

СИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ (БЛА)

Калиниченко В.Г.

В настоящее время на различных БЛА находят применение следующие силовые установки: поршневые двигатели внутреннего сгорания (в т. ч. роторно-поршневые), газотурбинные, прямоточные, а также электродвигатели. При скоростях полета $M < 0,5$ преимущественно применяются винтомоторные группы (ВМГ) с поршневым двигателем (ПД), т. к. они позволяют достигать наиболее высокого показателя экономичности — удельной тяги (табл. 1). Весовая удельная тяга $I_{уд}$ (удельный импульс) — это отношение получаемой тяги к весовому расходу топлива, измеряется в секундах ($c = кгс \cdot с / кгс$). Массовая удельная тяга получается умножением весовой удельной тяги на ускорение свободного падения и измеряется в метрах в секунду. Физический смысл удельного импульса — время в секундах, в течение которого в данном двигателе сгорает 1 кг топлива, создавая тягу в 1 кг. Тем самым он является обратной величиной удельного расхода топлива для получения тяги. Удельную тягу в метрах в секунду применяют в реактивной технике и называют также эффективной скоростью истечения.

Электросиловые установки значительно проигрывают поршневому и реактивному двигателям по запасенной удельной энергии на единицу массы аккумулятора в отношении к единице массы углеводородного топлива. Для батареи аккумуля-

торов, собранной из серийных Li-Ion-элементов, можно получить энергоемкость 200 Вт·ч/кг. Для сравнения — на бензине имеем 12 600 Вт·ч/кг для самого топлива в теории и 3600 Вт·ч/кг на практике с учетом реального КПД $\eta_e = 0,28$ ПД. С использованием в качестве источников питания лучших топливных элементов возможно увеличить показатель удельной энергии до 560 Вт·ч/кг. Удельная масса самих бесколлекторных электродвигателей может составлять 0,18–0,2 кг/л.с. Стоимость комплекта мотор – аккумулятор – зарядное устройство – регулятор гораздо выше, чем у аналогичной по мощности силовой установки на базе ПД. Электросиловые установки имеют и ряд преимуществ — простота автономного управления, бесшумность, отсутствие вибрации, теплового следа и т. п.

ПД с кривошипно-шатунным механизмом и роторно-поршневой двигатель Ванкеля работают на принципе объемного неполного расширения, при котором изменение объема, создаваемого рабочим телом в цилиндре, производит соответствующее перемещение передающего энергию механического органа, при этом кинетическая энергия рабочего тела не оказывает существенного влияния. ПД создает тягу с помощью движителя винта и представляет двигатель не прямой реакции. Основной его характеристикой является эффективная мощность N_e .

Таблица 1

По данным для двигателей больших ЛА

Тип двигателя	ВМГ с ПД	ВРД		РкД	
		ТРД	ПВРД	ЖРД	РДТТ
Параметры					
$I_{уд}$, с	5000–8000	2000–3000	1000–1600	280–450	230–310
P_{max} , МН (кгс)	0,05–0,06 ($5 \cdot 10^3$ – $6 \cdot 10^3$)	0,05–0,10 ($5 \cdot 10^3$ – $10 \cdot 10^3$)	0,02–0,04 ($2 \cdot 10^3$ – $4 \cdot 10^3$)	2–8 ($2 \cdot 10^5$ – $8 \cdot 10^5$)	16 ($16 \cdot 10^5$)
$\gamma_{дв}$, кг/кН (кгс/кгс)	60–80 (0,6–0,8)	15–50 (0,15–0,50)	7–15 (0,07–0,15)	0,8–40 (0,008–0,040)	3–4 (0,03–0,04)

В турбореактивных (ТРД) и других реактивных двигателях прямой реакции способом преобразования энергии рабочего тела в механическую энергию является полное необъемное расширение, при котором энергия рабочего тела преобразуется в кинетическую энергию. Их основной характеристикой является реактивная тяга P .

Можно видеть, что самый экономичный двигатель — это тот, который использует силу давления расширяющегося газа до полного его расширения, а не тот, который использует давление струи газа на лопатки турбины. Платой за этот принцип является большая удельная масса (вес) $\gamma_{дв}$ для получаемой от него тяги.

Наиболее известные производители двигателей внутреннего сгорания для малоразмерных ЛА следующие: O.S. Max, Saito, Fuji, Zenoah, Jamada (Япония); Desert Aircraft, BME, First Place (США); 3W (Германия); Taurus (Англия); Brison, Quadra-Aerrow (Канада); ZDZ (Чехия); Evolution (Нидерланды); DLE, DLA, ASP, Magnum (Китай). Указанные фирмы производят большой ряд 2-тактных (далее 2Т) и 4-тактных (далее 4Т) моторов, работающих как на метаноле (калильные), так и на бензине. Среди них имеются одноцилиндровые, оппозитные 2- и 4-цилиндровые, многоцилиндровые звездообразные и рядные.

Малоразмерные роторные двигатели Ванкеля производят: O.S. Max, Nitto MFG. Works (Япония); Cubevano Ltd (Англия).

На рис. 1 приведены сравнительные характеристики веса ПД нескольких производителей от их мощности. Здесь и на последующих рисунках зависимости выражены линиями тренда, построенным по паспортным или другим данным. Бензиновые 2Т-двигатели по возрастанию удельной массы от мощности располагаются в последовательности: DA, ZDZ, 3W. Видно также существенное отличие по данному параметру 2Т и 4Т калильных двигателей в пользу первых. Значения удельной массы от мощности для приведенных бензиновых ПД нахо-

дятся в диапазоне 0,23–0,27 кг/л.с. Необходимо отметить, что для компактности этого и других рисунков характеристики по наиболее широкой номенклатуре производимых 3W-двигателей приведены не для всего их ряда. Характеристики двигателей ряда 3W имеют линейное продолжение до объема цилиндров $V = 684 \text{ см}^3$ и мощности $N_e = 60 \text{ л.с.}$

Зависимости мощности от объема цилиндров ПД некоторых производителей для их сравнения, построенные подобным образом, приведены на рис. 2. Приведенные данные, в частности по калильным двигателям, показывают, что 4Т существенно проигрывают по литровой мощности 2Т.

Важной характеристикой экономичности ПД является удельный расход топлива C_e , выражаемый в килограммах на киловатт-час (кг/л.с.ч). В паспортных данных малоразмерных двигателей расход топлива указывается редко и обычно приводится в миллилитрах в минуту для режима максимальной мощности. На рис. 3 приведены сравнительные характеристики по расходу топлива для ПД производителей, для которых имеются такие данные. Из приведенных данных для бензиновых двигателей видно, что 4Т выигрывают по экономичности у 2Т при одинаковом объеме цилиндров.

В табл. 2 приведены данные по удельной массе конструкции и удельному расходу топлива также некоторых малоразмерных роторно-поршневых двигателей.

Удельный расход топлива ПД имеет большое значение для достижения максимума дальности или продолжительности полета ЛА. Эту связь иллюстрирует известное уравнение Бреге дальности горизонтального полета ЛА:

$$L = -\frac{KN_e \eta_B}{\mu g} \ln(1 - \bar{m}_T) = -\frac{K}{C_y} \ln(1 - \bar{m}_T), \quad (1)$$

где $K = Y / X$ — аэродинамическое качество для режима полета со скоростью V как отношение подъемной силы к силе сопротивления ЛА; N_e — эффективная мощность ПД, Вт; η_B — КПД винта;

Таблица 2

Производитель	Рабочий объем V , см ³	Вид топлива	Удельная масса $\gamma_{дв}$, кг/л.с	Мощность N_e , л.с.	Удельный расход топлива C_e , кг/л.с.ч
O.S.	5	Метанол	0,27	1,27	1,03
Nitto MFG. Works (3 модели)	20	Метанол	1,0	1,8	1,0
		Бензин	0,82	1,8	0,94
			0,8	1,8	0,49
Cubevano Ltd (3 модели)	30	Многотопливные	0,6	2,0	0,4
			0,5	5,0	0,36
			0,47	7,5	0,36

m_T — относительный запас топлива в начальной общей массе ЛА; μ — секундный расход топлива, кг/с; g — ускорение земного притяжения, м/с²; $C_y = \mu g / N_e \eta_B$ — удельный расход топлива. Если учесть, что дальность L и время полета T при постоянной или средней скорости V связаны соотношением $L = VT$, то уравнение Бреге позволяет производить ориентировочные расчеты L_{\max} и соответствующее ему T .

При небольших рабочих объемах (менее 20–30 см³) ПД, работающих на бензине, существенно падает их КПД по причине недостаточной удельной энергоёмкости топлива. Более энергоёмким заменителем является метиловый спирт с возможной добавкой до 10–15% нитрометана в калильных двигателях. Дело в том, что для сгорания 1 весовой части метилового спирта требуется 6,5, а у бензина — 14,7 весовых частей воздуха. Меньшая удельная теплота сгорания (19,6 МДж/кг у спирта и 42–44 МДж/кг у бензина) требует большего расхода сжигаемого топлива. В итоге теплотворная способность бензиновой и спиртовой смеси с воздухом составляет соответственно 2,96 и 3,446 Дж/л. Отсюда понятно, почему ПД на метиловом спирте развивают большие мощности. При этом указанное увеличение расхода метанола по отношению к бензину в значительной степени компенсируется увеличением оборотов, степени сжатия и обеспечением более полного сгорания.

У спирто-воздушной смеси почти в 2 раза большая скорость горения по сравнению с бензином, что позволяет увеличить оборотистость, в частности, 2Т ПД. Все моторы развивают самую

большую мощность на оборотах, близких к максимальным, что следует из выражения

$$N_e = \frac{M_{кр} n}{716,2}, \quad (2)$$

где $M_{кр}$, кг·м; n , об./мин; 716,2 — эмпирический коэффициент.

А так как 2Т мотор по принципу работы более быстроходен, чем 4Т, то и обороты (как и мощность) у него выше. Существенно и то, что метиловый спирт в 3,5 раза лучше охлаждает детали двигателя вследствие большей теплоты испарения по сравнению с бензином (1100 и 310 кДж/кг).

В табл. 3 приведены для сравнения технические характеристики 2Т и 4Т ПД одинакового рабочего объема. Из последних трех строк таблицы можно сделать вывод, что по удельному крутящему моменту, литровой массе и литровой мощности 4Т уступают 2Т. В связи с тем, что у 4Т меньше обороты и в 2 раза меньшая равномерность хода, чем у 2Т, то они работают с пропеллерами большего диаметра для получения оптимальной тяги и выполнения роли маховика. Из-за большей неравномерности $M_{кр}$ у 4Т также выше уровень вибраций (существенно для фото и видеокамер).

При выборе ПД практический интерес представляет соответствие взлетной массы и создаваемой силовой установкой тяги, которая зависит от мощности двигателя.

Установившийся горизонтальный полет ЛА при $H = \text{const}$, $G = \text{const}$ и скорости $V_x = \text{const}$ обеспечивается при потребных тяге $P_{ГП}$ и мощности $N_{ГП}$:

$$P_{ГП} = \frac{G}{K}; \quad N_{ГП} = P_{ГП} V_x, \quad (3)$$

Таблица 3

Тип и марка ПД	4-тактные				2-тактные			
	калильные		бензиновые		калильные		бензиновые	
	FS 120S-SP	FA-220A	FG-20	FG-36	120AX	BGX-1	ZG20	MLD35
V , см ³	20	36,3	20,5	36,3	19,96	35	20	35
m , г	1030	1096	690	1389	892	1340	1179	1220
N , л.с.	2,5	3,5	2,1	3,0	3,1	4,1	1,73	4,0
n , 1/мин	10000	8100	8700	8700	9000	10000	9500	9000
$n_{\min} - n_{\max}$, 1/МИН	2000–11000	1900–10000	1800–9500	1700–9000	1800–9500	1500–10000	1400–10000	1500–9500
$M_{кр.уд}$, кг·см/см ³	0,89	0,85	0,84	0,68	1,23	0,84	0,65	0,91
$m_{уд}$, г/см ³	51,5	30,2	33,7	38,3	44,6	38,2	59,0	35,0
$N_{уд}$, л.с./см ³	0,12	0,096	0,10	0,083	0,155	0,12	0,09	0,114

где H — высота полета; G — вес ЛА; K — аэродинамическое качество, зависящее от угла атаки α ЛА. Можно показать, что мощность, потребная для горизонтального полета, пропорциональна V^3 , а потребная тяга пропорциональна V^2 .

Установившийся подъем ЛА с $V_y = \text{const}$ возможен при избытке тяги ΔP над $P_{\text{ГП}}$ и избытке мощности ΔN над $N_{\text{ГП}}$:

$$\Delta P = G \sin \theta,$$

где θ — угол подъема;

$$\Delta N \approx G V_y. \quad (4)$$

Применение последней приближенной формулы оправдано для скоростей движения до 250–350 км/ч при наборе высоты и вертикальных скоростей $V_y \leq 10$ –20 м/с.

При выраже без снижения потребные тяга и мощность силовой установки определяются выражениями

$$P_{\text{в}} = P_{\text{ГП}} n_{\gamma}; N_{\text{в}} = N_{\text{ГП}} \sqrt{n_{\gamma}^3}, \quad (5)$$

где $n_{\gamma} = 1 / \cos \gamma$, нормальная перегрузка; γ — угол крена.

По формуле (5) при крене 20° мощность $N_{\text{в}}$ больше мощности $N_{\text{ГП}}$ на малую величину; при крене, равном 50° , — в 2 раза; при крене, равном 60° , — в 3 раза, а при крене, равном 70° , — в 5 раз больше.

В определенной степени возможности винтомоторной силовой установки характеризует развиваемая ею статическая тяга. На рис. 4 приведены результаты статистического обобщения данных статической тяги с оптимально подобранным винтом для силовых установок с некоторыми ПД небольшой мощности. При этом использованы данные, приводимые производителями двигателей, а также результаты измерений посредством динамометра, имеющиеся на форуме авиамodelистов www.forum.rcdesign.ru.

Аналитическую взаимосвязь статической (максимально достижимой) тяги винта, работаю-

щего на месте, и мощности двигателя отражает формула Вельнера – Жуковского:

$$P_0 = (33,25 \eta_{\text{в}} N_{\text{в}} D_{\text{в}})^{2/3}, \quad (6)$$

где $D_{\text{в}}$ — диаметр винта, м; $\eta_{\text{в}}$ — относительный КПД винта; $N_{\text{в}}$ — мощность двигателя на валу винта, л.с.

В полете тяга P , развиваемая воздушным винтом, уменьшается с увеличением скорости полета V , что следует из выражения (3).

Статическую тягу критерием качества в полном смысле считать нельзя, т. к. винт должен развивать достаточную тягу при выполнении полета. Для ЛА с заданной скоростью полета V существует оптимальный размер винта (диаметр и шаг), при котором тяга P и КПД $\eta_{\text{в}}$ будут максимальными. Тяга (КПД) винта с малым шагом монотонно уменьшаются с увеличением скорости полета, а у винта с большим шагом его статическая тяга может быть меньше, но с ростом скорости тяга (КПД) увеличиваются и при крейсерской скорости имеют наибольшие значения, а затем с ее ростом также уменьшаются.

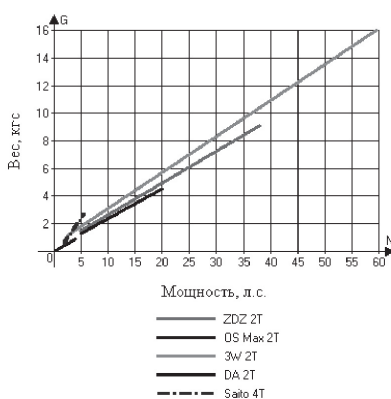


Рис. 1

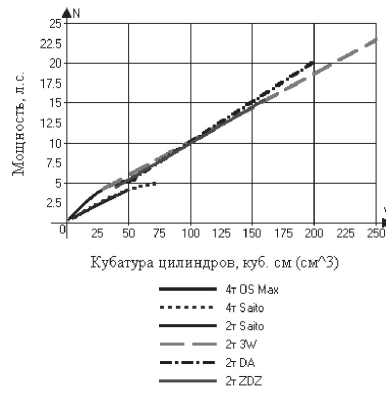


Рис. 2

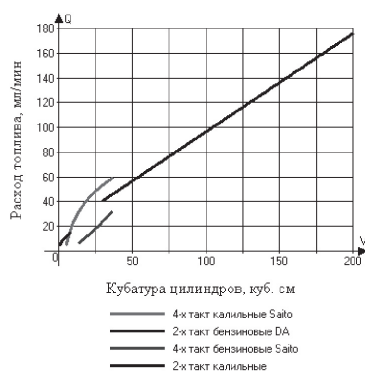


Рис. 3

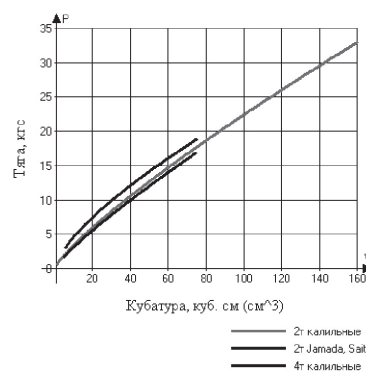


Рис. 4

Источники

1. Паспортные характеристики модельных двигателей из Интернет.
2. Gierke, D. Airplane Engine Guide / D. Gierke. — 2005.