

3. Определение расчётных параметров воздуха и газа для турбокомпрессора при $p = \text{const}$

1	Тип двигателя			7S50MC-C	
2	Эксплуатационная мощность двигателя, кВт	N_e		8375	
3	Частота вращения двигателя, об/мин	n_D		116	
4	Схема газообмена			Прямоточно-клапанная	
5	Давление наддувочного воздуха, кПа	p_s		257	
6	Эффективный удельный расход топлива, г/(кВт*ч)	g_e		169	
7	Коэффициент избытка воздуха при сгорании	α		1,7	м1,7-2,2; б1,6-1,8
8	Коэффициент продувки	$\varphi_{пр}$		1,4	(4x)1,1-1,2; (2x)1,4-
9	Теоретическое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг/кг	L_0		14,3	
10	Расход воздуха на двигатель, кг/с	$G_B = \frac{g_e N_e \alpha \varphi_{пр} L_0}{3600 \cdot 10^3}$	$(169 \cdot 8375 \cdot 1,7 \cdot 1,4 \cdot 14,3) / (3600 \cdot 1000)$	13,4	
11	Расход газа, кг/с	$G_z = G_B$		13,4	
12	Среднее давление отработавших газов за выхлопными органами, кПа	$p_e = \alpha \cdot p_s$	257 · 0,95	244,15	
13	Коэффициент потери давления при продувке	α		0,95	(2x)0,8-0,95; (4x)0,94-0,99
14	Среднее давление газов перед турбиной	$p_{1T} = \xi_k \xi_p p_B = \xi_k \xi_p \alpha p_s$	0,96 · 0,98 · 244,15	229,69632	

15	Коэффициент потери давления в выхлопном коллекторе	ξ_k		0,96	0,96-0,98
16	Коэффициент потери давления в защитной решетке	ξ_p		0,98	(2x)0,96-0,98; (1x)=1
17	Среднее давление газов перед соплами турбины, кПа	$p_{0T} = \xi_{TK} p_{1T} = \xi_{TK} \xi_k \xi_p p_s$	0,99·0,96·0,98·244,15	227,4	
18	Коэффициент потери давления в газовпускном патрубке турбины	ξ_{zk}		0,99	0,98-0,99
19	Среднее давление газа после турбины, кПа	$p_{2m} = p_a \xi_{em}$	101,3·1,02	103,3	
20	Атмосферное давление, кПа	p_a		101,3	
21	Коэффициент потери давления в выхлопном тракте за турбиной	ξ_{em}		1,02	1,02-1,03
22	Среднее давление газов в выходном сечении рабочих лопаток, кПа	$p_2 = \xi_{BK} p_{2T} = \xi_{BK} \xi_{BT} p_a$	1,01·1,02·101,3	104,4	
23	Коэффициент потери давления в выпускном корпусе турбины	ξ_{BK}		1,01	1,01-1,015
24	Средняя температура газов перед турбиной, К	$T_{VT} = \frac{c_{pB} T_s + \frac{q_T Q_u}{(\alpha q_w L_o) c_{pT}}}{c_{pT}}$	(1,004·306/1,09)+((0,4·40500)/(1,7·1,4·14,3·1,09))	718,5	
25	Средняя изобарная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К)	c_{pB}		1,004	
26	Средняя изобарная теплоемкость газа, кДж/(кг·К)	c_{pT}		1,09	1,085-1,1
27	Показатель изэнтропы: для воздуха, для газа	k_a, k_z		1,4	1,35
28	Температура надувочного воздуха в ресивере, К	$T_s = T_{с.в.} + (10 \div 20^0)$	296+10	306	
29	Температура заборной воды, К	T_{3B}		296	296-297

30	Относительная потеря тепла с отработавшими газами	q_z		0,4	(2x)0,4-0,45;(4x)0,35-0,40
31	Низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг	Q_n		40500	40200-41450
32	Средняя температура газов перед соплами турбины, К	$T_{0T} = T_{1T} - \Delta T_{ГК}$	718,5-16,4	702,1	
33	Понижение температуры в газовыпускном корпусе турбины, К	$\Delta T_{ГК} = \frac{q_{ГК} g_e N_e Q_n}{3600 \cdot 10^3 G_T c_{pT}}$	(0,015·169·8375·40500)/(3600·1000·13,4·1,09)	16,4	
34	Относительная доля тепла, потерянная от охлаждения	$q_{зк}$		0,015	
35	Средняя входная скорость газа на сопловые лопатки турбины, м/с	$c_{вх}$		90	60-90
36	Полное давление газа перед соплами, кПа	$p^*_{0T} = p_{0T} + \frac{c_{вх}^2}{2000} \rho_{0T}$	227,4+(90^2·1,1)/2000	231,9	
37	Плотность газа перед сопловыми лопатками турбины, кг/м	$\rho_{0T} = \frac{p_{0T}}{R_T T_{0T}}$	227,4/(0,283·702,1)	1,1	
38	Газовая постоянная, кДж/(кг·К)	$R_T = \frac{k_T - 1}{k_T} c_{p2}$	((1,35-1)·1,09)/1,35	0,283	
39	Полная температура газа перед соплами, К	$T^*_{0T} = T_{0T} + h_{вх} / c_{p2}$	702,1+4,05/1,09	705,8	
40	Входная энергия газа, кДж/кг	$h_{вх} = c_{вх}^2 / 2000$	(90^2)/2000	4,05	
41	Параметры воздуха на срезе всасывающего фильтра	p_a, T_a		101,325	293
42	Давление воздуха во входном сечении впускного корпуса компрессора, кПа	$p_{0K} = p_a - \Delta p_\phi$	101,325-0,5	100,8	
43	Перепад давлений на воздушном фильтре, кПа	Δp_ϕ		0,5	
44	Эффективный КПД турбины	$\eta_{ет}$		0,79	
45	Адиабатный КПД компрессора	$\eta_{ак}$		0,81	

46	Относительный перепад температур в турбине	$\overline{\Delta T}_T = 1 - (p_2 / p_{0T}^*)^{k_2-1}$	$1 - (104,4/231,9)^{(1,35-1)/1,35}$	0,187	
47	Относительный перепад температур в компрессоре	$\overline{\Delta T}_K = \frac{G_T c_{pT} T_{0T}^* \overline{\Delta T}_T \eta_{ET} \eta_{ак}}{G_0 c_{p0} T_{0K}^*}$	$(13,4 \cdot 1,09 \cdot 705,8 \cdot 0,187 \cdot 0,79 \cdot 0,81) / (13,4 \cdot 1,004 \cdot 293)$	0,313	Ток=Та
48	Давление наддувочного воздуха за компрессором (расчетное), кПа	$p'_k = ((\Delta T_k + 1)^{(k_0/(k_0-1))}) \cdot p_{ок}$	$((0,313+1)^{(1,4/(1,4-1))}) \cdot 100,8$	261,4	
49	Система наддува			-	
50	Давление наддувочного воздуха за компрессором (принято), кПа	$p_K = p_s + \Delta p_{00}$	257+3,5	260,5	
51	Перепад давления на воздухоохладителе	Δp_{00}		3,5	0,5-3,5
52	Отношение расходов	$G_k/G_m = (c_{p0} T_{0K}^* \Delta T_m \eta_{ет} \eta_{ак}) / (c_{p0} T_{0K}^* \Delta T_k)$	$(1,09 \cdot 705,8 \cdot 0,187 \cdot 0,79 \cdot 0,81) / (1,004 \cdot 293 \cdot 0,313)$	1	
53	Количество ТК, шт	$i_{тк}$		1	
54	Расход воздуха на один компрессор, кг/с	$G_K = \left(\frac{G_K}{G_T} \right) \frac{G_0}{i_{тк}}$	1·13,4/1	13,4	
55	Расход газа через турбину ТК, кг/с	$G_T = G_{Г} / i_{ТК}$		13,4	

4 . Тепловой расчёт одноступенчатого центробежного компрессора с радиальными лопатками

1	Расход воздуха через компрессор, кг/с	G_K		13,4	
2	Параметры воздуха перед центробежным компрессором (во входном сечении впускного корпуса): давление, кПа температура, К	$p_{ок}, T_{ок}$		100,83	293
3	Давление воздуха за компрессором, кПа	p_K		260,5	
4	Степень повышения давления	$\pi_K = p_K / p_{ок}$	260,5/100,83	2,58	
5	Действительный напор компрессора, кДж/кг	$h_{ак}^* = \frac{k_B}{k_B - 1} R_B T_{ок}^* \left[\left(\frac{p_K}{p_{ок}} \right)^{\frac{k_B - 1}{k_B}} - 1 \right]$	$1,4 \cdot 0,287 \cdot 293 \cdot (((2,58)^{(1,4-1)/1,4} - 1) / (1,4-1))$	91,5	
6	Изоэнтروпийный КПД компрессора	$\eta_{ак}$		0,81	
7	Выходной угол рабочих лопаток, град	$\beta_{2л}$		90	80-140
8	Количество рабочих лопаток	$Z_K = \frac{2}{3} \pi \frac{\mu}{\mu - 1} \frac{1}{1 - (r_{cp} / r_2)^2}$	$-((2/3) \cdot 3,14 \cdot 0,87) / (0,87 - 1) / (1 - (0,369)^2)$	16,23	
9	Коэффициент уменьшения напора компрессора	$\mu = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{\pi \eta_{ак}}{z_K} \frac{1}{1 - (r_{cp} / r_2)^2}}$		0,87	
10	Отношение	d_0 / d_2		0,15	0,15-0,27
11	Отношение	$d_{1н} / d_2$		0,5	0,45-0,65
12	Отношение	$\frac{r_{cp}}{r_2} = \sqrt{\frac{0,5(r_0^2 + r_{1н}^2)}{r_2^2}}$	$((0,5 \cdot ((0,15^2) + (0,5^2))))^{0,5}$	0,369	
13	Действительный коэффициент напора	$\psi_K = \frac{h_{ак}^*}{u_2^2 / 2} = 2\eta_{ак} [\mu(1 + \varphi \operatorname{ctg} \beta_{2л}) + \alpha]$	$2 \cdot 0,81 \cdot (0,87 \cdot (1 + 0,28 \cdot \operatorname{ctg} 90) + 0,08)$	1,522	

14	Коэффициент расхода	φ		0,28	0,28-0,35
15	Коэффициент	α		0,08	0,03-0,08
16	Окружная скорость на периферии колеса, м/с	$u_2 = \sqrt{2h_{ак}^* / \psi_{\kappa}}$	$(2 \cdot 91,5 \cdot 1000 / 1,522)^{0,5}$	346,8	
17	Абсолютная скорость входа воздуха в рабочее колесо, м/с	$C_1 = C_{1\alpha} = \varphi u_2$	0,28·346,8	97,1	80-140
18	Температура воздуха перед рабочим колесом, К	$T_1 = T_{ок} - \frac{C_1^2}{2 \frac{k_B}{k_B - 1} R_B}$	$293 - 97,1^2 / ((2 \cdot 1,4 \cdot 0,287 \cdot 1000) / (1,4 - 1))$	288,3	
19	Газовая постоянная воздуха, кДж/(кг·К)	$R_g = (k_g - 1)c_{pg} / k_g$	$(1,4 - 1) \cdot 1,004 / 1,4$	0,287	
20	Показатель политропы расширения во входном корпусе компрессора	$n_1 = k_B \frac{1 + \xi_{BK}}{1 + k_B \xi_{BK}}$	$1,4 \cdot (1 + 0,05) / (1 + 1,4 \cdot 0,05)$	1,37	
21	Коэффициент потерь во входном корпусе	ξ_{BK}		0,05	0,03-0,06
22	Давление воздуха перед компрессором, кПа	$p_1 = p_{ок} \left(\frac{T_1}{T_{ок}} \right)^{\frac{n_1}{n_1 - 1}}$	$100,83 \cdot (288,3 / 293)^{(1,37 / (1,37 - 1))}$	95	
23	Плотность воздуха перед рабочим колесом, кг/м	$\rho_1 = p_1 / R_B T_1$	$95 / (0,287 \cdot 288,3)$	1,148	
24	Наружный диаметр рабочего колеса компрессора, м	$d_2 = \sqrt{\frac{4G_k R_B T_1}{\pi c_{1\alpha} \rho_1 (d_{2n}^2 - d_0^2)}}$	$(4 \cdot 13,4 \cdot 0,287 \cdot 288,3 / (3,14 \cdot 97,1 \cdot 95 \cdot (0,5^2 - 0,15^2)))^{0,5}$	0,82	
25	Диаметр втулки рабочего колеса, м	$d_0 = \overline{d_0} d_2$	0,15·0,82	0,123	

26	Наружный диаметр лопаток рабочего колеса во входном сечении, м	$d_{1n} = \overline{d_{1n}} d_2$	0,5·0,82	0,41	
27	Средний диаметр входного сечения, м	$d_1 = \sqrt{0,5(d_0^2 + d_{1n}^2)}$	$(0,5 \cdot ((0,123^2) + (0,41^2)))^{0,5}$	0,303	
28	Частота вращения рабочего колеса компрессора, мин	$n = \frac{60 u_2}{\pi d_2}$	$(60 \cdot 346,8) / (3,14 \cdot 0,82)$	8077	
29	Окружная скорость на среднем диаметре входного сечения рабочего колеса, м/с	$u_1 = \pi d_1 n / 60;$	$3,14 \cdot 0,303 \cdot 8077 / 60$	128,1	
30	Угол входа воздуха в рабочее колесо, град	$\beta_1 = \arctg \frac{c_1}{u_1};$	$\arctg(97,1/128,1)$	37	
31	Относительная скорость входа воздуха в рабочее колесо, м/с	$w_1 = c_1 / \sin \beta_1.$	$97,1 / \sin 37$	161,3	
32	Число Маха на входе в рабочее колесо	$M_{w1} = \frac{w_1}{a_1} = \frac{w_1}{\sqrt{k_B R_B T_1}}$	$161,3 / ((1,4 \cdot 0,287 \cdot 288,3 \cdot 1000)^{0,5})$	0,474	
33	Окружная составляющая абсолютной скорости, с, м/с	$c_{2u} = \mu(u_2 + c_{2r} \operatorname{ctg} \beta_{2n})$	$0,87 \cdot (346,8 + 97,1 \cdot \operatorname{ctg} 90)$	301,7	
34	Радиальная составляющая абсолютной скорости с, м/с	$c_{2r} = c_1$		97,1	
35	Абсолютная скорость выхода воздуха из рабочего колеса, м/с	$c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2r}^2}$	$((301,7^2) + (97,1^2))^{0,5}$	316,9	
36	Угол выхода воздуха из рабочего колеса, град	$\alpha_2 = \arctg \frac{c_{2r}}{c_{2u}}$	$\arctg(97,1/301,7)$	18	
37	Температура воздуха на выходе из рабочего колеса, К	$T_2 = T_1 + (\mu + \frac{a}{2} - \frac{\mu^2}{2}) \frac{u_2^2}{k_s - 1} R_s$	$288,3 + (((0,87 + 0,08/2 - 0,87^2/2) \cdot 346,8^2 \cdot (1,4 - 1)) / (1,4 \cdot 0,287 \cdot 1000))$	351,9	

38	Давление воздуха за рабочим колесом, кПа	$p_2 = p_1 (T_2/T_1)^{\frac{n_2}{n_2-1}}$	$95 \cdot (351,9/288,3)^{(1,5/(1,5-1))}$	172,8	
39	Величина	$\frac{n_2}{n_2-1} = \frac{k_B}{k_B-1} - \frac{q_{pk}}{R_B(T_2-T_1)}$	$1,4/(1,4-1) - 11394/(0,287 \cdot 1000)/(351,9-288,3)$	2,876	
40	Показатель политропы сжатия в рабочем колесе	n_2		1,5	1,45-1,55
41	Суммарная потеря энергии в рабочем колесе, Дж/кг	$q_{pk} = q_{p1} + q_{p2} + q_{me}$	1301+471+9622	11394	
42	Потеря энергии в ВНА, Дж/кг	$q_{p1} = \xi_1 \frac{\omega_1^2}{2}$	$0,1 \cdot (161,3^2)/2$	1301	
43	Коэффициент потерь энергии	ξ_1		0,1	0,1-0,3
44	Потеря энергии от поворота потока в рабочем колесе, Дж/кг	$q_{p2} = \xi_2 \frac{c_{2r}^2}{2}$	$0,1 \cdot (97,1^2)/2$	471	
45	Коэффициент потери энергии	ξ_2		0,1	0,1-0,2
46	Потеря энергии на трение и вентиляцию (дисковые потери), Дж/кг	$q_{me} = a(u_2^2)$	$0,08 \cdot (346,8^2)$	9622	
47	КПД рабочего колеса	$\eta_{pk} = \frac{n_2}{n_2-1} \cdot \frac{k_B-1}{k_B}$	$(1,5/(1,5-1)) \cdot ((1,4-1)/1,4)$	0,857	0,84-0,86
48	Число Маха	$M_{c2} = c_2/a_2 = c_2/\sqrt{k_B R_B T_2}$	$14,31/(1,4 \cdot 0,287 \cdot 351,9 \cdot 1000)^{0,5}$	0,843	
49	Плотность воздуха на выходе из рабочего колеса, кг/м	$\rho_2 = p_2/R_B T_2$	$172,8/0,287/351,9$	1,711	

50	Ширина лопаток в выходном сечении рабочего колеса, м	$b_2 = \frac{G_K}{\pi d_2 c_{2r} \rho_2}$	13,4/3,14/0,82/97,1/1,711	0,031	
51	Наружный диаметр щелевого диффузора, м	$d_3 = (1,1 \div 1,25) d_2$	1,25·0,82	1,025	
52	Ширина щелевого диффузора, м	$b_3 = b_2 + (0 \div 2)$	0,031+0,002	0,033	
53	Скорость выхода воздуха из щелевого диффузора, м/с	$c_3 = c_2 \frac{d_2}{d_3}$	316,9·0,82/1,025	253,5	
54	Угол выхода воздуха из щелевого диффузора, град	$\alpha_3 = \alpha_2$		18	
55	Температура воздуха за щелевым диффузором, К	$T_3 = T_2 + \frac{c_2^2 - c_3^2}{2 \frac{k_B}{k_B - 1} R_B}$	351,9+(316,9^2-253,5^2)·(1,4-1)/(2·1,4·0,287·1000)	369,9	
56	Давление воздуха за щелевым диффузором, кПа	$p_3 = p_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{n_3}{n_3 - 1}};$	172,8·(369,9/351,9)^(1,7/(1,7-1))	195,1	
57	Величина	$\frac{n_3}{n_3 - 1} = \frac{k_B}{k_B - 1} - \frac{q_{щ.о}}{R_B(T_3 - T_2)}$	1,4/(1,4-1)-(1817/(0,287·1000·(369,9-351,9)))	3,15	
58	Показатель политропы сжатия в щелевом диффузоре	n_3		1,7	1,6-1,95
59	Потеря энергии в щелевом диффузоре, Дж/кг	$q_{щ.о} = \frac{\lambda (r_3 - r_2) (c_2^2 - c_3^2)}{8b_3 \sin \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{2}}$	0,04·((1,025/2)-(0,82/2))·(316,9^2-253,5^2)/(8·0,033·sin 18)	1817	
60	Коэффициент трения	λ		0,04	0,035-0,04
61	КПД щелевого диффузора	$\eta_{щ.о} = \frac{n_3}{n_3 - 1} \frac{k_B - 1}{k_B}$	3,15·((1,4-1)/1,4)	0,9	0,6-0,75

62	Плотность воздуха за щелевым диффузором, кг/м ³	$\rho_3 = p_3 / R_B T_3.$	195,1/0,287/369,9	1,838	
63	Число Маха	$M_{c_3} = c_3 / a_3 = c_3 / \sqrt{k_B R_B T_3}$	253,5/(1,4·0,287·369,9·1000) ^{0,5}	0,658	
64	Скорость выхода воздуха из лопаточного диффузора, м/с	c_4		100	85-120
65	Угол выхода воздуха из лопаточного диффузора, град	$\alpha_4 = \alpha_3 + (12 \div 18^\circ)$	18+15	33	
66	Температура воздуха за лопаточным диффузором, К	$T_4 = T_3 + \frac{c_3^2 - c_4^2}{2 \frac{k_B}{k_B - 1} R_B}$	369,9+(253,5 ² -100 ²)·(1,4-1)/(2·1,4·0,287·1000)	396,9	
67	Давление воздуха за лопаточным диффузором, кПа	$p_4 = p_3 \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{n_4}{n_4 - 1}};$	195,1·(396,9/369,9) ³	241	
68	Величина	$\frac{n_4}{n_4 - 1} = \frac{k_B}{k_B - 1} - \frac{q_{л.д}}{R_B(T_4 - T_3)}.$	1,4/(1,4-1)-(3856/(0,287·1000·(396,9-369,9)))	3	
69	Показатель политропы сжатия воздуха в лопаточном диффузоре	n_4		1,55	1,55-1,7
70	Потеря энергии в лопаточном диффузоре, Дж/кг	$q_{л.д} = \xi_3 \frac{c_3^2}{2}$	0,12·(253,5 ²)/2	3856	
71	Коэффициент потери в лопаточном диффузоре	ξ_3		0,12	0,12-0,20
72	КПД лопаточного диффузора	$\eta_{л.д} = \frac{n_4}{n_4 - 1} \cdot \frac{k_B - 1}{k_B}$	3·((1,4-1)/1,4)	0,857	0,68-0,8
73	Плотность воздуха на выходе из лопаточного диффузора, кг/м	$\rho_4 = p_4 / R_B T_4$	241/0,287/396,9	2,116	

74	Наружный диаметр лопаточного диффузора, м	$d_4 = d_3 \frac{c_3 \rho_3 \sin \alpha_3}{c_4 \rho_4 \sin \alpha_4}$	$1,025 \cdot 253,5 \cdot 1,838 \cdot \sin 18 / (100 \cdot 2,116 \cdot \sin 33)$	1,281	
75	Ширина лопаточного диффузора, м	$b_4 = b_3$		0,033	
76	Количество лопаток лопаточного диффузора, шт	$z_{л.д.}$		21	13-31
77	Скорость воздуха на выходе из компрессора, м/с	c_5		70	60-80
78	Температура воздуха на выходе из компрессора, К	$T_k = T_s = T_4 + \frac{c^2_4 - c^2_5}{2 \frac{k_B}{k_B - 1} R_B}$	$396,9 + (100^2 - 70^2) \cdot (1,4 - 1) / (2 \cdot 1,4 \cdot 0,287 \cdot 1000)$	399,4	
79	Давление воздуха на выходе из компрессора, кПа	$p_k = p_s = p_4 \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{n_5}{n_5 - 1}}$	$241 \cdot (399,4 / 396,9)^{2,106}$	244,2	
80	Величина	$\frac{n_5}{n_5 - 1} = \frac{k_B}{k_B - 1} - \frac{q_{y.л}}{R_B (T_5 - T_4)}$	$1,4 / (1,4 - 1) - (1000 / (0,287 \cdot 1000 \cdot (399,4 - 396,9)))$	2,106	
81	Показатель политропы сжатия воздуха в улитке и в выпускном патрубке	n_5		2,1	1,85-2,1
82	Потеря энергии в улитке и в выпускном патрубке, Дж/кг	$q_{y.л} = \xi_{y.л} \frac{c_4^2}{2}$	$0,2 \cdot 100^2 / 2$	1000	
83	Коэффициент потери энергии в улитке и в выпускном патрубке	$\xi_{y.л}$		0,2	0,2-0,3
84	КПД улитки и выпускного патрубка	$\eta_{y.л} = \frac{n_5}{n_5 - 1} \frac{k_B - 1}{k_B}$	$2,106 \cdot ((1,4 - 1) / 1,4)$	0,602	0,3-0,65
85	Полная температура воздуха за компрессором, К	$T^*_k = T_k + \frac{c^2_5}{2 \frac{k_B}{k_B - 1} R_B}$	$399,4 + (70^2) \cdot (1,4 - 1) / (2 \cdot 1,4 \cdot 0,287 \cdot 1000)$	401,8	

86	Полное давление воздуха за компрессором, кПа	$p_{\kappa}^* = p_{\kappa} \left(T_{\kappa}^* / T_{\kappa} \right)^{\frac{k_B}{k_B-1}}$	$244,2 \cdot (401,8/399,4)^{(1,4/(1,4-1))}$	249,4	
87	Расчетное значение действительного напора, кДж/кг	$h_{ак}^* = \frac{k_B}{k_B-1} R_B T_{0\kappa}^* \left[\left(\frac{p_{\kappa}}{p_{0\kappa}} \right)^{\frac{k_B-1}{k_B}} - 1 \right]$	$1,4 \cdot 0,287 \cdot 293 \cdot ((244,2/100,83)^{((1,4-1)/1,4)} - 1) / (1,4-1)$	84,6	
88	Внутренняя работа сжатия в компрессоре, кДж/кг	$h_{ик}^* = \frac{k_B}{k_B-1} R_B (T_{\kappa}^* - T_{0\kappa}^*)$	$1,4 \cdot 0,287 \cdot (401,8 - 293) / (1,4 - 1)$	109,3	
89	Адиабатный КПД компрессора	$\eta_{ак} = h_{ак}^* / h_{ик}^*$	$84,6 / 109,3$	0,774	
90	Потребляемая мощность компрессора	$N_{ик} = G_{\kappa} h_{ак}^* / \eta_{ак} = G_{\kappa} h_{ик}^*$	$13,4 \cdot 84,6 / 0,774$	1465	1464,62

5. Тепловой расчет одноступенчатой турбины осевого типа

1	Расчет газа через турбину, кг/с	G_m		13,40	
2	Давление газа перед сопловыми лопатками, кПа	$p_{0T} = \xi_{гк} p_{1T} = \xi_{гк} \xi_{к} \xi_{р} a p_s$		0,99·0,96·0,98·244,15	227,4
3	Полное давление газа перед соплами, кПа	$p^*_{0T} = p_{0T} + \frac{c^2_{вх}}{2000} \rho_{0T}$		227,4+(90^2·1,1)/2000	231,9
4	Температура газа перед соплами, К	$T_{0T} = T_{1T} - \Delta T_{гк}$		718,5-16,4	702,1
5	Полная температура газа перед соплами, К	$T^*_{0T} = T_{0T} + h_{вх}/c_{рг}$		702,1+4,05/1,09	705,8
6	Давление газа за рабочими лопатками, кПа	$p_2 = \xi_{вк} p_{2T} = \xi_{вк} \xi_{вт} p_a$		1,01·1,02·101,3	104,4
7	Частота вращения турбокомпрессора, мин	$n = \frac{60u_2}{\pi d_2}$		(60·346,8)/(3,14·0,82)	8077,0
8	Эффективный КПД турбины	η_{em}			0,79
9	Полный изоэнтروпийный перепад энтальпий в турбине, кДж/кг	$h^*_{aT} = c_{рг} T^*_{0T} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p^*_{0T}} \right)^{\frac{\kappa_T - 1}{\kappa_T}} \right]$		1,09·705,8·(1-(104,4/231,9)^((1,35-1)/1,35))	143,8
10	Изоэнтропийный перепад энтальпий в турбине, кДж/кг	$h_{aT} = h^*_{aT} - h_{вх}$		143,8-4,05	139,8
11	Входная энергия газа в сопловой решетке, кДж/кг	$h_{вх} = (c_{вх}^2)/2000$		(90^2)/2000	4,05

12	Изоэнтروпийный перепад энтальпий в соплах, кДж/кг	$h_{ан} = (1-\rho)h_{ат}$	$(1-0,3) \cdot 139,75$	97,8	
13	Степень реактивности турбинной ступени	ρ		0,3	0,3-0,45
14	Полный изоэнтропийный перепад энтальпий в соплах, кДж/кг	$h^*_{ан} = h_{ан} + h_{вх}$	$97,8 + 4,05$	101,9	
15	Действительная скорость выхода газа из сопел, м/с	$c_1 = \varphi \sqrt{2000 h^*_{ан}}$	$0,96 \cdot (2000 \cdot 101,9)^{0,5}$	433,4	
16	Коэффициент скорости в сопловой решетке	φ		0,96	0,96-0,98
17	Потеря энергии в соплах, кДж/кг	$q_H = (1-\varphi^2) h^*_{ан}$	$(1-0,96^2) \cdot 101,9$	8,00	
18	Температура в конце изоэнтропийного процесса расширения газа в соплах, К	$T_{lt} = T^*_{от} - \frac{h^*_{ан}}{c_{пр}}$	$705,8 - 101,9/1,09$	612,3	
19	Температура в конце действительного процесса расширения газа, К	$T_1 = T^*_{от} - \varphi^2 \frac{h^*_{ан}}{c_{пр}}$	$705,8 - 0,96^2 \cdot 101,9/1,09$	619,6	
20	Давление газа за сопловыми лопатками, кПа	$p_1 = p^*_{от} \left(\frac{T_{lt}}{T^*_{от}} \right)^{\frac{\kappa_r}{\kappa_r-1}}$	$231,9 \cdot (612,3/705,8)^{(1,35/(1,35-1))}$	134,0	
21	Удельный объем газа за соплами, м/кг	$v_1 = \frac{R_r T_1}{p_1}$	$0,283 \cdot 619,6/95$	1,85	
22	Наружный диаметр колеса компрессора, м	d_2		0,820	
23	Средний диаметр турбинной ступени, м	$d = \left(\frac{d}{d_2} \right) d_2$	$0,85 \cdot 0,82$	0,697	

24	Отношение	$\frac{d}{d_2}$		0,85	0,8-0,9
25	Окружная скорость на среднем диаметре, м/с	$u = \pi d n / 60,$	$3,14 \cdot 0,697 \cdot 8077 / 60$	294,8	
26	характеристика ступени	$v_1 = u / c_1$	$294,8 / 433,4$	0,680	
27	Оптимальное отношение скоростей	$v_1^{opt} = (u / c_1)^{opt} = \cos \alpha_1 / 2 (1 - \rho)$	$\cos 20 / 2 / (1 - 0,3)$	0,671	
28	Угол выхода газа из сопел, град	α_1		20	
29	Высота сопловых лопаток, мм	$l_H = \frac{G_T v_1 \cdot 10^3}{\epsilon \pi d c_1 \sin \alpha_1}$	$13,4 \cdot 1,85 \cdot 1000 / (3,14 \cdot 0,697 / 433,4 / \sin 20)$	76,0	
30	Степень парциальности	ϵ		1	
31	Количество сопловых лопаток, шт,	$z_H = \pi d / t_H,$	$3,14 \cdot 0,697 / 0,03$	73	
32	Шаг сопловых лопаток, мм	t_H		0,03	30-35
33	Перекрыш рабочих лопаток, мм	Δl_p		3	
34	Высота рабочих лопаток, мм	$l_p = l_H + \Delta l_p,$	$76 + 3$	79,0	
35	Отношение	$\lambda = d / l_p.$	$0,697 / (79 / 1000)$	8,82	

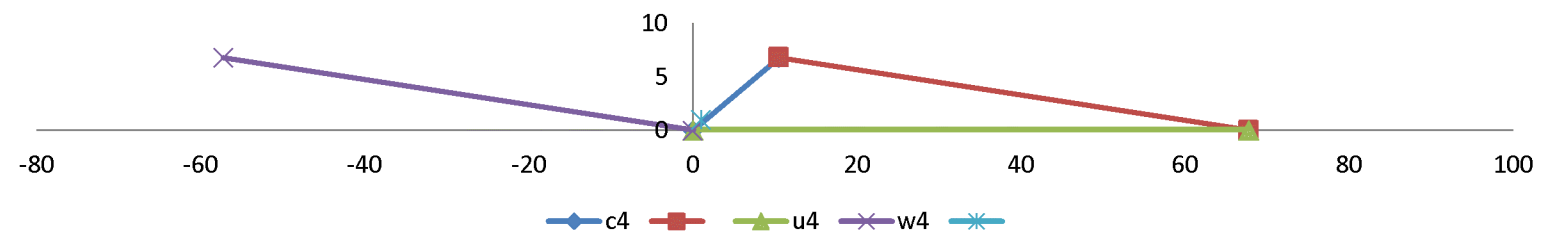
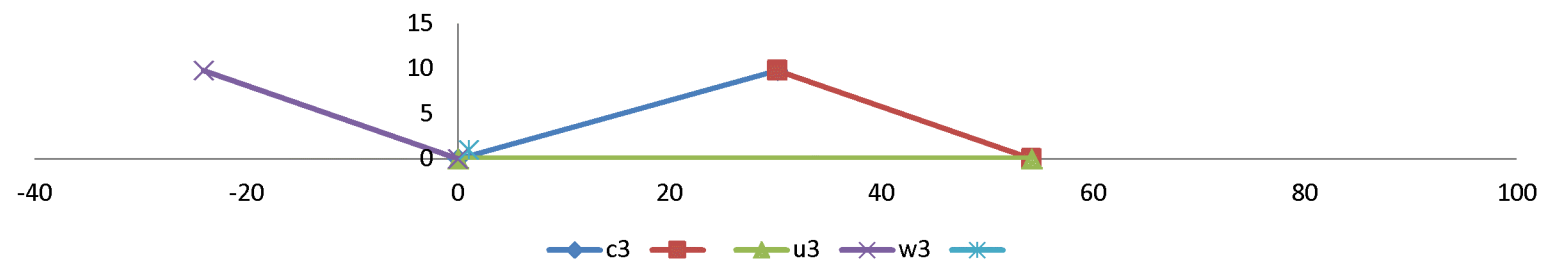
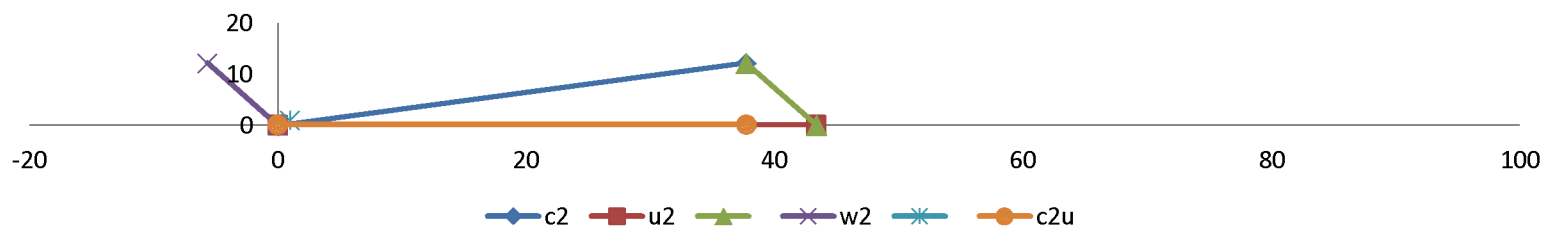
36	Количество рабочих лопаток турбины, шт,	$z_p = \pi d / t_p,$	$3,14 \cdot 0,697 / (22 / 1000)$	99,53	
37	Шаг рабочих лопаток турбины, мм	t_p		22	22-28
38	Диаметр корневого сечения рабочих лопаток, м	$d_k = d - l_p.$	$0,697 - 79 / 1000$	0,618	
39	Степень реактивности в корневом сечении рабочих лопаток	$\rho_k = 1 - (1 - \rho) \left(\frac{d}{d_k} \right)^2$	$1 - (1 - 0,3) \cdot (0,697 / 0,618)^2$	0,110	
40	Относительная скорость входа газа на рабочие лопатки, м/с	$w_1 = c_1 \sqrt{1 + v_1^2 - 2v_1 \cos \alpha_1}$	$433,4 \cdot (1 + 0,671^2 - 2 \cdot 0,671 \cdot \cos 20) ^{0,5}$	188,5	
41	Угол входа на рабочие лопатки, град	$\beta_1 = \arcsin \left(\frac{c_1}{w_1} \sin \alpha_1 \right)$	$\arcsin (433,4 \cdot \sin 20 / 188,5)$	52	
42	Полный изоэнтروпийный перепад энтальпий на рабочих лопатках, кДж/кг	$h^*_{ap} = h_{ap} + h_{w_1},$	$41,925 + 17,8$	59,7	
43	Изоэнтропийный перепад энтальпий на рабочих лопатках, кДж/кг	$h_{ap} = \rho h_{aT}$	$0,3 \cdot 139,75$	41,9	
44	Входная энергия газа на рабочих лопатках, кДж/кг	$h_{w_1} = w_1^2 / 2000$	$188,5^2 / 2000$	17,8	
45	Температура газа в выходном сечении рабочих лопаток, К	$T_2 = T^*_1 - \psi^2 \frac{h^*_{ap}}{c_{pr}},$	$635,9 - 0,97^2 \cdot 59,7 / 1,09$	584,4	
46	Полная температура газа в конце действительного процесса расширения в соплах, К	$T^*_1 = T_1 + h_{w_1} / c_{pr}$	$619,6 + 17,8 / 1,09$	635,9	
47	Коэффициент скорости в рабочей решетке	ψ		0,97	0,95-0,97

48	Относительная скорость выхода газа из рабочей решетки, м/с	$w_2 = \psi \sqrt{2000 h^*_{ap}}$	$0,97 \cdot (2000 \cdot 59,7)^{0,5}$	335,2	
49	Угол выхода газа из рабочих лопаток, град	$\beta_2 = \arcsin \frac{G_T v_2 \cdot 10^3}{\epsilon \pi d_l p_2 w_2}$	$\arcsin (13,4 \cdot 1,584 \cdot 1000 / (3,14 \cdot 0,697 / 79 / 335,2))$	21,00	
50	Удельный объем газа на выходе из рабочих лопаток, м/кг	$v_2 = R_T T_2 / p_2$	$0,283 \cdot 584,4 / 104,4$	1,58	
51	Пропускная способность газовой турбины, см	$\mu F_T = \frac{G_T v_2}{44,72 \sqrt{h^*_{aT}}}$	$13,4 \cdot 1,584 / 44,72 / (143,8)^{0,5}$	0,0396	
52	Абсолютная скорость выхода газа из рабочей решетки, м/с	$c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2a}^2}$	$(18,14^2 + 120,1^2)^{0,5}$	121,5	
53	Проекция абсолютной скорости на окружное направление, м/с	$c_{2u} = w_2 \cos \beta_2 - u$	$335,2 \cdot \cos 21 - 294,8$	18,14	
54	Проекция абсолютной скорости на осевое направление, м/с	$c_{2a} = w_{2a} = w_2 \sin \beta_2$	$335,2 \cdot \sin 21$	120,1	
55	Угол выхода абсолютной скорости из рабочих лопаток, град	$\alpha_2 = \arcsin \left(\frac{w_2}{c_2} \sin \beta_2 \right)$	$\arcsin (335,2 \cdot \sin 21 / 121,5)$	81,4	98,6
56	Потеря энергии в рабочей решетке, кДж/кг	$q_p = (1 - \psi^2) h^*_{ap}$	$(1 - 0,97^2) \cdot 59,7$	3,50	
57	Потеря энергии с выходной скоростью, кДж/кг	$q_a = c_2^2 / 2000$	$121,5^2 / 2000$	7,38	
58	Окружной КПД ступени газовой турбины	$\eta_u = \frac{u(c_{1u} - c_{2u})}{h^*_{aT} \cdot 10^3};$ $\eta_u = 1 - \frac{q_n + q_p + q_a}{h^*_{aT}}$	$294,8 \cdot (433,4 - (18,14)) / 143,8 / 1000$	0,851	
59			$1 - (7,38 + 3,5 + 8) / 143,8$	0,870	

60	Потеря мощности на трение и вентиляцию, кВт	$N_{TB} = 0,735 [1,46d^2 + 0,83(1-\varepsilon)dl_p^{1,5}] \left(\frac{u}{100}\right)^3 \frac{1}{v_4}$	$(0,735 \cdot (1,46 \cdot 0,697^2) \cdot (294,8/100)^3) / 1,584$	8,430	
61	Коэффициент потерь энергии на трение и вентиляцию	$\xi_{TB} = N_{TB} / G_T h^*_{ат}$	8,43/13,4/143,8	0,00440	
62	Коэффициент потерь энергии от утечек в радиальных зазорах турбины	$\xi_{yT} = 3,1 \frac{\delta_r}{l_p}$	3,1 \cdot 1,5/79	0,05890	
63	Радиальный зазор рабочих лопаток, мм	δ_r		1,5	0,8-1,5
64	Внутренний КПД газовой турбины ТК	$\eta_i = \eta_u - \xi_{ym} - \xi_{TB} - \xi_{вык}$	0,87-0,0589-0,0044	0,807	
65	Эффективный КПД газовой турбины	$\eta_{ет} = \eta_i \eta_m$	0,8067 \cdot 0,98	0,791	
66	Механический КПД турбокомпрессора	η_m		0,98	0,98-0,99
67	Эффективная мощность газовой турбины ТК, кВт	$N_{ет} = G_T h^*_{ат} \eta_{ет}$	13,4 \cdot 143,8 \cdot 0,791	1524	
68	Расхождение мощностей компрессора и турбины, %	$\Delta = (Net - Nik) * 100 / Net$	(1524-1465) * 100 / 1524	4	

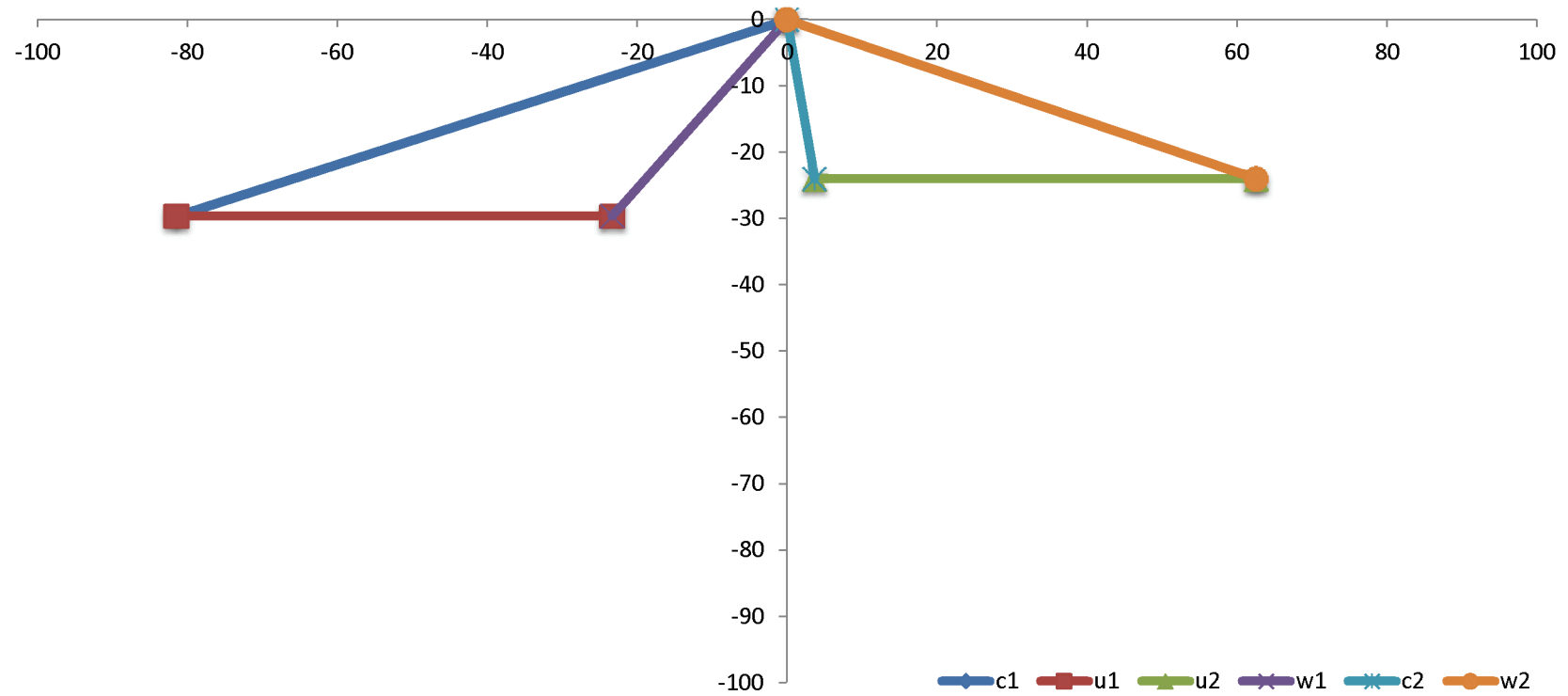
Условие баланса мощностей компрессора и турбины выполняется т.к. $N_k \leq Net$

6.3. Треугольники скоростей ступени компрессора



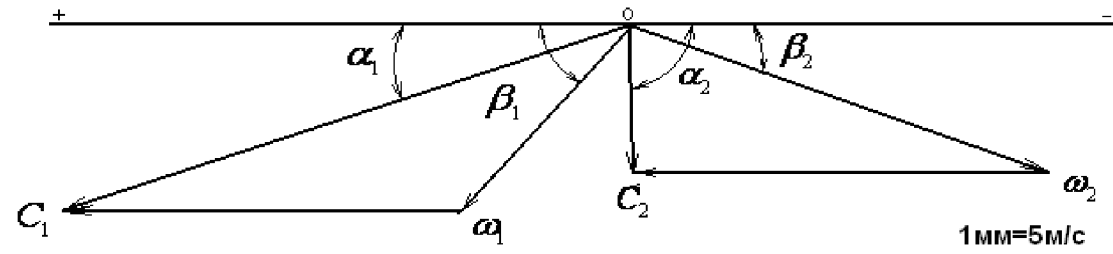
										Масштаб(м/с)/мм
α_2	c_2	u_2	c_{2u}	α_3	c_3	u_3	α_4	c_4	u_4	8
18	317	347	302	18	254	433	33	100	542	м/с
	40	43	38		32	54		13	68	мм

6.2. Треугольники скоростей ступени газовой турбины



α_1	β_1	c_1	u_1	ω_1	α_2	β_2	c_2	ω_2	Масштаб(м/с)/мм
20	52	433	333	189	81	21	122	335	5
		87	67	38			24	67	мм

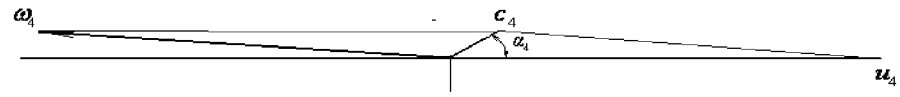
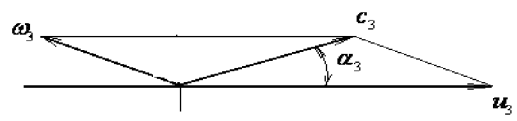
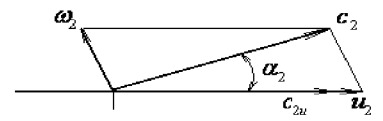
Турбина



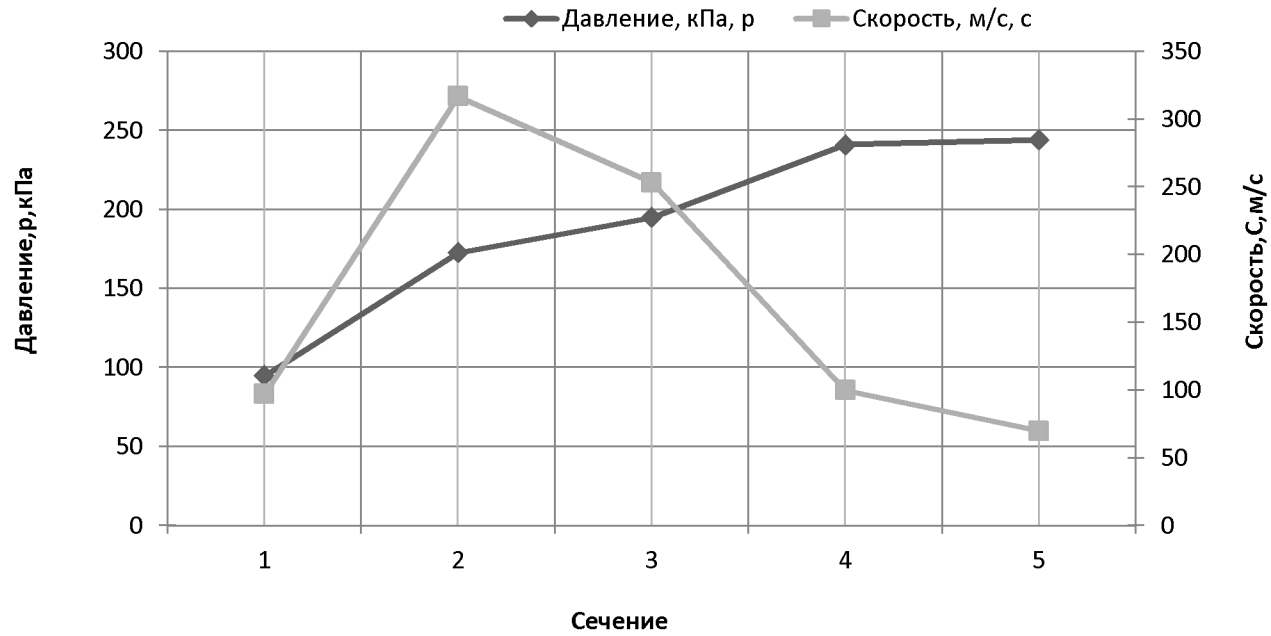
ОБРАЗЕЦ

Компрессор

1mm=7m/c



"Изменение давления и скорости воздуха в сечениях компрессора"



Давление, кПа, р	95	172,8	195,1	241	244,2
Скорость, м/с, с	97,1	316,9	253,5	100	70
Сечение, V	1	2	3	4	5