

## Контрольная по теплотехнике с решением

### Задача 5

Водяной пар, имея абсолютное давление  $p = 5 \text{ МПа}$  и степень сухости  $x=0,88$ , течёт по трубе со скоростью 20 м/с. Определить диаметр трубы, если расход пара  $D=1,5 \text{ кг/с}$ .

### Решение

Удельный объем влажного пара зависит от давления и от степени сухости и определяется по формуле:

$$\nu_x = \nu'' \cdot x + (1 - x) \cdot \nu', \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1)$$

где  $\nu'$  - удельный объем воды в состоянии насыщения,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$\nu''$  - удельный объем сухого насыщенного пара,  $\text{м}^3/\text{кг}$ .

По таблице свойств насыщенного водяного пара по давлениям (справочные данные) при  $p = 5 \text{ МПа}$  находим:  $\nu' = 0,0012857 \text{ м}^3/\text{кг}$  и  $\nu'' = 0,03944 \text{ м}^3/\text{кг}$ , тогда

$$\nu_x = 0,03944 \cdot 0,88 + (1 - 0,88) \cdot 0,0012857 = 0,0349 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Объемный расход пара:

$$G = \nu_x \cdot D, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2)$$

где  $D$  - массовый расход пара,  $\text{кг/с}$ ;

$$G = 0,0349 \cdot 1,5 = 0,0524 \text{ м}^3/\text{с}$$

Площадь поперечного сечения трубы:

$$f = \frac{G}{\omega}, \text{ м}^2 \quad (3)$$

где  $\omega$  - скорость течения водяного пара,  $\text{м/с}$ ;

$$f = \frac{0,0524}{20} = 0,00262 \text{ м}^2$$

Диаметр трубы:

$$d = \sqrt{\frac{4f}{\pi}}, \text{ м} \quad (4)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00262}{3,14}} = 0,0578 \text{ м} = 57,8 \text{ мм}$$

**Ответ:**  $d = 57,8 \text{ мм}$ .

### Задача 25

Газовый двигатель всасывает  $200 \text{ м}^3/\text{кг}$  воздуха при температуре  $t = 30^\circ\text{C}$ , давлении  $p = 0,1 \text{ МПа}$  и относительной влажности  $\varphi = 0,7$ . Какое количество воды всасывается двигателем за 1 ч? Задачу решить при помощи  $hd$ -диаграммы и привести схему решения.

### Решение

По  $hd$  - диаграмме влажного воздуха составленной для давления  $p = 0,1 \text{ МПа}$  при температуре  $t = 30^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi = 0,7$  находим плотность влажного воздуха  $\rho_n = 1,145 \text{ кг/м}^3$  и влагосодержание  $d = 18,9 \text{ г/кг}$ .

Количество воды, всасываемого газовым двигателем, находим по формуле:

$$m_g = V \cdot \rho_n \cdot d, \text{ кг/ч} \quad (1)$$

$$m_g = 200 \cdot 1,145 \cdot 18,9 \cdot 10^{-3} = 4,3 \text{ кг/ч}$$

Ответ:  $m_e = 4,3 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ .

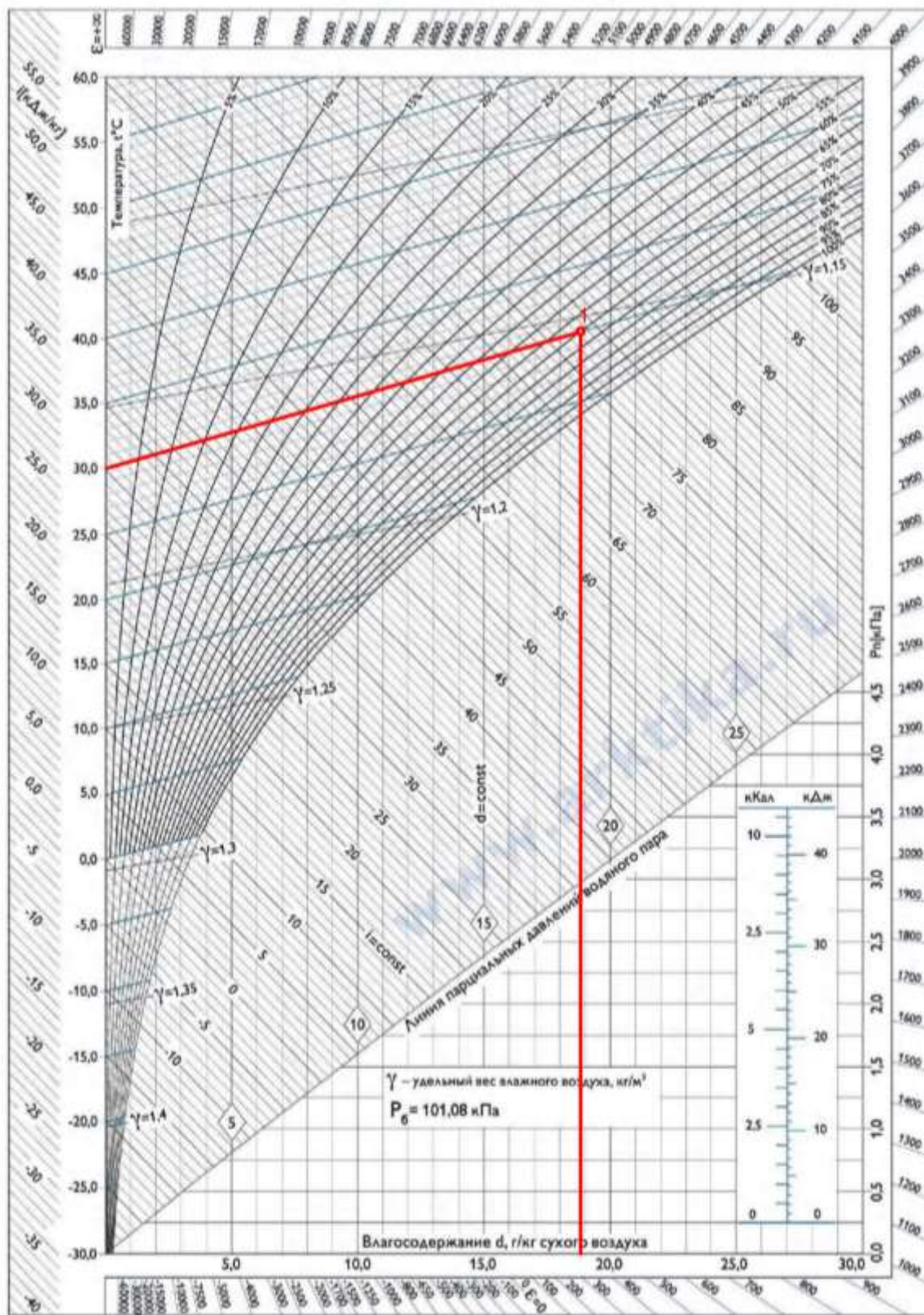


Рисунок 1 – Определение параметров влажного воздуха по  $hd$  - диаграмме.

В этом файле выложены ознакомительные фрагменты работы. Вы можете заказать решение задач, контрольную или курсовую работу по своей теме и требованиям на [сайте МатБюро](http://www.MatBuro.ru).

### Задача 38

Определить скорость истечения воздуха через сопло Лаваля, если начальные параметры воздуха  $p_1 = 0,8$  МПа и  $t_1 = 700$  °С, а давление среды на выходе из сопла равно атмосферному ( $p_2 = 0,1$  МПа). Скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,92$ . Скоростью воздуха на входе в сопло пренебречь.

### Решение

Начальный удельный объем воздуха определяем из уравнения состояния идеального газа:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1)$$

где  $R$  - газовая постоянная воздуха (справочная величина),  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$T_1$  - начальная температура воздуха,  $\text{К}$ ;

$$\begin{aligned} T_1 &= t_1 + 273, \text{ К} \\ T_1 &= 700 + 273 = 973 \text{ К} \end{aligned} \quad (2)$$

тогда

$$v_1 = \frac{287 \cdot 973}{0,8 \cdot 10^6} = 0,349 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Показатель адиабаты:

$$k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} \quad (3)$$

где  $\mu c_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$  - мольная теплоемкость воздуха, как двухатомного газа при постоянном давлении (справочная величина);

$\mu c_v = 20,8 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$  - мольная теплоемкость воздуха, как двухатомного газа при постоянном объеме (справочная величина);

$$k = \frac{29,1}{20,8} = 1,4$$

Конечный удельный объем воздуха находим из соотношения параметров в адиабатном процессе расширения:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa} \quad (4)$$

откуда

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (5)$$

$$v_2 = 0,349 \cdot \left( \frac{0,8}{0,1} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 1,541 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Скорость истечения воздуха через сопло Лаваля:

$$\omega = \varphi \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \text{ м/с} \quad (6)$$

где  $\varphi$  - скоростной коэффициент

$$\omega = 0,92 \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,349 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,1}{0,8} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right]} = 861 \text{ м/с}$$

**Ответ:**  $\omega = 861 \text{ м/с}$ .

## Задача 62

Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 2 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 350 \text{ °C}$  дросселируется в регулирующем клапане паровой турбины до  $p_2 = 1,5 \text{ МПа}$ , а затем расширяется в ней до  $p_3 = 0,004 \text{ МПа}$ . Определить потерю располагаемой работы вследствие дросселирования.

## Решение

В этом файле выложены ознакомительные фрагменты работы. Вы можете заказать решение задач, контрольную или курсовую работу по своей теме и требованиям на [сайте МатБюро](http://www.MatBuro.ru).

По  $hs$ -диаграмме водяного пара на пересечении изобары  $p_1 = 2 \text{ МПа}$  и изотермы  $t_1 = 350^\circ\text{C}$  находим точку 1, характеризующую начальное состояние пара. Энтальпия в точке 1 составляет  $h_1 = 3138 \text{ кДж/кг}$ , а энтропия  $s_1 = 6,958 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ .

По линии  $s = \text{const}$  опускаемся до пересечения с изобарой  $p_3 = 0,004 \text{ МПа}$  и находим точку 4, характеризующую состояние водяного пара после расширения в турбине без предварительного дросселирования. Энтальпия в точке 4 составляет  $h_4 = 2096 \text{ кДж/кг}$ .

На пересечении изоэнтальпы  $h_2 = h_1 = 3138 \text{ кДж/кг}$  и изобары  $p_2 = 1,5 \text{ МПа}$  находим точку 2, характеризующую состояние водяного пара после дросселирования. Энтропия в точке 2 составляет  $s_2 = 7,087 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ . По линии  $s = \text{const}$  опускаемся до пересечения с изобарой  $p_3 = 0,004 \text{ МПа}$  и находим точку 3, характеризующую состояние водяного пара после расширения в турбине. Энтальпия в точке 3 составляет  $h_3 = 2135 \text{ кДж/кг}$ .



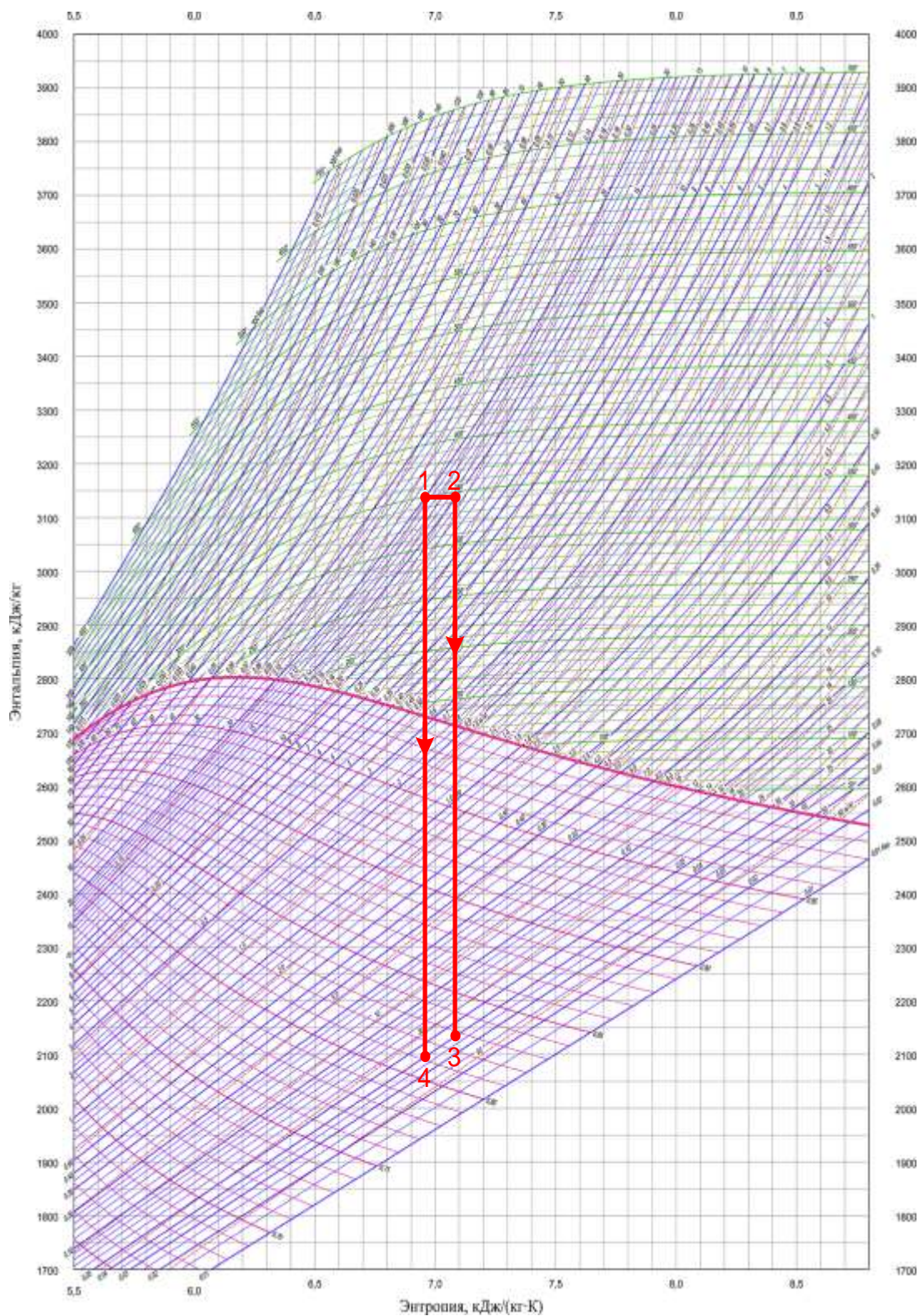


Рисунок 1 - Определение параметров пара по  $hs$  - диаграмме.

Располагаемая работа пара при расширении в турбине без предварительного дросселирования:

В этом файле выложены ознакомительные фрагменты работы. Вы можете заказать решение задач, контрольную или курсовую работу по своей теме и требованиям на [сайте МатБюро](http://www.matburo.ru).

$$l_1^{расн} = h_1 - h_4, \kappaДж / кг \quad (1)$$

$$l_1^{расн} = 3138 - 2096 = 1042 \kappaДж / кг$$

Располагаемая работа пара при расширении в турбине с предварительным дросселированием:

$$l_2^{расн} = h_2 - h_3, \kappaДж / кг \quad (2)$$

$$l_2^{расн} = 3138 - 2135 = 1003 \kappaДж / кг$$

Потеря располагаемой работы пара вследствие дросселирования составляет:

$$\Delta l_{расн} = l_1^{расн} - l_2^{расн}, \kappaДж / кг \quad (3)$$

$$\Delta l_{расн} = 1042 - 1003 = 39 \kappaДж / кг$$

**Ответ:**  $\Delta l_{расн} = 39 \kappaДж / кг$ .

## 16. Как могут быть вычислены параметры в области влажного пара?

Параметры пара в области влажного насыщенного воздуха могут быть вычислены по  $h_s$  - диаграмме водяного пара и по справочным таблицам свойств влажного насыщенного пара.

Влажный насыщенный пар – это двухфазная смесь, представляющая собой пар со взвешенными в нем капельками жидкости. Поэтому значения удельного объема влажного пара  $v_x$  находятся между значениями  $v'$  и  $v''$  и зависят от давления и степени сухости пара  $x$ :

$$v_x = xv'' + (1-x)v', \text{ или } v_x = v' + x(v'' - v') \quad (1)$$

Состояние влажного насыщенного пара характеризуется двумя параметрами: давлением (или температурой насыщения при этом давлении) и степенью сухости  $x$ . В этом файле выложены ознакомительные фрагменты работы. Вы можете заказать решение задач, контрольную или курсовую работу по своей теме и требованиям на [сайте МатБюро](http://www.MatBuro.ru).



Разность  $v'' - v'$  выражает приращение объема пара в процессе парообразования. При малых давлениях удельный объем сухого насыщенного пара во много раз больше удельного объема воды. Например, при  $p = 0,1$  МПа удельный объем сухого насыщенного пара  $v''$  в 1630 раз больше удельного объема воды при температуре кипения  $v'$ , а при  $p = 0,005$  МПа – в 28000 раз. Поэтому при невысоких давлениях (ниже в 3 МПа) и больших степенях сухости ( $x \geq 8$ ), объемом воды  $(1-x)v'$  можно пренебречь, и тогда:

$$v_x \cong xv'' , \quad (2)$$

т.е. удельный объем влажного насыщенного пара приближенно равен произведению удельного объема сухого пара того же давления на степень сухости.

Плотность влажного пара определяется по формуле:

$$\rho_x = \frac{1}{v_x} = \frac{1}{v''x} = \frac{\rho''}{x} \quad (3)$$

Таким образом, плотность влажного пара приближенно равна отношению плотности сухого пара к степени сухости.

Энтальпия влажного пара определяется по правилу аддитивности уравнением:

$$i_x = i' + (i'' - i')x \quad (4)$$

или

$$i_x = i' + rx \quad (5)$$

Внутренняя энергия влажного пара определяется по уравнению:

$$u_x = xu'' + (1-x)u' \quad (6)$$

С учетом соотношения (3) уравнение (6) преобразуется к виду:

$$u_x = x(u' + \rho) + (1-x)u' = u' + x\rho \quad (7)$$

С другой стороны, для влажного пара, как и для любого состояния вещества, справедлива зависимость:

$$i_x = u_x + pv_x$$

отсюда:

$$u_x = i_x - pv_x \quad (8)$$

Энтропию влажного пара можно определить по правилу аддитивности:

$$s_x = xs'' + (1-x)s' = x(s'' - s') + s' \quad (9)$$

или

$$s_x = s' + \frac{xr}{T} = \ln \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s} x \quad (10)$$

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{i_x - i'}{i'' - i'} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} \quad (11)$$
$$r_x = xr; \rho_x = x\rho; \psi_x = x\psi \quad (12)$$
[illegible]

В этом файле выложены ознакомительные фрагменты работы. Вы можете заказать решение задач, контрольную или курсовую работу по своей теме и требованиям на сайте МатБюро.

между жидким и газообразным состояниями вещества. Такое состояние называют критическим состоянием вещества, которому соответствует положение критической точки  $K$ . Критическая точка на пограничной кривой лежит гораздо левее максимума этой кривой.

**46. Напишите формулу для эксергии потока и поясните её, приведя для иллюстрации график эксергии потока перегретого пара в  $Ts$  - диаграмме.**

Рассмотрим изолированную систему, состоящую из вещества, занимающего при давлении  $p$  и температуре  $T$  некоторый объем  $V$ , и окружающей среды при давлении  $p_0$  и температуре  $T_0$ . Эксергию этого вещества можно найти, рассчитав максимальную полезную работу, совершаемую в обратимом процессе изменения его параметров до параметров  $p_0, T_0$ .

Такое обратимое изменение параметров можно осуществить в результате последовательного проведения двух процессов. Вначале следует провести обратимое адиабатное (изоэнтропное) расширение вещества так, чтобы его температура стала равна температуре окружающей среды  $T_0$  (процесс 1-а на рис. 1), а затем обратимое изотермическое расширение до давления окружающей среды  $p_0$  (процесс а-0 на рис. 1). В последнем процессе к веществу подводится теплота, равная (в расчете на 1 кг)  $q = T_0(s_0 - s)$  и суммарно совершенную в этих двух процессах работу можно найти по уравнению первого закона термодинамики  $l = u - u_0 - T_0(s - s_0)$ .

Однако это не есть эксергия, так как часть этой работы должна быть затрачена на работу против постоянного давления окружающей среды при увеличении объема вещества от начального до объема при конечных параметрах  $p_0, T_0$ . Поэтому эксергия вещества в замкнутом объеме равна  $e_v = u - u_0 - T_0(s - s_0) - p_0(v_0 - v)$ .

Если в подобной системе вещество находится не в замкнутом объеме, а в потоке, то обратимо изменить его параметры до параметров окружающей среды можно с помощью той же последовательности процессов, что рассмотрена выше и представлена на рис. 1. В этом случае при нахождении эксергии следует учесть, что техническая работа потока это и есть эксергия, так как ее можно полностью полезно использовать на валу вращающегося механизма (турбины, компрессора и т.п.).

Тогда из уравнения первого закона термодинамики для потока получим, что эксергия вещества в потоке равна  $e = h - h_0 - T_0(s - s_0)$ .

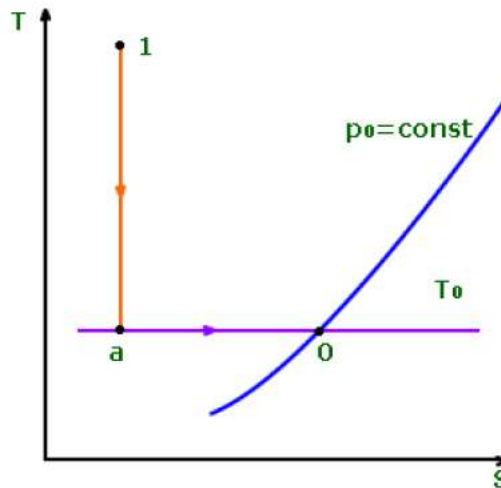


Рисунок 1

**57. Как физически объяснить, почему при снижении внешнего давления ниже критического скорость истечения через суживающееся сопло перестаёт увеличиваться?**

В термодинамической теории газового потока большое значение имеет скорость звука, которая для идеального газа определяется по формуле:

$$a = \sqrt{kRT}$$

Скорость распространения упругих деформаций, то есть скорость звука, зависит от состояния и природы газа и является прямой функцией температуры. Отсюда можно сделать вывод, что каждому сечению канала должна соответствовать своя местная скорость звука, определяемая величиной  $p$  и  $v$  в данном сечении.

Величина  $a = \sqrt{k v_k p_k}$  определяет скорость звука в газе при критическом режиме истечения в выходном сечении суживающегося канала, или критическая скорость газа при истечении равна местной скорости звука (в данном сечении), то есть  $\omega_k = a$ .

Последнее позволяет объяснить, почему в суживающемся канале газ не может расширяться до давления меньше критического, а скорость не может превысить критическую. Действительно, как известно из физики, импульс давления распространяется в материальной среде со скоростью звука и поэтому, когда скорость истечения будет меньше скорости звука (критической скорости), уменьшение внешнего



давления передается по потоку газа внутрь канала и приводит к перераспределению давления в канале. В результате в выходном сечении канала устанавливается давление, равное давлению среды. Если же скорость истечения достигнет скорости звука (критической скорости), то скорость движения газа и скорость распространения давления будут одинаковы и никакое уменьшение внешнего давления не сможет повлиять на распределение давлений внутри канала. Оно будет постоянным, а следовательно, будет неизменным и давление в выходном сечении канала, независимо от величины внешнего давления.

Отсюда следует, что скорость истечения в выходном сечении суживающегося канала не может быть больше скорости звука в газе (рис. 1).

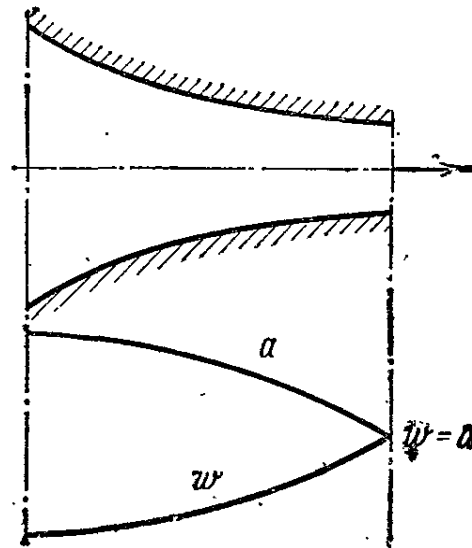


Рисунок 1

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Злобин В. Г., Горбай С. В., Короткова Т. Ю. Техническая термодинамика. Часть 1. Основные законы термодинамики. Циклы тепловых двигателей: учебное пособие. -2 изд., испр. и перераб./ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2016.-146 с.
2. Злобин В. Г., Горбай С. В., Короткова Т. Ю. Техническая термодинамика. Часть 2. Водяной пар. Циклы теплосиловых установок: учебное пособие. -2-е изд., испр. и перераб./ВШТЭ СПбГУПТД. -СПб., 2016. - 90 с.
3. Кирилин В. А., Сычев В. В., Шейдулин А. Е. Техническая термодинамика: учебник для вузов. -5-е изд., перераб. и доп. /МЭИ. –М., 2008. - 496 с.