
Термодинамика и теплопередача

лектор

Зиякаев Григорий Ракитович

Лекция 13

Содержание

- Истечение газов и паров

Истечение газов и паров

Процессы истечения газов и паров происходят в газо- и паротурбинных установках, в воздушно-реактивных двигателях. Сопла и диффузоры находят применение в эжекторах, струйных компрессорах.

Для увеличения скорости потока газа или пара применяют **сопла**.

Первый закон термодинамики для потока, применительно к адиабатным процессам истечения из сопел, имеет вид

$$0 = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2},$$

где c_1 , c_2 – скорости потока рабочего тела на входе и на выходе из сопла

Истечение газов и паров

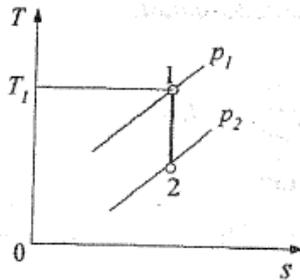


Рис. 1.15

Обозначения: p_1, t_1 – параметры потока рабочего тела на входе в сопло; p_2 – давление рабочего тела на выходе из сопла.

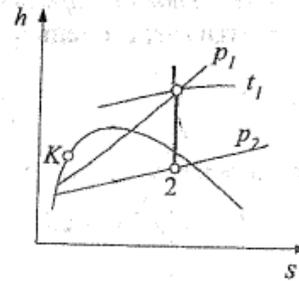


Рис. 1.16

На рисунках показаны процессы адиабатного истечения газа в T-s диаграмме и водяного пара в h-s диаграмме

В процессах адиабатного истечения газов и паров из сопел:

- Давление уменьшается $p_2 < p_1$
- Температура уменьшается $T_2 < T_1$
- Энтальпия уменьшается $h_2 < h_1$
- Удельный объем увеличивается $v_2 > v_1$
- Энтропия обратимых процессах (без учета трения) не изменяется ($s = \text{const}$), в реальных (необратимых) процессах увеличивается $s_2 > s_1$

Истечение газов и паров

Скорость потока рабочего тела принято сравнивать со скоростью звука (a)

$$a = \sqrt{k \cdot p \cdot v},$$

где k – показатель адиабаты;
 p , Па – давление;
 v , м³/кг - удельный объем.

Для идеального газа с учетом уравнения $pv=RT$

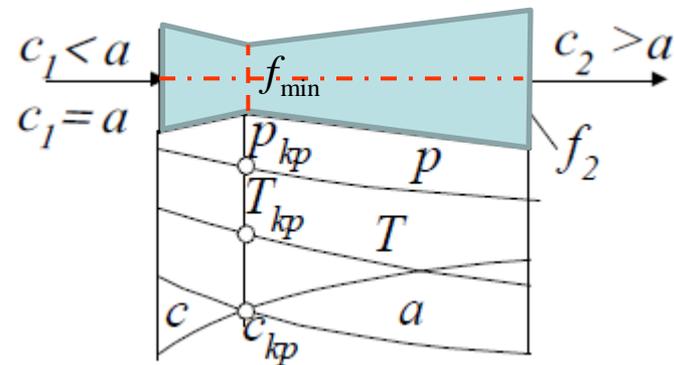
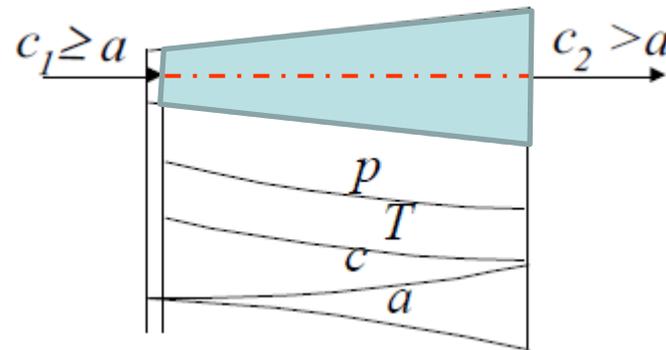
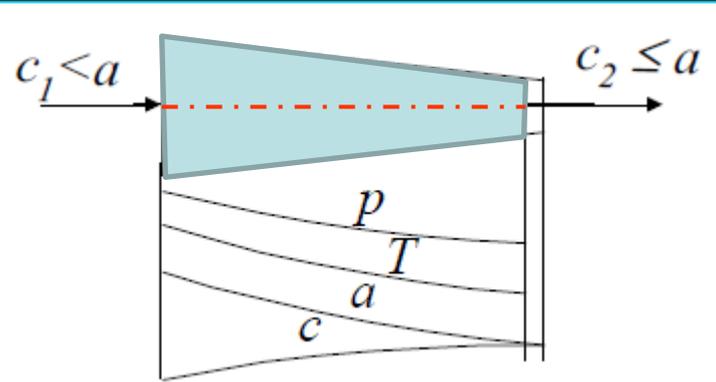
$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T},$$

Для идеального газа и любых рабочих тел скорость звука $a=f(T)$
С уменьшением температуры скорость звука уменьшается и наоборот.

Истечение газов и паров

Различают 3 вида сопел:

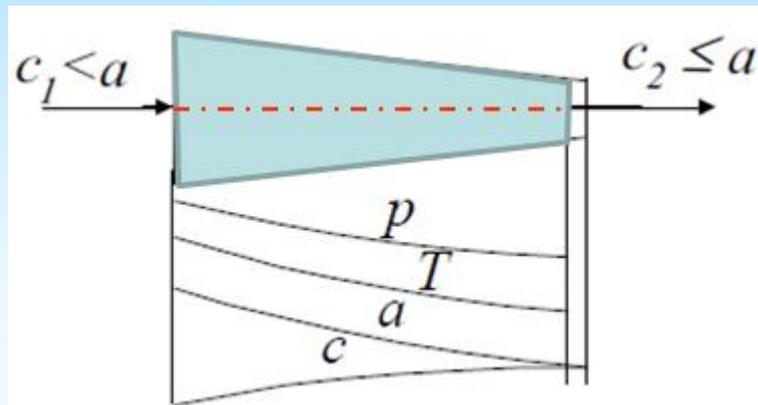
- Суживающееся
- Расширяющееся
- Сопло Лавала



Истечение газов и паров

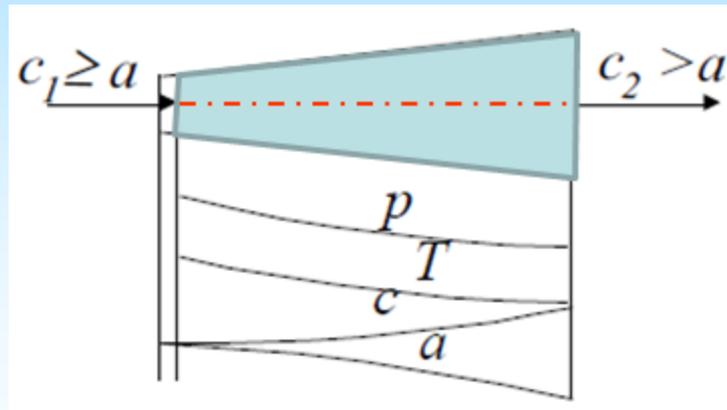
Суживающееся сопло применяют для увеличения скорости дозвуковых потоков ($c_1 < a$ или $c_1 = 0$).

На выходе суживающегося сопла $c_2 \leq a$, получить сверхзвуковую скорость невозможно.



Истечение газов и паров

Расширяющееся сопло применяют для увеличения скорости звуковых или сверхзвуковых потоков ($c_1 \geq a$).



Истечение газов и паров

Сопло Лавала применяют для увеличения скорости дозвуковых потоков ($c_1 < a$ или $c_1 = 0$) до значений $c_2 \geq a$

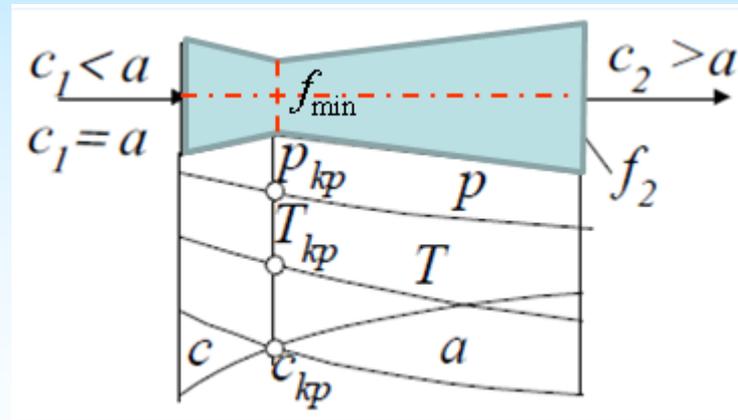
В минимальном сечении сопла скорость потока, равную скорости звука, и все параметры называют критическими:

$$c_{кр} = a$$

$$p = p_{кр}$$

$$T = T_{кр}$$

$$v = v_{кр}$$



f_2 - площадь выходного сечения сопла

f_{min} - площадь минимального сечения сопла

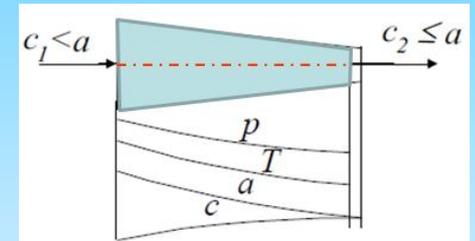
Истечение газов и паров

Если обозначить

$$\frac{p_2}{p_1} = \beta, \quad \frac{p_{кр}}{p_1} = \beta_{кр},$$

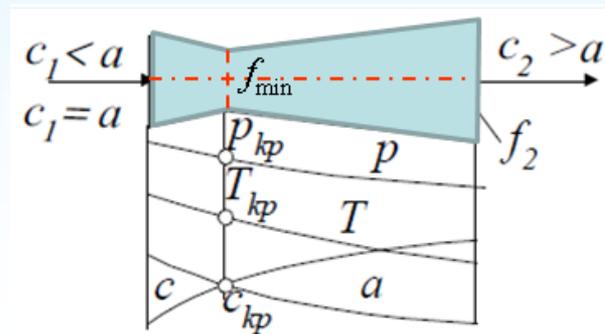
То для суживающихся сопел

$$\beta \geq \beta_{кр} \quad (p_2 \geq p_{кр}),$$



Для сопел Лавалья

$$\beta < \beta_{кр} \quad (p_2 < p_{кр}),$$



Истечение газов и паров

Анализ адиабатного процесса истечения дает

$$\beta_{\text{кр}} = \frac{p_{\text{кр}}}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = f(k),$$

где k – показатель адиабаты

В таблице приведены значения $\beta_{\text{кр}}$ для газов и водяного пара

Рабочее тело	k	$\beta_{\text{кр}}$
1 атомный идеальный газ	1,67	0,484
2х-атомный идеальный газ	1,4	0,528
3х-и многоатомный идеальный газ	1,29	0,546
Водяной пар	1,3	0,55

Истечение газов и паров

Целью расчета сопел является определение скоростей (c_2 и $c_{кр}$) и площадей характерных сечений сопла (f_2 и f_{min}).

Скорости рабочего тела на выходе из сопел (c_2) и в минимальном сечении сопел Лавалья ($c_{кр}$) рассчитываются по формулам

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2) + c_1^2}, \left[\frac{м}{с} \right]$$

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) + c_1^2},$$

$$c_{кр} = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_{кр}) + c_1^2}, \left[\frac{м}{с} \right]$$

$$c_{кр} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{кр}) + c_1^2}, \left[\frac{м}{с} \right]$$

где h (Дж/кг) — энтальпия

c_p — массовая теплоемкость газа

Истечение газов и паров

Площади выходного и минимального сечений сопла рассчитываются по уравнению неразрывности потока

$$G = \frac{f \cdot c}{\nu} = \text{const} \quad \frac{\text{кг}}{\text{с}} = \frac{\text{м}^2 \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}}$$

где G (кг/с) – расход рабочего тела

c (м/с) – скорость потока

ν (м³/кг) – удельный объем

$$f_2 = \frac{G \cdot \nu_2}{c_2},$$

$$f_{\min} = \frac{G \cdot \nu_{\text{кр}}}{c_{\text{кр}}}$$

Истечение газов и паров

Даны параметры и скорость газа на входе в сопло, давление среды в которую происходит истечение и массовый расход газа.

Определить тип сопла, рассчитать скорость истечения газа, определить диаметры сечений сопла.

Изобразить процесс истечения в Ts- диаграмме.

Таблица 1

№ вар.	Газ	p_1 , бар	t_1 , °C	C_1 , м/с	p_2 , бар	G , кг/с
1	Воздух	25	180	350	20	0,55
2	O_2	24	170	400	1,9	0,58
3	N_2	23	160	450	1,8	0,60
4	CO_2	22	150	500	1,7	0,62
5	Воздух	21	140	450	1,6	0,65
6	H_2	20	170	550	1,5	0,68
7	CO	19	160	600	1,4	0,70
8	Воздух	18	150	300	13	0,73
9	O_2	17	140	350	1,2	0,75
10	N_2	16	130	400	11	0,80
11	CO_2	15	160	200	1,0	0,83
12	Воздух	14	150	250	0,9	0,85
13	H_2	13	140	300	8	0,90
14	CO	12	130	350	7	0,93
15	Воздух	11	120	400	0,7	0,96
16	O_2	12	175	450	0,8	0,93
17	N_2	13	165	500	0,9	0,90
18	CO_2	14	155	550	1,0	0,85
19	Воздух	15	145	600	1,1	0,83
20	H_2	16	135	300	1,2	0,80
21	CO	17	165	350	13	0,75
22	Воздух	18	155	350	1,4	0,73
23	O_2	19	145	370	15	0,70
24	N_2	20	135	400	1,6	0,68
25	CO_2	21	125	420	1,7	0,65
26	Воздух	22	190	450	18	0,62
27	H_2	23	175	500	1,9	0,60
28	CO	24	165	530	2,0	0,58
29	Воздух	25	155	480	2,1	0,55
30	O_2	26	145	400	2,2	0,50