Процессы изменения состояния термодинамических систем

Классификация термодинамических процессов

Термодинамический процесс может быть задан либо графическим способом в виде изображения процесса в координатах *p-v*, *p-T*, *T-s*, либо в аналити-ческой форме в виде зависимости $\varphi(p,v)=0$

Уравнение процесса может быть также задано исходным условием о неизменном значении в этом процессе какой - либо функции состояния

$$z = idem;\ z = p,v,t,u,h,s$$

или условием о равенстве нулю какого – либо эффекта термодинамического процесса $(\delta q = 0)$

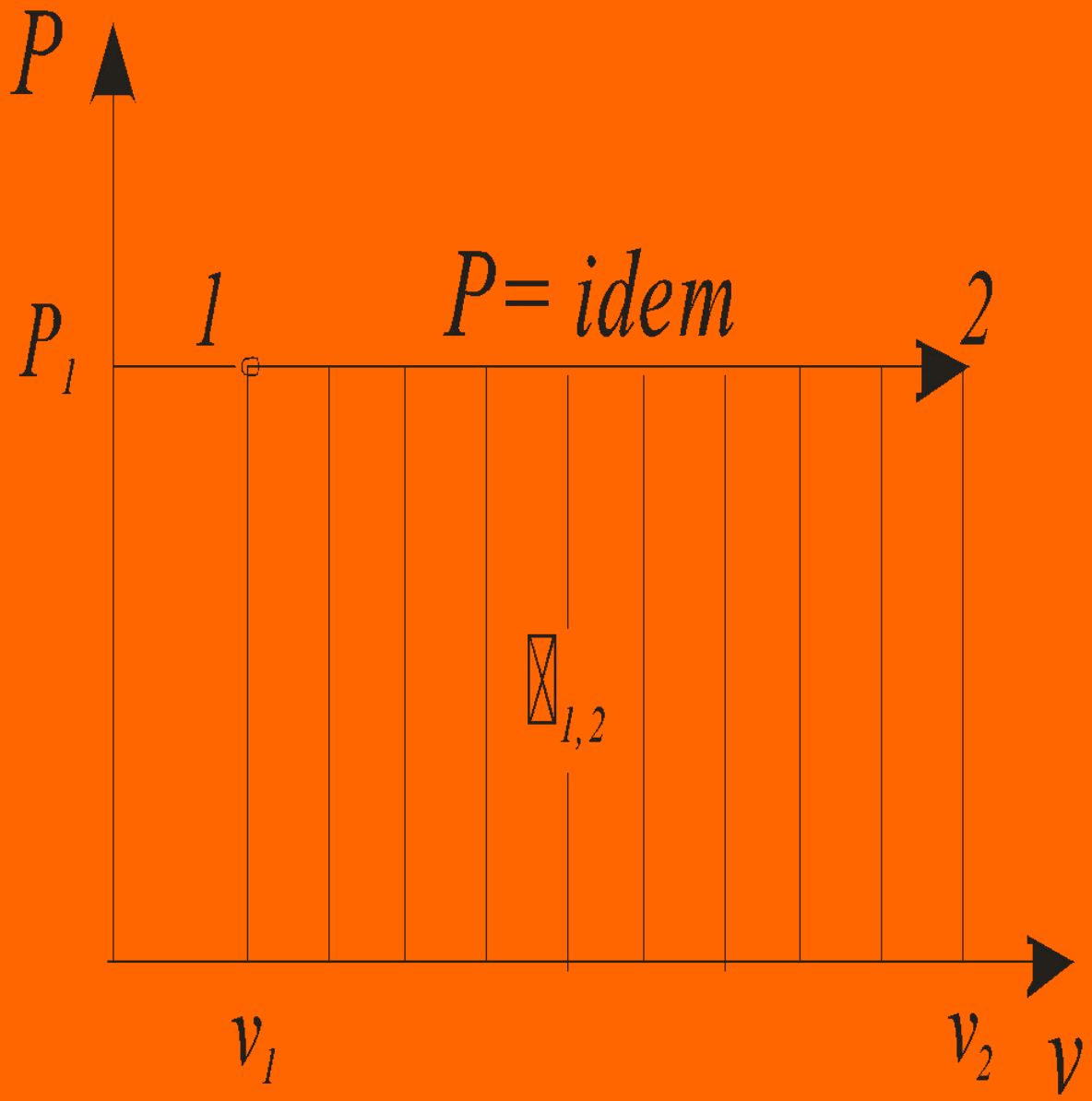
При изучении термодинамических процессов определяются:

1) **закономерность изменения параметров состояния рабочего тела, то есть выводится уравнение процесса или дается его графическое изображение в координатах *p-v*, *p-T*, *T-s* и т.д.;**
2) **параметры состояния системы в начальной и конечной точках процесса;**
3) **численные значения работы и теплообмена в процессе;**
4) **изменение значений внутренней энергии, энтальпии и энтропии рабочего тела.**

Простейшие термодинамические процессы

Простейшими термодинамическими процессами обычно считают *изобарный, изохорный и изопотенциальные процессы*.

Изобарный процесс $p = idem\ ;\ dp = 0$ **– процесс в котором давление в системе остается постоянным**



Изобарные процессы подвода или отвода теплоты происходят в поршневых двигателях внутреннего сгорания, газотурбинных, паросиловых, холодильных установках и др.

Для идеального газа в изобарном процессе (*1-2*) соотношение объемов прямо пропорционально соотношению температур

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

Удельная термодинамическая и потенциальная работы в изобарном процессе определяются из соотношений

$$w_{1,2} = -\int_1^2 v\,dp = 0; \quad l_{1,2} = \int_1^2 p\,dv = p \cdot \left(v_2 - v_1\right)$$

Для идеального газа

$$l_{1,2} = p \cdot (v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$$

Количество теплоты, подведенной к рабочему телу или отведенной от него в изобарном процессе, определяется из выражения первого начала термодинамики

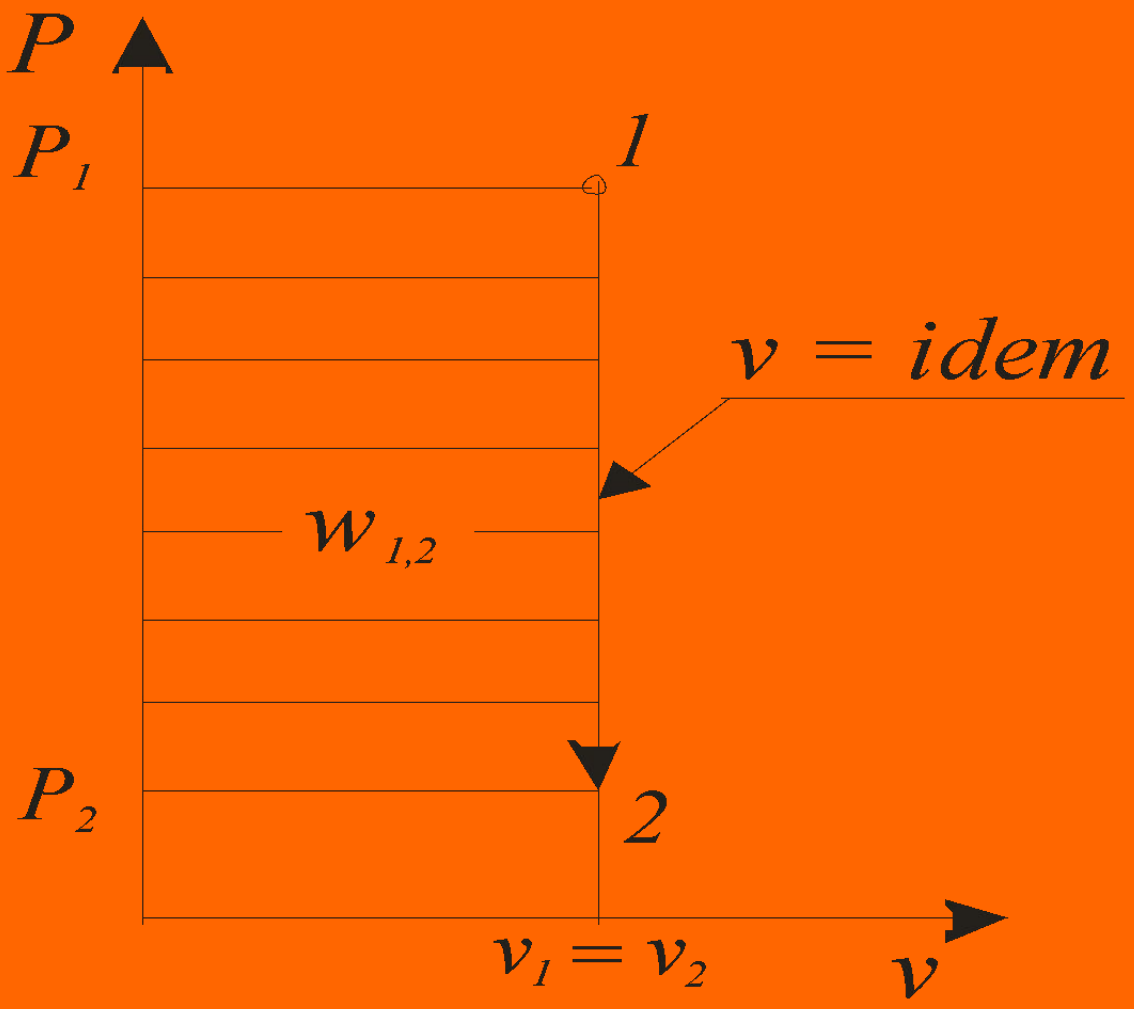
$$q_{1,2} = \Delta u + l_{1,2} = \Delta h$$

Для идеального газа

$$q_{1,2} = \Delta u + l_{1,2} = \Delta h =$$

$$= c_{vm}(T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) = c_{pm}(T_2 - T_1)$$

Изохорный процесс $v = idem;\ dv = 0$ **– процесс, при котором объем системы или удельный объем рабочего тела остается постоянным.**



В изохорных процессах происходит увеличение или уменьшение давления, что связано с соответствен – ным изменением температуры – подводом или отводом теплоты.

Изохорные процессы подвода или отвода теплоты происходят в поршневых двигателях внутреннего сго- рания, газотурбинных, паросиловых установках и др.

Для идеального газа в изохорном процессе соотношение давлений прямо пропорционально соотношению температур

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}$$

Удельная термодинамическая и потенциальная работы в изохорном процессе определяются из соотношений

$$l_{1,2} = \int_1^2 p\,dv = 0;\; w_{1,2} = -\int_1^2 vdp = v\cdot\left(p_1 - p_2\right)$$

Для идеального газа

$$w_{1,2} = v\left(p_1 - p_2\right) = R\left(T_1 - T_2\right)$$

Количество теплоты, подведенной к рабочему телу или отведенной от него в изохорном процессе, определяется из выражения первого начала термодинамики

$$q_{1,2} = \Delta h + w_{1,2} = \Delta u$$

Для идеального газа

$$q_{1,2} = \Delta h \ + w_{1,2} = \Delta u =$$

$$= c_{pm}\left(T_2 - T_1\right) + R\left(T_1 - T_2\right) = c_{vm}\left(T_2 - T_1\right)$$

Изопотенциальный процесс **– термодинамический процесс изменения состояния системы, при котором значение потенциальной функции сохраняет неизменное значение** $pv = idem;\ d(pv) = 0$

Для идеального газа, согласно уравнению Клапейрона $pv = RT$ ***изопотенциальный*** **процесс** $pv = idem$ **является и** ***изотермическим*** $T = idem$ **.**

$$\frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Удельная термодинамическая и потенциальная работы в изопотенциальном процессе определяются из следующих соотношений:

$$l_{1,2} = \int_1^2 p\,dv = \int_1^2 pv \cdot \frac{dv}{v} = pv \cdot ln\frac{v_2}{v_1}$$

$$w_{1,2} = -\int_1^2 v\,dp = -\int_1^2 vp \cdot \frac{dp}{p} = pv \cdot \int_2^1 \frac{dp}{p} = pv \cdot ln\frac{p_1}{p_2}$$

Нетрудно заметить, что постоянство $pv = idem$ **приводит к условию**

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

Поэтому, в изопотенциальном процессе численные значения термодинамической и потенциальной работ равны между собой.

$$l_{1,2} = w_{1,2} = pv \cdot ln\frac{v_2}{v_1} = pv \cdot ln\frac{p_1}{p_2}$$

Для идеального газа *pv=RT=idem* (изотермический)

$$l_{1,2} = w_{1,2} = RT \cdot ln\frac{v_2}{v_1} = RT \cdot ln\frac{p_1}{p_2}$$

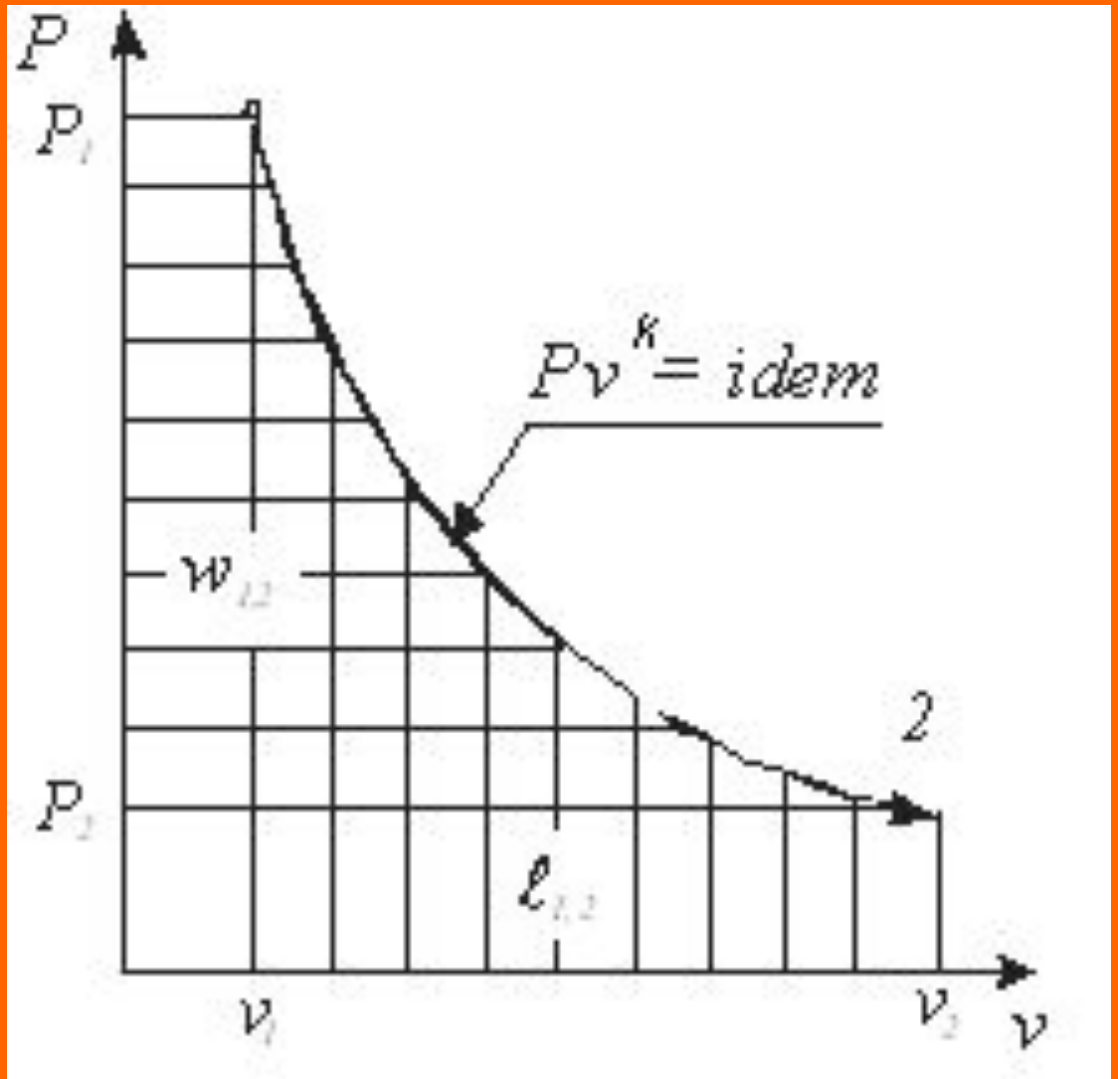
Количество теплоты, подведенной к рабочему телу или отведенной от него в изопотенциальном процессе определяется из выражения первого начала термодинамики по балансу рабочего тела

$$q_{1,2} = \Delta u + l_{1,2} = \Delta h + w_{1,2}$$

Для идеалного газа *du=0; dh=0*

$$q_{1,2} = RT \cdot ln\frac{v_2}{v_1} = RT \cdot ln\frac{p_1}{p_2}$$

Адиабатный процесс - термодинамический процесс изменения состояния системы, при котором отсутствует теплообмен $(\delta q = 0)$ и в силу обратимости процесса энтропия остается величиной постоянной $(s = idem)$



Из выражения первого начала термодинамики для простого тела при условии $(\delta q = 0)$ **имеем** $(s = idem)$

$$\delta q = \delta q^{*} + \delta q^{**} = du + pdv = dh - vdp = 0$$

Отсюда следует выражение для показателя адиабатного процесса

$$\frac{dh}{du} = -\frac{vdp}{pdv} = n_s = k$$

где n_s=k – показатель адиабаты.

Расчетное выражение для расчета показателя адиабатного процесса

$$n_s = k = -\frac{\frac{dp}{p}}{\frac{dv}{v}} = \frac{-d\ln p}{d\ln v} = \frac{-d\log p}{d\log v}.$$

После интегрирования при условия постоянства показателя процесса имеем

$$n_s = k = \frac{\Delta h}{\Delta u} = \frac{w_{1,2}}{l_{1,2}} = \frac{\log\frac{p_1}{p_2}}{\log\frac{v_2}{v_1}}$$

Для идеального газа показатель адиабаты равен

$$k = c_p / c_v$$

Из уравнения адиабатного процесса получим выражение для связи параметров состояния

$$k \log \frac{v_2}{v_1} = \log \frac{p_1}{p_2},$$

потенцируя имеем

$$\frac{p_2}{p_1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^k = \frac{v_2}{v_1}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} = 1$$

$$pv^k = idem; \qquad p^{\frac{1}{k}} v = idem;$$

Выражения конечных (интегральных) величин термодинамической и потенциальных работа в адиабатном процесс можно получить при сопоставлении их элементарных значений

$$\delta l = pdv, \ldots\ldots \delta w = -vdp$$

$$\delta l - \delta w = pdv + vdp = d(pv)$$

С учетом определения показателя адиабаты имеем:

$$\delta l - \delta w = (1-k)\delta l = d(pv)$$

$$\delta l = \frac{1}{1-k} d(pv)$$

Интегрируя последнее выражение с учетом того, что *k=idem*, получим интегрального уравнения термодинамической работы

$$l_{1,2} = \int_1^2 \frac{1}{1-k} d(pv) = \frac{1}{1-k}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = u_1 - u_2$$

Введем понятие характеристики процесса расширения или сжатия

$$\tau_{1,2} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1}$$

Окончательно имеем уравнения для определения термодинамической и потенциальной работы

$$l_{1,2} = \frac{p_1 v_1}{k-1}\left(1-\tau_{1,2}\right) = u_1 - u_2$$

$$w_{1,2} = k l_{1,2} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left(1-\tau_{1,2}\right) = h_1 - h_2$$

Различные уравнения для определения характеристики расширения или сжатия $\tau_{1,2}$ определяются с учетом уравнения адиабаты

$$\frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \tau_{1,2}$$

Применительно для идеального газа имеем:

$$l_{1,2} = \frac{RT_1}{k-1}\left(1-\tau_{1,2}\right) = c_{vm}\left(t_1 - t_2\right)$$

$$w_{1,2} = kl_{1,2} = \frac{k}{k-1}R_1T_1\left(1-\tau_{1,2}\right) = c_{pm}\left(t_1 - t_2\right)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2v_2}{p_1v_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \tau_{1,2}$$

Уравнения перечисленных простейших и любых других термодинамических процессов могут быть представлены одним уравнением. Это уравнение называется *уравнением политропы*, а термодинамические процессы, описываемые этим уравнением, называются *политропными*.

Политропные процессы

Политропным процессом с постоянным показателем **называется обратимый термодинамический процесс изменения состояния простого тела, подчиняющийся уравнению**

$$pv^n = idem = C; \quad p^{1/n} \cdot v = idem = C_1;$$

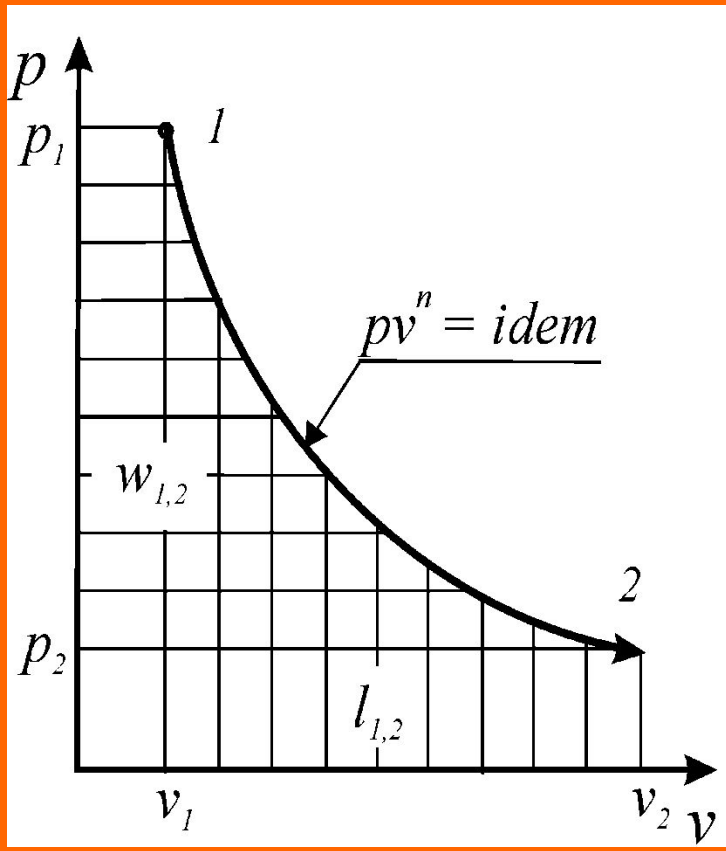
$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

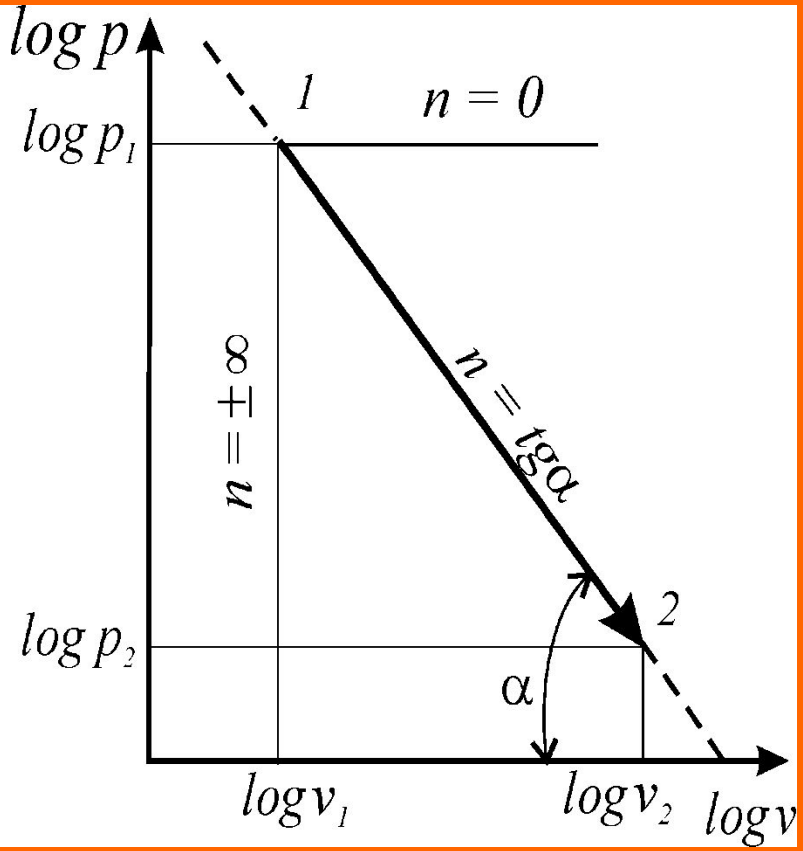
где *n* – показатель политропы, являющий в рассматриваемом процессе постоянной величиной, которая может иметь любые частные значения - положительные и отрицательные (-∞ ≤ *n* ≤ +∞).

Физический смысл *показателя политропы n* определяется после дифференцирования уравнения политропы $pv^n = idem = C;$

$$v^n \cdot dp + n \cdot v^{n-1} \cdot pdv = 0$$

$$n = -\frac{vdp}{pdv} = \frac{\delta w}{\delta l} = \frac{w_{1,2}}{l_{1,2}}$$


p
p1
1
pv^n = idem
w1,2
2
p2
l1,2
v1
v2
v


log p
1
n = 0
log p1
n = ±∞
n = tgα
2
log p2
α
log v1
log v2
log v

Это значит, что *постоянный показатель политропы* определяется соотношением потенциальной и термодинамической работ в элементарном или конечном процессах. Значения этих работ могут быть определены графически в координатах $p - v$

В логарифмических координатах политропный процесс (*политропа*) с постоянным показателем представляет собой прямую линию

$$log\ p + n \cdot log\ v = log\ C$$

При этом, постоянный показатель политропы определяется как тангенс угла наклона линии процесса к оси абсцисс (α **)**

$$n = \frac{\delta w}{\delta l} = -\frac{vdp}{pdv} = \frac{d\log p}{d\log v} = tg\alpha = \frac{\log(p_1 / p_2)}{\log(v_2 / v_1)}$$

Из соотношения показателя политропи следует, что для изобарного процесса $n_p = 0$, для изохорного процесса $n_v = \pm\infty$, для изопотенциальног процесса $n_{pv} = 1$ (для идеального газа $n_{pv} = n_t = n_u = n_h = 1$, это означает, что для идеального газа изоротенциальный, изотермический, изоэнергетический и изоэнтальпийный процессы совпа дают), для адиабатного процесс $n = k$.

Работа в политропных процессах

Выражения конечных (интегральных) величин термодинамической и потенциальных работ в политропных процессах

$$l_{1,2} = \frac{p_1 v_1}{n-1} \cdot \left(1 - \tau_{1,2}\right); \; w_{1,2} = n \cdot l_{1,2} = \frac{n}{n-1} \cdot p_1 v_1 \cdot \left(1 - \tau_{1,2}\right)$$

$$\tau_{1,2} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$$

для идеального газа *pv = RT* и

$$\tau_{1,2} = \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Теплообмен в политропном процессе для простых тел выводится также на основе рассмотрения выражения первого начала термодинамики

$$\delta q = du + \delta l.$$

Удельная внутренняя энергия для простых тел может быть представлена в виде функции *u =u (p, v)*.

Тогда дифференциал внутренней энергии запишется в следующем виде:

$$du = \left(\frac{\partial u}{dv}\right)_p dv + \left(\frac{\partial u}{dp}\right)_v dp$$

Последнее выражение можно представить в виде

$$du = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{\partial u}{dv}\right)_p \cdot pdv + \frac{1}{v} \cdot \left(\frac{\partial u}{dp}\right)_v \cdot vdp$$

Введем следующие обозначения:

$$a_v = \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{\partial u}{dv} \right)_p , \qquad a_p = \frac{1}{v} \cdot \left(\frac{\partial u}{dp} \right)_v$$

При этом выражение примет вид:

$$du = a_v \cdot \delta l - a_p \cdot \delta w =$$

$$= a_v \cdot \delta l - a_p \cdot n \cdot \delta l = (a_v - n \cdot a_p) \cdot \delta l$$

Подставив полученное уравнение в выражение первого начала термодинамики

$$\delta q = du + \delta l.$$ **получим**

$$\delta q = (a_v - n \cdot a_p + 1) \cdot \delta l.$$

Для определения величин (a_p и a_v) рассмотрим два термодинамических процесса:

Изоэнергетический процесс (*u = idem, du = 0 ,n = n_u*.)

Так как в изоэнергетическом процессе $\delta l \neq 0,$

$$a_v - n_u \cdot a_p = 0, \qquad a_v = n_u \cdot a_p$$

Адиабатный процесс (δ *q = 0*). Для этого процесса показатель политропы принимает значение *n = k* и элементарная термодинамическая работа также не равна нулю

$$a_v - k \cdot a_p + 1 = 0,\ n_u a_p - k a_p = -1 \quad отсюда$$

$$a_p = \frac{1}{k - n_u}, \qquad a_v = \frac{n_u}{k - n_u}$$

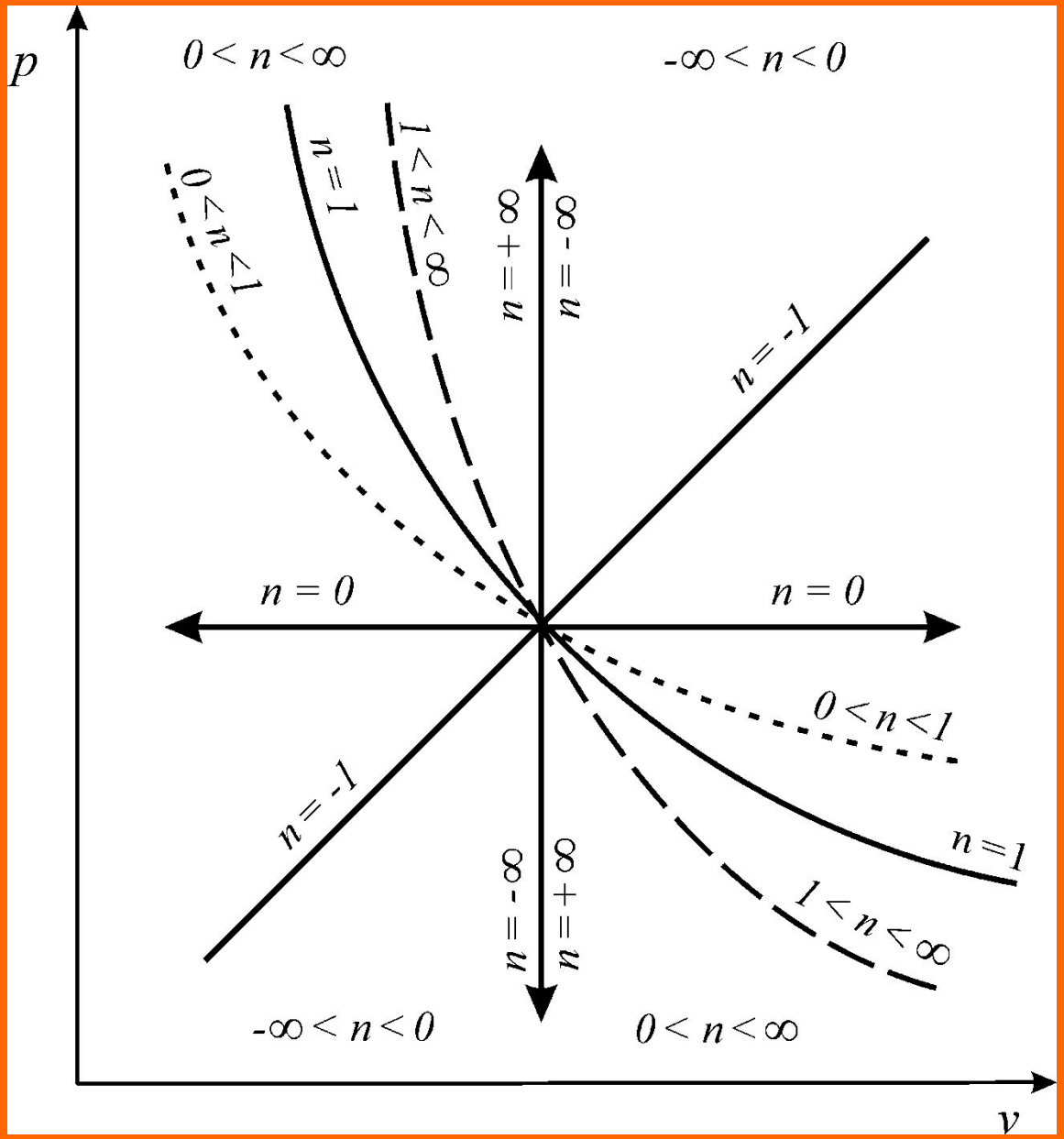
С учетом полученных соотношений для определения *av* и *ap*, находим выражения для расчета удельных значений изменения внутренней энергии и теплообмена в элементарном процессе:

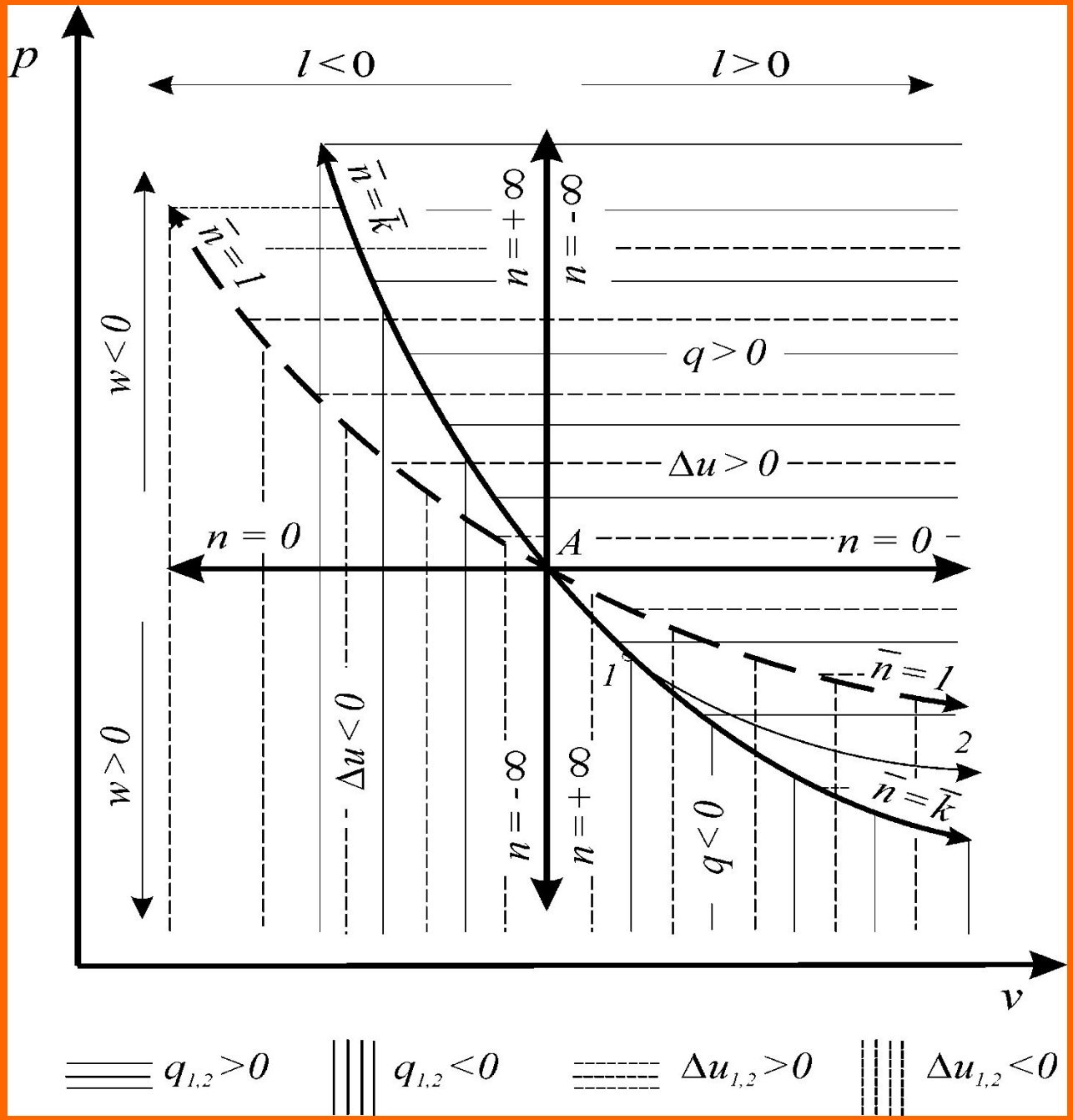
$$du = \frac{n_u - n}{k - n_u} \cdot \delta l \,, \qquad \delta q = \frac{k - n}{k - n_u} \cdot \delta l$$

Соотношения для расчета удельных значений изменения внутренней энергии и теплообмена в конечном процессе имеют следующий вид:

$$\Delta u_{1,2} = \frac{n_u - n}{k - n_u} \cdot l_{1,2} \quad ; \qquad q_{1,2} = \frac{k - n}{k - n_u} \cdot l_{1,2}$$

Для идеального газа $n_u = 1$


p
v
0 < n < ∞
-∞ < n < 0
-∞ < n < 0
0 < n < ∞
n = 0
n = 0
n = +∞
n = -∞
n = -∞
n = +∞
n = 1
n = -1
n = -1
n = 1
1 < n < ∞
0 < n < 1
0 < n < 1
1 < n < ∞


p
l<0
l>0
n=k
n=1
n=+∞
n=-∞
w<0
q>0
Δu>0
n = 0
A
n = 0
w>0
Δu<0
n=-∞
n=+∞
q<0
1
n=1
2
n=k
v
q1,2>0
q1,2<0
Δu1,2>0
Δu1,2<0