

УДК 532.5: 533.6 : 621.48

## АНАЛОГИЯ МЕЖДУ МАШУЩИМ КРЫЛОМ И ВЕТРОКОЛОСОМ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Д. Н. Горелов

Омский филиал Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН, 644099 Омск  
E-mail: gorelov@ofim.oscsbras.ru

На основе анализа имеющихся экспериментальных данных дано обоснование гипотезы об аналогии машущего крыла и ветроколеса типа ротора Дарье. Показано, что на валу ротора Дарье крутящий момент создается силами тяги, действующими на лопасти в пульсирующем потоке. Сделан вывод о необходимости проведения аэродинамического расчета лопастей на основе нелинейной теории крыла в нестационарном потоке с учетом толщины профиля.

Ключевые слова: машущее крыло, ветроколесо, ротор Дарье.

Одним из перспективных направлений в ветроэнергетике является разработка ветроэнергетических установок с ветроколесом типа ротора Дарье [1]. Ветроколеса этого типа существенно отличаются от традиционных пропеллерных ветроколес, имеют вертикальную ось вращения и могут работать при любом направлении ветра, не требуя систем ориентации по потоку. По своим энергетическим характеристикам такие ветроустановки приближаются к лучшим образцам установок пропеллерного типа. Например, в конструкторском бюро “Вертикаль” (г. Миасс, Россия) разработана установка с двухъярусным ротором (рис. 1), коэффициент полезного действия которой в опытной эксплуатации достигал 40 %.

Исследования вертикально-осевых ветроколес интенсивно ведутся с начала 80-х гг. XX в. В частности, разрабатываются методы аэродинамического расчета лопастей [2, 3]. Обнаружено, что в большинстве случаев такой расчет в рамках модели стационарного течения не позволяет точно предсказать величину крутящего момента и коэффициента использования энергии потока. Причиной этого является существенная нестационарность течения вблизи вращающегося ротора. Для объяснения взаимодействия лопастей вращающегося ротора Дарье с потоком в [4] выдвинута гипотеза об аналогии между ротором Дарье и машущим крылом. Рассмотрим основные элементы этой гипотезы.

1. В рабочем режиме машущее крыло и лопасти ротора Дарье обтекаются нестационарным потоком. Такой поток порождает силу тяги, которая зависит от амплитуды и частоты пульсаций потока, а также от геометрических параметров лопасти (крыла). Сила тяги, действующая на лопасти, создает аэродинамический момент, вращающий ротор Дарье. В отличие от ротора Дарье у ветроколеса пропеллерного типа крутящий момент создается подъемными силами, действующими на лопасти, при этом аэродинамический расчет ведется в рамках модели стационарного течения. Следует отметить, что в стационарном течении сила тяги не возникает (на крыло действуют только подъемная сила и сила сопротивления), поэтому механизмы образования крутящего момента у ротора Дарье и ветроколеса пропеллерного типа принципиально различаются.

2. Машущее крыло является основным движителем в природе. Ими обладают птицы, насекомые и большинство животных, обитающих в воде. Коэффициент полезного дей-



Рис. 1

Рис. 1. Опытный образец двухъярусного ротора Дарье

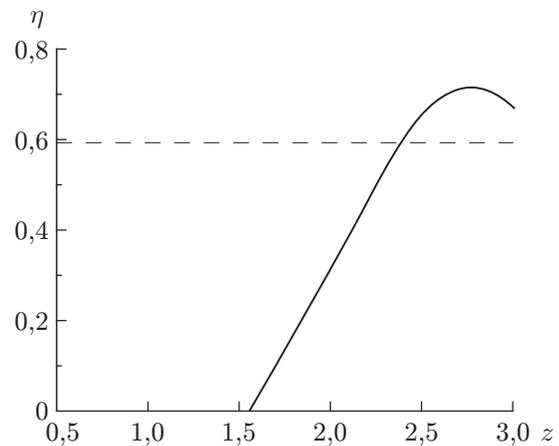


Рис. 2

Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента использования энергии потока  $\eta$  от коэффициента быстроходности для “идеального” ротора Дарье: штриховая линия — предельное значение коэффициента  $\eta = 0,593$  для идеального ветроколеса пропеллерного типа

ствия такого движителя может быть очень близким к единице, вследствие чего птицы и насекомые в период миграции способны преодолевать огромные расстояния с малыми затратами своего “биологического топлива”. Поскольку между ротором Дарье и машущим крылом имеется аналогия, естественно предположить, что ротор Дарье также может иметь большое значение коэффициента полезного действия. Доля кинетической энергии потока, которую может “забрать” ветроколесо, определяется коэффициентом использования энергии потока  $\eta$ . Для идеального ветроколеса пропеллерного типа предельное значение коэффициента  $\eta = 0,593$  [3]. Для того чтобы определить, могут ли значения коэффициента использования энергии потока у ротора Дарье быть больше, чем у идеального ветроколеса пропеллерного типа, на модели идеального ротора Дарье (без траверс, соединяющих лопасти с вертикальным валом) проведен специальный эксперимент. Модель имела три лопасти, расположенные между двумя плоскими шайбами. Исследовались четыре набора лопастей различной ширины. Эксперимент проводился в гидроканале в условиях пренебрежимо малого влияния границ потока. Подробное описание и результаты эксперимента изложены в работе [5]. Основной результат этой работы представлен на рис. 2 в виде зависимости коэффициента использования энергии потока  $\eta = 2M\omega/(\rho v^3 S)$  от коэффициента быстроходности  $z = \omega R/v$  ( $M$  — крутящий момент на валу ротора;  $\omega$  — круговая частота вращения вала;  $\rho$  — плотность жидкости;  $v$  — скорость потока;  $S$  — площадь поперечного сечения ротора;  $R$  — радиус ротора). В рассматриваемом эксперименте для “идеального” ротора Дарье получено максимальное значение коэффициента  $\eta = 0,72$ , тогда как для идеального ветроколеса пропеллерного типа предельное значение коэффициента  $\eta = 0,593$  (см. рис. 2). Приведенные экспериментальные данные показывают, что энергетические характеристики идеального ротора Дарье могут быть выше соответствующих предельных характеристик идеального ветроколеса пропеллерного типа.

Следует отметить, что предельное значение коэффициента  $\eta$  для идеального пропеллера получено теоретически в рамках модели стационарного движения идеальной несжимаемой жидкости, тогда как экспериментальное исследование “идеального” ротора Дарье проводилось в условиях нестационарного движения среды. В этих условиях лопасти ротора Дарье обтекались потоком аналогично тому, как обтекается машущее крыло, чем и объясняется большее значение коэффициента  $\eta$ .

**3.** Экспериментальные исследования показывают, что сила тяги, создаваемая колеблющимся крылом, существенно зависит от относительной толщины крыла [6]. Наиболее полно эта зависимость исследована в [7]. Для испытаний были выбраны симметричные крылья серии НАСА с относительной толщиной  $c = 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,18; 0,21$ , хордой  $b = 0,15$  м и удлинением  $\lambda = 2$ . Крылья совершали поступательные колебания перпендикулярно хорде по гармоническому закону с амплитудой  $A = b$  и  $A = 0,7b$ . Результаты испытаний, полученные в настоящей работе для круговой частоты колебаний крыльев  $\omega = 2\pi \text{ с}^{-1}$ , представлены на рис. 3 в виде зависимости коэффициента силы тяги  $C_T = 2R_T/(\rho S(b\omega)^2)$  от относительной толщины крыла  $c$  ( $R_T$  — среднее значение силы тяги за период колебаний;  $S$  — площадь крыла).

Увеличение относительной толщины крыла с 6 до 21 % приводит к увеличению силы тяги в четыре раза, что можно объяснить только нестационарным характером обтекания крыльев. Максимальное значение силы тяги достигается при толщине крыла  $c = 0,21$ . Заметим, что именно такую относительную толщину (18–20 %) имеет хвостовой плавник дельфина.

Аналогичная зависимость силы тяги от толщины крыла имеет место и для ротора Дарье. На рис. 4 приведена экспериментальная зависимость коэффициента использования энергии потока  $\eta$  от относительной толщины лопастей ротора Дарье [8]. Для ротора Дарье крутящий момент определяется силами тяги, действующими на лопасти, поэтому зависимость  $\eta(c)$  аналогична зависимости  $C_T(c)$ . Максимальное значение коэффициента  $\eta$  достигается при относительной толщине лопасти  $c = 0,18$ . Как и в экспериментах с машущим крылом, при уменьшении относительной толщины лопасти значение коэффициента  $\eta$  (силы тяги) также резко уменьшается.

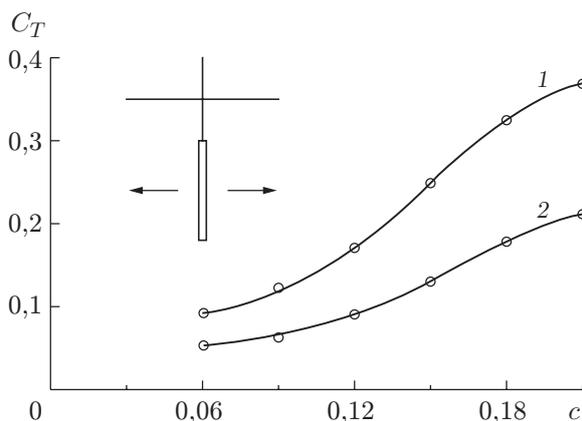


Рис. 3

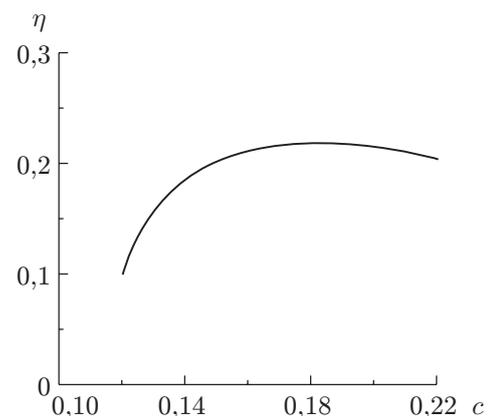


Рис. 4

Рис. 3. Зависимость коэффициента силы тяги от относительной толщины профиля при поперечных колебаниях крыла в “неподвижной” жидкости:

1 —  $A/b = 1$ ; 2 —  $A/b = 0,7$

Рис. 4. Зависимость коэффициента использования энергии потока  $\eta$  от относительной толщины лопастей ротора Дарье [8]

**Заключение.** Представленные результаты позволяют сделать вывод, что между машущим крылом и ветроколесом типа ротора Дарье имеет место аналогия, поэтому аэродинамический расчет для ротора Дарье следует проводить на основе нелинейной теории крыла в нестационарном потоке с учетом формы профиля лопастей.

Объяснение механизма взаимодействия лопастей ротора Дарье с ветровым потоком позволяет найти решение ряда практических задач [4, 5, 9] включая получение высоких энергетических характеристик, ограничение частоты вращения ротора и его запуск.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Галась М. И., Дымковец Ю. П., Акаев Н. А., Костюков И. Ю.** О целесообразности создания вертикально-осевых ветроэлектрических установок мегаваттного класса // Энерг. стр-во. 1991. № 3. С. 33–37.
2. **Турян К. Дж., Стрикленд Дж. Х., Берг Д. Э.** Мощность ветроэлектрических агрегатов с вертикальной осью вращения // Аэрокосм. техника. 1988. № 8. С. 105–121.
3. **Ершина А. К.** Основы теории ветротурбины Дарье / А. К. Ершина, Ш. А. Ершин, У. К. Жанбасбаев. Алматы: Каз. гос. ин-т науч.-техн. информ., 2001.
4. **Горелов Д. Н.** Проблемы аэродинамики ветроколеса Дарье // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 1. С. 47–51.
5. **Горелов Д. Н., Кузьменко Ю. Н.** Экспериментальная оценка предельной мощности ветроколеса с вертикальной осью вращения // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 2. С. 329–334.
6. **Гребешов Э. П., Сагоян О. А.** Гидродинамические характеристики колеблющегося крыла, выполняющего функции несущего элемента и движителя // Тр. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 1976. Вып. 1725. С. 3–30.
7. **Черказьянов В. Г.** Экспериментальные исследования колеблющегося крыла в покоящейся жидкости: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1990.
8. **Баклушин П. Г., Вашкевич К. П., Самсонов В. В.** Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик ортогональных крыльчатых ветроколес: Сб. науч. тр. Гидропроекта. 1988. Вып. 129. С. 98–105.
9. **Горелов Д. Н., Вьюгов В. В., Кривоспицкий В. П.** Экспериментальное исследование двухъярусного ротора Дарье // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 243–248.

*Поступила в редакцию 30/XI 2007 г.*

---