Энергомашиностроение.
Э6

Лекция №28

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

- Схема задачи и основные термины.
- Вывод основного уравнения истечения (уравнения скорости истечения).
- Уравнения для адиабатного истечения парогазообразных тел.
- Исследование уравнений истечения.
- Определение критических скорости и расхода.
- Физический смысл критической скорости.
- Расширяющееся сопло (сопло Лаваля).
- Действительные скорость истечения и секундный расход.
- Дросселирование или мятие газов и паров.

Схема задачи и основные термины

Каналы, в которых движущийся газ увеличивает скорость с одновременным уменьшением давления, называются ***соплами;*** каналы, в которых скорость газа уменьшается, а давление возрастает, называются ***диффузорами***. ***Детандер*** (от франц. detendre - ослаблять) - поршневая или турбинная машина для охлаждения газа за счет его расширения с совершением внешней работы. Используются главным образом в установках для сжижения и разделения газов.

Имеется резервуар, в одной из стенок которого установлен насадок (рис. 1). Этим насадком резервуар сообщается с окружающей средой. В дальнейшем резервуар будем называть сосудом, а насадок — соплом. Если рабочее тело в сосуде имеет параметры p_1, υ_1, а давление в окружающей среде p_2, причем

$$\frac{p_2}{p_1} = \beta < 1 \qquad (p_2 < p_1)$$

то рабочее тело будет вытекать из сосуда в окружающую среду. Этот процесс называется ***истечением***. Истечение — широко распространенный процесс. В частности истечение является основным процессом в паровых и газовых турбинах и в реактивных двигателях.

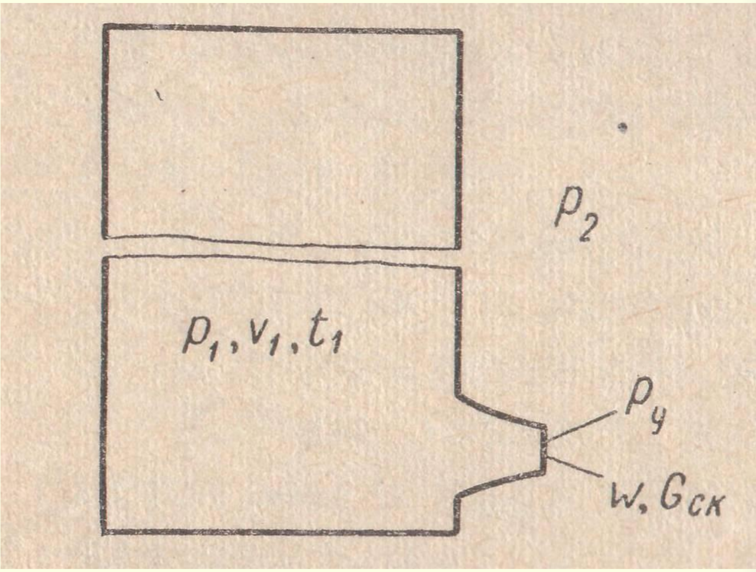

Рис. 1. Схема процесса истечения

Если при истечении давление в сосуде остается постоянным (p_1= const), то такой сосуд называют ***сосудом неограниченной ёмкости***. Если же p_1 при истечении падает, то говорят об истечении из сосуда ограниченной емкости. Скорость, которую рабочее тело приобретает в устье сопла, т. е. при выходе из него, называют ***<u>скоростью истечения.</u>*** Важной характеристикой процесса истечения, помимо скорости, является секундный расход рабочего тела, т. е. массовое количество его, выходящее из сопла за секунду.

Если в процессе истечения в устье сопла или в любом его сечении скорость не изменяется с течением времени, то такой процесс истечения называется ***установившимся***.

Противоположностью ему является так называемое ***неустановившееся истечение***, при котором скорость в устье сопла (и в любом другом его сечении) с течением времени изменяется. При установившемся истечении в любом сечении должны оставаться постоянными не только скорость, но и параметры рабочего тела.

Вывод основного уравнения истечения

$$p - dp - p = -dp$$

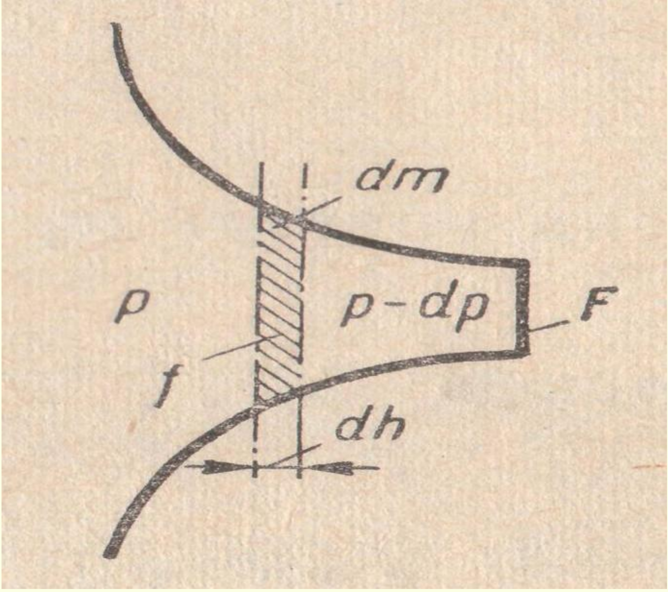

Рис. 2. Вывод основного уравнения истечения

По законам механики сила, действующая на тело, равна массе, умноженной на ускорение, т.е.

$$-fdp = dm\frac{dw}{d\tau}$$

где $\frac{dw}{d\tau}$ - ускорение (**w** — скорость потока, τ — время).

$$dm = fdh\frac{1}{\upsilon}$$

$$-fdp = fdh\frac{1}{\upsilon}\frac{dw}{d\tau}$$

$$-\upsilon dp = \frac{dh}{d\tau}dw$$

$$\frac{dh}{d\tau} = w$$

h — путь, τ— время. Тогда

$$-\upsilon dp = wdw$$

где **— υ**dp представляет собой положительный элемент располагаемой работы

$$dl_0 = wdw$$

$$dl_0 = d\left(\frac{w^2}{2}\right)$$

$$l_0 = \frac{1}{2}(w_2^2 - w_1^2)$$

Если $w_1 = 0$

$$l_0 = \frac{w_2^2}{2}$$

$$w_2 = \sqrt{2l_0} \qquad (1)$$

Уравнение для адиабатного истечения парогазообразных тел

$$l_0 = h_1 - h_2 \qquad (2)$$

$$w = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = 1{,}41\sqrt{h_1 - h_2} \qquad (3)$$

$$h_1 - h_2 = c_p(T_1 - T_2)$$

$$w = \sqrt{2c_p(T_1 - T_2)} \qquad (4)$$

$$\frac{c_p}{R} = \frac{k}{k-1}$$

$$w = \sqrt{2\frac{k}{k-1}R(T_1 - T_2)}$$

$$w = \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_1\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)} = \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1\upsilon_1\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)} \qquad (5)$$

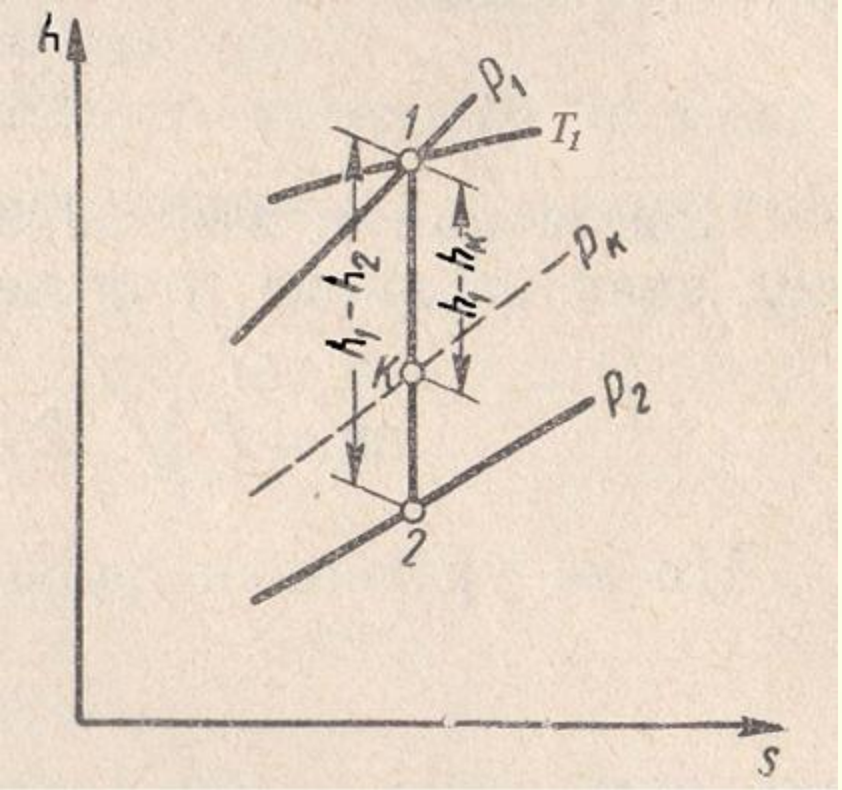

Рис. 3. Определение скорости истечения с помощью sh-диаграммы

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad (6)$$

$$w = \sqrt{2\frac{k}{k-1} p_1 \upsilon_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}$$

$$G_m = Fw\rho \qquad (7)$$

где F в $м^2$, w в $\frac{м}{с}$, ρ в $\frac{кг}{м^3}$ — некоторое сечение и взятые в нем скорость потока и плотность рабочего тела.

$$G_m = Fw\rho_2 = \frac{Fw}{\upsilon_2} \qquad (8)$$

$$G_m = F\sqrt{2\frac{k}{k-1} p_1 \upsilon_1 \frac{1}{\upsilon_2^2} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}$$

$$\upsilon_2 = \upsilon_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}}$$

$$G_m = F\sqrt{2\frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\upsilon_1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right)} \qquad \frac{кг}{с} \qquad (9)$$

Исследование уравнений истечения

$$G_m = F\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{\upsilon_1}\left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right)} \qquad (10)$$

На рис. 4 показан график зависимости m=f(β), полученный по уравнению (10). Это уравнение дает два нулевых значения расхода: при β=1 и при β=0; при некотором значении β_k, называемом ***критическим***, секундный расход достигает максимального значения. При уменьшении β в области от β=1 до β= β_k секундный расход увеличивается. Эта область значений называется подкритической. В области значений от β= β_k до β= 0 уменьшение отношения давлений приводит к уменьшению секундного расхода ***(надкритическая область).***

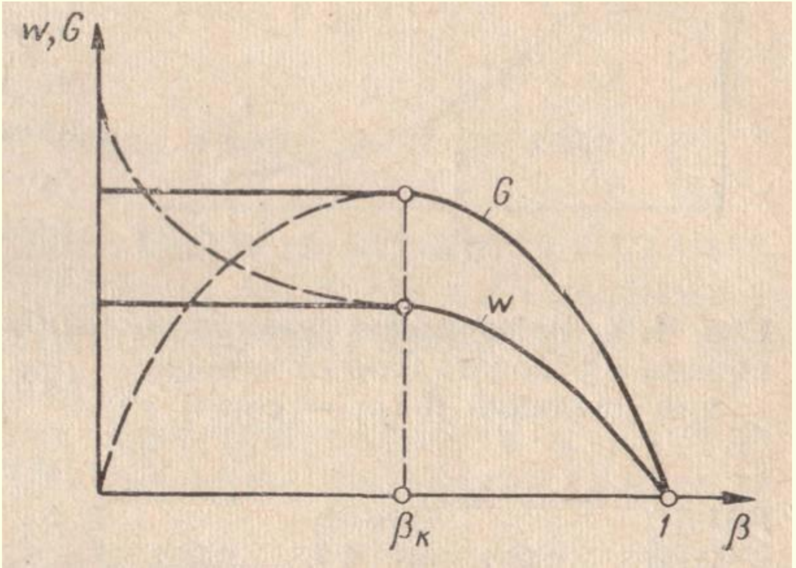

Рис. 4. Опытные и расчетные зависимости скорости истечения и секундного расхода

$$\beta = 0$$

$$w = \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1\upsilon_1}$$

Уравнение (10) для расхода ***было бы справедливо***, если бы газообразные тела были способны в надкритической области расшириться в сопле от состояния, определяемого параметрами в сосуде p_1, V_1, до давления p_2 в окружающей среде; при этом удельный объем в устье сопла изменялся бы в зависимости от β по закону адиабаты (рис. 5).

$$p_к = p_1\beta_к \qquad (11)$$

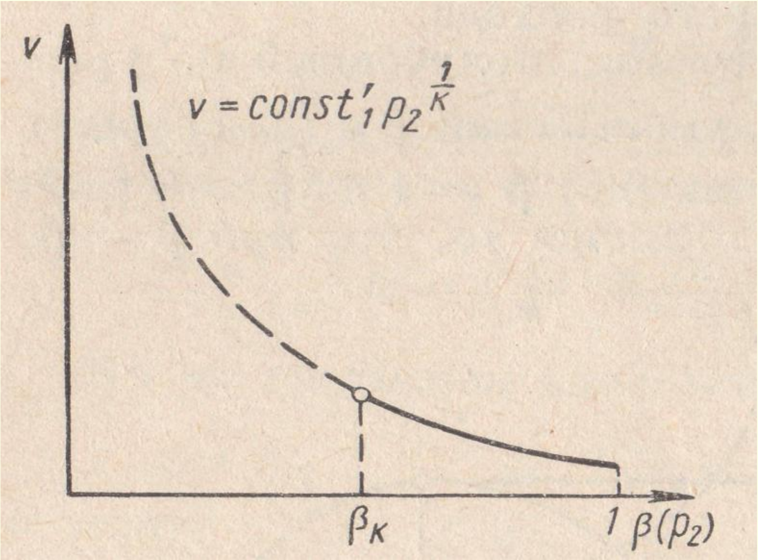

Рис. 5. Зависимость удельного объема рабочего тела от отношения давления

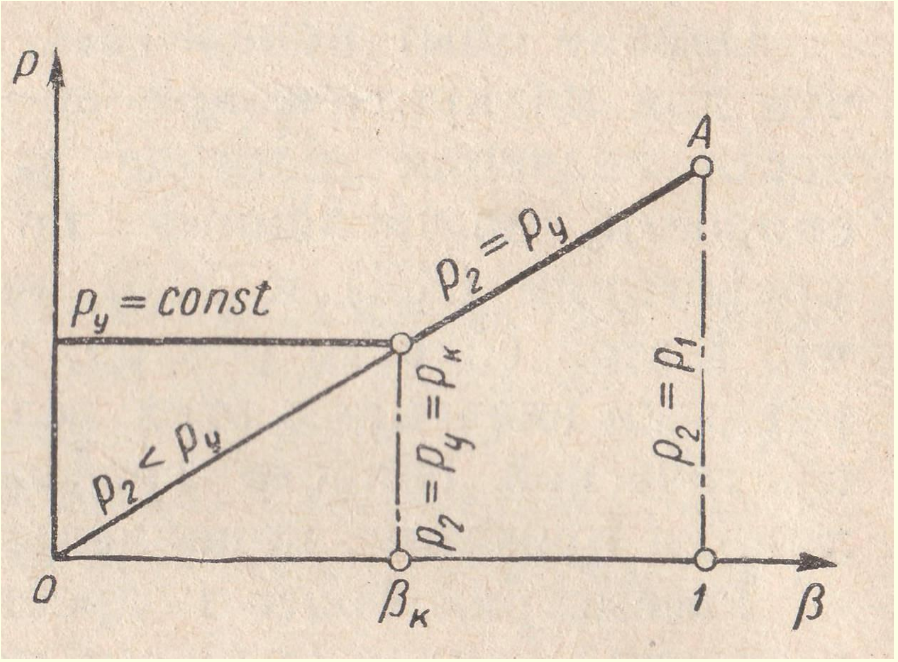

Рис. 6. Зависимость отношения давления окружающей среды к давлению в устье сопла от бета при p_1=const

$$\frac{p_2}{p_1} = \beta_к$$

Особенность парогазообразных тел, что они в устье суживающегося сопла не могут принять значения давления, меньшего критического, и является единственной причиной постоянства скорости и расхода в надкритической области (рис. 4).

Определение критических скорости и расхода

Если провести такое графическое исследование уравнения расхода (10), то можно установить, что β имеет различное значение для различных газов, но для большинства из них $\beta_k = 0.5$.

$$\beta_\kappa = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad (12)$$

$$w_\kappa = \sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1\upsilon_1(1-(\frac{2}{k+1})^{\frac{k}{k-1}\frac{k-1}{k}})}$$

$$w_\kappa = \sqrt{2\frac{k}{k+1}p_1\upsilon_1} \qquad (13)$$

$$w_\kappa = \psi\sqrt{p_1\upsilon_1} \qquad (14)$$

Для идеального газа с постоянной теплоемкостью	k	β_k	ψ	φ
одноатомные газы	1.67	0.482	3.52	2.29
двухатомные газы	1.4	0.528	3.38	2.14
трехатомные газы	1.29	0.546	3.33	2.09

$$G_{m\max} = F\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{\upsilon_1}((\frac{2}{k+1})^{\frac{k}{k-1}\frac{2}{k}} - (\frac{2}{k+1})^{\frac{k}{k-1}\frac{k+1}{k}})}$$

$$G_{m\max} = F\sqrt{2\frac{k}{k-1}((\frac{2}{k+1})^{\frac{2}{k-1}} - (\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k-1}})}\sqrt{\frac{p_1}{\upsilon_1}}$$

$$G_{m\max} = F\varphi\sqrt{\frac{p_1}{\upsilon_1}}$$

$$\psi = \sqrt{2\frac{k}{k+1}}$$

$$w_k = \psi\sqrt{RT_1} = \psi^{'}\sqrt{T_1} \qquad (15)$$

$$w_k = 1.41\sqrt{h_1 - h_k} \qquad (16)$$

Физический смысл критической скорости

$$w_к = \sqrt{2\frac{k}{k+1}p_1\upsilon_1} \qquad p_1\upsilon_1^k = p_к\upsilon_к^k$$

$$\upsilon_1 = \upsilon_к\left(\frac{p_к}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} \qquad (17)$$

$$\frac{p_к}{p_1} = \beta_к = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad \upsilon_1 = \upsilon_к\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}\frac{1}{k}} = \upsilon_к\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$\left(\frac{p_к}{p_1}\right) = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$p_1 = p_к\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad (18)$$

$$w_к = \sqrt{kp_к\upsilon_к} = \sqrt{kRT} = a \qquad (19)$$

Из физики известно, что таким образом выражается скорость звука в среде с параметрами p_k, υ_k. Значит, в устье суживающегося или цилиндрического сопла при критическом режиме истечения устанавливается скорость, равная местной скорости звука. На этом основании часто критическую скорость называют ***звуковой.***

Расширяющееся сопло (сопло Лаваля)

При истечении газа из суживающегося сопла при условии, когда $p_2<p_k$ работоспособность потока будет в координатных осях *vp* определяться площадью 12'ka (рис. 6). Если бы газ смог расшириться до давления p_2 среды, то в этом случае его работоспособность, выражаемая пл.12ba, была бы больше. Но для этого необходимо, чтобы скорость на выходе из сопла стала больше звуковой, чего в суживающемся сопле или цилиндрической насадке достигнуть невозможно.

Если изменить определенным образом продольный профиль сопла, по которому движется газ, то можно в нем обеспечить полное расширение газа до давления среды даже в том случае, если $p_2<p_k$. При этом газ из него будет вытекать со сверхзвуковой скоростью.

Сопло, обеспечивающее такие условия истечения, было предложено и выполнено впервые шведским инженером Лавалем и получило поэтому название

сопла Лаваля.

Минимальное сечение сопла Лаваля, в котором скорость, а также давление и все другие параметры парогазообразных тел достигают критических значений, называется ***критическим сечением.***

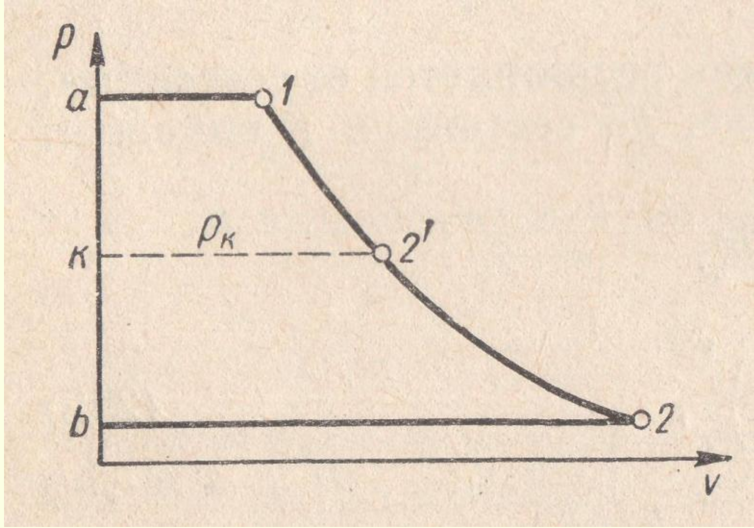

Рис. 7. Располагаемая работа, превращаемая в кинетическую энергию вытекающего газа (пара) до критического сечения сопла и после него

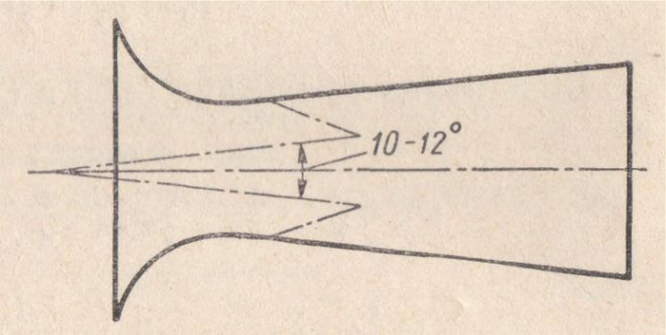

Рис. 8. Сопло Лаваля

Действительные скорость истечения и секундный расход

В проведенном выше вычислении скорости истечения и секундного расхода предполагалось, что сопло не оказывает никакого сопротивления протекающему по нему телу.

В действительности движение газа по каналу всегда сопровождается трением его о стенки. Кроме того, в реальном потоке имеется внутреннее вязкостное трение отдельных струек потока между собой. Вязкостное трение обусловливается тем, что в реальном потоке скорости газа по сечению неодинаковы. В центре сечения скорость будет максимальной, а вблизи стенки минимальной. Наличие трения требует затраты части энергии потока на его преодоление.

В результате скорость течения по соплу и скорость истечения будут меньше тех, которые получились бы при вычислении их по ранее выведенным уравнениям, справедливым для идеального потока без наличия трения. Такие скорости называют ***теоретическими скоростями истечения.***

Отношение действительной скорости истечения к теоретической называют ***коэффициентом скорости или скоростным коэффициентом:***

$$\varphi' = \frac{w_\partial}{w} \qquad (20)$$

$$w_\partial = 1{,}41\varphi'\sqrt{h_1 - h_2} \qquad (21)$$

$$w_\partial = \varphi'\sqrt{2\frac{k}{k-1}p_1\upsilon_1\left(1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} \qquad (22)$$

$$m_{\partial} = \frac{F w_{\partial}}{\upsilon_{2\partial}}$$

где $\upsilon_{2\partial}$ - удельный объём газа в выходном сечении реального сопла.

$$w_{\partial} = 1{,}41\sqrt{h_1 - h_{2\partial}} \qquad (23)$$

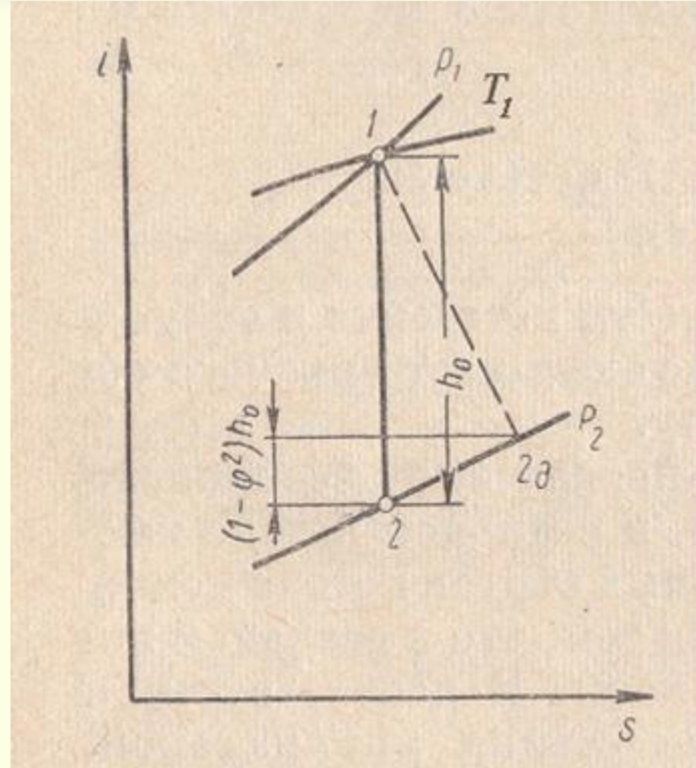

Рис. 9. Изображения процесса расширения рабочего тела в сопле без трения и условное изображения процесса расширения в сопле с трением

$$\varphi'^2 (h_1 - h_2) = h_1 - h_{2\partial}$$

$$\varphi'^2 h_0 = h_0 - h_{2\partial} + h_2$$

$$h_{2\partial} = h_2 + (1 - \varphi'^2) h_0$$

Отношение $\dfrac{(h_1 - h_{2\partial})}{h_0} = \varphi'^2$ часто называют кпд сопла.

Подвод теплоты к потоку газа позволяет создать так называемое ***тепловое сопло***, в котором принципиально возможен непрерывный переход от дозвукового движения газа к сверхзвуковому за счёт изменения знака теплового воздействия.

Механическое сопло представляет собой теплоизолированную трубу постоянного сечения, в которой поток, движущийся без трения, совершает работу на ряде турбин в дозвуковой части.

Расчетное сопло – это сопло Лаваля, в котором площадь выходного сечения сопла выбирается из условия достижения в этом сечении давления газа, равного давлению окружающий среды.

Дросселирование или мятие газов и паров

Дросселированием или мятием называется ***процесс снижения давления пара или газа при движении его через какое-либо «местное» сопротивление в канале, трубопроводе или в специальном устройстве*** (вентили, задвижки, шайбы и т. д.).

Обозначим в сечении *I* давление рабочего тела p_1 и скорость w_1, в сечении *II* – давление $p_2 < p_1$ и скорость w_2. Разность давлений $\Delta p = p_2 - p_1$ иногда называют ***величиной мятия или дросселирования***. При дросселировании, несмотря на то, что рабочее тело расширяется, оно ***не производит внешней работы***.

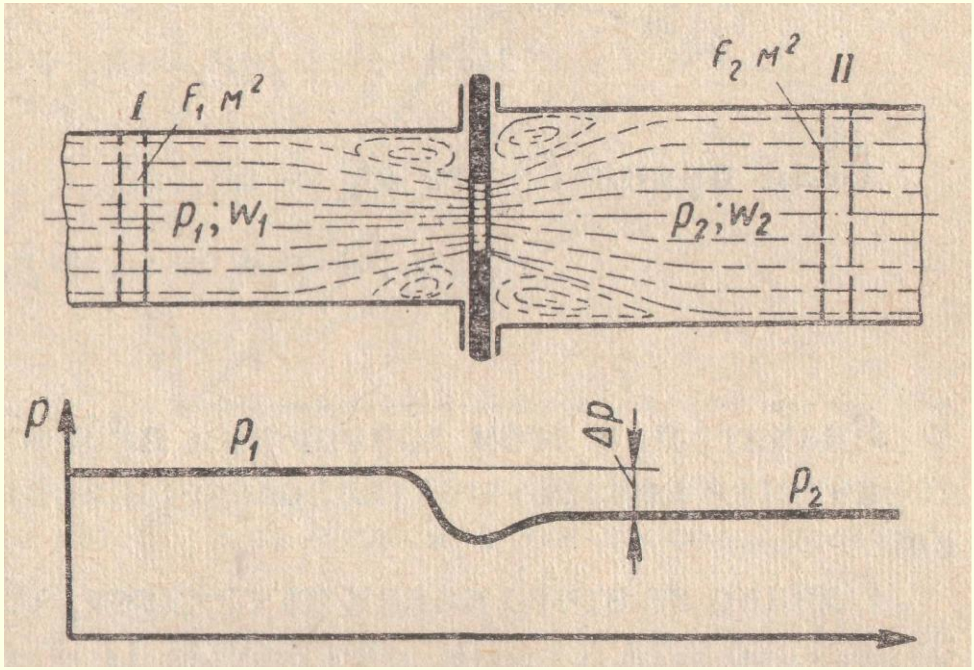

Рис. 10. Схема процесса дросселирования

$$\left(u_1 + \frac{w_1^2}{2}\right) - \left(u_2 + \frac{w_2^2}{2}\right) = p_2\upsilon_2 - p_1\upsilon_1$$

$$u_1 + \frac{w_1^2}{2} + p_1\upsilon_1 = u_2 + \frac{w_2^2}{2} + p_2\upsilon_2 \qquad (24)$$

Если принять $w_1 = w_2$, то

$$\left.\begin{aligned} u_1 + p_1\upsilon_1 = u_2 + p_2\upsilon_2 \\ h_1 = h_2 \end{aligned}\right\} \qquad (25)$$

В результате дросселирования идеального газа температура его не будет изменяться, что следует из равенства энтальпии дросселируемого газа в начале и конце процесса. При дросселировании ***реального газа***, как показывают опыт и теория, температура его может возрастать, уменьшаться и, в частности, оставаться без изменения. В последнем случае температуру газа называют **температурой инверсии**.

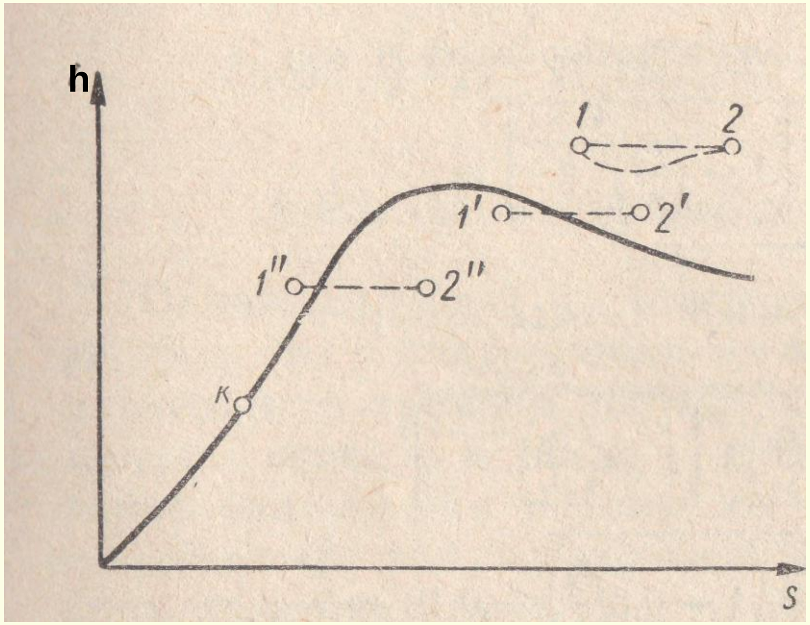

Рис. 11. Различные случаи процесса дросселирования и их условное изображение в координатах sh

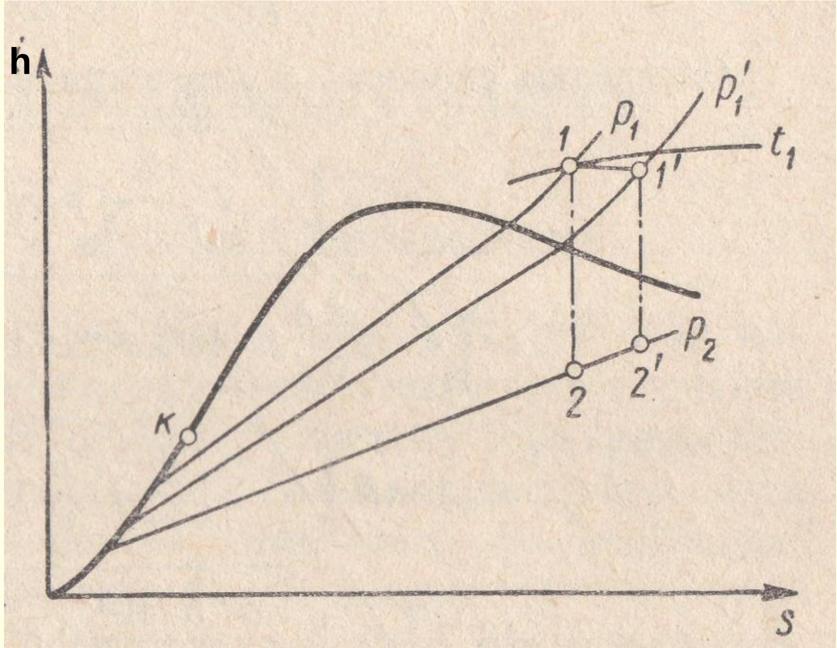

Рис. 12. Снижение работоспособности пара при его дросселировании

Контрольные вопросы

- Основные термины
- Вывод основного уравнения истечения (уравнения скорости истечения)
- Уравнения для адиабатного истечения парогазообразных тел
- Исследование уравнений истечения
- Определение критических скорости и расхода
- Физический смысл критической скорости
- Расширяющееся сопло (сопло Лаваля)
- Действительные скорость истечения и секундный расход
- Дросселирование или мятие газов и паров