

Проектирование осевых вентиляторов для малых СВП и аэроглизсеров

Осевые вентиляторы (ОВ) используются как нагнетатели воздуха в камеру воздушной подушки судов на воздушной подушке (СВП), могут применяться и в качестве движителей на малых СВП и аэроглизсерах. До сих пор проектирование ОВ было доступно квалифицированным специалистам. Предлагаемый материал позволит любому желающему, владеющему инженерным калькулятором, самому рассчитать тяговый или подъёмный ОВ для желаемой мощности.

Движители – осевые вентиляторы, имея сравнимые с воздушными винтами тяговые характеристики на скоростях $0 - 60$ км/ч, меньше винтов шумят, что очень важно для СВП и аэроглизсеров, эксплуатирующихся в зоне обитания людей. Меньший шум вентиляторов объясняется меньшим диаметром рабочего колеса при одинаковой подводимой мощности (концы лопастей имеют меньшую окружную скорость). Кроме того лопасти, как источник шума, закрыты обечайкой вентилятора. Имея меньший диаметр, чем воздушный винт, осевой вентилятор лучше komponуется на малом СВП или аэроглизсере, так как уменьшается общая высота центра тяжести комплекса “двигатель – движитель”, а также сокращается межосевое расстояние передачи с двигателя на движитель.

Предлагаемая методика расчета характеристик осевых вентиляторов основывается на замечательной книге И.В.Брусиловского “Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ” [1]. В книге приведена таблица характеристик исследованных вентиляторов, в которой эти характеристики даны при **максимальном** кпд

Таблица 1

№ п/п	n_{γ}	D_{γ}	η	\bar{d}	z_k шт.	ν°	Схема	Тип вентилятора
1	147	0,84	0,84	0,6	12	35	ВНА+К+СА	ОВ-42
2	148	0,81	0,87	0,6	10	40	ВНА+К+СА	ОВ-76
3	148	0,89	0,87	0,6	14	30,8	К+СА	ОВ-76
4	150	0,845	0,86	0,6	16	35	ВНА+К+СА	ОВ-29
5	152	0,77	0,87	0,6	16	45	ВНА+К+СА	ОВ-29
6	155	0,80	0,85	0,6	8	40	ВНА+К+СА	ОВ-76

7	155	0,815	0,86	0,6	12	35	BHA+K+CA	OB-29
8	161	0,824	0,87	0,6	12	35	K+CA	OB-111
9	165	0,725	0,85	0,6	12	45	BHA+K+CA	OB-29
10	166	0,75	0,85	0,6	12	45	BHA+K+CA	OB-29
11	167	0.805	0.85	0.6	12	35	BHA+K+CA	OB-29
12	195	0.80	0,78	0,5	10	24	BHA+K	OB-74
13	203	0.794	0,73	0,4	6	24	K	OB-109
14	212	0.678	0,86	0,4	6	35	K+CA	OB-109
15	212	0.735	0,81	0,6	12	35	K	OB-111
16	212	0.755	0,81	0,4	6	25	K+CA	OB-109
17	224	0.68	0,73	0,4	6	35	K	OB-109
18	224	0.82	0,75	0,4	4	20	K	OB-109
19	240	0.713	0,76	0,4	4	30	K	OB-109
20	252	0.645	0,9	0,35	10	35	K+CA	OB-23
21	260	0.78	0,76	0,4	3	20	K	OB-109
22	303	0.655	0,86	0,35	6	30	K+CA	OB-23M
23	309	0.62	0,80	0,35	10	30	K	OB-23
24	309	0.625	0,82	0,35	10	29	K	OB-23M
25	312	0.785	0,75	0,4	2	15	K	OB-109
26	314	0.66	0,80	0,35	8	25	K	OB-23
27	317	0.70	0,78	0,4	3	22	K	OB-143
28	317	0.74	0,75	0,4	2	20	K	OB-109
29	344	0.645	0,79	0,35	6	25	K	OB-23
30	358	0.68	0,82	0,35	6	20	K	OB-121
31	363	0.66	0,81	0,35	6	22	K	OB-120
32	366	0.73	0,80	0,35	6	15	K	OB-101
33	370	0.635	0,80	0,35	5	25	K	OB-23
34	400	0.71	0,80	0,35	6	15	K	OB-100
35	406	0.66	0,81	0,35	4	20	K	OB-23
36	434	0.61	0,82	0,35	4	25	K	OB-120
37	453	0.685	0,81	0,35	4	15	K	OB-101
38	465	0.62	0,84	0,35	4	20	K	OB-121
39	486	0.67	0,82	0,35	4	15,5	K	OB-100

Здесь

$$n_y = \frac{Q^{1/2}}{P^{3/4}} \cdot n_{\theta} - \text{быстроходность вентилятора,} \quad (1)$$

$$D_y = \frac{P^{1/4}}{Q^{1/2}} \cdot D - \text{габаритность вентилятора,} \quad (2)$$

P - давление за вентилятором,

Q - расход воздуха через вентилятор,

n_{θ} - обороты вентилятора,

D - диаметр рабочего колеса вентилятора,

η - кпд вентилятора,

\bar{d} - относительный диаметр втулки вентилятора,

$$d_{\theta} = \bar{d} \cdot D$$

z_k - количество лопастей рабочего колеса,

ν - угол установки лопасти рабочего колеса,

ВНА – входной направляющий аппарат,

К – рабочее колесо вентилятора,

СА – спрямляющий аппарат.

Пользуясь таблицей, можно определить характеристики ОВ для любой мощности привода.

Для примера рассчитаем характеристики тягового вентилятора, приводимого во вращение двигателем длительной мощности $N = 25$ л.с. при $n_{\theta\phi} = 4500$ об/м (рис.1).

Запишем формулу мощности

$$N = \frac{Q \cdot P}{75 \cdot \eta \cdot \eta_m}. \quad (3)$$

Здесь Q, P, η - обозначены ранее,

η_m – кпд механической передачи на вентилятор.

Перепишем формулу (3) в другом виде

$$QP = 75 \cdot N \cdot \eta \cdot \eta_m. \quad (4)$$

Для первой стадии расчета примем $\eta = 0,8$, $\eta_m = 0,95$.

Подставляя известные величины, получим

$$QP = 75 \cdot 25 \cdot 0.8 \cdot 0.95 = 1425.$$

Задаваясь рядом значений давления за вентилятором P , определим из соотношения (4) значения расхода Q и тяги T вентиляторного комплекса на стопе и при движении.

Тяга на стопе определится как

$$T_c = \rho \cdot Q \cdot V_u,$$

где ρ - массовая плотность воздуха, при стандартных условиях $\rho = 0,125 \text{ кг} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$;

$$V_u = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \text{ - скорость истечения воздуха из выходного сопла вентилятора.}$$

Тяга комплекса при движении будет следующей

$$T_{\partial\partial} = \rho \cdot Q \cdot (V_u - V_{\partial\partial}),$$

где $V_{\partial\partial}$ - скорость движения аппарата.

Зададим $V_{\partial\partial} = 13,9 \text{ м/с}$ (50 км/ч) и $16,7 \text{ м/с}$ (60 км/ч) и сведем результаты расчета в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	P кг/м^2	Q $\text{м}^3/\text{с}$	V_u м/с	$V_u - V_{\partial\partial}$		T_c кг	$T_{\partial\partial}$		$T_{\partial\partial}/N$
				13,9	16,7		13,9	16,7	
1	40	35,6	25,3	11,4	8,6	112,6	50,7	38,3	4,5
2	50	28,5	28,3	14,4	11,6	100,8	51,3	41,3	4,0
3	60	23,8	31,0	17,1	14,3	92,0	50,8	42,4	3,7
4	70	20,4	33,5	19,6	16,8	85,2	49,9	42,8	3,4
5	80	17,8	35,8	21,9	19,1	79,6	48,8	42,5	3,2

Проектировщик может выбрать любое сочетание параметров тяги комплекса в зависимости от целей, которые он преследует.

Допустим, мы проектируем движительный комплекс для двухместного СВП массой $G = 430 \text{ кг}$, расчетное сопротивление на скорости $V = 13.9 \text{ м/с}$ $X = 42 \text{ кг}$. Желательно иметь тягу на стопе равную $T_c \geq 0,2 \cdot G$ для большей динамики разгона и преодоления усилия страгивания в зимнее время, а также некоторый запас тяги крейсерского движения. Тогда выбираем вторую строку из таблицы 2 и для $P = 50 \text{ кг/м}^2$, $Q = 28,5 \text{ м}^3/\text{с}$ определяем тип и характеристики вентилятора. В начале примем $n_{\partial} = n_{\partial\partial} = 4500 \text{ об/м}$.

Быстроходность вентилятора определим по формуле (1)

$$n_y = \frac{Q^{1/2}}{P^{3/4}} \cdot n_e = \frac{28,5^{1/2}}{50^{3/4}} \cdot 4500 = 1278$$

Такой быстроходности в таблице 1 нет, но есть $n_y = 434$ вентилятора ОВ-120 схемы «К» с $D_y = 0,61$, $\eta = 0,82$, $z_k = 4$, $\bar{d} = 0,35$.

Применим понижающую передачу с коэффициентом $i = \frac{1278}{434} = 2,945$.

Обороты вентилятора составят

$$n_e = \frac{n_{\partial e}}{i} = \frac{4500}{2,945} = 1528 \text{ об/м.}$$

При этих оборотах быстроходность будет соответствовать табличной

$$n_y = \frac{28,5^{1/2}}{50^{3/4}} \cdot 1528 = 434.$$

Чтобы выдерживать режим работы осевого вентилятора в зоне максимального кпд, необходим контроль частоты оборотов двигателя.

Теперь из формулы (2) определим диаметр вентилятора

$$D = \frac{D_y \cdot Q^{1/2}}{P^{1/4}} = \frac{0,61 \cdot 28,5^{1/2}}{50^{1/4}} = 1,225 \text{ м.}$$

Диаметр втулки вентилятора $d = \bar{d} \cdot D = 0,35 \cdot 1,225 = 0,429 \text{ м.}$

Окружная скорость конца лопасти

$$U = \frac{\pi \cdot D \cdot n_e}{60} = \frac{\pi \cdot 1,225 \cdot 1528}{60} = 98 \text{ м/с,}$$

что ниже, чем допускаемая скорость по уровню шума $U \leq 160 \text{ м/с.}$

Воздушный винт на мощность такую же, как и в нашем примере $N=25 \text{ л.с.}$, при диаметре 2 м и оборотах $n = 1500 \text{ об/м}$ имеет тягу на стопе $T_c = 110 \text{ кгс}$ («Катера и яхты», №78, стр. 51, графики на рис. 2,3,4). Окружная скорость его конца лопасти

$$U = \frac{\pi \cdot 2,0 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ м/с, т.е. больше окружной скорости рассчитанного}$$

вентилятора. Воздушный движитель создаёт продольный дифферентующий момент на нос тем больше, чем больше его возвышение над опорной поверхностью; то же и с кренящим моментом при поворотах. Понятно, что плечо дифферентующего и кренящего моментов у движителя диаметром 2 м больше, чем у движителя диаметром 1.22 м. Установка на СВП длиной около 4 м и шириной около 2 м воздушного винта диаметром 2 м вряд ли приемлемо из-за

проблем продольной и поперечной устойчивости, которые возникнут. Винт, диаметром равным диаметру рассчитанного вентилятора, имеет тягу на стопе менее 80 кг, на скорости 50 км/ч – около 60 кг (“Катера и яхты”, №78, стр. 51, графики на рис. 2,3,4).

Очевидно, движительный вентиляторный комплекс имеет право на сопоставление с воздушным винтом при рассмотрении вариантов обеспечения тяги СВП.

Движительный комплекс с рассчитанными выше характеристиками (ОВ – 120, $n_в = 1528$ об/м, $D = 1,225$ м) может быть применен и для аэроглизсера массой около 400 - 420 кг (рис.2).

Теперь определим характеристики вентилятора подъемной системы СВП массой $G = 430$ кг (рис.1).

Площадь ВП у него составит около $S_{\Pi} = 6,7 \text{ м}^2$, давление в ВП

$$P_{\Pi} = \frac{G}{S_{\Pi}} = \frac{430}{6,7} = 64,2 \text{ кг/м}^2, \text{ коэффициент перепада давления от вентилятора к ВП}$$

$$\kappa_{\Pi} = 1,5.$$

Тогда давление на срезе вентилятора

$$P = \kappa_{\Pi} \cdot P_{\Pi} = 1,5 \cdot 64,2 = 96,3 \text{ кг/м}^2.$$

Расход воздуха в ВП определим по приближенной формуле

$$Q_{\Pi} = 0,8 \cdot S_{\Pi} \cdot \sqrt{h_{zo}}.$$

Высоту гибкого ограждения примем $h_{zo} = 0,25$ м.

Тогда расход, который должен обеспечить подъемный вентилятор

$$Q = Q_{\Pi} = 0,8 \cdot 6,7 \cdot \sqrt{0,25} = 2,7 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем $n_в = n_{ов} = 4000$ об/м. Определяем по формуле (1)

быстроходность

$$n_y = \frac{Q^{1/2}}{P^{3/4}} \cdot n_в = \frac{2,7^{1/2}}{96,3^{3/4}} \cdot 4000 = 213,8.$$

В таблице 1 находим близкую быстроходность, подбираем высокоэкономичный вентилятор. Это ОВ – 109 с плоскими лопатками: $n_y = 212$,

$$D_y = 0,678, \eta = 0,86, z = 6, \bar{d} = 0,4 \text{ схемы «К+СА»}.$$

Определяем обороты, при которых быстроходность будет табличной

$$\frac{213,8}{212} = \frac{4000}{n_g}, \quad n_g = \frac{212 \cdot 4000}{213,8} = 3966 \text{ об/м.}$$

Определяем диаметр вентилятора

$$D = \frac{D_y \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{P^{\frac{1}{4}}} = \frac{0,678 \cdot 2,7^{\frac{1}{2}}}{96,3^{\frac{1}{4}}} = 0,356 \text{ м.}$$

Окружная скорость конца лопасти

$$U = \frac{\pi \cdot D \cdot n'_g}{60} = \frac{\pi \cdot 0,356 \cdot 3966}{60} = 74 \text{ м/с.}$$

Диаметр втулки вентилятора $d = \bar{d} \cdot D = 0,4 \cdot 0,356 = 0,142 \text{ м.}$

Поскольку обороты вентилятора подъемной системы при экономичном режиме ($\eta = 0,86$) должны составлять $n_g = 3966 \text{ об/м}$, а это совпадает с числом оборотов известных маломощных двигателей, вал вентилятора и выходной вал двигателя можно соединить напрямую, т.е. без потерь на передачу.

Мощность привода подъемного вентилятора

$$N = \frac{Q \cdot P}{75 \cdot \eta} = \frac{2,7 \cdot 96,3}{75 \cdot 0,86} = 4,0 \text{ л.с.}$$

Номинальная мощность для лодочных моторов составляет $N_n = N/(0,8 \div 0,85)$.

В нашем случае $N_n = 4/(0,8 \div 0,85) = 5 \div 4,7 \text{ л.с.}$

Можно использовать угловую передачу лодочного подвесного мотора. В этом случае при определении n_g следует учесть передаточное отношение редуктора i : $n_g = n_{ог} / i$ и определить параметры вентилятора подъемной системы заново.

При раздельной схеме вентиляторов (отдельно на тягу и на ВП) целесообразно тяговый комплекс разместить в корме судна, а подъемный – в носу, причем для использования скоростного напора последний трубой вентилятора горизонтально или с небольшим углом к горизонтали.

И, наконец, по предлагаемой методике можно определить характеристики вентилятора “совмещенной схемы”, когда часть нагнетаемого воздуха направляется в воздушную подушку, а остальная – на тягу (рис3). В рассмотренном выше примере на тягу затрачивалось $N_T = 25 \text{ лс}$, на подушку – $N_n = 4 \text{ лс}$, всего $N = 29 \text{ лс}$.

Для малого СВП $G = 430 \text{ кг}$, $S_{\Pi} = 6,7 \text{ м}^2$, $P_{\Pi} = 64,2 \text{ кг/м}^2$, $Q_{\Pi} = 2,7 \text{ м}^3/\text{с}$, с давлением на срезе вентилятора $P = \kappa_{\Pi} \cdot P_{\Pi} = 1,5 \cdot 64,2 = 96,3 \text{ кг/м}^2$ и подводимой мощности $N = 29 \text{ л.с.}$ соотношение (4) составит $QP = 75 \cdot N \cdot \eta \cdot \eta_m = 1653$.

Зададим $V_{\partial\partial} = 13,9 \text{ м/с}$ (50 км/ч) и $16,7 \text{ м/с}$ (60 км/ч) и сведем результаты расчета в таблицу 3.

Таблица 3

P кг/м^2	Q $\text{м}^3/\text{с}$	$Q_T = Q - Q_{\Pi}$ $\text{м}^3/\text{с}$	V_{Π} м/с	$V_{\Pi} - V_{\text{ДВ}}$		T_c кг	$T_{\text{ДВ}}$		T_c/N
				13,9	16,7		13,9	16,7	
96,3	17,16	14,46	39,2	25,3	22,5	70,8	45,7	40,7	2,44

В начале положим $n_B = n_{\text{ДВ}} = 4500 \text{ об/м}$

Определим быстроходность

$$n_y = \frac{Q^{1/2}}{P^{3/4}} \cdot n_{\partial} = \frac{17,16^{1/2}}{96,3^{3/4}} \cdot 4500 = 606,4.$$

Необходимо понизить обороты вентилятора, чтобы получить быстроходность из табл. 1. Допустим, выбираем $n_y = 314$ вентилятора ОВ – 23 схемы «К», $D_y = 0,66$ при $\eta = 0,8$, $\bar{d} = 0,35$.

Тогда передаточное отношение составит

$$i = \frac{606,4}{314} = 1,93.$$

Обороты вентилятора

$$n_{\partial} = \frac{n_{\partial\partial}}{i} = \frac{4500}{1,93} = 2332 \text{ об/м.}$$

Определим диаметр вентилятора

$$D = \frac{D_y \cdot Q^{1/2}}{P^{1/4}} = \frac{0,66 \cdot 17,16^{1/2}}{96,3^{1/4}} = 0,873 \text{ м}$$

и окружную скорость

$$U = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\partial}}{60} = \frac{\pi \cdot 0,873 \cdot 2332}{60} = 106,5 \text{ м/с.}$$

Диаметр втулки вентилятора $d = \bar{d} \cdot D = 0,35 \cdot 0,873 = 0,306 \text{ м.}$

Движительно – нагнетательный комплекс (ДНК) совмещенной схемы хотя и проще по конструкции, чем отдельный, менее эффективен по тяге ($T_c = 70,8 \text{ кг}$ против $T_c = 100,8 \text{ кг}$ в отдельном варианте). Кроме того, он таит в себе

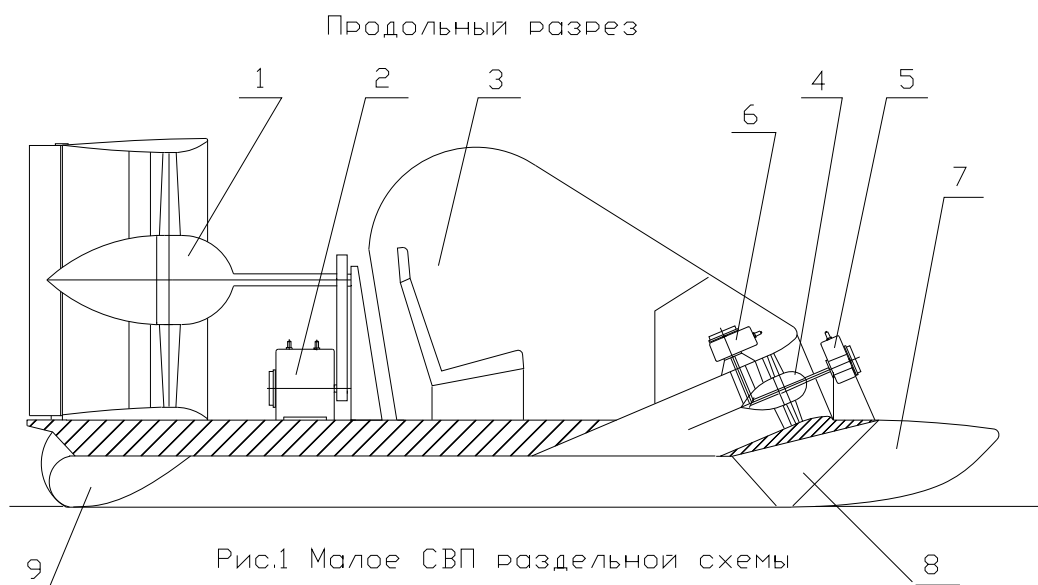
определенную эксплуатационную опасность. При отказе ДНК совмещенной схемы, особенно в зимнее время, когда ремонт затруднен холодом, СВП превратится в груды «железа» на чистом льду. Чтобы его буксировать хотя бы до берега, нужно более **мощное СВП** или **вертолёт**. Это проблема!

Другое дело – раздельный ДНК. Если отказал подъемный комплекс, аппарат сохраняет возможность движения малым ходом (особенно если он на баллонах); если отказал тяговый комплекс при работающем подъемном – аппарат можно буксировать на воздушной подушке другим СВП, лёгкий СВП – силами экипажа пешком по льду зимой и вёслами летом.

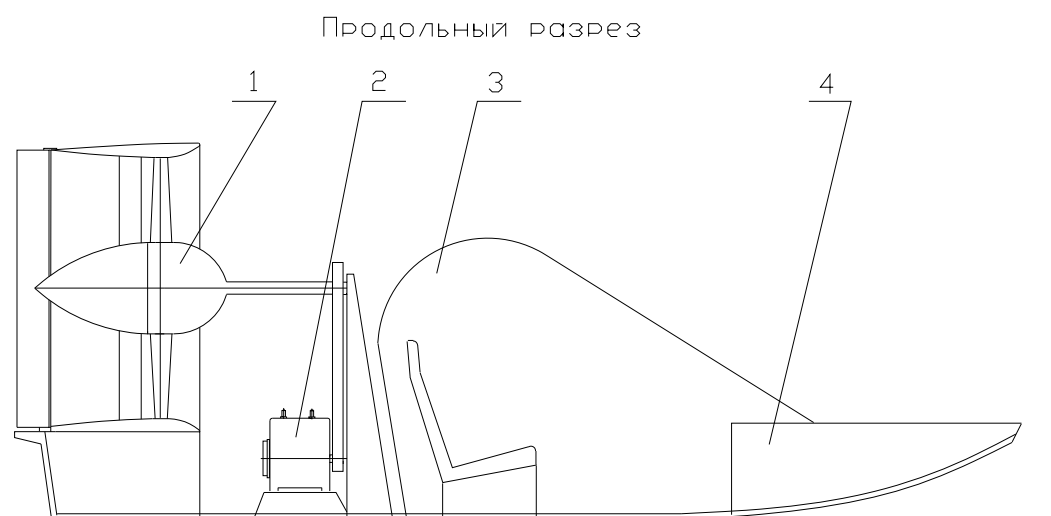
Автор не стал бы в нашем неласковом климате делать совмещенный комплекс.

Геометрические характеристики лопастей рабочего колеса, входного и спрямляющего аппаратов, профилировка входного и выходного сопел приведены в работе [1].

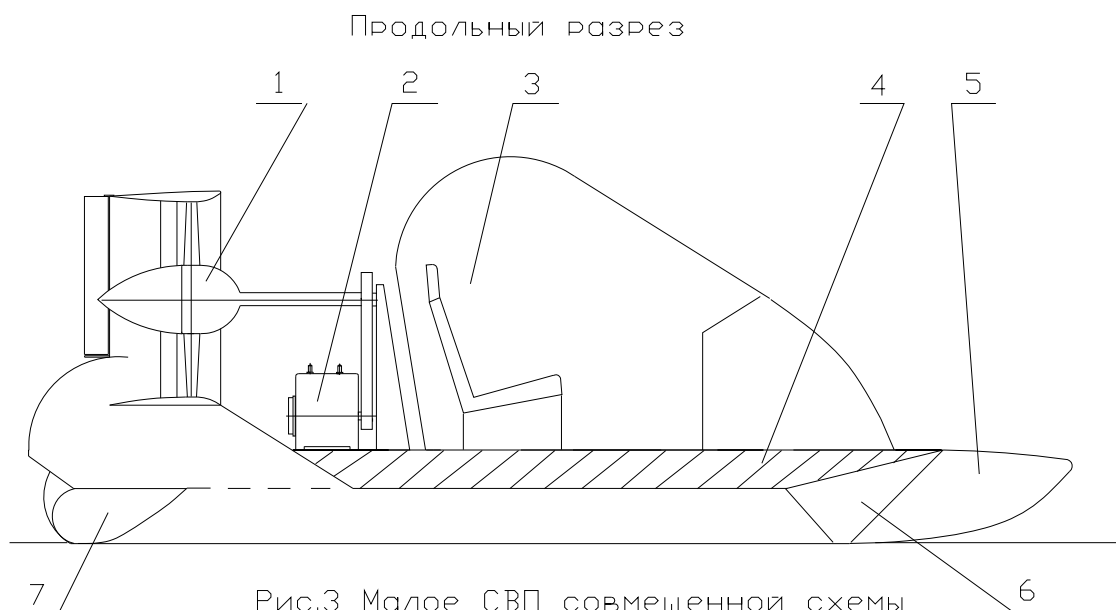
Рисунки



1-тяговый вентилятор, 2-маршевый двигатель,
3-кабина двухместная, 4-подъемный вентилятор,
5-двигатель ВП, 6-двигатель ВП (вариант), 7-баллон ВП,
8-ограждение ВП носовое, 9-ограждение ВП кормовое.



1-тяговый вентилятор, 2-маршевый двигатель,
3-кабина двухместная, 4-корпус.



1-тяговый вентилятор, 2-маршевый двигатель,
3-кабина двухместная, 4-корпус, 5-баллон ВП,
6-ограждение ВП носовое, 7-ограждение ВП кормовое.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.В. Брусиловский. "Аэродинамические схемы и характеристики осевых вентиляторов ЦАГИ", Москва, "Недра", 1978 г.

Сведения об авторе.

Матвеев Анатолий Алексеевич, 1948 года рождения. Закончил школу в 1966 г. в городе Спасск – Дальний.

Приехав в г. Горький в 1966 году, поступил в Горьковский институт инженеров водного транспорта на кораблестроительный факультет, который окончил в июне 1971г. Дипломная работа – «Судно на воздушной подушке на 50 пассажиров».

С осени 1971г. по осень 1972 г. служил в ВМФ, ремонтировал подводные лодки. С декабря 1972г. до ноября 1973г. работал инженером в Горьковском филиале ПИ «Промстальконструкция».

С 3 января 1974г. работал конструктором III, а с сентября 1974г - II категории в шестом отделе ЦКБ по СПК. Занимался конструированием, а с конца 1974г. до ноября 1977 г. конструкторским обслуживанием постройки заказа «Орленок».

В ноябре 1977г. перешёл Горьковский филиал ЦНИИ им. А.Н. Крылова. В должности старшего, а затем ведущего инженера лаборатории полунатурных (мореходных) испытаний, занимался разработкой, постройкой и испытаниями самоходных моделей быстроходных судов (глиссера с интерцепторами «Молния», СВП «Касатка», скеговых СВП пр.125 и пр.133), мотолодки на ПК «Каскад». С 1985 г. в конструкторском отделе филиала участвовал в проектировании СВП «Сибирь», «Малыш» и катамарана «Троца». Ушел с филиала в августе 1993 года из-за проблем с выплатой зарплаты.

С августа 1993г по январь 1997г – директор частного предприятия «Спектр – АМ», занимался проектированием двухместных СВП и торговлей в обеспечение деятельности предприятия.

В 1996-1998г.г. построил два крейсерских швертбота микрокласса - «Лагуна» и «Синичка» по своим проектам.

С октября 1999г по июнь 2000г – опять на Горьковском филиале ЦНИИ им. А.Н. Крылова, работал ведущим конструктором, разрабатывал предконтрактную документацию на переоборудование т/х «Пропагандист» и проект судна с воздушной каверной на 24 пассажира.

11.04.2013

