

Прямые и обратные уравнения  
напорных характеристик  
центробежных вентиляторов.  
(Полная версия)  
Алгоритм.

Андониев И.Ю.

Нижний Новгород  
2019.

	Лист
1. Введение .....	2
2. Условия расчета .....	6
3. Условные обозначения основных величин .....	7
4. Плотность влажного воздуха на заданном расстоянии от уровня моря .....	8
5. Планы скоростей .....	11
6. Исходные таблицы .....	14
7. Построение напорной характеристики .....	16
8. Влияние местоположения .....	21
9. Примеры расчета .....	21
10. Прямые и обратные уравнения канального вентилятора K315L .....	34
11. Проверка метода получения напорной характеристики .....	38
12. Ряд вентиляторов .....	44
13. Короткий алгоритм .....	56
14. Заключение .....	59
15. Список используемой литературы .....	63

## 1. Введение.

**Без уравнений напорных характеристик** вентиляторов проектирование систем вентиляции и кондиционирования, процесс длительный, трудоемкий, вязкий. При проектировании систем вентиляции в основном применяются центробежные вентиляторы. Центробежные вентиляторы изготавливают различных конструкций: в корпусе Рейнольдса, круглые канальные, прямоугольные канальные, но суть у всех одна - они центробежные. **В каталогах для каждого вентилятора, представлены отличные графики опытных напорных характеристик.** Особое значение уравнения напорных характеристик центробежных вентиляторов имеют для **рядовых инженеров, которые проектируют, участвуют в монтаже и сами испытывают свои системы.** В советской, современной отечественной литературе, по центробежным насосам и вентиляторам отсутствуют **инженерные методы** построения уравнений напорных характеристик. 20 лет назад мною была изучена масса литературы, и наконец была найдена великолепная книга: [1] Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов. М. Машиностроение 1960. Немецкий ученый Карл Пфлейдерер **подробно и доступно** описал построение напорной характеристики насосов и вентиляторов в этой книге. Это единственный источник в котором изложен метод **приближенного** построения уравнения **при проектировании вентиляторов и насосов.** К. Пфлейдерер: "... до настоящего времени еще нет возможности надежно заранее определить напорную характеристику. ... потери которые также следует учитывать ... могут быть определены лишь приближенно", см. [1] стр. 420. А рядовому инженеру уравнения напорных характеристик вентиляторов необходимы для **проектирования систем вентиляции,** и кроме того у него уже есть **графики опытных напорных характеристик** (в каталогах). То есть, **рядовому инженеру,** можно определить приближенное уравнение напорной характеристики, а затем **привести приближенное уравнение к опытному по графику.**

В этой работе использован метод Пфлейдерера, с минимальными комментариями, за подробностями обращаться к первоисточнику. Характеристика отличается от опытной (в каталогах), поэтому в уравнения введены **два деформационных коэффициента (для каждого вентилятора свои)**, для приведения теоретической (приближенной) характеристики к опытной **на рабочем участке**. Рабочий участок напорной характеристики это участок эффективной, устойчивой работы вентилятора с большим КПД. В отечественных каталогах представлены очень не удобные графики характеристик: кривые расхода, мощности, КПД, давления: статические, динамические, полные ...оси в логарифмическом масштабе, все это на одном графике!!! Отечественные каталоги созданы специалистами производителями вентиляторов и удобны только для них. **В зарубежных каталогах: один вентилятор - одна кривая, давление - статическое, оси в масштабе 1:1, все ясно и понятно.** Для рядового инженера важно только одно давление - статическое (его легко измерить и посчитать).

Прямое уравнение это зависимость напора вентилятора от расхода  $H = f(V)$ . Обратное уравнение (не должно вызывать удивления) это зависимость расхода вентилятора от напора  $V = f(H)$ . Прямые и обратные уравнения напорной характеристики позволяет одновременно проектировать систему вентиляции вместе с вентилятором .

При проектировании системы воздухопроводов вычисляются сопротивления на различных участках, затем находится сумма всех сопротивлений и определяется сопротивление всей системы, и по обратному уравнению вычисляется расход по системе .

*В таблице 1 пример поиска вентилятора для системы с сопротивлением 440 Па. В таблице 2 представлен расчет приточной системы с вентилятором КТ 50-30-4. Расчет системы вентиляции (с перебором вентиляторов) занимает от нескольких минут до часа.*

Таблица 1

Расчет производительности вентиляторов по их обратным функциям. Начало 15.12.04.							
№	Фирма	Функция	Тип	Марка	L, мкубч	Pmax, Па	Lmax
1	ИННОВЕНТ	Испытание	Вентилятор	БК 11-2-2	0	425	1450
2	МОВЕН	Испытание	Вентилятор	ВР 86-77-2,5	1727	830	2000
3	МОВЕН	Диаграмма	Вентилятор	ВР 86-77-5	8829	950	10845
4	МОВЕН	Диаграмма	Вентилятор	ВР 300-45-2, 1,5 кВт	2523	1900	2555
5	МОВЕН	Диаграмма	Вентилятор	ВР 300-45-2, 2,2 кВт	3370	2600	3500
6	Ostberg	Испытание	Вентилятор	СК100С	0	390	430
7	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	K100XL	0	360	265
8	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	K125XL	0	350	350
9	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	K160XL	0	400	847
10	Systemair	Испытание	Вентилятор	K200L	242	490	1011
11	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	K250L	194	485	981
12	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	K315L	634	700	1688
13	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	KD200L1	24	450	1325
14	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	KD250L1	572	550	1985
15	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	KD315L	632	550	2160
16	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	KD355XL3	0	350	4320
17	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	KD400XL3	0	450	6400
18	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	KD450XL3	2635	550	8150
19	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	КТ 40-20-4	0	250	1284
20	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	КТ 50-25-4	0	310	1929
21	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	КТ 50-30-4	0	425	2723
22	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	КТ 60-30-4	1087	450	3407
23	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	КТ 60-35-4	3558	650	4400
24	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	КТ 70-40-4	5442	820	5200
25	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	КТ 80-50-4	6054	1100	6000
26	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	КТ100-50-6	7438	650	8750
27	Systemair	Испытание	Вентилятор	RS40-20L	355	620	1320
28	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	RS60-35 L3	1659	580	4320
29	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	RS70-40 L3	2321	550	5000
30	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	RS80-50 L3	6051	900	9350
31	Systemair	Диаграмма	Вентилятор	RS100-50 L3	8739	1000	12000
32	Благовест	Диаграмма	АПК	Бризарт 350	0	410	430
33	Благовест	Диаграмма	АПК	Бризарт 500	210	550	650
34	Благовест	Диаграмма	АПК	Бризарт 1000	0	420	1000
35	Благовест	Диаграмма	АПК	Бризарт 2000	0	420	2000
36	Systemair	Диаграмма	АПК	TLP125/1.2	0	150	145
37	Systemair	Диаграмма	АПК	TLP160/2.1	0	300	330
38	Systemair	Диаграмма	АПК	TLP200/3...5	0	400	560

Ввод
P, Па
440
▲
▼

работа	минимальное давление P <sub>сг</sub> = 250 Па
АВАРИЯ	минимальное давление P <sub>сг</sub> = 500 Па
АВАРИЯ	минимальное давление P <sub>сг</sub> = 900 Па
работа	минимальное давление P <sub>сг</sub> = 250 Па



Таблица 2

Приточный воздуховод постоянного сечения с отверстиями разной площади. I < X3. Счет от заглушки									
<b>Ввод</b>									
Клапан ZR: 1 - есть.	1								
Глушитель SG: 1 - есть.	0								
Фильтр EU3: 1 - есть.	1								
Нагреватель электро: 1 - есть.	1								
Нагреватель водяной: 1 - есть.	0								
Количество ветвей воздуховода, шт	1								
Диаметр ветви воздуховода d, м.	0,440								
Колич. отверстий в одной ветви - n	10								
Полная производительность, м³/ч.	2229								
Скорость в отверстии	3,00								
Козф. Шероховатости	1,000E-04								
Козф. Расхода	0,65								
Козф. См. удара	0,40								
Длина нагнетающего воздуховода l, м	15,00								
<b>Вычисления</b>									
Производительность на 1 ветвь, м³/ч	2229								
Площадь воздухов.	0,152								
Скорость в магистрали, м/с	4,072								
Число Рейнольдса	1,197E+05								
Козф. Трения	0,0185								
X3, м	71,461								
Длина воздуховода меньше X3?	ДА								
Расстояние между отверстиями по длине,	1324	2	3	4	5	6	7	8	
Номер отверстия, от заглушки	1	2	3	4	5	6	7		
Параметр C		2,5370	4,3481	6,0333	7,5925	9,0257	10,3330	11,5	
Площадь отверстия	0,0206	0,0208	0,0212	0,0218	0,0225	0,0235	0,0249	0,0	
Диаметр отверстия	162	163	164	166	169	173	178		
скорость в отверстии	3,0	3,0	2,9	2,8	2,8	2,6	2,5		
Козф. Сопротивления	1,51	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0	
Падение давления	15,1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0	
Усредненный диаметр	176								
Расход через одно отверстие, м³/ч	223								
<b>Расчет полного сопротивления</b>									
<b>Ввод</b>									
Количество поворотов, шт	1,0								
Длина всасывающего воздуховода, м	1,0								
<b>Счет</b>									
ZR 50-30	6								
SG 50-30	0								
Фильтр FKU 50-30	66								
Нагреватель эл ELN 50-30	16,4								
Нагреватель вод WWN 50-30/2	0,0								
Падение давления в отверстиях, Па	15,1								
Динамическое давление, Па	10,0								
Сопротивление на входе, Па	10,0								
Сопротивление всасыв воздуховода, Па	0,4								
Сопротивление нагнет воздуховода, Па	6,3								
Сопротивление поворотов, Па	4,5								
<b>Полное сопротивление, Па</b>	<b>135</b>								

## Параметры воздушной среды

Температура потока внутри помещения, С	20	_tn
Температура потока на улице, С°		
Барометрическое давление, мм.рт.ст.	760	_prc
<b>Счет</b>		
Барометрическое давление, Па	101325	_pp
Плотность воздуха, кг/м³	1,20	_ro
Козф. Кинематической вязкости воздуха	0,0000150	_my

## Расчет сечений воздуховодов

A, м	B, м	V, м/с
0,50	0,30	4,1
dэкв, м	0,38	Эквивал диаметр
S, мкв	0,15	Площадь сечения
dр, м	0,44	Диаметр по сечению

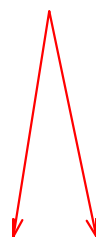
P, Па	KT 50-30-4	Воздуховод
135	L, м³/ч	k=0,0001 жесткий
Дср, мм	2230	k=0,003 гибкий
176		

Проверено

## 2. Условия расчета.

Для получения напорных уравнений выбраны замечательные отечественные вентиляторы ОАО "Мовен": ВР-86-77 с лопатками загнутыми назад и ВР-300-45, с лопатками загнутыми вперед. Эти вентиляторы созданы по отработанным аэродинамическим схемам [4], имеют минимальные габариты, отличные характеристики, применяются в системах вентиляции и кондиционирования, отличаются высокой надежностью.

Напорные уравнения получены при нормальных внешних условиях по каталогу ОАО Мовен [6]: температура воздуха 20°C (плотность 1,19кг/м³), влажность 50%, барометрическое давление на уровне моря 760 мм.рт.ст. В каталоге [6] представлены аэродинамические характеристики в виде **диаграмм**, но по ним невозможно определить расчетные точки. В каталоге [6] представлены **таблицы** технических характеристик, где даны две крайние точки рабочего диапазона вентиляторов. По этим крайним точкам и получены напорные уравнения.



Типоразмер вентилятора	Конструктив- ное исполнение	Относит. диаметр колеса	Двигатель		Частота вращения рабочего колеса, мин <sup>-1</sup>	Параметры в рабочей зоне		Масса венти- лятора не более, кг
			Типоразмер	Мощ- ность, кВт		Производи- тельность, тыс. м³/час	Полное давление, Па	
ВР-86-77-2,5В ВР-86-77-2,5ВЖ ВР-86-77-2,5ВК1 ВР-86-77-2,5ВК1Ж	1	1	АИМ63А4	0,25	1350	0,45-0,85	170-110	31,5
			АИМ63В2	0,55	2750	0,85-1,75	720-440	31,5
		0,9	АИМ63А4	0,25	1350	0,4-0,8	120-70	31,5
			АИМ63А2	0,37	2750	0,85-1,65	490-300	31,5
		0,95	АИМ63А4	0,25	1350	0,44-0,85	150-95	31,5
			АИМ63В2	0,55	2750	0,9-1,75	620-380	31,5
		1,05	АИМ63А4	0,25	1350	0,45-0,85	190-130	31,5
			АИМ71А2	0,75	2750	0,85-1,7	800-540	34,5
		1,1	АИМ63А4	0,25	1350	0,47-0,85	230-170	31,5
			АИМ71А2	0,75	2750	0,9-1,75	960-740	34,5

Расчет воспринимает следующие внешние условия : координата от уровня моря : от -5000м до 5000м, температура воздуха -50°C...100°C, влажность 0...100%.

## 3. Условные обозначения основных величин.

## Константы

$t_k = 273.15^\circ K$  - температура Кельвина при  $0^\circ C$ ;  
 $M = 28.96$ , кг/кмоль - молекулярная масса воздуха;  
 $M_e = 18.02$ , кг/кмоль - молекулярная масса воды;  
 $r = 8314,3$ , Дж / (кмольК) - универсальная газовая постоянная;  
 $r_v = 287.1$ , Дж / (кг $^\circ C$ ) - газовая постоянная воздуха;  
 $g = 9.81$ , м<sup>2</sup> / с - ускорение свободного падения;

## Переменные

$t_v$ ,  $^\circ C$  - температура воздуха;  
 $\varphi_v$ , % - влажность воздуха;  
 $d$ , г/кг - влагосодержание на линии насыщения;  
 $d_{vn}$ , г/кг - влагосодержание при заданной влажности;  
 $p_b$ , мм.рт.ст - барометрическое давление на уровне моря;  
 $p_a$ , Па - давление на уровне моря;  
 $p_{ob}$ , Па - давление на уровне объекта;  
 $p_{vn}$ , Па - парциальное давление воздуха;  
 $h_{ob}$ , м - высота расположения объекта над уровнем моря;  
 $\rho_{sy}$ , кг / м<sup>3</sup> - плотность сухого воздуха на уровне моря;  
 $\rho_{sy}^{ob}$ , кг / м<sup>3</sup> - плотность сухого воздуха на уровне объекта;  
 $\rho_{vl}$ , кг / м<sup>3</sup> - плотность влажного воздуха на высоте объекта;  
 $H_x$ , Па - напор с учетом лопастей;  
 $V_x$ , м<sup>3</sup>/ч – расход;  
 $k_1, k_2, k_3$  - коэф. основного уравнения;  
 $n$ , об/мин - обороты колеса;  
 $n_s$  - быстроходность вентилятора;

$d_1$ , м - внутренний диаметр колеса;  
 $d_2$ , м - внешний диаметр колеса;  
 $b_1$ , м - ширина лопасти на входе;  
 $b_2$ , м - ширина лопасти на выходе;  
 $z$  - число лопастей;  
 $t_1$  - шаг лопастей;  
 $\delta$  - толщина лопасти;  
 $k_1$  - коэффициент стеснения потока;  
 $\phi$  - коэффициент кривизны лопастей;  
 $p$  - коэффициент числа лопастей;  
 $\eta_e$  - гидравлический КПД;  
 $\eta_o$  - объемный КПД;  
 $\eta_m$  - механический КПД;  
 $\eta_n$  - КПД насоса;  
 $\beta_1$ , - угол входа лопасти;  
 $\beta_2$ , - угол выхода лопасти;  
 $\alpha_3$ , - угол между скоростями  $c_3$ ,  $u_2$ ;  
 $\varphi$  - коэф. смягчения удара;  
 $a$ ,  $b$ ,  $c$  - коэф. квадратного уравнения;  
 $\alpha$ ,  $\beta$  - коэф. приведенного уравнения;  
 $i$ ,  $i_1$ , - коэф. деформации.

#### 4. Плотность влажного воздуха на заданном расстоянии от уровня моря .

Вентиляторы в России, работают в разнообразных географических и внешних условиях: в городах, на уровне моря, высоко в горах, в шахтах и т.д. Для этого необходимо вычислять плотность влажного воздуха на разных расстояниях от уровня моря. Плотность влажного воздуха рассчитывается с использованием законов: Менделеева-Клайперона, Авогадро, Дальтона, см. [7]. Влажность для напорной характеристики вентилятора, не имеет практического значения, в расчет введена для определенности и для удаления повода для споров.

Барометрическое давление  
на высоте объекта, Па

$$p_{ob} = p_a \cdot e^{-\frac{M \cdot g \cdot h_{ob}}{r \cdot (t_n + t_k)}}$$

Плотность сухого воздуха  
на уровне моря

$$\rho_{sy} = \frac{p_a}{r_v \cdot (t_{vn} + 273.15)}$$

Плотность влажного воздуха

$$\rho_{vl} = \frac{(p_{ob} - 0.378 \cdot p_{vn})}{r_v \cdot (t_{vn} + 273.15)}$$

$$0,378 = 1 - \frac{M_e}{M}$$

молярные массы воды и  
сухого воздуха  $M_e$ , М

$p_{vn}$ , Па - парциальное давление  
водяных паров

Влагосодержание воздуха на линии насыщения в табличном виде из справочника [8], аппроксимированны полиномами и используются в расчете . Парциальное давление влажного воздуха, так же получены по таблицам из справочника [8].

### Влагосодержание воздуха

на линии насыщения  $d = f(t)$ , г/кг

Интервал температур

$$t_n = -50 \dots 0^\circ C$$

$$d = 1 \cdot 10^{-6} \cdot (51 + t_n)^4 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot (51 + t_n)^3 + 0.00141 \cdot (51 + t_n)^2 - 0.007954 \cdot (51 + t_n) + 0.043136$$

Интервал температур

$$t_n = 0 \dots 60^\circ C$$

$$d = 0,000014 \cdot (t_n + 1)^4 - 0,00081 \cdot (t_n + 1)^3 + 0,036212 \cdot (t_n + 1)^2 - 0,021506 \cdot (t_n + 1) + 4,254927$$

Интервал температур

$$t_n = 60 \dots 95^\circ C$$

$$d = 0,000042 \cdot (t_n - 60)^6 - 0,003784 \cdot (t_n - 60)^5 + 0,132364 \cdot (t_n - 60)^4 - 2,191216 \cdot (t_n - 60)^3 + 17,821742 \cdot (t_n - 60)^2 - 50,095802 \cdot (t_n - 60) + 211,462203$$

### Парциальное давление водяных паров,

Интервал температур

$$t_n = -50 \dots 0^\circ C$$

$$p_{vn} = 0.000166 \cdot (51 + t_n)^4 - 0.007734 \cdot (51 + t_n)^3 + 0.218634 \cdot (51 + t_n)^2 - 1.206114 \cdot (51 + t_n) + 6.77659$$

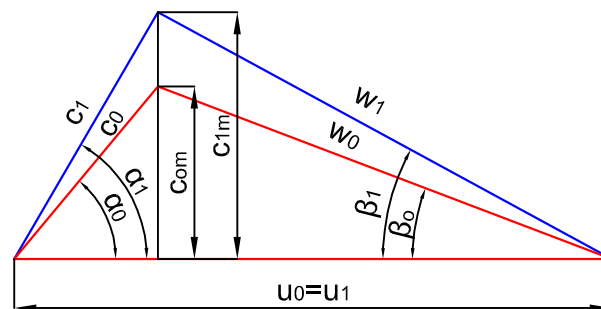
$$t_n = 0 \dots 95^\circ C$$

$$p_{vn} = 0.000971 \cdot (1 + t_n)^4 - 0.039272 \cdot (1 + t_n)^3 + 3.875334 \cdot (1 + t_n)^2 - 3.912819 \cdot (1 + t_n) + 705.212485$$

## 5. Планы скоростей.

В большинстве формул гидродинамического расчета лопастных насосов и вентиляторов, начиная с уравнения Бернулли, закона количества движения, используются скорости потока на входе и выходе из колеса. Поэтому в самом начале расчета определяются скорости, на входе и выходе из колеса, чтобы использовать эти величины на всех дальнейших этапах. Абсолютную скорость  $C$  частицы жидкости можно получить геометрическим суммированием переносной (окружной)  $U$  и относительной  $W$  скоростей. При геометрическом суммировании получается треугольник скоростей, см. рисунок 1 и рисунок 2. На рисунках красные треугольники - с учетом стеснения потока лопастями, [1].

Лопатки загнуты назад  
треугольник скоростей на входе



треугольник скоростей на выходе

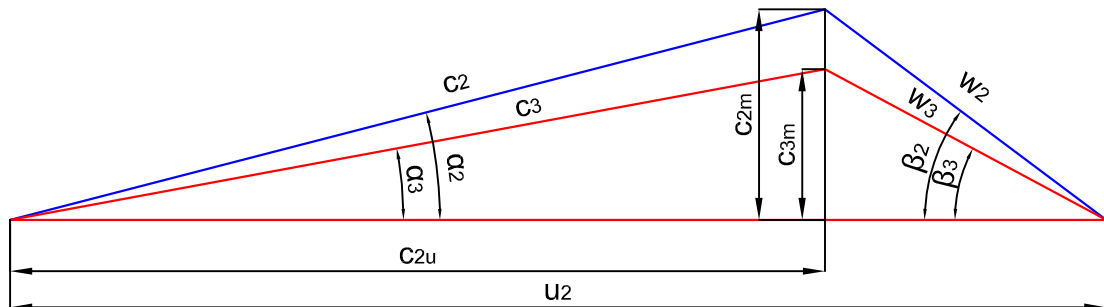


Рисунок 1

$u_0$  - окружная скорость перед входом в колесо (скорость ненарушенного потока);

$u_1$  - окружная скорость непосредственно на входном участке лопатки ;

$w_0$  - относительная скорость перед входом в колесо (скорость ненарушенного потока);

$w_1$  - относительная скорость непосредственно на входном участке лопатки ;

$c_0$  - абсолютная (относительно корпуса) скорость перед входом в колесо (скорость ненарушенного потока);

$c_1$  - абсолютная (относительно корпуса) скорость непосредственно на входном участке лопатки;

$c_{0m}$  - радиальная составляющая абсолютной скорости перед входом в колесо (скорость ненарушенного потока);

$c_{1m}$  - радиальная составляющая абсолютной скорости непосредственно на входном участке лопатки;

$u_2$  - окружная скорость перед выходом потока из колеса ;

$w_2$  - относительная скорость перед выходом потока из колеса ;

$w_3$  - относительная скорость потока непосредственно после схода с лопатки ;

Лопатки загнуты вперед (неполные треугольники)

скорости на входе                      скорости на выходе

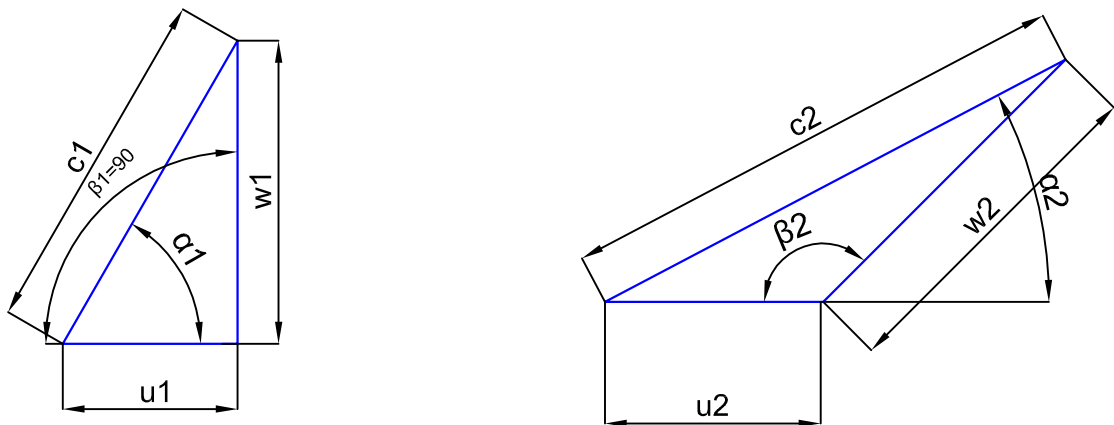


Рисунок 2

$c_2$  - абсолютная (относительно корпуса) скорость потока перед выходом из колеса ;  
 $c_3$  - абсолютная (относительно корпуса) скорость непосредственно после выхода потока из колеса;  
 $c_{2m}$  - радиальная составляющая абсолютной скорости перед выходом из колеса ;  
 $c_{3m}$  - радиальная составляющая абсолютной скорости непосредственно после выхода потока из колеса, [1].

Окружная скорость  $u$ , направлена по касательной к окружности в сторону вращения колеса; относительная скорость  $w$  направлена по касательной к поверхности лопатки; радиальная (меридиональная) составляющая абсолютной скорости  $c_m$  направлена по радиусу от оси. Углы на планах:  $\alpha$  - угол между абсолютной и окружной скоростями жидкости;  $\beta$  - угол между относительной скоростью  $w$  и отрицательным направлением окружной скорости  $u$  жидкости;  $\beta_l$  - угол между касательной к лопатке и отрицательным направлением окружной скорости  $u$  жидкости.

Темные места теории отмеченные разными авторами .

а) **Угол атаки лопасти**: опыт показывает, что КПД вентилятора и высота всасывания насоса увеличиваются, если угол потока больше входного угла лопатки на  $3...8^\circ$ , этот угол называют углом атаки. При этом не происходит отрыва потока от лопатки. Но на самом деле расчетом невозможно определить угол атаки, угол атаки в расчете можно получить искусственно, изменением угла  $\alpha_1$ .

б) **Угол  $\alpha_1$**  так же невозможно вычислить: для лопаток загнутых назад  $\alpha_1 = 85...90^\circ$ ; для лопаток загнутых вперед  $\alpha_1 = 30...60^\circ$ .

в) **Скорость во всасывающей трубе, или скорость входа  $C_0$** . У Ломакина: "Скорость входа должна быть выбрана так, чтобы обеспечить благоприятные условия для проектирования лопасти"...? Михайлов приводит эмпирическую формулу Руднева С.С. Пфлейдерер также рекомендует выбирать  $C_0$ . Это произвольное назначение скорости  $C_0$  приводит к произвольному значению  $C_1$ , что искажает план скоростей.

В расчете удалось избежать этих противоречий. Сначала вычисляется  $C_1$  (по плану скоростей), затем производительность  $V$ , а потом вычисляется  $C_0$ . Такой порядок вычислений не искажает плана скоростей.



Для вычисления мощности необходимо найти КПД . Формулы КПД взяты у Ломакина [5].

Быстроходность

$$n_s = 3.65 \cdot n \cdot \frac{\sqrt{V}}{H^{0.75}}$$

Гидравлический кпд

$$\eta_e = 1 - \frac{0,42}{(\lg d_1 - 0.172)^2}$$

Объемный кпд

$$\eta_{об} = \frac{1}{1 + 0,68 \cdot n_s^{\frac{2}{3}}}$$

Механический кпд

$$\eta_m = \frac{1}{1 + \frac{820}{n_s^2}}$$

Общий кпд

$$\eta = \eta_e \cdot \eta_{об} \cdot \eta_m$$

Мощность

$$N = 1.1 \cdot \frac{\rho_{vl} \cdot g \cdot V \cdot H}{1000 \cdot \eta}, \text{кВт}$$

Треугольники соростей

Шаг лопастей на входе, м

$$t_1 = \frac{\pi \cdot d_1}{z}$$

Толщина лопастей на входе, м

$$\delta_1 = \frac{0,001 \cdot \delta}{\sin \beta_1}$$

Коэф. стеснения на входе

$$db_1 = \frac{t_1}{t_1 - \delta_1}$$

Шаг лопастей на выходе, м

$$t_2 = \frac{\pi \cdot d_2}{z}$$

Толщина лопастей на выходе, м

$$\delta_2 = \frac{0,001 \cdot \delta}{\sin \beta_2}$$

Коэф. стеснения на выходе

$$db_2 = \frac{t_2}{t_2 - \delta_2}$$

Частота вращения, 1/с

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$$

Коэф. полного напора

$$\psi = \frac{2 \cdot g \cdot H}{u_2^2}$$

**Вход потока**

окружная скорость, м/с

$$u_1 = 0.5 \cdot d_1 \cdot \omega$$

абсолютная скорость, м/с

$$c_1 = \frac{u_1 \cdot \sin \beta_1}{\sin(180 - \beta_1 - \alpha_1)}$$

радиальная составляющая, м/с

$$c_{1m} = c_1 \cdot \sin \alpha_1$$

подача вентилятора, м/с

$$V = 3600 \cdot c_{1m} \cdot 0.25 \cdot \pi \cdot d_1^2$$

скорость перед колесом, м/с

$$c_o = \frac{4 \cdot V}{3600 \cdot \pi \cdot d_1^2}$$

относительная скорость, м/с

$$w_1 = \frac{u_1 \cdot \sin \alpha_1}{\sin(180 - \beta_1 - \alpha_1)}$$

**Выход потока**

окружная скорость, м/с

$$u_2 = 0.5 \cdot d_2 \cdot \omega$$

радиальная составляющая, м/с

$$c_{2m} = \frac{d_1}{d_2} \cdot c_{1m}$$

относительная скорость, м/с

$$w_2 = \frac{c_{2m}}{\sin \beta_2}$$

абсолютная скорость, м/с

$$c_2 = \sqrt{(w_2^2 + u_2^2 - 2 \cdot w_2 \cdot u_2 \cdot \cos \beta_2)}$$

$$\alpha_2 = \arcsin \left( \frac{c_{2m}}{c_2} \right)$$

окружная составляющая, м/с

$$c_{2u} = c_2 \cdot \cos \alpha_2$$

радиальная составляющая, м/с

$$c_{3m} = \frac{c_{2m}}{db_2}$$

угол  $\beta_3$ 

$$\beta_3 = \arctg \left( \frac{c_{3m}}{u_2 - c_{2u}} \right)$$

**6. Исходные таблицы.**

В таблицах 3 и 4 представлены исходные данные для расчета. Данные в таблице 3 для вентиляторов ВР-86-77 получены из источника [4] рис 78, стр 101, аэродинамическая схема Ц4-70, для вентиляторов с лопатками загнутыми назад. Данные в таблице 4 для вентиляторов ВР-300-45 получены из источника [4] рис 64, стр 87, аэродинамическая схема Ц14-46, для вентиляторов с лопатками загнутыми вперед.

**Разница между лопатками загнутыми назад и вперед** (для ВР-86-77, ВР-300-45):

**а) лопатки загнуты назад - напор увеличивается - расход падает - ВР-86-77;**

лопатки, загнутые назад, применяются в вентиляторах с любым давлением;

**б) лопатки загнуты вперед - напор увеличивается - расход растет - ВР-300-45.**

Лопатки, загнутые вперед, применяются только в вентиляторах, для них характерны большие давления и расходы, малые размеры см. [2] стр. 133.

Вентиляторы ВР-86-77, лопасти загнуты назад						Таблица 3
Вентилятор	ВР-86-77-2,5	ВР-86-77-3,15	ВР-86-77-4	ВР-86-77-5	ВР-86-77-6,3	ВР-86-77-8
Мощность, кВт	0.55	1,5	5,5	2,2	7,5	7,5
Обороты, об/мин	2750	2850	2850	1420	1435	960
Число лопаток	13	13	13	13	13	13
Толщина лопасти, мм	1,5	1,5	2	2	2	2
Диаметр входа D1, м	0.185	0.233	0.296	0.370	0.466	0.592
Диаметр выхода D2, м	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Угол входа $\beta_1$	16	16	16	16	16	16
Угол выхода $\beta_2$	44,7	44,7	44,7	44,7	44,7	44,7
Ширина лопасти на входе b1, м	0.088	0.110	0.140	0.175	0.221	0.280
Ширина лопасти на выходе b2, м	0.063	0.079	0.100	0.125	0.158	0.200
L/P (м3/ч;Па)	850/720	1800/1220	4300/2200	4300/810	8600/1320	12000/950
L/P (м3/ч;Па)	1750/450	4000/680	8300/1250	8600/500	17500/800	23000/580
Коэф полного давления, $\psi_{\max}/\psi_{\min}$	0,93/0,58	0,93/0,52	1,03/0,59	0,98/0,61	1,01/0,61	0,45/0,27

Вентиляторы ВР-300-45, лопасти загнуты вперед							Таблица 4
Вентилятор	ВР-300-45-2	ВР-300-45-2,5	ВР-300-45-3,15	ВР-300-45-4	ВР-300-45-5	ВР-300-45-6,3	ВР-300-45-8
Мощность, кВт	1,5	5,5	2,2	7,5	15	22	45
Обороты, об/мин	2850	2850	1420	1430	1460	975	985
Число лопаток	34	34	34	34	34	34	34
Толщина лопасти, мм	1,5	1,5	2	2	3	3	3
Диаметр входа D1, м	0.160	0.200	0.252	0.320	0.400	0.504	0.640
Диаметр выхода D2, м	0.200	0.250	0.315	0.400	0.500	0.630	0.800
Угол входа $\beta_1$	90	90	90	90	90	90	90
Угол выхода $\beta_2$	135	135	135	135	135	135	135
Ширина лопасти на входе b1, м	0.100	0.125	0.158	0.200	0.250	0.315	0.400
Ширина лопасти на выходе b2, м	0.100	0.125	0.158	0.200	0.250	0.315	0.400
L/P (м3/ч;Па)	1300/1250	2400/1950	2300/800	5200/1320	9000/2200	12300/1580	24500/2600
L/P (м3/ч;Па)	2000/1950	4400/2300	5100/850	10800/1550	14500/2500	28000/1800	37000/2850
Коэф полного давления, $\psi_{\max}/\psi_{\min}$	2,35/2,26	2,35/2,77	2,67/2,51	2,90/2,47	2,87/2,52	2,92/2,56	2,81/2,56

## 7. Построение напорной характеристики .

**Недостаточное совпадение теории с действительностью.**

а) В настоящее время расчет насосов, вентиляторов, турбин производится на основе конгруэнтного лопаткам течения жидкости, т.е. в предположении бесконечного числа лопаток потому что нет другого, пригодного **инженерного способа расчета**, обладающего такой же надежностью, [1].

б) Согласно одномерной струйной теории безразлично, как осуществлено соединение между входной и выходной кромками лопаток. В расчете учитываются только входные и выходные углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  лопаток, [1].

в) Условие безударного входа потока в рабочее колесо **на практике не соблюдается**. Удар на входе в рабочее колесо представляет собой потерю энергии давления, [1].

г) Теоретический напор  $H_\infty$  с бесконечным числом лопаток по одномерной теории получается **существенно меньше**, чем по результатам опыта (по опытному КПД). Значит напор с конечным числом лопастей так же будет **меньше действительного**, [1].

д) Формулы для учета конечного числа лопаток неточные и имеют ориентировочный характер.

## Построение характеристики расчетным путем .

Построение характеристики проводится по методике Пфлейдерера К., см. [1], стр. 421. Уравнение напора в общем виде :

$$H_x = H_{thx} - Z_{hx} - Z_{s1} - Z_{s2}, \text{ где}$$

$H_{thx}$  - теоретическая высота напора ;

$Z_{hx}$  - потери на трение внутри всего вентилятора ;

$Z_{s1}$  - потери на удар на входе ;

$Z_{s2}$  - потери на удар на выходе .

Уравнение приводится к виду:  $H_x = k_1 \cdot n^2 + 2 \cdot k_2 \cdot n \cdot V_x - k_3 \cdot V_x^2$

Уравнение представляет напорную характеристику вентилятора (или насоса) при постоянном числе оборотов рабочего колеса. Коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  являются постоянными коэффициентами **для одного и того же вентилятора**. Эти коэффициенты определяются длинными выражениями, поэтому для краткости записи применяются комплексы:  $a_1$ ,  $a_2$  ...

На рисунке 3 представлен результат по уравнению Пфлейдерера, напорная характеристика для вентилятора ВР-86-77-2,5, кривая напора проходит мимо контрольных точек. Очевидно, уравнение требует корректировки. На стр. 18 представлен алгоритм преобразования квадратного трехчлена: выделение точного квадрата и сжатие-растяжение по осям координат. На рисунке 4 представлен результат преобразования, кривая проходит через контрольные точки. Уравнения реагируют на изменения внешних условий: атмосферное давление, координата от уровня моря от -5000м до 5000м, температура воздуха -50°C...100°C, плотность воздуха, влажность 0...100%.

**Построение напорной характеристики**

теоретический напор, м

$$H_t = \frac{u_2 \cdot c_2 \cdot \cos \alpha_2 - u_1 \cdot c_1 \cdot \cos \alpha_1}{g}$$

коэф. кривизны лопастей

$$\varphi = (1 \dots 1,2) \cdot (1 + \sin \beta_2) \cdot \frac{d_1}{d_2}$$

коэф. конечного числа лопастей

$$p = \frac{2 \cdot \varphi}{z} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2}$$

теоретический напор с лопастями, м

$$H_{th} = \frac{H_t}{1 + p}$$

Уравнение Пфлейдерера высоты напора, м

$$H_x = k_1 \cdot n^2 + 2 \cdot k_2 \cdot n \cdot V_x - k_3 \cdot V_x^2$$

Вспомогательные комплексы

$$a_1 = \frac{\pi^2}{g \cdot 60^2}; a_2 = 1 + p; a_3 = a_2 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3 + \operatorname{ctg} \beta_2;$$

$$a_4 = \frac{t_1}{t_1 - \sigma_1}; a_5 = 1 - \eta_e; a_6 = \pi D_1 b_1; a_7 = \pi D_2 b_2$$

Напорные коэффициенты

$$k_1 = a_1 \cdot \left( \frac{D_2^2}{a_2} - 0.5 \cdot \varphi \cdot D_1^2 - 0.5 \cdot \varphi \cdot \frac{D_2^2}{a_2^2} \right)$$

$$k_2 = \frac{1}{120 \cdot g} \left( -\frac{\operatorname{ctg} \beta_2}{b_2 \cdot a_2} + \frac{\varphi \cdot a_3}{b_2 \cdot a_2} + a_4 \cdot \frac{\varphi \cdot \operatorname{ctg} \beta_1}{b_1} \right)$$

$$k_3 = \frac{a_5}{g} \cdot \frac{a_3 \cdot \operatorname{ctg} \alpha_3}{a_7^2} + \frac{0.5 \cdot \varphi}{g} \cdot \left( \frac{a_3}{a_2 \cdot a_7} \right)^2 + \frac{0.5 \cdot \varphi}{g} \cdot \left( \frac{a_4 \cdot \operatorname{ctg} \beta_1}{a_6} \right)^2$$

**Деформация графика**

Квадратный трехчлен

$$y = ax^2 + bx + c$$

Выделение точного квадрата

$$y = a \cdot (x + \alpha)^2 + \beta$$

$$\alpha = \frac{b}{2a}; \beta = -\frac{b^2 - 4ac}{4a}$$

Коэффициенты деформации

$i$  - по ординате;

$i_1$  - по абсциссе

Окончательное уравнение (прямое)

$$y = i \cdot \left[ a \cdot (i_1 \cdot x + \alpha)^2 + \beta \right]$$

Обратная функция

$$x = \frac{1}{i_1} \cdot \left( \sqrt{\frac{y - i \cdot \beta}{i \cdot a}} - \alpha \right)$$

Основное уравнение высоты напора, Па

$$H_x = \rho \cdot g \cdot (k_1 \cdot n^2 + 2 \cdot k_2 \cdot n \cdot V_x - k_3 \cdot V_x^2)$$

$$H_x = -\rho \cdot g \cdot k_3 \cdot V_x^2 + 2 \cdot \rho \cdot g \cdot k_2 \cdot n \cdot V_x + \rho \cdot g \cdot k_1 \cdot n^2$$

Квадратный трехчлен

$$H_x = -a \cdot V_x^2 + b \cdot V_x + c$$

$$a = \rho \cdot g \cdot k_3$$

$$b = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot k_2 \cdot n$$

$$c = \rho \cdot g \cdot k_1 \cdot n^2$$

Приведенное уравнение

$$H_x = a \cdot (V_x + \alpha)^2 + \beta$$

$$\alpha = \frac{b}{2a}$$

$$\beta = \frac{b^2 - 4ac}{4a}$$

Уравнение с коэффициентами

деформации, Па

$$H_x = i \cdot \left[ a \cdot (i_1 \cdot V_x + \alpha)^2 + \beta \right]$$

Обратное уравнение, м<sup>3</sup>/с

для нисходящей ветви параболы ВР-86-77-

$$V_x = \frac{1}{i_1} \cdot \left( \sqrt{\frac{H_x - i \cdot \beta}{i \cdot a}} - \alpha \right)$$

для восходящей ветви параболы ВР-300-45-

$$V_x = \frac{1}{i_1} \cdot \left( -1 \cdot \sqrt{\frac{H_x - i \cdot \beta}{i \cdot a}} - \alpha \right)$$

В результате мы получаем полноценные уравнения напорной характеристики для **любого** центробежного вентилятора, на рабочем участке.

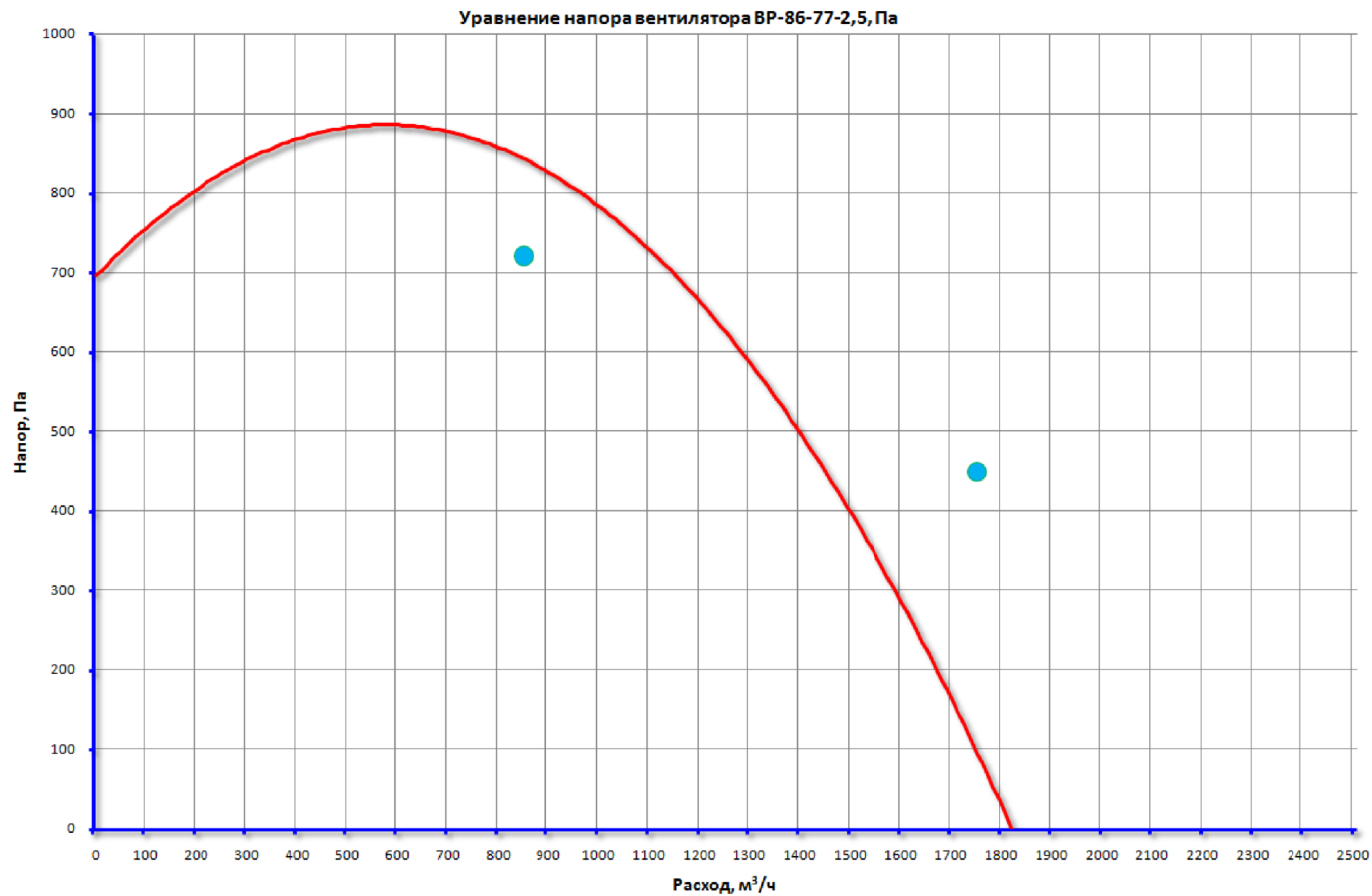


Рисунок 3

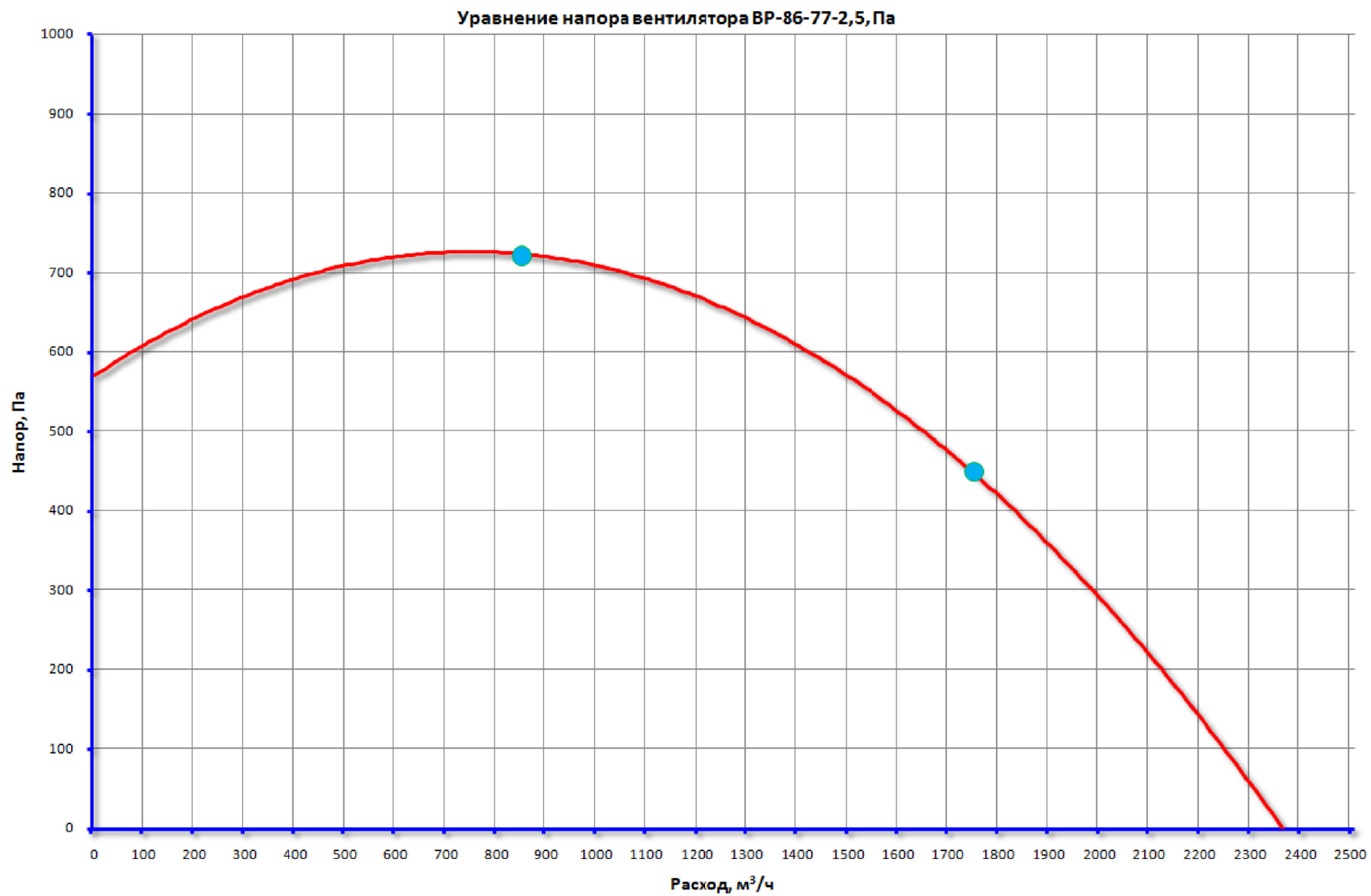


Рисунок 4



#### 8. Влияние местоположения.

На рисунке 5 показана характеристика вентилятора ВР-86-77-2,5 расположенном на высоте 1600 м над уровнем моря. На рисунке 6 характеристика вентилятора ВР-86-77-2,5 расположенном в шахте на глубине 1500 м под уровнем моря.

#### 9. Примеры расчета.

Для каждого вентилятора создается файл расчета, емкость файла составляет 300...400 килобайт. Блок-схема представляет прямолинейную цепочку формул, без условий и переходов. Файл состоит из нескольких листов, все управление расчетом располагается на листе "Управление". На лист выведены неопределенные переменные: угол  $\alpha_1$ , коэффициент смягчения удара, коэффициент кривизны лопастей и два коэффициента деформации. Изменяя вручную эти коэффициенты получаем прямое уравнение вентилятора. Затем имея прямое уравнение находим обратное уравнение вентилятора. Далее приведены скриншоты файла вентилятора ВР-86-77-2,5 с лопатками загнутыми назад и вентилятора ВР-300-45-2 с лопатками загнутыми вперед.

Угол $\alpha_1$	88	50°...90°
Коэф. смягчения удара	0,40	0,4...0,7
Коэф. кривизны лопастей $\varphi$	1,64	
Коэф. деформации	0,82	i
Коэф. деформации	0,78	i1
Темп. воздуха нар. на уровне моря, °C	20	tym
Темп. воздуха на уровне объекта, °C	10,4	tn
Влажность воздуха, фп, %	50	fin
Высота расположения объекта hоб, м	1600	hob
По каталогу		
Коэф. полного давления, $\psi$	1,67	
Расчет $\psi_{max}$	1,09	
Расчет $\psi_{min}$	0,68	

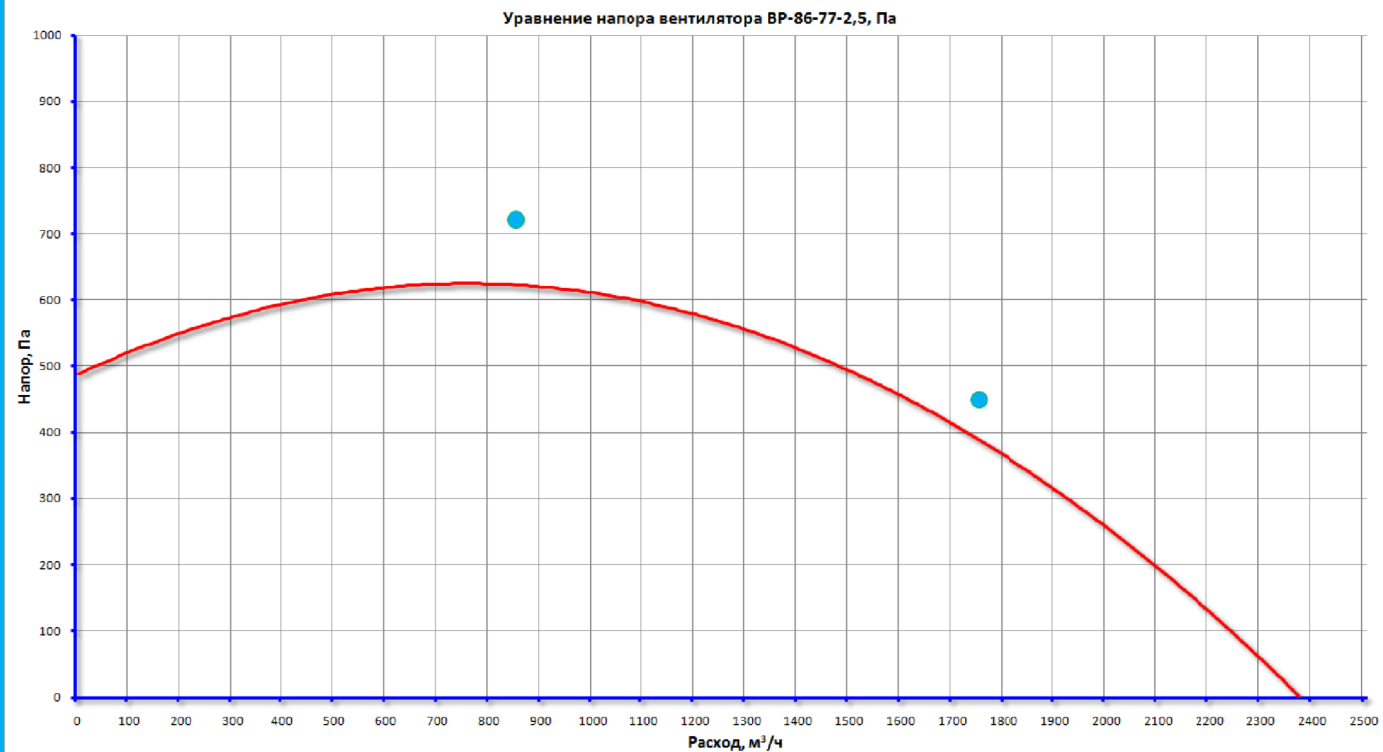


Рисунок 5

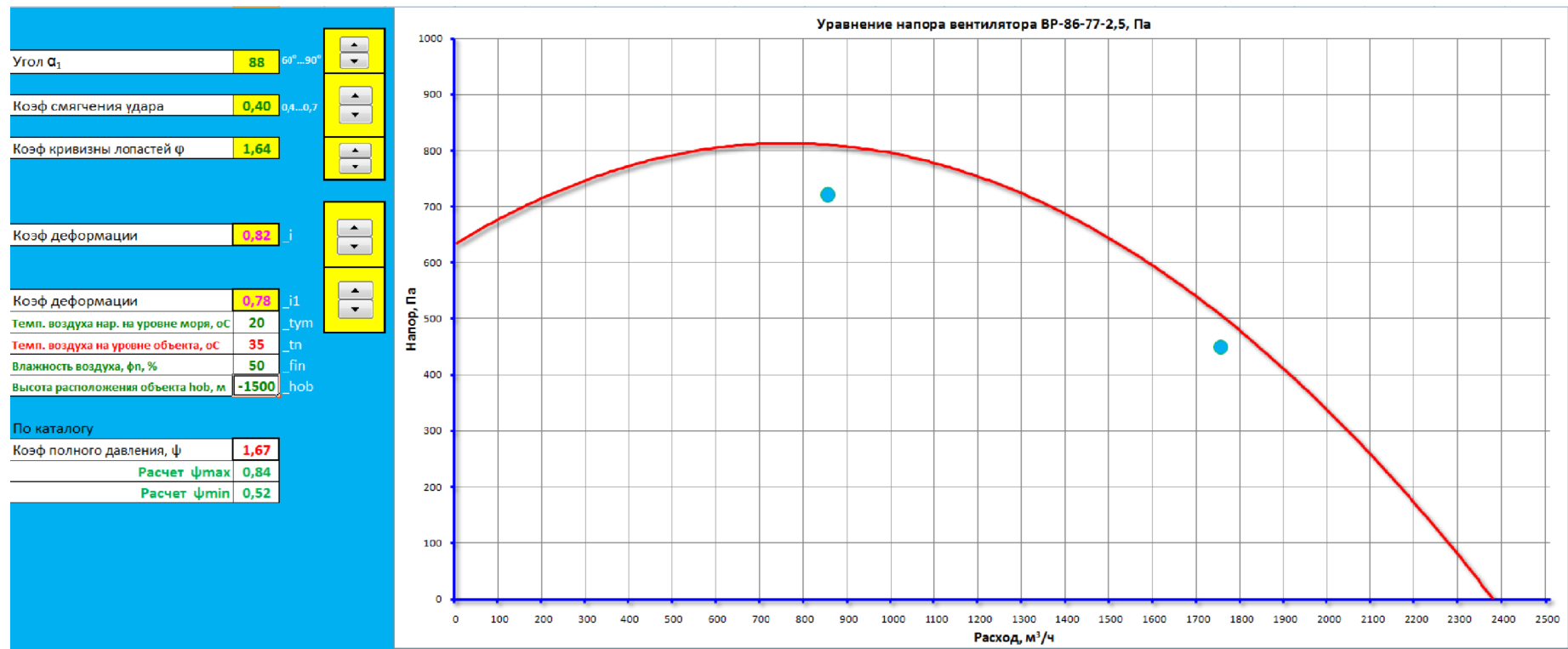


Рисунок 6

<b>Внешние условия, мощность</b>	
<b>Константы</b>	
Температура Кельвина при 0°C	273,15
Молекулярная масса воздуха, кг/(кмоль)	28,96
Молекулярная масса воды, кг/(кмоль)	18,02
Универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль.К)	8314,3
Газовая постоянная воздуха, Дж/(кг°C)	287,1
Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	9,81
<b>Переменные</b>	
Темп. воздуха нар. на уровне моря, оС	20
Влажность воздуха, фп, %	50
Высота расположения объекта hоб, м	0
Барометрическое давление на уровне моря, мм.рт.ст.	760
<b>Счет</b>	
Давление на уровне моря, Па	101325
Барометрическое давление на высоте hоб, мм.рт.ст.	760
Барометрическое давление на высоте hоб, Па	101325
Влагосодержание влажного воздуха на лин насыщ, г/кг	14,74
Влагосодержание воздуха при фп, %, г/кг	7,37
Парциальное давление воздуха, Па	2322
Плотность сух воздуха на уровне моря, кг/м <sup>3</sup>	1,20
Плотность сухого воздуха на высоте hоб, кг/м <sup>3</sup>	1,20
Плотность влажного воздуха на высоте hоб, кг/м <sup>3</sup>	1,19
<b>Быстроходность</b>	
Быстроходность	133
<b>Гидравлический КПД</b>	<b>0,90</b>
Объемный КПД	0,97
Механический КПД	0,96
КПД насоса	0,84
Мощность насоса, кВт	0,24

<b>ВР-86-77-2,5</b>	
<b>Исходные</b>	
Число лопастей	13
Толщина лопасти, мм	1,5
Диаметр внутренний $D_1$ , м	0,185
Диаметр внешний $D_2$ , м	0,250
Угол входа лопасти $\beta_1$	16,0
Угол выхода лопасти $\beta_2$	44,7
Ширина лопасти на входе $e_1$ , м	0,088
Ширина лопасти на выходе $e_2$ , м	0,063
Угол между абсолют и переносной $\alpha_1$	88
Обороты колеса, об/мин	2750
Коеф. смягчения удара	0,4
<b>Счет</b>	
Шаг лопастей на входе, м	0,045
Толщина лопасти на входе, м	0,0054
Коеффициент стеснения на входе	1,14
Шаг лопастей на выходе, м	0,060
Толщина лопасти на выходе, м	0,0021
Коеффициент стеснения на выходе	1,04
Частота вращения $\omega$ , 1/с	288
<b>Вход потока</b>	
Окружная скорость входа $(u_1)$ , м/с	26,64
Абсолютная скорость входа $(c_1)$ , м/с	7,57
Радиальная составляющая входа $(c_{1r})$ , м/с	7,56
Подача вентилятора, м <sup>3</sup> /ч	732
Скорость на всасывании перед колесом $(c_2)$ , м/с	7,56
Относительная скорость входа $(w_1)$ , м/с	27,44
Угол атаки между потоком и углом $\beta_1$	0,15
<b>Выход потока</b>	
Окружная скорость выхода $(u_2)$ , м/с	36,0
Радиальная составляющая выхода $(c_{2r})$ , м/с	5,6
Относительная скорость выхода $(w_2)$ , м/с	8,0
Абсолютная скорость выхода $(c_2)$ , м/с	30,9
Угол между абсолют и переносной $\alpha_2$	10,5
Окружная составляющая $(c_{2u})$ , м/с	30,3
Радиальная составляющая выхода $(c_{3r})$ , м/с	5,4
Угол $\beta_2$	43,7
Теоретический напор, м	111
Коеффициент кривизны лопастей $\Phi$	1,64
Коеффициент конечного числа лопастей "р"	0,56
Теоретический напор с лопастями, м	71
<b>Построение характеристики вентилятора</b>	
Угол входа в спиральный корпус $\alpha_3$	10,1
Периметр $a_1$	2,79E-04
Периметр $a_2$	1,56
Периметр $a_3$	9,76
Периметр $a_4$	0,88
Периметр $a_5$	0,096
Периметр $a_6$	0,051
Периметр $a_7$	0,049
Коеффициент уравнения K1	7,86E-06
Коеффициент уравнения K2	0,037
Коеффициент уравнения K3	619
<b>Деформация графика</b>	
Коеффициент уравнения A	-7246,8
Коеффициент уравнения B	2375,4
Коеффициент уравнения C	696,2
Альфа	-0,164
Бетта	890,9

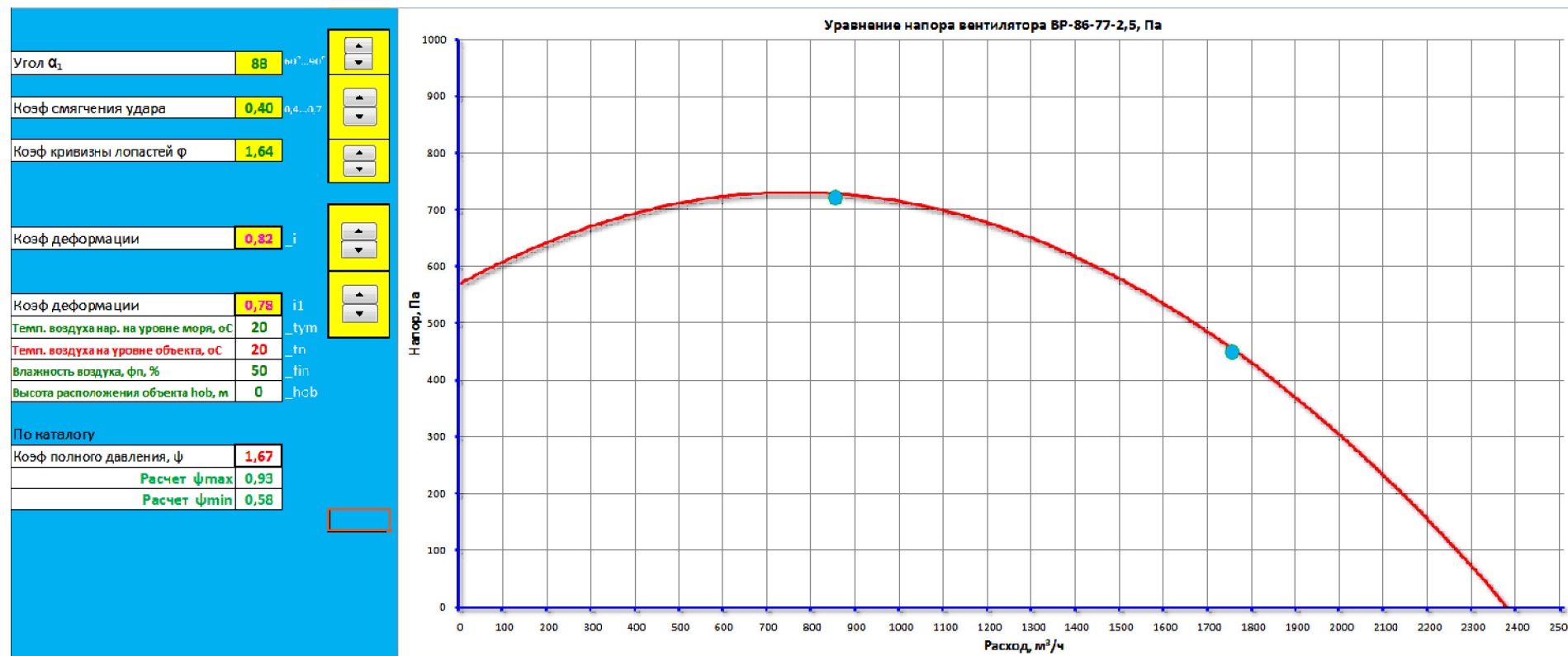


Рисунок 7

График мощности вентилятора ВР-86-77-2,5, кВт

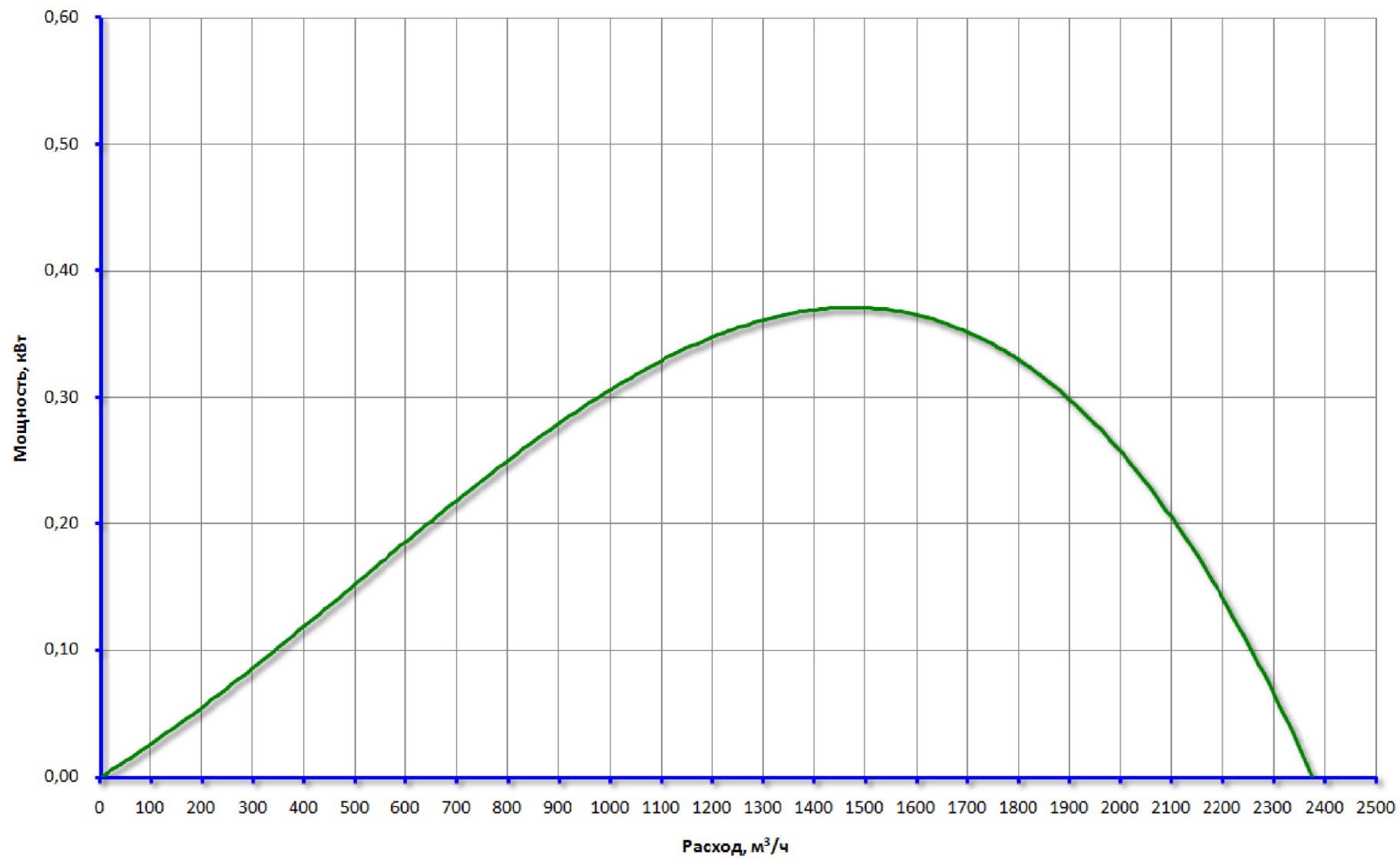


Рисунок 8

Обратная функция вентилятора ВР-86-77-2,5

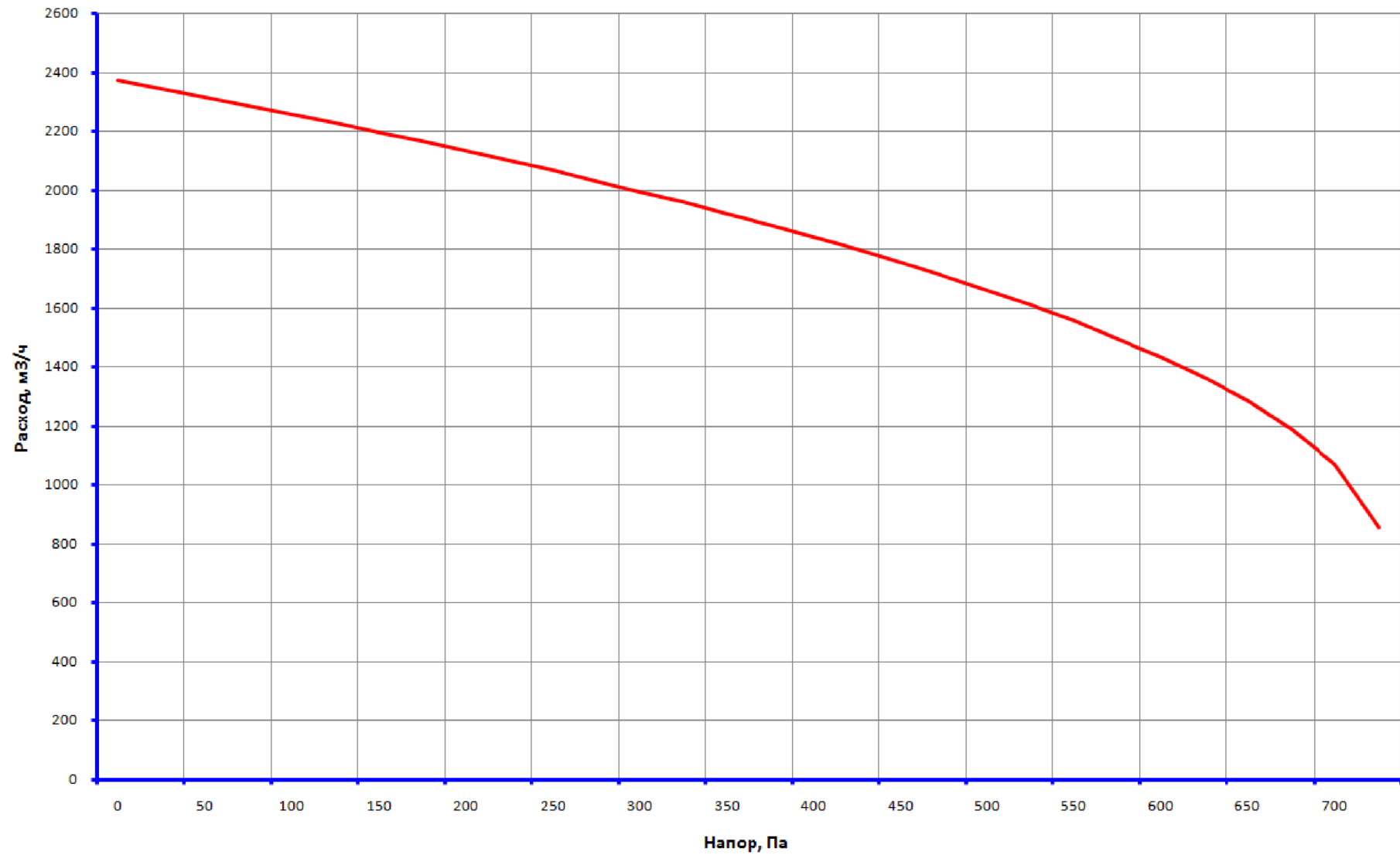


Рисунок 9



Внешние условия, мощность	
Константы	
Температура Кельвина при 0°С	273,15
Молекулярная масса воздуха, кг/(кмоль)	28,96
Молекулярная масса воды, кг/(кмоль)	18,02
Универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль.К)	8314,3
Газовая постоянная воздуха, Дж/(кг°С)	287,1
Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	9,81
Переменные	
Темп. воздуха нар. на уровне моря, оС	20
Влажность воздуха, фп, %	50
Высота расположения объекта hоб, м	0
Барометрическое давление на уровне моря, мм.рт.ст.	760
Счет	
Давление на уровне моря, Па	101325
Барометрическое давление на высоте hоб, мм.рт.ст.	760
Барометрическое давление на высоте hоб, Па	101325
Влагосодержание влажного воздуха на лин насыщ, г/кг	14,74
Влагосодержание воздуха при фп, %, г/кг	7,37
Парциальное давление воздуха, Па	2322
Плотность сух воздуха на уровне моря, кг/м <sup>3</sup>	1,20
Плотность сухого воздуха на высоте hоб, кг/м <sup>3</sup>	1,20
Плотность влажного воздуха на высоте hоб, кг/м <sup>3</sup>	1,19
Быстроходность	289
Гидравлический КПД	0,89
Объемный КПД	0,98
Механический КПД	0,99
КПД насоса	0,87
Мощность насоса, кВт	0,28

Лопатки загнутые вперед, $\beta_1 = 90$	
BP-300-45-2	
Исходные	
Число лопастей	34
Толщина лопасти, мм	1,5
Диаметр внутренний $D_1$ , м	0,160
Диаметр внешний $D_2$ , м	0,200
Угол входа лопасти $\beta_1$	90
Угол выхода лопасти $\beta_2$	135
Ширина лопасти на входе $e_1$ , м	0,100
Ширина лопасти на выходе $e_2$ , м	0,100
Угол между абсолют и переносной $\alpha_1$	33
Обороты колеса, об/мин	2850
Кэф смягчения удара	0,49
Счет	
Шаг лопастей на входе, м	0,015
Толщина лопасти на входе, м	0,0015
Коэффициент стеснения на входе	1,11
Шаг лопастей на выходе, м	0,018
Толщина лопасти на выходе, м	0,0021
Коэффициент стеснения на выходе	1,13
Частота вращения $\omega$ , 1/с	298
Вход потока	
Окружная скорость входа ( $u_1$ ), м/с	23,88
Абсолютная скорость входа ( $c_1$ ), м/с	28,47
Радиальная составляющая входа ( $c_{1r}$ ), м/с	15,51
Подача вентилятора, м <sup>3</sup> /ч	1122
Скорость на всасывании перед колесом ( $c_2$ ), м/с	15,51
Относительная скорость входа ( $w_1$ ), м/с	15,51
Угол атаки между потоком и углом $\beta_1$	57,00
Выход потока	
Окружная скорость выхода ( $u_2$ ), м/с	29,8
Радиальная составляющая выхода ( $c_{2r}$ ), м/с	12,4
Относительная скорость выхода ( $w_2$ ), м/с	17,5
Абсолютная скорость выхода ( $c_2$ ), м/с	44,0
Угол между абсолют и переносной $\alpha_2$	16,4
Окружная составляющая ( $c_{2u}$ ), м/с	42,2
Радиальная составляющая выхода ( $c_{2r}$ ), м/с	11,0
Угол $\beta_2$	-41,5
Теоретический напор, м	70
Коэффициент кривизны лопастей $\phi$	1,78
Коэффициент конечного числа лопастей "p"	0,29
Теоретический напор с лопастями, м	55
Построение характеристики вентилятора	
Угол входа в спиральный корпус $\alpha_2$	14,6
Параметр $a_1$	2,79E-04
Параметр $a_2$	1,29
Параметр $a_3$	3,96
Параметр $a_4$	0,90
Параметр $a_5$	0,109
Параметр $a_6$	0,050
Параметр $a_7$	0,063
Коэффициент уравнения K1	5,27E-06
Коэффициент уравнения K2	0,019
Коэффициент уравнения K3	103
Деформация графика	
Коэффициент уравнения A	-1201,7
Коэффициент уравнения B	1292,9
Коэффициент уравнения C	500,8
Альфа	-0,538
Бета	848,6

Угол $\alpha_1$	33	30°...90°
Коэф смягчения удара	0,49	0,4...0,7
Коэф кривизны лопастей $\phi$	1,78	
Коэф деформации	1,48	$\lambda_i$
Коэф деформации	1,00	$\lambda_{i1}$
Темп. воздуха нар. на уровне моря, оС	20	$t_{um}$
Темп. воздуха на уровне объекта, оС	20	$t_n$
Влажность воздуха, фп, %	50	$\phi_n$
Высота расположения объекта $h_{ob}$ , м	0	$h_{ob}$
Коэф полного давления, $\psi$	1,55	
$\psi_{max}$	2,35	
$\psi_{min}$	2,26	

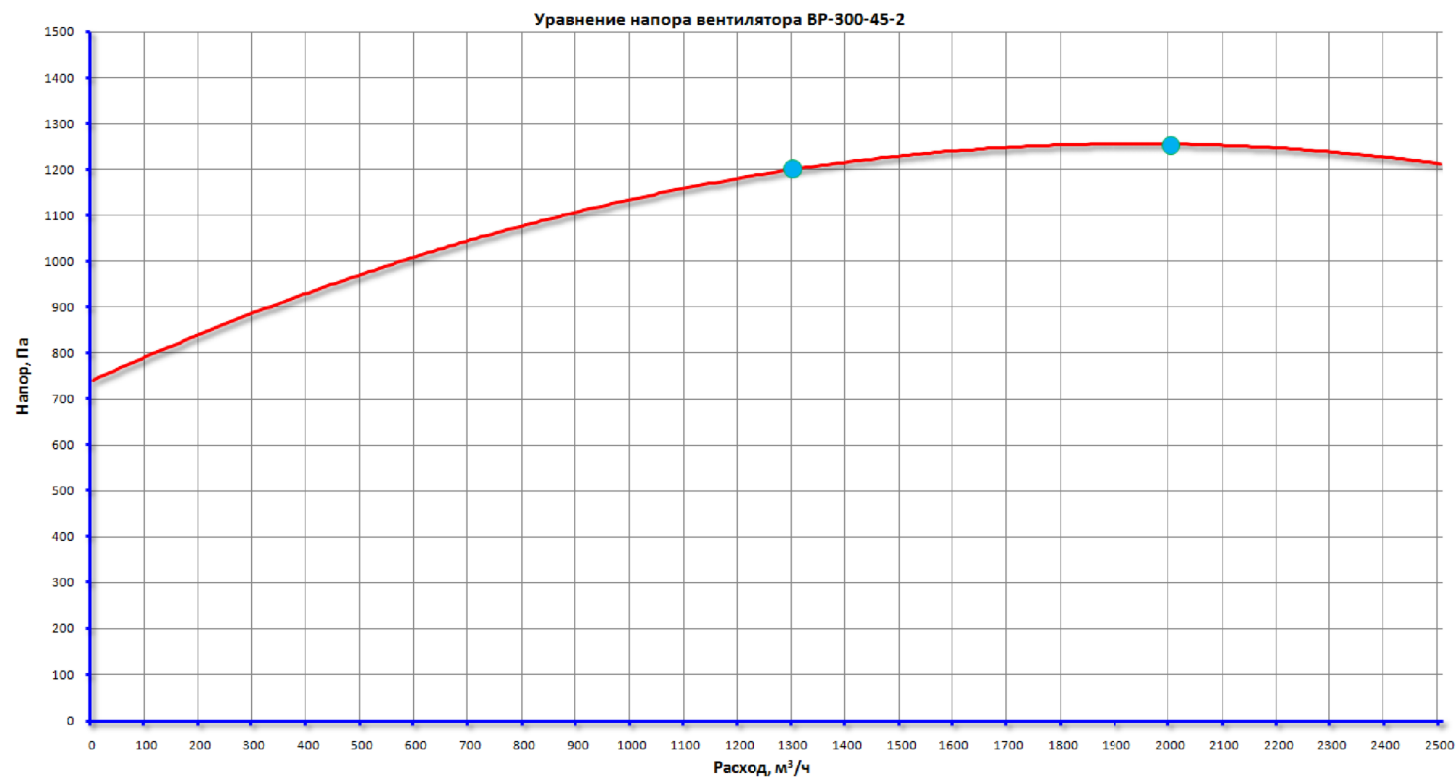


Рисунок 10

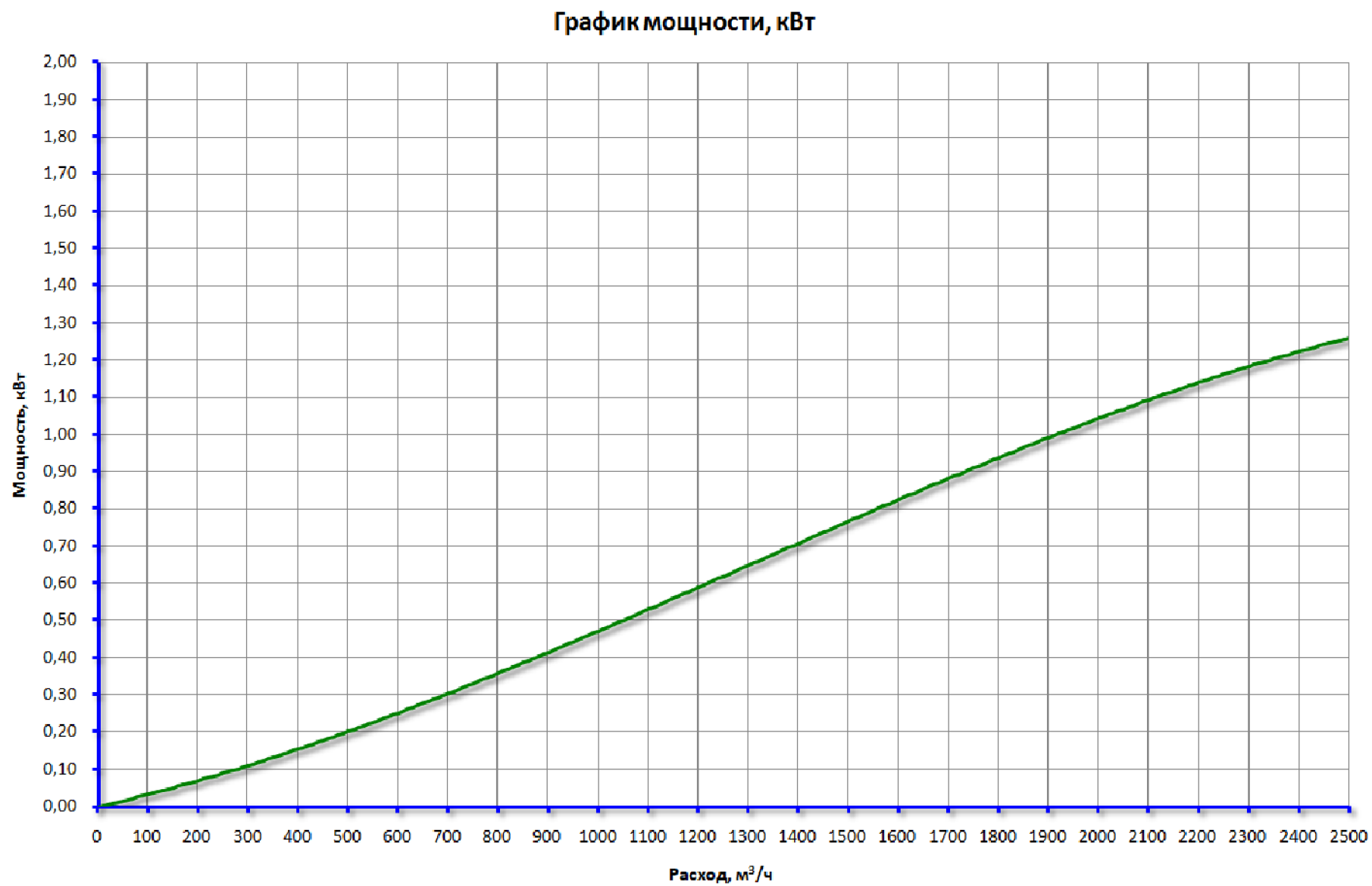


Рисунок 11

Обратная функция вентилятора ВР 300-45-2

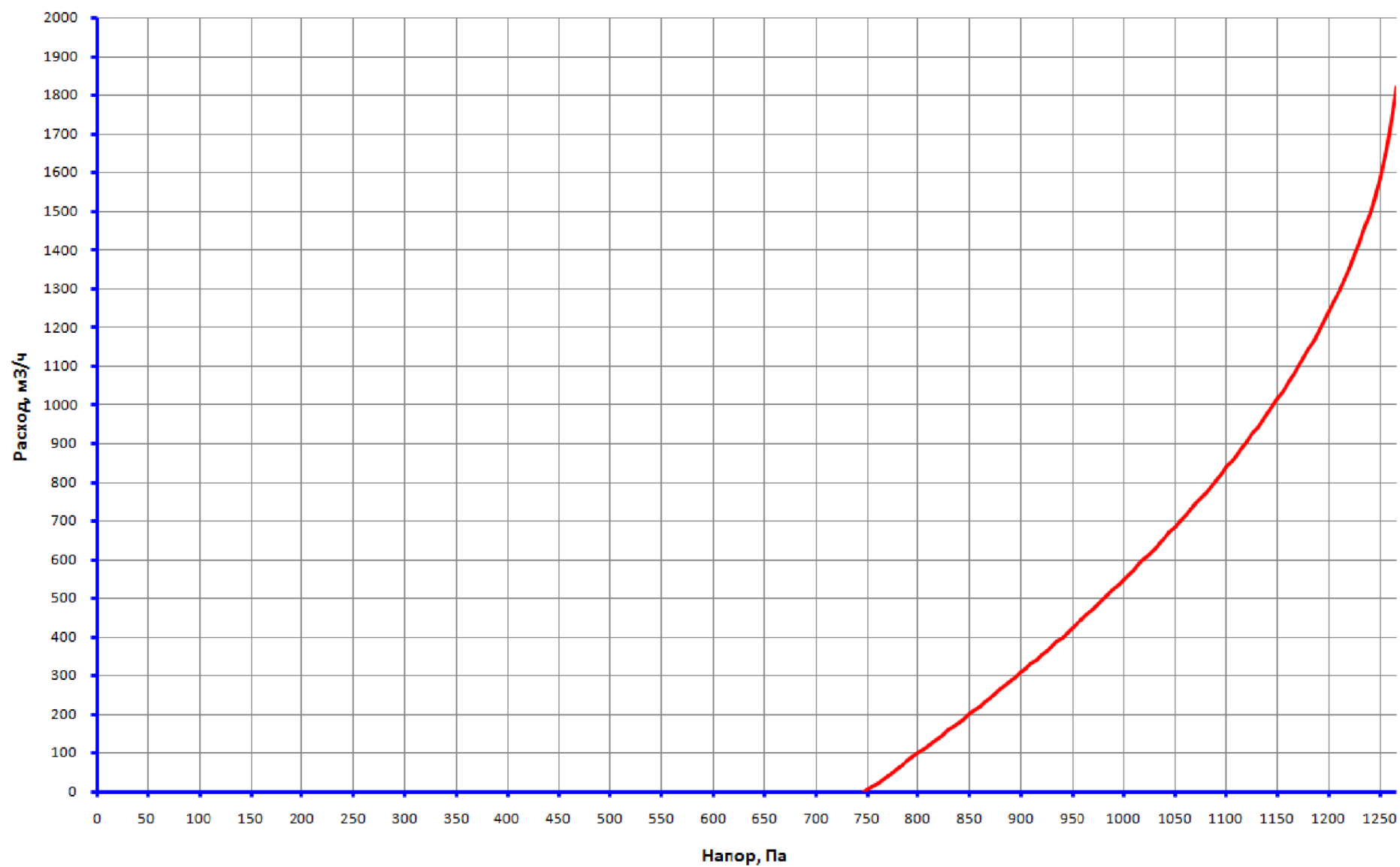
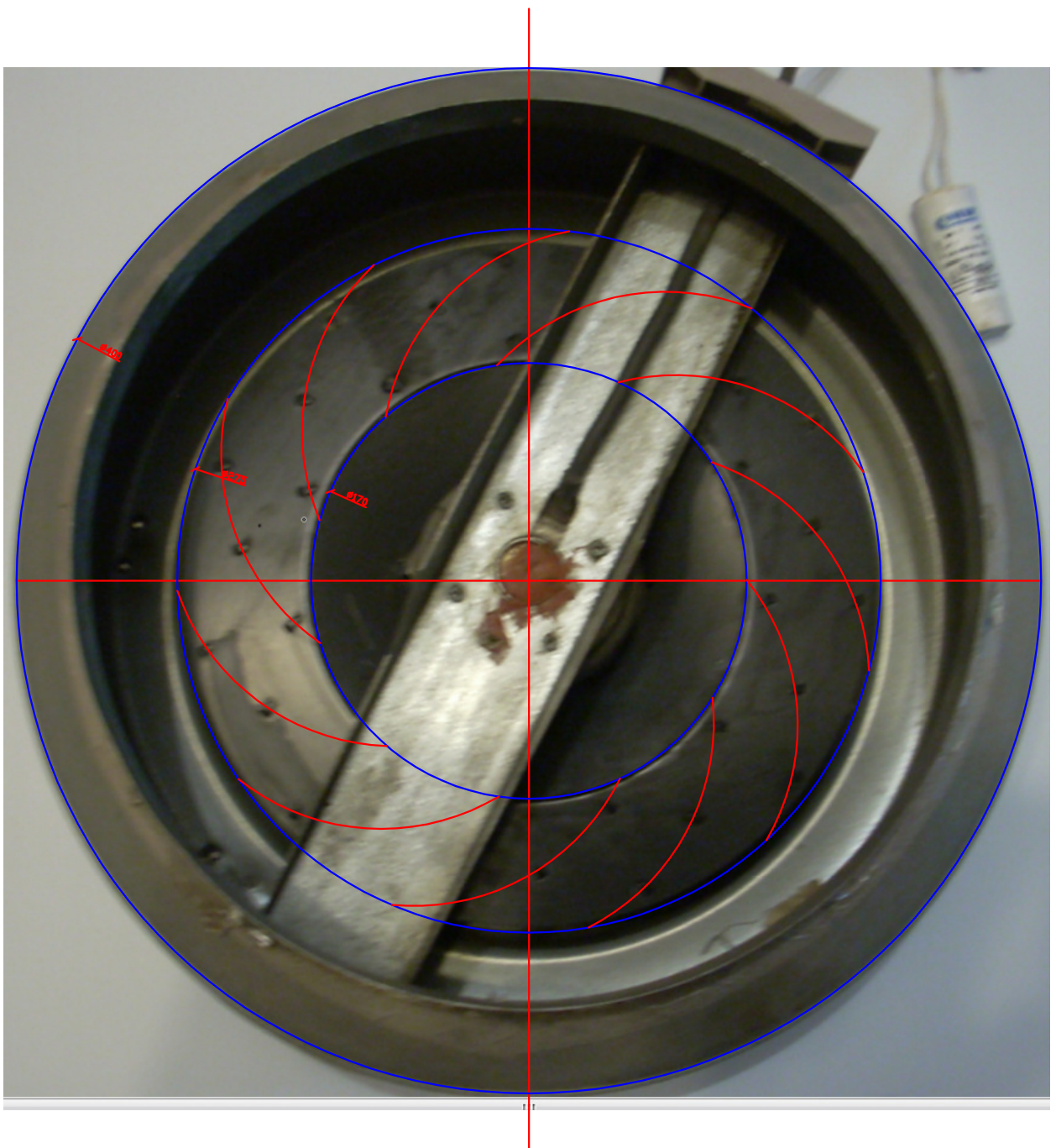


Рисунок 12

## 10. Прямые и обратные уравнения канального вентилятора КЗ15Л.

У вентилятора снять часть корпуса, измерить: диаметры колеса, ширину и толщину лопатки, сделать фото, и по фото вычислить углы лопатки.

Рабочее колесо имеет 11 лопаток загнутых назад;  
мощность вентилятора - 0,32 кВт;  
обороты - 2318 об/мин;  
диаметр входа - 0,17 м;  
диаметр выхода - 0,275 м;  
ширина лопатки - 0,05 м;  
угол входа лопатки -  $40^\circ$ ;  
угол выхода лопатки -  $20^\circ$ .



## Вычисление углов лопатки вентилятора K315L.

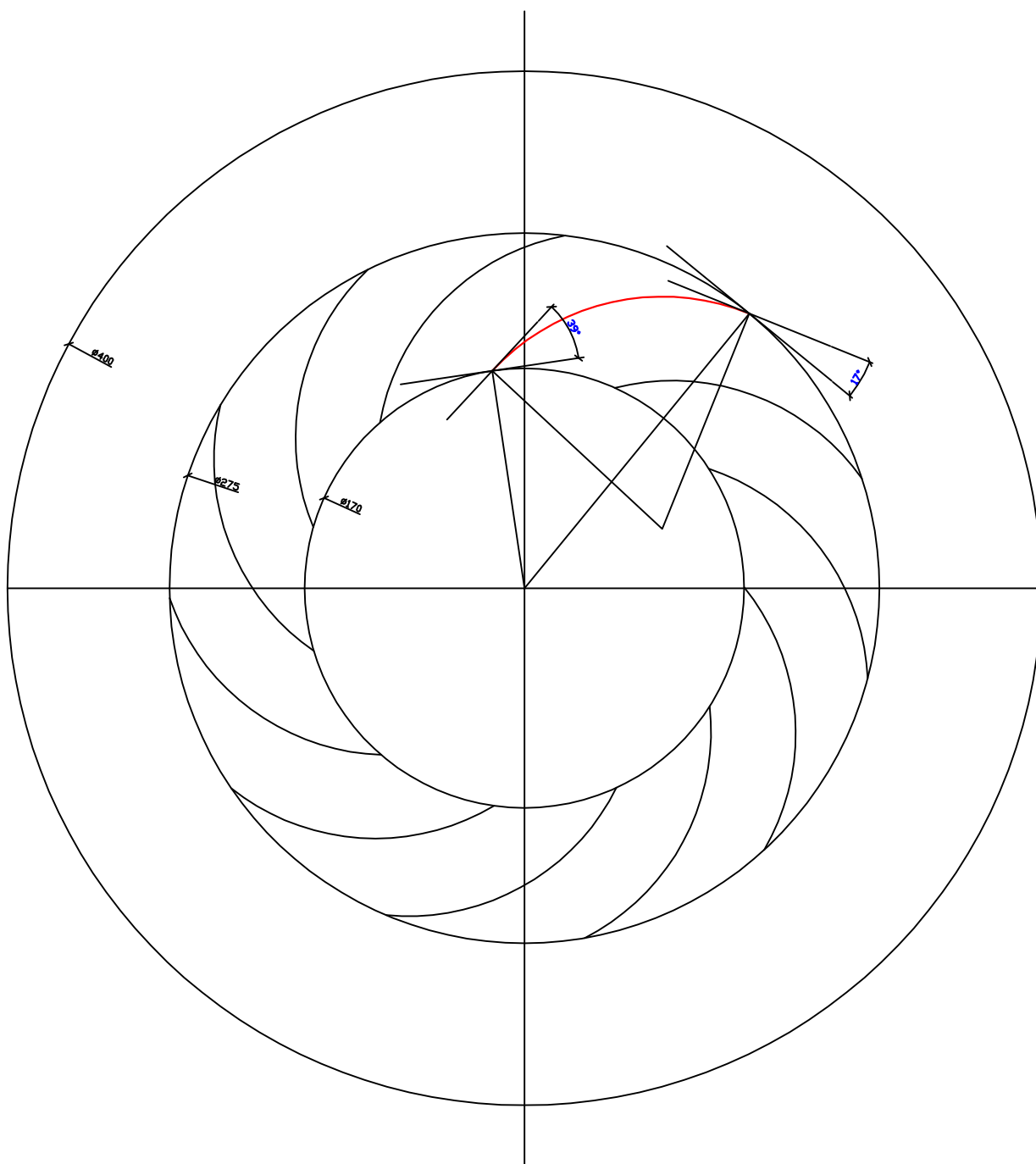


Рисунок 13

Угол $\alpha_1$	90	60°...90°
Коэф смягчения $\gamma$	0,30	0,4...0,7
Коэф кривизны лоп	1,08	
Коэф деформаци	0,84	i
Коэф деформаци	1,30	i1
Температура воздуха наружная, оС	20	tn
Влажность воздуха, фп, %	50	fin
Высота расположения объекта hob, м	0	hob
Коэф полного давления	0,89	
Расчет $\psi_{max}$	0,66	
Расчет $\psi_{min}$	0,15	

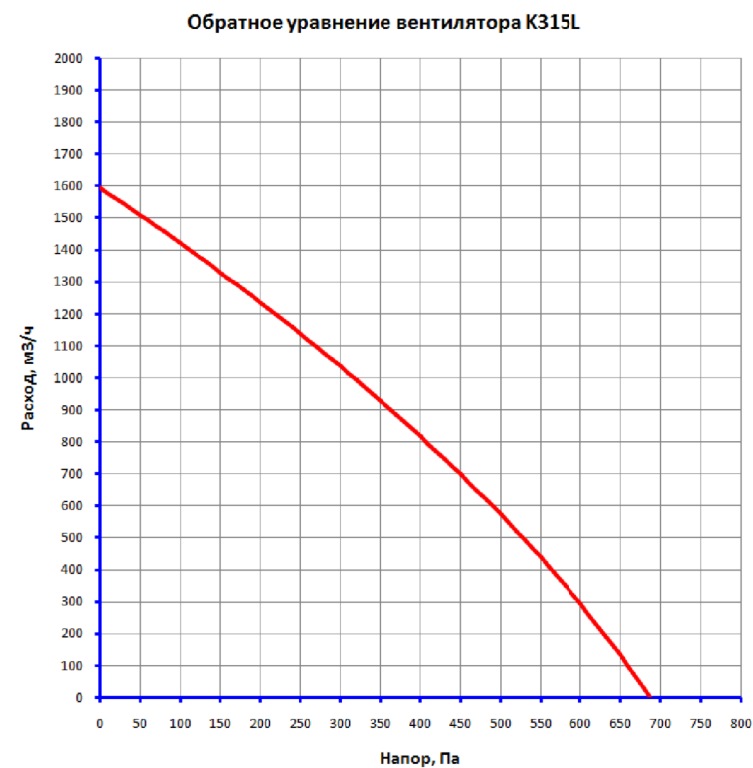
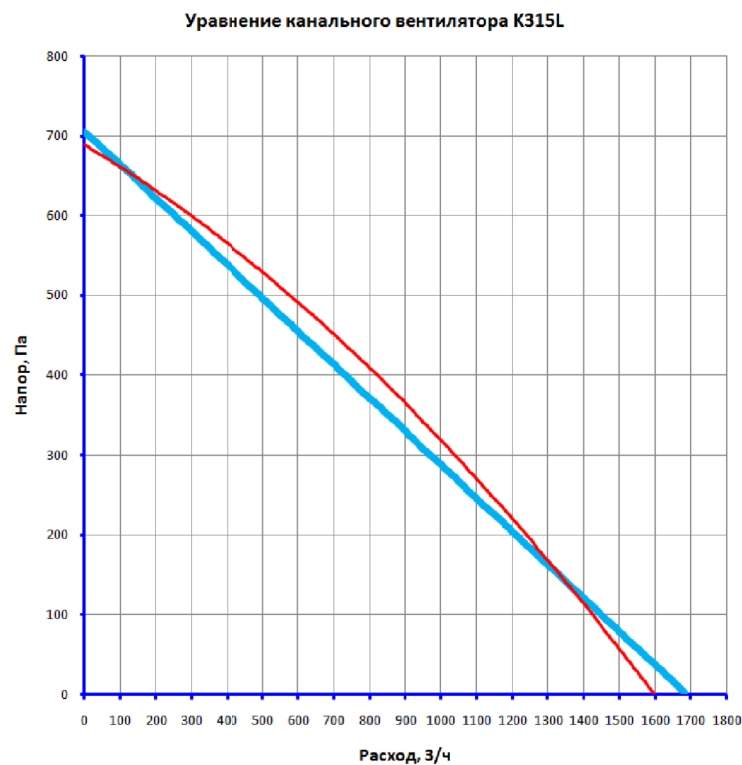


Рисунок 14



К315L:

$t = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{\text{бар}} = 760 \text{ мм.рт.ст}$ ;  $\varphi = 50\%$ .

Прямое уравнение

с коэффициентами деформации, Па

$$H_x = i \cdot \left[ a \cdot (i_1 \cdot V_x + \alpha)^2 + \beta \right]$$

Обратное уравнение, м<sup>3</sup>/ч

$$V_x = 3600 \cdot \frac{1}{i_1} \cdot \left( \sqrt{\frac{H_x - i \cdot \beta}{i \cdot a}} - \alpha \right)$$

## 11. Проверка метода получения напорной характеристики .

Для проверки метода получения напорной характеристики использованы два канальных вентилятора ВК 100Б, фирмы ООО "АерВан", отечественного производства. С вентиляторов были сняты напорные характеристики и построена напорная характеристика изложенным методом.

## Технические данные вентилятора .

Для испытаний применяются два канальных вентилятора марки ВК 100Б

Вентиляторы предназначены для перемещения чистого сухого воздуха при температуре окружающей среды  $-15^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$ , применяются в системах вентиляции .

Вентилятор может быть установлен в любом положении .

Корпус вентилятора выполнен из оцинкованной стали .

Рабочее колесо выполнено с загнутыми назад лопатками .

Электродвигатель с внешним ротором , однофазный, напряжение 220 В.

Для измерения давлений применяется отечественный дифференциальный полупроводниковый манометр с цифровой индикацией МД 1-2000.

Изготовитель НПП "Инновент". Диапазон измеряемых давлений, Па:  $-600 \dots +2000$ ;

Рабочий диапазон температур,  $^{\circ}\text{C}$ :  $0 \dots +80$ .

В комплект входит приемник воздушного давления (трубка Пито) типа ЦАГИ-ВЦННИОТ (ГОСТ 12.3018-78). Для измерений было изготовлено два коллектора ЦАГИ  $d = 100$  мм, из пластика. Для каждого коллектора составлена функция определения скорости потока. Функция вычислена на основании непосредственных измерений по сетке (60 точек), комбинированным насадком ВЦННИОТ. Расход изменялся пятиступенчатым регулятором частоты вращения VRTE 1.5. Проведено 3 серии по 5 измерений (всего измерено 450 точек). Затем произведена аппроксимация по методу наименьших квадратов и найдена функция коллектора. На рисунке 15 представлена схема установки для снятия характеристики канального вентилятора ВК 100Б, ниже приложено фото.

Рабочее колесо имеет 16 лопаток загнутых назад;

мощность вентилятора - 0,08 кВт;

обороты - 2460 об/мин;

диаметр входа - 0,115 м;

диаметр выхода - 0,185 м;

ширина лопатки - 0,045 м;

угол входа лопатки -  $60^{\circ}$ ;

угол выхода лопатки -  $25^{\circ}$ .

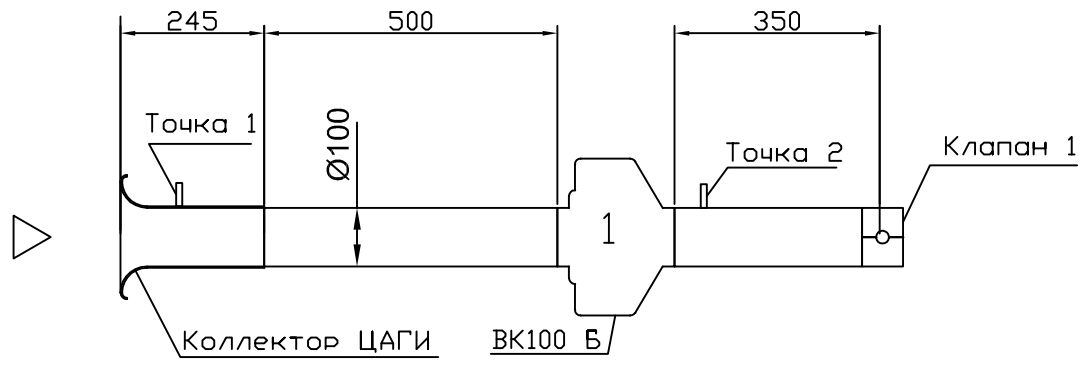


Рисунок 15



Обратная функция вентилятора №1

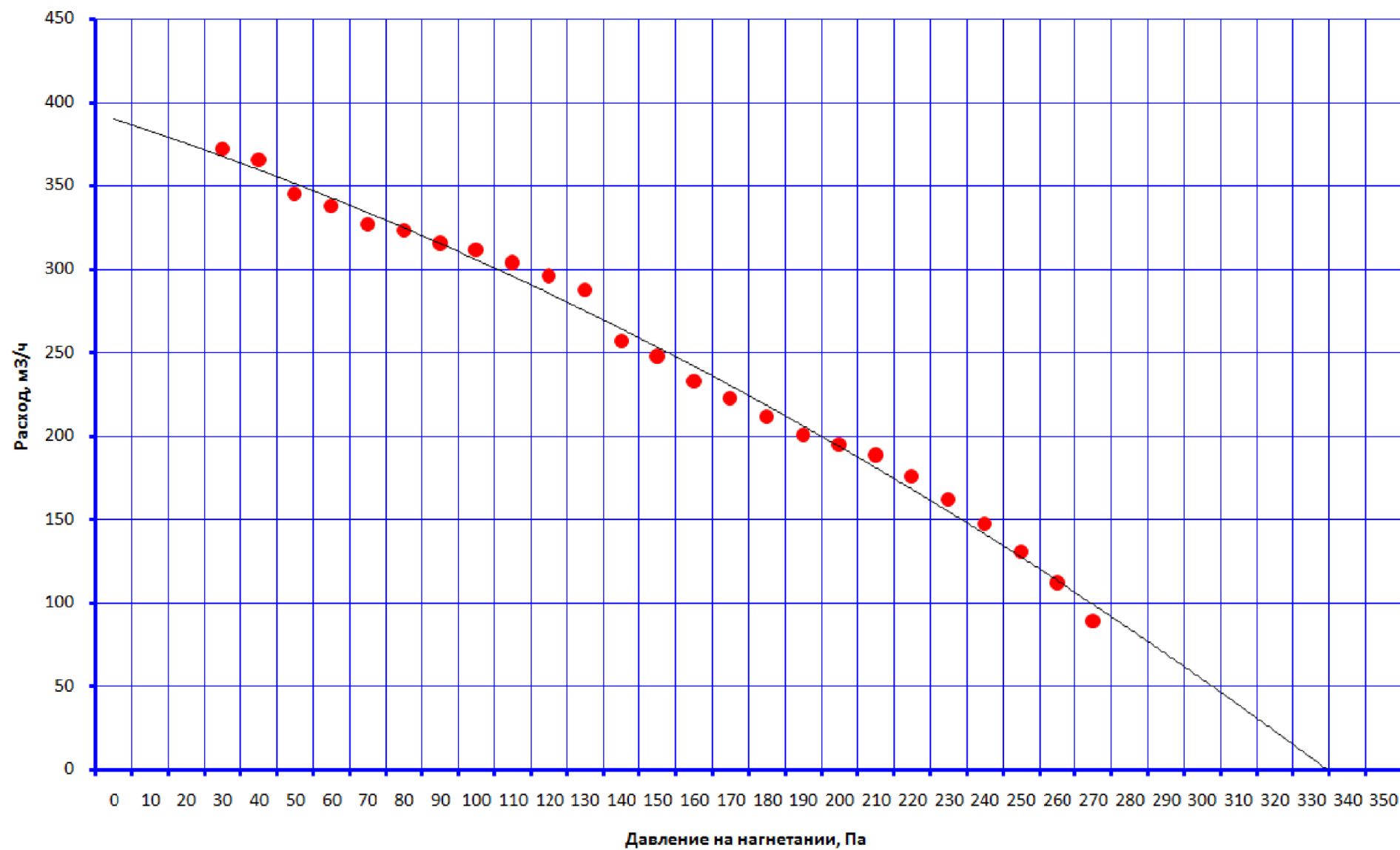


Рисунок 16

## Обратная функция вентилятора №2

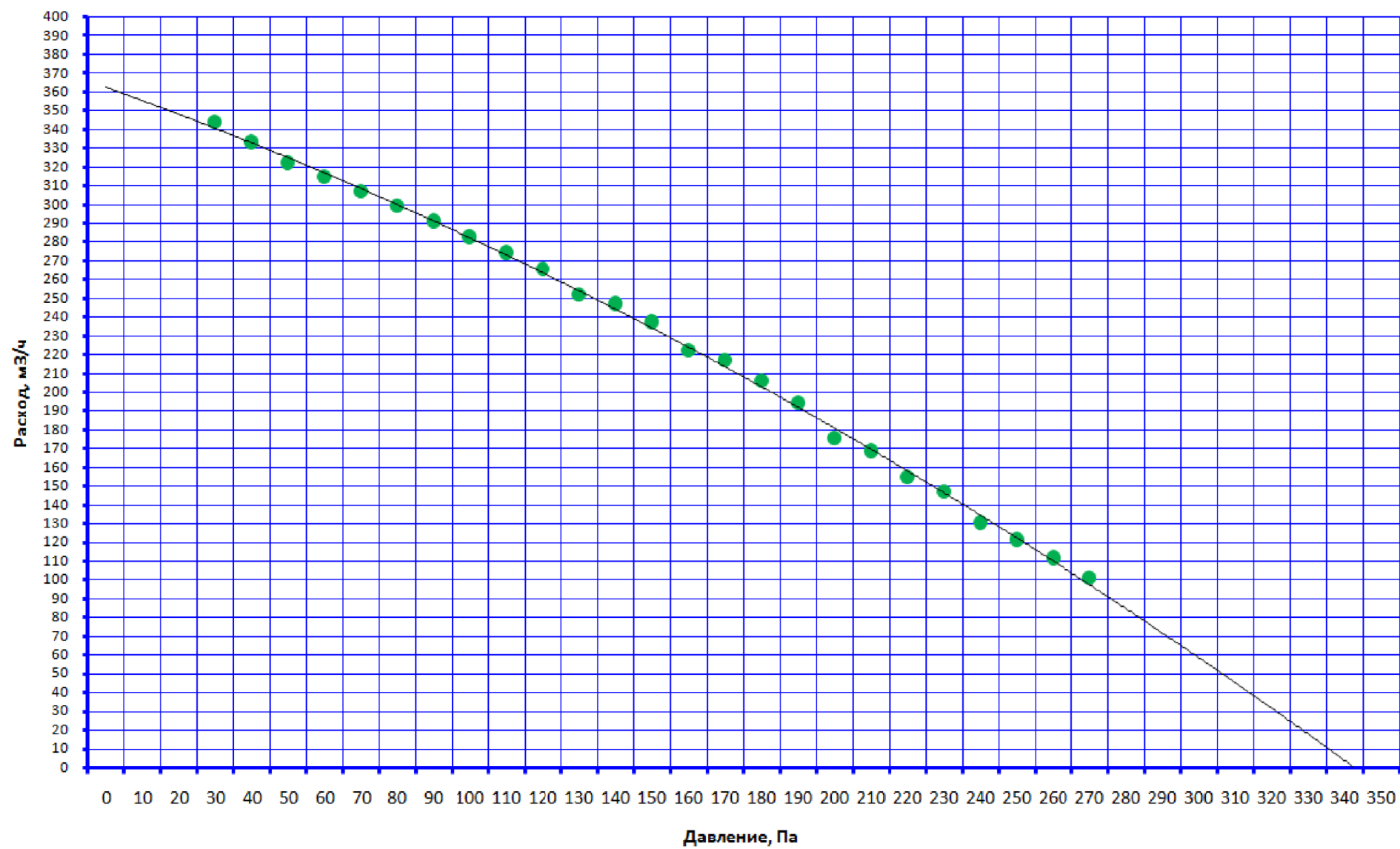


Рисунок 17

Угол $\alpha_1$	75	60°...90°	
Коэф смягчения $\gamma$	0,50	0,4...0,7	
Коэф кривизны лоп	0,97		
Коэф деформаци	0,87	i	
Коэф деформаци	2,91	i1	
Температура воздуха наружная, оС	20	tn	
Влажность воздуха, фп, %	50	fin	
Высота расположения объекта hob, м	0	hob	
По каталогу			
Коэф полного давл	0,89		
Расчет $\psi_{max}$	0,91		
Расчет $\psi_{min}$	0,15		

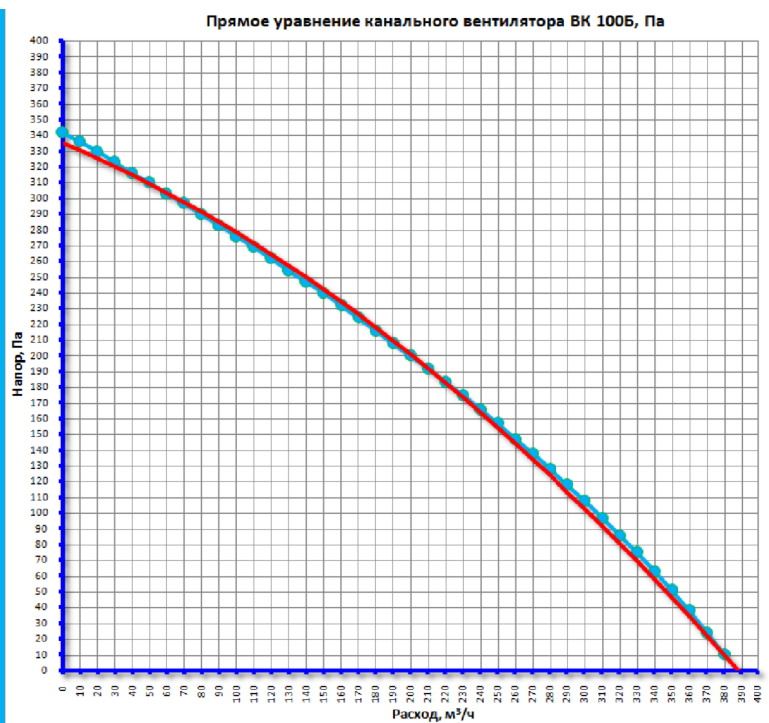


Рисунок 18

ВК 100Б:

$t = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $P_{\text{бар}} = 760 \text{ мм.рт.ст}$ ;  $\varphi = 50\%$ .

Прямое уравнение

с коэффициентами деформации, Па

$$H_x = i \cdot \left[ a \cdot (i_1 \cdot V_x + \alpha)^2 + \beta \right]$$

Обратное уравнение,  $\text{м}^3/\text{ч}$

$$V_x = 3600 \cdot \frac{1}{i_1} \cdot \left( \sqrt{\frac{H_x - i \cdot \beta}{i \cdot a}} - \alpha \right)$$

Результаты представлены на рисунках 16, 17, 18. Очевидно расчетная кривая точно ложится на опытную. Но в отличии от опытной характеристики, расчетная кривая - "живая", она передвигается по координатному полю в зависимости от внешних условий !

## 12. Ряд вентиляторов.

Из всего многообразия вентиляторов я составил ограничительный ряд (1998 год), для собственного использования при проектировании. Принцип отбора вентиляторов: известные фирмы изготовители, компактность, максимальная мощность в размере, максимальная производительность, минимальная стоимость. Всего набралось 31 вентилятор, они охватывают равномерный диапазон расхода 100...37000 м<sup>3</sup>/ч. Затем для каждого вентилятора я составил прямые и обратные функции. Этими вентиляторами я пользуюсь более 20 лет.

### Вентиляторы ВР 86-77-....

Вентиляторы ВР 86-77-... имеют рабочее колесо с лопатками загнутыми назад. Данные в таблице 1 и 2 для вентиляторов ВР-86-77 получены из источника [4] рис 78, стр 101, аэродинамическая схема Ц4-70. Для каждого вентилятора создается файл: **короткий алгоритм вентилятора** см. рисунок 19. Алгоритм реагирует на изменения следующих параметров: температуры воздуха, высоты от уровня моря, атмосферного давления, частоты вращения рабочего колеса. Мы получаем полноценные уравнения прямых и обратных напорных характеристик вентиляторов. **Этот алгоритм можно вставлять в любые алгоритмы, в которых присутствует вентилятор.**

### Вентиляторы ВР 300-45-....

Вентиляторы ВР 300-45-... имеют рабочее колесо с лопатками загнутыми вперед. Данные в таблице 3 и 4 для вентиляторов ВР 300-45 получены из источника [4] рис 67, стр 87, аэродинамическая схема Ц14-46. Для каждого вентилятора создается файл: **короткий алгоритм вентилятора** см. рисунок 20.

### Круглые канальные вентиляторы Systemair.

В отличие от вентиляторов ВР для канальных вентиляторов нет геометрических размеров рабочих колес, но есть отличные графики см. [9]. Для нахождения уравнений приходится поступать формально и принимать геометрические размеры колес по источнику [4].

Вентиляторы K100...K315L имеют рабочее колесо с лопатками загнутыми назад. Данные в таблице 5 и 6 для круглых вентиляторов получены из источника [4] рис 78, стр 101, аэродинамическая схема Ц4-70. Для каждого вентилятора создается файл: **короткий алгоритм вентилятора** см. рисунок 21.



**Исходные для короткого алгоритма центробежных вентиляторов. Таблица 1**

Аэродинамическая схема	Ц4-70 [2] рис 78, стр 101		Колесо с лопатками загнутыми <b>назад</b>				
Марка вентилятора	<b>BP-86-77-2,5</b>	<b>BP-86-77-3,15</b>	<b>BP-86-77-4</b>	<b>BP-86-77-5</b>	<b>BP-86-77-6,3</b>	<b>BP-86-77-8</b>	
Козф деформации <b>_i</b>	0,81	0,80	0,85	0,80	0,82	0,38	
Козф деформации <b>_i1</b>	0,78	0,75	0,76	0,71	0,72	1,10	
Козф уравнения <b>_k1</b>	0,0000078628	0,0000124925	0,0000201276	0,0000290419	0,0000461442	0,0000812248	
Козф уравнения <b>_k2</b>	0,0368890402	0,0292765828	0,0276633799	0,0241482428	0,0190885659	0,0118285434	
Козф уравнения <b>_k3</b>	618,9601268803	240,5702578375	102,1297767632	41,9474318739	16,2726526571	5,4528444807	
Обороты колеса, об/мин <b>_nnn</b>	<b>2750</b>	<b>2850</b>	<b>2850</b>	<b>1420</b>	<b>1435</b>	<b>960</b>	
КПД вентилятора <b>_kpdn</b>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	

**Точки рабочего диапазона радиальных вентиляторов. Таблица 2**

Вентилятор	<b>Лч, м<sup>3</sup>/ч</b>	<b>Нх, Па</b>	Вентилятор	<b>Лч, м<sup>3</sup>/ч</b>	<b>Нх, Па</b>
BP-86-77-2,5	850	720	BP-300-45-2	1300	1200
	1750	450		2000	1250
BP-86-77-3,15	1800	1220	BP-300-45-2,5	2400	1950
	4000	680		4400	2300
BP-86-77-4	4300	2200	BP-300-45-3,15	2300	800
	8300	1250		5100	850
BP-86-77-5	4300	810	BP-300-45-4	5200	1320
	8600	500		10800	1550
BP-86-77-6,3	8600	1320	BP-300-45-5	9000	2200
	17500	800		14500	2500
BP-86-77-8	12000	950	BP-300-45-6,3	12300	1580
	23000	580		28000	1800
			Вентилятор	<b>Лч, м<sup>3</sup>/ч</b>	<b>Нх, Па</b>
			BP-300-45-8	24500	2600
				37000	2850

Атмосфера стандартная		ГОСТ 44081	Имя
Константы			
Температура Кельвина при 0°C	273,15		tk
Молекулярная масса воздуха, кг/(кмоль)	28,9644		M
Молекулярная масса воды, кг/(кмоль)	18,02		Me
Универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К)	8314,3		r
Газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·°C)	287,053		rv
Ускорение свободного падения, м/с²	9,8067		g
Коэффициент Сатерленда, S, K	110,4		S
Коэффициент Сатерленда, кг·с⁻¹·м⁻¹·К⁰·⁵	0,000001458		bs
Давление на уровне моря стандартное, Па	101325		pa
Температура воздуха стандартная, °C	20		ta
Температура воздуха перед нагревателем, °C	20		tv
Переменные			
Высота расположения объекта от уровня моря hob, м	0		hob
Счет			
Плотность сухого воздуха на уровне моря, кг/м³	1,204		_pvv
Кинематическая вязкость V, м²/с	0,000015060		ny
Давление на уровне ОБЪЕКТА, Па	101325		_paob
Плотность воздуха на уровне ОБЪЕКТА, кг/м³	1,20		pvoB
Кинем. вязкость перед нагревателем V, м²/с	0,000015060		_nyob
Короткий алгоритм функции вентилятора			
Козф деформации	0,81		_i
Козф деформации	0,78		_i1
Коэффициент уравнения K1	0,0000078628		_k1
Коэффициент уравнения K2	0,0368890401		_k2
Коэффициент уравнения K3	618,9601268803		_k3
Обороты колеса, об/мин	2750		_nnn
КПД насоса	0,75		_kpdn
Счет			
Коэффициент уравнения a	-7308,9		_a
Коэффициент уравнения b	2395,8		_b
Коэффициент уравнения c	702,2		_c
Альфа	-0,164		_alfa
Бетта	898,5		_bet

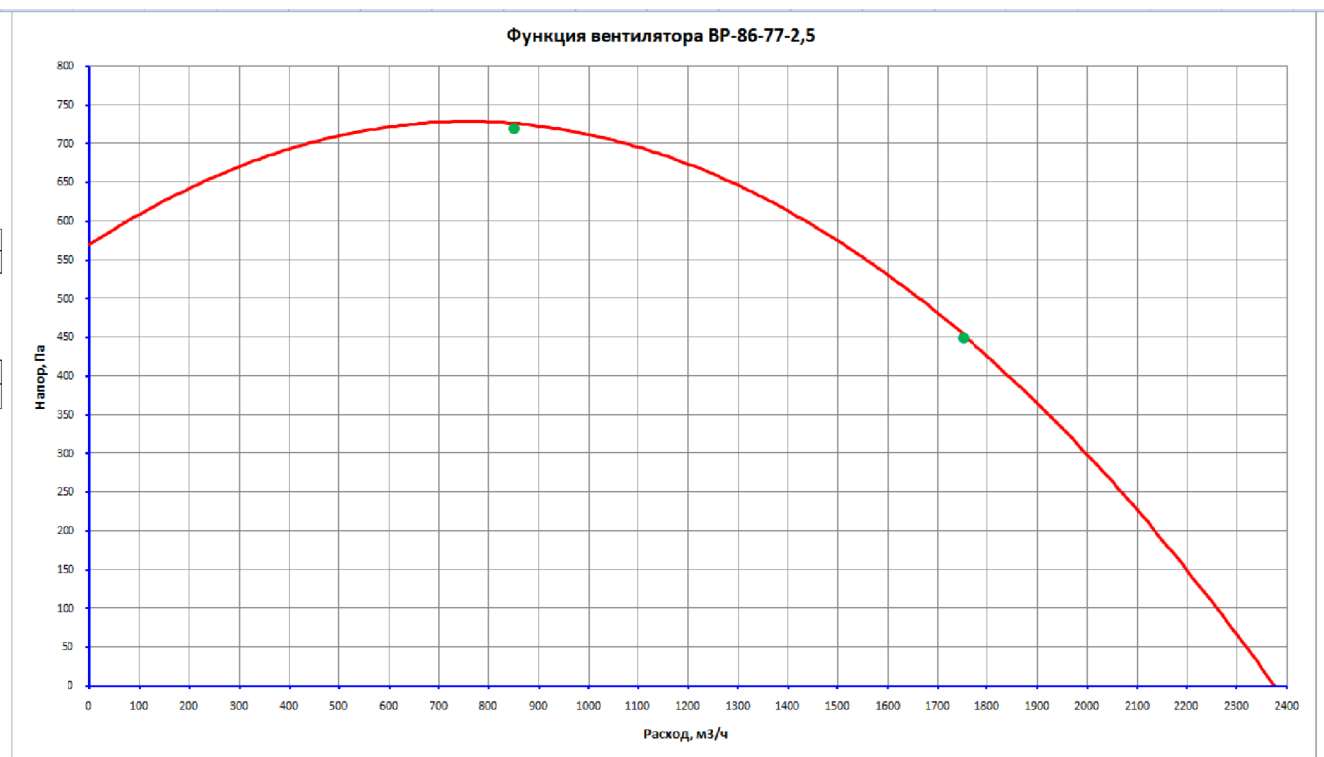


Рисунок 19

**Исходные для короткого алгоритма центробежных вентиляторов. Таблица 3.**

Аэродинамическая схема	Ц14-46 [2] рис 64, стр 87		Колесо с лопатками загнутыми <b>вперед</b>				
Марка вентилятора	BP-300-45-2	BP-300-45-2,5	BP-300-45-3,15	BP-300-45-4	BP-300-45-5	BP-300-45-6,3	BP-300-45-8
Козф деформации <b>_i</b>	1,48	1,25	1,65	1,65	1,70	1,70	1,85
Козф деформации <b>_i1</b>	1,00	2,19	1,55	1,00	1,00	1,00	0,67
Козф уравнения <b>_k1</b>	0,0000052666	0,0000091441	0,0000182924	0,0000191245	0,0000313554	0,0000487306	0,0000994234
Козф уравнения <b>_k2</b>	0,0193739558	0,0089598314	0,0122253997	0,0091390018	0,0076005273	0,0065523381	0,0027559206
Козф уравнения <b>_k3</b>	102,6389983349	7,4628755841	14,8737321056	4,0982196100	1,8733988403	0,9105355440	0,0484463565
Обороты колеса, об/мин <b>_nnn</b>	2850	2850	1400	1430	1460	975	985
КПД вентилятора <b>_kpdn</b>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

**Точки рабочего диапазона радиальных вентиляторов. Таблица 4.**

Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па	Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па
BP-86-77-2,5	850	720	BP-300-45-2	1300	1200
	1750	450		2000	1250
Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па	Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па
BP-86-77-3,15	1800	1220	BP-300-45-2,5	2400	1950
	4000	680		4400	2300
Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па	Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па
BP-86-77-4	4300	2200	BP-300-45-3,15	2300	800
	8300	1250		5100	850
Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па	Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па
BP-86-77-5	4300	810	BP-300-45-4	5200	1320
	8600	500		10800	1550
Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па	Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па
BP-86-77-6,3	8600	1320	BP-300-45-5	9000	2200
	17500	800		14500	2500
Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па	Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па
BP-86-77-8	12000	950	BP-300-45-6,3	12300	1580
	23000	580		28000	1800
			Вентилятор	Lч, м³/ч	Hх, Па
			BP-300-45-8	24500	2600
				37000	2850

Атмосфера стандартная		ГОСТ 44081		
Константы			Имя	
Температура Кельвина при 0°C	273,15		tk	
Молекулярная масса воздуха, кг/(кмоль)	28,9644		M	
Молекулярная масса воды, кг/(кмоль)	18,02		Me	
Универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К)	8314,3		r	
Газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·°C)	287,053		rv	
Ускорение свободного падения, м/с²	9,8067		g	
Коэффициент Сатерленда, S, К	110,4		S	
Коэффициент Сатерленда, кг·с⁻¹·м⁻¹·К⁻⁰.⁵	0,000001458		bs	
Давление на уровне моря стандартное, Па	101325		pa	норм
Температура воздуха стандартная, °C	20		ta	норм
Температура воздуха перед нагревателем, °C	20		tv	
Переменные				
Высота расположения объекта от уровня моря hоб, м	0		hob	
Счет				
Плотность сухого воздуха на уровне моря, кг/м³	1,204		pvv	норм
Кинематическая вязкость V, м²/с	0,000015060		ny	норм
Давление на уровне ОБЪЕКТА, Па	101325		paob	
Плотность воздуха на уровне ОБЪЕКТА, кг/м³	1,20		pvob	
Кинем. вязкость перед нагревателем V, м²/с	0,000015060		nyob	
Короткий алгоритм функции вентилятора				
Коэф. деформации	1,48		i	
Коэф. деформации	1,00		i1	
Коэффициент уравнения K1	0,0000052666		k1	
Коэффициент уравнения K2	0,0193739558		k2	
Коэффициент уравнения K3	102,6389983349		k3	
Обороты колеса, об/мин	2850		nnn	
КПД насоса	0,75		kpdn	
Счет				
Коэффициент уравнения a	-1212,0		a	
Коэффициент уравнения b	1304,0		b	
Коэффициент уравнения c	505,1		c	
Альфа	-0,538		alfa	
Бетта	855,9		bet	

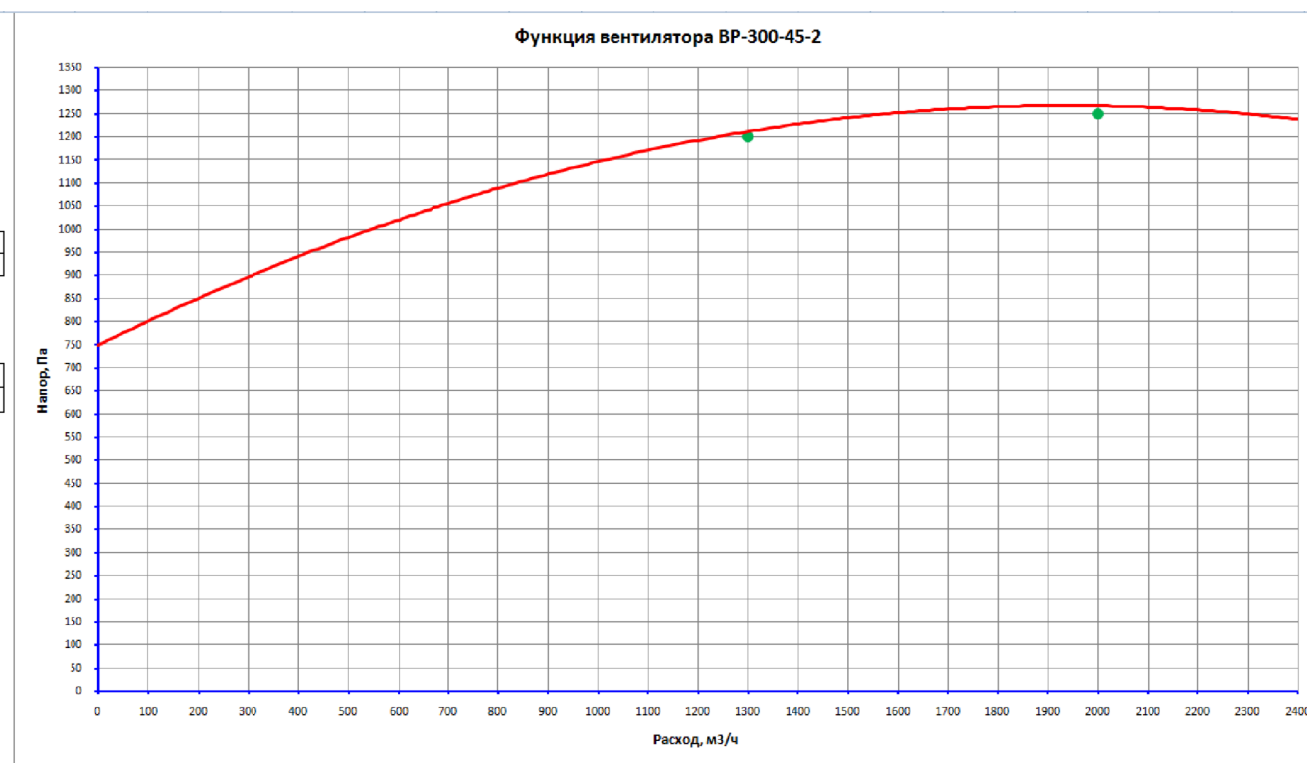


Рисунок 20

**Исходные для короткого алгоритма круглых канальных вентиляторов. Таблица 5.**

Аэродинамическая схема	Ц4-70 [2] рис 78, стр 101		Колесо с лопатками загнутыми <b>назад</b>			
Марка вентилятора	<b>K100XL</b>	<b>K125XL</b>	<b>K160XL</b>	<b>K200L</b>	<b>K250L</b>	<b>K315L</b>
Коэф деформации <b>_i</b>	0,94	0,72	0,72	0,75	0,63	0,95
Коэф деформации <b>_i1</b>	4,00	4,16	2,35	2,24	2,58	1,06
Коэф уравнения <b>_k1</b>	0,0000055489	0,0000066895	0,0000076454	0,0000089590	0,0000102294	0,0000445595
Коэф уравнения <b>_k2</b>	-0,0132311170	-0,0167480251	-0,0113513802	-0,0104949435	-0,0064222954	-0,0157871868
Коэф уравнения <b>_k3</b>	167,9227967724	56,1654414917	90,2928561054	79,3419666645	103,5946883480	108,6643680255
Обороты колеса, об/мин <b>_nnn</b>	<b>2425</b>	<b>2483</b>	<b>2553</b>	<b>2630</b>	<b>2641</b>	<b>2318</b>
КПД вентилятора <b>_kpdn</b>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

**Опытная кривая круглых канальных вентиляторов. Таблица 6.**

<b>K100XL</b>	L <sub>ч</sub> , м³/ч	H <sub>х</sub> , Па	<b>K160XL</b>	L <sub>ч</sub> , м³/ч	H <sub>х</sub> , Па
	0	362		0	420
	60	300		100	388
	120	233		200	349
	150	194		300	300
	180	145		400	244
	210	94		500	179
	270	0		600	119
<b>K125XL</b>	L <sub>ч</sub> , м³/ч	H <sub>х</sub> , Па	<b>K200L</b>	L <sub>ч</sub> , м³/ч	H <sub>х</sub> , Па
	0	350		0	542
	100	264		200	476
	200	154		400	385
	300	53		600	272
	350	0		800	136
				970	0
<b>K250L</b>	L <sub>ч</sub> , м³/ч	H <sub>х</sub> , Па	<b>K315L</b>	L <sub>ч</sub> , м³/ч	H <sub>х</sub> , Па
	0	532		0	734
	200	472		300	619
	400	397		600	491
	600	287		900	368
	800	138		1200	249
	960	0		1500	120
				1730	0

Атмосфера стандартная	ГОСТ 44081		
Константы		Имя	
Температура Кельвина при 0°C	273,15	_tk	
Молекулярная масса воздуха, кг/(кмоль)	28,9644	_M	
Молекулярная масса воды, кг/(кмоль)	18,02	_Me	
Универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль.К)	8314,3	_r	
Газовая постоянная воздуха, Дж/(кг°C)	287,053	_rv	
Ускорение свободного падения, м/с²	9,8067	_g	
Коэффициент Сатерленда, S, К	110,4	_S	
Коэффициент Сатерленда, кг·с⁻¹·м⁻¹·К⁰·⁵	0,000001458	_bs	
Давление на уровне моря стандартное, Па	101325	_pa	норм
Температура воздуха стандартная, °C	20	_ta	норм
Температура воздуха перед нагревателем, °C	20	_tv	
Переменные			
Высота расположения объекта от уровня моря hob, м	160	_hob	
Счет			
Плотность сухого воздуха на уровне моря, кг/м³	1,204	_piv	норм
Кинематическая вязкость V, м²/с	0,000015060	_nu	норм
Давление на уровне ОБЪЕКТА, Па	99453	_paob	
Плотность воздуха на уровне ОБЪЕКТА, кг/м³	1,18	_piob	
Кинем. вязкость перед нагревателем V, м²/с	0,000015344	_nyob	
Короткий алгоритм функции вентилятора			
Козф деформации	0,94	_i	
Козф деформации	4,00	_i1	
Коэффициент уравнения K1	0,0000055489	_k1	
Коэффициент уравнения K2	-0,0132311170	_k2	
Коэффициент уравнения K3	167,9227967724	_k3	
Обороты колеса, об/мин	2425	_nnn	
КПД насоса	0,75	_kpdn	
Счет			
Коэффициент уравнения a	-1946,3	_a	
Коэффициент уравнения b	-743,8	_b	
Коэффициент уравнения c	378,2	_c	
Альфа	0,191	_afa	
Бетта	449,3	_bet	

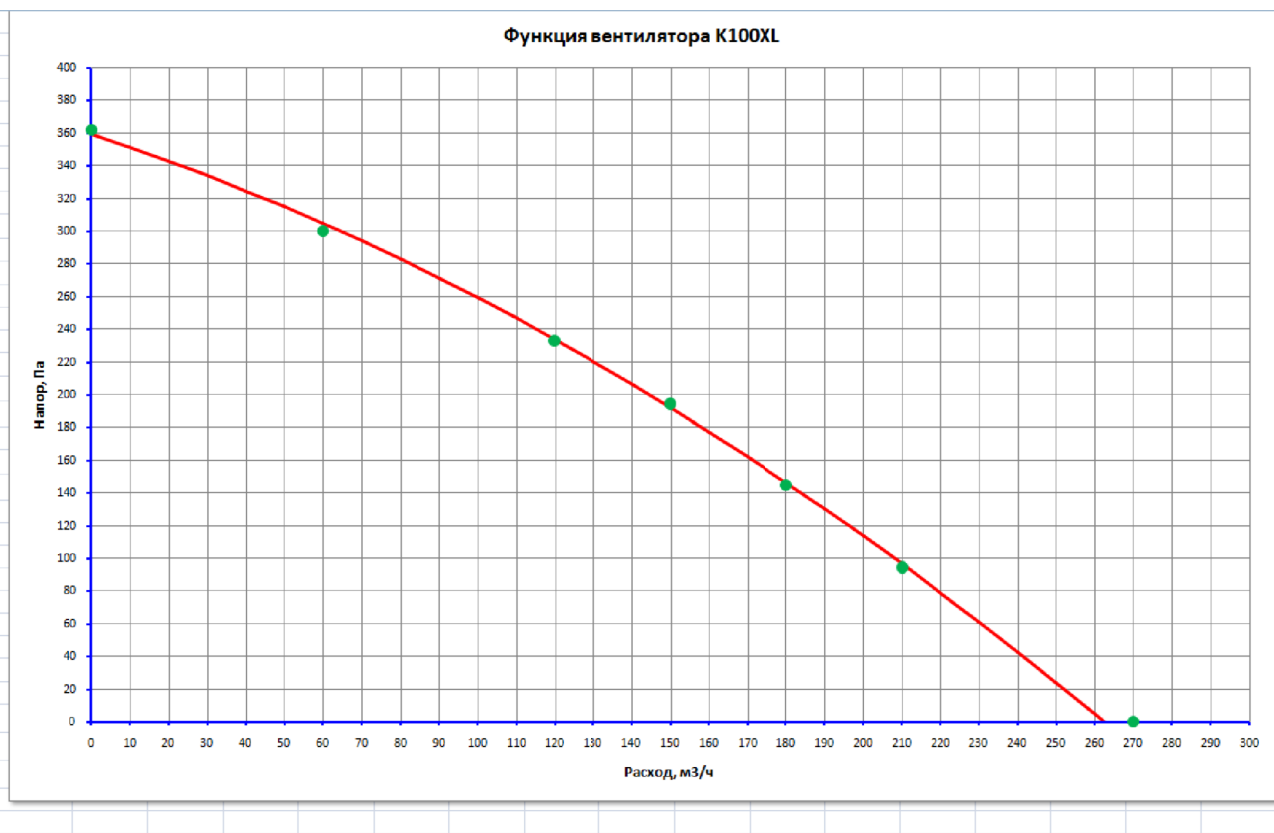


Рисунок 21

### Прямоугольные канальные вентиляторы Systemair тип КТ.

В отличие от вентиляторов ВР для канальных вентиляторов нет геометрии рабочих колес, но есть отличные графики см. [9]. Для нахождения уравнений приходится поступать формально и принимать геометрические размеры колес по источнику [4].

Вентиляторы КТ имеют рабочее колесо с лопатками загнутыми вперед. Вентиляторы КТ80-50-... и выше имеют ограниченный рабочий диапазон, поэтому они не входят в таблицу 7. Данные в таблице 7 и 8 для прямоугольных вентиляторов КТ получены из источника [4] рис 67, стр 87, аэродинамическая схема Ц14-46. Для каждого вентилятора создается файл: **короткий алгоритм вентилятора** см. рисунок 22.

### Прямоугольные канальные вентиляторы Systemair тип RS.

В отличие от вентиляторов ВР для канальных вентиляторов нет геометрии рабочих колес, но есть отличные графики см. [9]. Для нахождения уравнений приходится поступать формально и принимать геометрические размеры колес по источнику [4].

Вентиляторы RS имеют рабочее колесо с лопатками загнутыми назад. Вентиляторы RS имеют ничем не ограниченный рабочий диапазон, повышенное давление. Данные в таблице 9 и 10 для прямоугольных вентиляторов RS получены из источника [4] рис 78, стр 101, аэродинамическая схема Ц4-70. Для каждого вентилятора создается файл: **короткий алгоритм вентилятора** см. рисунок 23.

Исходные для короткого алгоритма прямоугольных канальных вентиляторов. Таблица 7.						
Аэродинамическая схема	Ц14-46 [2] рис 64, стр 87		Колесо с лопатками загнутыми вперед			
Марка вентилятора	КТ40-20-4	КТ50-25-4	КТ50-30-4	КТ60-30-4	КТ60-35-4	КТ70-40-4
Коэф деформации <u>i</u>	1,35	1,15	0,92	0,68	0,65	0,95
Коэф деформации <u>i1</u>	1,62	1,98	2,21	3,21	3,13	1,06
Коэф уравнения <u>k1</u>	0,0000082766	0,0000126937	0,0000215403	0,0000276966	0,0000458334	0,0000445595
Коэф уравнения <u>k2</u>	0,0084011847	0,0074888059	0,0043896463	0,0091718929	0,0075263861	-0,0157871868
Коэф уравнения <u>k3</u>	74,2251057261	35,4263229287	20,0506323804	12,1310187477	7,6014281279	108,6643680255
Обороты колеса, об/мин <u>nnn</u>	1303	1287	1272	1279	1250	2318
КПД вентилятора <u>kpdn</u>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Опытная кривая прямоугольных канальных вентиляторов. Таблица 8.						
КТ40-20-4	Лч, м³/ч	Нх, Па	КТ60-30-4	Лч, м³/ч	Нх, Па	
	0	260		0	450	
	200	249		1000	444	
	400	242		1500	433	
	600	228		2000	395	
	800	198		2500	314	
	1000	148		3000	176	
	1200	66		3400	0	
	1320	0				
КТ50-25-4	Лч, м³/ч	Нх, Па	КТ60-35-4	Лч, м³/ч	Нх, Па	
	0	315		0	532	
	500	310		200	472	
	1000	280		400	397	
	1500	181		600	287	
	1800	69		800	138	
	1950	0		960	0	
КТ50-30-4	Лч, м³/ч	Нх, Па	КТ70-40-4	Лч, м³/ч	Нх, Па	
	0	427		0	734	
	500	393		300	619	
	1000	356		600	491	
	1500	300		900	368	
	2000	206		1200	249	
	2500	57		1500	120	
	2650	0		1730	0	



Атмосфера стандартная		ГОСТ 44081		
Константы			Имя	
Температура Кельвина при 0°С	273,15		tk	
Молекулярная масса воздуха, кг/(кмоль)	28,9644		M	
Молекулярная масса воды, кг/(кмоль)	18,02		Me	
Универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль.К)	8314,3		г	
Газовая постоянная воздуха, Дж/(кг.°С)	287,053		rv	
Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	9,8067		g	
Коэффициент Сатерленда, S, К	110,4		S	
Коэффициент Сатерленда, кг.с.с <sup>-1</sup> .м <sup>-1</sup> .К <sup>0,5</sup>	0,000001458		bs	
Давление на уровне моря стандартное, Па	101325		pa	норм
Температура воздуха стандартная, °С	20		ta	норм
Температура воздуха перед нагревателем, °С	20		tv	
Переменные				
Высота расположения объекта от уровня моря hob, м	160		hob	
Счет				
Плотность сухого воздуха на уровне моря, кг/м <sup>3</sup>	1,204		pvv	норм
Кинематическая вязкость V, м <sup>2</sup> /с	0,000015060		пу	норм
Давление на уровне ОБЪЕКТА, Па	99453		paob	
Плотность воздуха на уровне ОБЪЕКТА, кг/м <sup>3</sup>	1,18		pvoB	
Кинем. вязкость перед нагревателем V, м <sup>2</sup> /с	0,000015344		пуob	
Короткий алгоритм функции вентилятора				
Козф деформации	1,35		i	
Козф деформации	1,62		i1	
Козфициент уравнения K1	0,0000082766		k1	
Козфициент уравнения K2	0,0084011847		k2	
Козфициент уравнения K3	74,2251057261		k3	
Обороты колеса, об/мин	1303		nnn	
НПД насоса	0,75		kpdn	
Счет				
Козфициент уравнения а	-860,3		a	
Козфициент уравнения b	253,7		b	
Козфициент уравнения c	162,9		c	
Альфа	-0,147		alfa	
Бетта	181,6		bet	

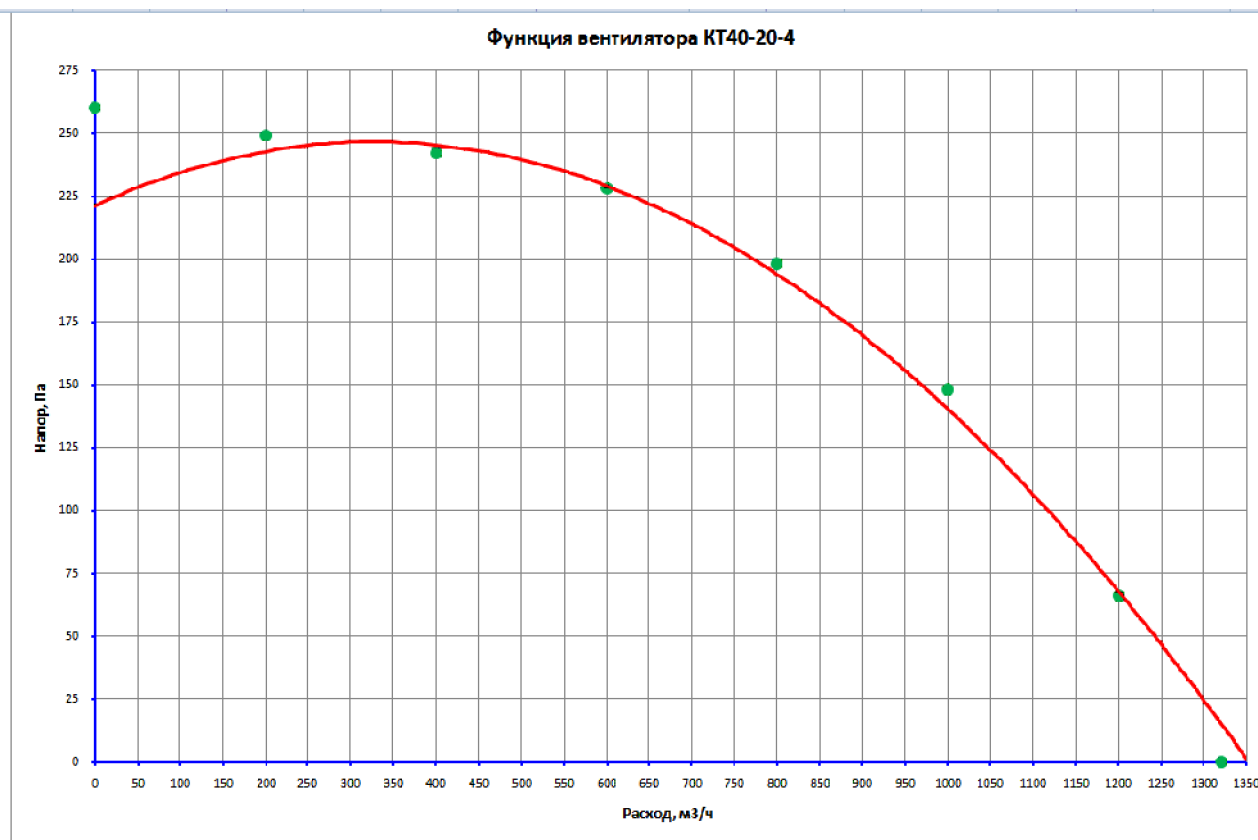


Рисунок 22

Аэродинамическая схема	Ц4-70 [2] рис 78, стр 101		Колесо с лопатками загнутыми <b>назад</b>			
Марка вентилятора	<b>RS40-20L</b>	<b>RS50-25</b>	<b>RS60-35L3</b>	<b>RS70-40L3</b>	<b>RS80-50L3</b>	<b>RS100-50L3</b>
Козф деформации <b>_i</b>	0,69	0,73	0,44	0,57	0,55	0,95
Козф деформации <b>_i1</b>	1,46	1,35	2,34	1,39	1,48	1,06
Козф уравнения <b>_k1</b>	0,0000121353	0,0000189898	0,0000294735	0,0000411512	0,0000458334	0,0000702004
Козф уравнения <b>_k2</b>	-0,0083242528	-0,0065494953	-0,0048070702	0,0024598469	0,0075263861	-0,0023527220
Козф уравнения <b>_k3</b>	247,5633992794	85,0319119920	51,1737290225	26,2388340346	7,6014281279	7,8167443540
Обороты колеса, об/мин <b>_nnn</b>	2556	1362	1408	1410	1383	1361
КПД вентилятора <b>_kpdn</b>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Опытная кривая прямоугольных канальных вентиляторов. Таблица 10.					
	<b>RS40-20L</b>	<b>Лч, м³/ч</b>	<b>Нх, Па</b>	<b>RS70-40L3</b>	<b>Лч, м³/ч</b>	<b>Нх, Па</b>
		0	680		0	552
		200	606		1000	542
		400	520		2000	475
		600	422		3000	360
		800	309		4000	198
		1000	175		5000	0
		1200	0			
	<b>RS50-25</b>	<b>Лч, м³/ч</b>	<b>Нх, Па</b>	<b>RS80-50L3</b>	<b>Лч, м³/ч</b>	<b>Нх, Па</b>
		0	310		0	870
		200	289		2000	804
		400	262		4000	654
		600	231		6000	439
		800	192		8000	187
		1000	141		9400	0
		1200	79			
		1400	21			
		1500	0			
	<b>RS60-35L3</b>	<b>Лч, м³/ч</b>	<b>Нх, Па</b>	<b>RS100-50L3</b>	<b>Лч, м³/ч</b>	<b>Нх, Па</b>
		0	577		0	1000
		1000	512		2000	960
		2000	406		4000	862
		3000	257		6000	715
		4000	67		8000	521
		4250	0		10000	287
				12000	0	

Атмосфера стандартная		ГОСТ 44081
Константы		Имя
Температура Кельвина при 0°С	273,15	tk
Молекулярная масса воздуха, кг/(кмоль)	28,9644	M
Молекулярная масса воды, кг/(кмоль)	18,02	Me
Универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К)	8314,3	r
Газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·°С)	287,053	rv
Ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup>	9,8067	g
Коэффициент Сатерланда, S, К	110,4	S
Коэффициент Сатерланда, кг·с <sup>-1</sup> ·м <sup>-2</sup> ·К <sup>0,5</sup>	0,00001458	bs
Давление на уровне моря стандартное, Па	101325	_pa
Температура воздуха стандартная, °С	20	_ta
Температура воздуха перед нагревателем, °С	20	_tv
Переменные		
Высота расположения объекта от уровня моря hоб, м	0	_hob
Счет		
Плотность сухого воздуха на уровне моря, кг/м <sup>3</sup>	1,204	_pvv
Кинематическая вязкость V, м <sup>2</sup> /с	0,000015060	_ny
Давление на уровне ОБЪЕКТА, Па	101325	_paob
Плотность воздуха на уровне ОБЪЕКТА, кг/м <sup>3</sup>	1,20	_pvob
Кинем вязкость перед нагревателем V, м <sup>2</sup> /с	0,000015060	_nyob
Короткий алгоритм функции вентилятора		
Кэф деформации	0,69	_i
Кэф деформации	1,46	_i1
Коэффициент уравнения K1	0,0000121353	_k1
Коэффициент уравнения K2	-0,0083242528	_k2
Коэффициент уравнения K3	247,5633992794	_k3
Обороты колеса, об/мин	2556	_nnn
КПД насоса	0,75	_kpdn
Счет		
Коэффициент уравнения a	-2923,3	_a
Коэффициент уравнения b	-502,5	_b
Коэффициент уравнения c	936,2	_c
Альфа	0,086	_alfa
Бетта	957,8	_bet

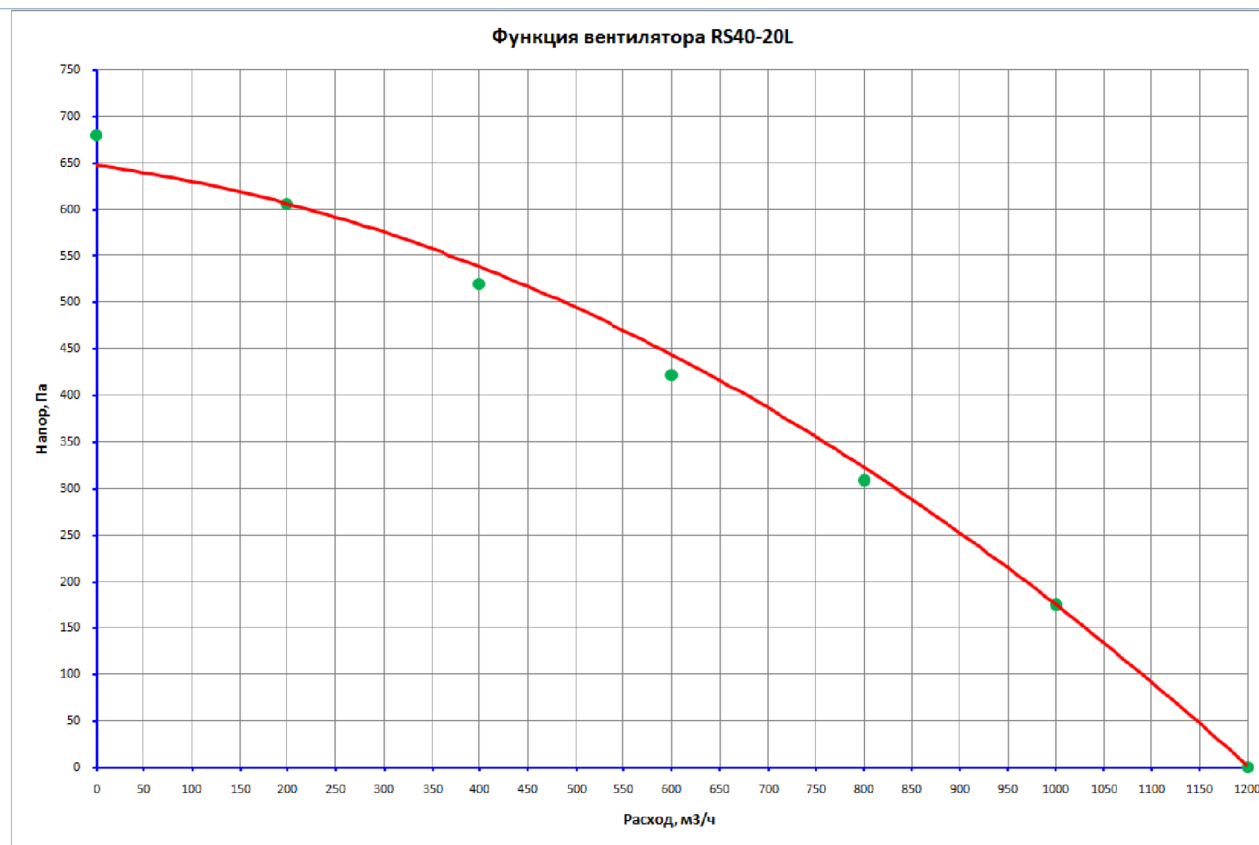


Рисунок 23

## 13. Короткий алгоритм.

Условные обозначения основных величин .

**Константы**

Температура Кельвина при 0 °С

$$t_k = 273.15^{\circ}$$

Молекулярная масса воздуха, кг/(кмоль)

$$Me = 18,02$$

Молекулярная масса воды, кг/(кмоль)

$$M = 28,9644$$

Универсальная постоянная воздуха,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ 

$$r = 8314.3$$

Газовая постоянная воздуха,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{С}}$ 

$$r_v = 287.053$$

Ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>

$$g = 9,8067$$

Коэффициент Сатерлэнда, К

$$S = 110.4$$

Коэффициент Сатерлэнда, кгс · с<sup>-1</sup> · м<sup>-1</sup> · К<sup>-0,5</sup>

$$bs = 0.000001458$$

Норм. атмосферное давление, Па

$$p_a = 101325$$

Норм. температура воздуха, °С

$$t_a = 20$$

**Переменные**

Температура воздуха перед нагревателем, °С

$$t_v$$

Координата объекта от уровня моря, м

$$h_{ob} = \pm 3000$$

## Алгоритм.

Норм. атмосферное давление, Па

$$p_a = 101325, \text{ при } t_a = 20^\circ \text{C}$$

Плотность воздуха на уровне моря, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_m = \frac{p_a}{r_v \cdot (t_k + t_a)}$$

Кинематическая вязкость на уровне моря, м<sup>2</sup> / с

$$\nu_{ob} = \frac{\beta_s \cdot (t_k + t_a)^{\frac{3}{2}}}{(t_k + t_a + S) \cdot \rho_m}$$

Атмосферное давление  
на уровне объекта

$$p_{hob} = p_a \cdot e^{\frac{-M \cdot g \cdot h_{ob}}{r \cdot (t_v + t_k)}}, \text{ Па}$$

Плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{ob} = \frac{p_{hob}}{r_v \cdot (t_k + t_v)}$$

Кинематическая вязкость, м<sup>2</sup> / с

$$\nu_{ob} = \frac{\beta_s \cdot (t_k + t_v)^{\frac{3}{2}}}{(t_k + t_v + S) \cdot \rho_{ob}}$$

Короткий алгоритм вентилятора

Постоянные:

$i, i_1, k_1, k_2, k_3, g$ .

Переменные:

$n, \rho_{ob}$ .

Уравнение высоты напора, Па

$$H_x = -\rho_{ob} \cdot g \cdot k_3 \cdot V_x^2 + 2 \cdot \rho_{ob} \cdot g \cdot k_2 \cdot n \cdot V_x + \rho_{ob} \cdot g \cdot k_1 \cdot n^2$$

Квадратный трехчлен

$$H_x = -a \cdot V_x^2 + b \cdot V_x + c$$

$$a = \rho_{ob} \cdot g \cdot k_3$$

$$b = 2 \cdot \rho_{ob} \cdot g \cdot k_2 \cdot n$$

$$c = \rho_{ob} \cdot g \cdot k_1 \cdot n^2$$

Приведенное уравнение

$$H_x = a \cdot (V_x + \alpha)^2 + \beta$$

$$\alpha = \frac{b}{2a}$$

$$\beta = \frac{b^2 - 4ac}{4a}$$

Прямое уравнение с

коэффициентами деформации, Па

$$H_x = i \cdot \left[ a \cdot (i_1 \cdot V_x + \alpha)^2 + \beta \right]$$

Обратное уравнение, м<sup>3</sup>/с

для нисходящей ветви параболы

$$V_x = \frac{1}{i_1} \cdot \left( \sqrt{\frac{H_x - i \cdot \beta}{i \cdot a}} - \alpha \right)$$

для восходящей ветви параболы

$$V_x = \frac{1}{i_1} \cdot \left( -1 \cdot \sqrt{\frac{H_x - i \cdot \beta}{i \cdot a}} - \alpha \right)$$

#### 14. Заключение.

Уравнение Пфлейдерера дает положительные результаты независимо от корпуса вентилятора и таким образом подходит для вентиляторов различной конструкции: в корпусе Рейнольдса (спиральном), канальном круглом, прямоугольном. Но следует учитывать, что на малых расходах действительные напорные кривые могут иметь перегибы : " ...полученная таким образом напорная характеристика ... дает достаточное приближение только в области нормальных и повышенных подач ." [1] стр. 443.

Также следует учесть, что у каждого пользователя при работе с данной методикой будут получаться различные уравнения (коэффициенты), то есть нельзя получить совершенно одинаковые уравнения, так как гидроаэромеханика гораздо сложнее механики твердого тела. Но зато результаты по полученным уравнениям будут равноценны характеристикам вентиляторов.

**В результате мы получаем полноценные уравнения напорной характеристики для любого центробежного вентилятора , на рабочем участке.** Уравнения реагируют на изменения внешних условий: атмосферное давление, координата от уровня моря от -5000м до 5000м, температура воздуха -50°С...100°С, плотность воздуха, влажность 0...100%.

Высота над уровнем моря озер и водохранилищ СССР. Таблица 1.		
Регион	Озеро	Высота, м
Урал	Тургояк	320
	Зюраткуль	724
Алтай	Джулукуль	2200
	Телецкое	437
Киргизия	Иссык-куль	1600
Кавказ	Казеной Ам	1869
	Сылтранкуль	3000
	Азау	3350
	Башкаринское	2600
Сибирь	Байкал	457
Юг России	Каспийское море	-28
Север России	Ладожское озеро	5
	Онежское озеро	33
	Водохранилище	
Россия	Белгородское	115
	Белоярское	207
	Братское	402
	Воронежское	93
	Горьковское	84
	Клязминское	162
	Костромское	85
	Можайское	183
	Цымлянское	35
	Яузское (Смоленское)	214



Города России, высота над уровнем моря, м. Таблица 1.	
Город	Высота, м
Сочи	65
Владивосток	8
Севастополь	50
Южно-Сахалинск	50
Волгоград	-12
Кызыл	630
Орел	170
Иркутск	440
Петропавловск	100
Калининград	5
Омск	90
Москва	255
Новосибирск	150
Н. Новгород	160
Екатеринбург	270
Братск	450
Тюмень	102
Ленинград	3
Магадан	70
Якутск	95
Северодвинск	7
Воркута	180
Мурманск	50
Сабетта	2

Высокогорные города России , высота над уровнем моря, м. Таблица 1.	
Город	Высота, м
Тырныауз	1587
Теберда	1325
Кисловодск	949
Карачаевск	862
Владикавказ	703
Лермонтов	691
Усть-Джегута	679
Ессентуки	640
Железноводск	610
Алагир	579

Большой телескоп альт-азимутальный, установлен в Специальной астрономической обсерватории, расположен на высоте 2070 м, Карачаево-Черкесская республика.

Самая глубокая шахта России - "Черемуховская-Глубокая", глубиной 1500 м, на Урале.

## 15. Список используемой литературы .

1. Пфлейдерер К. Лопаточные машины для жидкостей и газов . М. Машиностроение 1960.
2. Бак О. Проектирование и расчет вентиляторов . М. Госгортехиздат 1960.
3. Михайлов А.К. Лопастные насосы. М. Машиностроение 1977.
4. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы . Аэродинамические схемы и характеристики . Справочник. М. Машиностроение 1980.
5. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы . Л. Машиностроение 1965 г.
6. "Вентиляторы общего и специального назначения . Канальные вентиляторы" Каталог ОАО "МОВЕН" 2006.
7. Миняев В.В. Расчет параметров атмосферы с учетом влажности воздуха . Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2004. №2.
8. Богданов С.Н. Свойства веществ. Справочник. Санкт-Петербург 1999.
9. Каталог оборудования Systemair 2010.

**Для посетителей форума АВОК: все мои работы  
находятся → [проектант.орг](http://проектант.орг) → вентиляция →  
алгоритмы расчетов.**