

Таблица 1.4

№	м										м									
	z ₁	z ₂	l ₁	d ₁	l ₂	d ₂	l ₃	d ₃	l ₄	d ₄	l ₅	d ₅	l ₆	d ₆	l ₇	d ₇	l ₈	d ₈	l ₉	d ₉
1	-5	5	200	0,2	20	0,2	20	0,1	20	0,1	20	0,2	10	0,15	15	0,10	—	—	—	—
2	-5	5	200	0,15	40	0,15	40	0,20	40	0,20	40	0,15	15	0,18	20	0,10	—	—	—	—
3	-3	3	100	0,15	40	0,15	60	0,15	60	0,20	40	0,10	30	0,18	40	0,12	—	—	—	—
4	-6	5	120	0,15	60	0,15	40	0,15	70	0,12	60	0,15	40	0,15	40	0,12	—	—	—	—
5	-5	5	200	0,20	40	0,20	40	0,15	30	0,12	60	0,18	60	0,15	40	0,20	30	0,20	—	—
6	-6	4	100	0,20	40	0,20	40	0,15	30	0,12	20	0,20	60	0,20	60	0,15	60	0,18	—	—
7	-6	5	150	0,20	40	0,20	60	0,20	30	0,12	40	0,10	60	0,15	40	0,12	60	0,15	70	0,15
8	-6	2	150	0,20	60	0,20	120	0,15	30	0,15	30	0,20	30	0,20	30	0,15	60	0,20	60	0,20
9	-6	2	100	0,20	40	0,20	120	0,15	30	0,15	40	0,20	40	0,20	40	0,15	100	0,20	50	0,20
10	-6	4	200	0,20	60	0,20	150	0,15	100	0,12	40	0,10	60	0,15	70	0,12	100	0,12	50	0,10

Примечание. Рекомендуемые расходы: вода — $0,01 \div 0,05$ (0,05) м³/сек; газ — $0,1 \div 0,55$ (0,05) м³/сек.

11. Потери давления:

а) местные

$$\Delta p_m = 101 + 303 + 1200 + 8640 + 1820 = 12064 \text{ н/м}^2;$$

б) в трубах

$$\Delta p_T = 4560 + 456 + 3400 + 456 + 1750 = 10622 \text{ н/м}^2;$$

в) за счет разности геометрических высот

$$\Delta p_z = \rho g \Delta z = 1000 \cdot 9,81 \cdot 10 = 98100 \text{ н/м}^2.$$

12. Полные потери в трубопроводе

$$\Delta p_p = \Delta p_z + \Delta p_m + \Delta p_T = 98100 + 10622 + 12064 = 120800 \text{ н/м}^2.$$

13. Требуемая мощность электродвигателя

$$N = \Delta p_p \dot{Q} = 120800 \cdot 0,02 = 2416 \text{ Вт} = 2,42 \text{ кВт}.$$

Задание выдается преподавателем с указанием номера схемы из табл. 1.3 и основных размеров из табл. 1.4.

Рекомендуемый расход и интервал его изменения приведены в конце табл. 1.4. Кроме того, преподаватель в соответствии с табл. 1.1 указывает материал трубопровода и рабочее тело (вода, газ).

ЛИТЕРАТУРА

- Теплотехнический справочник, т. I. Госэнергоиздат, 1957.
 Справочник машиностроителя, т. II. Машгиз, 1956.
 С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.
 И. Е. Идельчик. Гидравлические сопротивления. Госэнергоиздат, 1954.

Контрольное задание 2

Движение газового потока в сопле Лавала

Каналы с суживающейся входной и расширяющейся выходной частью широко применяются в технике. Если они предназначены для преобразования дозвукового потока в сверхзвуковой, то называются соплами Лавала. Заставив газ протекать под действием достаточно большого перепада давлений сначала через суживающийся, а затем через расши-

ряющийся канал, можно осуществить течение с непрерывно возрастающей скоростью и достигнуть на выходе из сопла скорости истечения больше скорости звука в этом же выходном сечении. В зависимости от соотношения между начальным давлением газа p_1 и давлением p' внешней среды, в которую происходит истечение, т. е. от величины перепада давлений $p_1 - p'$, в сопле возможны различные режимы течения.

Режим непрерывного течения, характеризующийся сверхзвуковой скоростью истечения и равенством внешнего давления p' и давления p_2 в выходном сечении сопла, называется расчетным. Если уменьшить внешнее давление p' по сравнению с расчетным давлением p_2 , то движение газа в сопле не изменится, но выходящая из сопла струя начнет пульсировать. В отличие от всех других случаев давление в выходном сечении сопла при этом больше внешнего давления и имеет независимо от внешнего давления постоянное значение p_2 .

Различают два типа нерасчетного режима. При первом из них струя газа в том месте, где давление газа становится равным внешнему давлению p' , отрывается от стенок сопла и выходит в виде цилиндрической струи. При втором режиме, который наблюдается в соплах с небольшим углом раствора расширяющейся части ($10 - 12^\circ$), струя не отрывается от стенок сопла. Однако при повышении давления возникают косые скачки уплотнения сначала за выходным сечением сопла, а затем при более высоком давлении среды происходит прямой скачок уплотнения внутри расширяющейся части сопла. В сечении, где возникает скачок, давление и плотность газа возрастают на конечную величину, а скорость газа скачкообразно уменьшается, переходя от сверхзвуковой в дозвуковую. После прямого скачка уплотнения скорость течения вдоль сопла убывает, а давление газа возрастает, принимая в выходном сечении значение, равное внешнему давлению. Все эти режимы течения имеют только теоретическое значение, так как в действительных соплах всегда имеется трение, а также скачки уплотнения (в сверхзвуковой части сопла), которые нарушают изэнтропический характер течения.

При отсутствии теплообмена газа с внешней средой и необратимых потерь механической энергии между параметрами газа существует зависимость

$$p = \frac{p_1}{\rho_1^k} \rho^k, \quad (1)$$

представляющая собой уравнение изэнтропической адиабаты. Для одноатомных газов $k = 1,66$; для двухатомных (воздух) $k = 1,40$ и для многоатомных $k = 1,33$.

Характеристикой энергетического состояния газа является скорость звука в нем. Под скоростью звука в газовой дина-

мике понимают скорость распространения в газе слабых возмущений. Скорость звука можно вычислить по формулам:

$$a = \sqrt{\frac{k p}{\rho}}; \quad a = \sqrt{k R T}; \quad R = \frac{8310}{\mu} \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}. \quad (2)$$

Важнейшим газодинамическим параметром является число Маха $M = \frac{c}{a}$ — отношение скорости движения газа к местной скорости звука в нем.

В расчете одномерных адиабатических течений идеального газа главную роль играет уравнение сохранения энергии

$$\frac{c^2}{2} + i = i^*, \quad (3)$$

где i — энтальпия, Дж/кг,

$$i = \frac{a^2}{k-1} = \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} = \frac{k R T}{k-1}; \quad (4)$$

i^* — энтальпия газа в заторможенном состоянии.

Полную энергию энергетически изолированного газа характеризует максимальная теоретическая скорость течения c_{max}

$$c_{max} = \sqrt{2 i^*} = \sqrt{\frac{2 k R T^*}{k-1}}. \quad (5)$$

Для изэнтропических процессов уравнение (3) можно записать в эквивалентных формах:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T^*}{T} &= 1 + \frac{k-1}{2} M^2; \quad \frac{p^*}{p} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}; \\ \frac{\rho^*}{\rho} &= \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{k-1}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Если скорость движения газа и местная скорость звука в газе совпадают по величине, то обе скорости называются критическими

$$c_{кр} = a_{кр}. \quad (7)$$

Критическая скорость звука (или критическая скорость) может быть выражена через параметры торможения газа. В частности,

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2 k R T^*}{k+1}}. \quad (8)$$

Параметры газа, скорость движения которого равна по величине местной скорости звука в газе, называются критическими параметрами.

Критическим параметрам соответствует число $M=1$. Из формул (6) вытекает:

$$T_{кр} = \frac{2}{k+1} T^*; \quad p_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p^*; \quad \rho_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \rho^*. \quad (9)$$

Уравнение энергии применяется также в одной из следующих форм:

$$\left. \begin{aligned} \tau = \frac{T}{T^*} &= 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2; \\ \pi = \frac{p}{p^*} &= \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad \varepsilon = \frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где $\lambda = \frac{c}{a_{кр}}$ — коэффициент скорости; τ , π и ε — газодинамические функции (табл. 2.1).

При решении многих задач пользоваться коэффициентом скорости λ удобнее, чем числом M . Между числом λ и числом M имеется следующая связь:

$$\lambda^2 = \frac{\frac{k+1}{2} M^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2}. \quad (11)$$

При подсчете секундного расхода газа через сопло удобно пользоваться функцией $q(M)$ — приведенным секундным расходом:

$$q = \frac{\rho c}{\rho_{кр} a_{кр}} = \frac{F_{кр}}{F}, \quad (12)$$

где $F_{кр}$ — площадь критического сечения сопла; F — площадь сечения, в котором достигается скорость c ;

$$q = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{2(k-1)}} M \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{-\frac{k+1}{2(k-1)}}$$

или

$$q = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (13)$$

Значения $q(M)$ и $q(\lambda)$ приведены в табл. 2.1.

Приведенный секундный расход выражается также через отношение давлений π :

$$q = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \sqrt{\pi^{\frac{2}{k}} - \pi^{\frac{k+1}{2}}}. \quad (14)$$

$\frac{c}{a_{кр}}$	$\frac{T}{T^*}$	$\frac{p}{p^*}$	$\frac{\rho}{\rho^*}$	$\frac{F_{кр}}{F}$	$\frac{c}{a}$
λ	τ	π	ε	q	M
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000
0,01	1,0000	0,9999	0,9999	0,0158	0,0091
0,02	0,9999	0,9998	0,9998	0,0315	0,0183
0,03	0,9999	0,9995	0,9997	0,0473	0,0274
0,04	0,9997	0,9990	0,9993	0,0631	0,0365
0,05	0,9996	0,9986	0,9990	0,0788	0,0457
0,06	0,9994	0,9979	0,9985	0,0945	0,0548
0,07	0,9992	0,9971	0,9979	0,1102	0,0639
0,08	0,9989	0,9963	0,9974	0,1259	0,0731
0,09	0,9987	0,9953	0,9967	0,1415	0,0822
0,10	0,9983	0,9942	0,9959	0,1571	0,0914
0,11	0,9980	0,9929	0,9949	0,1726	0,1005
0,12	0,9976	0,9916	0,9940	0,1882	0,1097
0,13	0,9972	0,9901	0,9929	0,2036	0,1190
0,14	0,9967	0,9886	0,9918	0,2190	0,1280
0,15	0,9963	0,9870	0,9907	0,2344	0,1372
0,16	0,9957	0,9851	0,9893	0,2497	0,1460
0,17	0,9952	0,9832	0,9880	0,2649	0,1560
0,18	0,9946	0,9812	0,9866	0,2801	0,1650
0,19	0,9940	0,9791	0,9850	0,2952	0,1740
0,20	0,9933	0,9768	0,9834	0,3102	0,1830
0,21	0,9927	0,9745	0,9817	0,3252	0,1920
0,22	0,9919	0,9720	0,9799	0,3401	0,2020
0,23	0,9912	0,9695	0,9781	0,3549	0,2109
0,24	0,9904	0,9668	0,9762	0,3696	0,2202
0,25	0,9896	0,9640	0,9742	0,3842	0,2290
0,26	0,9887	0,9611	0,9721	0,3987	0,2387
0,27	0,9879	0,9581	0,9699	0,4131	0,2480
0,28	0,9869	0,9550	0,9677	0,4274	0,2573
0,29	0,9860	0,9518	0,9653	0,4416	0,2670
0,30	0,9850	0,9485	0,9630	0,4557	0,2760
0,31	0,9840	0,9451	0,9605	0,4697	0,2850
0,32	0,9829	0,9415	0,9579	0,4835	0,2947
0,33	0,9819	0,9379	0,9552	0,4972	0,3040
0,34	0,9807	0,9342	0,9525	0,5109	0,3134
0,35	0,9796	0,9303	0,9497	0,5243	0,3228
0,36	0,9784	0,9265	0,9469	0,5377	0,3322
0,37	0,9772	0,9224	0,9439	0,5509	0,3417
0,38	0,9759	0,9183	0,9409	0,5640	0,3511
0,39	0,9747	0,9141	0,9378	0,5769	0,3606
0,40	0,9733	0,9097	0,9346	0,5897	0,3701
0,41	0,9720	0,9053	0,9314	0,6054	0,3796
0,42	0,9706	0,9008	0,9281	0,6149	0,3892
0,43	0,9692	0,8962	0,9247	0,6272	0,3987
0,44	0,9677	0,8915	0,9212	0,6394	0,4083
0,45	0,9663	0,8868	0,9178	0,6515	0,4179
0,46	0,9647	0,8819	0,9142	0,6633	0,4275
0,47	0,9632	0,8770	0,9105	0,6750	0,4372
0,48	0,9616	0,8719	0,9067	0,6865	0,4468
0,49	0,9600	0,8668	0,9029	0,6979	0,4565
0,50	0,9583	0,8616	0,8991	0,7091	0,4663

Таблица 2.1

λ	τ	π	ε	q	M
0,51	0,9567	0,8563	0,8951	0,7201	0,4760
0,52	0,9549	0,8509	0,8911	0,7309	0,4858
0,53	0,9532	0,8455	0,8871	0,7419	0,4956
0,54	0,9514	0,8400	0,8829	0,7520	0,5054
0,55	0,9496	0,8344	0,8787	0,7623	0,5152
0,56	0,9477	0,8287	0,8744	0,7724	0,5251
0,57	0,9459	0,8230	0,8701	0,7823	0,5360
0,58	0,9439	0,8172	0,8657	0,7920	0,5450
0,59	0,9420	0,8112	0,8612	0,8015	0,5549
0,60	0,9400	0,8053	0,8567	0,8109	0,5649
0,61	0,9380	0,7992	0,8521	0,8198	0,5750
0,62	0,9359	0,7932	0,8475	0,8288	0,5850
0,63	0,9339	0,7870	0,8428	0,8375	0,5951
0,64	0,9317	0,7808	0,8380	0,8459	0,6053
0,65	0,9296	0,7745	0,8332	0,8543	0,6154
0,66	0,9274	0,7681	0,8283	0,8623	0,6256
0,67	0,9252	0,7617	0,8233	0,8701	0,6359
0,68	0,9229	0,7553	0,8183	0,8778	0,6461
0,69	0,9207	0,7488	0,8133	0,8852	0,6565
0,70	0,9183	0,7422	0,8082	0,8924	0,6668
0,71	0,9160	0,7356	0,8030	0,8993	0,6772
0,72	0,9136	0,7289	0,7978	0,9061	0,6876
0,73	0,9112	0,7221	0,7925	0,9126	0,6981
0,74	0,9087	0,7154	0,7872	0,9189	0,7086
0,75	0,9063	0,7086	0,7819	0,9250	0,7192
0,76	0,9037	0,7017	0,7764	0,9308	0,7298
0,77	0,9012	0,6948	0,7710	0,9364	0,7404
0,78	0,8986	0,6878	0,7655	0,9418	0,7511
0,79	0,8960	0,6809	0,7599	0,9469	0,7619
0,80	0,8933	0,6738	0,7543	0,9518	0,7727
0,81	0,8907	0,6668	0,7486	0,9565	0,7835
0,82	0,8879	0,6597	0,7429	0,9610	0,7944
0,83	0,8852	0,6526	0,7372	0,9652	0,8053
0,84	0,8824	0,6454	0,7314	0,9691	0,8163
0,85	0,8796	0,6382	0,7256	0,9729	0,8274
0,86	0,8767	0,6310	0,7197	0,9764	0,8384
0,87	0,8739	0,6238	0,7138	0,9796	0,8496
0,88	0,8709	0,6165	0,7079	0,9826	0,8608
0,89	0,8680	0,6092	0,7019	0,9854	0,8721
0,90	0,8650	0,6019	0,6959	0,9879	0,8833
0,91	0,8620	0,5946	0,6898	0,9902	0,8947
0,92	0,8589	0,5873	0,6838	0,9923	0,9062
0,93	0,8559	0,5800	0,6776	0,9941	0,9177
0,94	0,8527	0,5726	0,6715	0,9957	0,9292
0,95	0,8496	0,5653	0,6653	0,9970	0,9409
0,96	0,8464	0,5579	0,6591	0,9981	0,9526
0,97	0,8432	0,5505	0,6528	0,9989	0,9644
0,98	0,8399	0,5431	0,6466	0,9993	0,9761
0,99	0,8367	0,5357	0,6403	0,9999	0,9880
1,00	0,8333	0,5283	0,6340	1,0000	1,0000

λ	τ	π	ε	q	M
1,01	0,8300	0,5209	0,6276	0,9999	1,0120
1,02	0,8266	0,5135	0,6212	0,9995	1,0241
1,03	0,8232	0,5061	0,6148	0,9989	1,0363
1,04	0,8197	0,4987	0,6084	0,9980	1,0486
1,05	0,8163	0,4913	0,6019	0,9969	1,0609
1,06	0,8127	0,4840	0,5955	0,9957	1,0733
1,07	0,8092	0,4766	0,5890	0,9941	1,0858
1,08	0,8056	0,4693	0,5826	0,9924	1,0985
1,09	0,8020	0,4619	0,5760	0,9903	1,1111
1,10	0,7983	0,4546	0,5694	0,9880	1,1239
1,11	0,7947	0,4473	0,5629	0,9856	1,1367
1,12	0,7909	0,4400	0,5564	0,9829	1,1496
1,13	0,7872	0,4328	0,5498	0,9800	1,1627
1,14	0,7834	0,4255	0,5432	0,9768	1,1758
1,15	0,7796	0,4184	0,5366	0,9735	1,1890
1,16	0,7757	0,4111	0,5300	0,9698	1,2023
1,17	0,7719	0,4040	0,5243	0,9659	1,2157
1,18	0,7679	0,3969	0,5168	0,9620	1,2292
1,19	0,7640	0,3898	0,5102	0,9577	1,2428
1,20	0,7600	0,3827	0,5035	0,9513	1,2566
1,21	0,7560	0,3757	0,4969	0,9484	1,2708
1,22	0,7519	0,3687	0,4903	0,9435	1,2843
1,23	0,7478	0,3617	0,4837	0,9384	1,2974
1,24	0,7437	0,3548	0,4770	0,9331	1,3126
1,25	0,7396	0,3479	0,4704	0,9275	1,3268
1,26	0,7354	0,3411	0,4638	0,9217	1,3413
1,27	0,7312	0,3343	0,4572	0,9159	1,3558
1,28	0,7269	0,3275	0,4505	0,9096	1,3705
1,29	0,7227	0,3208	0,4439	0,9033	1,3853
1,30	0,7183	0,3142	0,4374	0,8969	1,4002
1,31	0,7140	0,3075	0,4307	0,8901	1,4153
1,32	0,7096	0,3010	0,4241	0,8831	1,4305
1,33	0,7052	0,2945	0,4176	0,8761	1,4458
1,34	0,7007	0,2880	0,4110	0,8688	1,4613
1,35	0,6962	0,2816	0,4045	0,8614	1,4769
1,36	0,6917	0,2753	0,3980	0,8538	1,4927
1,37	0,6872	0,2690	0,3914	0,8459	1,5087
1,38	0,6826	0,2628	0,3850	0,8380	1,5248
1,39	0,6780	0,2566	0,3785	0,8299	1,5410
1,40	0,6733	0,2505	0,3720	0,8216	1,5575
1,41	0,6687	0,2445	0,3656	0,8131	1,5741
1,42	0,6639	0,2385	0,3592	0,8046	1,5909
1,43	0,6592	0,2326	0,3528	0,7958	1,6078
1,44	0,6544	0,2267	0,3464	0,7869	1,6250
1,45	0,6496	0,2209	0,3401	0,7778	1,6423
1,46	0,6447	0,2152	0,3338	0,7687	1,6598
1,47	0,6398	0,2095	0,3275	0,7593	1,6776
1,48	0,6349	0,2040	0,3212	0,7499	1,6955
1,49	0,6300	0,1985	0,3150	0,7404	1,7137
1,50	0,6250	0,1930	0,3088	0,7307	1,7321

λ	τ	π	ε	q	M
1,51	0,6200	0,1876	0,3027	0,7209	1,7506
1,52	0,6149	0,1824	0,2965	0,7110	1,7694
1,53	0,6099	0,1771	0,2904	0,7009	1,7885
1,54	0,6047	0,1720	0,2844	0,6909	1,8078
1,55	0,5996	0,1669	0,2784	0,6807	1,8273
1,56	0,5944	0,1619	0,2724	0,6703	1,8471
1,57	0,5892	0,1570	0,2665	0,6599	1,8672
1,58	0,5839	0,1522	0,2606	0,6494	1,8875
1,59	0,5786	0,1474	0,2547	0,6389	1,9081
1,60	0,5733	0,1427	0,2489	0,6282	1,9290
1,61	0,5680	0,1381	0,2431	0,6175	1,9501
1,62	0,5626	0,1336	0,2374	0,6067	1,9716
1,63	0,5572	0,1291	0,2317	0,5958	1,9934
1,64	0,5517	0,1248	0,2261	0,5850	2,0155
1,65	0,5463	0,1205	0,2205	0,5740	2,0380
1,66	0,5407	0,1163	0,2150	0,5630	2,0607
1,67	0,5352	0,1121	0,2095	0,5520	2,0839
1,68	0,5296	0,1081	0,2041	0,5409	2,1073
1,69	0,5240	0,1041	0,1988	0,5298	2,1313
1,70	0,5183	0,1003	0,1934	0,5187	2,1555
1,71	0,5126	0,0965	0,1881	0,5075	2,1802
1,72	0,5069	0,0928	0,1830	0,4965	2,2053
1,73	0,5012	0,0891	0,1778	0,4852	2,2308
1,74	0,4954	0,0856	0,1727	0,4741	2,2567
1,75	0,4896	0,0821	0,1677	0,4630	2,2831
1,76	0,4837	0,0787	0,1629	0,4520	2,3100
1,77	0,4779	0,0754	0,1578	0,4407	2,3374
1,78	0,4719	0,0722	0,1529	0,4296	2,3653
1,79	0,4660	0,0691	0,1482	0,4185	2,3957
1,80	0,4600	0,0660	0,1435	0,4075	2,4227
1,81	0,4540	0,0630	0,1389	0,3969	2,4523
1,82	0,4479	0,0602	0,1343	0,3855	2,4824
1,83	0,4418	0,0573	0,1298	0,3746	2,5132
1,84	0,4357	0,0546	0,1253	0,3638	2,5449
1,85	0,4296	0,0520	0,1210	0,3530	2,5766
1,86	0,4234	0,0494	0,1167	0,3423	2,6094
1,87	0,4172	0,0469	0,1124	0,3316	2,6429
1,88	0,4109	0,0445	0,1083	0,3211	2,6772
1,89	0,4047	0,0422	0,1042	0,3105	2,7123
1,90	0,3983	0,0399	0,1002	0,3002	2,7481
1,91	0,3920	0,0377	0,0962	0,2898	2,7849
1,92	0,3856	0,0356	0,0923	0,2797	2,8225
1,93	0,3792	0,0336	0,0885	0,2695	2,8612
1,94	0,3727	0,0316	0,0848	0,2596	2,9007
1,95	0,3662	0,0297	0,0812	0,2497	2,9414
1,96	0,3597	0,0279	0,0776	0,2400	2,9831
1,97	0,3532	0,0262	0,0741	0,2304	3,0301
1,98	0,3466	0,0245	0,0707	0,2209	3,0701
1,99	0,3400	0,0229	0,0674	0,2116	3,1155
2,00	0,3333	0,0214	0,0642	0,2024	3,1622

λ	τ	π	ε	q	M
2,01	0,3267	0,0199	0,0610	0,1934	3,2104
2,02	0,3199	0,0185	0,0579	0,1845	3,2603
2,03	0,3132	0,0172	0,0549	0,1758	3,3113
2,04	0,3064	0,0159	0,0520	0,1672	3,3642
2,05	0,2996	0,0147	0,0491	0,1588	3,4190
2,06	0,2927	0,0136	0,0464	0,1507	3,4759
2,07	0,2859	0,0125	0,0437	0,1427	3,5343
2,08	0,2789	0,0115	0,0411	0,1348	3,5951
2,09	0,2720	0,0105	0,0386	0,1272	3,6583
2,10	0,2650	0,0096	0,0361	0,1198	3,7240
2,11	0,2580	0,0087	0,0338	0,1125	3,7922
2,12	0,2509	0,0079	0,0315	0,1055	3,8633
2,13	0,2439	0,0072	0,0294	0,0986	3,9376
2,14	0,2367	0,0065	0,0273	0,0921	4,0150
2,15	0,2296	0,0058	0,0253	0,0857	4,0961
2,16	0,2224	0,0052	0,0233	0,0795	4,1791
2,17	0,2152	0,0046	0,0215	0,0735	4,2702
2,18	0,2079	0,0041	0,0197	0,0678	4,3642
2,19	0,2006	0,0036	0,0180	0,0623	4,4633
2,20	0,1933	0,0032	0,0164	0,0570	4,5674
2,21	0,1860	0,0028	0,0149	0,0520	4,6778
2,22	0,1786	0,0024	0,0135	0,0472	4,7954
2,23	0,1712	0,0021	0,0121	0,0427	4,9201
2,24	0,1637	0,0018	0,0116	0,0408	5,0533
2,25	0,1563	0,00151	0,00966	0,0343	5,1958
2,26	0,1487	0,00127	0,00813	0,0290	5,3494
2,27	0,1412	0,00106	0,00749	0,0268	5,5147
2,28	0,1336	0,00087	0,00652	0,0234	5,6940
2,29	0,1260	0,00071	0,00564	0,0204	5,8891
2,30	0,1183	0,00057	0,00482	0,0175	6,1033
2,31	0,1106	0,00045	0,00407	0,0148	6,3399
2,32	0,1029	0,00035	0,00400	0,0124	6,6008
2,33	0,0952	0,00027	0,00280	0,0103	6,8935
2,34	0,0874	0,00020	0,00226	0,0083	7,2254
2,35	0,0796	0,00014	0,00170	0,0063	7,6053
2,36	0,0717	$0,988 \cdot 10^{-4}$	0,00138	0,0051	8,0450
2,37	0,0638	$0,657 \cdot 10^{-4}$	0,00103	0,0038	8,5619
2,38	0,0559	$0,413 \cdot 10^{-4}$	0,00078	0,0028	9,1882
2,39	0,0480	$0,242 \cdot 10^{-4}$	0,00050	0,0019	9,9624
2,40	0,0400	$0,128 \cdot 10^{-4}$	0,00032	0,0012	10,957
2,41	0,0320	$0,584 \cdot 10^{-5}$	0,00018	0,0007	12,306
2,42	0,0239	$0,211 \cdot 10^{-5}$	$1,884 \cdot 10^{-4}$	0,0003	14,287
2,43	0,0158	$0,499 \cdot 10^{-6}$	$0,315 \cdot 10^{-4}$	0,0001	17,631
2,44	0,0077	$0,316 \cdot 10^{-6}$	$0,410 \cdot 10^{-5}$	$0,058 \cdot 10^{-4}$	25,367
2,449	0	0	0	0	∞

Массовый расход газа, который во всех сечениях сопла один и тот же, выразится следующим образом:

$$\dot{m} = \rho_2 F_2 c_2. \quad (15)$$

При истечении газа через сужающееся сопло (конфузорное) секундный массовый расход рассчитывается по формуле

$$\dot{m} = B_m \frac{p^*}{\sqrt{T^*}} F q(\lambda), \quad (16)$$

когда $p_2/p^* > p_{кр}/p^*$, и по формуле

$$\dot{m} = B_m \frac{p^*}{\sqrt{T^*}} F, \quad (17)$$

когда $p_2/p^* \leq p_{кр}/p^*$.

В формулах (16) и (17) F — площадь выходного сечения сопла; постоянная

$$B_m = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{1}{\sqrt{R}}};$$

$$B_m = 0,0405 \text{ при } k = 1,4; R = 287 \text{ дж/кг} \cdot \text{град.}$$

Сопло Лавала также можно рассчитать по формулам (16) и (17). В формуле (16) положим $F = F_2$. Далее для $M < 1$ из табл. 2.1 определяем безразмерное давление π_{1D} , соответствующее величине F_{min}/F_2 данного сопла. Если $p_2/p^* \leq \pi_{1D}$, то в формулу необходимо подставить значение $q = F_{min}/F_2$. Это равносильно применению формулы (17), в которой условие $p_2/p^* \leq \pi_{1D}$ означает, что в горле сопла скорость звуковая.

В случае $p_2/p^* > \pi_{1D}$ величину q в формуле (16) определяем не отношением F_{min}/F_2 , а из табл. 2.1 или по формуле (14).

Постоянство массового расхода \dot{m} при сверхзвуковом истечении из сопла физически объясняется тем, что изменение внешнего давления $p_{вн}$ распространяется, как всякое возмущение, со скоростью звука; в то же время скорость на выходе c_2 в данном случае больше скорости звука. Поэтому возмущения не в состоянии распространиться внутрь сопла: они все сносятся потоком наружу. В силу этого давление на выходе p_2 только при дозвуковой скорости истечения c_2 будет равно внешнему давлению $p_{вн}$. При сверхзвуковом же истечении p_2 должно быть независимо от $p_{вн}$ и связано с площадью выходного сечения F_2 определенной зависимостью. Именно этим и объясняется, что формула (16) верна и для сверхзвукового истечения. Различие в ее применении состоит только в том, что в случае дозвукового истечения ($c_2 < a$) $p_2 = p_{вн}$ и не зависит от F_2 ; в случае же сверхзвукового исте-

чения ($c_2 > a$) $p_2 \neq p_{вн}$ и \neq зависит от F_2 . Поэтому в последнем случае при заданном F_2 расход \dot{m} остается неизменным (не зависящим от $p_{вн}$).

Выбор формы профиля сопла должен обеспечивать наименьшие потери механической энергии при течении газа с трением. Задача эта достаточно сложная и до настоящего времени еще не решенная. В рассматриваемом случае идеального течения рекомендуется профилирование сопла следующим образом. Дозвуковая часть сопла (от входного до критического сечения) профилируется по формуле Витошинского

$$d = \frac{d_0 d_{кр}}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{F_{кр}}{F_1} \right) \right] \frac{\left(1 - \frac{3l^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(1 + \frac{l^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}}}}}, \quad (18)$$

где l — координата вдоль оси сопла; d — текущий диаметр сопла; d_0 — диаметр входного сечения; $d_{кр}$ — диаметр критического сечения сопла; a — некоторый параметр, выбираемый так, чтобы длина рассматриваемого участка сопла находилась с параметром a в соотношении

$$l_c' = \frac{a}{\sqrt{3}} = 2d_{кр}, \quad (19)$$

где l_c' — длина сужающейся части сопла.

Сверхзвуковая, расширяющаяся часть сопла профилируется по линейному закону и представляет собой усеченный конус, в котором угол между образующей и осью конуса рекомендуется не более 6° для отсутствия отрыва. Величина диаметра в этом случае находится по общеизвестной формуле

$$d = \sqrt{\frac{4F}{\pi}}. \quad (20)$$

В дальнейших расчетах предполагается, что начальные параметры газа (параметры перед соплом) остаются неизменными и возникновение скачков определяется изменением параметров среды (давления среды), куда происходит истечение газа из сопла.

При постоянном давлении перед соплом положение скачка уплотнения будет зависеть от противодействия среды. Задаваясь различными противодавлениями, можно получить режимы течения газа в сопле с различными положениями скачка уплотнения в расширяющейся части сопла. Однако для простоты вычислений удобнее решать обратную задачу, т. е. определять величины противодавлений при различных местоположениях скачка. Выбираем сечение F_c , в котором

расположен скачок уплотнения. Поскольку течение газа в сопле до скачка не меняется, то параметры в сечениях до скачка остаются теми же, что при расчетном режиме работы сопла. Параметры за скачком будем обозначать штрихом. Поскольку фронт скачка очень узок, то оба сечения отвечают одному и тому же месту в сопле. Скорость за скачком можно вычислить из основного соотношения теории прямого скачка

$$\lambda_c \lambda_c' = 1. \quad (21)$$

Температура торможения за скачком остается такой же, как и перед скачком, и равной T_c^* , вследствие того, что температура торможения пропорциональна энтальпии торможения, которая в теплоизолированных процессах не меняется. Давление торможения за скачком уплотнения уменьшается. Действительно, если температура торможения характеризует запас полной энергии потока, который в изолированном течении не изменяется, то давление торможения характеризует запас механической энергии газа. При переходе через скачок уплотнения часть механической энергии газа необратимо теряется и идет на нагрев газа, поэтому давление торможения за скачком оказывается меньшим. Определить его можно по уравнению (16), которое преобразуется к виду

$$\sigma = \frac{p_c^{*'}}{p_c^*} = \frac{q(\lambda_c)}{q(\lambda_c')} = \frac{q(\lambda_c)}{q\left(\frac{1}{\lambda_c}\right)} = \frac{p_c^{*'}}{p_c^*}. \quad (22)$$

Для расчета остальных параметров используются формулы (10). Некоторое упрощение вычислений имеет место лишь при положении скачка уплотнений в критическом сечении. Как известно, по мере продвижения скачка уплотнения в глубь сопла интенсивность его ослабевает, и при критическом сечении скачок уплотнения перерождается в слабую волну возмущения, т. е. исчезает. В этом случае $p_c^{*'} = p_c^*$, и после плавного нарастания скорости в суживающейся части сопла имеет место плавное торможение газа в его расширяющейся части.

Методику расчета сопла можно представить следующим образом. Предположим, что заданы параметры:

- 1) начальное давление рабочего тела p_1 , ат;
- 2) начальная температура T_1 , °К;
- 3) начальная скорость c_1 , м/сек;
- 4) массовый расход рабочего тела \dot{m} , кг/сек;
- 5) давление в выходном сечении сопла p_2 , ат;
- 6) угол между образующими конуса в расширяющейся части сопла φ° ;
- 7) рабочее тело — двухатомный газ с $k=1,4$.

Требуется:

1. Рассчитать параметры торможения.
2. Определить основные параметры в характерных сечениях сопла (входное, критическое и выходное).

3. Рассчитать общую длину сопла.

4. В сужающейся части сопла разбить его длину на пять интервалов, примерно равных. Два последних интервала (ближних к минимальному сечению) разбить пополам. Во всех этих точках по формуле (18) определить профиль сопла, из табл. 2.1 — газодинамические функции и изменение основных параметров по длине. Результаты расчетов свести в табл. 2.2.

5. В сверхзвуковой части сопла разбить перепад по давлению между $p_{кр}$ и p_2 так, чтобы получить не менее пяти промежуточных точек. По табл. 2.1 в промежуточных точках найти газодинамические функции, рассчитать изменение основных параметров по длине. Все данные расположить в табл. 2.3.

6. Предположим, что в минимальном (критическом) сечении сопла имеет место скачок уплотнения. При этом в расширяющейся части сопла будет дозвуковое течение, хотя скорость звука достигается в критическом сечении. Профиль сопла оставим неизменным. Можно рассчитать $q(\lambda)$, а по ней все газодинамические функции. Так как при слабом скачке параметры торможения постоянны, нетрудно рассчитать основные параметры и их изменение по длине сопла. Результаты расчетов занести в табл. 2.4.

7. Предположим, что скачок имеет место в одном из сечений внутри сопла. Тогда по формуле (21) определяем коэффициент скорости λ_c' за скачком. По формуле (22) вычисляем параметры торможения до скачка и газодинамические функции. Удобнее располагать скачок в одном из сечений, которые имели место при расчете режима истечения газа из сопла. Скачки необходимо рассчитывать не менее чем в трех сечениях внутри сопла. Эффективные результаты дают расчеты примерно с третьего сечения (считая от критического). Результаты вычислений можно свести в табл. 2.4. Очевидно, что данная методика обратима и по ней нетрудно рассчитать сопло со скачком при заданном противодавлении на выходе из сопла.

8. По рассчитанным значениям в масштабе построить графики изменения d , F , p , ρ , T , c , M по длине сопла с расчетными и нерасчетными режимами истечения из сопла.

Таблица 2.2

№	l_i м	d_i м	F_i м ²	$q(\lambda_i)$	λ_i	τ_i	π_i	ε_i	M_i	T_i °K	p_i ат	ρ_i кг/м ³	c_i м/сек
1	0												
2	Δl												
	$l_c' - \Delta l' 2$												
	l_c'												

Таблица 2.3

№	p_i ат	π_i	λ_i	τ_i	ε_i	$q(\lambda_i)$	M_i	T_i °K	ρ кг/м ³	c_i м/сек	F м ²	d_i м	$d_i - d_{кр}$	l_i м
1	$p_{кр} - \Delta p$													
2	$p_{кр} - 2\Delta p$													
	\dots													
	p_2													

Таблица 2.4

№	l_i м	F м ²	λ_i	M_i	T_i °K	ρ кг/м ³	c_i м/сек	p_i ат	π_i	ε_i	$q(\lambda_i)$	M_i	T_i °K	p_i ат	ρ_i кг/м ³	c_i м/сек
1																
2																

Скачок в n -м сечении $\varepsilon =$; $p_c^* =$ ат; $\rho_c^* =$ кг/м³; $T_c^* =$ °K

Пример расчета

Задано: $p_1 = 33$ ат; $T_1 = 1321^\circ \text{K}$; $c_1 = 100$ м/сек; $\dot{m} = 172$ кг/сек; $p_2 = 3,6$ ат; $\varphi = 10^\circ$. Рабочее тело — воздух с показателем адиабаты $k = 1,4$.

1. Скорость звука в начальном сечении:

$$a_1 = \sqrt{kRT_1}; \quad a_1 = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 1321} = 729 \text{ м/сек.}$$

Число Маха на входе

$$M_1 = \frac{c_1}{a_1} = \frac{100}{729} = 0,1372.$$

Из табл. 2.1 находим:

$$\lambda_1 = 0,15; \quad \tau_1 = 0,9963; \quad \pi_1 = 0,9870; \quad \varepsilon_1 = 0,9907; \quad q(\lambda_1) = 0,2344.$$

Следует обратить внимание на пользование табл. 2.1. Табл. 2.1 составлена по λ с интервалом 0,01, но часто значения λ оказываются промежуточными, и тогда необходимо интерполировать все значения, принимая для простоты линейную интерполяцию. Однако это может значительно усложнить задания, и потому предлагается принимать ближайшее к имеющемуся в таблице значение.

Параметры торможения:

$$T^* = \frac{T_1}{\tau_1} = \frac{1321}{0,9963} = 1325^\circ \text{K}; \quad p^* = \frac{p_1}{\pi_1} = \frac{33}{0,9870} = 33,45 \text{ ат};$$

$$\rho^* = \frac{8,52}{0,9907} = 8,60 \text{ кг/м}^3;$$

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT^*} = \sqrt{\frac{2,8}{2,4} 287 \cdot 1325} = 666 \text{ м/сек.}$$

2. Площадь входного сечения

$$F_1 = \frac{\dot{m} \sqrt{T^*}}{p^* q(\lambda_1) B_m} = \frac{172 \sqrt{1325}}{33,45 \cdot 10^4 \cdot 9,81 \cdot 0,0405 \cdot 0,2344} = 0,201 \text{ м}^2.$$

Диаметр входного сечения

$$d_1 = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4}{3,14} \cdot 0,201} = 0,506 \text{ м.}$$

Площадь критического сечения

$$F_{кр} = F_1 q(\lambda_1) = 0,201 \cdot 0,2344 = 0,0471 \text{ м}^2;$$

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{4F_{кр}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0471}{3,14}} = 0,245 \text{ м.}$$

Газодинамические функции в выходной части сопла

$$\pi_2 = \frac{p_2}{p^*} = \frac{3,6}{33,45} = 0,1076.$$

Остальные значения находим по табл. 2.1 при известном значении λ_2 :

$$\lambda_2 = 1,68; \tau_2 = 0,5296; \varepsilon_2 = 0,2041; q(\lambda_2) = 0,5409; M_2 = 2,1073.$$

Площадь и диаметр выходного сечения сопла:

$$F_2 = \frac{F_{кр}}{q(\lambda_2)} = \frac{0,0471}{0,5409} = 0,0870 \text{ м}^2;$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4F_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0870}{3,14}} = 0,333 \text{ м}.$$

3. Длина дозвуковой (сужающейся) части сопла

$$l_c' = 2d_{кр} = 0,490 \text{ м}.$$

Длина сверхзвуковой части сопла

$$l_c'' = \frac{d_2 - d_{кр}}{2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} = \frac{0,333 - 0,245}{2 \cdot 0,0872} = 0,505 \text{ м}.$$

Полная длина сопла

$$l_c = l_c' + l_c'' = 0,995 \text{ м}.$$

4. Сначала делим сужающуюся часть сопла по длине на пять примерно равных интервалов (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,49 м). Два последних интервала делим еще пополам (0,35 и 0,45 м). По формуле (18) рассчитываем диаметр сопла в каждом из сечений и соответственно площадь поперечного сечения. Пользуясь формулой

$$F_i q(\lambda_i) = F_{i+1} q(\lambda_{i+1}), \quad (23)$$

находим $q(\lambda_{i+1})$ и тем самым все газодинамические функции в последующем сечении. По значениям этих функций и параметрам торможения определяем основные параметры. Результаты расчетов сводим в табл. 2.5.

5. Сверхзвуковую часть сопла разбиваем на интервалы по давлению (в нашем случае удобно разбить на интервалы по 2 ат). По давлению в каждом сечении определяем $\pi_i = p_i/p^*$, а по нему остальные газодинамические функции и параметры. Располагая для удобства начало координат в критическом сечении, вычисляем $l_i = \frac{d_i - d_{кр}}{2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}$. Результа-

ты расчетов заносим в табл. 2.6.

6. Предположим, что скачок уплотнения находится в критическом сечении. Профиль сопла сохраним таким же, как и в расчетном режиме истечения. Сечения выбираем (только для удобства) такими же, как и при сверхзвуковом истечении с известным значением F_i в них. По формуле (23) можно

Таблица 2.5

N	d_i м	F_i м ²	$q(\lambda_i)$	λ_i	τ_i	π_i	ε_i	M_i	T_i °K	p_i ат	ρ_i кг/м ³	c_i м/сек
1	0,506	0,201	0,2344	0,15	0,9963	0,9870	0,9907	0,1372	1321	33	8,52	100
2	0,430	0,1456	0,324	0,21	0,9927	0,9745	0,9817	0,1920	1315	32,6	8,44	140
3	0,331	0,0860	0,547	0,37	0,9772	0,9224	0,9439	0,3417	1295	30,9	8,12	247
4	0,275	0,0594	0,793	0,58	0,9439	0,8172	0,8657	0,5450	1250	27,35	7,45	386
5	0,260	0,0530	0,888	0,70	0,9183	0,7422	0,8082	0,6668	1216	24,85	6,95	466
6	0,251	0,0494	0,953	0,80	0,8933	0,6788	0,7543	0,7727	1183	22,56	6,48	533
7	0,246	0,0476	0,99	0,91	0,8620	0,5946	0,6898	0,8947	1143	19,9	5,94	606
8	0,245	0,0471	1,0	1,0	0,8333	0,5283	0,6340	1,0	1103	17,7	5,45	666

Таблица 2.6

N	p_i ат	π_i	λ_i	τ_i	ε_i	$q(\lambda_i)$	M_i	T_i °K	ρ_i кг/м ³	c_i м/сек	F_i м ²	d_i м	$d_i - d_{кр}$ м	l_i м
1	15	0,4486	1,11	0,7947	0,5629	0,9856	1,137	1054	4,84	739	0,0478	0,247	0,002	0,0115
2	13	0,3885	1,19	0,7640	0,5102	0,9577	1,243	1012	4,38	792	0,0492	0,2505	0,0055	0,0315
3	11	0,329	1,28	0,7269	0,4505	0,9096	1,371	963	3,88	852	0,0518	0,2570	0,0115	0,066
4	9	0,269	1,37	0,6872	0,3914	0,8459	1,509	910	3,37	912	0,0557	0,2670	0,0215	0,1235
5	7	0,209	1,47	0,6398	0,3275	0,7593	1,678	848	2,82	979	0,0620	0,2815	0,0365	0,209
6	5	0,1495	1,59	0,5786	0,2547	0,6389	1,908	767	2,19	1060	0,0737	0,307	0,062	0,355
7	3,6	0,1076	1,68	0,5296	0,2041	0,5409	2,107	702	1,755	1120	0,0870	0,333	0,088	0,505

Таблица 2.7

N	l_i м	F_i м ²	λ_i	M_i	π_i	τ_i	ε_i	$q(\lambda_i)$	T_i °K	p_i ат	ρ_i кг/м ³	c_i м/сек
1	0,0115	0,0478	0,89	0,8721	0,6092	0,8680	0,7019	0,9856	1150	20,4	6,03	593
2	0,0315	0,0492	0,81	0,7835	0,6668	0,8907	0,7486	0,9577	1190	22,3	6,44	539
3	0,066	0,0518	0,72	0,6876	0,7289	0,9136	0,7978	0,9096	1210	24,4	6,86	479
4	0,1235	0,0557	0,64	0,6053	0,7808	0,9317	0,8380	0,8459	1234	26,1	7,20	426
5	0,209	0,0620	0,55	0,5152	0,8344	0,9496	0,8787	0,7593	1257	27,9	7,56	366
6	0,355	0,0737	0,44	0,4083	0,8915	0,9777	0,9212	0,6389	1282	29,8	7,92	293
7	0,505	0,0870	0,36	0,3322	0,9265	0,9784	0,9469	0,5409	1296	31,0	8,14	240

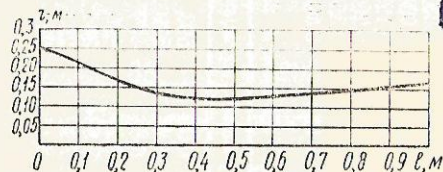


Рис. 2.1

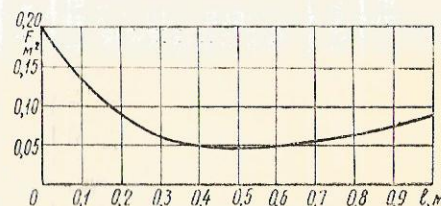


Рис. 2.2

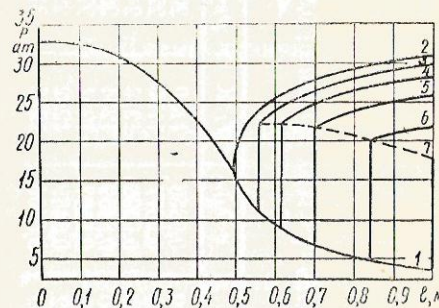


Рис. 2.3

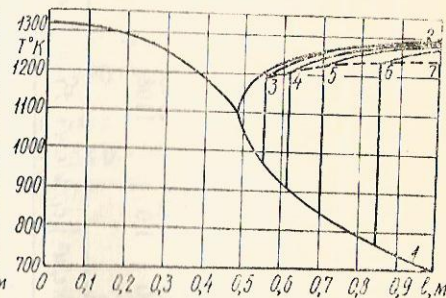


Рис. 2.4

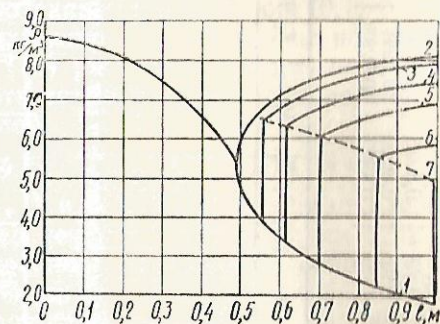


Рис. 2.5

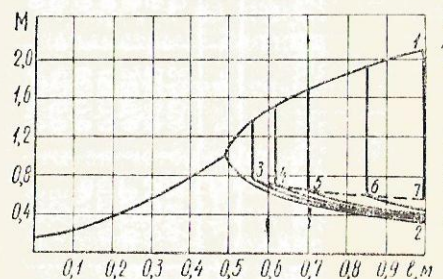


Рис. 2.6

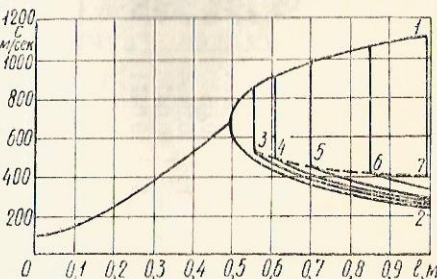


Рис. 2.7

Таблица 2.8

N	l_i, m	F_i, m^2	λ_i	M_i	τ_i	π_i	ϵ_i	$q (\lambda_i)$	$T_i, ^\circ K$	p_i, atm	$\rho_i, kg/m^3$	$c_i, m/sec$
Скачок в третьем сечении $\sigma = 0.965$; $p_{c*}' = 32.3$; $p_{c*}'' = 8.30 kg/m^2$												
3	0.066	0.0518	0.781	0.751	0.8986	0.6878	0.7655	0.9418	1191	22.2	6.43	520
4	0.1235	0.0557	0.68	0.646	0.9229	0.7553	0.8183	0.876	1210	24.4	6.88	453
5	0.209	0.0620	0.58	0.545	0.9439	0.8172	0.8657	0.787	1251	26.4	7.38	386
6	0.355	0.0737	0.46	0.4275	0.9647	0.8819	0.9142	0.663	1279	28.5	7.58	306
7	0.505	0.0770	0.38	0.3511	0.9759	0.9183	0.9409	0.561	1284	29.6	7.90	253
Скачок в четвертом сечении $\sigma = 0.927$; $p_{c*}' = 31.0 atm$; $p_{c*}'' = 7.97 kg/m^2$												
4	0.1235	0.0557	0.73	0.6981	0.9112	0.7221	0.7925	0.9126	1207	22.4	6.32	486
5	0.209	0.0620	0.61	0.575	0.9380	0.7992	0.8521	0.820	1243	24.8	6.79	406
6	0.355	0.0737	0.48	0.447	0.9616	0.8719	0.9067	0.690	1260	27.0	7.23	320
7	0.505	0.0870	0.40	0.370	0.9733	0.9037	0.9346	0.585	1295	28.2	7.45	266
Скачок в пятом сечении $\sigma = 0.865$; $p_{c*}' = 28.95 atm$; $p_{c*}'' = 7.44 kg/m^2$												
5	0.209	0.0620	0.68	0.6461	0.9229	0.7553	0.8183	0.8778	1223	21.9	6.09	453
6	0.355	0.0737	0.53	0.4956	0.9532	0.8455	0.8871	0.740	1263	24.5	6.60	353
7	0.505	0.0870	0.43	0.3987	0.9692	0.8962	0.9247	0.626	1285	26.0	6.88	286
Скачок в шестом сечении $\sigma = 0.763$; $p_{c*}' = 25.5 atm$; $p_{c*}'' = 6.55 kg/m^2$												
6	0.355	0.0737	0.63	0.5961	0.9339	0.7870	0.8428	0.8375	1237	20.1	5.52	419
7	0.505	0.0870	0.50	0.4663	0.9583	0.8616	0.8991	0.709	1270	22.0	5.89	333
Скачок в седьмом сечении $\sigma = 0.667$; $p_{c*}' = 22.3 atm$; $p_{c*}'' = 5.73 kg/m^2$												
7	0.505	0.0870	0.595	0.5649	0.9400	0.8053	0.8567	0.8109	1245	17.95	4.91	396

найти $q(\lambda_i)$ (истечение за скачком дозвуковое), а следовательно, по табл. 2.1 и все газодинамические функции. Так как параметры торможения при таком истечении сохраняют постоянное значение, можно рассчитать изменение основных параметров по длине сопла (табл. 2.7).

7. Предположим, что скачок уплотнения находится в каком-либо сечении за критическим. В сечении, где имеется скачок, определяем $\lambda_{с'}$ по формуле (21), а по формуле (22) — параметры торможения за скачком. Остальные расчеты не отличаются от ранее изложенных для дозвукового течения. Результаты расчетов заносятся в табл. 2.8. Для простоты сечения удобно выбирать такими же, как и при расчете сверхзвукового истечения из сопла. Близкие к критическому сечения выбирать не рекомендуется из-за малого отличия с параметрами для нерасчетного режима. Поэтому расчеты течения со скачком проводились начиная с третьего сечения.

8. На рис. 2.1 представлен профиль расчетного сопла, а на рис. 2.2 — изменение площади поперечного сечения по длине. На рис. 2.3 — 2.7 показано изменение основных величин по длине сопла для расчетного 1 и нерасчетного 2 режимов и течения со скачком в сечениях 3 — 7.

Таблица 2.9

N	p_1 ат	T_1 °К	c_1 м/сек	\dot{m} кг/сек	p_2 ат	φ°
1	10	1000	100	40	1	10
2	15	1000	100	50	1,2	8
3	20	1000	100	100	1,5	8
4	8	800	100	50	1	8
5	10	800	120	10	2	8
6	15	800	120	10	2	8
7	12	400	100	10	4	6
8	20	1200	120	100	3	6
9	20	1200	200	50	1,5	6
10	15	800	200	30	2	6
11	15	1200	200	30	2	6
12	15	1200	200	40	0,5	9
13	10	900	150	30	0,5	9
14	12	475	150	30	0,5	9
15	13	563	150	20	1,2	9
16	14	630	150	25	2,0	9
17	7	740	150	25	1,0	10
18	7	350	100	50	0,6	4
19	8	430	100	50	0,8	4
20	9	540	100	110	0,8	4
21	27	1000	150	150	2,3	10
22	33	1320	200	200	3,6	10
23	5	430	100	1,35	0,3	4
24	6	580	100	20	0,4	6
25	7	600	100	10	1,0	6

Рекомендуемые задания даны в табл. 2.9. Рабочее тело задается преподавателем. В качестве рекомендуемых можно предложить воздух, O_2 , N_2 , H_2 , CO и т. д. Следует обратить внимание на изменение постоянной B_m в уравнениях (16) и (17), так как при этом меняется газовая постоянная $R = \frac{R_u}{\mu} = \frac{8310}{\mu} (B_m = 0,685 \frac{1}{\sqrt{R}}; k = 1,4)$.

ЛИТЕРАТУРА

Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. «Наука», 1970 (гл. IV).

Г. Н. Абрамович. Прикладная газовая динамика. «Наука», 1969 (гл. III, IV).

Контрольное задание 3

Истечение пара из сопла Лавала

Сопло Лавала широко применяется для получения сверхзвуковых потоков пара в паровых турбинах. В зависимости от соотношения между начальным давлением пара p_1 и давлением p' внешней среды, в которую происходит истечение, т. е. от величины перепада давлений $p_1 - p'$, в сопле возможны различные режимы течения. Режим непрерывного течения, характеризующийся сверхзвуковой скоростью истечения и равенством внешнего давления p' и давления p_2 в выходном сечении сопла, называется расчетным.

Расчет сопла Лавала заключается в определении по заданным исходным параметрам (секундному расходу \dot{G} пара, начальному давлению p_1 , температуре T_1 , противодавлению p') минимального и выходного сечений сопла применительно к условиям расчетного режима течения, т. е. при $p' = p_2$.

Предположим, что течение изэнтропическое. Проводим на $i-s$ -диаграмме (рис. 3.1) вертикальную прямую AB от начальной точки $A(p_1, T_1)$ до конечной точки $B(p_2, T_2)$. Линия AB является графическим изображением рассматриваемого истечения. Определим на прямой AB точку D , в которой скорость течения s равна скорости звука a . Далее, имея в виду, что в сопле Лавала скорость течения, равная скорости звука, достигается в наиболее узком (минимальном) сечении сопла, в точке D находим значения энтальпии $i_{кр}$, давления $p_{кр}$, температуры $T_{кр}$ и удельного объема $v_{кр}$ для этого сечения сопла.