УДК 533.6.011

ВРАЩАТЕЛЬНОЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Герасимов С.А.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Подробная информация об авторах размещена на сайте
«Учёные России» - http://www.famous-scientists.ru

Во вращательном режиме сила аэродинамического сопротивления в несколько раз больше силы, с которой воздух действует на то же тело, движущееся поступательно.

То, что сила аэродинамического сопротивления, действующая на вращающееся тело, существенно отличается от той же силы, действие которой испытывает тело при прямолинейном движении, не вызывает сомнений. Во-первых, в первом случае речь идет о динамическом режиме [1], в котором может проявлять себя, к примеру, эффект присоединенной массы [2]. Во-вторых, скорость протяженного тела при вращательном движении становится неопределенной величиной. Наконец, при вращательном движении наиболее заметной может быть интерференция обтекания тела воздухом [3]. Известные же экспериментальные результаты [4,5] в основном относятся к прямолинейному движению тела в воздухе. Более того, будучи полученными из экспериментов в аэродинамических трубах, если строго, они описывают не силу, испытываемую движущимся в воздухе телом, а силу, с которой движущийся воздух действует на покоящееся тело. Даже если такие опасения преждевременны, все это должно быть проверено, разумеется, экспериментально.

Элемент поверхности hdr плоскости, вращающейся с угловой скоростью ω, испытывает действие силы аэродинамического сопротивления

$$dF=-\frac{C\rho}{2}\omega^2 r^2 hdr, \qquad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, C – коэффициент аэродинамического сопротивления. Отсюда следует, что момент силы аэродинамического сопротивления, действующего на вращающуюся плоскость, должен быть равен

$$N=-\frac{C\rho}{2}h\omega^2\int_0^R r^3 dr=-\frac{C\rho}{8}S\omega^2 R^3, \qquad (2)$$

а уравнение движения подвижной части измерительной установки после выключения двигателя (рис. 1) приобретает вид

$$J\frac{d\omega}{dt}=-\frac{C\rho}{8}S\omega^2 R^3-\sigma\omega^2, \qquad (3)$$

где S – площадь плоскости, J – момент инерции подвижной части измерительной установки, включающей, в том числе, и ротор двигателя. Второе слагаемое в правой части уравнения (3) описывает момент сил сопротивления, испытываемого подвижной частью установки без плоскости. Сюда входит также момент сил, обусловленный трением в осях двигателя. Решение уравнения для системы, нагруженной исследуемой плоскостью:

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 + \alpha\omega_0 t}, \tag{4}$$

где ω_0 – угловая скорость вращения плоскости в момент времени t=0 и

$$\alpha = \frac{C\rho SR^3 + 8\sigma}{8J} \tag{5}$$

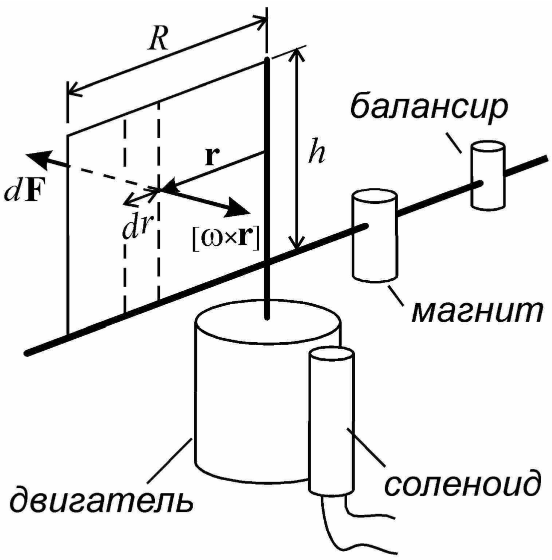

Рис. 1. Схема эксперимента

– для системы нагруженной исследуемым телом и

$$\alpha = \alpha_* = \frac{\sigma}{J_*} \tag{6}$$

– для подвижной системы без плоскости. Отсюда

$$C = \frac{8(J\alpha - J_*\alpha_*)}{\rho SR^3}. \tag{7}$$

Моменты инерции ненагруженной и нагруженной подвижной части определяются либо расчетным путем, либо экспериментально. В последнем случае следует провести дополнительное измерение для системы, момент инерции которой увеличен на известную величину. Коэффициенты α и α_* определяются исходя из следующих соображений. Поскольку угловая скорость вращения ω связана с углом поворота φ выражением $\omega = d\varphi/dt$, то

$$\varphi = \frac{1}{\alpha}\ln(1 + \alpha\omega_0 t), \tag{8}$$

где ω_0 – угловая скорость подвижной части в момент времени t=0. Пусть t_i – моменты времени, в которых индукционный ток максимален (рис. 2), что в той или иной степени соответствует минимальному расстоянию между вращающимся источником магнитного поля (постоянным магнитом), установленном на одном плече подвижной части системы, и соленоидом. Тогда моменты времени t_{i+1} и t_i должны удовлетворять необходимому условию

$$2\pi=\frac{1}{\alpha}\ln\frac{1+\alpha\omega_0 t_{i+1}}{1+\alpha\omega_0 t_i}.$$

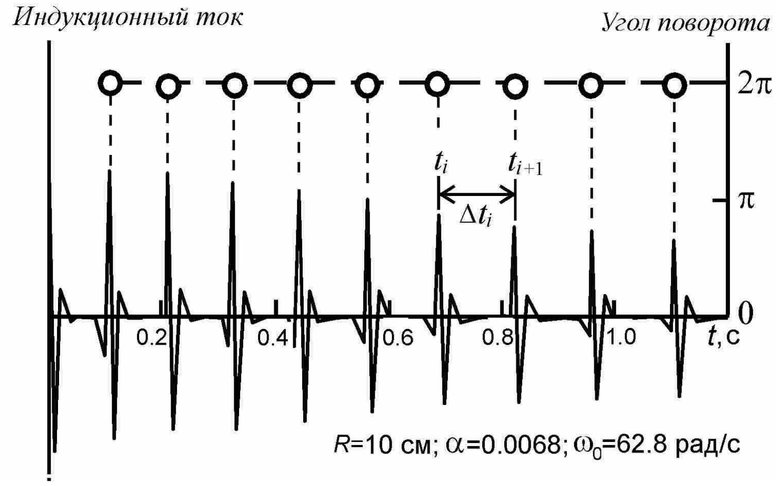

Рис. 2. Индукционный ток как функция времени

Более того, неизвестные величины α и ω_0 являются нетривиальным (ненулевым) решением системы уравнений

$$\frac{1+\alpha\omega_0 t_{i+n}}{1+\alpha\omega_0 t_i}=e^{2n\pi\alpha}$$
$$\frac{1+\alpha\omega_0 t_{i+2n}}{1+\alpha\omega_0 t_{i+n}}=e^{2n\pi\alpha} \quad (9)$$

При этом система уравнений (9) имеет аналитическое решение, что, по существу, делает задачу корректно поставленной. Другими словами, это позволяет не только определить коэффициент аэродинамического сопротивления, но и выяснить его зависимость от скорости. Однако, самый важный и самый интересный результат заключается не в этом. Во-первых, определенный таким образом коэффициент аэродинамического сопротивления оказался более чем в два раза больше известного значения для плоскости 1.1 [4,5]. Совершенно неожиданной оказалась нерегулярность коэффициента С при изменении горизонтального размера вращающейся плоскости (рис. 3). Наиболее подозрительным кажется существование минимума коэффициента аэродинамического сопротивления в зависимости от R при частоте вращения около 10 Гц. Ясно, что это не является результатом методической ошибки. Об этом свидетельствуют результаты, соответствующие сравнительно низким начальным угловым скоростям вращения ω_0. С другой стороны, маловероятно, что это последствие так называемого кризиса аэродинамического сопротивления [6]. Резкое уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления, называемое кризисом, должно наступать при числах Рейнольдса Re, составляющих величину около $3\cdot10^5$. Минимум же величины C, показанный на рис. 3, имеет место при $\mathrm{Re}\approx\rho\omega_0 R^2/2\mu=2.2\cdot10^4$. А вообще, считается, что кризис аэродинамического сопротивления для плоскости должен отсутствовать [6]. С другой стороны, продемонстрированные выше результаты относятся к скоростям, где аэродинамическое сопротивление является квадратичным по скорости, а его коэффициент должен иметь постоянное значение, приблизительно равное 1.1. Едва ли этот вывод нуждается в проверке. Детальному изучению должны быть подвергнуты особенности аэродинамического сопротивления, возникающие в динамическом режиме. Кстати говоря, косвенным подтверждением приведенных выше результатов является попытка измерить силу аэродинамического сопротивления, действующего на маятник Максвелла, снабженный лопастями [7]. Не отличаясь достаточной точностью, такие измерения, как оказалось, тем не менее предлагают коэффициент аэродинамического сопротивления $C \approx 2.6$.

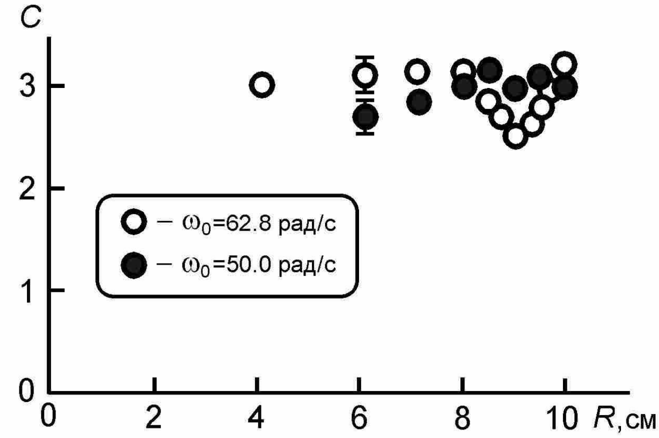

Рис. 3. Коэффициенты аэродинамического сопротивления при различных размерах плоскости и начальных угловых скоростях вращения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Герасимов С.А. Об автомодельности аэродинамического сопротивления. // Вестник машиностроения. 2007. № 1. С. 34-35.
2. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т. 2. – М.: «Лань», 2004. – 560 с.
3. Петров К.П. Аэродинамика тел простейших форм. – М.: «Факториал», 1998. – 432 с.
4. Sovran G., Morel T., Mason W.T. Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles. – New York: Plenum Press, 1978. – 360 p.
5. Pivit R. Measuring Aerodynamic Drag. // Radfahren. 1990. V. 2. P. 44-49.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Физматлит, 2006. 736 с.
7. Благодарный В.В. Маятник Максвелла в опытах по аэродинамике. // Учебная физика. 2007. № 1. С. 103-106.

ROTATING AERODYNAMIC DRAG RESISTANCE

Gerasimov S.A.
Southern federal university, Rostov-on-Don

In rotation regime, the drag force is some times greater than the resistance force by means which air acts on the same body in translation motion.