

УДК 621.48

Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор)

Д.Н. Горелов

Омский филиал Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН

E-mail: gorelov@ofim.oscsbras.ru

Дан обзор результатов экспериментальных исследований энергетических характеристик ротора Дарье с вертикальной осью вращения. Проведен анализ влияния основных геометрических параметров ротора на его энергетические характеристики. Показано, что ротор Дарье может иметь более высокий уровень энергетических характеристик, чем лучшие ветроколеса пропеллерного типа.

Ключевые слова: ротор Дарье, идеальное ветроколесо, экспериментальные исследования ротора Дарье.

В публикациях, связанных с разработкой ветроэнергетических установок с ротором Дарье и его модификациями, постоянно подчеркивается, что по своим энергетическим характеристикам ротор Дарье уступает ветроколесам пропеллерного типа. Однако приведенные в этой статье экспериментальные данные показывают, что энергетические характеристики ротора Дарье могут быть выше соответствующих характеристик ветроколес пропеллерного типа. Но создание ветроэнергетических установок с высоким уровнем энергетических характеристик требует ясного понимания особенностей работы ротора Дарье и знания основных зависимостей энергетических характеристик от параметров конструкции ротора. Обсуждению этих вопросов и посвящена настоящая статья.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОТОРА ДАРЬЕ

Энергетические характеристики ротора Дарье зависят от большого числа геометрических и кинематических параметров ротора и воздушного потока. Основные параметры показаны на рис. 1, на котором схематично изображен одноярусный трехлопастной ротор типа Дарье с прямыми лопастями. Здесь L , b , c — длина, хорда и максимальная толщина лопасти, $D = 2R$ — диаметр ротора (R — радиус), ω — угловая скорость вращения ротора, V — скорость ветрового потока.

Безразмерными параметрами являются: $z = \omega R/V$ — быстроходность ротора, $\lambda = L/b$ — удлинение лопасти, $\bar{c} = c/b$ — относительная толщина лопасти, n_b — число лопастей в одном ярусе, σ — коэффициент заполнения (затенения), φ — угол установки лопасти, $Re = \omega R b/\nu$ — число Рейнольдса (ν — кинематическая вязкость).

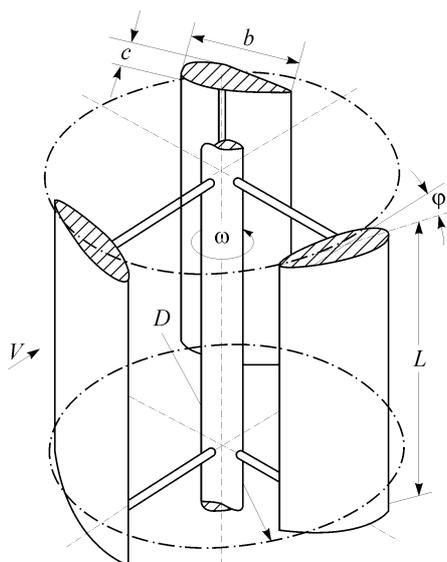


Рис. 1. Схема трехлопастного ротора.

Основной энергетической характеристикой ротора является зависимость коэффициента использования энергии ветрового потока C_N от быстроходности ротора z . В ветроэнергетике коэффициент использования энергии потока определяется отношением полезной мощности N , которую ротор способен забрать у потока, к мощности потока N_f в поперечном сечении ротора:

$$C_N = N/N_f, \quad N_f = \rho V^3 S/2, \quad (1)$$

где $S = 2RL$, ρ — плотность потока. Из (1) следует, что полезная мощность

$$N = C_N N_f = \rho V^3 S C_N / 2. \quad (2)$$

Та же мощность может быть выражена через аэродинамический момент M , вращающий ротор и угловую скорость вращения ротора ω : $N = M\omega$. Поэтому соотношения (1), (2) позволяют определить вращающий аэродинамический момент через коэффициент использования энергии ветрового потока

$$M = C_N N_f / \omega = \rho V^3 C_N / (2\omega). \quad (3)$$

Результаты экспериментальных исследований показывают существенную зависимость коэффициента использования энергии потока C_N от геометрических параметров ветроколеса. В этой связи конструктору важно знать предельные энергетические возможности ветроколеса, которые можно “выжать” из него путем проектирования. Для оценки предельных энергетических возможностей ветроколеса ввели понятие идеального ветроколеса. Под ним понимают некоторое виртуальное ветроколесо, работающее без потерь. Принято считать, что ротор Дарье и ветроколесо пропеллерного типа имеют одинаковые предельные значения коэффициента использования энергии ветрового потока (Турян и др., 1988). Однако экспериментальные исследования, проведенные в последнее время (Горелов, Кузьменко, 2001), показали, что ротор Дарье может иметь более высокие энергетические характеристики, чем ветроколесо пропеллерного типа. Поэтому целесообразно рассматривать две виртуальные модели идеальных ветроколес: идеальное ветроколесо пропеллерного типа и идеальный ротор Дарье.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПОТОКА ДЛЯ ИДЕАЛЬНОГО ВЕТРОКОЛЕСА ПРОПЕЛЛЕРНОГО ТИПА

Определение предельных значений коэффициента использования энергии потока для идеального ветроколеса пропеллерного типа проведем, следуя работам (Ершина и др., 2001; Фатеев, 1957). Идеальное ветроколесо моделируется бесконечно тонким проницаемым несущим слоем АВ (рис. 2), при переходе через который скорость потока и давление терпят разрыв. Воздушная среда предполагается идеальной и несжимаемой, а ее движение — стационарным и одномерным.

Рассмотрим течение среды в осесимметричной трубке тока, внутри которой находится слой АВ. Сечение A_0B_0 выбираем далеко перед АВ, а сечение A_1B_1 —

далеко за AB . Площади соответствующих поперечных сечений и скорости потока в них обозначим через S_0, S, S_1 и V_0, V, V_1 . Движение среды в трубке тока подчиняется законам сохранения массы, импульса и энергии. Закон сохранения массы можно записать в виде постоянства расхода среды G в трубке тока

$$G = \rho S_0 V_0 = \rho S V = \rho S_1 V_1. \quad (4)$$

Мощность потока в сечениях S_0 и S_1 определяется выражениями $N_0 = G V_0^2 / 2$, $N_1 = G V_1^2 / 2$. Разность этих мощностей $N = G(V_0^2 - V_1^2) / 2$ представляет собой полезную мощность, которую поток отдает идеальному ветроколесу. Коэффициент использования энергии потока C_{Ni} для идеального ветроколеса определяется формулой (1) с заменой V на V_0 : $C_{Ni} = N / N_f$, $N_f = \rho V_0^3 S / 2$. С учетом (4)

$$C_{Ni} = \left(1 - (V_1^2 / V_0^2)\right) (V / V_0). \quad (5)$$

Формула (5) содержит два параметра: V / V_0 и V_1 / V_0 . Для нахождения предельного значения коэффициента C_{Ni} целесообразно выразить C_{Ni} через один параметр. Для этого нужно найти зависимость между параметрами V / V_0 и V_1 / V_0 . С этой целью определим полезную мощность N иначе, полагая $N = P V$, где P — суммарная сила, действующая на идеальное ветроколесо со стороны потока. В соответствии с теоремой об изменении количества движения среды между сечениями $A_0 B_0$ и $A_1 B_1$ сила $P = G V_0 - G V_1$. Отсюда следует, что

$$N = P V = G V_0^2 (1 - (V_1 / V_0)) V / V_0.$$

Сравнивая полученное выражение с $N = G(V_0^2 - V_1^2) / 2$, находим искомую связь между параметрами V / V_0 и V_1 / V_0 : $2V / V_0 - V_1 / V_0 = 1$. Тогда формулу (5) можно записать в виде

$$C_{Ni}(\zeta) = 4\zeta^2(1 - \zeta), \quad \zeta = V / V_0. \quad (6)$$

Для нахождения максимального значения коэффициента C_{Ni} продифференцируем функцию $C_{Ni}(\zeta)$ по ζ и потребуем равенство нулю производной. Корнем этого уравнения является $\zeta = 2/3$. В результате получим, что максимальное значение коэффициента использования энергии потока для идеального ветроколеса пропеллерного типа равно:

$$\max C_{Ni} = (16/27) = 0,5926... \quad (7)$$

Следует еще раз отметить, что в ветроэнергетике мощность невозмущенного потока, из которого ветроколесо черпает энергию, определяется в поперечном сечении ветроколеса S , а не в исходном сечении S_0 трубки тока, как это принято в теории идеального винта. Если мощность потока определять в сечении S_0 , то $N_f = \rho S_0 V_0^3 / 2$,

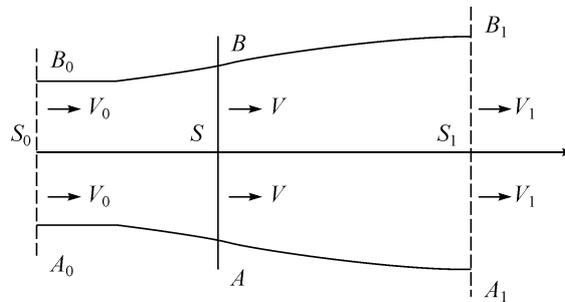


Рис. 2. Модель течения через идеальное ветроколесо.

а формула (6) для коэффициента C_{Ni} принимает вид: $C_{Ni}(\zeta) = 4\zeta(1 - \zeta)$. Максимальное значение коэффициента использования энергии потока в этом случае для идеального ветроколеса равно 1 и достигается при $\zeta = V/V_0 = 1/2$. При этом поток в трубке тока вдали за ветроколесом полностью тормозится, так как $V_1/V_0 = 0$.

3. ИДЕАЛЬНЫЙ РОТОР ДАРЬЕ С ПРЯМЫМИ ЛОПАСТЯМИ

Виртуальная модель идеального ротора Дарье с прямыми лопастями введена в работах (Горелов, Кузьменко 2001; Горелов, 2003). Под идеальным ротором Дарье (схема Н-Дарье) понимается ротор, состоящий только из лопастей и не имеющий ни траверса, ни вала. Коэффициент использования энергии ветра идеального ротора определяется полезной работой одних лопастей без учета потерь, вносимых траверсами, валом и другими элементами конструкции ветроколеса. Эта виртуальная модель может быть исследована теоретически в рамках нелинейной теории нестационарного обтекания идеальной несжимаемой жидкостью системы профилей, вращающихся вокруг общей оси с заданной угловой скоростью. В настоящее время эта задача пока не решена. Но идеальный ротор Дарье может быть исследован экспериментально, если методика проведения эксперимента позволяет выделить полезную мощность, развиваемую одними лопастями. Методика такого эксперимента приведена в работе (Горелов, Кузьменко, 2001).

Для выбора параметров ротора, при которых можно ожидать достижения предельных значений коэффициента C_{Ni} , использовались известные результаты систематических испытаний ортогональных ветроколес. Эти результаты показали, что основными параметрами, определяющими величину коэффициента использования энергии потока, являются быстроходность ротора z , удлинение лопасти $\lambda = L/b$, коэффициент заполнения σ , число лопастей n_b , относительная толщина профиля лопасти \bar{c} и угол установки φ . По данным работ (Баклушин и др., 1988; Иванов и др., 1988) ротор Дарье может работать эффективно, если $1 < z < z_0$, где z_0 — значение z при свободном вращении ротора; $0,2 < \sigma < 0,4$, $\lambda > 5$, $0,1 < \bar{c} < 0,2$, $2 \leq n_b \leq 4$. С учетом этих результатов была выбрана модель одноярусного ротора с тремя прямыми сменными лопастями, размещенными между двумя параллельными дисками, жестко скрепленными с валом. Для идеального ротора с параметрами $\sigma = 0,3$, $\lambda = 7$, $\bar{c} = 0,18$, $n_b = 3$, $\varphi = 0$ было получено значение коэффициента $C_{Ni} = 0,72$, которое оказалось выше известных ранее экспериментальных данных для ветроколес всех типов, включая предельное значение $C_{Ni} = 0,593$ для идеального ветроколеса пропеллерного типа (Горелов, Кузьменко, 2001).

Такое высокое значение коэффициента использования энергии потока у идеального ротора Дарье, превышающее предельное значение C_{Ni} ветроколес пропеллерного типа, объясняется принципиальным различием механизма образования крутящего момента этими ветроколесами. Крутящий момент ветроколес пропеллерного типа создается подъемными силами, действующими на лопасти. При этом течение среды вокруг лопастей мало отличается от стационарного. А вокруг лопастей ротора Дарье течение среды носит существенно нестационарный характер и аналогично потоку около машущего крыла птиц (Горелов, 2009). Такой нестационарный поток порождает на лопастях силу тяги, которая и создает крутящий аэродинамический момент.

4. ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОКОЛЕСА

Для успешного проектирования ветроколес с высокими энергетическими характеристиками конструктор должен знать, как влияют на эти характеристики основные параметры ветроколеса. Характер такого влияния может быть чрезвы-

Рис. 3. Зависимость C_N от z при разных числах Рейнольдса (1): $Re = 8,4 \cdot 10^5$ (1), $3,3 \cdot 10^5$ (2).

чайно сложен и непредсказуем. В настоящее время главным источником информации при проектировании ветроколес с ротором Дарье является эксперимент. Наиболее полные и всесторонние экспериментальные результаты опубликованы в работах (Баклушин и др., 1988; Иванов и др., 1988). Эти результаты позволяют оценить влияние основных параметров ротора и потока на энергетическую эффективность ротора Дарье с прямыми лопастями. Отметим, что данные работы (Баклушин и др., 1988) получены при испытаниях в аэродинамической трубе, а работы (Иванов и др., 1988) — в гидрлотке.

Данные работы (Баклушин и др., 1988) получены для моделей одноярусного ротора с различным числом лопастей. В ходе испытаний варьировалась скорость потока, а частота вращения модели поддерживалась постоянной. Такая методика позволила получать аэродинамические характеристики в зависимости от быстроходности ротора при постоянном числе Рейнольдса, определяемым для окружной скорости лопастей ωR .

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента использования энергии потока C_N от быстроходности двухлопастного ротора z (отношения окружной скорости лопастей ротора к скорости набегающего потока) при разных значениях числа Рейнольдса. Для рассматриваемой модели ротора удлинение лопастей $\lambda = 8$, относительная толщина лопастей $\bar{c} = 0,15$, коэффициент заполнения $\sigma = 0,3$, угол установки $\varphi = 0$. Приведенные данные показывают существенное влияние числа Рейнольдса для левой ветви зависимости $C_N = f(z)$ и слабое влияние Re для правой ветви. Такой характер зависимости $C_N = f(z)$ можно объяснить тем, что на режимах обтекания лопастей, соответствующих левой ветви, вектор относительной скорости за время оборота лопасти меняется в широких пределах как по величине, так и направлению. Это приводит к отрыву потока от лопасти и неустойчивости течения. Иная картина наблюдается на правой ветви. Углы атаки меняются здесь в более узком диапазоне, что приводит к слабой зависимости коэффициента использования энергии потока от числа Рейнольдса. Отметим, что именно правая ветвь зависимости $C_N = f(z)$ является рабочей для ротора Дарье. Характерной особенностью зависимости $C_N = f(z)$ является достижение максимального значения C_N при $2 < z < 3$ с последующим падением и обращением в ноль при некотором значении быстроходности z . Такое поведение коэффициента C_N вызвано тем, что с увеличением окружной скорости лопастей ротора вихревые следы, сходящие с лопастей, не успевают выйти за пределы ротора. Поэтому лопасти при своем вращении вынуждены проходить через эти следы, теряя полезную мощность.

Влияние относительной толщины профиля лопасти на величину максимального значения коэффициента C_N при разных числах Re показано на рис. 4. Наибольший эффект достигается для лопастей с относительной толщиной $0,15 < \bar{c} < 0,20$. Главная особенность

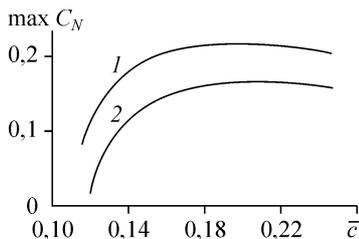
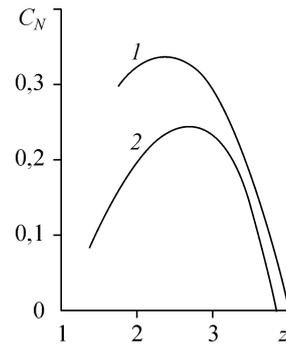


Рис. 4. Влияние относительной толщины лопасти \bar{c} на $\max C_N$: $Re = 3,5 \cdot 10^5$ (1), $2 \cdot 10^5$ (2).



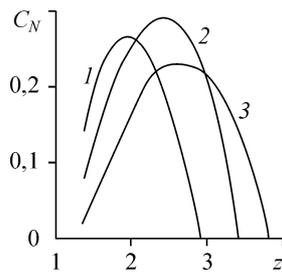


Рис. 5. Зависимость $C_N = f(z)$ при разных значениях σ : 0,2 (1), 0,15 (2), 0,1 (3); $b = \text{const}$.

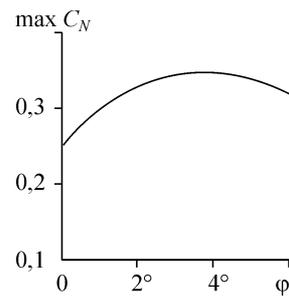


Рис. 6. Влияние угла установки φ на $\max C_N$.

этого влияния связана с резким падением C_N для тонких лопастей. Следует отметить, что такой же характер зависимости от относительной толщины профиля наблюдается для силы тяги, создаваемой машущим крылом (Горелов, 2009).

Типичное влияние коэффициента заполнения σ на зависимость $C_N = f(z)$ показана на рис. 5. Испытывались модели ротора с лопастями, у которых $b = \text{const}$, $\lambda = 5$, $\bar{c} = 0,15$, $\varphi = 0$. Коэффициент σ менялся путем изменения числа лопастей $n_b = 2, 3, 4$. В этом случае $\max C_N$ достигался при $\sigma = 0,15$, $n_b = 3$. Следует отметить, что с увеличением коэффициента заполнения σ уменьшается значение скорости z , при котором C_N достигает своего максимума. Такая тенденция проявляется и в других экспериментах. Влияние коэффициента заполнения на C_N при фиксированном числе лопастей путем варьирования длины хорды лопасти представлено на рис. 8.

Неожиданно большой эффект получен при исследовании влияния угла установки лопасти φ на величину коэффициента использования энергии потока C_N . Впервые на влияние этого параметра на энергетические характеристики ротора Дарье указано, видимо, в работе (Баклушин и др., 1988). В качестве примера на рис. 6 приведена зависимость $C_N = f(\varphi)$ для одноярусного двухлопастного ротора с параметрами $\lambda = 5$, $\sigma = 0,2$, $\bar{c} = 0,18$. Изменение угла установки на 3 градуса привело к существенному росту эффективности ротора. В работе (Баклушин и др., 1988) показано, что оптимальная величина угла установки зависит от относительной толщины лопасти \bar{c} и коэффициента заполнения σ . Рекомендации работы (Баклушин и др., 1988) проверены автором настоящей статьи для разных моделей ротора. Положительный эффект угла установки установлен во всех случаях (Горелов и др., 2005), но этот эффект до конца не исследован и не понят.

На рис. 7, 8 показана зависимость коэффициента использования энергии ветра C_N от удлинения лопасти λ для двух возможных вариантов изменения удлинения: путем изменения длины лопасти (при постоянной хорде) и изменения длины

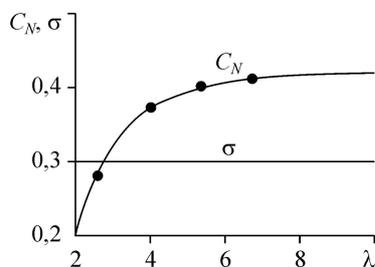


Рис. 7. Влияние удлинения лопасти на C_N при $b = \text{const}$.

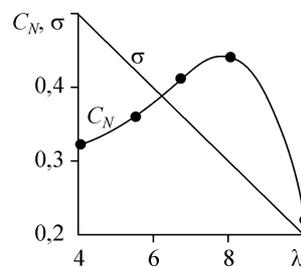


Рис. 8. Влияние удлинения лопасти на C_N при $L = \text{const}$.

хорды (при постоянной длине лопасти). В первом случае остается постоянным коэффициент заполнения σ , тогда как при изменении длины хорды коэффициент заполнения тоже меняется. Точками показаны экспериментальные данные, взятые из работы (Иванов и др., 1988). Приведенные данные показывают принципиальное различие зависимости $C_N = f(\lambda)$ при $b = \text{const}$ и $L = \text{const}$. Зависимость $C_N = f(\lambda)$ на рис. 7 аналогична зависимости подъемной силы крыла от его удлинения. С уменьшением λ коэффициент C_N падает (почти по линейному закону при $\lambda < 3$), а при $\lambda > 5$ коэффициент C_N практически перестает зависеть от удлинения лопасти. Но ситуация становится совершенно другой, если удлинение меняется с длиной хорды (рис. 8). В этом случае зависимость $C_N = f(\lambda)$ при некотором значении λ достигает своего максимального значения, а затем быстро падает. Для рассматриваемых экспериментальных данных максимум C_N достигается при удлинении $\lambda = 8$, что соответствует значению коэффициента заполнения $\sigma = 0,25$. Такой характер зависимости $C_N = f(\lambda)$ можно объяснить тем, что от числа лопастей и их ширины существенно зависит количество энергии, которое способен забрать ротор из потока. При малых значениях коэффициента заполнения ($\sigma < 0,25$) поток проходит через рабочее сечение ротора без существенной отдачи своей энергии, тогда как при больших значениях коэффициента заполнения ($\sigma > 0,25$) взаимодействие потока с лопастями становится существенным.

Данные рис. 8 чрезвычайно важны для конструктора. Погоня за более высоким значением C_N путем выбора узкой лопасти для получения максимального значения коэффициента C_N может вызвать обратный эффект, тогда как выбор более широкой лопасти (например, для $0,3 < \sigma < 0,4$) не приводит к заметному снижению энергетических характеристик ротора. В то же время ротор с широкими лопастями оказывается более устойчив к порывам ветра и имеет тенденцию к самозапуску (Иванов и др., 1988; Горелов, Кривоспицкий, 2008).

Влияние числа лопастей на C_N можно проследить по экспериментальным данным (точки на рис. 9, 10), приведенным в (Иванов и др., 1988). Данные на рис. 9 получены на моделях ротора с постоянным значением коэффициента σ , когда с изменением числа лопастей меняется их хорда. Рис. 10 соответствует данным, полученным при постоянной хорде лопастей, когда с изменением числа лопастей меняется коэффициент σ .

Наибольший крутящий момент создает ротор с одной лопастью. Но в этом случае крутящий момент испытывает большие пульсации по времени, порождая букет динамических проблем. Увеличение числа лопастей сглаживает моментную

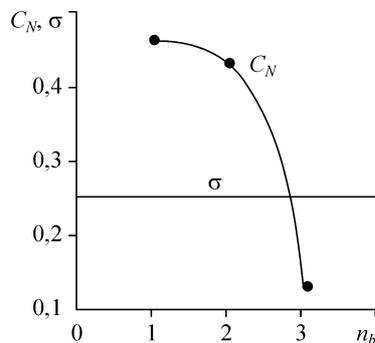


Рис. 9. Влияние числа лопастей n_b на C_N при $\sigma = \text{const}$.

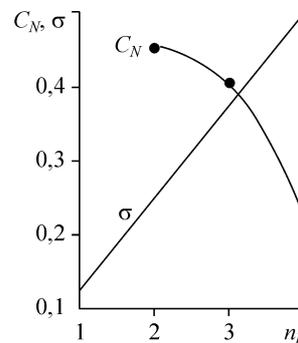


Рис. 10. Влияние числа лопастей n_b на C_N при $b = \text{const}$.

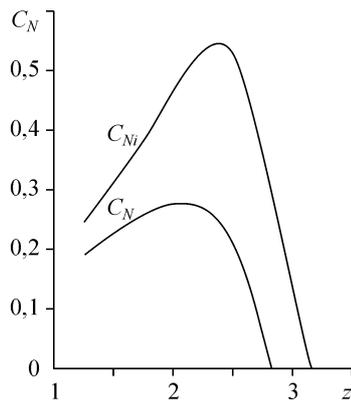


Рис. 11. Зависимость коэффициента использования энергии потока от z : C_N — ротор с траверсами, C_{Ni} — идеальный ротор.

характеристику ротора, но приводит к снижению его энергетической эффективности. Особенно сильно это проявляется, если при увеличении числа лопастей уменьшать их хорду для сохранения постоянства коэффициента заполнения σ (рис. 9). Более эффективным при увеличении числа лопастей оказывается сохранение длины хорды. Главной причиной падения энергетических характеристик ротора с увеличением числа его лопастей является вихревая структура нестационарного течения внутри ротора. Вращение ротора в поступательном ветровом потоке приводит к пульсации относительной скорости и изменению циркуляции скорости вокруг лопастей с течением времени, что приводит к появлению нестационарных вихревых следов (дополнительно к вихревым следам, обусловленным вязкостью среды). С увеличением числа лопастей вихревые структуры течения внутри ротора становятся более сложными. При прохождении лопастей через эти вихревые структуры ветроколесо теряет свою энергию.

В заключение рассмотрим влияние траверс на энергетические характеристики ротора Дарье. Следует отметить, что в большинстве известных публикаций, включая работы (Баклушин и др., 1988; Иванов и др., 1988), на влияние траверс обращалось мало внимания. Исследования автора статьи показали, что конструкция траверс оказывает сильное влияние на энергетические характеристики ротора Дарье.

Оценить влияние траверс можно путем непосредственного измерения энергетических затрат на вращение модели ротора без лопастей (с одними траверсами) и полной модели с лопастями (и траверсами) в потоке. Такие измерения проводились для разных конструкций ротора Дарье. Уровень потерь за счет траверс составлял, как правило, 40–50 % от полезной мощности, создаваемой идеальным ротором без траверс. В качестве примера на рис. 11 представлены результаты испытаний двухъярусного 6-лопастного ротора Дарье (Горелов и др., 2005) с тремя лопастями в каждом ярусе. Удлинение лопастей $\lambda = 4$, коэффициент заполнения $\sigma = 0,42$, угол установки лопастей $\phi = 4$. Лопасты в трех сечениях соединены кольцевым бандажом, а в среднем сечении связаны с валом траверсами. Испытания показали, что потери энергии при обтекании траверс достигают 50 %, тогда как для вращающегося кольцевого бандажа эти потери настолько малы, что ими можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты экспериментальных исследований и их анализ позволяют сделать вывод, что ротор Дарье обладает большими возможностями для эффективного преобразования кинетической энергии ветра в механическую. Главным резервом повышения энергетической эффективности ротора Дарье с прямыми лопастями является рациональный выбор конструкции траверс и угла установки лопастей.

Ветроколеса с ротором Дарье могут иметь более высокий уровень энергетических характеристик, чем лучшие ветроколеса пропеллерного типа. Необходимо

преодолеть стереотип мышления о превосходстве ветроколес пропеллерного типа над другими.

В настоящее время основные результаты по аэродинамике ротора Дарье получены экспериментальными методами. Необходимо активизировать теоретические исследования в этой области, разрабатывая методы аэродинамического расчета ротора Дарье на основе нелинейной теории крыла в нестационарном потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баклушин П.Г., Вашкевич К.П., Самсонов В.В.** Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик ортогональных крыльчатых ветроколес // Сб. науч. тр. Гидропроекта. М., 1988. Вып. 129: Ветроэнергетический станции. С. 98–105.
- Горелов Д.Н.** Аналогия между машущим крылом и ветроколесом с вертикальной осью вращения // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50, № 2. С. 152–155.
- Горелов Д.Н.** Проблемы аэродинамики ветроколеса Дарье // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 1. С. 47–51.
- Горелов Д.Н., Выгонов В.В., Кривоспицкий В.П.** Экспериментальное исследование двухъярусного ротора Дарье // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 243–248.
- Горелов Д.Н., Кривоспицкий В.П.** Перспективы развития ветроэнергетических установок с ортогональным ротором // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 1. С. 163–167.
- 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.
- Ершина А.К., Ершин Ш.А., Жалбасбаев У.К.** Основы теории ветротурбины Дарье. Алматы: КазгосИНТИ, 2001. С. 37–39.
- Иванов И.И., Иванова Г.А., Перфилов О.Л.** Модельные исследования роторных рабочих колес ветроэнергетических станций // Сб. науч. тр. Гидропроекта. М., 1988. Вып. 129: Ветроэнергетический станции. С. 106–113.
- Турян К. Дж., Стрикленд Дж., Бэрг Д.Э.** Мощность ветроэнергетических агрегатов с вертикальной осью вращения // Аэрокосмическая техника. 1988. № 8. С. 100–115.
- Фатеев Е.М.** Ветро двигатели и их применение в сельском хозяйстве. М.: Гостехиздат, 1957. С. 41–44.

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2010 г.