ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ, ПАРОВ И ГАЗОВ

1. **Общие понятия.**
2. **Истечение через суживающееся сопло.**
3. **Критическая скорость потока и максимальный массовый расход рабочего тела.**
4. **Истечение через сопло Лаваля.**
5. **Дросселирование.**

Параметры газа в потоке

Состояние газа в каждой точке потока характеризуется термодинамическими параметрами: p, T, v (или $\rho = 1/v$), w.

Если на пути движущегося газа поставить перегородку, то в результате адиабатного торможения потока до нулевой скорости кинетическая энергия единичной массы $w^2/2$ преобразуется в тепловую с увеличением температуры и энтальпии газа, возрастают также его давление и плотность.

Параметры заторможенного потока называются ***параметрами торможения*** и обозначаются p^*, T^*, ρ^*.

$$h = c_p T \qquad\qquad h^* = c_p T^*$$

Энтальпия торможения h^* по сравнению с ***энтальпией*** h ***в потоке газа*** возрастает на величину кинетической энергии, преобразуемой в теплоту:

$$h^* = h + \frac{w^2}{2} \tag{1}$$

$$c_p T^* = c_p T + \frac{w^2}{2} \tag{2}$$

$$T^* = T + \frac{w^2}{2c_p} \tag{2a}$$

Давление, плотность и удельный объём можно определить по формулам соотношения параметров в адиабатном процессе

$$p^* = p\left(\frac{T^*}{T}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad \rho^* = \rho\left(\frac{T^*}{T}\right)^{\frac{1}{k-1}} \qquad v^* = v\left(\frac{T^*}{T}\right)^{\frac{1}{1-k}} \tag{3}$$

С увеличением скорости движения газа его параметры в потоке (***статические параметры***) изменяются − p, T, ρ ***уменьшаются***, а v ***растёт***.

Параметры же торможения в любом сечении потока остаются неизменными.

$$T_1^* = T_2^* = T^* = \mathrm{idem} \quad p_1^* = p_2^* = p^* = \mathrm{idem} \quad \rho_1^* = \rho_2^* = \rho^* = \mathrm{idem} \tag{4}$$

Неизменной остаётся и энтальпия торможения

$$h_1^* = h_2^* = h^* = \mathrm{idem} \tag{5}$$

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} = h_2 + \frac{w_2^2}{2} = h + \frac{w^2}{2} \tag{6}$$

Уравнения, связывающие между собой параметры газового потока в различных сечениях канала, будем рассматривать применительно к одномерному стационарному течению газа.

Уравнение неразрывности

$$G = w\rho F = const \quad \text{или} \quad G = wF/v = const \tag{7}$$

Уравнение первого закона термодинамики для потока

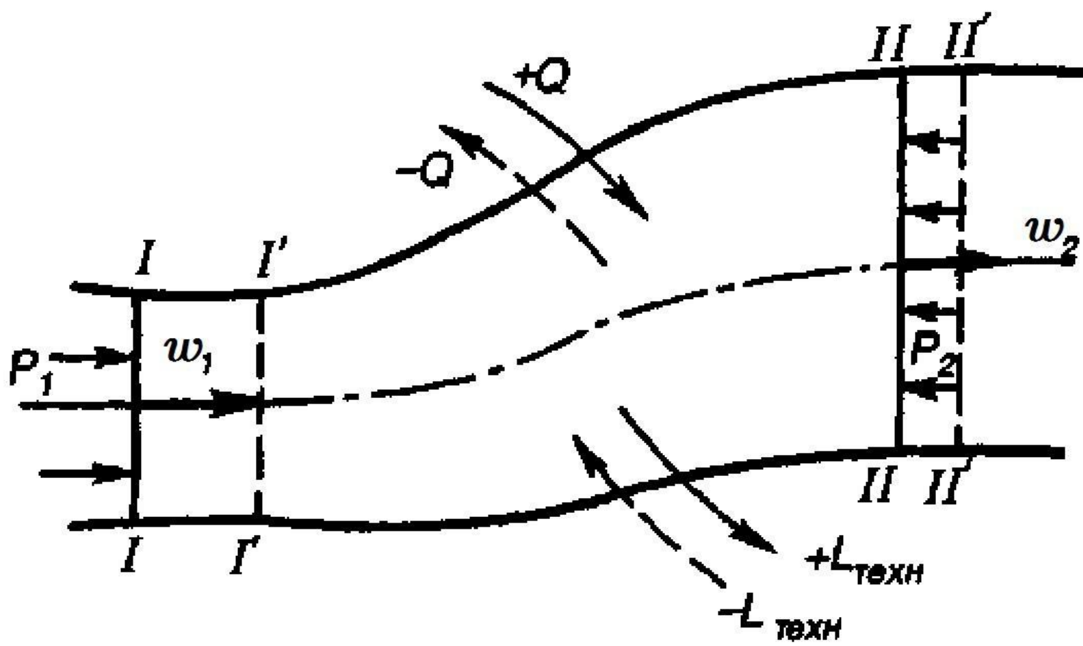
Термодинамическая система газового потока относится к открытой проточной системе, для которой характерен обмен с окружающей средой не только тепловой и механической энергиями, но и массой. Это обуславливает особенности энергетического баланса системы, определяемого **первым законом термодинамики**.

Рассмотрим естественный процесс течения газа из области высокого в область низкого давления.

В канале с газовым потоком, как показано на рисунке, выделим некоторое количество газа, объём которого ограничим сечениями I и II.

В сечении I по направлению потока действует сила p_1F_1, которая за промежуток времени $\Delta\tau$ совершает работу

$$p_1F_1w_1\Delta\tau = p_1\Delta V_1 = p_1v_1\Delta m$$



В сечении II сила p_2F_2 направлена против потока и препятствует перемещению газа. Работа этой силы равна

$$-p_2F_2w_2\Delta\tau = -p_2\Delta V_2 = -p_2v_2\Delta m$$

Алгебраическая сумма работ сил давления, действующих в сечениях I и II, затрачивается на перемещение газа и называется ***работой проталкивания***

$$\Delta L_{\text{прот}} = (p_1v_1 - p_2v_2)\Delta m$$

$(u_2 - u_1)\Delta m$ – изменение внутренней энергии газа

$\dfrac{(w_2^2 - w_1^2)\Delta m}{2}$ – изменение кинетической энергии газа

Кроме того, за рассматриваемый промежуток времени $\Delta\tau$ к газу может подводиться или от него отводиться теплота в количестве Q, а сам газ может совершать техническую работу $L_{\text{техн}}$, вращая, например, колесо турбины.

Вся подведённая к газу энергия, состоящая из суммы подведённой теплоты Q и работы проталкивания $L_{\text{прот}}$, должна быть равна изменению внутренней и кинетической энергии газа, а также технической работе совершаемой им,

$$Q + (p_1v_1 - p_2v_2)\Delta m = (u_2 - u_1)\Delta m + \frac{(w_2^2 - w_1^2)\Delta m}{2} + L_{\text{техн}}$$

$$q = u_2 - u_1 + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + (w_2^2 - w_1^2)/2 + l_{\text{техн}}$$

$$u + pv = h$$

$$q = h_2 - h_1 + (w_2^2 - w_1^2)/2 + l_{\text{техн}} \tag{8}$$

В дифференциальной форме уравнение имеет в виде:

$$dq = dh + wdw + dl_{\text{техн}} \tag{8а}$$

Первый закон термодинамики для потока: ***теплота, подведенная к потоку газа, равна алгебраической сумме изменения энтальпии газа, совершаемой им технической работы и изменения кинетической энергии потока.***

Для повышения давления газа и его перемещения из области низкого в область высокого давления необходима затрата механической энергии (компрессоры).

В тех случаях, когда техническая работа совершается внешним источником энергии, в уравнениях (8) и (8а) она должна учитываться со знаком минус.

Полученные уравнения (8) и (8а) справедливы как для обратимых, так и для необратимых (протекающих при наличии трения) процессах.

В необратимых процессах дополнительно затрачивается работа $l_{\text{тр}}$ на преодоление силы трения, которая полностью переходит в теплоту $q_{\text{тр}}$.

Так как работа $l_{\text{тр}}$ и $q_{\text{тр}}$ равны по величине, но имеют разные знаки, то они взаимно уничтожаются и из уравнений (8) и (8а) исключаются.

Из сопоставления уравнений (8а) и $dq = dh - vdp$ следует другая форма уравнения энергии:

$$-vdp = wdw + dl_{\text{техн}} \tag{9}$$

$$-dp/\rho = wdw + dl_{\text{техн}} \tag{9а}$$

После интегрирования получаем

$$-\int_{p_1}^{p_2} vdp = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + l_{\text{техн}} \tag{10}$$

$$-\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + l_{\text{техн}} \tag{10а}$$

$$-\int_{p_1}^{p_2} vdp = \int_{p_2}^{p_1} vdp = l_0$$ − ***располагаемая работа***

Располагаемая работа при прохождении газа через турбину реализуется в техническую работу, а при отсутствии турбины расходуется на изменение кинетической энергии газового потока.

В каналах, когда течение газа осуществляется под действием разности давлений без подвода и отвода теплоты и без совершения технической работы, уравнения (9) и (9а) принимают вид

$$-vdp = wdw \tag{11}$$

$$-dp/\rho = wdw \tag{11a}$$

Из уравнений следует, что по мере уменьшения давления в канале ($dp < 0$) скорость газа возрастает ($dw > 0$), т.е. ***потенциальная энергия*** преобразуется в ***кинетическую***.

Движение газа возможно и при возрастающем давлении, если на входе в канал газ будет иметь запас кинетической энергии. В этом случае кинетическая энергия газа может быть преобразована в потенциальную, с уменьшением скорости движения ($dw < 0$) давление газа будет возрастать ($dp > 0$).

В соответствии с уравнением (8а) при $dq = 0$ и $dl_{техн} = 0$

$$dh + wdw = 0 \qquad dh = -wdw \tag{12}$$

$$h_1 - h_2 = \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2} \tag{13}$$

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} = h_2 + \frac{w_2^2}{2}$$

В ***турбине*** в соответствии с уравнением (8) при условии адиабатного течения газа ($dq = 0$) работа $l_т$ совершается за счёт уменьшения энтальпии газа и его кинетической энергии

$$l_{т} = l_{техн} = h_1 - h_2 + \frac{w_1^2}{2} - \frac{w_2^2}{2}$$

$$l_{т} = h_1^* - h_2^* \qquad (14)$$

$h_1^* - h_2^*$ – ***располагаемый теплоперепад***

Сопоставляя уравнения (10) при $w_2 = w_1$ и (14), замечаем, что располагаемая работа равна располагаемому теплоперепаду

$$-\int_{p_1}^{p_2} vdp = h_1^* - h_2^* \qquad (15)$$

В ***компрессоре*** при адиабатном сжатии газа ($dq = 0$) работа, затрачиваемая на привод рабочего колеса, расходуется на увеличение полной энтальпии газа

$$l_{к} = h_2^* - h_1^* \qquad (16)$$

В ***проточной камере сгорания*** в потоке газа происходит сгорание непрерывно подаваемого топлива, при этом технической работы газ не совершает ($l_{\text{техн}} = 0$).

В ***теплообменнике*** течение подогретого газа также осуществляется с подводом теплоты.

В этих процессах подведённая теплота затрачивается на увеличение полной энтальпии

$$q_{\text{кс}} = h_2^* - h_1^* \qquad q_{\text{то}} = h_2^* - h_1^* \tag{17}$$

Теплота, отводимая от горячего газа в теплообменнике, равна разности полных энтальпий на входе в канал и на выходе из него ($h_2^* < h_1^*$), при этом изменение полный энтальпий подогреваемого и горячего (охлаждаемого) газов одинаково.

СОПЛА И ДИФФУЗОРЫ

Канал, в котором с уменьшением давления скорость газового потока возрастает, называется ***соплом***; канал, в котором скорость газа уменьшается, а давление возрастает, называется ***диффузором***.

СКОРОСТЬ И МАССОВЫЙ РАСХОД ГАЗА

Исходным для определения скорости w газового потока в произвольном сечении сопл и диффузоров является уравнение (13) при $w_2 = w$ и $h_2 = h$, из которого следует

$$w = \sqrt{2(h_1 - h) + w_1^2}$$

$$w = \sqrt{2(h_1^* - h)} \tag{18}$$

Это уравнение справедливо как для идеальных, так и для реальных газов, и может быть решено с использованием hs-диаграммы.

Для идеального газа, преобразуя уравнение (18) с учётом уравнения состояния и соотношений между параметрами в адиабатном процессе, получим зависимость w в заданном сечении канала от параметров газа на входе.

$$w = \sqrt{2(h_1^* - h)} = \sqrt{2c_p(T_1^* - T)} = \sqrt{2\frac{k}{k-1}R(T_1^* - T)} =$$

$$= \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_1^*\left[1 - \left(\frac{p}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad (19)$$

$$w = \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1^* v_1^*\left[1 - \left(\frac{p}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad (19a)$$

При стационарном течении газа его массовый расход может определяться по параметрам в любом сечении сопла. В соответствии с уравнением неразрывности (7) и (7а).

$$G = w\rho F = wF/v$$

В адиабатном процессе течения

$$p/p_1^* = \left(v_1^*/v\right)^k \qquad \frac{1}{v} = \frac{\left(p/p_1^*\right)^{1/k}}{v_1^*}$$

Подставив в уравнение неразрывности выражения $1/v$ и w, получим

$$G = F\frac{\left(p/p_1^*\right)^{1/k}}{v_1^*}\sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_1^*\left[1-\left(\frac{p}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} =$$

$$= F\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{RT_1^*}{v_1^{*2}}\left[\left(\frac{p}{p_1^*}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_1^*}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \qquad (20)$$

Так как по уравнению состояния $v_1^* = RT_1^*/p_1^*$, то

$$G = F\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1^{*2}}{RT_1^*}\left[\left(\frac{p}{p_1^*}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_1^*}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \qquad (20a)$$

СКОРОСТЬ ЗВУКА

$$c = \sqrt{dp/d\rho} \tag{21}$$

Для адиабатного течения газа

$$pv^k = const \qquad p\rho^{-k} = const$$

Продифференцируем последнее выражение

$$\rho^{-k}dp - kp\rho^{-(k+1)}d\rho = 0$$

$$dp = kp\rho^{-1}d\rho \qquad dp/d\rho = kp/\rho$$

Подставляя это выражение в уравнение (21), получим

$$c = \sqrt{k\frac{p}{\rho}} = \sqrt{kpv} = \sqrt{kRT} \tag{22}$$

Таким образом, при ускоренном или замедленном движении газа с изменением его температуры скорость звука также изменяется.

Отношение скорости газа к местной (в данном сечении канала) скорости звука называется ***числом Маха***.

$$M = \frac{w}{c} \tag{23}$$

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Параметры газового потока, при скорости газа равной местной скорости звука, называются ***критическими***.

$$w_{\text{кр}} = c_{\text{кр}}$$

В соответствии с уравнениями (19) и (22)

$$\sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_1^* \left[1 - \left(\frac{p_{\text{кр}}}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} = \sqrt{kRT} \qquad \frac{2}{k-1}\left[1 - \left(\frac{p_{\text{кр}}}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] = \frac{T_{\text{кр}}}{T_1^*}$$

Учитывая, что в адиабатном процессе

$$\frac{T_{\text{кр}}}{T_1^*} = \left(\frac{p_{\text{кр}}}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}},$$

после решения уравнения получим

$$\frac{p_{\text{кр}}}{p_1^*} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad \beta_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad (24)$$

$$\beta_{\text{кр}} = p_{\text{кр}} / p_1^*$$

Таким образом, ***критическое отношение давлений*** $\beta_{кр}$, при котором скорость газа становится равной скорости звука, является только функцией показателя адиабаты, зависящего от атомарного состава газа и температуры.

Состав молекулы	k	$\beta_{кр}$
одноатомная	1,67	0,490
двухатомная	1,40	0,528
многоатомная	1,33	0,546

Используя соотношения между параметрами в адиабатном процессе, определим и другие критические параметры:

$$\frac{T_{кр}}{T_1^*} = \left(\frac{p_{кр}}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{2}{k+1} \qquad T_{кр} = T_1^* \frac{2}{k+1} \qquad (25)$$

$$\frac{v_{кр}}{v_1^*} = \left(\frac{T_1^*}{T}\right)^{\frac{1}{k-1}} = \left(\frac{T_{кр}}{T^*}\right)^{\frac{1}{1-k}} \qquad v_{кр} = v_1^* \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{1-k}} \qquad (26)$$

$$\frac{\rho_{кр}}{\rho_1^*} = \frac{v_1^*}{v} \qquad \rho_{кр} = \rho_1^* \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \qquad (27)$$

При подстановке в уравнение (22) выражения (25) критической температуры получим уравнение для определения критической скорости звука

$$c_{кр} = \sqrt{kRT_{кр}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_1^*} \qquad (28)$$

ФОРМА КАНАЛОВ СОПЛ И ДИФФУЗОРОВ

В соответствии с уравнением неразрывности (7) $F = G/(w\rho)$, из которого видно, что при неизменном расходе газа через любое из сечений канала площадь F сечений будет зависеть от характера изменения w и ρ.

Для анализа их изменения воспользуемся уравнением (9а) при $dl_{\text{техн}} = 0$.

$$\frac{dp}{\rho} = -wdw \qquad\qquad \frac{dp}{d\rho}\frac{d\rho}{\rho} = -w^2\frac{dw}{w}$$

С учётом уравнения (21) получаем

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{w^2}{c^2}\frac{dw}{w} \tag{29}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -M^2\frac{dw}{w} \tag{29a}$$

Знак минус в этих уравнениях показывает, что при увеличении скорости ($dw > 0$) плотность газа уменьшается ($d\rho < 0$).

Степень уменьшения плотности не остаётся постоянной, она зависит от величины w (от значения числа Маха M).

При $M << 1$ сжатием газа обычно пренебрегают и считают $\rho = const$.

С увеличением числа M сжимаемость газа проявляется всё в большей степени и уменьшение плотности возрастает.

При дозвуковом течении газа ($M < 1{,}0$) изменение плотности остаётся меньше прироста скорости.

При скорости газа равной скорости звука ($M = 1$), степени уменьшения ρ и роста w становятся одинаковыми.

С переходом к сверхзвуковому течению ($M > 1$) уменьшение ρ начинает превышать прирост w и тем в большей степени, чем больше будет скорость течения газа.

Для выявления взаимосвязи изменений площади проходного сечения канала и скорости течения газа вновь обратимся к уравнению неразрывности (7), продифференцировав его,

$$w\rho dF + wF d\rho + \rho F dw = 0$$

Разделим это уравнение на $w\rho F$:

$$\frac{dF}{F} + \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dw}{w} = 0 \qquad \frac{dF}{F} = -\left(\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dw}{w}\right)$$

Подставив выражение $d\rho/\rho$ из (29а), получим:

$$\frac{dF}{F} = (M^2 - 1)\frac{dw}{w} \tag{30}$$

Из этого уравнения видно, что при $M < 1$ для увеличения скорости ($dw > 0$) площадь проходного сечения сопл должна уменьшаться ($dF < 0$).

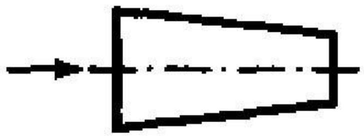
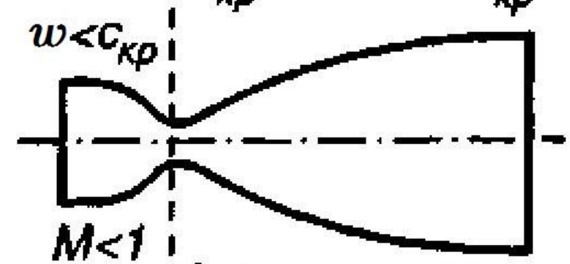
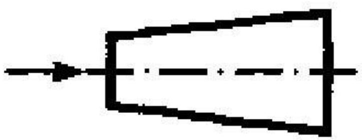
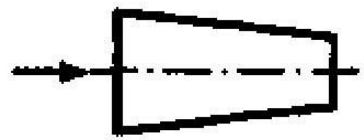
То же самое можно установить из рассмотрения уравнения (7). Так как при этом режиме течения увеличение скорости больше уменьшения плотности, то произведение $w\rho$ возрастает, а площадь F уменьшается.

При $M > 1$ для увеличения скорости ($dw > 0$) площадь проходного сечения канала по формуле (30) должна увеличиваться ($dF > 0$).

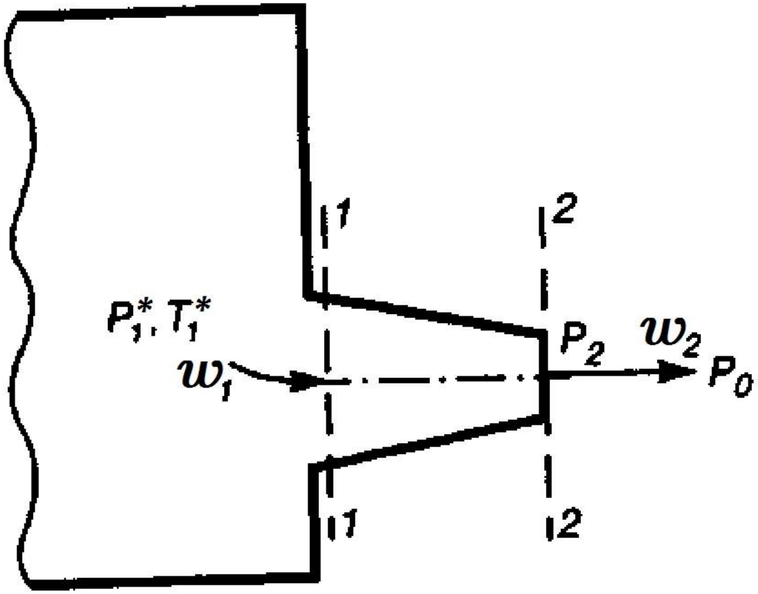
В уравнении (7) при большем уменьшении плотности по сравнению с ростом скорости произведение $w\rho$ уменьшается, а площадь F увеличивается.

Для диффузора, в котором скорость газа уменьшается, при $M < 1$ площадь проходного сечения канала должна увеличиваться ($dF > 0$), а при $M > 1$ − уменьшается ($dF < 0$).

Формы каналов сопл и диффузоров для различных режимов течения газа

	<u>Сопло</u> $dw>0;\ dp<0;$ $dT<0;\ dv>0$	<u>Диффузор</u> $dw<0;\ dp>0;$ $dT>0;\ dv<0$	Сопло Лаваля
$w<c_{кр}$ $(M<1)$			
$w>c_{кр}$ $(M>1)$			

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ЧЕРЕЗ СУЖИВАЮЩЕЕСЯ СОПЛО

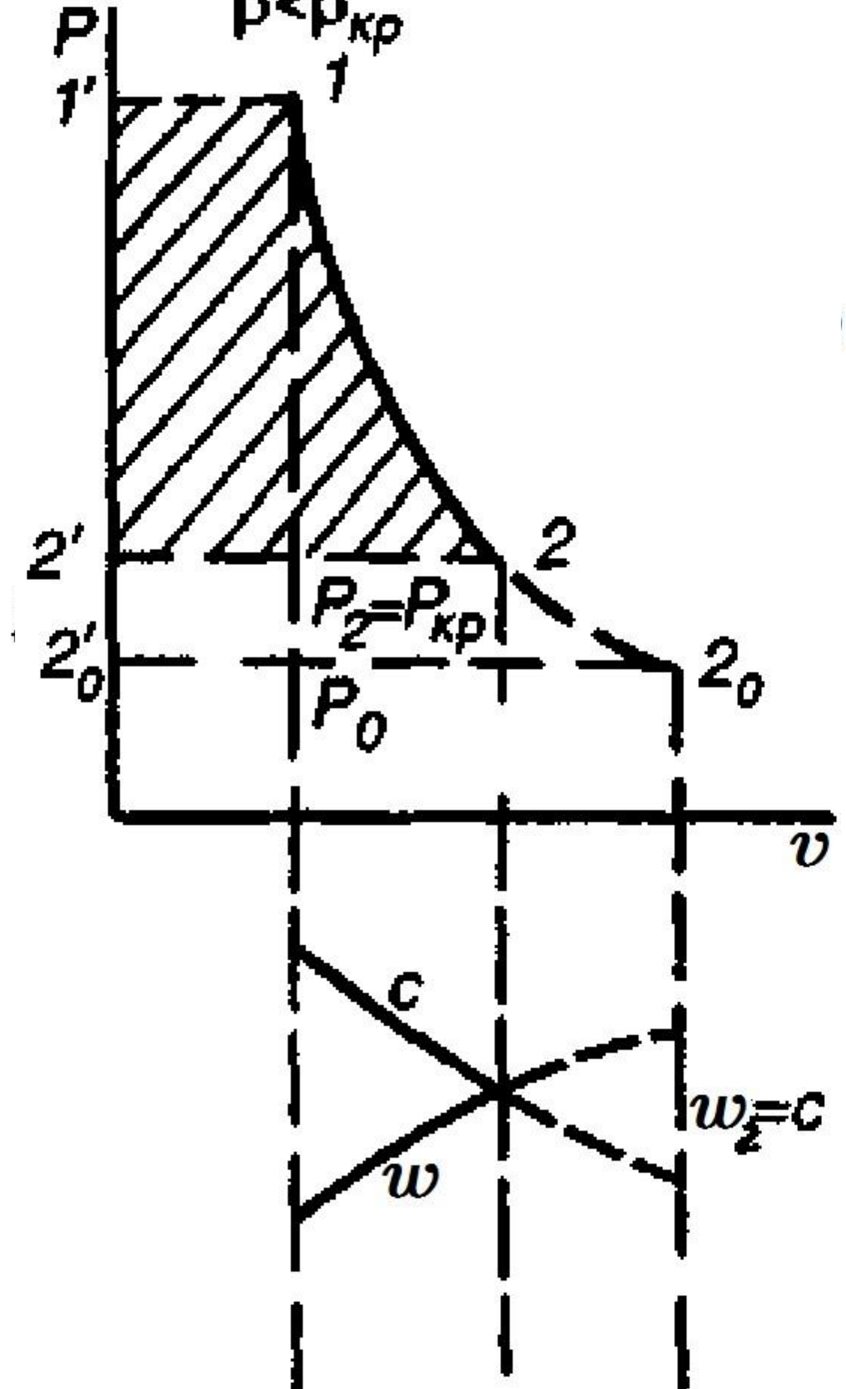


$$\frac{p_0}{p_1^*} = \beta$$

$\beta > \beta_{кр}$ − докритический режим истечения газа;

$\beta = \beta_{кр}$ − критический режим;

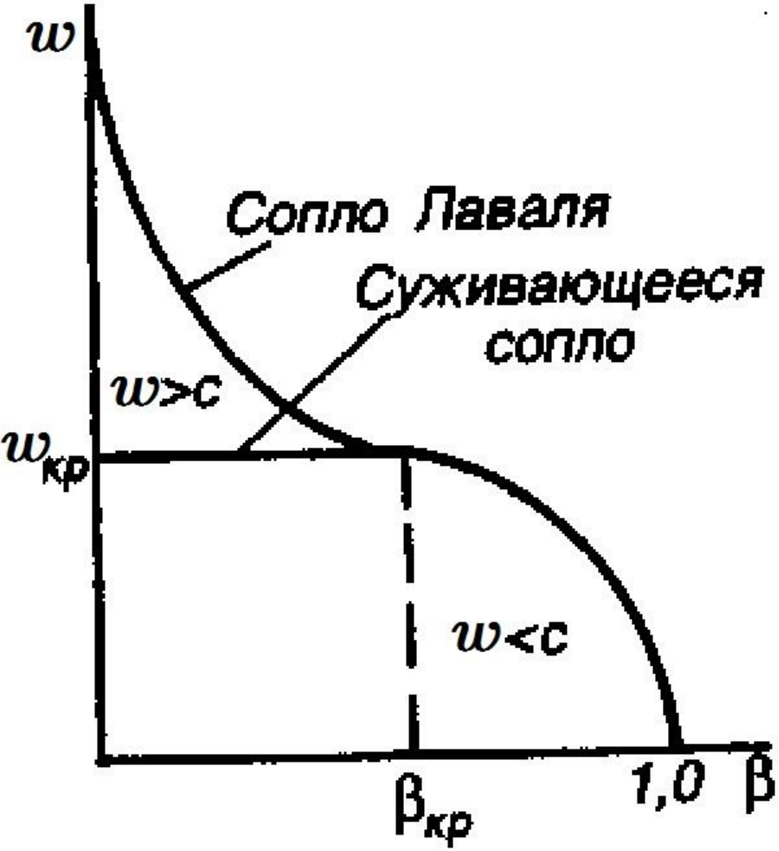
$\beta < \beta_{кр}$ − сверхкритический режим.

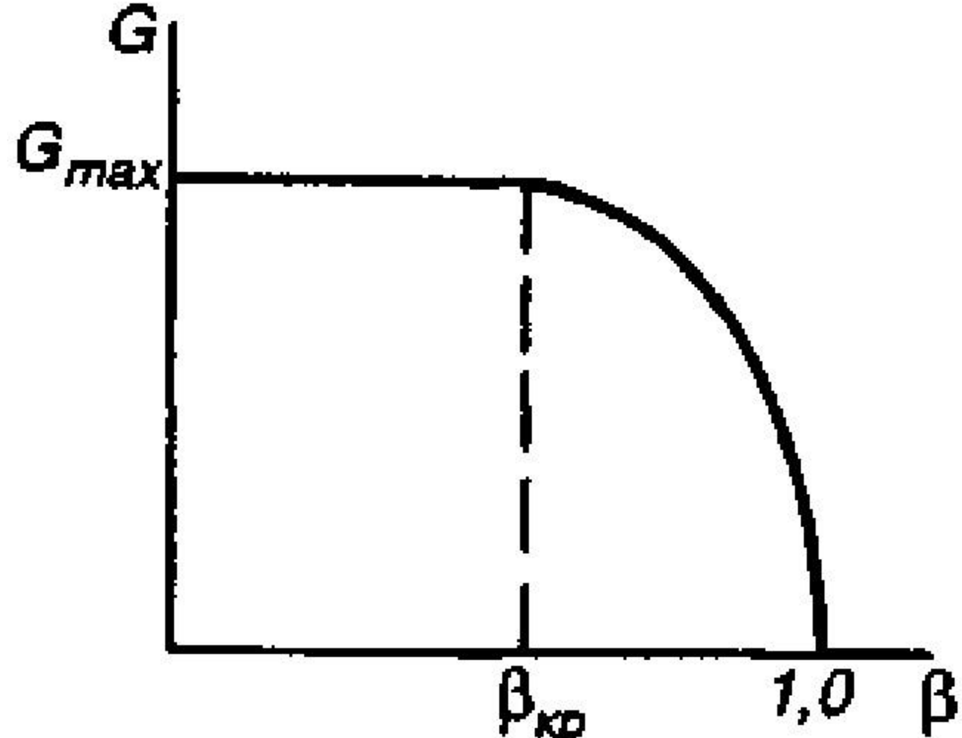


β<β_кр
P
1'
1
2'
2
P_2=P_кр
2'_0
2_0
P_0
v
c
w
w_2=c

Когда $\beta = \beta_{кр}$ и $\beta < \beta_{кр}$, $w = c_{кр}$, скорость газа на выходе можно определить по формуле (28)

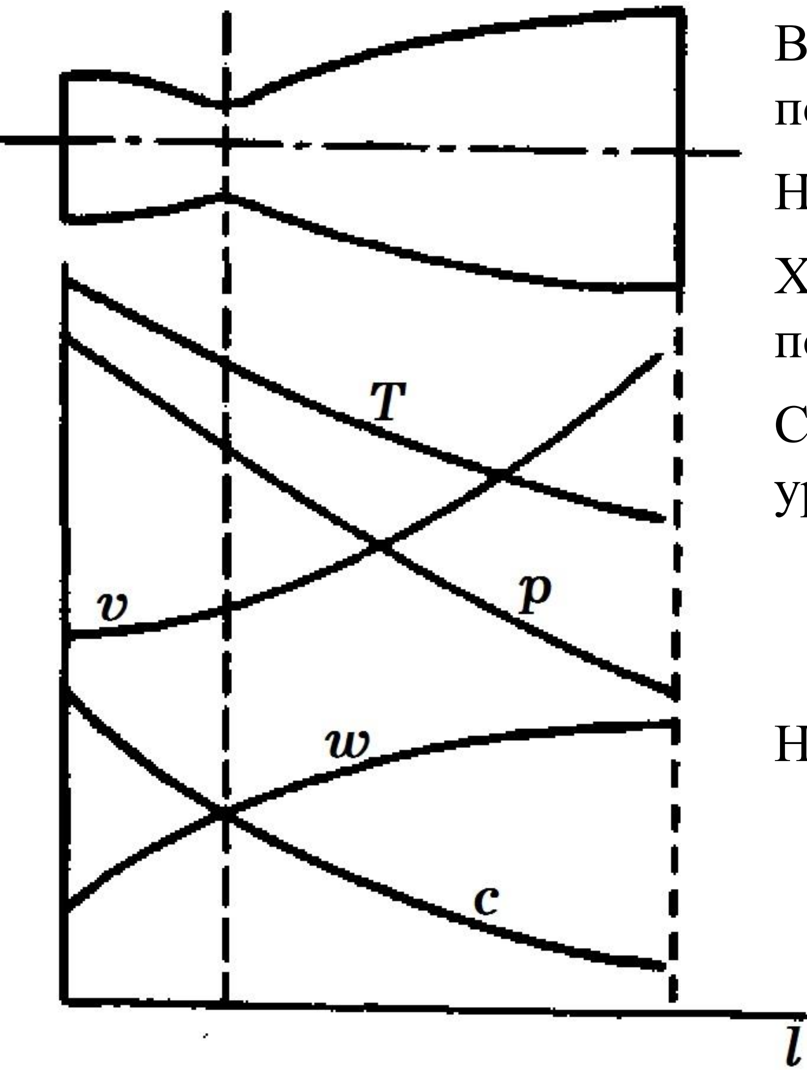
$$w_{кр} = c_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R T^{*}}$$





ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ЧЕРЕЗ СОПЛО ЛАВАЛЯ

В том случае, когда $\beta < \beta_{кр}$, полное использование располагаемого перепада давлений и, соответственно, располагаемой работы достигается применением сопла Лаваля, в котором происходит полное расширение газа с понижением его давления до давления среды.



В узком сечении сопла параметры газового потока равны критическим, $w_{кр} = c_{кр}$.

На разрезе сопла $p_2 = p_0$, $w_2 > c_2$.

Характер изменения параметров газового потока по длине сопла Лаваля показан на рисунке.

Скорость газа в узком сечении определяется по уравнению (28)

$$w_{кр} = c_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_1^*}$$

На выходе из сопла по уравнению

$$w_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_1^* \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$$

Максимальная скорость на выходе из сопла Лаваля достигается при истечении газа в абсолютный вакуум, когда $p_2 = p_0 = 0$:

$$w_{2\max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} R T_1^*} \tag{31}$$

Отношение максимальной скорости на выходе из сопла Лаваля к критической скорости определяется по выражению

$$\frac{w_{2\max}}{w_{\text{кр}}} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \tag{32}$$

Параметры газа на выходе из сопла Лаваля определяются по уравнениям соотношения параметров в адиабатном процессе:

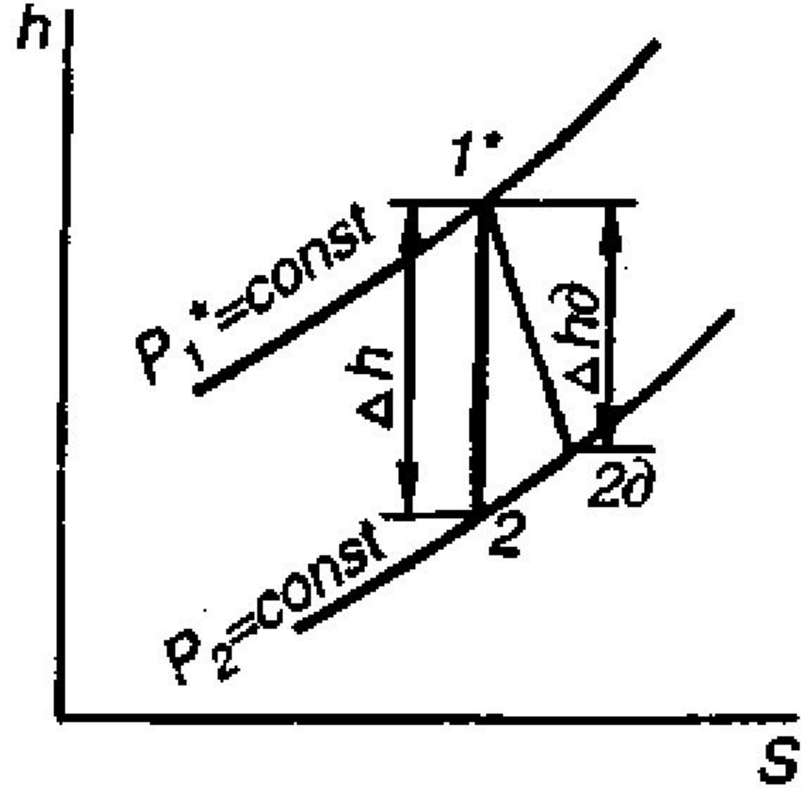
$$T_2 = T_1^* \left(\frac{p_2}{p_1^*}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad v_2 = v_1^* \left(\frac{p_2}{p_1^*}\right)^{-\frac{1}{k}} \qquad \rho_2 = \rho_1^* \left(\frac{p_2}{p_1^*}\right)^{\frac{1}{k}}$$

или по уравнению состояния

$$v_2 = \frac{R T_2}{p_2} \qquad \rho_2 = \frac{p_2}{R T_2}$$

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ С УЧЁТОМ ТРЕНИЯ

Истечение газа с трением ведёт к возрастанию температуры и энтальпии газа в выходном сечении канала, в этом случае процесс становится необратимым и сопровождается увеличением энтропии.



Действительный теплоперепад

$$\Delta h_{\partial} = h_1^* - h_{2\partial}$$

Располагаемый теплоперепад

$$\Delta h = h_1^* - h_2$$

Отношение разности располагаемого и действительного теплоперападов (потери теплоперепада) к располагаемому теплоперепаду называется ***коэффициентом потери энергии***

$$\zeta_c = \frac{\Delta h - \Delta h_{\partial}}{\Delta h} \qquad (33)$$

$$\Delta h_{\partial} = (1 - \zeta_c)\Delta h \qquad (34)$$

Тогда действительная скорость

$$w_{\partial} = \sqrt{2\Delta h_{\partial}} = \sqrt{2(1-\zeta_c)\Delta h} = \sqrt{1-\zeta_c}\sqrt{2\Delta h} = \varphi_c\sqrt{2\Delta h} = \varphi_c w$$

Коэффициент скорости, учитывающий уменьшение действительной скорости по сравнению с теоретической

$$\varphi_c = \sqrt{1-\zeta_c} = \frac{w_{\partial}}{w} \tag{35}$$

$$\zeta_c = 1 - \varphi_c^2 \tag{36}$$

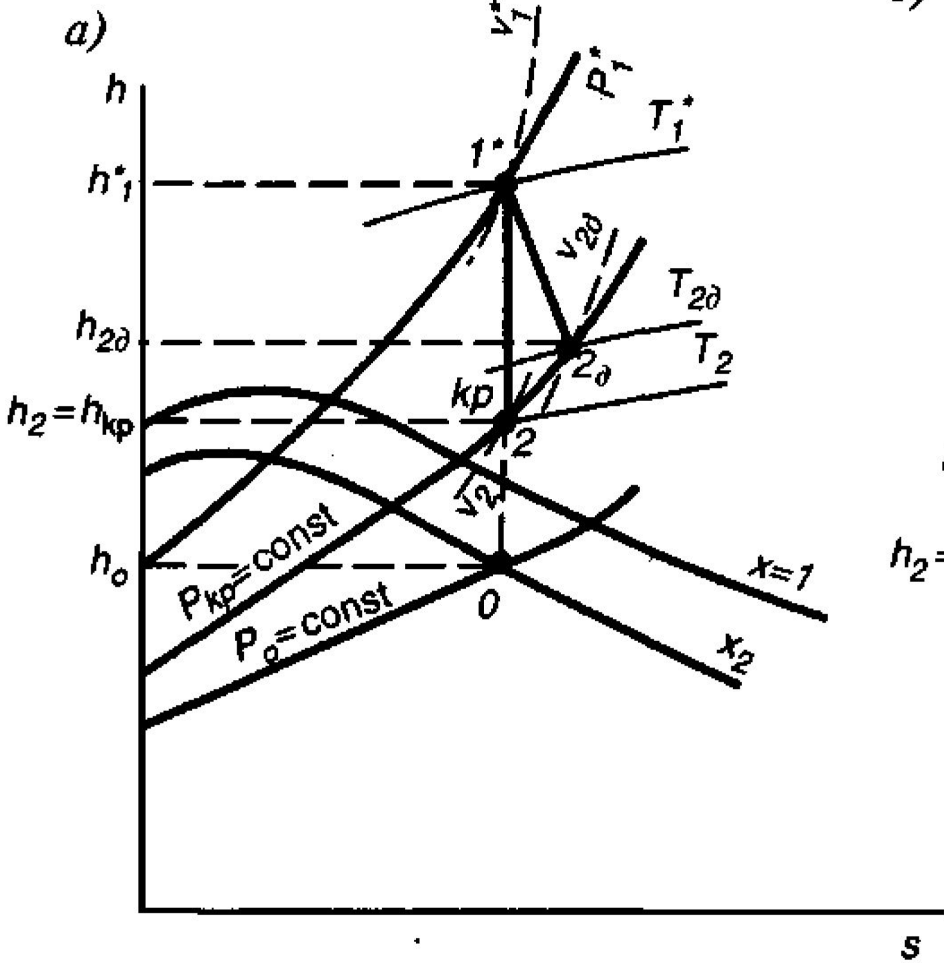
Отношение действительного теплоперепада Δh_{∂} к теоретическому Δh, или действительной кинетической энергии $w_{2\partial}^2/2$ к теоретической $w^2/2$ называется ***коэффициентом полезного действия*** канала

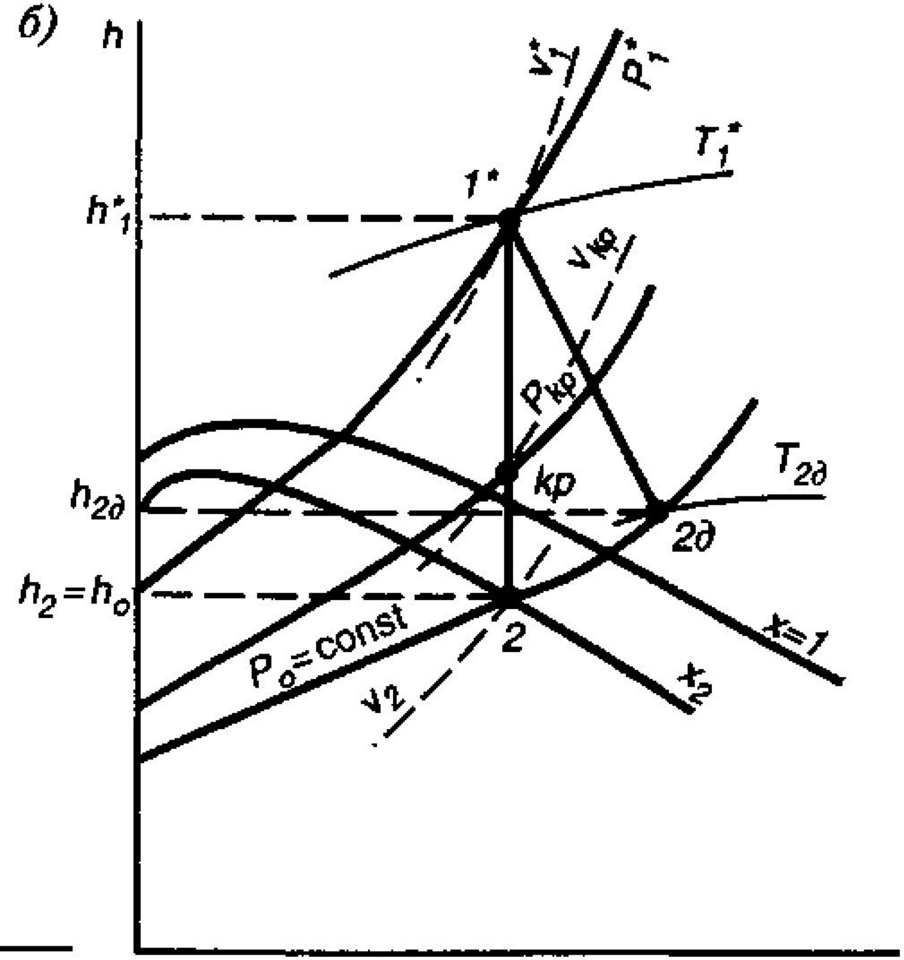
$$\eta_к = \frac{\Delta h_{\partial}}{\Delta h} = \frac{w_{\partial}^2}{w^2}$$

$$\eta_к = \varphi^2 = 1 - \zeta_c \tag{37}$$

ИСТЕЧЕНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА

Водяной пар существенно отличается от идеального газа, поэтому расчёт истечения пара выполняется с использованием *hs*-диаграммы.

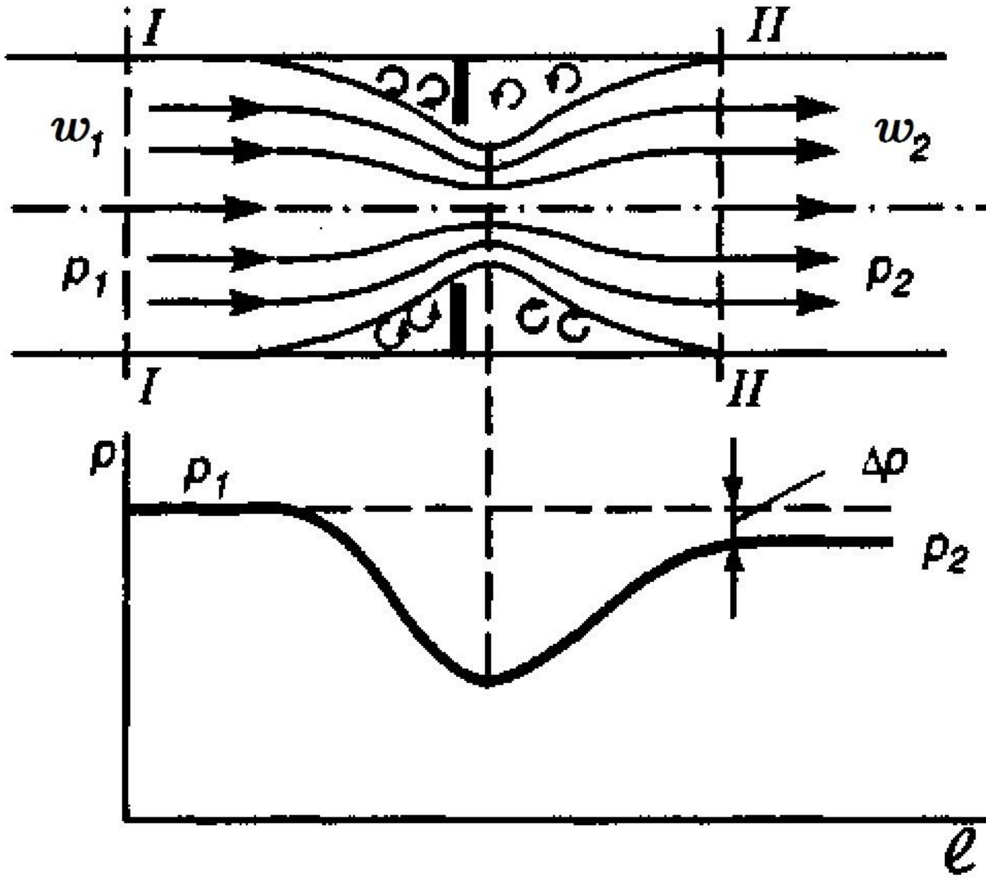




Скорость истечения определяется по формуле (18) $w_2 = \sqrt{2(h_1^* - h_2)}$

ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

Дросселированием называется необратимый процесс протекания газа (пара) через местное сопротивление, в результате которого понижается давление газа без совершения им технической работы.



Эффект Джоуля-Томсона.