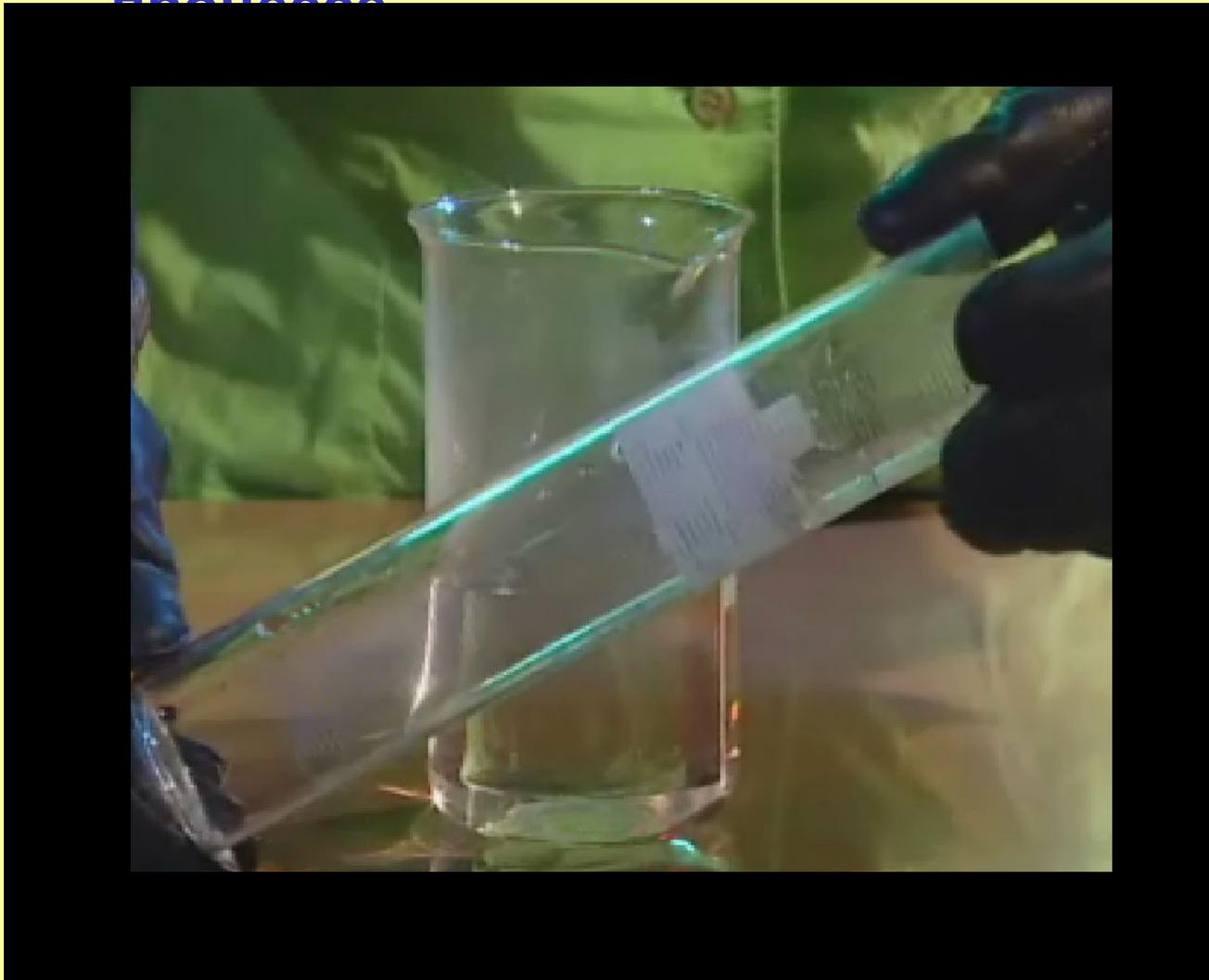
4. ИГ  $U_2=0$   $U_{\text{ИГ}}=f(T)$

5. для задач  $\Delta u=u_2-u_1$

# Работа расширения (L)

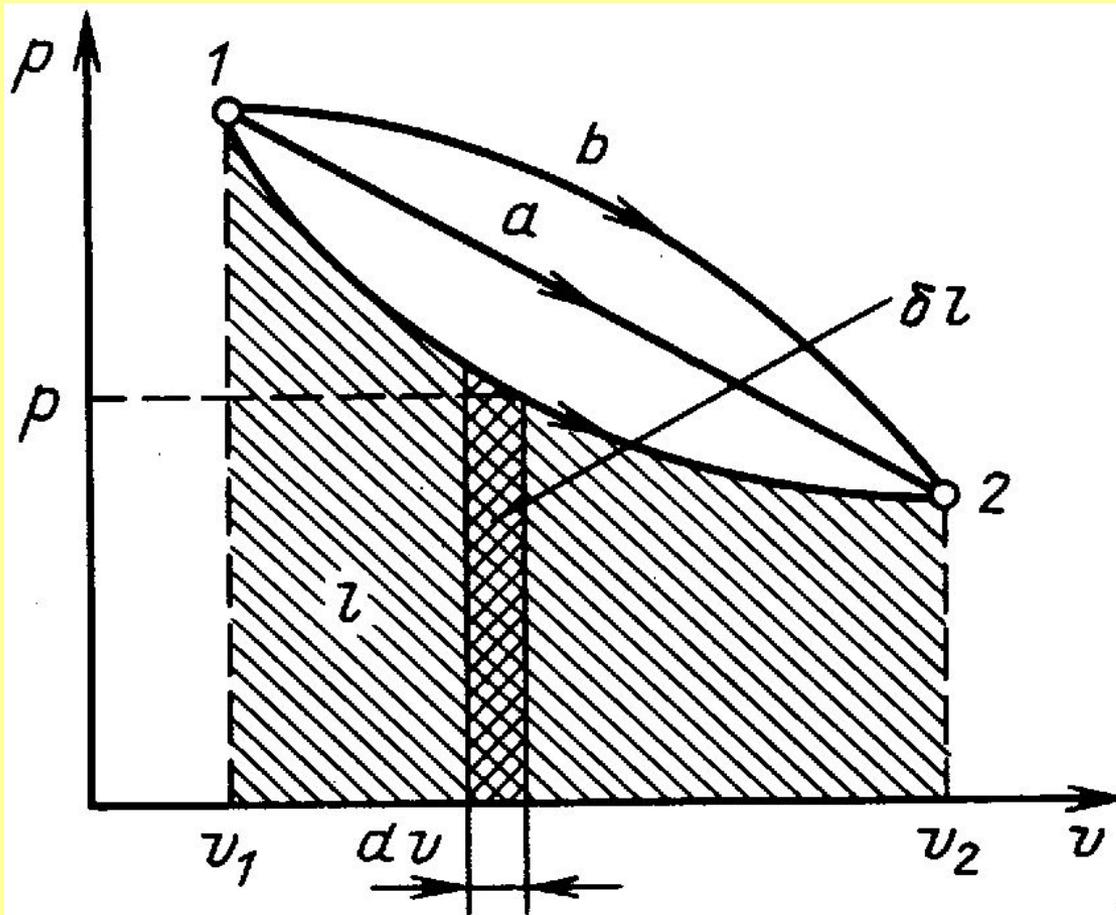
- форма передачи энергии в ТД

процесс



**Фильм 24**

# Работа расширения ( $L$ ), Дж



$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

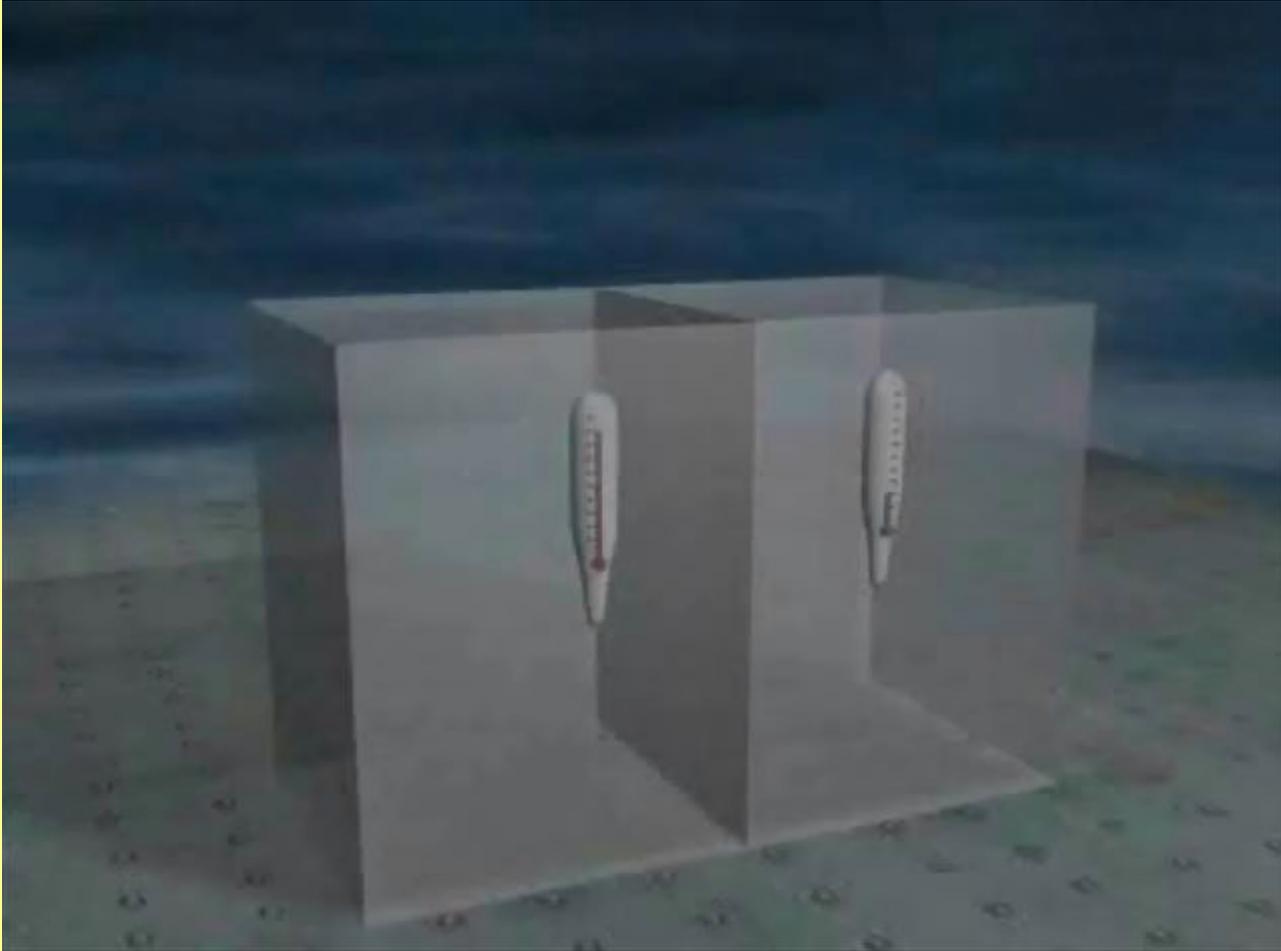
# Работа расширения (L)

## Свойства :

1.  $L=f(\text{процесса})$
2. Макрофизическая форма передачи энергии в ТД процессе
3.  $l=L/M$  [Дж/кг]
4. При расширении - «+», при сжатии – «-»
5. Зависит от свойств ТРД

**Теплота ( $Q$ ), Дж ( $q$ , дж/кг)**

**- форма передачи энергии на микрофизическом уровне**



**Фильм 25**

## Теплоемкость газов (С)

- количество теплоты, которое необходимо подвести или отвести от единицы рабочего тела для изменения его температуры на  $1^\circ$

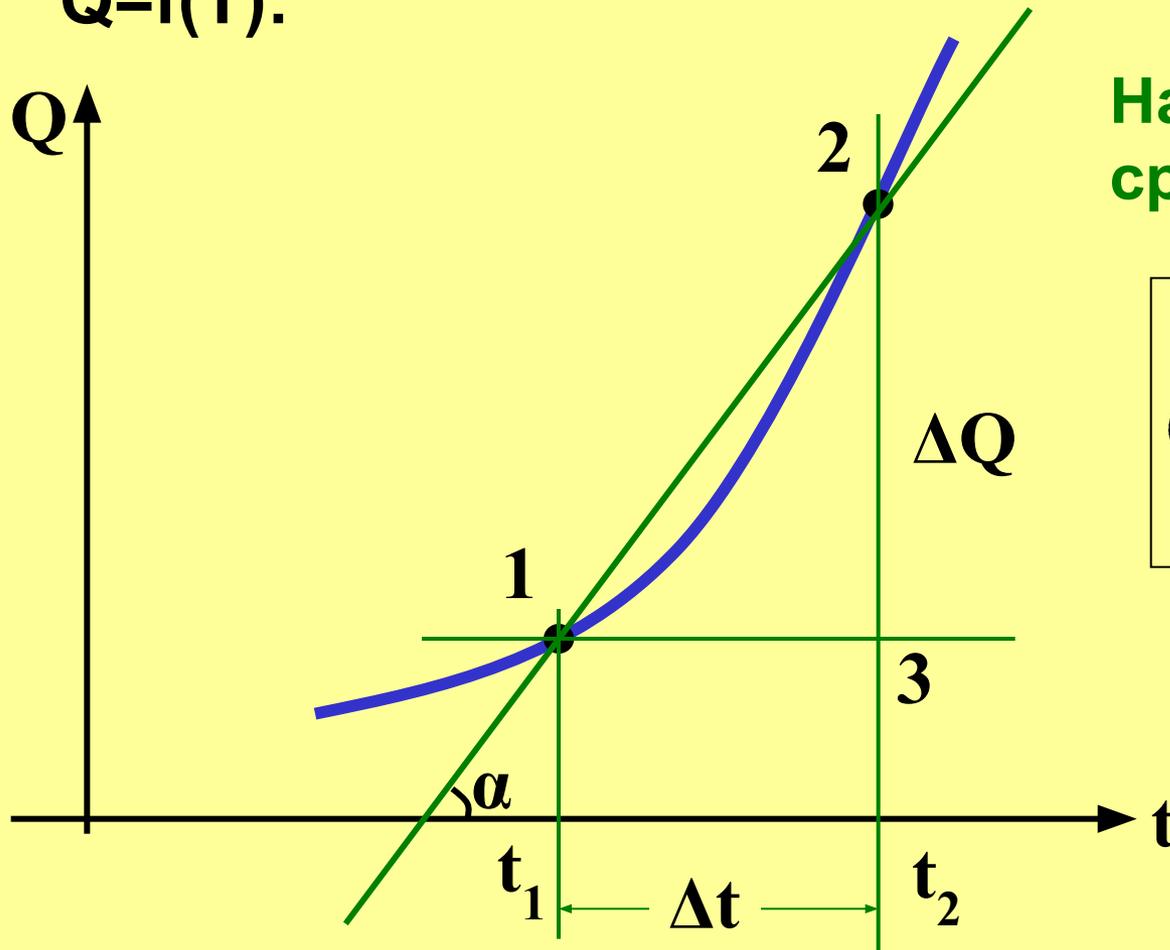
$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

Теплоемкость зависит от:

температуры,  
давления,  
структуры молекул,  
процесса,  
единицы рабочего тела

# Теплоемкость газов (С)

Рассмотрим процесс нагревания единицы массы рабочего тела, который характеризуется кривой  $Q=f(T)$ :



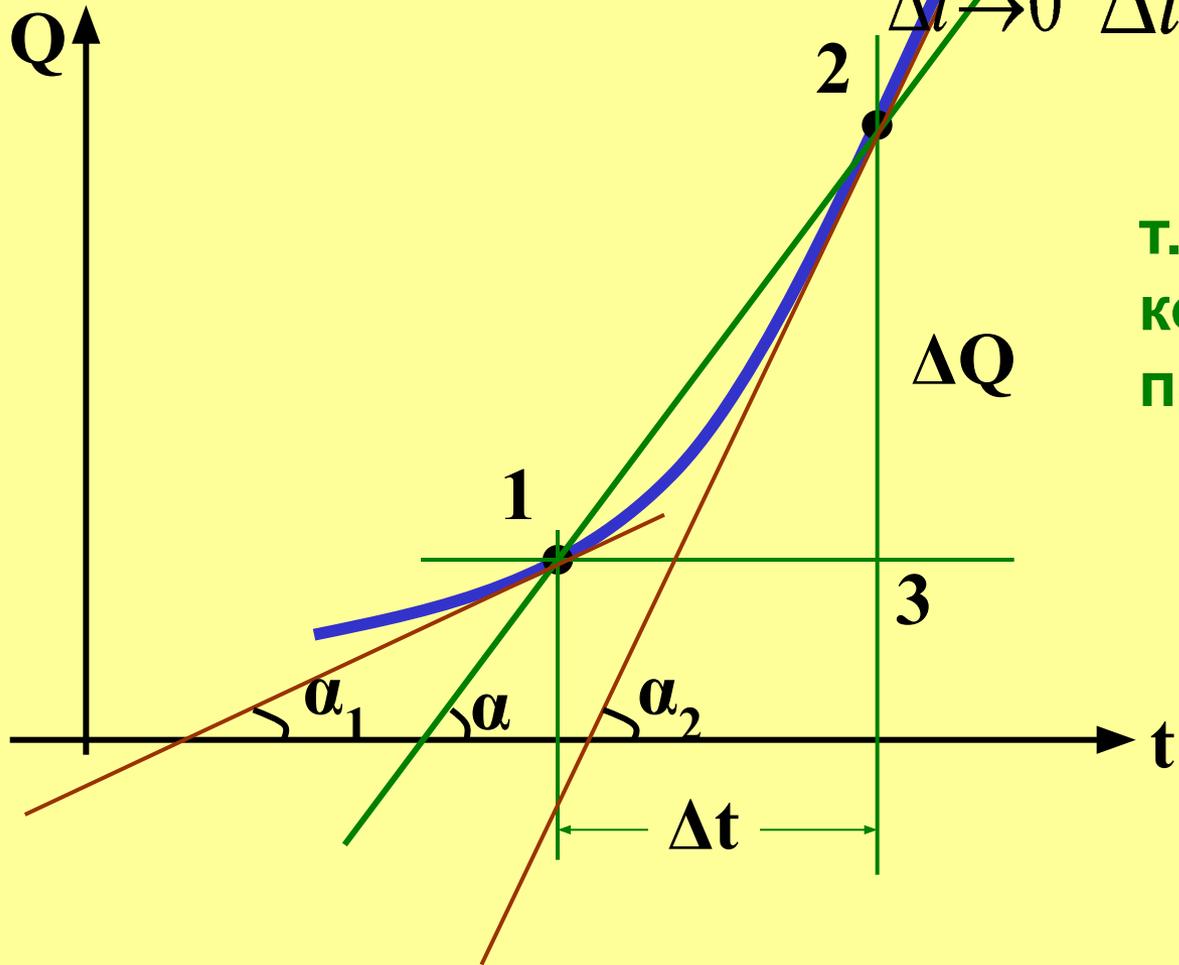
На интервале от 1 до 2:  
средняя теплоемкость –

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \operatorname{tg} \alpha$$

# Теплоемкость газов (С)

Истинная теплоемкость – значение теплоемкости в данной температурной точке

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} = \operatorname{tg} \alpha_1 = C_1$$



т.е. производная от количества тепла по температуре

## Расход тепла в процессе:

1. Через среднюю теплоемкость:

$$\Delta Q = C_{cp} \Delta t$$

2. Через истинную теплоемкость:

$$dQ = C dt$$
$$Q = \int_{t_1}^{t_2} C dt$$

# Теплоемкость газов (С)

Удельная  
теплоемкость:

$$c = \frac{dq}{dT} \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

## Виды теплоемкости:

Массовая –  $c$ , кг

Объемная –  $c'$ , м<sup>3</sup>

молярная -  $c_{\mu}$ , кмоль

Изобарная -  $c_p$

изохорная -  $c_v$

политропная -  $c_n$

$$c = \frac{c_{\mu}}{\mu} = \frac{c'}{\rho_H}$$

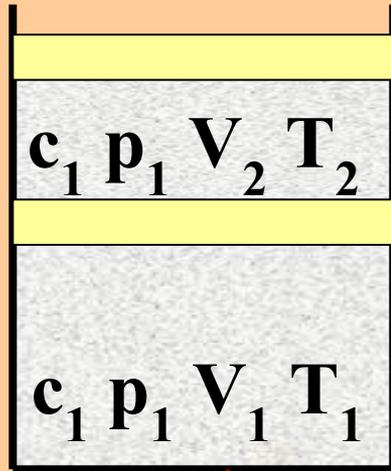
$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$c_n = c_v \frac{n - k}{n - 1}$$

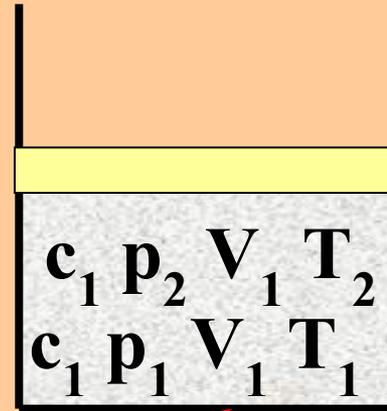
# Уравнение Майера

Рассмотрим процесс нагревания газа от  $T_1$  до  $T_2$  :

Случай 1.  $p = \text{const}$



Случай 2.  $v = \text{const}$



$$Q_p > Q_v$$

$$Q_p - Q_v = L$$

$$Q_p = mc_p(T_2 - T_1)$$

$$Q_v = mc_v(T_2 - T_1)$$

# Уравнение Майера

$$pV = mRT$$

Работа газа:

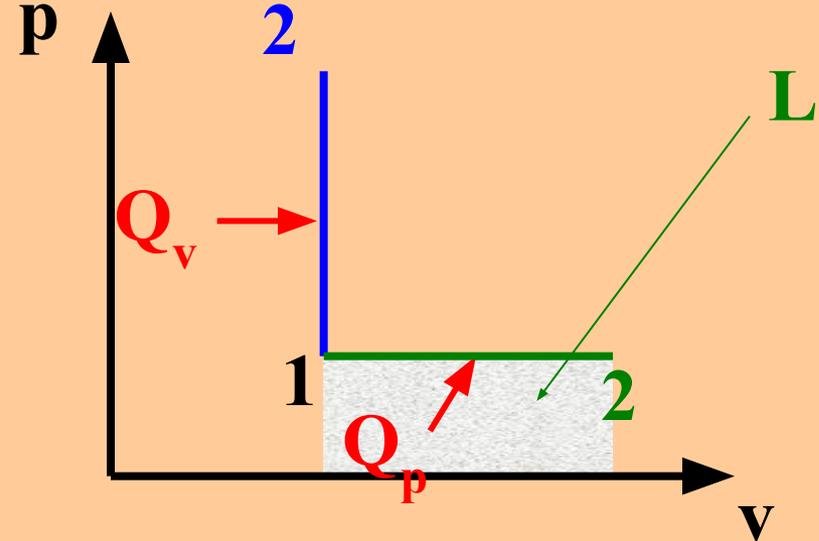
$$\begin{aligned} L &= p_1 V_2 - p_1 V_1 = \\ &= p_1 (V_2 - V_1) = \\ &= mR(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

С другой стороны:

$$L = Q_p - Q_v = mc_p(T_2 - T_1) - mc_v(T_2 - T_1)$$

Тогда:

$$mR(T_2 - T_1) = mc_p(T_2 - T_1) - mc_v(T_2 - T_1)$$



$$R = c_p - c_v$$

1842 г.

# Уравнение Майера

Для идеального газа:

$$c_{v\mu} = \frac{i}{2} R$$

$$c_{p\mu} = \frac{i + 2}{2} R$$

$i$  – число степеней свободы

Коэффициент Пуассона:

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

Газ	$k$
одноатомный	1,67
двухатомный	1,40
многоатомный	1,28

# Энтальпия (i)

$$I = U + pV \quad [\text{Дж}]$$

Функция состояния

$$u + pv = i \quad [\text{Дж/кг}]$$

Энтальпия ИГ является функцией только T

$$i = U(T) + RT$$

$$di = c_p dT$$

$$i = cdT + RT$$

$$\Delta i = c_p (T_2 - T_1)$$

$$E = \text{const}$$

**Полная энергия изолированной термодинамической системы при любых происходящих в системе процессах остается неизменной**

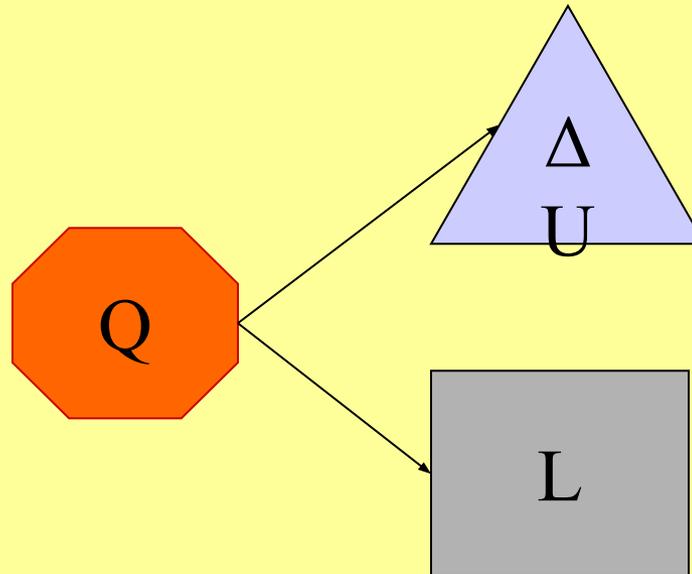
# Первый закон термодинамики

$$dq = du + dl$$

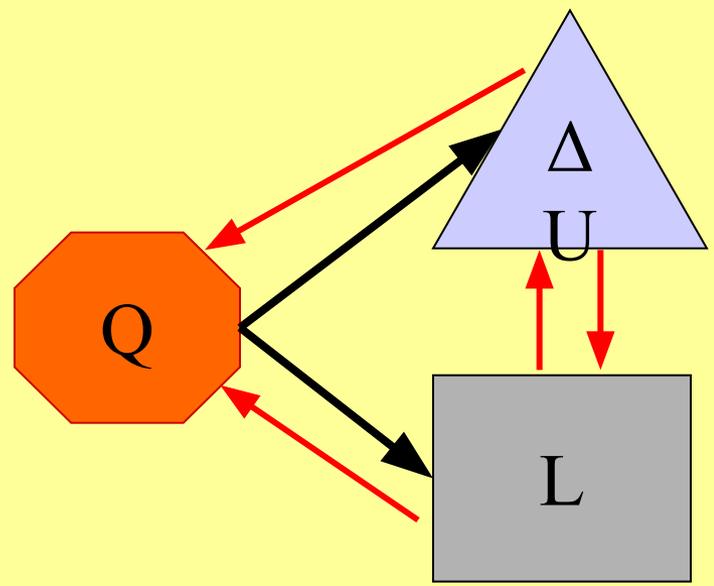
$$Q = \Delta U + L$$

$$dq = du + pdv$$

**В термодинамическом процессе вся теплота, подводимая к телу расходуется на изменение внутренней энергии и на работу против внешних сил.**



# Первый закон термодинамики



$$dq = du + pdv$$

Выражение 1-го закона термодинамики через энтальпию:

$$di = d(u + pv)$$

$$di = du + pdv + vdp$$

$$di = dq + vdp$$

$$dq = di - vdp$$