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

$$B = p_в + p_п,$$

где B – барометрическое (атмосферное) давление,

$p_в$ и $p_п$ – соответственно парциальные давления сухого воздуха и водяного пара.

При: $p_п < p_н$ – воздух влажный, ненасыщенный;

$p_п = p_н$ – воздух влажный насыщенный водяным паром.

Абсолютная и относительная влажности воздуха

Абсолютная влажность воздуха – это масса пара в 1 м³ влажного воздуха, что совпадает с определением плотности пара при его парциальном давлении $\rho_п$, кг/м³.

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

С учетом того, что $\rho_п/\rho_н=v_н/v_п$, а по закону Бойля-Мариотта $p_п v_п=p_н v_н$, имеем:

$$\boxed{\varphi=\frac{\rho_п}{\rho_н}=\frac{v_н}{v_п}=\frac{p_п}{p_н}} \quad (1)$$

Влагосодержание влажного воздуха

Влагосодержание воздуха – это масса водяного пара, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха $d=m_п/m_в$.

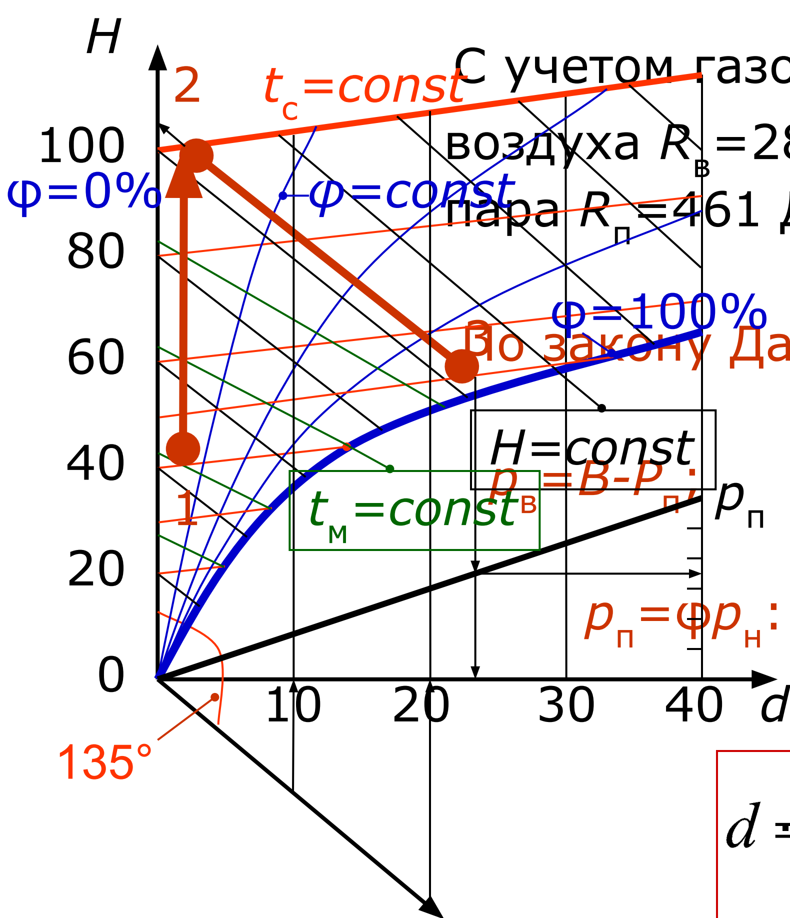
Запишем уравнение Клапейрона для водяного пара и сухого воздуха: $p_пV=m_пR_пT$; $p_вV=m_вR_вT$.

Поделив уравнения Клапейрона и разрешив относительно влагосодержания, имеем:

.

$$\boxed{d=\frac{m_{\text{ï}}}{m_{\text{â}}}=\frac{R_{\text{â}}\,p_{\text{ï}}}{R_{\text{ï}}\,p_{\text{â}}}}$$

Hd-диаграмма влажного воздуха



С учетом газовых постоянных воздуха $R_в$=287 и водяного пара $R_п$=461 Дж/(кг·К).

По закону Дальтона

$p_в = B - p_п$;

$p_п = \varphi p_н$:

$$d = \frac{287\,p_п}{461(B - p_п)} = 0,622\frac{\varphi p_н}{B - \varphi p_н}$$

К *Hd*-диаграмме

Hd-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°.

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, °C и энтальпии влажного воздуха $H=h_в+dh_п$, кДж/(кг сух. возд.)

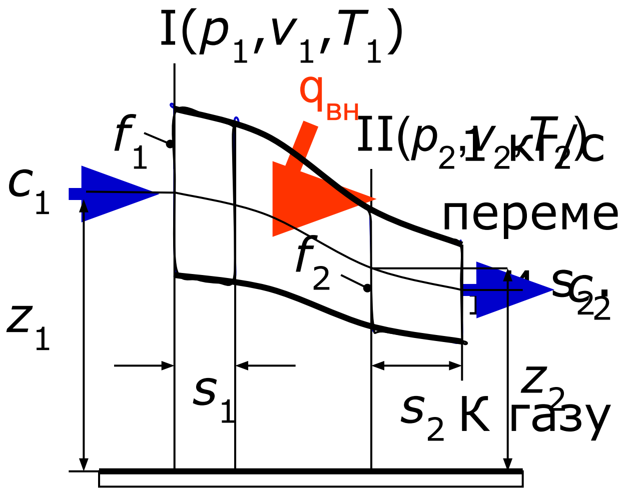
Относительная влажность влажного воздуха:

- 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



1 кг/с газа в сечениях I и II перемещается на расстояние s_1 и s_2.

К газу подведена теплота $q_{вн}$.

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

$$l_{\mathrm{I}}=-p_1 f_1 s_1=-p_1 v_1.$$

В сечении II газ совершит работу

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

Их разность – работа проталкивания:

$$l_1=l_{\mathrm{II}}-l_{\mathrm{I}}=p_2 v_2-p_1 v_1. \qquad (2)$$

Составляющие работы

Работа на изменение кинетической энергии потока:

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

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

Работа на изменение потенциальной энергии газа:

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

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 $l_{т}$; (5)

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

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

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

Уравнение I закона термодинамики для потока

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

Перегруппируем члены полученного уравнения; учтем, что

$u_2+p_2v_2=h_2$ и
$u_1+p_1v_1=h_1$:

$$q=(h_2-h_1)+(\frac{c_2^2}{2}-\frac{c_1^2}{2})+g(z_2-z_1)+l_{\text{ò}}$$

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 ($dq=0$):

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

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:

$dq=0=du+pdv$, откуда $du=-pdv$.

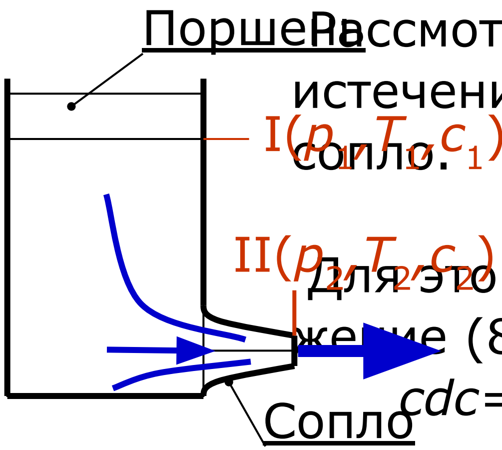
Подставим это выражение в (7):

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

Итак, выражение I закона термодинамики для обратимого адиабатного потока:

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

Истечение газов и паров через суживающиеся сопла



Рассмотрим обратимое, адиабатное истечение газа через суживающееся сопло.

Для этого случая применимо выражение (8) I закона термодинамики:

$cdc=-vdp$. (1)

или в интегральной форме:

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

Так как $c_1 << c_2$, 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:

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

Скорость истечения газа

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

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

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

$$m = cf/v_2 = const. \qquad (3)$$

Массовый расход газа

При адиабатном истечении

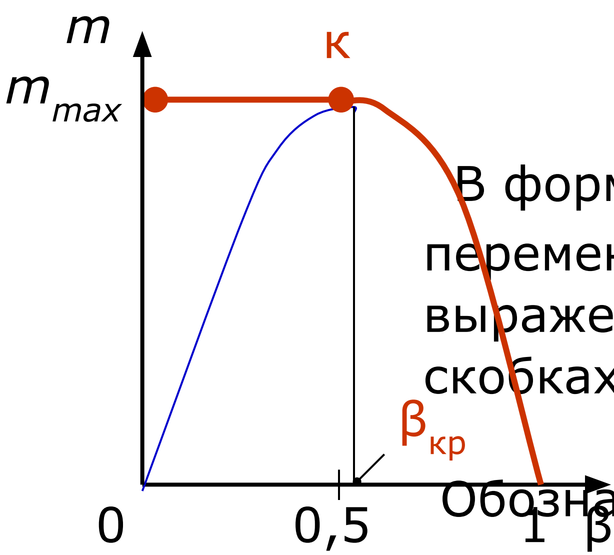
$p_1 v_1^{\,k} = p_2 v_2^{\,k}$, откуда $v_2 = v_1 (p_1/p_2)^{1/k}$. (4)

Подставляем (4) и (2) в (3):

$$m = \frac{cf}{v_1}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/k} = f\sqrt{\frac{2k}{k-1}\,\frac{p_1 v_1}{v_1^2}\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/k}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}\right]} \quad (5)$$

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

К гипотезе Сен-Венана и Вентцеля



В формуле расхода газа (6) переменным является выражение в квадратных скобках.

Обозначим

$p_2/p_1=\beta$,

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

При $\beta=0$ и $\beta=1$ $m=0$.

Исследование на экстремум

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

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

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

получим

$$2/(k+1)=\beta_{кр}^{(k\text{-}1)/k},$$

откуда

$$\boxed{\beta_{\hat{e}\eth}=\frac{\eth_{\tilde{e}\eth}}{\eth_1}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}} \quad (7)$$

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:

$$.c_{\text{êð}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1} \quad (8)$$

Если в (8) подставить

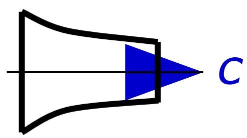
$$p_1 = p_{кр}/\beta_{кр}; \; v_1 = v_{кр}\beta_{кр}^{1/k},$$

то:

$$\boxed{c_{\text{êð}} = \sqrt{k p_{\text{êð}} v_{\text{êð}}} = a \quad (9)}$$

Гипотеза Сен-Венана и Вентцеля
• $c<c_{кр}$

$p_2>p_{кр}$



$c<c_{кр}$

$p'_2<p_2$

Из формулы (9) следует, что критическая скорость истечения – это местная скорость звука (при критических параметрах).

$(a\text{-}c)>0$

Гипотеза Сен-Венана и Вентцеля:

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

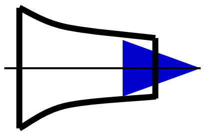
$(a\text{-}c)>0.$

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

Гипотеза Сен-Венана и Вентцеля

- $c = c_{кр}$

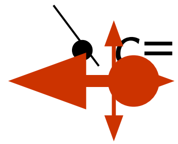
$p_2 = p_{кр}$



c

$c = c_{кр}$

$p'_2 < p_2$



$(a - c_{кр}) = 0$

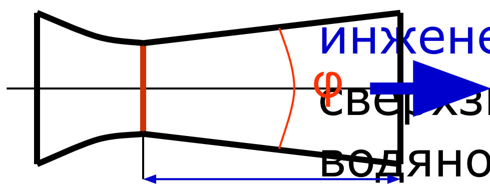
$c = c_{кр}$: относительная скорость $(a - c_{кр}) = 0$; импульс разряжения никогда не дойдет до выходного сечения сопла; скорость истечения остается критической.

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

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

Комбинированное сопло (Лаваля)

Комбинированное из сужающейся и расширяющейся частей сопло впервые применил шведский инженер Лаваль для получения сверхзвуковых скоростей истечения водяного пара.



Угол φ расширяющейся части сопла не должен превышать 12°, чтобы получить сверхзвуковые скорости истечения.

Длина расширяющейся части сопла

$$l_р=(d_2-d_{min})/2tg(\varphi/2).$$

Режимы истечения

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

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

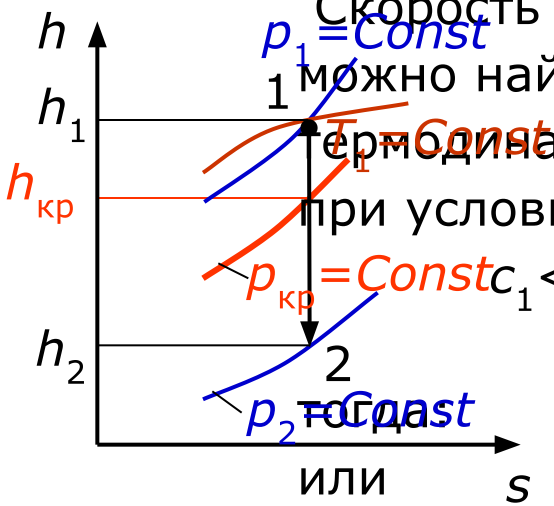
$$c_д = \varphi c,$$

где φ – скоростной коэффициент сопла.

Для хорошо спрофилированных и чисто обработанных сопел

$\varphi = 0{,}92 \ldots 0{,}99$.

Скорость истечения пара



Скорость необратимого истечения пара можно найти из выражения (7) I закона термодинамики в интегральной форме, при условии: $c_1 << c_2$; $c_1 \approx 0$; $c_2 = c$,

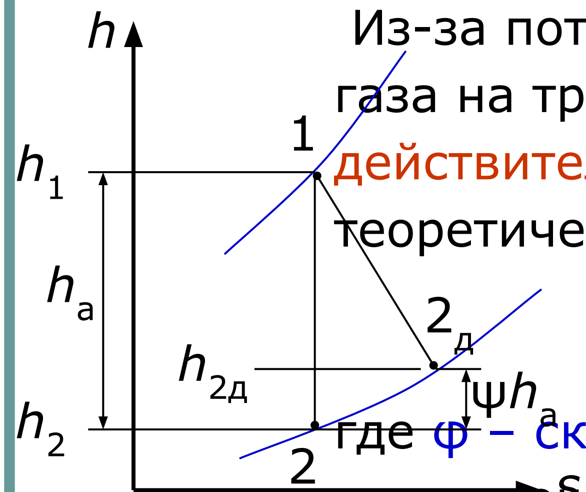
тогда: $c^2/2 = h_1 - h_2$;

или $$c = \sqrt{2(h_1 - h_2)}.$$

Энтальпии пара в это уравнение надо подставлять в Дж/кг.

Критическая скорость истечения находится по аналогичной формуле: $$c_{кр} = \sqrt{2(h_1 - h_{кр})}.$$

Истечение газов с учетом трения



Из-за потерь части кинетической энергии газа на трение и завихрение действительная скорость истечения ниже теоретической:

$c_д = \varphi c$,

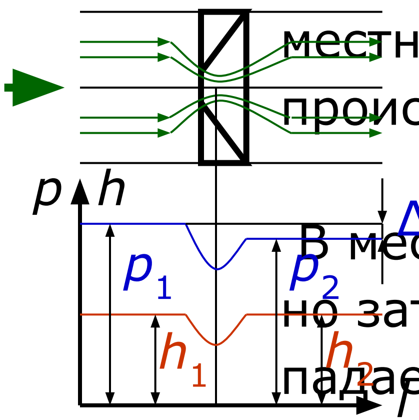
где φ – скоростной коэффициент сопла; для хорошо спрофилированных и обработанных сопел φ=0,92…0,99.

Потери кинетической энергии оцениваются коэффициентом потери энергии ψ:

$$\Delta E_{тр} = \frac{c^2 - c_д^2}{2} = \frac{c^2 - \varphi^2 c^2}{2} = (1-\varphi^2)\frac{c^2}{2} = \psi\frac{c^2}{2} = h_{2д} - h_2.$$

Дросселирование газов и паров

Если при движении газа он встречает местные сужения (вентиль, шайба), то происходит дросселирование.



В месте сужения скорость газа возрастает, но затем она восстанавливается; давление падает, но затем возрастает до $p_2 < p_1$.

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:

$$cdc = -dh$$

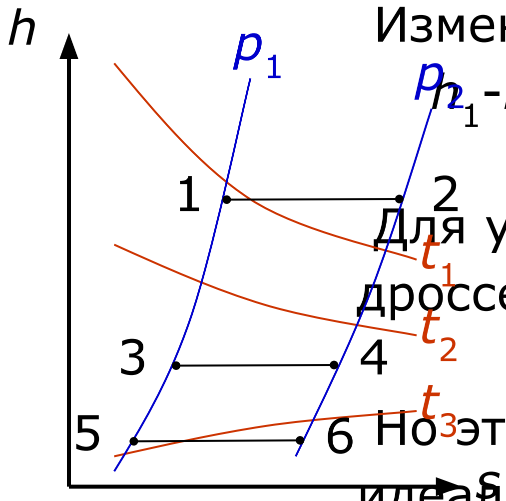
или .

$$\boxed{\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = h_1 - h_2}$$

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



Изменение энтальпии газа:

h_1-h_2=c_p(t_1-t_2).

Для условно изоэнтальпийного дросселирования $h_2=h_1$, то есть $t_2=t_1$.

Но это справедливо только для идеальных газов; реальные газы при дросселировании меняют свою 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).

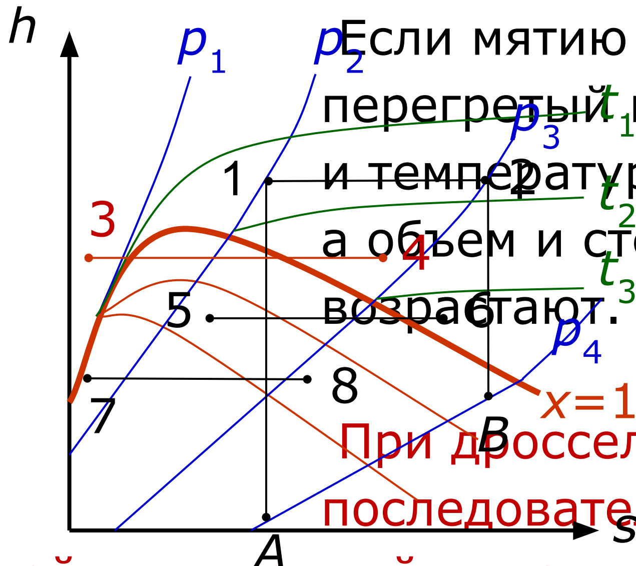
Большинство газов имеют довольно высокую температуру инверсии (600 °С) и выше. Исключение составляют водород и гелий (для H_2 температура инверсии -80 °С).

Использование дросселирования для ожижения газов

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

Для этого газ многократно сжимается с охлаждением и последующим дросселированием.

Дросселирование (мятие) пара



Если мятию подвергается перегретый пар 1-2, то давление и температура его уменьшаются, а объем и степень перегрева возрастают.

При дросселировании 3-4 пар последовательно переходит в сухой насыщенный, затем во влажный и снова в перегретый.

Мятие влажного пара 5-6 приводит к росту его степени сухости.

При дросселировании закипающей воды 7-8 она испаряется с увеличением степени сухости пара.

Снижение работоспособности пара при дросселировании

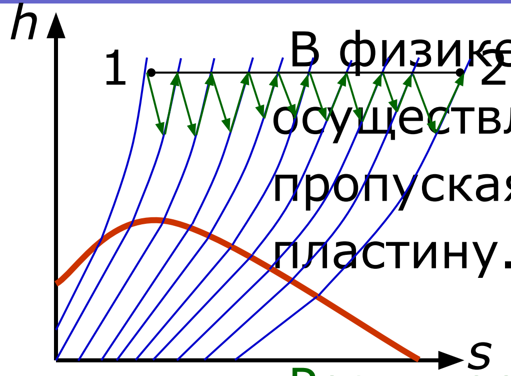
Из диаграммы хорошо видно, что работоспособность пара после дросселирования значительно падает $(h_2\text{-}h_В)<(h_1\text{-}h_А)$.

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).