DOI: 10.17117/na.2016.05.03.041

Поступила (Received): 24.05.2016

<http://ucom.ru/doc/na.2016.05.03.041.pdf>**Герасимов С.А.****Вращающийся цилиндр с двойным плоским экранированием: подъемная сила и потери энергии****Gerasimov S.A.****Rotating cylinder with double plane screening:
lift force and dissipation of energy**

Экспериментально изучается явление, аналогичное эффекту Магнуса. Система представляет собой длинный цилиндр, вращающийся с большой скоростью между двумя симметричным плоскими экранами. Даже в воздухе такая система испытывает существенную силу, играющую роль подъемной. Подъемная сила измерена при различных геометрических параметрах установки и при различных частотах вращения цилиндра. Экспериментальные результаты удовлетворяют свойству автомодельности аэродинамических систем, что позволяет настаивать на их универсальном характере. Оказалось, что горизонтальная составляющая полной силы, действующей на цилиндр, много меньше вертикальной, что свидетельствует о малых диссипативных потерях энергии. Предложено полуэмпирическое выражение, описывающее весь массив экспериментальных данных, в том числе и удовлетворяющее свойству автомодельности

Ключевые слова: эффект Магнуса, экран, подъемная сила, касательное сопротивление

A phenomenon analogous to the Magnus effect is studied experimentally. The system is a long cylinder rotating with high speed between two symmetrical plane screens. Even in air such a system exerts considerable force playing role of the lift one. The lift force is measured at various sizes of the experimental setup and for various frequencies of rotation of the cylinder. Experimental results satisfy the scaling property of aerodynamic systems, what enables to insist on the universal character of the results. The horizontal component of the net force acting on the rotating cylinder is proven to be small in comparison with the vertical one that confirms that the dissipative energy losses are small. Semi-empirical relation describing all the massive of experimental data is proposed

Key words: magnus effect, screen, lift force, tangent resistance

Герасимов Сергей Анатольевич

Кандидат физико-математических наук, доцент
Южный федеральный университет
г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5

Gerasimov Sergey Anatolievich

Candidate of Physico-mathematical Sciences,
Associate Professor
Southern federal university
Rostov-on-Don, Zorge st., 5

Существуют аргументы, согласно которым тело, движущееся вблизи экрана, должно испытывать существенную подъемную силу [1]. Особый интерес представляет система с длинным гладким цилиндром, вращающимся внутри части другого тонкого цилиндра, расположенного в непосредственной близости от вращающегося тела [2]. Появление подъемной силы в этом случае

вытекает из рассмотрения обтекания средой вращающегося частично-экранированного цилиндра, сама же сила соизмерима с силой Магнуса и, поэтому, кажется сомнительной из-за чрезвычайно большого ее значения. Одной из причин этого может быть характер граничного условия: предполагалось, что скорости среды и тела на поверхности того и другого тела, вращающегося цилиндра и покоящегося экрана, совпадают. Вторая причина заключается в том, что решение задачи получено в рамках так называемой непотенциальной аэродинамики, для которой использование теоремы Остроградского-Гаусса для вычисления подъемной силы мало обосновано. Поэтому отождествлять подъемную силу, возникающую при экранированном вращении цилиндра, с силой Магнуса [3] преждевременно. Экспериментально эффект Магнуса изучен лишь в традиционном или прикладном варианте, то есть для вращающегося тела в поперечном потоке [4,5]. Несмотря на большое число проектов и технических решений, использующих эффект Магнуса в аэродинамике [5], едва ли такие выводы можно назвать экспериментальными результатами. Как следствие экспериментальные данные, в той или иной степени относящиеся к вращающемуся экранированному цилиндру, отсутствуют вообще, а известные результаты изучения эффекта Магнуса для оценки возникающей при этом силы не пригодны.

Рис. 1. Длинный цилиндр *C*, вращающийся между двумя плоскими экранами *S*.

Подъемная сила Магнуса обусловлена разностью относительных скоростей сверху и снизу вращающегося движущегося цилиндра [3]. Следуя такой интерпретации эффекта, скорость среды в одной части пространства, окружающего вращающееся тело, следует подавить. Чтобы избежать противоречий, обусловленных возможным движением среды вдоль части цилиндрического экрана, находящегося в непосредственной близости от вращающегося цилиндра, имеет смысл несколько изменить характер экранирования (рис. 1). В такой схеме малая величина зазора Δ позволит не только устранить движение среды

вместе с цилиндром в области под экранами, но и, тем самым, существенно увеличить подъемную силу F . Обозначения: l и w – длина и ширина каждого экрана, соответственно; ω – угловая скорость, c – радиус цилиндра, длина которого совпадает с длиной экранов. Среда, разумеется, не является идеальной. Поэтому кроме вертикальной составляющей силы, может возникнуть и горизонтальная, что означает целесообразность измерения вертикальной компоненты силы при различных углах наклона экранов φ по отношению к вертикали Y . Следующий важный параметр системы – угол экранирования δ (рис. 1). Необходимость экспериментального определения подъемной силы при различных углах экранирования очевидна: например, при угле экранирования, равном π , система становится абсолютно симметричной, что означает отсутствие подъемной силы. Нет оснований считать, что полная сила будет максимальна и при $\delta=0$.

Рис. 2. Зависимость относительной подъемной силы от угла экранирования φ и угла наклона системы δ . Точки – экспериментальные результаты для $c=0,02$ м (○) и $c=0,04$ м (●); $l=4c$. Кривые – зависимость (1).

Подъемная сила должна быть пропорциональна скорости и массе среды, перекачиваемой тем или иным устройством в единицу времени. Из плотности среды ρ , скорости ωc и площади боковой поверхности цилиндра, пропорциональной cl , можно составить единственную комбинацию $\rho\omega^2c^3l$, имеющую размерность силы. Поэтому относительная сила $F/\rho\omega^2c^3l$ должна обладать свойством автомодельности [6], то есть при прочих равных условиях должна быть постоянной величиной. Кроме безразмерных параметров системы δ и φ , подъемная сила, надо полагать, достаточно сильно зависит от величины зазора Δ . По этой причине экспериментальные данные, претендующие на автомодельность, должны быть получены при одной и той же относительной величине зазора Δ/c . Результаты таких измерений представлены на рис. 2. Поскольку они получены

при двух различных радиусах цилиндра s , но, правда, для достаточно узкого диапазона частот вращения от 35 Гц до 55 Гц, то автомодельность, судя по всему, выполняется. Во всем диапазоне изменений параметров δ и φ подъемная сила может быть описана выражением

$$F \approx \frac{\rho \omega^2 c^3 l}{40} \cos^2 \left(\frac{3\delta}{4} - \frac{\pi}{4} \right) \cos^2 \varphi, \quad (1)$$

справедливым при сравнительно большой относительной величине зазора $\Delta/c=1/20$.

Единственным неожиданным результатом измерений оказалось отсутствие горизонтальной составляющей силы для ненаклоненной системы ($\varphi=0$). Это, впрочем, можно объяснить чрезвычайно малой величиной силы касательного трения, что находится в полном соответствии с другими измерениями [7]. С этой точки зрения среда ведет себя как идеальная, для которой сопротивление среды попросту отсутствует. Это достаточно важный и перспективный факт. Вызывает оптимизм и максимальное значение подъемной силы, появляющееся при $\delta \approx \pi/3$. Например, при радиусе $s=1$ м, длине $l=4$ м и частоте вращения 50 оборотов в секунду максимальное значение подъемной силы составляет 12817 ньютонов, что соответствует массе поднимаемого груза 1308 кг. Если же вращающийся экранированный цилиндр радиусом $s=0,1$ м и длиной 1 м находится в воде, то максимальное значение силы при той же частоте равно $2,46 \cdot 10^3$ Н. И это не предел, поскольку максимальное значение силы, полученное в настоящей работе, пока остается существенно меньшим по сравнению с силой Магнуса. Эти цифры в совокупности с очень малыми потерями энергии, затрачиваемой на вращение, делает рассматриваемую систему перспективной не только в аэродинамике, но и в технике вообще.

Список используемых источников:

1. Gerasimov S.A. *Semiperiodic Screening of a Rotating Wing* // *Russian Engineering Research*. 2008. V. 28. No 8. P. 762-763.
2. Герасимов С.А. Движение среды при экранированном вращении цилиндрического тела // *Динамика сложных систем*. 2012. Т. 6. № 2. С. 138-141.
3. Zdravkovich M.M. *Flow around Circular Cylinder*. New York: Oxford University Press, 2003. 612 p.
4. Swanson W.M. *The Magnus Effect: A Summary of Investigation to Date* // *Transactions of ASME*. 1961. V. 83. No 3. P. 461-470.
5. Seifert J. *A Review of the Magnus Effect in Aerodynamics* // *Progress in Aerospace Sciences*. 2012. V. 55. No 11. P. 17-45.
6. Седов Л.И. *Методы подобия и размерности в механике*. М.: Наука, 1977. 440 с.
7. Бычков Н.М. Коваленко В.М. Аэродинамические силы на вращающемся гладком цилиндре в поперечном потоке // *Известия СО АН СССР. Технические науки*. 1980. № 8. Вып. 2. С. 125-135.