

# ТНис 06

- Влажный воздух
- I закон термодинамики для потока
- Истечение газов и паров

# Влажный воздух

Влажный воздух – это смесь сухого воздуха и водяного пара.

По закону Дальтона для смеси газов

$$B = p_v + p_n,$$

где  $B$  – барометрическое (атмосферное) давление,

$p_v$  и  $p_n$  – соответственно парциальные давления сухого воздуха и водяного пара.

При:  $p_n < p_n$  – воздух влажный, ненасыщенный;

$p_n = p_n$  – воздух влажный насыщенный водяным паром.

# Абсолютная и относительная влажности воздуха

Абсолютная влажность воздуха – это масса пара в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха, что совпадает с определением плотности пара при его парциальном давлении  $\rho_p$ , кг/м<sup>3</sup>.

Относительная влажность воздуха – это отношение его абсолютной влажности к максимально возможной в состоянии насыщения  $\varphi = \rho_p / \rho_H$ .

С учетом того, что  $\rho_p / \rho_H = v_H / v_p$ , а по закону Бойля-Мариотта  $\rho_p v_p = \rho_H v_H$ , имеем:

$$\varphi = \frac{\rho_i}{\rho_i} = \frac{v_i}{v_i} = \frac{P_i}{P_i}$$

# Влагосодержание влажного воздуха

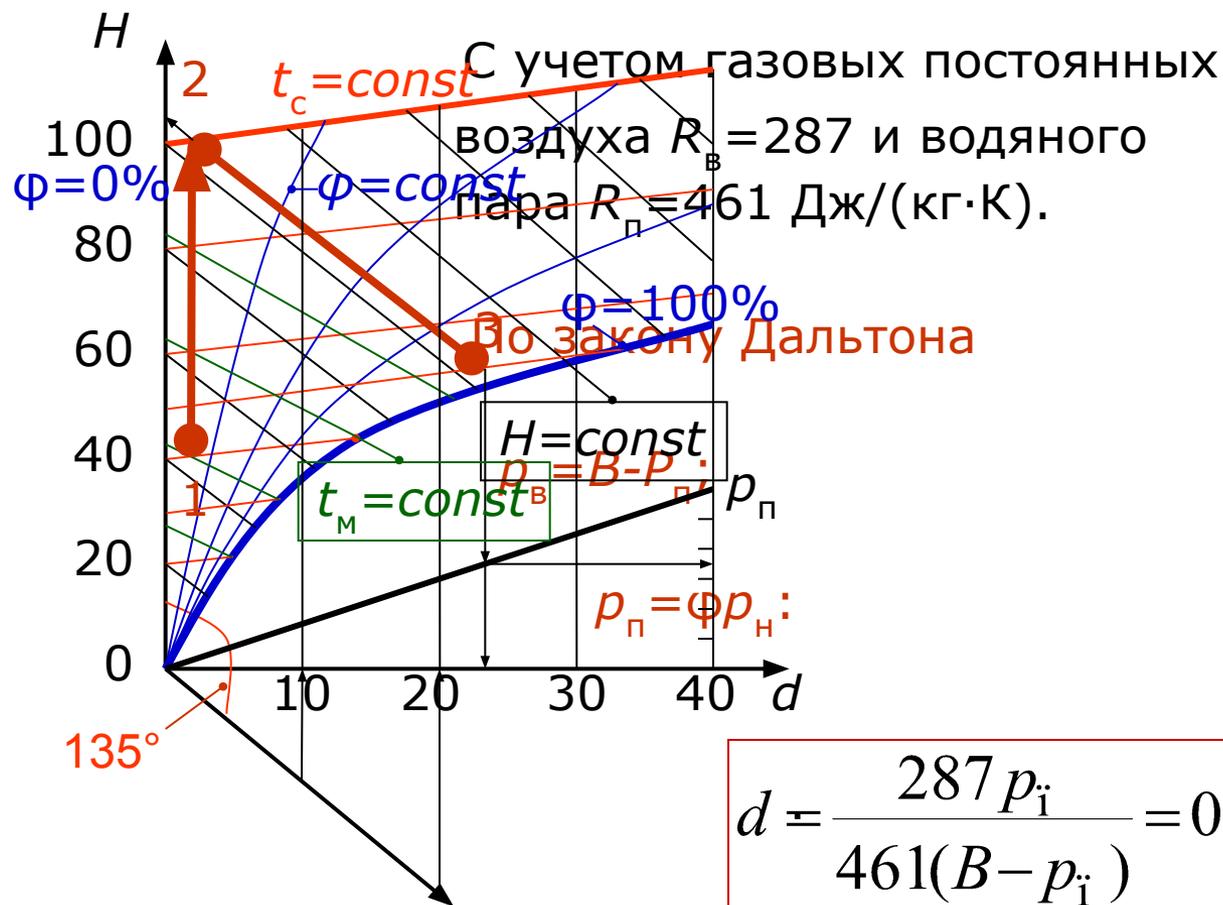
**Влагосодержание воздуха** – это масса водяного пара, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха  $d = m_{\text{п}} / m_{\text{в}}$ .

Запишем уравнение Клапейрона для водяного пара и сухого воздуха:  $p_{\text{п}} V = m_{\text{п}} R_{\text{п}} T$ ;  $p_{\text{в}} V = m_{\text{в}} R_{\text{в}} T$ .

Поделив уравнения Клапейрона и разрешив относительно влагосодержания, имеем:

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{в}}} = \frac{R_{\text{в}} p_{\text{п}}}{R_{\text{п}} p_{\text{в}}}$$

# *Hd*-диаграмма влажного воздуха



# К $h$ -диаграмме

$h$ -диаграмма была предложена профессором Л.К. Рамзиным в 1918 году.

Она удобна для исследования процессов влажного воздуха в кондиционерах, сушильных установках и т.д.

Оси ординат и абсцисс в ней находятся под углом  $135^\circ$ .

Но значения влагосодержаний  $d$ , г. пара/(кг сух. возд.), для удобства, сносятся на горизонталь.

# Процессы в $Hd$ -диаграмме

Цифры на оси ординат – это температуры сухого воздуха, °С и энтальпии влажного воздуха  $H=h_v+dh_{п}$ , кДж/(кг сух. возд.)

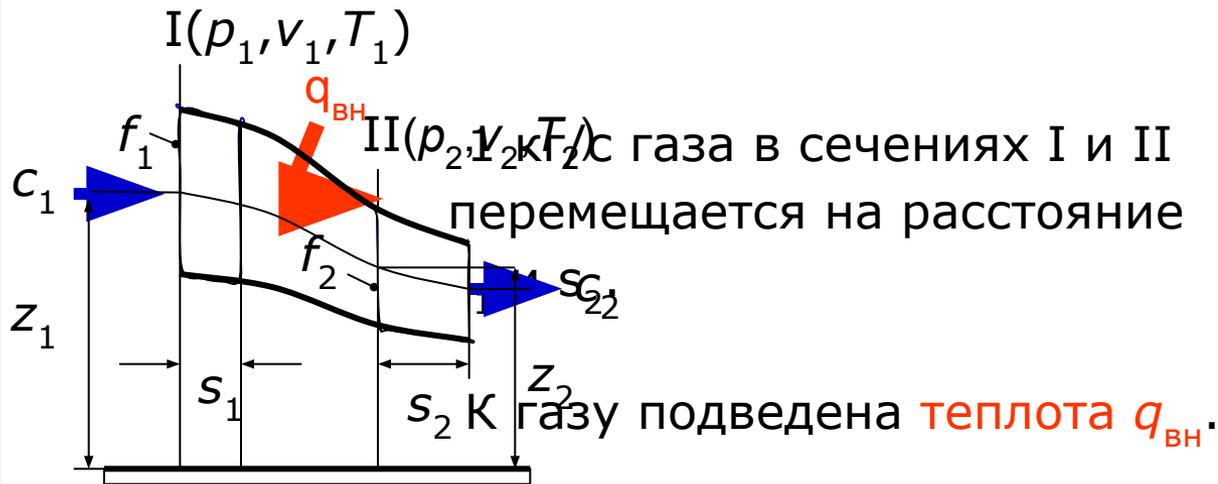
Относительная влажность влажного воздуха:

- на оси ординат  $\varphi=0\%$  – сухой воздух,
- на линии  $\varphi=100\%$  – влажный, насыщенный воздух.

Процессы:

1-2 нагрев воздуха в калорифере при  $d=const$ ,  
2-3 сушка материала воздухом при  $H=const$ .

# I закон термодинамики для потока



По I закону термодинамики

$$q = q_{вн} + q_{тр} = \Delta u + l, \quad (1)$$

где  $q_{тр}$  – потери на трение, перешедшие в теплоту.

# Работа проталкивания

Для ввода 1 кг/с в сечение I, надо совершить работу

$$l_I = -p_1 f_1 s_1 = -p_1 v_1.$$

В сечении II газ совершит работу

$$l_{II} = p_2 f_2 s_2 = p_2 v_2.$$

Их разность – работа проталкивания:

$$l_1 = l_{II} - l_I = p_2 v_2 - p_1 v_1. \quad (2)$$

# Составляющие работы

Работа на изменение кинетической энергии потока:

$$l_2 = c_2^2/2 - c_1^2/2, \quad (3)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – скорости газа в сечениях I и II, м/с.

Работа на изменение потенциальной энергии газа:

$$l_3 = g(z_2 - z_1), \quad (4)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – высота осей канала над горизонталью, м.

# Последние составляющие работы

В общем случае, между сечениями I и II газ может совершать **техническую работу**  $l_{\tau}$ ; (5)

для реального газа надо учесть и **потери на трение**  $l_{\text{тр}}$ . (6)

После подстановки выражений (2)-(6) в (1) имеем:

$$q = q_{\text{âí}} + q_{\text{òð}} = (u_2 - u_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + \left( \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} \right) + g(z_2 - z_1) + l_{\text{ò}} + l_{\text{òð}}$$

# Уравнение I закона термодинамики для потока

Так как  $l_{\text{тр}} = q_{\text{тр}}$ , то они сокращаются.

Перегруппируем члены полученного уравнения;  
учтем, что

$$u_2 + p_2 v_2 = h_2 \text{ и}$$

$$u_1 + p_1 v_1 = h_1:$$

$$q = (h_2 - h_1) + \left( \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} \right) + g(z_2 - z_1) + l_0$$

Запишем это выражение в дифференциальной форме для потока, не совершающего техническую работу:

$$dq = dh + cdc + gdz.$$

# Изменения потенциальной и кинетической энергий газа

Для газов  $gdz \ll cdc$ , то есть можно считать  $gdz \approx 0$ , тогда выражение I закона термодинамики для обратимого и необратимого адиабатного потока ( $dq=0$ ):

$$cdc = -dh. \quad (7)$$

Для обратимого, адиабатного изменения состояния рабочего тела воспользуемся первым законом термодинамики.

# I закон термодинамики для обратимого, адиабатного потока

Аналитическое выражение I закона термодинамики для обратимого, адиабатного изменения состояния:

$$dq=0 = du+pdv, \text{ откуда } du=-pdv.$$

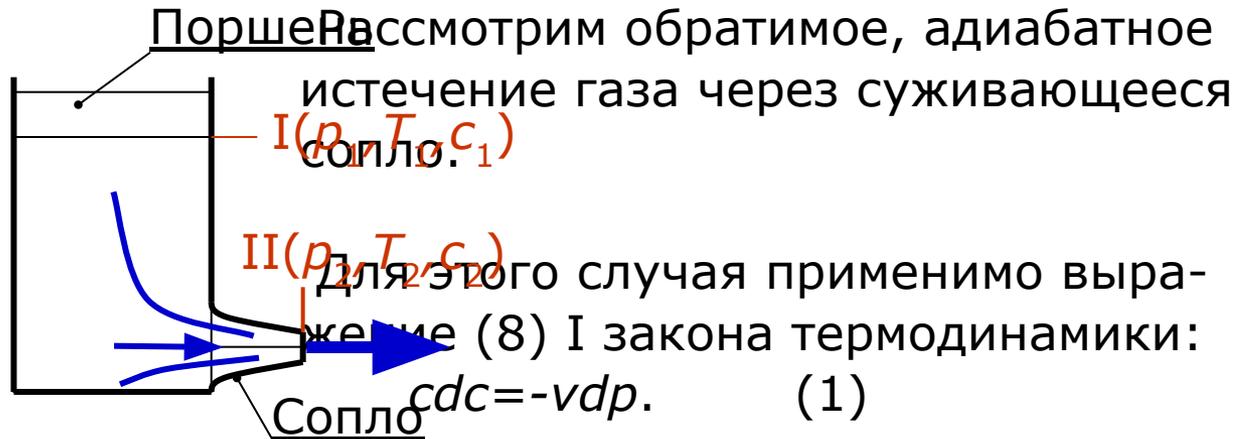
Подставим это выражение в (7):

$$cdc=-d(u+pv)=-du-pdv-vdp=pdv-pdv-vdp=-vdp.$$

Итак, выражение I закона термодинамики для обратимого адиабатного потока:

$$cdc=-vdp. \quad (8)$$

# Истечение газов и паров через суживающиеся сопла



или в интегральной форме:

$$\frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} = - \int_{p_1}^{p_2} v dp = \int_{p_1}^{p_2} v dp$$

Так как  $c_1 \ll c_2$ , то примем:  $c_1 \approx 0$ ;  $c_2 = c$  – скорость истечения газа.

# Соотношения между параметрами

Для адиабатного процесса:

$$p_1 v_1^k = p v^k,$$

или  $p_1^{1/k} v_1 = p^{1/k} v.$

Выразим удельный объем из уравнения адиабаты и подставим под знак интеграла:

$$\frac{c^2}{2} = p_1^{1/k} v_1 \int_{p_2}^{p_1} p^{-1/k} dp = \frac{k}{k-1} p_1^{1/k} v_1 (p_1^{(k-1)/k} - p_2^{(k-1)/k})$$

# Скорость истечения газа

Вынесем за скобки первый член и найдем скорость обратимого истечения газа:

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

Для установившегося течения массовый расход газа является постоянным, то есть его уравнение неразрывности для выходного сечения сопла, кг/с:

$$m = c f / v_2 = \text{const.} \quad (3)$$

# Массовый расход газа

При адиабатном истечении

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k, \text{ откуда } v_2 = v_1 (p_1/p_2)^{1/k}. \quad (4)$$

Подставляем (4) и (2) в (3):

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

$$m = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{v_1^2} \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k+1)/k} \right]} \quad (6)$$

# К гипотезе Сен-Венана и Вентцеля



$$p_2/p_1 = \beta,$$

тогда

$$[\beta^{2/k} - \beta^{(k+1)/k}] = var.$$

При

$$\beta = 0 \text{ и } \beta = 1 \quad m = 0.$$

# Исследование на экстремум

Чтобы найти  $m_{max}$ , надо исследовать функцию на экстремум, то есть:

$$\frac{\partial}{\partial \beta} (\beta^{2/k} - \beta^{(k+1)/k}) = \frac{2}{k} \beta^{(2-k)/k} - \frac{k+1}{k} \beta^{1/k} = 0$$

Поделим выражение на  $\beta^{(2-k)/k}(k+1)/k$ ,

получим

$$2/(k+1) = \beta_{кр}^{(k-1)/k},$$

откуда

$$\beta_{\epsilon\delta} = \frac{\delta_{\epsilon\delta}}{\delta_1} = \left( \frac{27}{k+1} \right)^{k/(k-1)}$$

# Критическое отношение давлений

Если в выражение (7) для  $\beta_{кр}$  подставить значения показателей адиабаты  $k$  газов,

то получим:

- 1-атомные газы  $k=1,67$ ;  $\beta_{кр}=0,49$ ;
- 2-атомные газы  $k=1,41$ ;  $\beta_{кр}=0,528$ ;
- 3-атомные газы  $k=1,29$ ;  $\beta_{кр}=0,546$ .

# Критическая скорость истечения

Подставив  $\beta_{кр}$  в формулу (2), получим критическую скорость истечения:

$$c_{\dot{\epsilon}\delta} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1} \quad (8)$$

Если в (8) подставить

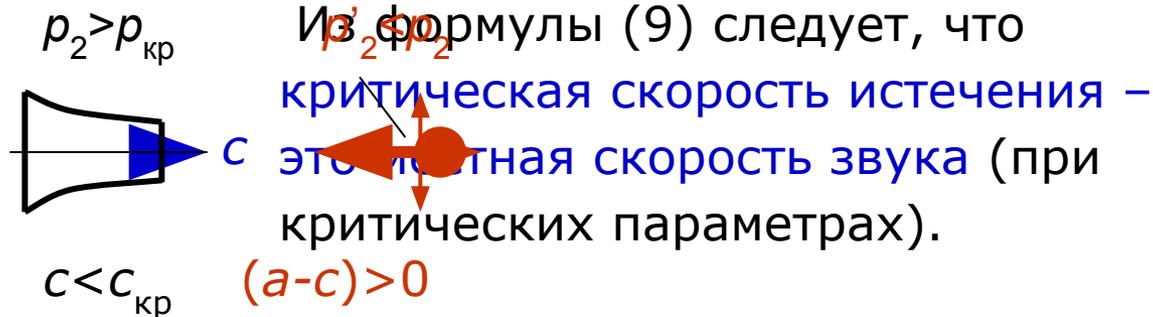
$$p_1 = p_{кр} / \beta_{кр}; \quad v_1 = v_{кр} \beta_{кр}^{1/k},$$

то:

$$c_{\dot{\epsilon}\delta} = \sqrt{k p_{\dot{\epsilon}\delta} v_{\dot{\epsilon}\delta}} \quad (9)$$

# Гипотеза Сен-Венана и Вентцеля

- $c < c_{кр}$



Гипотеза Сен-Венана и Вентцеля:

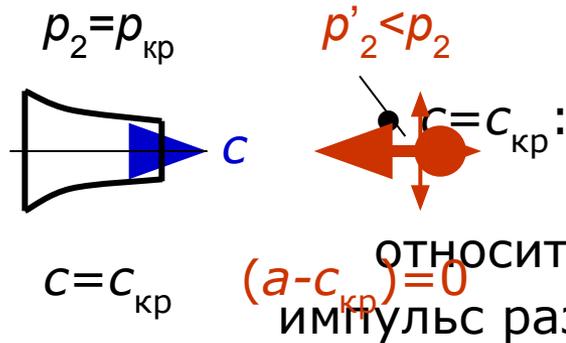
- $c < c_{кр}$ : импульс понижения давления среды приближается к соплу с относительной скоростью

$$(a-c) > 0.$$

Через некоторое время устанавливается скорость истечения  $c' > c$ ;

# Гипотеза Сен-Венана и Вентцеля

- $c = c_{кр}$

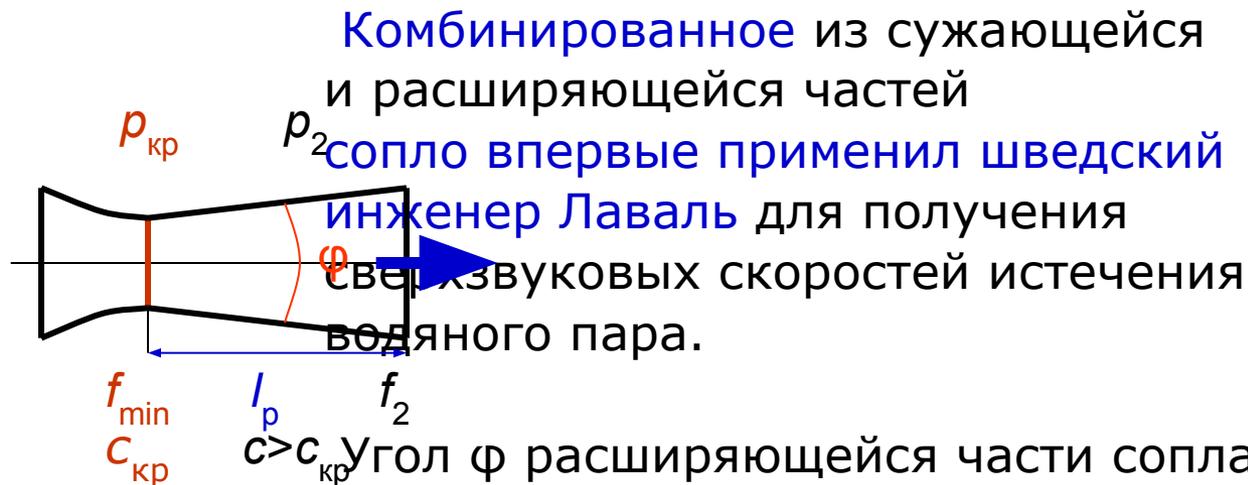


относительная скорость  $(a - c_{кр}) = 0$ ;  
 не дойдет до выходного сечения сопла; скорость истечения  
 остается критической.

Если подставить (7) в (6), получим максимальный расход  
 газа через сопло:

$$m_{\max} = f_{\min} \sqrt{\frac{10k}{k+1} \frac{p_1}{v_1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{2/(k-1)}}$$

# Комбинированное сопло (Лавалья)



Угол  $\varphi$  расширяющейся части сопла не должен превышать  $12^\circ$ , чтобы получить сверхзвуковые скорости истечения.

Длина расширяющейся части сопла

$$l_p = (d_2 - d_{min}) / 2 \operatorname{tg}(\varphi / 2).$$

# Режимы истечения

Отношение $\beta$	Суживающееся сопло	Сопло Лавала
$\beta > \beta_{кр}$	$c < c_{кр}$	$c < c_{кр}$ ;
$\beta = \beta_{кр}$	$c = c_{кр}$	$c = c_{кр}$ ;
$\beta < \beta_{кр}$	$c = c_{кр}$	$c > c_{кр}$ .

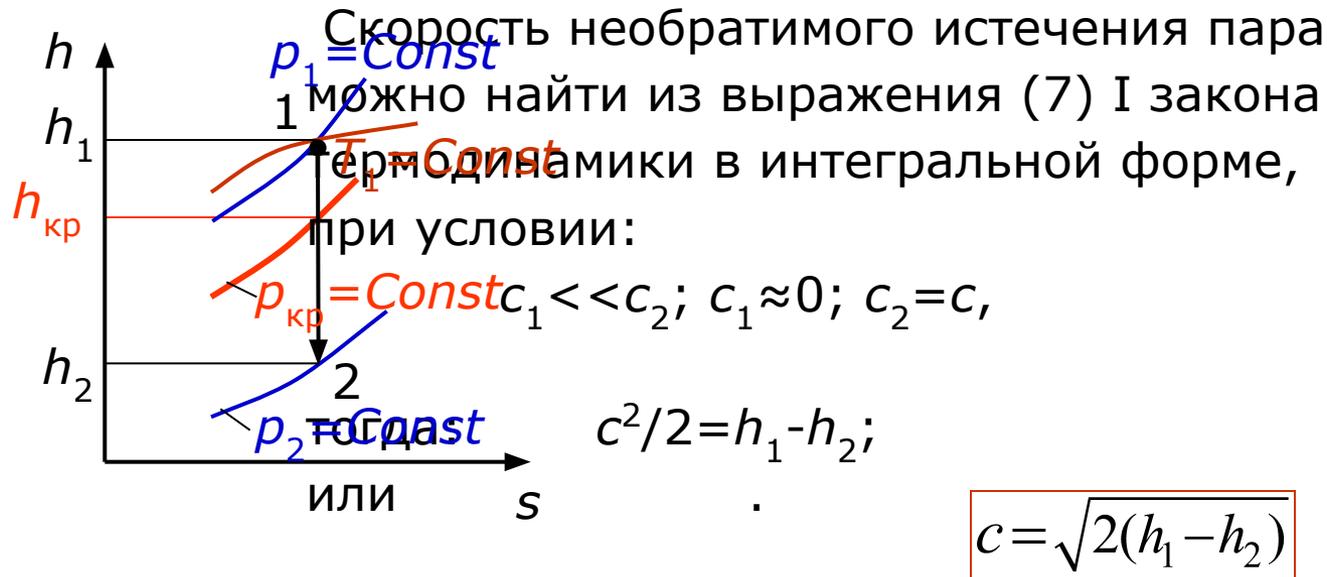
Действительная скорость всегда ниже теоретической из-за необратимых потерь на трение и завихрение:

$$c_d = \varphi c,$$

где  $\varphi$  – скоростной коэффициент сопла.

Для хорошо спроектированных и чисто обработанных сопел  $\varphi = 0,92 \dots 0,99$ .

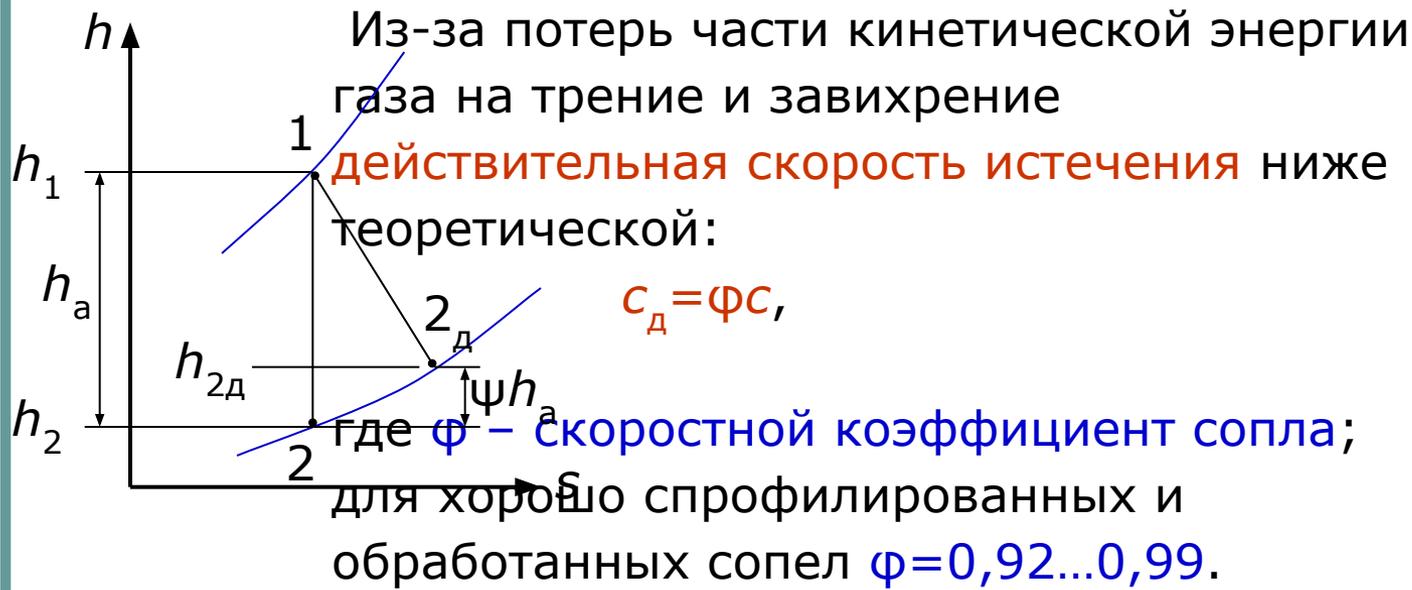
# Скорость истечения пара



Энтальпии пара в это уравнение надо подставлять в Дж/кг.  
 Критическая скорость истечения находится по аналогичной формуле:

$$c_{\text{êð}} = \sqrt{2(h_1 - h_{\text{êð}})}$$

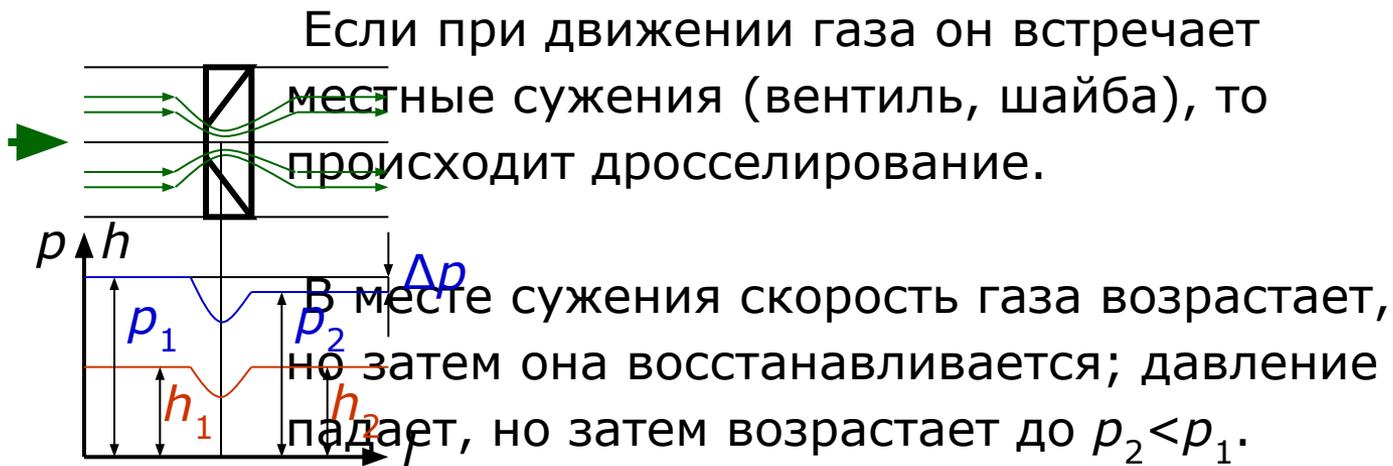
# Истечение газов с учетом трения



Потери кинетической энергии оцениваются коэффициентом потери энергии  $\psi$ :

$$\Delta \dot{A}_{\text{од}} = \frac{\tilde{n}^2 - \tilde{n}_{\text{ä}}^2}{2} = \frac{\tilde{n}^2 - \varphi^2 \tilde{n}^2}{2} = (1 - \varphi^2) \frac{\tilde{n}^2}{2} = \psi \frac{\tilde{n}^2}{2} = h_{2\text{ä}} - h_2.$$

# Дросселирование газов и паров



**Дросселирование (мятие)** – это процесс понижения давления при прохождении газа через местное сужение.

Падение давления зависит от природы газа, скорости движения и величины сужения. **Этот эффект используется для измерения скорости газа с помощью дроссельных шайб.**

# Дросселирование – условно изоэнтальпийный процесс

Потери на трение превращаются в теплоту, которая в адиабатном процессе воспринимается газом.

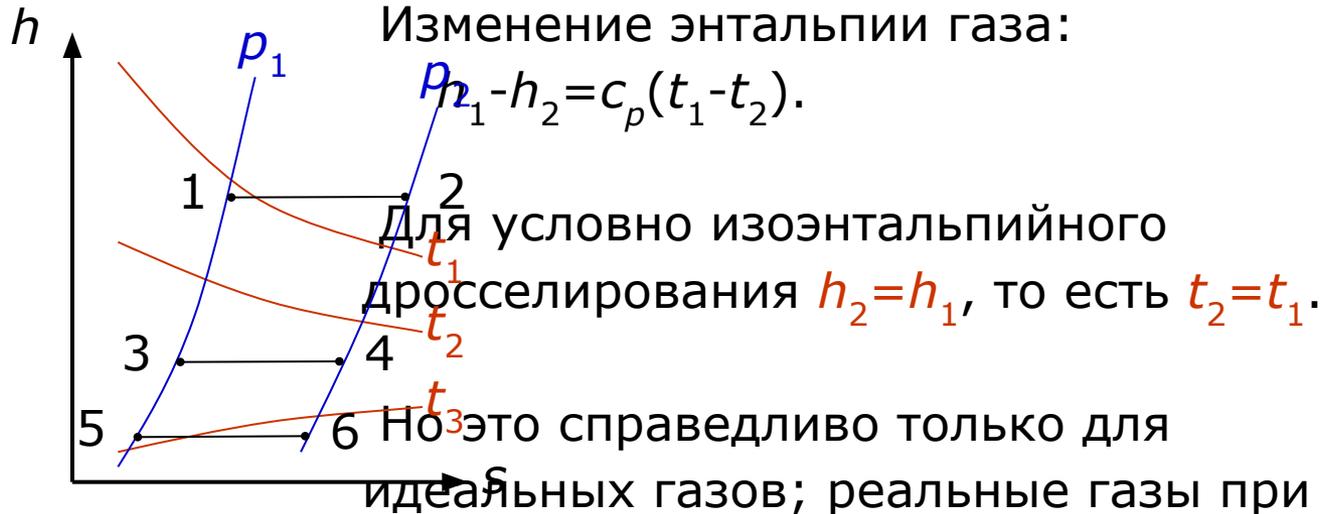
По I закону термодинамики для адиабатного процесса:

$$c d c \text{ или } -dh \quad . \quad \boxed{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = h_1 - h_2}$$

Скорости газа  $c_2$  и  $c_1$  мало отличаются, поэтому можно принять  $c_2 \sim c_1$ , то есть  $h_2 \sim h_1$ .

Таким образом **можно считать условно дросселирование изоэнтальпийным процессом**; на самом деле, в узком сечении энтальпия газа уменьшается, а затем снова восстанавливается.

# Дросселирование газов



температуру (см.  $hs$ -диаграмму).

Изменение температуры газа при дросселировании называется эффектом Джоуля-Томсона.

# Температура инверсии

На предыдущем слайде изображено дросселирование воздуха при разных начальных температурах.

При достаточно высокой начальной  $t_1$  температура воздуха при дросселировании 1-2 возрастает.

При некоторой  $t_3$  (температуре инверсии) газ ведет себя как идеальный ( $t_4 = t_3$ ).

Большинство газов имеют довольно высокую температуру инверсии (600 °С) и выше. Исключение составляют водород и гелий (для  $H_2$  температура инверсии -80 °С).

# Использование дросселирования для ожижения газов

Снижение температуры газа при дросселировании, если  $t_{\text{нач}} < t_{\text{инв}}$ , можно использовать для ожижения газов.

Для этого газ многократно сжимается с охлаждением и последующим дросселированием.



# Снижение работоспособности пара при дросселировании

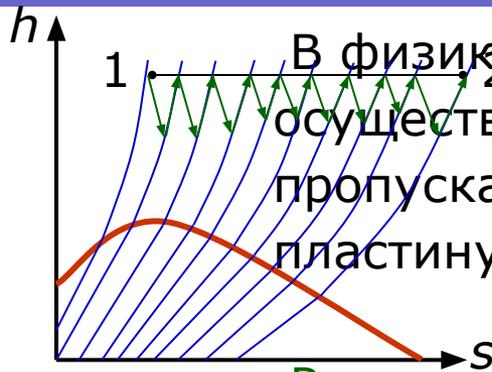
Из диаграммы хорошо видно, что работоспособность пара после дросселирования значительно падает  $(h_2 - h_B) < (h_1 - h_A)$ .

Поэтому дросселирования по возможности надо избегать.

Но дроссели применяются в холодильных установках.

Используется также дроссельное регулирование мощности паровых турбин.

# Опыт Джоуля-Томсона



В физике дросселирование пара осуществляют в опыте Джоуля-Томсона, пропуская газ или пар через пористую пластину.

Реальное мятие пара выглядит в виде зеленой ломаной линии (последовательного дросселирования от поры к поре при малом перепаде давлений).

При дросселировании получается процесс, аналогичный истечению: скорость возрастает, затем кинетическая энергия переходит в тепловую, которая усваивается паром при  $p = const$ .

В пределе получается линия 1-2 (изоэнтальпа).