ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

Уравнение первого закона термодинамики для потока

Имеется большая группа машин, в которых работа производиться за счет внешней кинетической энергии рабочего тела: паровые турбины, газовые турбины и т.д.

При перемещении газа с конечной скоростью по каналу теплота расходуется ни только на изменение внутренней энергии и совершение внешнего работы, но и на приращение внутренней кинетической энергии газа.

Таким образом, уравнение первого закона термодинамики для потока в диф. форме : , где

$$dq = dU + dl' + \frac{d\omega^2}{2}$$

dq - подведенное удельное количество теплоты от внешнего источника теплоты.

du - изменение удельной внутренней энергии газа.

dl'- работа против внешних сил, называемая работай проталкивания.

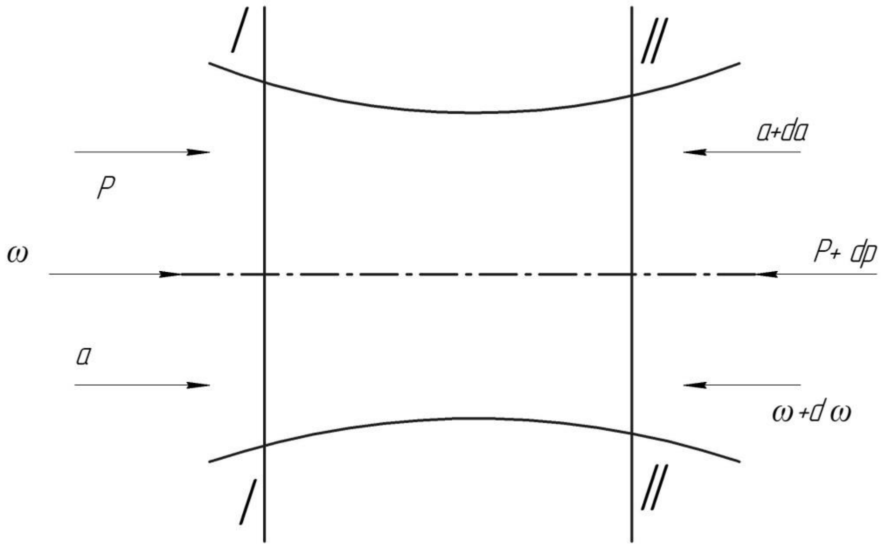
$d\omega^2/2$ - изменение внешней кинетической энергии рабочего тела (располагаемая работа)

Уравнение первого закона термодинамики для потока

Изменение кинетической энергии газа (рабочего тела) происходит как в трубах простого сечения, так и в каналах со специальным сечением - в соплах и диффузорах.

<u>Сопло</u> - канал, в котором при перемещении газа происходит его расширение с понижением давления и увеличением скорости.

<u>Диффузор</u> - канал, в котором происходит сжатие рабочего тела с увеличением давления и снижением скорости.



mv=aω=const, где

m – масса рабочего тела;

v - удельный объём;

ω - скорость рабочего тела;

a - площадь поперечного сечения.

Работа по перемещению объема между сечениями I-I и II-II с элементарной массой $dl'=(p+dp)(a+da)(\omega+d\omega)-pa\omega$

Уравнение первого закона термодинамики для потока

Работа проталкивания газа $dl'=(p+dp)(a+da)(\omega+d\omega)-pa\omega$, или

$dl'=pd(a\omega)+a\omega dp$, т.к. mv=aω , то $dl'=mpdv+mvdp=m(pdv+vdp)$

Таким образом, элементарная работа $dl'=d(pv)$, а уравнение первого закона термодинамики –

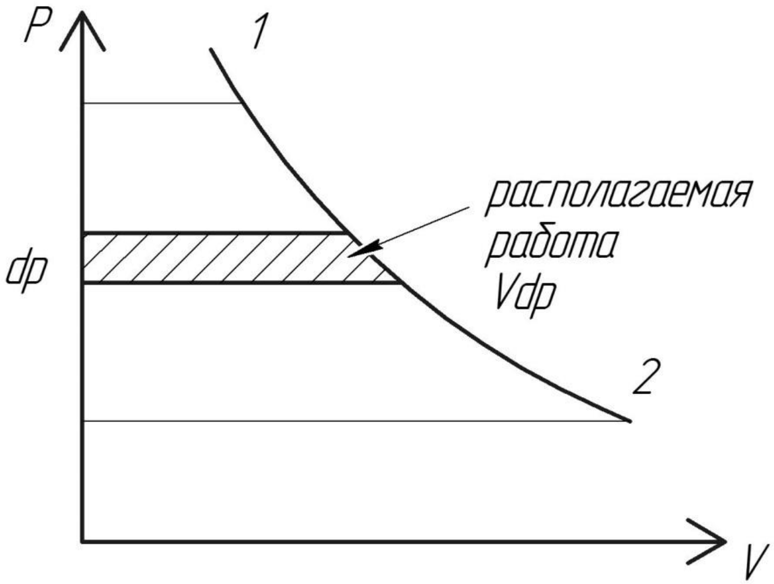
$dq=du+d(pv)+d\omega^2/2=d(u+pdv)+d\omega^2/2=di+d\omega^2/2$

Т.е. подведенное количество теплоты расходуется на изменение внутренней энергии рабочего тела, выполнения работы проталкивания и изменение внешней кинетической энергии рабочего тела.

При совершении технической работы $l_{тех}$ и изменении потенциальной энергии $di+d\omega^2/2=dq-l_{тех}-gdh$

При отсутствии теплообмена (адиабатное течение), $h1=h2$ *и* $l_{тех}=0$, то $di+d\omega^2/2=0$ *или* $i_1-i_2=(\omega_2^2-\omega_1^2)/2$

Располагаемая работа при истечении газов



Элементарная располагаемая работа равна $d\omega^2/2$ – бесконечно малому приращению кинетической энергии.

$d\omega^2/2 = -vdp$ *или* $\omega d\omega = -vdp$

=> если $dp>0$, то газ сжимается и $d\omega<0$

При $dp< 0$, то газ расширяется и $d\omega> 0$

На рисунке, вся располагаемая работа в обратимом процессе 1-2 равна:

$$l_{расп} = \int_{p_1}^{p_2} -Vdp = \int_{p_2}^{p_1} Vdp$$

Для политропного процесса:

$$\boldsymbol{l}_{\text{расп}} = \int_{p_2}^{p_1} \boldsymbol{v}\boldsymbol{dp} = \int_{p_2}^{p_1} \boldsymbol{v}_1 \left({}^{p_1}/_{p_2}\right)^{1/n} \boldsymbol{dp} = \left[{}^{n}/_{(n-1)}\right](\boldsymbol{p}_1\boldsymbol{v}_1 - \boldsymbol{p}_2\boldsymbol{v}_2)$$

Для адиабатного процесса:

$$\boldsymbol{l}_{\text{расп}} = \int_{p_2}^{p_1} \boldsymbol{v}_1 \left({}^{p_1}/_{p_2}\right)^{1/k} \boldsymbol{dp} = \left[{}^{k}/_{(k-1)}\right](\boldsymbol{p}_1\boldsymbol{v}_1 - \boldsymbol{p}_2\boldsymbol{v}_2)$$

Адиабатный процесс истечения газов

Для адиабатного процесса $dl_{расп} = d\omega^2/2$ или $l_{расп} = (\omega_2{}^2 - \omega_1{}^2)/2$

Откуда $\omega_2 = \sqrt{2l_{расп} + \omega_1{}^2}$, т.к. ω_1 – начальная скорость как правило $\omega_1=0$, то $\omega = \sqrt{2l_{расп}}$;

Для адиабатного истечения газа из суживающегося сопла скорость равна: $\omega = \sqrt{2l_{расп}} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\cdot\left(p_1\cdot V_1 - p_2\cdot V_2\right)}$; или

$$\omega = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\cdot p_1\cdot V_1\cdot\left(1-\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}};$$

Массовый расход газа: $m=a\omega/v_2$, где

a – площадь выходного сечения канала

ω – скорость истечения

v_2 – удельный объем газа в выходное сечение клапана. $v_2 = v_1(p_1/p_2)^{1/k}$

Тогда массовый секундный расход газа:

$$m = \frac{a}{v_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/k}}\sqrt{\frac{2k}{k-1}p_1 v_1\left(1-\frac{p_2}{p_1}\right)^{k-1/k}}$$

или

$$m = a\sqrt{\frac{2k}{k-1}\cdot p_1 V_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \frac{p_2}{p_1}^{\frac{k-1}{k}}\right]};$$

т.е массовый расход идеального газа зависит от площади выходного сечения канала, начального состояния газа и степени его расширения.

Критическое давление при истечении газа из сопла

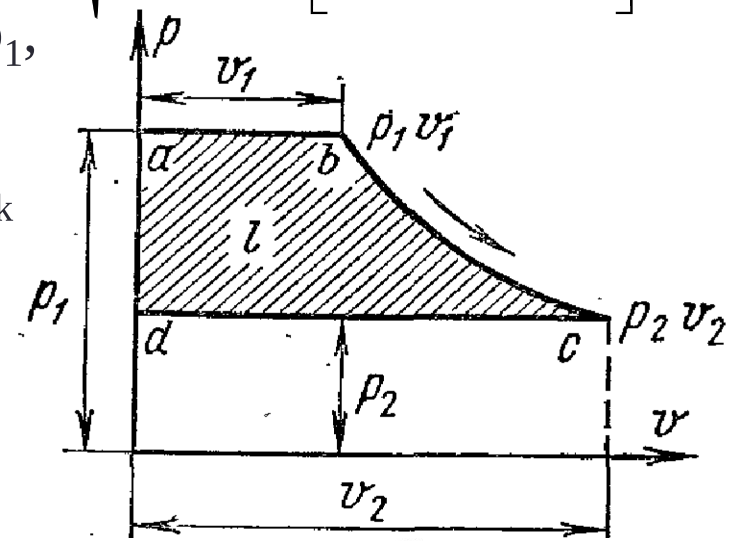
Массовый секундный расход газа:

$$m = a\sqrt{\frac{2k}{k-1}\cdot p_1V_1\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \frac{p_2}{p_1}^{\frac{k-1}{k}}\right]};$$

Массовый расход зависит от отношения p_2/p_1, если $p_2=p_1$, то $m=0$!

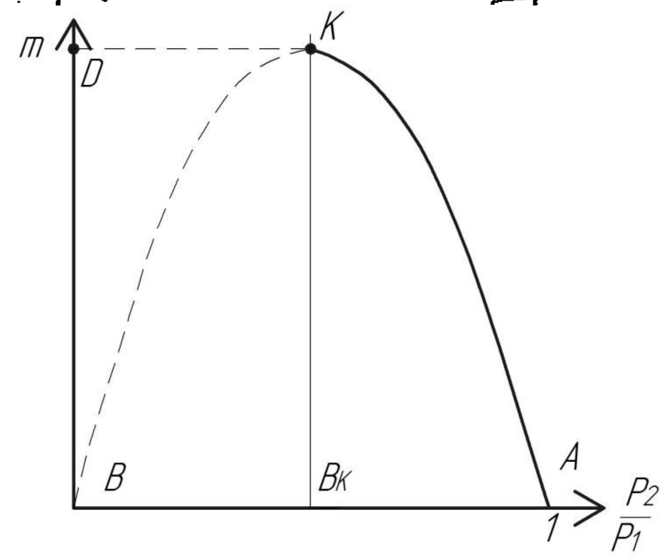
Теоретически: при $p_2\downarrow$, то $m\uparrow$, и при $p_2/p_1=\beta_k$ расход $m=m_{max}$ и при дальнейшим $p_2\downarrow$ и $m\downarrow$ при $p_2=0$ снова $m=0$.

Практически: при $p_2/p_1<\beta_k$ – кривая KD.



т.к. в уравнении $(p_2/p_1)^{2/k}$- $(p_2/p_1)^{k-1/k}$ – переменная величина, то

$$\frac{\partial}{\partial\beta}\left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right) = \frac{2}{k}\beta^{\frac{2}{k-1}} - \frac{k-1}{k}\cdot\beta^{\frac{k+1}{k-1}} = 0$$ откуда $$\beta_k = \frac{p_k}{p_1} = \left[\frac{2}{k+1}\right]^{\frac{k}{k-1}}$$



т.е β_k зависит только от показателя адиабаты k т.е зависит от природы рабочего тела.

$p_k= \beta_k p_1$ – критическое давление в выходном сечении сопла при достижении расхода m_{max}.

Критическая скорость истечения газа из сопла

Т.к. $$\omega = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \cdot \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}};$$,а $p_2/p_1=\beta_k=[2/(k+1)]^{k/(k-1)}$, то

$$\omega_k = \sqrt{2[k/(k-1)]p_1v_1[1-2/(k+1)]} = \sqrt{2[k/(k+1)]p_1v_1} = \sqrt{2[k/(k+1)]RT_1}$$

т.е критическая скорость газа в канале при зависит только от начальных параметров газа, и его природы.

Также $$\omega_k = \sqrt{kp_kv_k}$$

Из формулы Лапласа скорость звука в упругой среде

$$c = \sqrt{kp/\rho} = \sqrt{kpv}$$

где р- давление среды, Па; ρ – плотность среды, кг/м^3

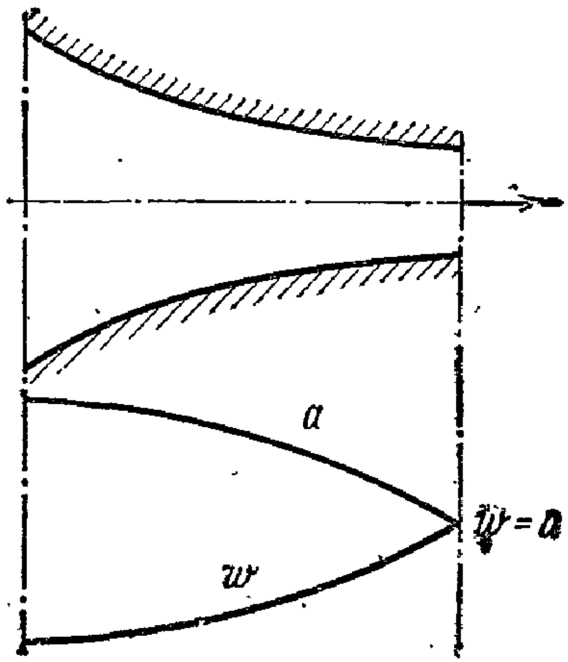
Для идеального газа: $$c = \sqrt{kRT}$$

Т.е скорость распространения упругих деформаций, т.е скорость звука зависит от состояния и природы газа и является прямой функцией температуры.

Критическая скорость истечения газа из сопла

Можно записать: $c = \sqrt{kp/\rho} = \sqrt{kpv}$ - скорость звука при критическом истечении в вых. сечении суживающегося канала ω_k=с;

Т.е каждому сечению канала должна соответствовать своя местная скорость звука, зависящая от параметров газа. Т.к , то в суживающемся канале истечения газа, не может расширяться до давления < p_k, а скорость всегда $\leq \omega_k$.



Поэтому, если скорость $\omega \leq \omega_k$, то уменьшение внешнего давления передается по потоку и в результате давление перераспределяется в канале и на выходе устанавливается давление равное давлению среды.

Если $\omega = \omega_k$, то и скорость распространения давления будет равной ω_k. Давление будет постоянным и неизменным независимо от величины внешнего давления.

Следовательно, скорость истечения не может быть больше скорости звука в газе (см. рисунок).

Условия течения газа по каналам переменного сечения

Для идеального газа в условиях неразрывности струи:

$f\omega = mv$, или $fd\omega + \omega df = mdv$.

Разделив уравнения одно на другое получим: $df/f = dv/v + d\omega/\omega$

После преобразования: $df/f = dp(a^2 - \omega^2)\omega^2 kp$, где a – местная скорость звука

Тогда **для сопла** (dp<0):

если $(a^2-\omega^2)<0$, то ω>a, значит df>0 (диффузор)

если $(a^2-\omega^2)>0$, то ω<a, значит df<0 (сопло)

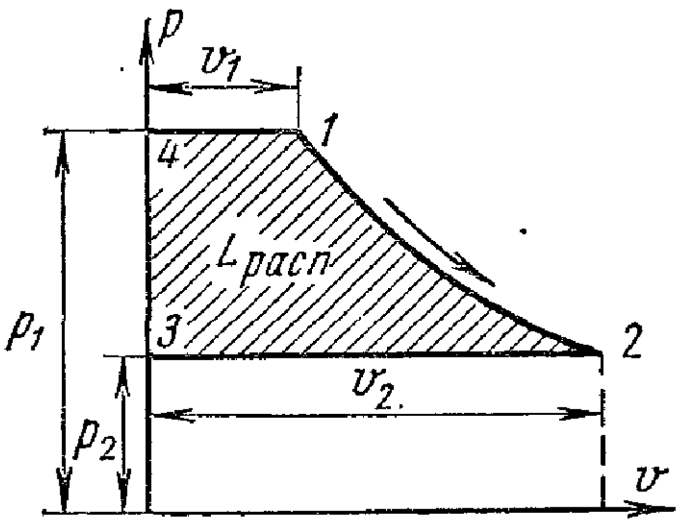
Тогда **для диффузора** (dp>0):

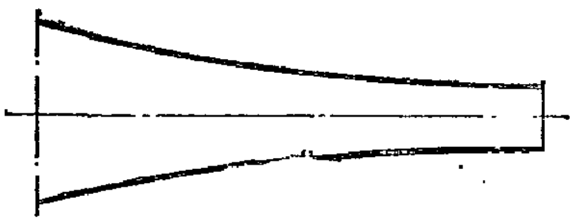
если $(a^2-\omega^2)<0$, то ω>a, значит df<0 (сопло)

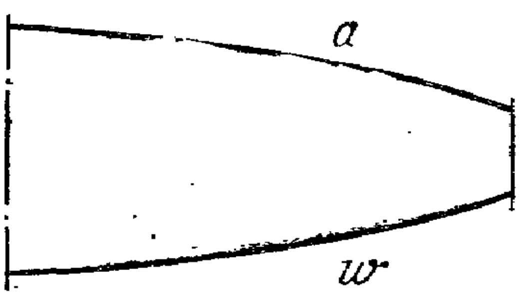
если $(a^2-\omega^2)>0$, то ω<a, значитdf>0 (диффузор)

Таким образом, в зависимости от скорости газа при входе, один и тот же канал может быть соплом и диффузором.

Истечение идеального газа из сопла







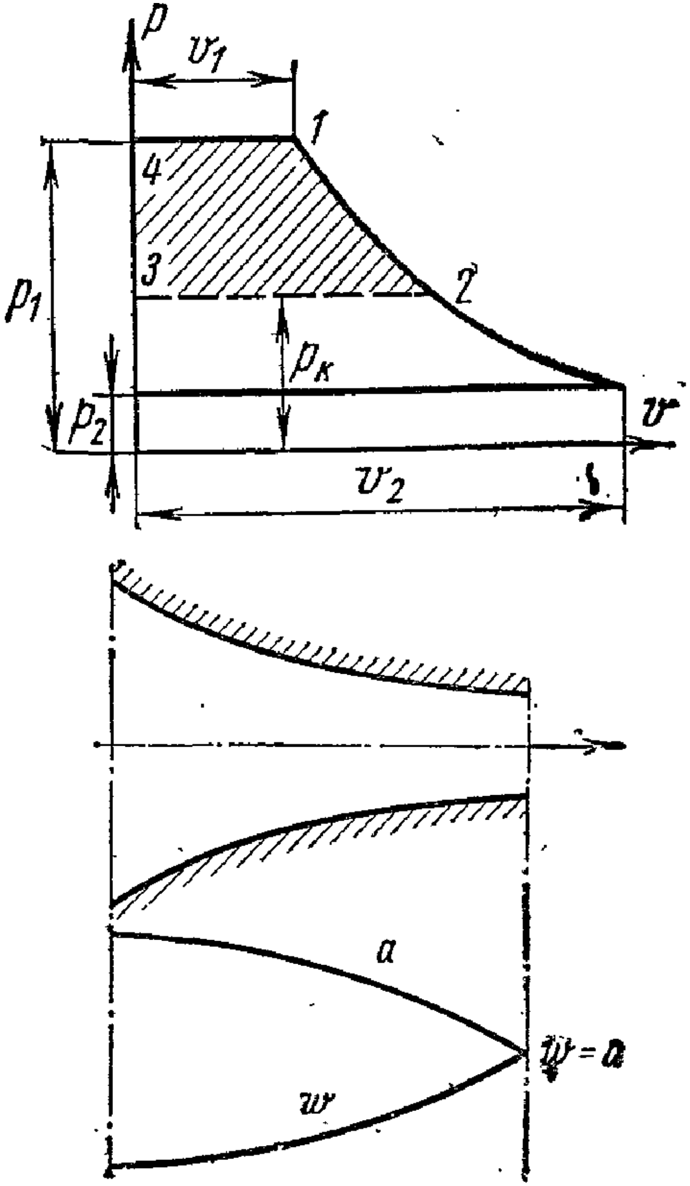
Случай первый: $\beta_k < p_2/p_1 < 1$ т.е. давление внешней p_1 среды больше $p_к$.

Происходит полное расширение газа от p_1 до p_2.

Скорость в выходном сечении сопла меньше местной скорости звука $\omega < a$.

Давление газа на выходе p_2 равно давлению внешней среды.

Истечение идеального газа из сопла



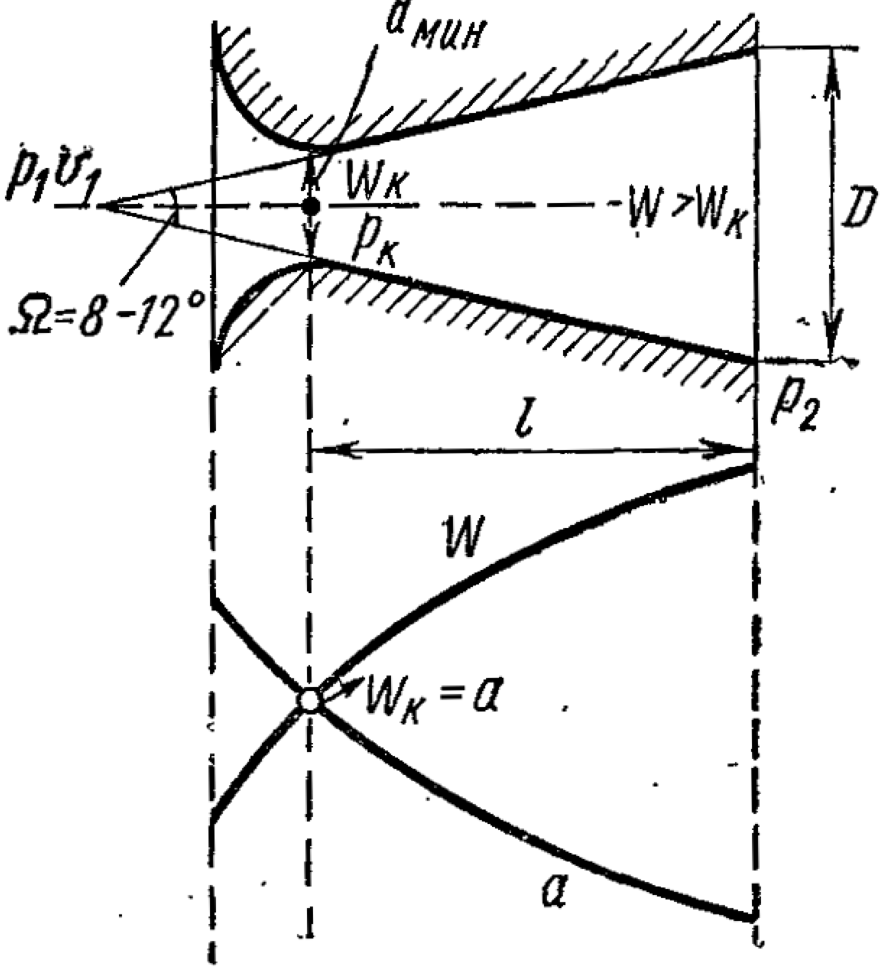
Случай второй: $\beta_k > p_2/p_1 > 0$ т.е. давление внешней среды p_1 меньше $p_к$.

Происходит неполное расширение газа а лишь его часть от p_1 до $p_к$.

Скорость в выходном сечении сопла равна местной скорости звука ω=a.

Давление газа на выходе p_2 равно критическому давлению. $p_к = \beta_k p_1$

Истечение газа из комбинированного сопла Лаваля



При истечении газа из комбинированного сопла в окружающую среду с давлением меше критического в самом узком сечении сопла устанавливается критическое давление $p_к$ и критическая скорость $\omega_к$.

В расширяющейся насадке сопла происходит дальнейшее увеличение скорости газа и падение давления до давления внешней среды.

Истечение газов с учетом сил трения

С учетом сил трения скорость газа в канале при любом Δp будет меньше обратимого процесса (теоретической скорости).

$\varphi_{ск}=\omega_д/\omega$ – коэффициент скорости. Или $\omega_д = \omega\,\varphi_{ск}$.

По опытным данным $\varphi_{ск}$=0,96…0,98

При наличии сил трения адиабатный процесс истечения из каналов – необратимый процесс.

Потеря кинетической энергии равна:

$(\omega^2 - \omega_д^{\ 2})/2 = (\omega^2 - \varphi_{ск}\ \omega^2)/2 = (1 - \varphi_{ск}^{\ 2})(\omega^2/2) = \psi(\omega^2/2)$, где

$\psi = (1 - \varphi_{ск}^{\ 2})$ – коэффициент потери энергии

КПД канала $\eta к = (\omega_д^{\ 2}/2) : (\omega^2/2) = (\omega_д^{\ 2}/\omega^2) = \varphi_{ск}^{\ 2}\omega^2/\omega^2 = \varphi_{ск}^{\ 2}$

Теплота трения без учета начальной скорости:

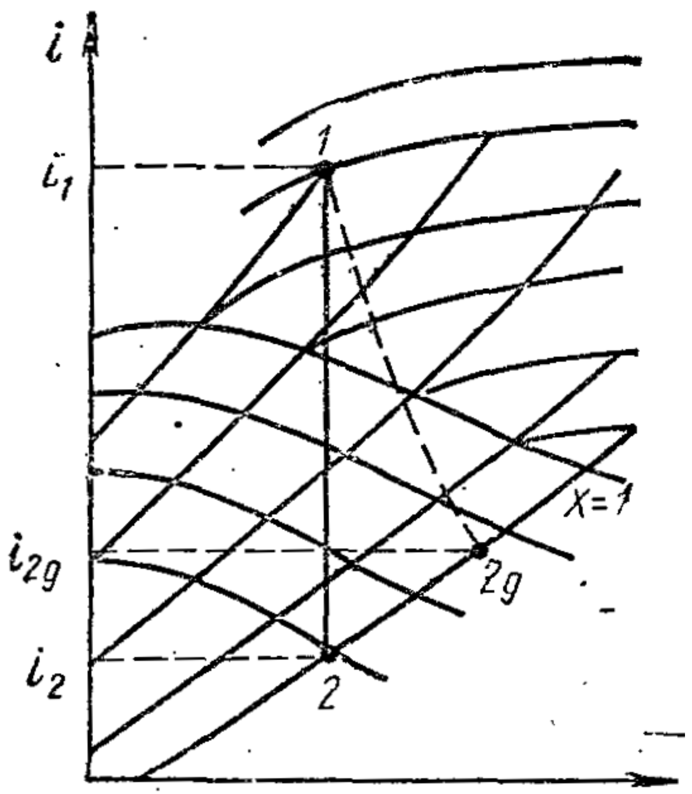
$q_{тр}=\psi(\omega^2/2)^2=\psi(i_1-i_2)$ где i_1 и i_2 – энтальпия рабочего тела в начале и конце обратимого адиабатного процесса расширения

Истечение водяного пара

Расчет скорости ведется по формуле для реальных газов если скорость истечения меньше критической: $\omega = 44{,}72\sqrt{i_1 - i_2}$

i_1 и i_2 определяют по таблицам или *is* - диаграмме

При критическом режиме истечения : $\omega = 44{,}72\sqrt{i_1 - i_k}$



На рисунке показан обратимый процесс 1-2 и 1-2g – необратимый процесс.

Видно, что энтальпия в конце расширения в необратимом процессе будет больше, чем в обратимом за счет теплоты трения.