

**Энергомашиностроение.**

**6**

## **Лекция №6**

# **Первый закон термодинамики**

- Формулировка первого закона термодинамики.
- Аналитическое выражения первого закона термодинамики.
- Энтальпия. Уравнение первого закона термодинамики, выраженное через энтальпию.
- Функции состояния и функции процесса.
- Вычисление изменения внутренней энергии и энтальпии идеального газа.
- Открытая система.
- Энтальпия. Уравнение первого закона термодинамики для открытой системы.
- Стационарный поток. Располагаемая работа.

## Формулировки первого закона термодинамики

Применение к тепловым процессам всеобщего закона природы — закона сохранения и превращения энергии — приводит к установлению первого закона термодинамики, лежащего в основе всех термодинамических исследований.

Так как первый закон термодинамики есть частный случай закона сохранения энергии, то его можно сформулировать следующим образом: ***при тепловых процессах, так же как и при любых других, невозможно возникновение или уничтожение энергии.***

Если бы удалось построить двигатель, который производил бы работу, не получая энергии от каких-либо внешних источников, то теоретически он мог бы быть вечным. Однако такой двигатель, называемый обычно «вечным двигателем» (perpetuum mobile) первого рода, осуществить невозможно, что следует из закона сохранения энергии. Из этого вытекает еще одна формулировка первого закона термодинамики: ***вечный двигатель первого рода невозможен.***

# Аналитическое выражение первого закона термодинамики (уравнение теплоты)

$$dq = du_k + du_n$$

$$du_k + du_n = d(u_k + u_n) = du$$

$$dq = du \quad (1)$$

$$dq = du + dl \quad (2)$$

$$dl = pdv$$

$$dq = du + pdv \quad (3)$$

$$mdq = mdu + mdl$$

$$mdq = mdu + mpdv$$

$$dQ = dU + dL \quad (4)$$

$$dQ = dU + pdV \quad (5)$$

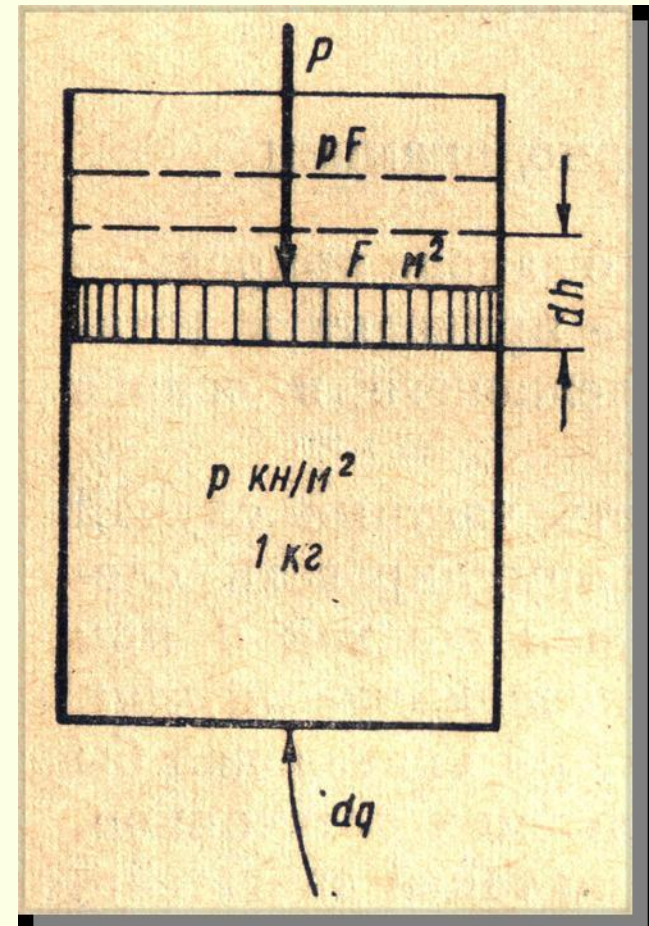


Рис. 1. К выводу уравнения первого закона термодинамики

Уравнения (2) и (4) относятся к таким процессам, для которых входящие в них члены являются величинами бесконечно малыми. Такие процессы будем называть **элементарными**. Они характерны тем, что при протекании процесса параметры состояния изменяются на бесконечно малые величины (в частных случаях некоторые из параметров остаются постоянными).

Для процессов, протекающих между состояниями, характеризующимися изменениями параметров на конечные величины, уравнения первого закона термодинамики соответственно принимают вид

$$q = \Delta u + l \quad (6)$$

$$Q = \Delta U + L \quad (7)$$

Как уже говорилось, в технической термодинамике принято считать теплоту положительной ( $dq > 0$ ,  $q > 0$ ), если она подводится к рабочему телу извне, и отрицательной, когда она отдается рабочим телом наружу, некоторому внешнему источнику ( $dq < 0$ ,  $q < 0$ ). Знак изменения внутренней энергии определяется тем, увеличивается она или уменьшается в результате процесса; в первом случае  $du$  положительно, во втором отрицательно. Если в результате процесса объем, занимаемый рабочим телом, увеличивается ( $dv > 0$ ), т. е. рабочее тело расширяется, то производимая им работа положительна ( $dl > 0$ ); при уменьшении объема ( $dv < 0$ ) отрицательна ( $dl < 0$ ).

## Энтальпия. Уравнение первого закона термодинамики, выраженное через энтальпию

$$u + p\nu = h \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \quad (8)$$

Эту сумму называют **энтальпией** или **теплосодержанием**. Последнее название крайне неудачно, так как оно противоречит физическому смыслу теплоты; нельзя говорить о содержании теплоты в теле, так как теплота является характеристикой процесса.

$$u = h - p\nu$$

$$du = dh - pd\nu - \nu dp$$

$$dq = dh - pd\nu - \nu dp + pd\nu$$

$$dq = dh - \nu dp \quad (9)$$

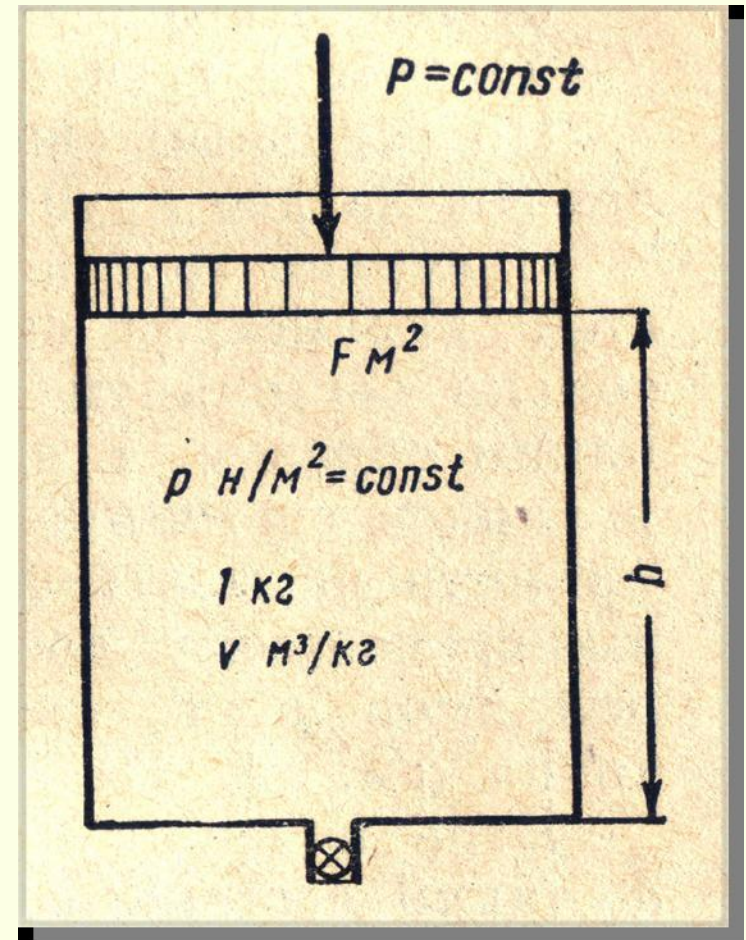


Рис. 2.

Уравнение первого закона термодинамики, выраженное через энтальпию для  $m$  кг рабочего тела, будет иметь вид

$$dQ = dH - Vdp \quad (10)$$

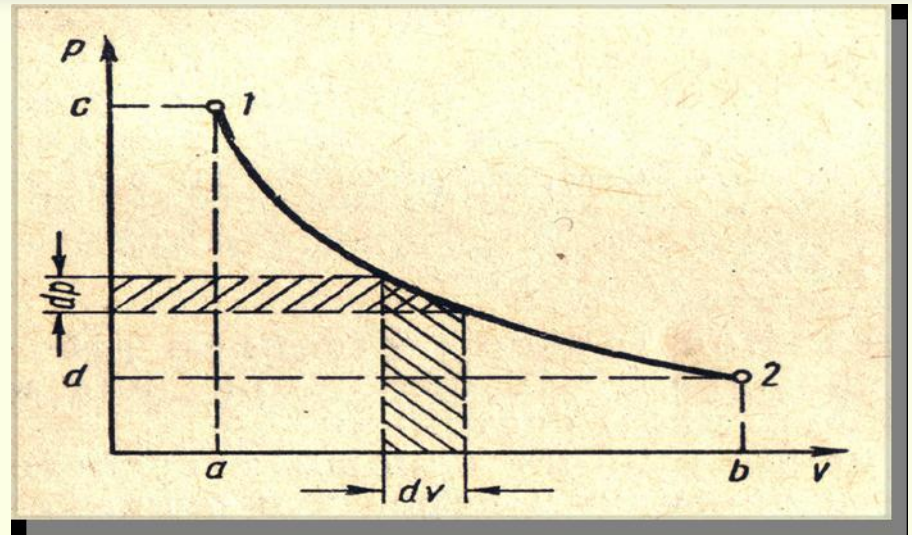


Рис. 3. Работа процесса

### Функции состояния и функции процесса

$$h = u + p\nu$$

$$z = f(x; y) \quad (11)$$

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

$$\Delta z = z_2 - z_1 = 0$$

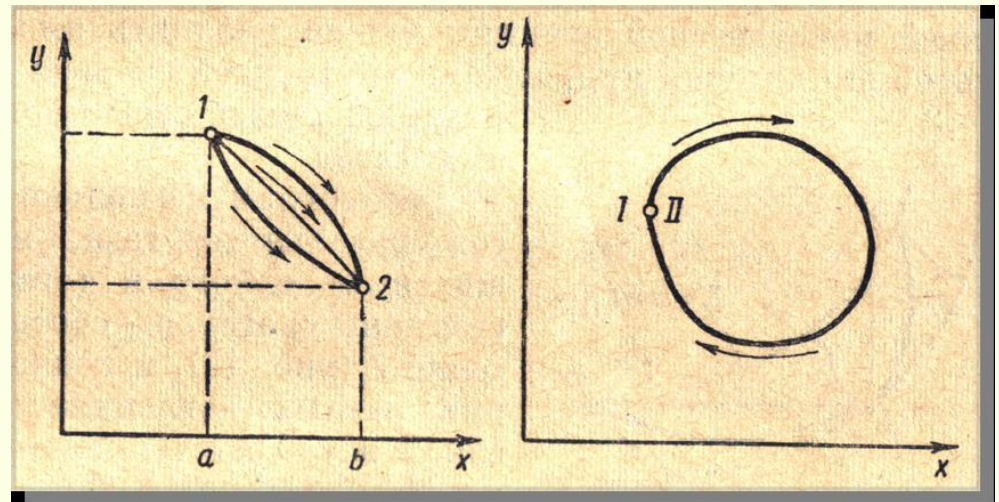


Рис. 4. Свойства функций состояния и процесса

# Вычисление изменения внутренней энергии и энтальпии идеального газа

$$l = \int_1^2 p dv = 0$$

$$q_v = \Delta u$$

$$q_v = c_{vm} (T_2 - T_1) = c_{vm} \Delta T$$

$$\Delta u = c_{vm} \Delta T \quad (12)$$

$$du = c_{vm} dT$$

$$u = c_{vm} T$$

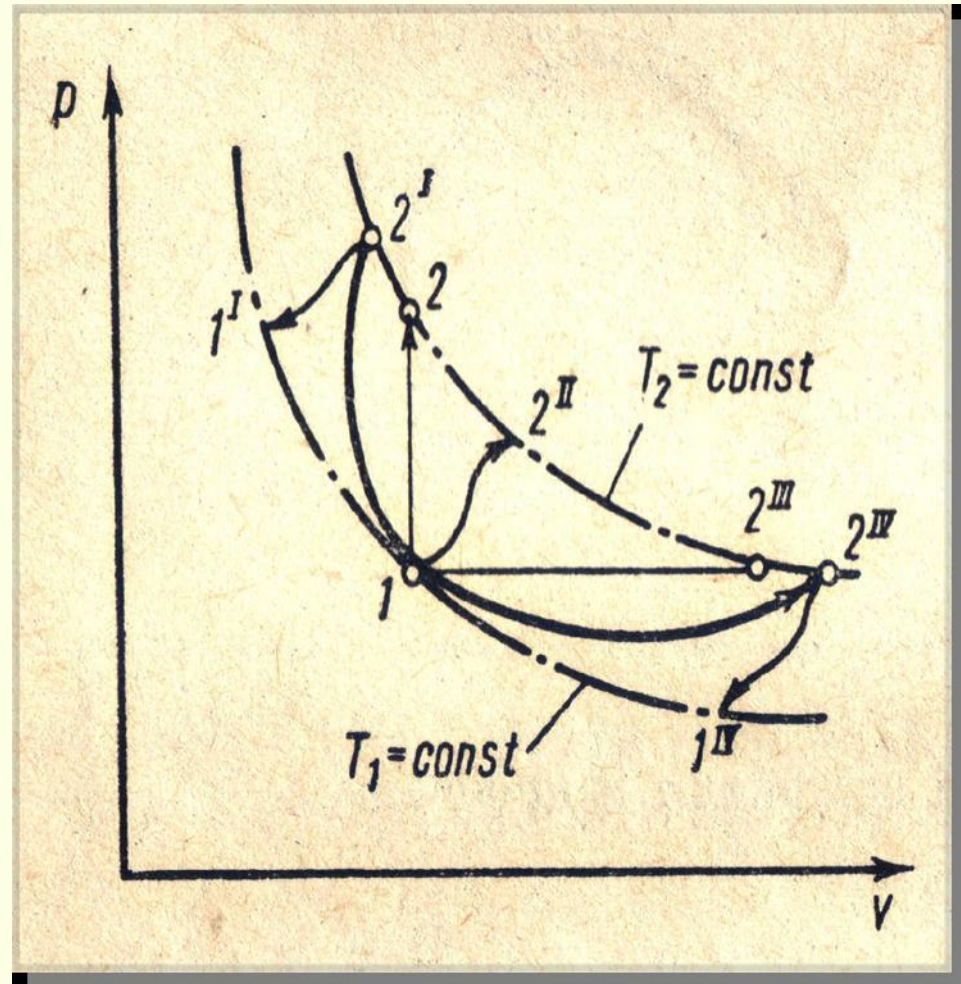


Рис. 5. Определение изменения внутренней энергии

$$h = u + RT = c_v T + RT = (c_v + R)T$$

По уравнению Майера

$$c_v + R = c_p$$

поэтому

$$h = c_{pm} T \quad (12)$$

$$dh = c_p dT \quad (13)$$

$$\Delta h = c_{pm} \Delta T \quad (14)$$

Используя полученные значения для изменения внутренней энергии и энтальпии, уравнения первого закона термодинамики для идеального газа можно записать следующим образом:

$$dq = c_v dT + p d\nu \quad (15)$$

$$q = c_{vm} \Delta T + l \quad (16)$$

$$dq = c_{pm} dT - \nu dp \quad (17)$$

## Открытая система

Работа ввода(вытеснения) массы.

$$L_m = pfx = pV$$

$$l_m = \frac{L_m}{\delta m} = \frac{pV}{\delta m} = pv \quad (18)$$

Полезная работа.

$$l_{\Pi} = l - l_m = \int pdv - \int d(p'v)$$

Количество воздействия.

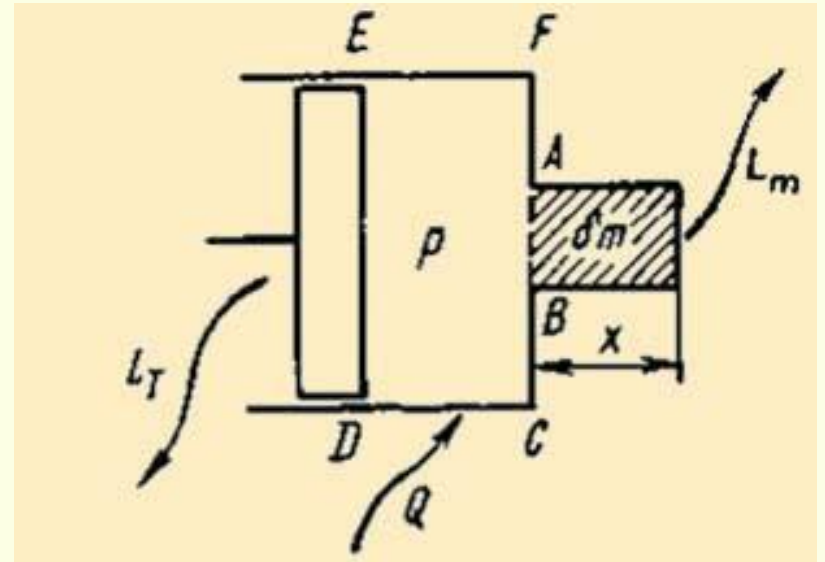


Рис. 6. Схема открытой системы

$$(u + w^2 / 2 + gz) + l_m = u + w^2 / 2 + gz + pv \quad (19)$$

$$\delta W_m = (u + pv + w^2 / 2 + gz) dm \quad (20)$$

## Энтальпия.

### Уравнения первого закона термодинамики для открытой системы

Величина, равная сумме внутренней энергии и произведения давления на удельный объем, называется *энтальпией*:

$$h = u + p v \quad (21)$$

$$dh = T ds + v dp \quad (22)$$

$$dE = \sum_{i=1}^n \left( h + \frac{w^2}{2} + gz \right)_i dm_i + \delta Q - \delta L_T \quad (23)$$

где  $dE$  — изменение энергии открытой системы;  $n$  — число вводов и выводов массы в системе;  $(h + w^2/2 + gz)_i m_i$  - количество воздействия (изменение энергии системы), связанное с вводом (выводом) массы  $dm_i$  в систему;  $\delta Q$  — количество теплоты, которым система обменивается с окружающей средой;  $\delta L_T$  — техническая работа — механическая работа, имеющая место в открытой системе.

$$du / (h_0 - u) = dn / n$$

$$du / (h_0 - u) = dn / n$$

Для идеального газа ( $H = C_p T$ ,  $U = C_v dT$ ) уравнение будет

$$dT / (kT_0 - T) = dn / n \quad (24)$$

где  $k = C_p / C_v$

$$(kT_0 - T)n = const \quad (25)$$

$$\frac{T_2 - kT_0}{T_1 - kT_0} = \frac{n_1}{n_2} \quad (26)$$

$$(kT_0 / T - 1)p = const \quad (27)$$

$$\frac{(kT_0 / T_2) - 1}{(kT_0 / T_1) - 1} = \frac{p_1}{p_2}$$

## Стационарный поток. Располагаемая работа

**Стационарным** называют такой поток, при котором в любом сечении канала параметры среды остаются неизменными во времени. Напишем уравнение первого закона термодинамики для открытой системы со стационарным потоком, которая обменивается теплотой  $Q$ , технической работой  $L_T$  и в сечениях 1 и 2 — массой с окружающей средой (рис 7). Так как поток, проходящий через систему, стационарен, то масса  $m$  и энергия  $E$  системы не меняются во времени, т. е.  $\Delta m = 0$  и  $\Delta E = 0$ .

$$\Delta E = (h + w^2 / 2 + gz)_1 m - (h + w^2 / 2 + gz)_2 m + Q - L_T = 0$$

$$\Delta h = q - l_T - \Delta w^2 / 2 - g\Delta z \quad (28)$$

$$l_0 = l_T + \frac{\Delta w^2}{2} + g\Delta z \quad (29)$$

$$\Delta h = q - l_0 \quad (30)$$

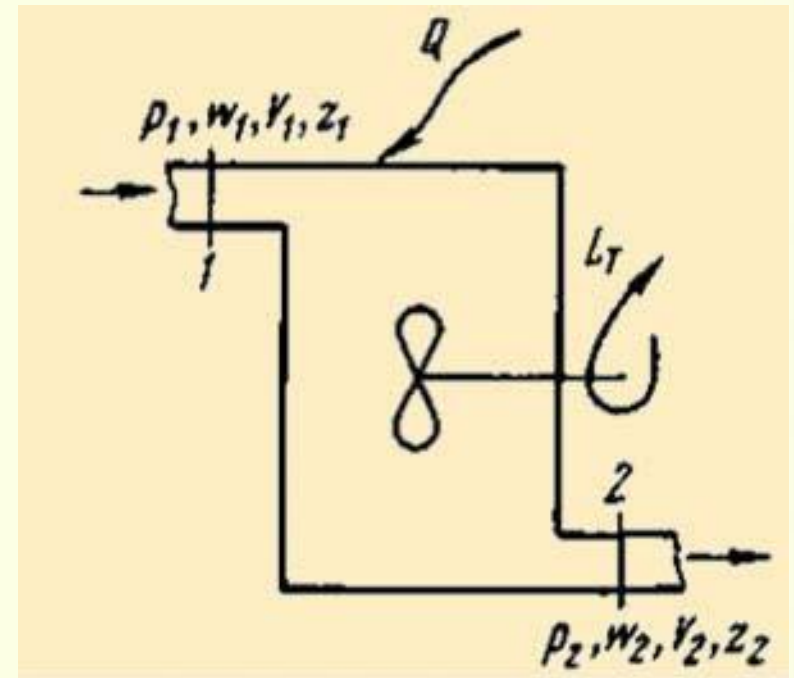


Рис. 7. Схема системы со стационарным потоком

$$\delta l_0 = -v dp \quad (31)$$

$$l_0 = - \int_{P_1}^{P_2} v dp \quad (32)$$

$$l_0 = a12b$$

$$\delta l_0 = \delta l - \delta l_m = p dv -$$

$$- d(pv) = -v dp$$

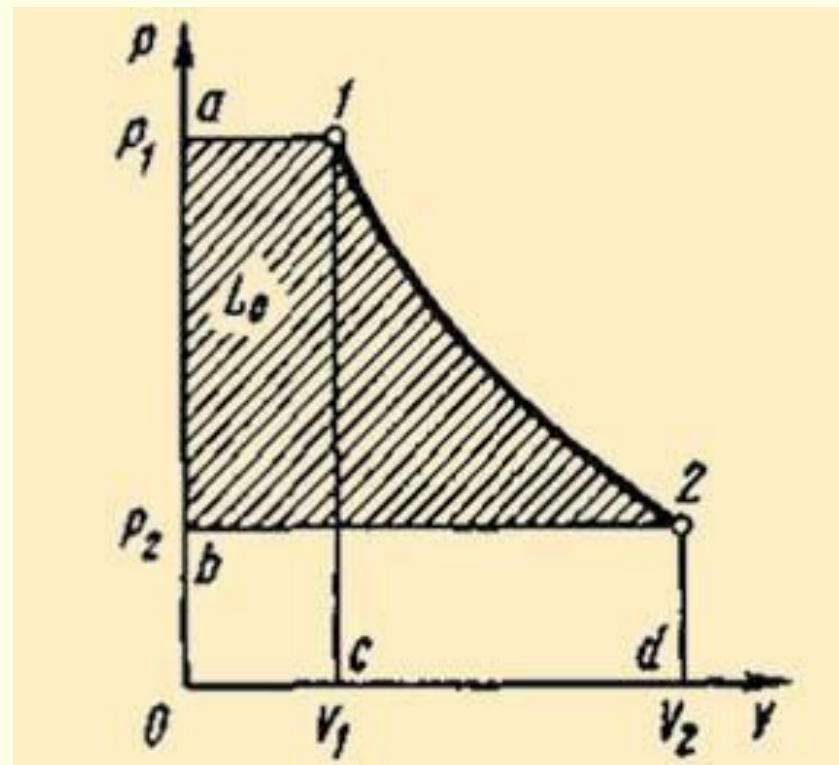


Рис. 8. Изображение располагаемой работы на VP-диаграмме

Работа изменения поверхности системы имеет вид

$$dL = \sigma d\Omega \quad (33)$$

где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения,  $\Omega$  — поверхность. Приведем примеры связи  $dL$  и соответствующих параметров состояния для некоторых термодинамических систем.

**1. Работа при изменении объема газообразной среды (термодеформационная система):**

$$dL = p dV \quad (34)$$

**2. Работа деформации твердого тела объемом  $V$ :**

$$dL = -[\sigma_{xx} d\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} d\varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} d\varepsilon_{zz} + \\ + 2\sigma_{zy} d\varepsilon_{zy} + 2\sigma_{yx} d\varepsilon_{yx} + 2\sigma_{zx} d\varepsilon_{zx}] \quad (35)$$

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{zy}, \sigma_{yx}, \sigma_{zx}$  - компоненты напряжений  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{zy}, \varepsilon_{yx}, \varepsilon_{zx}$  - компоненты деформаций.

**3. Работа поверхностных сил жидкости:**

$$dL = -\alpha d\Sigma, \quad (36)$$

где  $\alpha$  – поверхностное натяжение жидкости,  $d\Sigma$  – элементарное изменение площади поверхности.

**4. Работа внешних сил электрического поля при поляризации диэлектрика.**

Энергия электрического поля, рассчитанная на единицу объема, составляет для вакуума:

$$W_B = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} \quad W_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot E^2}{2} \quad (37) \quad (38)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость вещества, которая для диэлектриков всегда больше 1.

Для газов эта величина немного больше 1, для воды  $\varepsilon = 82$ , для некоторых веществ  $\varepsilon \cong 103$ .

Таким образом, энергия в  $\varepsilon$  раз больше, чем при одинаковых значениях  $E$ . Разность представляет собой энергию поляризации. Она идет либо на разделение зарядов в диэлектрике, либо на поворот в направлении поля поляризованных молекул. Соответствующая элементарная работа для изотропного диэлектрика:

$$dL = -\vec{E} d\vec{P} \quad (39)$$

**5. Работа электрической системы (конденсатор):**

$$dL = E d e \quad (40)$$

Вид взаимодействия	Потенциал	Координата
Тепловое	Абсолютная температура <b>T</b>	Энтропия <b>S</b>
Деформационное	Абсолютное давление, взятое со знаком «минус» <b>-p</b>	Объем <b>V</b>
Массообмен	Химический потенциал <b>μ</b>	Масса <b>M</b>
Магнитное (магнетики)	Напряженность магнитного поля <b>H</b>	Намагниченность <b>f</b>
Электрическое (диэлектрики)	Напряженность электрического поля, взятая со знаком «минус» <b>-E</b>	Поляризация диэлектрика <b>ϕ</b>
Поверхностное	Поверхностное натяжение <b>σ</b>	Поверхность <b>Ω</b>
Гравитационное	Ускорение силы тяжести <b>g</b>	Высота <b>Z</b>
Упругое (твердые тела)	Сила, взятая со знаком «минус» <b>-ψ</b>	Длина <b>ψ</b>
Электрическое (гальванический элемент)	Электродвижущая сила <b>ε</b>	Заряд элемента <b>q</b>

## Контрольные вопросы

- Первый закон термодинамики: формулировки, физический смысл аналитическое выражение для термомеханической системы
- Второе аналитическое выражение 1-го закона термодинамики (через  $h$ )
- Открытая система
- Энтальпия. Уравнение первого закона термодинамики для открытой системы
- Функции состояния и функции процесса
- Стационарный поток. Располагаемая работа
- Изображение располагаемой работы на  $VP$ -диаграмме
- Располагаемая работа: формула и графическое представление