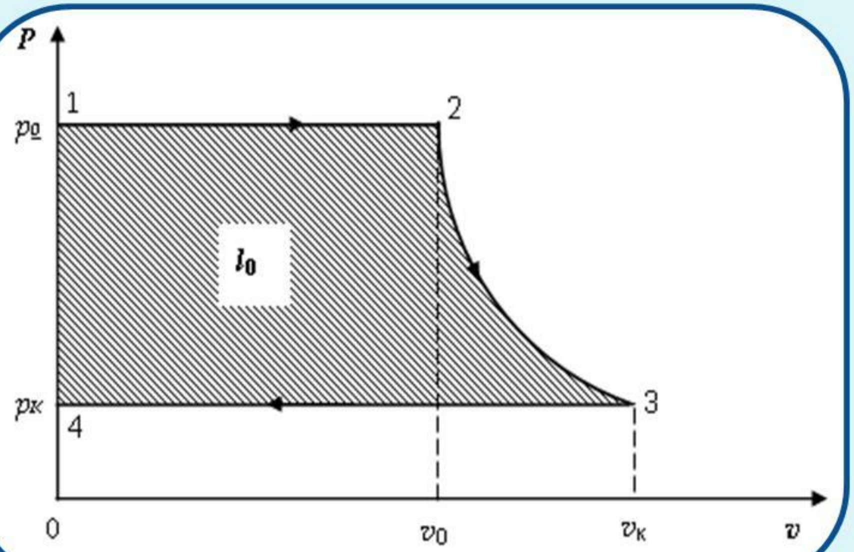
Тема 9 (4 час, лекция 0.5·9 - 10 - 0.5·11)

Первый закон термодинамики для потока.

Лекция 9 (второй час)

Располагаемая работа. Уравнение неразрывности потока. Уравнение **первого закона термодинамики для потока**. Определение количества тепла для потока.

Располагаемая работа.



Процесс под действием поршня.

Площадь под процессом 1-2 в p,v-диаграмме соответствует работе.

Работа $p_0 \cdot v_0$ совершается за счет внешних сил и носит названия **работы проталкивания (>0)**.

$$l = \int_{v_o}^{v_к} Pdv$$ - положительная **работа изменения объема.**

($-p_к \cdot v_к$)– работа проталкивания (<0).

$$l_o = P_o v_o + \int_{v_o}^{v_к} Pdv - P_к v_к$$

Сумма работ проталкивания, взятая с обратным знаком, называют **внешней работой** $l^* = p_к v_к - p_o v_o$

$$\boxed{l_0 = l - l^*}$$

Работа l_0 получила название **работы изменения давления в потоке или располагаемой работы,** последнее относится только к обратимым процессам.

$$l = q - (u_к - u_0)$$

$$l_o = l - l^* = q - (u_к - u_0) - (p_к v_к - p_0 v_0) =$$

$$= (u_0 + p_0 v_0) - (u_к + p_к v_к) + q = h_0 - h_к + q$$

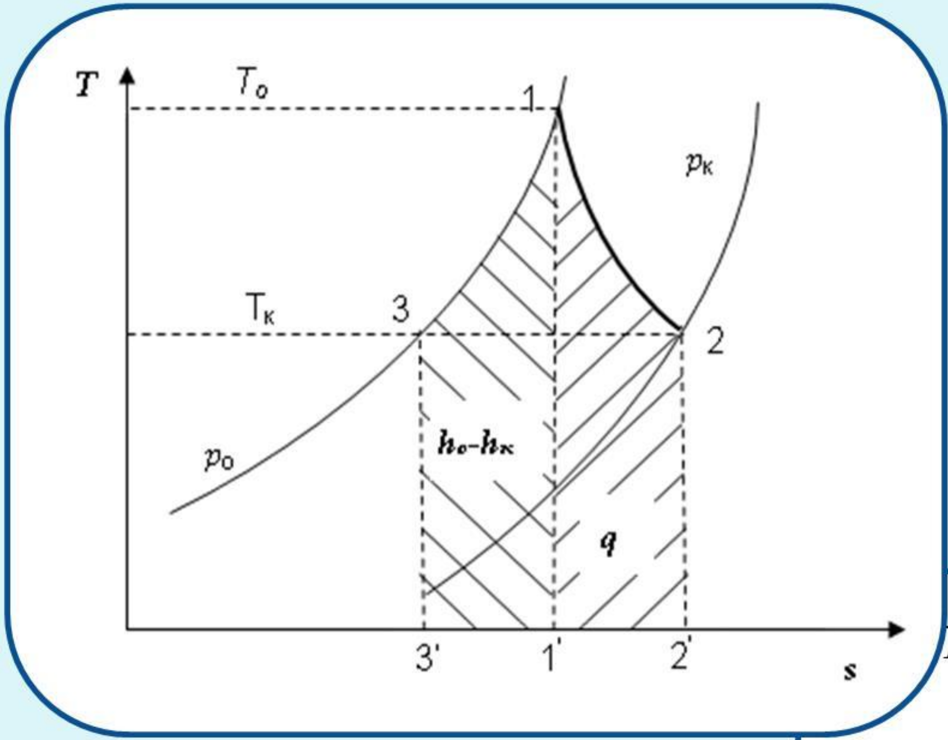
$$dq = dh - vdp$$

$$\delta l_0 = -dh + \delta q = -dh + (dh - vdp) = -vdp$$

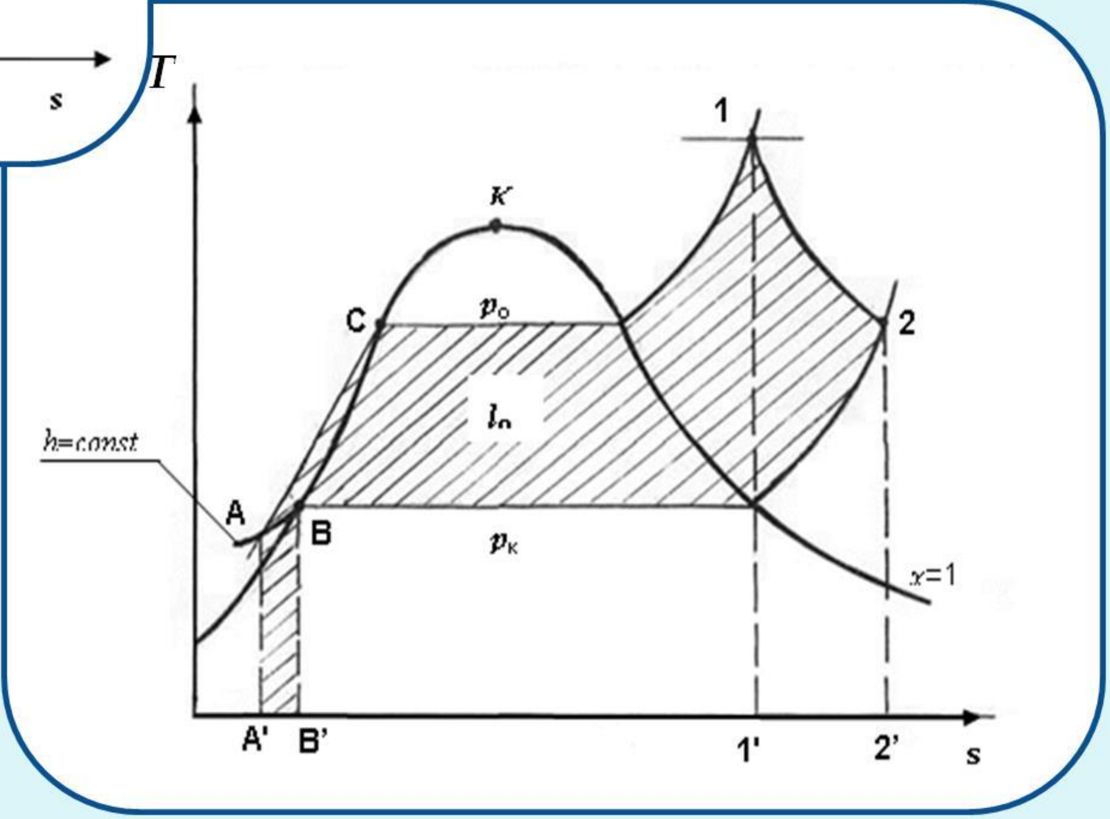
Работа изменения давления в потоке возможна только при наличии разности давлений $dp \neq 0$, отсюда и появилось её название.

В p,v - диаграмме для ***обратимых процессов*** работа изменения давления в потоке (она же располагаемая работа) есть площадь под процессом в проекции на ось давлений

$$l_o = \int_{p_o}^{p_к} -vdp$$



T
T_o
1
$p_к$
$T_к$
3
2
p_o
h_o-$h_к$
q
3'
1'
2'
s



T
1
K
C
p_o
2
l_o
h=const
A
B
$p_к$
x=1
A'
B'
1'
2'
s

Движущееся по каналу рабочее тело или вещество называется **потоком**.

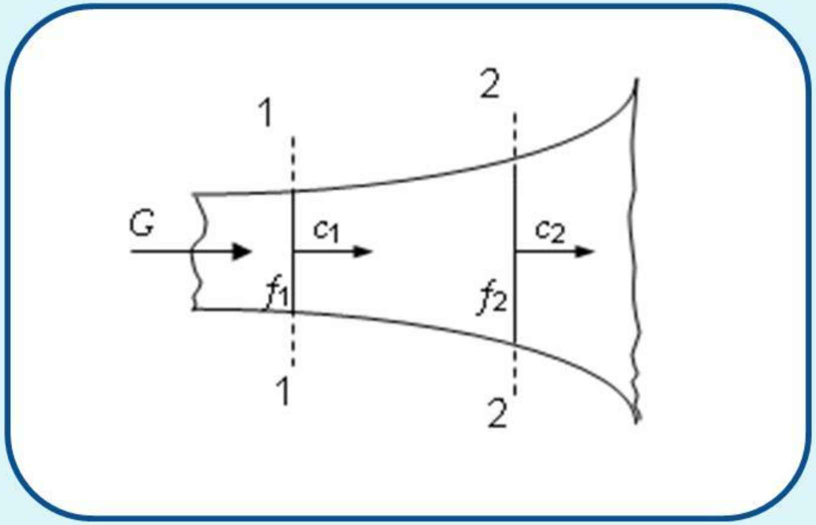
Процесс движения рабочего тела или вещества по каналу называется **истечением**.

Для характеристики потока, кроме термодинамических параметров (p, v, T и т.д.), необходимо знать скорость его движения – **с** метр на секунду и массовый расход - G килограмм на секунду.

Допущения, принятые в технической термодинамике при изучении процессов истечения:

- При изучении потоков газов и жидкостей будем рассматривать их как сплошную среду. Это правомерно, поскольку расстояние между молекулами и длина их свободного пробега несоизмеримо малы по сравнению с размерами каналов, в которых движется вещество;
- Будем рассматривать только установившийся – стационарный режим истечения, когда все параметры и скорость газа или жидкости остаются неизменными в каждой точке пространства канала;

Уравнение неразрывности



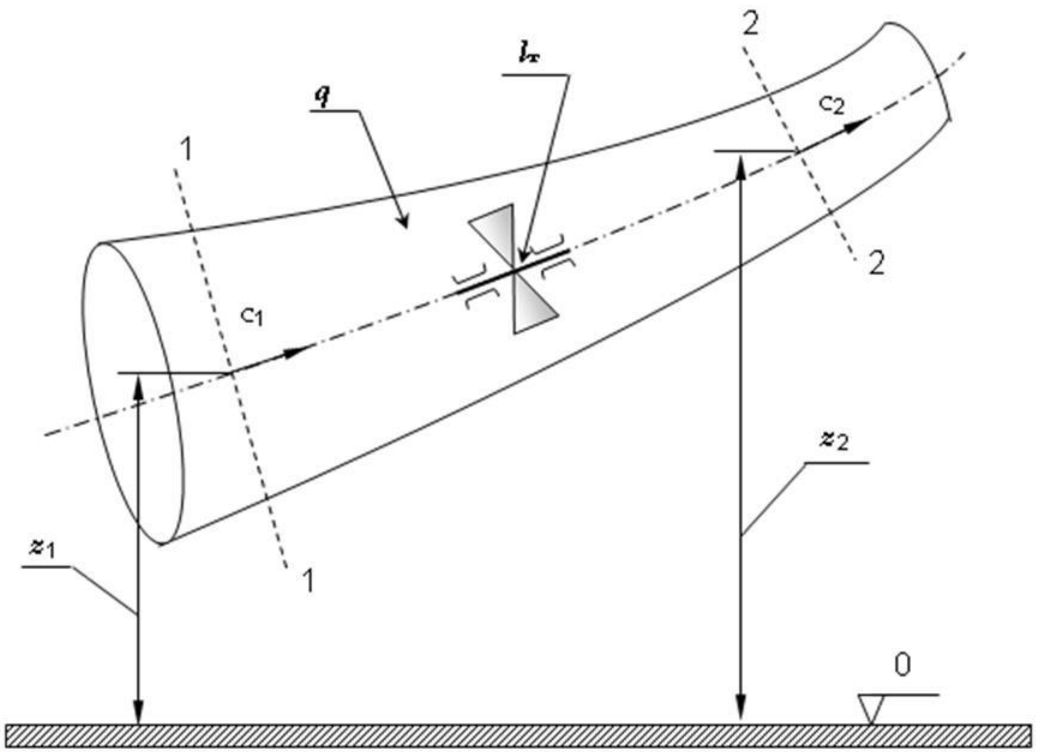
$$G = \frac{M}{\tau} = \left|\tau - \text{время пребывания}\right| =$$

$$= \frac{\rho V}{\tau} = \frac{\rho f x}{\tau} = \left|\frac{x}{\tau} = c\right| = \rho f c$$

$$G = f_1 c_1 \rho_1 = f_1 c_1 / v_1 = f_2 c_2 / v_2 = const$$

уравнениями сплошности или **неразрывности потока**

Уравнение первого закона термодинамики для потока



Изменение полной энергии

$$e_2 - e_1 = q - l_T$$

$$e_i = e_i^{\text{внешняя}} + e_i^{\text{внутренняя}}$$

$$e_1^{\text{внешняя}} = gz_1 + \frac{c_2^2}{2}$$

$$e_2^{\text{внешняя}} = \frac{c_2^2}{2} + gz_2$$

$$e_1^{\text{внутренняя}} = u_1$$

$$e_2^{\text{внутренняя}} = u_2$$

Было $l_0 = h_1 - h_2 + q$

Теперь располагаемая работа идет еще на изменение полной энергии, совершение внешней работы ($l* = p_2v_2 - p_1v_1$) и технической работы

$$(u_2 + p_2v_2 + gz_2 + \frac{c_2^2}{2}) - (u_1 + p_1v_1 + gz_1 + \frac{c_1^2}{2}) = q - l_т$$

$$dh + gdz + cdc = \delta q - \delta l_т$$

Тема 9 (3 час, лекция 0.5·9 - 10 - 0.5·11)

Первый закон термодинамики для потока.

<u>Лекция 10</u>

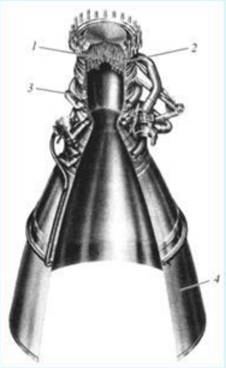
Течение в сопле

Сопло и диффузор. Скорость истечения газа из суживающегося сопла. Максимальный расход и критическая скорость. Критическое отношение давлений и температур. Критическая скорость и скорость звука. Отношение скорости потока к местной скорости звука и критической скорости. Зависимость скорости и расхода от отношения начального и конечного давлений. Условия перехода скорости потока через скорость звука. Комбинированное сопло Лаваля. Расчет скорости истечения водяного пара по изменению энтальпии.

Истечение с учетом необратимости. Коэффициенты скорости и расхода. Принцип обращения воздействия. Понятие о тепловом сопле.

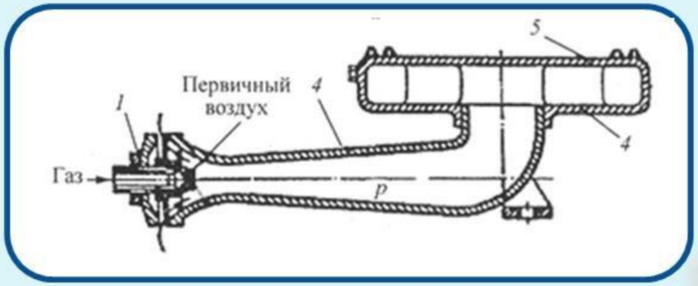
Сопло

Сопло - техническое устройство (специально спрофилированный закрытый канал), служащее для разгона жидкости или газа и придания потоку заданного направления.



Конфузор — (от лат. confundo вливаю, смешиваю, распределяю) сужающаяся спрофилированная часть канала (трубы), в котором дозвуковая скорость газа (жидкости) возрастает в результате преобразования потенциальную энергии в кинетическую.

Диффузор - в часть канала (трубы), в которой происходят замедление (расширение) потока и возрастание давления (в аэрогидродинамике).



Карл Густав Патрик де Лава́ль (Laval) (1845, —.1913), шведский инженер и изобретатель. По национальности француз. Впервые применил **расширяющиеся сопла**, гибкий вал, диск равного сопротивления, позволивший достигать очень высоких окружных скоростей (419 *м/сек*). **Разработал теорию сопла**.

$$dh + gdz + cdc = \delta q - \delta l_{т} - \delta l_{трения}$$

$$-\delta l_{трения} = \delta q_{трения}$$

$$\delta q = \delta q_{внешняя} + \delta q_{трения}$$

$$dh + gdz + cdc = \delta q_{внешняя} - \delta l_{т}$$

$$\delta l_{т} = 0 \qquad gdz = 0 \qquad \delta q_{внешняя} = 0$$

$$dh + cdc = 0$$

$$\left.\begin{aligned} -dh &= cdc \\ \delta q &= dh - vdp \end{aligned}\right\} cdc = -vdp$$

$$\frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} = -\frac{1}{\rho_{несжимаемой}}(p_2 - p_1)$$

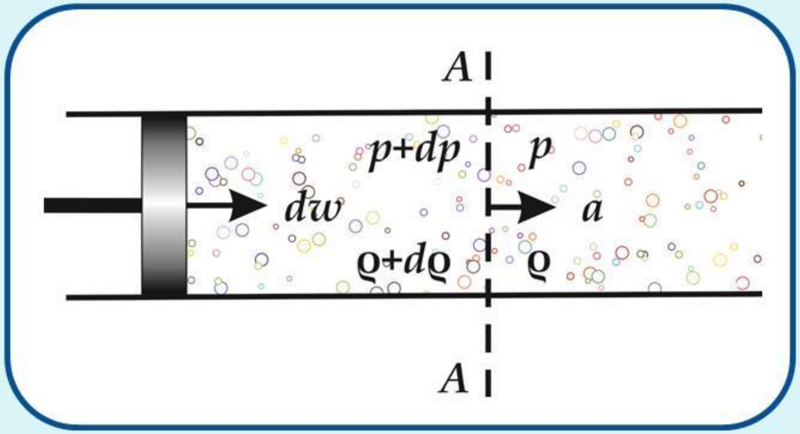
$$c_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_{несжимаемой}} + c_1^2}$$

$$G = const = \rho f c$$

$$c_2 = \frac{\rho_1}{\rho_2}\frac{f_1}{f_2}c_1 = \left|\rho_1 = \rho_2 = \rho_{несжимаемая}\right| = \frac{f_1}{f_2}c_1$$

Эффекты сжимаемости проявляются при скоростях близких к скорости звука (>20% от скорости звука)

Скорость звука



В область между поршнем площадью f и сечением **AA** за время $d\tau$ попадет газ массой

$$dM_{\text{невозмущенный}} = \varrho \cdot f \cdot a \cdot d\tau \,.$$

Масса возмущенного газа перед поршнем, «догоняющего» сечение **AA** увеличилась за это время на

$$dM_{\text{возмущенный}} = (\varrho + d\varrho) \cdot f \cdot (a - dw) \cdot d\tau$$

Из уравнения неразрывности следует

$$dM_{\text{невозмущенный}} = dM_{\text{возмущенный}}$$

$$\varrho \cdot a = (\varrho + d\varrho) \cdot (a - dw)$$

Перешедшая через **AA** увеличивает свою скорость от 0 до dw за счет перепада давления dp. Из закона сохранения и превращения импульса:

$$dp \cdot f \cdot d\tau = \rho \cdot f \cdot a \cdot d\tau \cdot dw$$

$$dp = \rho \cdot a \cdot dw$$

$$\rho \cdot a = (\rho + d\rho) \cdot (a - dw) \Rightarrow \rho \cdot a = \rho \cdot a + d\rho \cdot a - \rho dw - d\rho \cdot dw$$

$d\rho \cdot dw \to 0$ второй порядок малости

$$d\rho \cdot a - \rho dw = 0 \Rightarrow dw = \frac{d\rho}{\rho} \cdot a$$

$$dp = \rho \cdot a \cdot \frac{d\rho}{\rho} \cdot a$$

$$\boxed{dp = a^2 \cdot d\rho}$$

Сэр Исаа́к Нью́тон (англ. **Sir Isaac Newton**, 1643 —1727) — английский физик, математик, механик и астроном, один из создателей классической физики. Автор фундаментального труда «Математические начала натуральной философии», в котором он изложил закон всемирного тяготения и три закона механики, ставшие основой классической механики. Разработал дифференциальное и интегральное исчисления, теорию цвета и многие другие математические и физические теории.

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}}$$

В 1687 г. посчитал, что процесс изотермический, и из закона Бойля – Мариотта Определил

$$a_T = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T} = \sqrt{\frac{p}{\rho}} = \sqrt{RT}$$

Однако прямые измерения показали реальное превышение измеренной скорости на 20% относительно рассчитанной по формуле Ньютона.

— Вы написали такую огромную книгу о системе мира и ни разу не упомянули о его Творце!

— Сир, я не нуждался в этой гипотезе.

(Диалог Лапласа с Наполеоном)

Пьер-Симо́н Лапла́с (фр. **Pierre-Simon de Laplace**; 1749 —1827) — выдающийся французский математик, физик и астроном; известен работами в области небесной механики, дифференциальных уравнений, один из создателей теории вероятностей. Заслуги Лапласа в области чистой и прикладной математики и особенно в астрономии громадны: он усовершенствовал почти все отделы этих наук.

Исправил – П. Лаплас. Скорости высокие и теплообмен между зонами повышения давления и разрежения не успевает произойти. Следовательно, процесс адиабатный (предположил изэнтропический)

$$a_s = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{-v^2\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s}$$ – термодинамическая скорость звука

(скорость звука с нулевой частотой - при высоких частотах неизэнтропичность приводит к заметным отклонениям)

для идеального газа $a_s = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{k\frac{p}{\rho}} = \sqrt{kRT}$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s \Leftrightarrow \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s$$ – адиабатическая сжимаемость вещества

$$\mu = -\frac{1}{v_0}\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$$ – коэффициент изотермической сжимаемости

Давление 98 кПа = 1 кгс/см^2

Водяной пар (100°С) $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s = -1.259\cdot 10^{-5}\,\text{м}^4\cdot\text{с}^2/\text{кг}^2 \Rightarrow a = 471\,\text{м/с}$

Вода (20°С) $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s = -4.434\cdot 10^{-13}\,\text{м}^4\cdot\text{с}^2/\text{кг}^2 \Rightarrow a = 1505\,\text{м/с}$

Железо (20°С) $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s = -6.14\cdot 10^{-16}\,\text{м}^4\cdot\text{с}^2/\text{кг}^2 \Rightarrow a = 5130\,\text{м/с}$

Абсолютно несжимаемое тело: $\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T = 0 \;\Rightarrow\; a \to \infty$

Связь параметров в сжимаемом адиабатическом потоке

$$G = const = \rho f c = \frac{fc}{v}$$

$$\frac{dG}{G} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{df}{f} + \frac{dc}{c} = 0$$

$$\frac{df}{dc} = -\frac{f}{c}\left(\frac{d\rho}{\rho}\frac{c}{dc} + 1\right) = -\frac{f}{c}\left(\frac{d\rho}{\rho}\frac{c^2}{cdc} + 1\right) = \left| cdc = -vdp = -\frac{dp}{\rho} \right|$$

$$\frac{df}{dc} = -\frac{f}{c}\left(-\frac{d\rho}{\rho}\frac{\rho c^2}{dp} + 1\right) = \frac{f}{c}\left(\frac{c^2 d\rho}{dp} - 1\right) = \frac{f}{c}\left(\frac{c^2}{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} - 1\right) = \frac{f}{c}\left(\frac{c^2}{a^2} - 1\right) = \frac{f}{c}\left(M^2 - 1\right)$$

M – число Маха - Майевского

$$\boxed{\frac{df}{f} = \left(M^2 - 1\right)\frac{dc}{c}}$$

Изэнтропическое истечение газов (идеальных)

$$G = const$$

$$h_0 = h + \frac{c^2}{2} = const - \text{энтальпия торможения}$$

$$p = \rho RT$$

$$\frac{p}{\rho^k} = const$$

$$c = \sqrt{2\left(h_0 - h\right)} = \sqrt{2c_p\left(T_0 - T\right)} = \sqrt{2\frac{kR}{k-1}\left(T_0 - T\right)} == \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_0\left(1 - \frac{T}{T_0}\right)}$$

$$= \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_0\left(1 - \frac{T}{T_0}\right)} = \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_0\left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} = \sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}\left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$$

$$h_0 = c_p T_0 = c_p T + \frac{c^2}{2} \Rightarrow T_0 = T\left(1 + \frac{c^2}{2c_p T}\right) = T\left(1 + \frac{c^2}{2\frac{kR}{k-1}T}\right) = T\left(1 + \frac{c^2}{2\frac{kR}{k-1}T}\right) =$$

$$= T\left(1 + \frac{k-1}{2}\frac{c^2}{kRT}\right) = T\left(1 + \frac{k-1}{2}M^2\right)$$

$$G = \rho \cdot f \cdot c = \left| \rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} \right| = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} f \cdot c$$

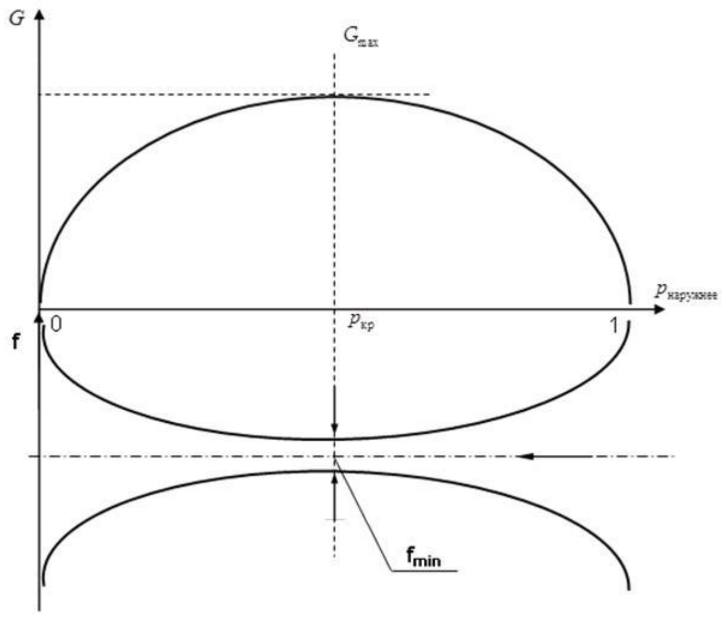
$$G = \rho \cdot f \cdot c = \left| \rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} \right| = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} f \cdot \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} =$$

$$= f \cdot \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_0 \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = f \cdot \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_0 \rho_0 \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

$$T_0 = T\left(1 + \frac{k-1}{2}M^2\right)$$

$$M = 1$$

$$\frac{T}{T_0} = \frac{2}{k+1}$$



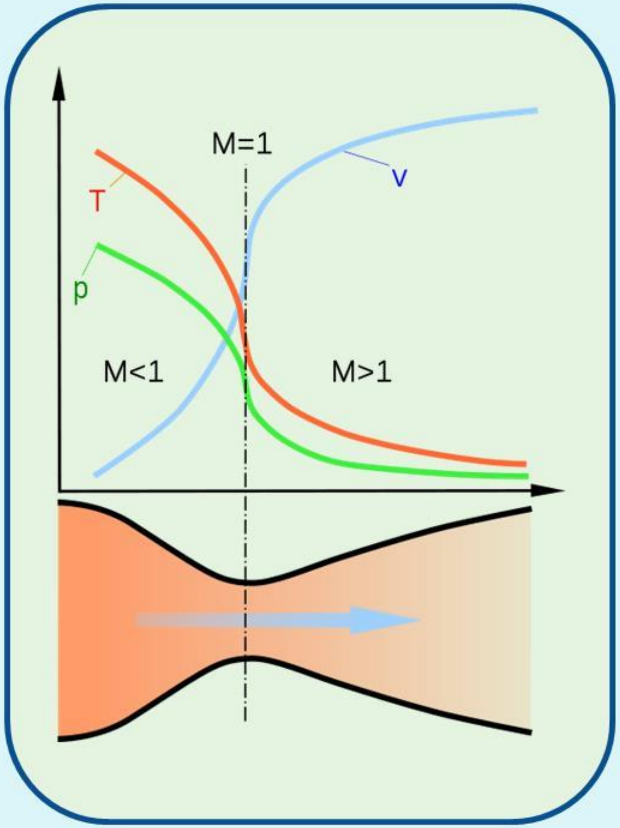
$$\frac{dG}{dp} = 0$$

$$\frac{d\left[\left(\frac{p_{кр}}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{кр}}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}{dp} = \frac{2}{k}\left(\frac{p_{кр}}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}-1} - \frac{k+1}{k}\left(\frac{p_{кр}}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}} = \frac{2}{k}\left(\frac{p_{кр}}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}}\left[\left(\frac{p_{кр}}{p_0}\right)^{\frac{1-k}{k}} - \frac{k+1}{2}\right] = 0$$

$$\left(\frac{p_{кр}}{p_0}\right)^{\frac{1-k}{k}} = \frac{k+1}{2} \Rightarrow \beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_0} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{-\frac{k}{k-1}}$$

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Для удобства анализа вводится сечение, где $c_0 = 0$. Параметры в данном сечении (c_0, a_0, p_0, T_0, υ_0, h_0) называют *параметрами торможения*.



В минимальном сечении сопла скорость потока равна местной скорости звука.

Ее и все параметры называют *критическими*:

$c_{кр} = a$, $p = p_{кр}$, $T = T_{кр}$, $\upsilon = \upsilon_{кр}$. Для идеального газа:

$$T_{кр} = \frac{2}{k+1} T_0$$

$$p_{кр} = \beta_{кр} p_0 = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p_0$$

$$c_{кр} = a = \sqrt{kRT_{кр}}$$

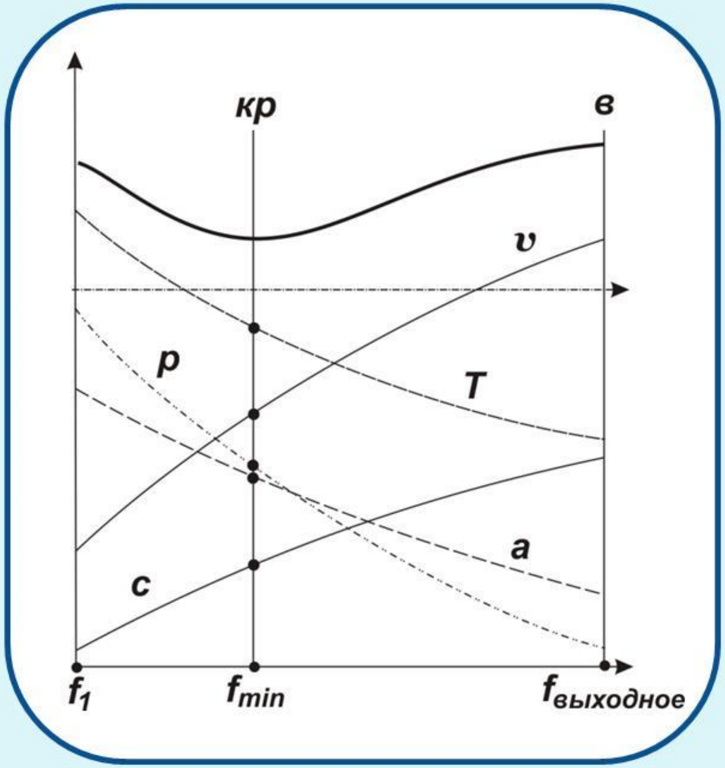
$$\upsilon_{кр} = \frac{RT_{кр}}{p_{кр}} = \upsilon_0 \beta_{кр}^{\frac{1}{k}}$$

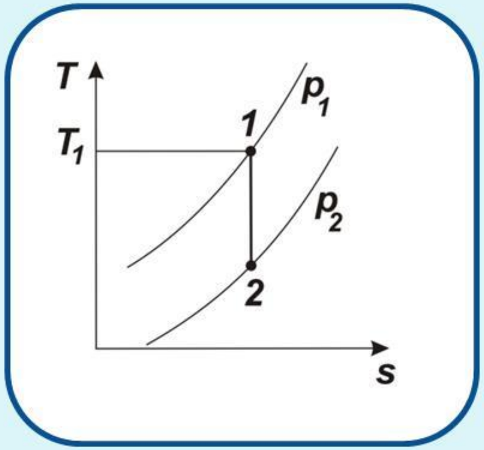
Для одноатомного идеального газа $k = 1{,}67$; $\beta_{кр} = 0{,}484$.

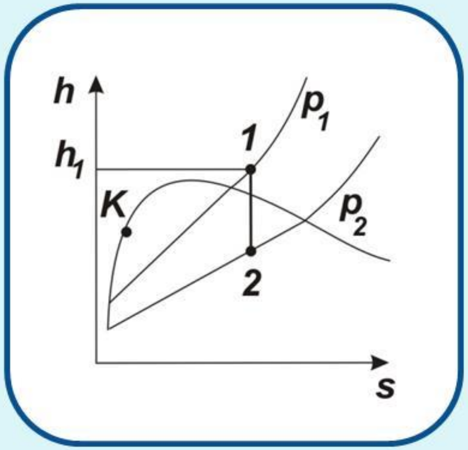
Для двухатомного идеального газа $k = 1{,}40$; $\beta_{кр} = 0{,}528$.

Для трёх и более атомного идеального газа $k = 1{,}29$; $\beta_{кр} = 0{,}546$.

Для водяного пара принимается $k = 1{,}3$; $\beta_{кр} = 0{,}55$.







$$x = \frac{s - s'}{s'' - s'}$$

$$c_2 = \sqrt{2\left(h_1 - h_2\right) + c_1^2} = \sqrt{2\left(h_0 - h_2\right)}$$

$$s_2 = s_1 = s_0$$

$$\frac{p_н}{p_0} = \beta, \quad \frac{p_{кр}}{p_0} = \beta_{кр}$$

Суживающееся сопло:

Дозвуковой

$$\beta > \beta_{кр} \ \left(p_н > p_{кр}\right) \Rightarrow p_в = p_н$$

Звуковой

$$\beta \le \beta_{кр} \ \left(p_н \le p_{кр}\right) \Rightarrow p_в = p_{кр}$$

Сопло Лаваля:

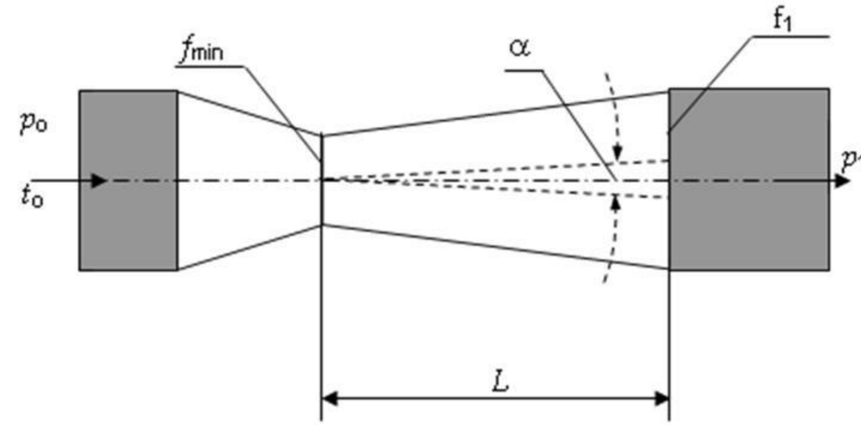
Дозвуковой нерасчетный режим

$$\beta > \beta_{кр} \ \left(p_н > p_{кр}\right) \Rightarrow p_{\min} = p_н$$

Сверхзвуковой

$$\beta \le \beta_{кр} \ \left(p_н \le p_{кр}\right) \Rightarrow p_{\min} = p_{кр}; \ p_в \le p_н.$$

$$\alpha \approx 14^\circ \div 15^\circ$$



Учет трения

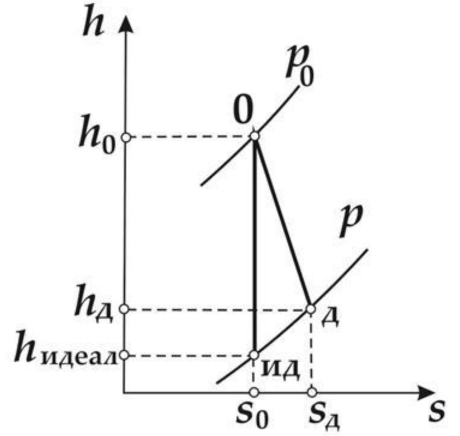
$$\varphi = \frac{c_д}{c_{идеал}}$$

$$\xi = \frac{h_д - h_{идеал}}{h_0 - h_{идеал}} = \frac{\Delta e_{потерь\ кинетической\ энергии}}{h_0 - h_{идеал}}$$

$$\Delta e_{потерь\ кинетической\ энергии} = \frac{c_{идеал}^2 - c_д^2}{2}$$

$$h_0 - h_{идеал} = \frac{c_{идеал}^2}{2}$$

$$\xi = 1 - \varphi^2$$



$$h_д = h_{идеал} + \xi \cdot \left(h_o - h_{идеал}\right)$$

Вводится коэффициент расхода $\mu = \frac{G_д}{G_{идеал}}$

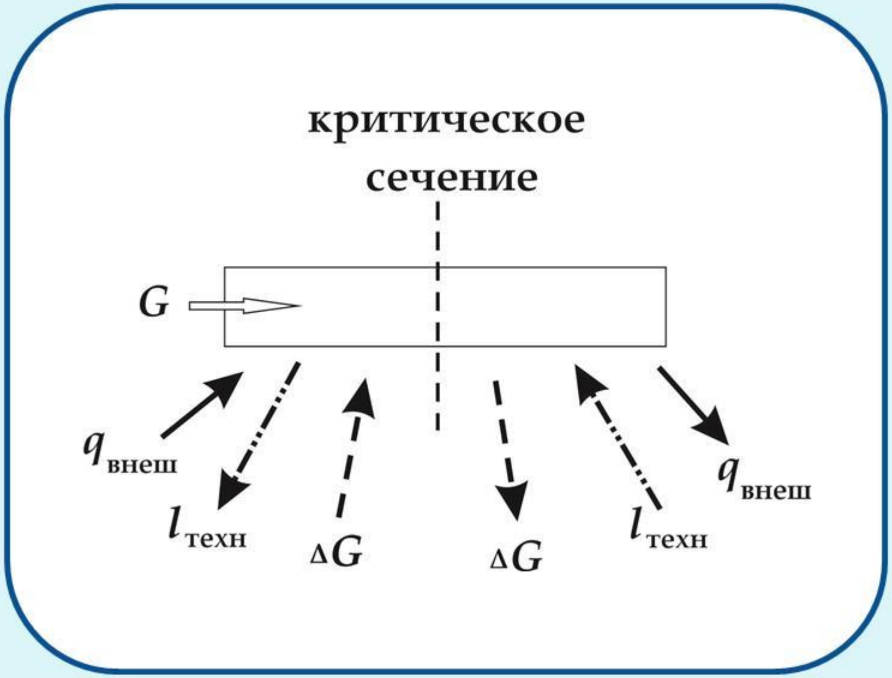
Общий случай переход через звуковую скорость. Закон обращения воздействий.

$$\left(M^2-1\right)\frac{dc}{c}=\frac{df}{f}-\frac{1}{vc_p}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dq_{\text{внеш}}-\frac{1}{a^2}dl_{\text{техн}}-\left[\frac{1}{vc_p}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p+\frac{1}{a^2}\right]dl_{\text{трен}}-\frac{g}{a^2}dz$$

Тепловое сопло с $q_{\text{внеш}}$

Механическое сопло с $l_{\text{техн}}$

Расходное сопло: $\left(M^2-1\right)\frac{dc}{c}=-\frac{dG}{G}$



Тема 9 (3 час, лекция 0.5·9 - 10 - 0.5·11)

Первый закон термодинамики для потока.

Лекция 11(первый час)

Процесс дросселирования

Уравнение процесса дросселирования. Техническое применение процесса дросселирования. Дросселирование идеального газа. Дросселирование водяного пара в *hs*- диаграмме. Потеря эксергии потока при дросселировании. Дифференциальное уравнение адиабатного дроссель – эффекта. Температура инверсии. Кривая инверсии.

Дросселирование. Эффект Джоуля—Томсона.

Эффект необратимого падения давления струи рабочего тела в процессе протекания через местное сопротивление (резкое сужения канала, поворот и т.п.) без совершения полезной (технической, внешней) работы называется **дросселированием**, или **мятием** потока.

Падение давления за местным сопротивлением обусловлено диссипацией энергии потока, расходуемой на преодоление этого местного сопротивления.

Рассматривается процесс течения газа (жидкости) через трубу, имеющую местное сопротивление, а сечение трубы до и после диафрагмы - одинаковое.

Скорость потока до и после диафрагмы считаем пренебрежимо малой (рассматривается существенно дозвуковой поток) по сравнению с энтальпией.

И изменением значения кинетической энергии потока по сравнению с его энтальпией можно пренебречь.

$$h = c_p T \approx (\underbrace{8.5\cdot 10^2}_{CO_2} \div \underbrace{1.5\cdot 10^4}_{H_2})\cdot(300\div 10^3) \approx (10^5 \div 10^7) - \text{для газов}$$

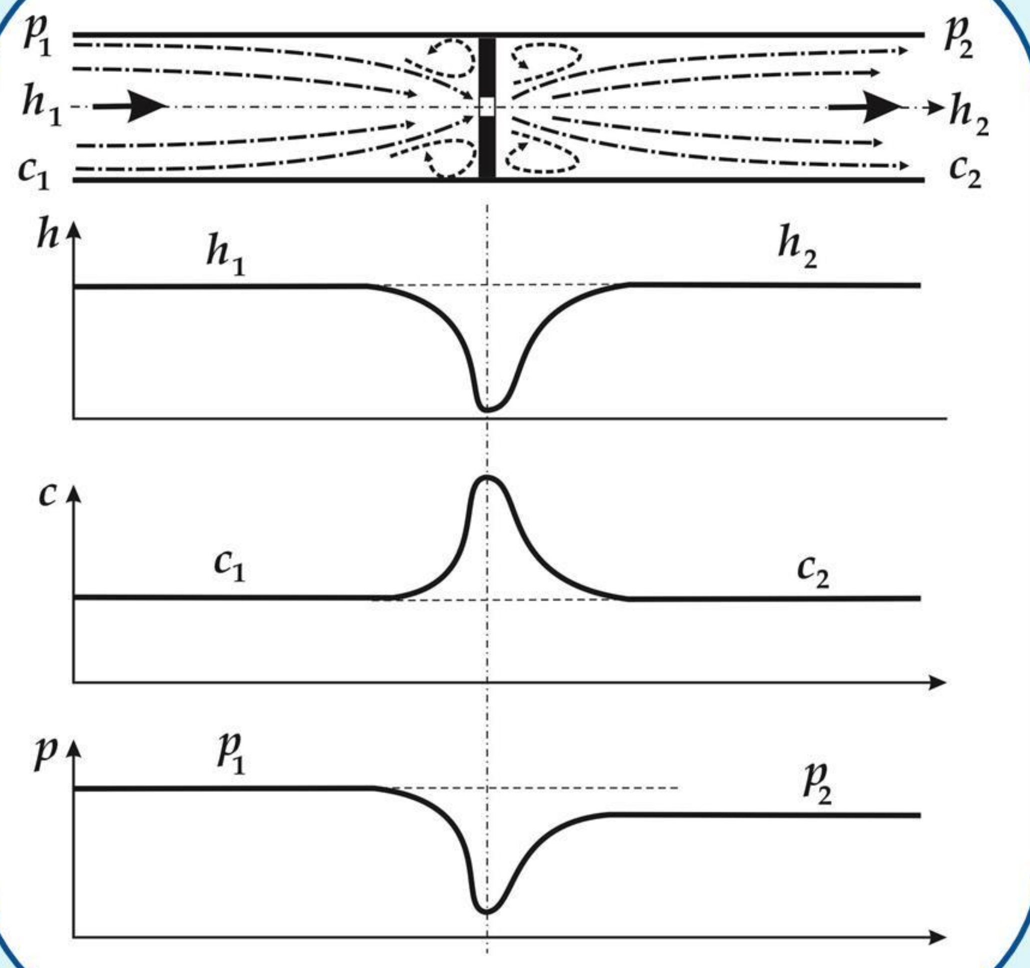
$$h \approx (10^5 \div 10^6) - \text{из таблиц для параметров воды и водяного пара}$$

Сравнимым с энтальпией значения кинетической энергии для газов обладают потоки со скоростями > 100 м/с и более. Эти случаи – не дросселирование. Для жидкостей из-за несжимаемости скорость при постоянном сечении постоянна.

Рассмотрим процесс:
Адиабатный
(не успевает обмениваться)
На одной высоте
(малая протяженность).
Для конечных разностей
(после выравнивания)

$$\Delta h + g\underbrace{\Delta z}_{\approx 0} + \underbrace{\Delta\frac{c^2}{2}}_{\approx 0} = \underbrace{\Delta q_{\text{внешняя}}}_{\approx 0} - \underbrace{\Delta l_{\text{т}}}_{\approx 0}$$

$$\boxed{h_1 = h_2}$$

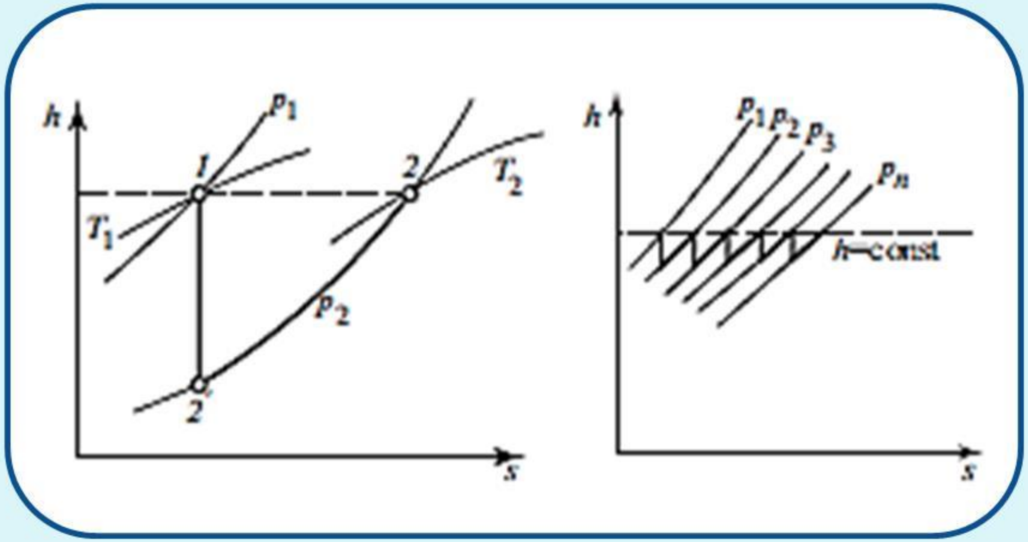


Поток за счет энтальпии производит работу по преодолению сопротивления.

$$-\Delta l_{\text{сопротивления преграды}} = \Delta q_{\text{сопротивления преграды}}$$

Теплота возвращается в поток и делает изменение энтальпии нулевым.

Невозможно представить обратный процесс – **стационарный** поток через **местное сопротивление** из зоны **низкого** давления в зону **высокого** давления.
В отличие от движения по **соплу** – там можно представить затекание в такое же сопло вплоть до **полной остановки**.



Поскольку процесс дросселирования явно необратим, энтропия газа (жидкости) в процессе дросселирования возрастает.

$$s(h,p_2)-s(h,p_1)=\int_{p_1}^{p_2}\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_h dp=-\int_{p_1}^{p_2}\frac{v}{T}dp$$

$$dh = Tds + vdp = c_p dT + \left[-T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v \right] dp = 0$$

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p} \quad \Rightarrow \text{для идеального газа} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = v \Rightarrow \alpha_h = 0$$

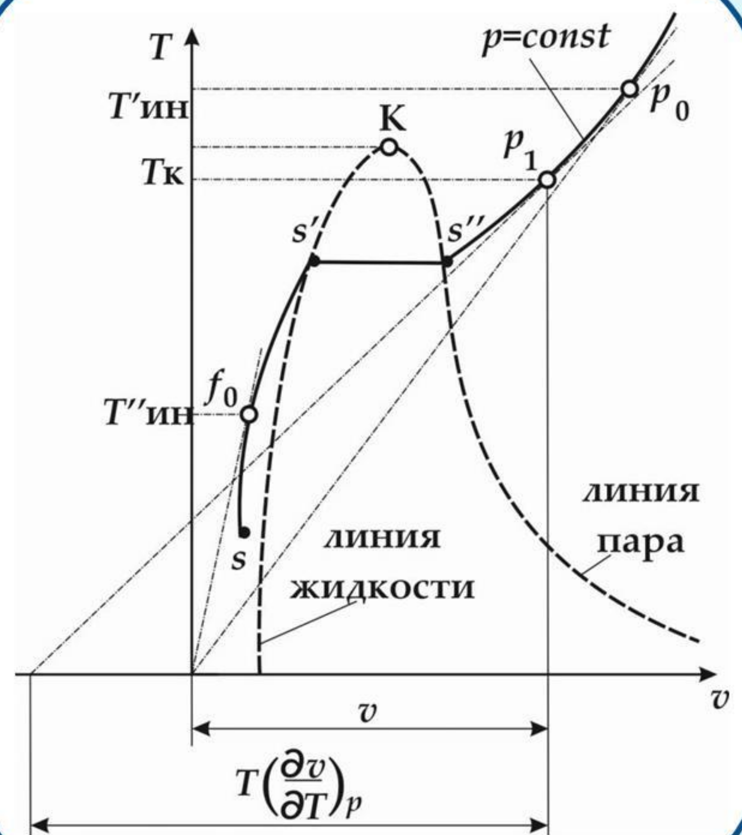
Коэффициент адиабатного дросселирования
или
дифференциальный дроссель - эффект

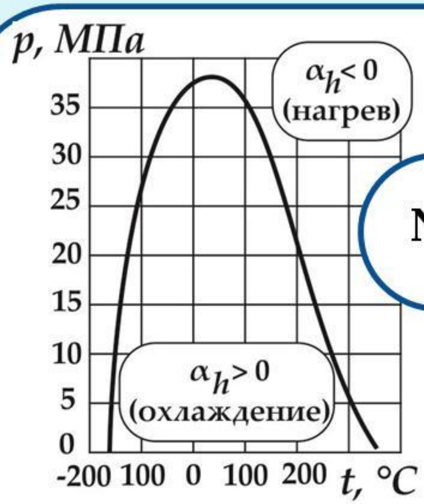
Джоулем и Томсоном в 1852 году

$$\alpha_h = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p}; \quad f(p,v,T) = 0 \text{ (Ур.сост.)}$$

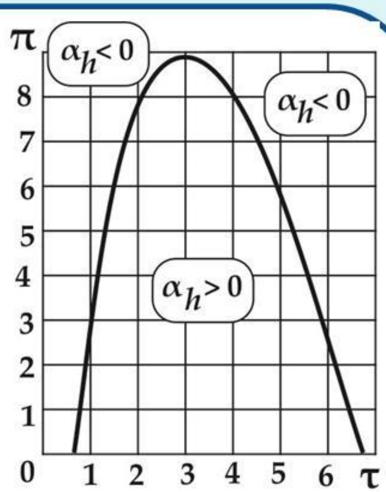
$c_p > 0 \Rightarrow$ знак α_h определяется $T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v$

$$\Delta T = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_h dp \text{ – интегральный дроссель-эффект}$$



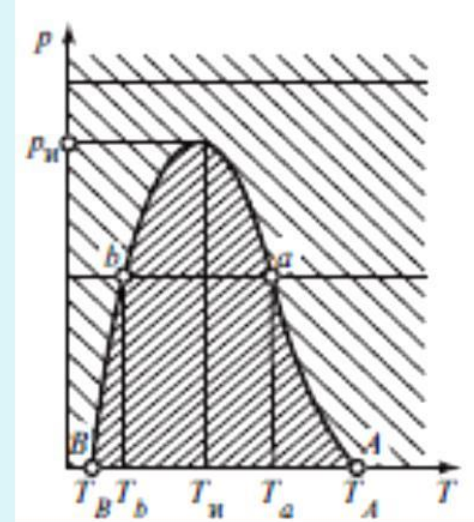


N_2



$\alpha_h = 0$ - точка инверсии

Точку максимума кривой инверсии называют **критической точкой инверсии**.



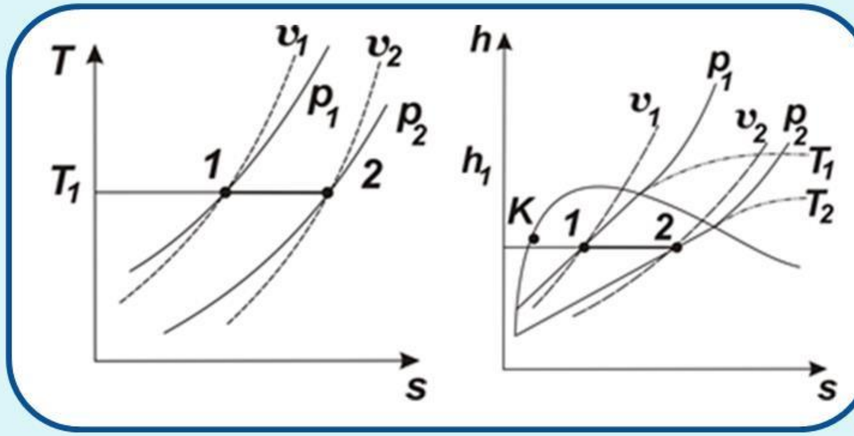
Как показывают расчеты, для ван-дер-ваальсова газа параметры критической точки инверсии таковы:

$$p_{\text{и}} = 9p_{\text{кр}}; \; T_{\text{и}} = 3T_{\text{кр}}; \; v_{\text{и}} = v_{\text{кр}};$$

Как показывают расчеты, для ван-дер-ваальсова газа.
Для реальных правая точка достаточно точно.

$$T_A = 6.75 \cdot T_{\text{кр}}; \; T_{\text{В}} = 0.75 \cdot T_{\text{кр}};$$

Эффективным способом охлаждения газов является процесс обратимого адиабатного, т.е. **изоэнтропного**, расширения (с отдачей внешней работы), представляет интерес сравнение этих двух способов охлаждения газов.



$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p dp$$

$$\alpha_s = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p}{c_p} \Rightarrow \alpha_s - \alpha_h = \frac{v}{c_p} \longrightarrow \alpha_s > \alpha_h$$

Если энтропия растет, а давление падает, то объем растет

Изменение температуры реальных веществ в результате адиабатного дросселирования объясняется энергетическим взаимодействием молекул.

$$u_2 - u_1 = p_1 v_1 - p_2 v_2 = \Delta u_к + \Delta u_п$$

При снижении давления в этом процессе происходит увеличение объема, что приводит к увеличению расстояния между молекулами, а следовательно, и к увеличению потенциальной составляющей внутренней энергии гравитационного их взаимодействия $\Delta u_п > 0$ (для идеальных газов $\Delta u_п = 0$).

$$\Delta u_к = -(\Delta u_п + p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

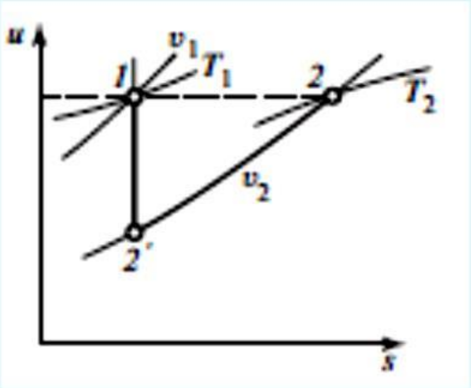
Для реальных газов и паров величина $\left(p_2 v_2 - p_1 v_1\right)$ или $(d(pv)/dp)_h$ характеризует их сжимаемость $-(dv/dp)_h$ по отношению к сжимаемости этих же идеальных газов.

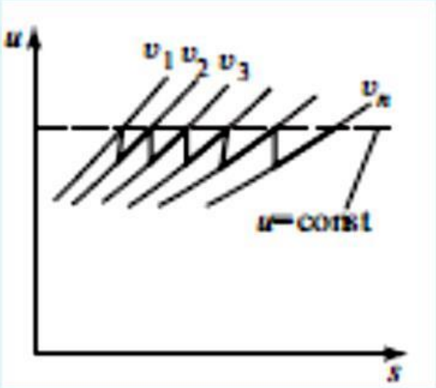
При $\left(p_2 v_2 - p_1 v_1\right) > 0$ – сжимаемость реальных газов меньше, чем идеальных, $\Delta u_п > 0$, следовательно $\Delta u_к < 0$, и температура в процессе дросселирования уменьшается.

В обратном случае сжимаемость реальных газов больше, чем идеальных, следовательно возможны ситуации, когда температура в процессе дросселирования будет увеличиваться, уменьшаться и быть неизменной.

Адиабатное расширение реального газа в вакуум
(процесс Джоуля)

$$\delta q = du + \delta w = du + pdv =$$
$$= du + 0 \cdot dv$$
$$du = 0$$





$$du = c_v dT + \left[T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v - p \right] dv$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_u = \frac{p - T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v}{c_v} \qquad T(u, v_2) - T(u, v_1) = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_u dv = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{p - T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v}{c_v} \right) \cdot dv$$

Если энтропия растет, то пропорционально падает эксергия

Снижение температуры хорошо, при регулировании плохо – эксергия падает.