

Базов Т.Х., Жучков И.А., Кулашев М.Ф., Рябухин М.И., Гарарак В.Г.

## МАЛОГАБАРИТНЫЕ МОБИЛЬНЫЕ МОТОР-ВЕСЫ ДЛЯ ДЕМОСТРАЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ И МОМЕНТОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАБОТЕ ВОЗДУШНОГО ВИНТА НА МЕСТЕ

В Краснодарском высшем военном авиационном училище летчиков разработан и внедрен в учебный процесс комплекс мобильных лабораторных установок, состоящий из камеры для визуализации обтекания тел плоским потоком жидкости, дымовой аэродинамической трубы и малогабаритной аэродинамической грубы, предназначенной, в частности, для демонстрации распределения давления по поверхности профиля, обтекаемого потоком воздуха [1,2].

В связи с тем, что в учебную программу по курсу "Аэродинамика и динамика полета" входят основы теории воздушного винта, возникла необходимость дополнить комплекс малогабаритных установок установкой для испытания воздушного винта при работе на месте (мотор-весы).

Мотор-весы, взятые в качестве прототипа, описаны в [3]. При этом винт находится в вертикальной плоскости, что потребовало свободной подвески привода к толчку и использования для измерения тяги  $T_{н.в}$  и мощности  $N_{н.в}$  трех весовых элементов довольно сложной конструкции и технологии их изготовления.

В условиях отсутствия специализированной аэродинамической лаборатории реализация подобной конструкции оказалась практически невозможной, тем более, что она является стационарной. Поэтому было принято решение разработать конструкцию мотор-весов, отвечающих следующим требованиям:

- мобильность установки;
- масса не более 2 кг;
- возможность монтажа установки без ее перепалки на столешнице лабораторного стола;
- наглядность демонстрации действующих сил и моментов;
- простота конструкции и технологии изготовления;
- питание от сети постоянного тока напряжением не более 27 В.

Исходя из этих требований, была выбрана маятниковая схема мотор-весов с измерением силы тяги методом силовой компенсации и крутящего момента по углу закручивания спиральной конической пружины. Общий вид установки представлен на рис. 1.

Вся система шарнирно подвешивается в точке А на оси, закрепленной в верхней части неподвижной стойки 1, нижняя часть которой выполнена в виде струбицы 2, с помощью которой стойка закрепляется на крышке рабочего стола 3.

Мотор-весы представляют собой коромысло 4 с установленной на нем в средней части вертикальной стойкой 5, в точке А имеющей шарикоподшипниковый шарнир.

На правом конце коромысла 4 установлен подшипниковый узел 6 с пружиной 7, шкивом 8 и чашкой 9. В чашке 9 неподвижно закрепляется электродвигатель 10 постоянного тока ( $U = 27 \text{ В}$ ), на свободном конце вала которого крепится испытываемый воздушный винт 11. Причем винт устанавливается так, чтобы сила его тяги была направлена вниз.

Свободный конец пружины 7 соединен с верхней поверхностью коромысла 4 таким образом, чтобы можно было изменять и фиксировать жесткость пружины 7 при настройке системы.

На том же коромысле 4 жестко закреплена шкала 12, проградуированная в единицах крутящего момента (Нм). Градуировка производится с помощью гирь, укладываемых в левую чашку весов 13, вес которых через блок 14 передается на неподвижный шкив 8, установленный на подшипниковом узле 6. Крутящий момент фиксируется по показаниям стрелки 15, жестко связанной со шкивом 8. По окончании градуировки гири из чашки 13 вынимаются и в дальнейшем до контрольной поверки в работе не участвуют.

В верхней части стойки 5 неподвижно закреплена шкала 16, служащая для установки мотор-весов на "ноль" при измерении силы тяги.

Установка мотор-весов на "ноль" контролируется с помощью неподвижной стрелки 17, жестко связанной со стойкой 1.

На левом конце коромысла 4 закреплена направляющая 18, выполненная из стального прутка диаметром 8 мм. На направляющей 18 установлены неподвижная шкала 19, проградуированная в единицах силы тяги (Н), и подвижный рейтер 20, фиксируемый на направляющей 18 винтом 21 после установки мотор-весов на "ноль".

Градуировка шкалы 19 также выполняется с помощью гирь, укладываемых в правую чашку весов 22, подвешенную на оси вращения винта.

Перед градуировкой шкалы 19 по силе тяги установка балансируется. При этом рейтер 20, на котором закреплена стрелка 23, устанавливается в точке, соответствующей началу отсчета по шкале 19, а в чашку 22 укладываются гири или какие-либо дру-

гие грузы до тех пор, пока "ноль" шкалы 16 не совпадет со стрелкой 17. В дальнейшем эти грузы постоянно находятся в чашке 22, статически уравновешивая установку.

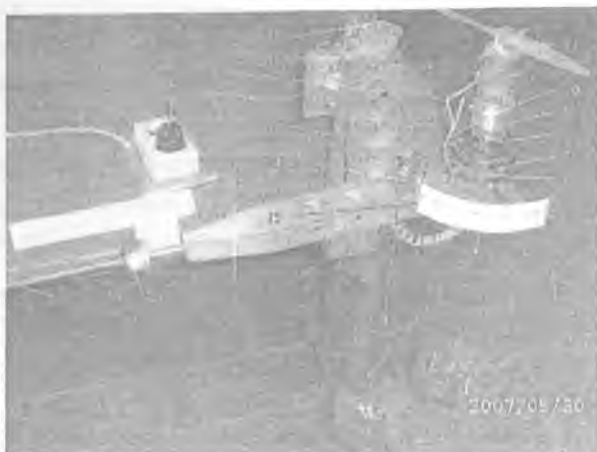


Рис. 1. Малогабаритные мотор-весы для демонстрации аэродинамических сил и моментов, возникающих при работе воздушного винта на месте:

- 1 – стойка; 2 – трубуцина; 3 – стол; 4 – коромысло; 5 – стойка коромысла;  
 6 – узел подшипниковый; 7 – пружина; 8 – шкив; 9 – чашка; 10 – электродвигатель;  
 11 – винт воздушный; 12 – шкала крутящего момента; 13 – чашка весов крутящего момента; 14 – блок; 15 – стрелка указателя крутящего момента; 16 – шкала установки на "ноль"; 17 – стрелка указателя "ноля"; 18 – направляющая; 19 – шкала силы тяги воздушного винта; 20 – рейтер; 21 – винт стопорный; 22 – чашка весов силы тяги

При включении двигателя 10 под действием возникшей силы тяги винта коромысло 4 поворачивается относительно точки А по часовой стрелке и установка сходит с "ноля". Путем перемещения рейтера 20 влево ее вновь устанавливают на "ноль" и с помощью стрелки 23 по шкале 19 определяют силу тяги винта.

Частота вращения винта измеряется с помощью тахометра, собранного на базе автомобильного компьютера БК-03, запитываемого универсальным сетевым адаптером БАД 3000. В качестве датчика используется система, состоящая из специальной скобы, установленной на винте, а также светодиода и фотодиода, установленных на двигателе 10 и связанных с прибором БК-03.

При испытаниях мотор-весов оценивались следующие характеристики:

- погрешность установки "ноля";
- погрешность измерения крутящего момента в диапазоне частот вращения ( $n_T$ ) от 6400 до 8200 об/мин;
- погрешность измерения силы тяги в том же диапазоне частоты вращения.

Погрешность измерения частоты вращения принималась соответствующей классу точности прибора БК-03.

Погрешность установки "ноля" оценивалась по результатам десятикратных измерений расстояний от торца коромысла 4 до рабочей кромки стрелки рейтера 20. При этом перед каждым замером рейтер 20 сдвигался влево от первоначального положения, после чего возвращался вправо, пока стрелка 17 не возвратится в исходное положение.

Погрешности измерения крутящего момента и силы тяги оценивались по результатам пятикратных измерений в шести контрольных точках диапазона частоты вращения винта.

Все оценки выполнялись при доверительной вероятности  $p = 0,95$  (табл. 1).

Кроме того были определены аэродинамические характеристики авиамодельного воздушного винта (диаметр 200 мм), а именно:

$\alpha$  – коэффициент силы тяги воздушного винта;

$\beta$  – коэффициент мощности воздушного винта;

$\eta_0$  – относительный коэффициент полезного действия воздушного винта.

Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\eta_0$  применяются в практике самолетного винтостроения. В практике вертолетостроения чаще используются другие коэффициенты, а именно коэффициент силы тяги несущего винта  $C_T$  и коэффициент крутящего момента несущего винта  $m_k$ .

Перечисленные коэффициенты определялись по формулам:

$$\alpha = \frac{T_{вв}}{\rho n_c^2 D^4}, \quad (1)$$

где  $T_{вв}$  – тяга воздушного винта (Н);  $\rho$  – плотность воздуха ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $n_c$  – секундная частота вращения винта ( $\text{с}^{-1}$ );  $D$  – диаметр воздушного винта (м);

$$\beta = \frac{2\pi M_{кр}}{\rho n_c^2 D^3}, \quad (2)$$

где  $M_{кр}$  – крутящий момент винта (Нм);

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\alpha^{2/3}}{\beta}}, \quad (3)$$

$$C_T = \frac{2T_{вв}}{\rho(\omega R)^2 \pi R^2}, \quad (4)$$

где  $\omega R$  – окружная скорость (м/с);  $\omega$  – угловая скорость вращения винта (рад/с);

$$\omega = 2\pi \cdot n_c, \quad (5)$$

$R$  – радиус винта (м);

$$m_k = \frac{2M_{кр}}{\rho(\omega R)^2 \pi R^3}, \quad (6)$$

Результаты оценки погрешностей измерений контролируемых величин представлены в табл. 1, а результаты испытаний воздушного винта, обработанные по методу наименьших квадратов, – в табл. 2.

Таблица 1 – Результаты оценки погрешностей измерений

Выполняемое измерение	Относительная погрешность измерений, ±%
1. Установка мотор-весов на "ноль"	3,0
2. Измерение крутящего момента	2,5
3. Измерение силы тяги воздушного винта	4,3

Таблица 2 – Результаты испытаний воздушного винта при работе на месте

Характеристика винта	Выявленная зависимость
1. Тяга	$T_{\text{в.в.}} = 0,503(n_c^2 \cdot 10^{-4}), H$
2. Крутящий момент	$M_{\text{кр.в.в.}} = 4,1(n_c^2 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^{-4}, Hm$
3. Мощность	$N_{\text{в.в.}} = 4,33(n_c^3 \cdot 10^{-6}), Bm$
4. Коэффициент силы тяги	$\alpha = const = 0,0256$
5. Коэффициент мощности	$\beta = const = 0,0066$
6. Относительный коэффициент полезного действия воздушного винта	$\eta_0 = const = 49,5\%$
7. Коэффициент силы тяги несущего винта	$C_T = const = 4,1 \cdot 10^{-4}$
8. Коэффициент крутящего момента несущего винта	$m_k = const = 1,69 \cdot 10^{-5}$

Как видно из результатов испытаний разработанных мотор-весов, они полностью отвечают исходным требованиям и не только обладают точностью измерений, достаточной для проведения лабораторных работ (табл.1), но и обеспечивают возможность изучения всего объема аэродинамических характеристик как воздушного, так и несущего винта (табл. 2).

#### Библиографический список

- Кулашев М.Ф., Жучков И.А., Базоев Т.Х. Комплекс мобильных лабораторных установок для визуализации процессов обтекания тел при изучении дисциплины "Аэродинамика" // Сб. трудов XI Всероссийского научно-технического семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов / Самарский государственный аэрокосмический университет. Самара, 2003, с. 249 – 254.
- Базоев Т.Х., Кулашев М.Ф., Распопов А.Н. Особенности конструкции малогабаритной аэродинамической трубы // Инновационные технологии в образовательном процессе. Материалы VII межвузовской научной конференции. Том 1 / КВВАУЛ, КубГУ, КубГТУ. Краснодар, 2005, с.42 – 44.
- Горшенин Д.С., Мартынов А.К. Руководство к практическим занятиям в аэродинамической лаборатории.: М. "Машиностроение". 1967.