

1.9 Истечение газов и паров.

Дросселирование

При решении задач, связанных с истечением газа через сопла (насадки), чаще всего приходится определять скорость истечения и расход. В этих случаях необходимо прежде всего найти отношение

$$\beta = \frac{P_2}{P_1},$$

где P_2 – давление среды на выходе из сопла;

P_1 - давление среды на входе в сопло.

Полученное числовое значение сравнивают с так называемым критическим отношением давлений для данного газа, определяемым из равенства

$$\beta_{кр} = \frac{P_{кр}}{P_1} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (128)$$

и равным: для одноатомных газов - 0,487; двухатомных - 0,528; для трех- и многоатомных газов – 0,546.

Если адиабатное истечение газа происходит при $\beta > \beta_{кр}$, то теоретическая скорость истечения газа, м/с, определяется по формуле

$$\omega = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} P_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}. \quad (129)$$

Теоретическая скорость истечения газа (м/с) может быть также определена по формуле

$$\omega = 1,41 \sqrt{h_1 - h_2}, \quad (130)$$

где h_1 и h_2 – соответственно энтальпии газа в начальном и конечном состояниях, Дж/кг.

Если значения энтальпии выражены в килоджоулях на килограмм, то формула принимает следующий вид:

$$\omega = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2} . \quad (131)$$

Действительная скорость истечения всегда меньше теоретической, так как процесс истечения связан с наличием трения:

$$\omega = 1,41 \psi \sqrt{h_1 - h_2} , \quad (132)$$

где ψ - скоростной коэффициент сопла.

Расход газа, кг/с, определяется по формуле

$$G = F \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} , \quad (133)$$

где F – площадь выходного сечения сопла, м².

Если адиабатное истечение газа происходит при $\beta \leq \beta_{кр}$, то теоретическая скорость истечения газа в устье суживающегося сопла будет равна критической скорости и определяется по формуле

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} P_1 v_1} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1} . \quad (134)$$

Критическая скорость может быть также определена по уравнению

$$\omega_{кр} = 1,41 \cdot \sqrt{h_1 - h_{кр}} , \quad (135)$$

Расход газа, кг/с, в этом случае будет максимальным и определяется по формуле

$$G_{max} = F \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_1}{v_1}} . \quad (136)$$

Для получения скоростей истечения выше критических (сверхзвуковые скорости) применяют сопло Лаваля. В минимальном сечении сопла Лаваля скорость движения газа равна критической скорости или скорости звука, определяемой параметрами $P_{кр}$ и $v_{кр}$. Площадь минимального сопла, m^2 , определяется по формуле

$$F_{min} = \frac{G_{max} \cdot v_{кр}}{\omega_{кр}}. \quad (137)$$

Площадь выходного сечения сопла, m^2 ,

$$F = f_{min} \frac{\omega_{кр} \cdot v_2}{\omega \cdot v_{кр}} = \frac{G \cdot v_2}{\omega}, \quad (138)$$

где v_2 – удельный объем газа при давлении среды P_2 ,

$$v_2 = v_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}}. \quad (139)$$

Длина расширяющейся части сопла определяется по уравнению

$$\ell = \frac{d - d_{min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (140)$$

где d и d_{min} – соответственно диаметры выходного и минимального сечений;

α - угол конусности расширяющейся части сопла.

При прохождении газа или пара через суженное сечение происходит снижение его давления. Этот процесс называют **дрсселированием** или **мятием**. В процессе дрсселирования газа или пара наряду со снижением давления всегда возрастает удельный объем. Температура идеальных газов при дрсселировании остается неизменной, температура же реальных газов остается постоянной лишь при определенной начальной температуре газа, называемой

температурой инверсии; приближенное значение этой температуры определяется из выражения

$$T_{\text{инв}} \approx T_{\text{кр}}, \quad (141)$$

где $T_{\text{кр}}$ – критическая температура газа или пара, К.

Если же температура подвергающегося дросселированию газа отлична от температуры инверсии, то его температура изменяется: уменьшается, если температура газа меньше температуры инверсии, и увеличивается, если температура его больше температуры инверсии.

С достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия газа или пара в начальном и конечном состояниях одинакова, т.е.

$$h_1 = h_2. \quad (142)$$

Задачи, связанные с дросселированием пара, обычно сводятся к определению параметров состояния пара после дросселирования. Проще всего они решаются при помощи h - s -диаграммы: конечное состояние пара определяется пересечением горизонтали, проходящей через начальную точку, с изобарой конечного давления.

Примеры решения задач

56 Воздух из резервуара с постоянным давлением 100 бар и температурой 15°C вытекает в атмосферу через трубку с внутренним диаметром 10 мм. Определить скорость истечения воздуха и его секундный расход. Наружное давление равно 1 бар. Процесс расширения воздуха считать адиабатным.

Решение:

Определяем величину β и сравниваем ее с критическим значением для воздуха:

$$\beta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{100} < \beta_{кр} = 0,528.$$

Скорость истечения будет критической и определяется по формуле (134):

$$\omega_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} R T_1} = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{1,4+1} \cdot 287 \cdot 288} = 310 \text{ м/с}.$$

Секундный расход определяем по формуле (136), предварительно рассчитав площадь сечения сопла и начальный удельный объем воздуха:

$$F = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ м}^2;$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 288}{100 \cdot 10^5} = 0,00827 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$G_{\max} = 0,0000785 \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4+1} \cdot \left(\frac{2}{1,4+1} \right)^{\frac{2}{1,4-1}} \cdot \frac{100 \cdot 10^5}{0,00827}} = 1,87 \text{ кг/с}.$$

57 В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживают давление $P_1 = 50$ бар. Газ вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением 40 бар. Начальная температура кислорода 100°C . Определить теоретическую скорость истечения и расход, если площадь выходного сечения сопла $F = 20 \text{ мм}^2$. Найти также теоретическую скорость истечения кислорода и его расход, если истечение будет происходить в атмосферу. В обоих случаях считать истечение адиабатным. Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Решение:

Отношение давлений составляет:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{40}{50} = 0,8 > \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\text{кр}} = 0,528 ,$$

следовательно, скорость истечения меньше критической и определяется по формуле (129). Из характеристического уравнения (15) определяем начальный удельный объем:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{259,8 \cdot 373}{50 \cdot 10^5} = 0,0194 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Все остальные величины, входящие в формулу (129), известны.

Подставляя их значения, получаем

$$\omega = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} 50 \cdot 10^5 \cdot 0,0194 \left[1 - \left(\frac{40}{50} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 205 \text{ м/с} .$$

Секундный расход найдем по формуле (133):

$$G = 0,00002 \sqrt{2 \frac{1,4}{0,4} \cdot \frac{50 \cdot 10^5}{0,0194} \left[\left(\frac{40}{50} \right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{40}{50} \right)^{\frac{2,4}{1,4}} \right]} = 0,175 \text{ кг/с} .$$

При истечении в атмосферу отношение давлений

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{50} < \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{\text{кр}} = 0,528 ,$$

следовательно, скорость истечения в этом случае будет равна критической, а расход будет максимальным. По формуле (134) с учетом показателя адиабаты для воздуха, равной 1,4, получаем:

$$\omega_{\text{кр}} = 1,08 \sqrt{R T_1} = 1,08 \sqrt{\frac{287}{1,4 - 1}} 373 = 336 \text{ м/с} .$$

Максимальный расход определяем по формуле (136) с учетом $k=1$:

$$G_{\max} = 0,686 f \sqrt{\frac{P_1}{v_1}} = 0,686 \cdot 0,00002 \sqrt{\frac{50 \cdot 10^5}{0,0194}} = 0,22 \text{ кг/с}.$$

58 Воздух при давлении 10 бар и температуре 300°С вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением $P_2 = 1$ бар. Расход воздуха 4 кг/с. Определить размеры сопла. Угол конусности расширяющейся части сопла принять равным 10°. Расширение воздуха в сопле считать адиабатным.

Решение:

Площадь минимального сечения сопла определяем по формуле (137). Удельный объем воздуха в минимальном сечении $v_{кр}$ находим из соотношения параметров адиабатного процесса :

$$\frac{v_{кр}}{v_1} = \left(\frac{P_1}{P_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

Значение v_1 определяем из начальных условий:

$$v_1 = \frac{R T_1}{P_1} = \frac{287 \cdot 573}{10 \cdot 10^5} = 0,164 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Критическое отношение давлений для воздуха

$$\left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{кр} = 0,528.$$

Следовательно, критическое давление, устанавливающееся в минимальном сечении сопла,

$$P_{кр} = 0,528 P_1 = 0,528 \cdot 10 = 5,28 \text{ бар};$$

$$v_{кр} = v_1 \left(\frac{P_1}{P_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \cdot \left(\frac{10}{5,28} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,259 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Теоретическая скорость воздуха $\omega_{кр}$ в минимальном сечении по формуле, полученной в примере 57,

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{R T_1} = 1,08 \sqrt{287 \cdot 573} = 432 \text{ м/с}.$$

Следовательно, площадь минимального сечения сопла должна быть:

$$F_{\min} = \frac{4 \cdot 0,259}{432} \cdot 10^6 = 2400 \text{ мм}^2.$$

Принимая сечение сопла круглым, находим диаметр наиболее узкой части:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{f_{\min}}{\pi/4}} = \sqrt{\frac{2400}{0,785}} = 55,4 \text{ мм}.$$

Площадь выходного сечения сопла по формуле (138)

$$F = \frac{G v_2}{\omega}.$$

Удельный объем воздуха в выходном сечении

$$v_2 = v_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,164 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,85 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Скорость истечения воздуха из сопла по уравнению (129)

$$\omega = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot 10 \cdot 10^5 \cdot 0,164 \left[1 - \left(\frac{1}{10} \right)^{\frac{0,4}{1,4}} \right]} = 744 \text{ м/с}$$

и, следовательно, площадь выходного сечения сопла

$$F = \frac{4 \cdot 0,85}{744} \cdot 10^6 = 4680 \text{ мм}^2,$$

а диаметр выходного сечения сопла

$$d = \sqrt{\frac{F}{0,785}} = \sqrt{\frac{4680}{0,785}} = 77,0 \text{ мм}.$$

Длина расширяющейся части определяется по формуле (140):

$$\ell = \frac{77,0 - 55,4}{2 \cdot 0,0875} = 123 \text{ мм}.$$

59. Как велика теоретическая скорость истечения пара через сопло Лаваля, если давление $P_1 = 14$ бар, температура $t_1 = 300^\circ\text{C}$, а

противодавление равно 0,06 бар? Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

Решение:

Из h_s -диаграммы (приложение К)

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 896 \text{ кДж/кг},$$

а по уравнению (131)

$$\omega = 44,76 \sqrt{896} = 1340 \text{ м/с}.$$

60 Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление пара в котле 12 бар, температура 300°C. Процесс расширения пара считать адиабатным. Барометрическое давление принять равным 750 мм рт. ст.

Решение:

Отношение давлений равно 0,0834, т.е. оно меньше критического отношения давлений для перегретого пара, составляющего 0,546. Следовательно, если истечение происходит не через сопло Лавалья, то скорость истечения будет равна критической скорости. Для перегретого пара эта скорость определяется по уравнению (139). Для нахождения $h_{кр}$ определяем $P_{кр}$:

$$P_{кр} = P_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{кр} = 12 \cdot 0,546 = 6,6 \text{ бар}.$$

Проведя на h_s -диаграмме (приложение Г) адиабату от точки, характеризуемой $P_1 = 12$ бар и $t_1 = 300^\circ\text{C}$, до изобары $P_2 = 6,6$ бар, получаем:

$$h_1 - h_{кр} = 148 \text{ кДж/кг}$$

и, таким образом,

$$\omega_{кр} = 44,76 \sqrt{148} = 546 \text{ м/с}.$$

61 Решить предыдущую задачу при условии, что истечение пара происходит через сопло Лаваля.

Решение:

В этом случае скорость истечения больше критической. Она определится из уравнения

$$\omega = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2} ,$$

причем h_2 будет соответствовать состоянию пара в конце адиабатного расширения при $P = 1$ бар.

Пользуясь h_s -диаграммой, получаем $h_2 - h_1 = 492$ кДж/кг и, таким образом,

$$\omega = 44,76 \sqrt{492} = 990 \text{ м/с} .$$

62 Давление воздуха при движении его по трубопроводу понижается вследствие местных сопротивлений от 8 бар до 6 бар. Начальная температура воздуха $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Определить изменение температуры и энтропии в рассматриваемом процессе. Какова температура воздуха после дросселирования?

Решение:

Так как с достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия воздуха в начальном и конечном состояниях одинакова, т.е. $h_1 = h_2$, то конечную температуру воздуха можно принять равной начальной, т.е. $t_2 = t_1 = 20^\circ\text{C}$.

Приращение энтропии можно определить по формуле (92):

$$\Delta s = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

и, так как для рассматриваемого процесса $T_2 = T_1$, то

$$\Delta s = - R \ln \frac{P_2}{P_1} = R \ln \frac{P_1}{P_2} = 287 \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{8}{6} = 82,6 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} .$$

63 Водяной пар при давлении 18 бар и температуре 250°C дросселируется до давления 10 бар. Определить температуру пара в конце дросселирования.

Решение:

Находим на диаграмме (приложение Г) начальное состояние пара и проводим через найденную точку линию постоянной энтальпии. На пересечении с изобарой $P_2 = 10$ бар находим точку, характеризующую конечное состояние пара. Температура, соответствующая этой точке, равна 234°C.

Задачи

202 Воздух при постоянном давлении $P_1 = 60$ бар и $t_1 = 27^\circ\text{C}$ вытекает в среду с давлением $P_2 = 40$ бар.

Определить теоретическую скорость и конечную температуру при адиабатном истечении.

Ответ: $\omega = 257$ м/с; $t_2 = -6^\circ\text{C}$.

203 Через сопло форсунки компрессорного двигателя с воспламенением от сжатия подается воздух для распыливания нефти,

поступающей в цилиндр двигателя. Давление воздуха $P_1 = 50$ бар, а его температура $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Давление сжатого воздуха в цилиндре двигателя 35 бар. Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха из сопла форсунки.

Ответ: $\omega = 241$ м/с.

204 Определить теоретическую скорость адиабатного истечения азота и секундный расход, если $P_1 = 70$ бар, $P_2 = 45$ бар, $t_1 = 50^\circ\text{C}$, $F = 10$ мм².

Ответ: $\omega = 282$ м/с; $G = 0,148$ кг/с.

205 Воздух при давлении $P_1 = 1$ бар и температуре $t_1 = 15^\circ\text{C}$ вытекает из резервуара. Найти значение P_2 , при котором теоретическая скорость адиабатного истечения будет равна критической, и величину этой скорости.

Ответ: $P_{2\text{кр}} = 0,528$ бар; $\omega_{\text{кр}} = 310$ м/с.

206 К соплам газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива при давлении 10 бар и температуре 600°C . Давление за соплами 1,2 бар. Расход газа, отнесенный к одному соплу, $G = 1440$ кг/ч. Определить размеры сопла. Истечение считать адиабатным. Угол конусности принять равным 10° . Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

Ответ: $d_{\min} = 19,4$ мм; $d = 25$ мм; $\ell = 32$ мм.

207 Определить теоретическую скорость адиабатного истечения воздуха через сопло Лавалья, если $P_1 = 8$ бар и $t_1 = 20^\circ\text{C}$, а давление среды на выходе из сопла $P_2 = 1$ бар. Сравнить полученную скорость с критической.

Ответ: $\omega = 514$ м/с; $\omega_{\text{кр}} = 313$ м/с.

208 Определить теоретическую скорость истечения пара из котла в атмосферу. Давление в котле 1,5 бар и степень сухости 0,95. Процесс расширения пара считать адиабатным.

Ответ: $\omega = 360$ м/с.

209 Влажный пар с параметрами $P_1 = 18$ бар и $x_1 = 0,92$ вытекает в среду с давлением $P_2 = 12$ бар; площадь выходного

сечения сопла 20 мм^2 . Определить теоретическую скорость при адиабатном истечении пара и его секундный расход.

Ответ: $\omega = 380 \text{ м/с}$; $G = 0,05 \text{ кг/с}$.

210 Определить теоретическую скорость истечения пара из сопла Лаваля для следующих данных: $P_1 = 16 \text{ бар}$, $t_1 = 300^\circ\text{C}$, $P_2 = 1 \text{ бар}$. Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

Ответ: $\omega = 1040 \text{ м/с}$.

211 Водяной пар давлением 20 бар с температурой 400°C при истечении из сопла расширяется по адиабате до давления 2 бар . Определить площадь минимального и выходного сечения сопла, а также скорости истечения в этих соплах, если расход пара 4 кг/с . Процесс расширения пара в сопле принять адиабатным.

Ответ: $F_{\min} = 16 \text{ см}^2$; $F_{\max} = 36 \text{ см}^2$;

$\omega_{\text{кр}} = 580 \text{ м/с}$; $\omega = 1050 \text{ м/с}$.

212 Парогенератор вырабатывает 1800 кг/ч пара давлением $10,8 \text{ бар}$. Каким должно быть сечение предохранительного клапана, чтобы при внезапном прекращении отбора пара давление не превысило $10,8 \text{ бар}$?

Ответ: $F_{\min} = 321 \text{ мм}^2$.

213 Для обдувки поверхностей нагрева паровых котлов пользуются так называемыми обдувочными аппаратами, снабженными соплами, через которые обычно пропускают пар или воздух.

Определить диаметры минимального и выходного сечения сопла для часового расхода 1000 кг сухого насыщенного пара, если начальное давление его $P_1 = 20,6 \text{ бар}$, а конечное $P_2 = 1,0 \text{ бар}$. Процесс расширения пара принять адиабатным. Определить также теоретическую скорость истечения пара из сопла.

Ответ: $d_{\min} = 11,2 \text{ мм}$; $d = 22,4 \text{ мм}$; $\omega = 1000 \text{ м/с}$.

214 1 кг воздуха при температуре $t_1 = 200^\circ\text{C}$ дросселируется от давления 12 бар до давления 7 бар . Определить энтальпию воздуха

после дросселирования (принимая, что энтальпия его при 0°C равна нулю) и изменение энтропии в рассматриваемом процессе.

Ответ: $h=202,4$ кДж/кг; $\Delta s=0,157$ кДж/(кг·К).

215 В стальном баллоне находятся 6,25 кг воздуха при давлении 50 бар. При выпуске из баллона воздуха он дросселируется до давления 25 бар. Определить приращение энтропии в процессе дросселирования.

Ответ: $\Delta s = 0,199$ кДж/К.

216 Пар при давлении 1 бар и $x_1 = 0,9$ дросселируется до давления 1 бар. Определить конечную сухость пара.

Ответ: $x_2 = 0,96$.

217 До какого давления необходимо дросселировать пар при $P_1 = 60$ бар и $x_1 = 0,96$, чтобы он стал сухим насыщенным?

Ответ: $P_2 = 2,6$ бар.

218 Пар при давлении 20 бар и степени сухости 0,9 дросселируется до давления 8 бар. Определить состояние пара в конце дросселирования.

Ответ: $x_2 = 0,921$.

219 Пар при давлении 100 бар и $t_1 = 320^{\circ}\text{C}$ дросселируется до $P_2 = 30$ бар. Определить параметры конечного состояния и изменение температуры пара.

Ответ: $x_2 = 0,99$; $\Delta t = 85^{\circ}\text{C}$.

220 Отработавший пар из паровой турбины поступает в конденсатор в количестве 125 т/ч. Состояние отработавшего пара: $P_2 = 0,044$ бар и $x = 0,89$. Определить диаметр входного патрубка конденсатора, если скорость пара в нем $\omega = 120$ м/с.

Ответ: $d = 3,22$ м.

221 Определить площади минимального и выходного сечений сопла Лаваля, если известны начальные параметры пара: $P_1 = 9,8$ бар,

$t_1 = 300^\circ\text{C}$. Давление за соплом $P_2 = 2,45$ бар. Расход пара через сопло 720 кг/ч. Скоростной коэффициент 0,94.

Ответ: $F_{\min} = 165 \text{ мм}^2$; $F_{\max} = 210 \text{ мм}^2$.

222 В паровую турбину подается пар со следующими параметрами: $P_1 = 60$ бар, $t_1 = 400^\circ\text{C}$. В клапанах турбины пар дросселируется до 55 бар и поступает в расширяющиеся сопла, давление за которыми $P_2 = 10$ бар. Расход пара через одно сопло 8000 кг/ч. Скоростной коэффициент 0,94. Определить площади минимального и выходного сечений.

Ответ: $F_{\min} = 355 \text{ мм}^2$; $F_{\max} = 546 \text{ мм}^2$.

223 По паропроводу течет влажный пар, параметры которого: $P_1 = 10$ бар и $x_1 = 0,98$. Часть пара через дроссельный вентиль перепускается в паропровод, давление в котором $P_2 = 1,2$ бар. Определить состояние пара в паропроводе низкого давления.

Ответ: пар перегретый, $t_2 = 130^\circ\text{C}$.