

УДК 621.548

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА ДАРЬЕ

Д. Н. Горелов

Омский филиал Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН,
644043 Омск, Россия
E-mail: gorelov@ofim.oscsbras.ru

Проведен анализ известных экспериментальных данных об аэродинамике ротора Дарье с прямыми лопастями. Установлены диапазоны значений основных параметров ротора, при которых ротор имеет высокие энергетические характеристики, способен самостоятельно запускаться и равномерно вращаться вокруг своей вертикальной оси. На основе полученных результатов разработана методика расчета геометрических параметров ротора, удовлетворяющего заданным условиям эксплуатации.

Ключевые слова: ротор Дарье, аэродинамический расчет, экспериментальное исследование.

Постановка задачи. В 1931 г. французский инженер Ж. Дарье запатентовал ротор с криволинейными лопастями, вращающимися вокруг вертикальной оси. Такой ротор, в отличие от ветроколес с горизонтальной осью вращения, может создавать крутящий аэродинамический момент при любом направлении ветра без использования дополнительных устройств ориентации по потоку. Позднее был предложен вариант ротора с прямолинейными лопастями. Оба варианта ротора Дарье после проведения экспериментальных исследований были использованы в реальных конструкциях. При эксплуатации ветроэнергетических установок с ротором Дарье был выявлен ряд недостатков таких роторов, в частности проблемы запуска и низкий уровень используемой энергии ветрового потока. В результате сложилось мнение, что по энергетическим характеристикам роторы Дарье уступают ветроколесам пропеллерного типа. Более поздние исследования показали, что при правильном проектировании ротора его энергетические характеристики могут быть выше, чем у лучших ветроколес пропеллерного типа.

Ротор Дарье представляет собой многопараметрическую систему, в которой параметры связаны друг с другом. Это затрудняет выбор параметров конструкции, обеспечивающих заданные условия функционирования ротора. Теоретические исследования аэродинамики ротора Дарье практически не проводились, а имеющиеся результаты противоречивы. Поэтому основным источником сведений об аэродинамике ротора Дарье является эксперимент. Наиболее полно исследованы роторы Дарье с прямыми лопастями [1–4]. Полученные результаты использованы при разработке предлагаемой методики расчета параметров конструкции ротора Дарье.

Поставим следующую задачу: на основе имеющихся экспериментальных данных выбрать параметры конструкции ротора Дарье с прямыми лопастями, при которых выполняются заданные требования к ротору. Главным требованием является высокий уровень

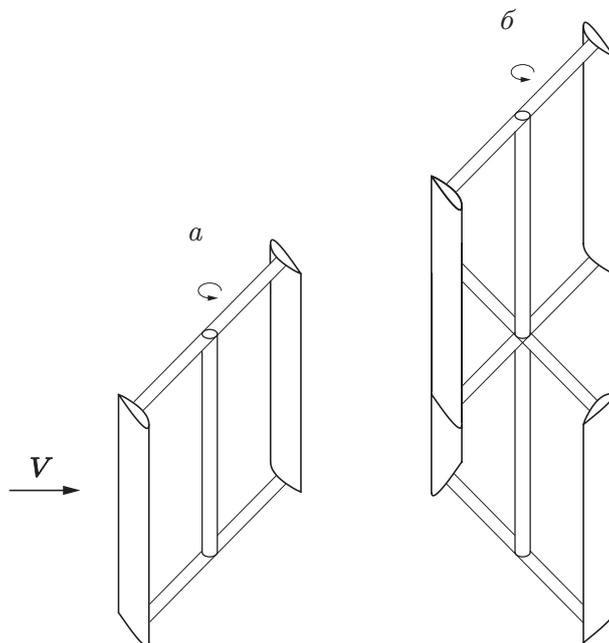


Рис. 1. Схемы одноярусного (а) и двухъярусного (б) роторов Дарье с двумя лопастями в каждом ярусе

энергетических характеристик ротора, не уступающих характеристикам ветроколес пропеллерного типа. Для этого максимальное значение коэффициента использования энергии потока должно составлять $0,40 \div 0,45$. Другими важными требованиями являются самостоятельный запуск ротора и равномерность его вращения вокруг своей вертикальной оси. Немаловажную роль играет и конструкторская реализация ротора.

Экспериментальные исследования показали, что выполнению указанных требований способствуют правильный выбор геометрических параметров лопастей, многоярусная конструкция ротора с двумя или тремя лопастями в каждом ярусе и установка лопастей со смещением относительно лопастей в соседних ярусах. При этом профили лопастей должны быть симметричными с относительной толщиной 15–20 %. Работу ротора может улучшить установка лопастей с заданным положительным углом между хордой лопасти и касательной к траектории ее движения.

Следует отметить также факторы, снижающие энергетические характеристики ротора: чрезмерно узкие или широкие лопасти, число лопастей свыше трех в каждом ярусе, малое удлинение лопасти, неудачная конструкция траверс, соединяющих лопасти с валом, и других элементов конструкции (стержней, тросов), находящихся внутри ротора.

Энергетические характеристики ротора Дарье. Прежде чем перейти к решению поставленной задачи, рассмотрим основные особенности аэродинамического взаимодействия лопастей ротора Дарье с ветровым потоком.

На вращающуюся лопасть действует пульсирующий поток, формирующийся в результате воздействия ветрового потока и вращения лопасти (рис. 1). В этом случае структура течения воздушной среды вокруг каждой лопасти аналогична структуре течения вокруг машущего крыла. Этот факт лежит в основе гипотезы об аналогии между лопастью ротора Дарье и машущим крылом [5]. Из этой гипотезы следует, что крутящий аэродинамический момент создается в основном не подъемной силой, а силой тяги, действующей на каждую лопасть в пульсирующем потоке. Это позволяет предположить, что предельное значение коэффициента использования энергии потока не ограничивается значением 0,593, как бы-

ло принято считать до сих пор, а может быть значительно больше (для машущего крыла этот коэффициент близок к единице). Данное предположение получило экспериментальное подтверждение. При исследовании энергетических характеристик идеального ротора Дарье (виртуальный ротор, составленный только из лопастей) для коэффициента использования энергии потока было получено значение 0,72 [6, 7]. Заметим, что для идеального ротора это значение не является предельным.

Энергетические характеристики ротора Дарье зависят от большого количества геометрических и кинематических параметров ротора и воздушного потока. Основными размерными параметрами являются длина лопасти l , длина ее хорды b и максимальная толщина лопасти c , радиус R и диаметр $D = 2R$ ротора, площадь поперечного сечения ротора S , угловая скорость вращения ротора ω , скорость ветрового потока V , угол установки лопасти φ .

Для моделирования аэродинамического взаимодействия ротора с потоком используются следующие безразмерные параметры: коэффициент быстроходности ротора (отношение скорости вращения лопасти к скорости потока) $z = \omega R/V$, удлинение лопасти $\lambda = l/b$, относительная толщина лопасти $\bar{c} = c/b$, число лопастей в одном ярусе n_b , число ярусов n_r , коэффициент заполнения $\sigma = n_b b/D$.

Эффективность работы ротора Дарье характеризуется его способностью отбирать у ветрового потока часть мощности. Доля этой мощности оценивается коэффициентом использования энергии ветрового потока C_N . В ветроэнергетике этот коэффициент задается отношением полезной мощности ротора N к мощности потока N_f в поперечном сечении ротора:

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

(ρ — плотность среды).

Из (1) следует, что полезная мощность ротора N может быть определена через коэффициент использования ветровой энергии по формуле

$$N = C_N N_f = \frac{1}{2} \rho V^3 S C_N. \quad (2)$$

Полезная мощность N создается аэродинамическим моментом M , вращающим ротор с угловой скоростью ω . По определению

$$N = M\omega. \quad (3)$$

Соотношения (1)–(3) позволяют выразить вращающий аэродинамический момент через коэффициент использования энергии ветрового потока:

$$M = \frac{1}{\omega} C_N N_f = \frac{1}{2\omega} \rho V^3 S C_N. \quad (4)$$

Аэродинамический момент M удобно определять через безразмерный коэффициент момента C_m :

$$M = \frac{1}{2} \rho V^2 S R C_m. \quad (5)$$

Из (4), (5) следует

$$C_m = C_N/z, \quad z = \omega R/V. \quad (6)$$

Формулы (1)–(6) показывают, что коэффициент использования энергии потока C_N является главной характеристикой ротора Дарье. Поэтому при выполнении аэродинамического расчета ротора необходимо знать зависимость коэффициента C_N от основных безразмерных параметров: коэффициента быстроходности ротора z и геометрических параметров ротора включая удлинение лопасти λ , число лопастей n_b , коэффициент заполне-

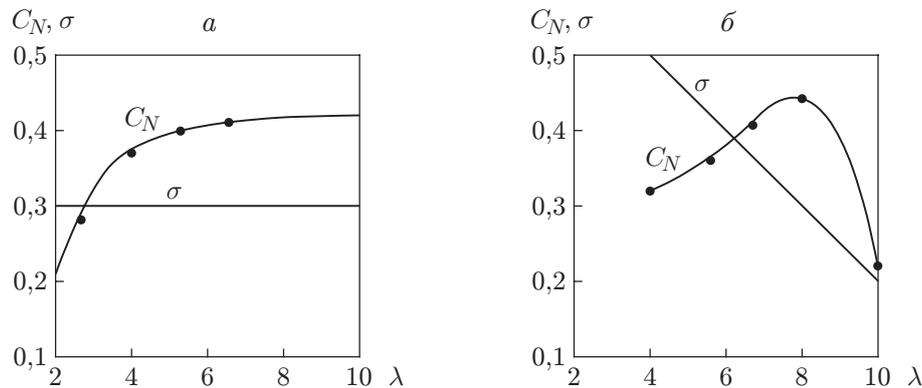


Рис. 2. Зависимости коэффициента C_N и коэффициента заполнения σ от удлинения лопасти λ :
 $a - b = \text{const}$, $b - l = \text{const}$

ния σ и угол установки лопастей φ . Расчет таких зависимостей должен проводиться в рамках нелинейной теории крыла в нестационарном потоке [8]. Однако в настоящее время соответствующие математические модели отсутствуют и единственным источником информации является эксперимент.

Результаты экспериментальных исследований. Наиболее важные экспериментальные результаты, необходимые для аэродинамического расчета ротора, приведены на рис. 2–6. Эти результаты представлены в виде зависимостей коэффициента C_N от разных параметров. Исходные данные взяты из работ [1–8].

На рис. 2 показаны типичные зависимости коэффициента C_N от удлинения лопасти λ . Удлинение лопасти можно изменять за счет изменения как длины лопасти при фиксированной длине ее хорды, так и длины хорды при фиксированной длине лопасти. В первом случае коэффициент заполнения σ остается неизменным, во втором случае он изменяется. Зависимости $C_N = f(\lambda)$ в этих случаях оказываются разными. При фиксированной длине хорды коэффициент C_N зависит от удлинения лопасти аналогично тому, как подъемная сила и сила тяги крыла зависят от его удлинения. Однако в случае если удлинение меняется за счет изменения длины хорды, функция $C_N = f(\lambda)$ при некотором значении λ достигает максимального значения, а затем быстро убывает. При рассматриваемых экспериментальных данных максимум C_N достигается при удлинении $\lambda = 8$, что соответствует значению коэффициента заполнения $\sigma = 0,25$.

Из рис. 2 следует, что на характер зависимости C_N от удлинения существенное влияние оказывают длина хорды и число лопастей в одном ярусе. Это влияние характеризуется коэффициентом заполнения σ . При малых значениях коэффициента заполнения ($\sigma < 0,25$) поток проходит через рабочее сечение ротора без существенных потерь энергии. При больших значениях коэффициента заполнения ($\sigma > 0,25$) потери энергии потока при взаимодействии с лопастями становятся существенными. Из результатов, представленных на рис. 2, следует, что попытки получить большее значение удлинения для увеличения коэффициента C_N путем выбора узкой лопасти могут дать противоположный результат, тогда как выбор более широкой лопасти (например, при $0,3 < \sigma < 0,4$) не приводит к существенному ухудшению энергетических характеристик ротора.

Важным параметром конструкции ротора Дарье является число лопастей в одном ярусе. Для оценки влияния числа лопастей на энергетические характеристики ротора проводятся специальные исследования на моделях с различным числом лопастей. На рис. 3 представлены типичные результаты таких исследований при фиксированной длине лопа-

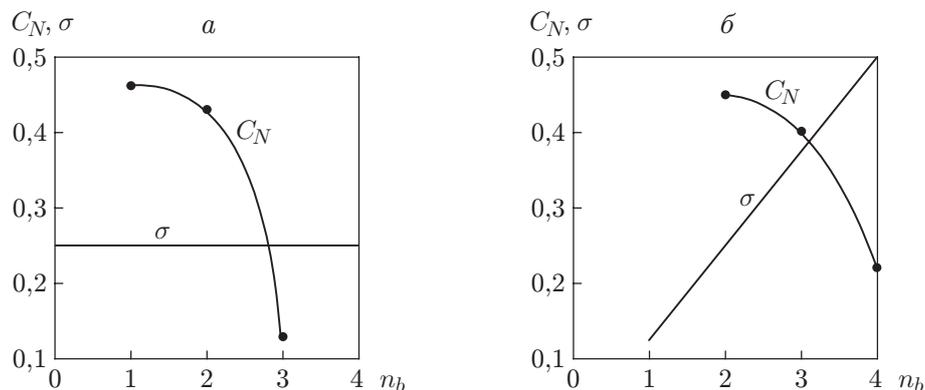


Рис. 3. Зависимости коэффициента C_N и коэффициента заполнения σ от числа лопастей n_b :

a — $\sigma = \text{const}$, b — $b = \text{const}$

стей для двух случаев: $\sigma = \text{const}$ и $b = \text{const}$. В первом случае длина хорды лопасти b меняется при изменении числа лопастей n_b . Во втором случае меняется коэффициент σ , а длины лопасти и ее хорды остаются неизменными.

Эксперименты показывают, что наилучшие энергетические характеристики имеет однолопастный ротор. Однако у такого ротора крутящий момент имеет большие пульсации, что обуславливает возникновение ряда динамических проблем. С увеличением числа лопастей сглаживается моментная характеристика ротора, но при этом уменьшаются его энергетические характеристики, особенно в случае, когда увеличивается число лопастей и уменьшается длина их хорды с целью сохранения постоянным коэффициентом заполнения σ . При увеличении числа лопастей более эффективным оказывается сохранение постоянной длины хорды. Однако число лопастей в одном ярусе ротора не должно быть более трех. Уменьшение коэффициента C_N с увеличением числа лопастей можно объяснить появлением дополнительных вихревых следов за лопастями, что приводит к изменению структуры течения внутри ротора.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 2, 3, свидетельствуют о существенном влиянии коэффициента σ на энергетические характеристики ротора. От значения этого коэффициента зависит также способность ротора Дарье к самостоятельному запуску. Для этого необходимо, чтобы крутящий момент был положительным при малых значениях коэффициента быстроходности ротора z .

На рис. 4 показана зависимость коэффициента крутящего момента C_m от параметра z для двухъярусного идеального ротора Дарье при различных значениях коэффициента заполнения σ . Видно, что с увеличением коэффициента σ возрастает вероятность самостоятельного запуска ротора. В рассматриваемом случае самостоятельный запуск ротора имеет место при $\sigma > 0,3$.

В реальном роторе лопасти связаны с валом траверсами, которые могут оказывать существенное влияние на структуру течения вокруг лопастей. Это влияние проявляется, в частности, в изменении зависимости коэффициента C_N от z . Экспериментальные данные, приведенные на рис. 5, показывают, что наличие траверс приводит к уменьшению максимальной полезной мощности идеального ротора в два раза.

Таким образом, выбор конструкции траверс и их расположения внутри ротора являются одним из основных способов улучшения энергетических характеристик ротора Дарье. Другим способом является установка лопастей под некоторым положительным углом φ между хордой лопасти и касательной к траектории ее движения (рис. 6). По-видимому,

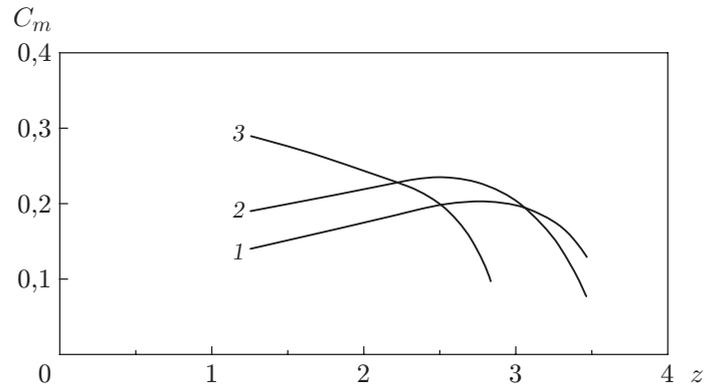


Рис. 4. Зависимость коэффициента момента C_m от величины z для двухъярусного идеального ротора при различных значениях σ :
 1 — $\sigma = 0,24$, 2 — $\sigma = 0,28$, 3 — $\sigma = 0,35$

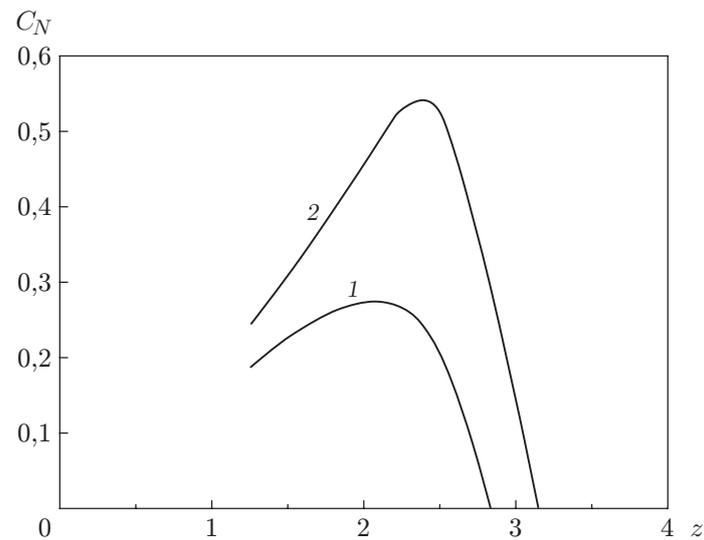


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования энергии потока от величины z :
 1 — ротор с траверсами, 2 — идеальный ротор

впервые это обстоятельство было отмечено в работе [1]. Влияние угла установки можно объяснить в рамках гипотезы аэродинамической аналогии. Основной вклад в крутящий момент вносит передний фронт лопастей, но в этом случае вектор относительной скорости образует отрицательный угол атаки с хордой лопасти. Согласно теории крыла в нестационарном потоке максимальная сила тяги у машущего крыла возникает при нулевом угле атаки, поэтому установка лопасти в роторе Дарье под положительным углом приводит к уменьшению влияния угла атаки на передний фронт, увеличению силы тяги на лопастях и соответственно величины крутящего момента.

Методика расчета геометрических параметров ротора. Использование приведенных на рис. 2–6 результатов экспериментов позволяет определить оптимальные геометрические параметры ротора Дарье, при которых ротор может иметь высокие энергетические характеристики, самостоятельно запускаться и равномерно вращаться. Исходными

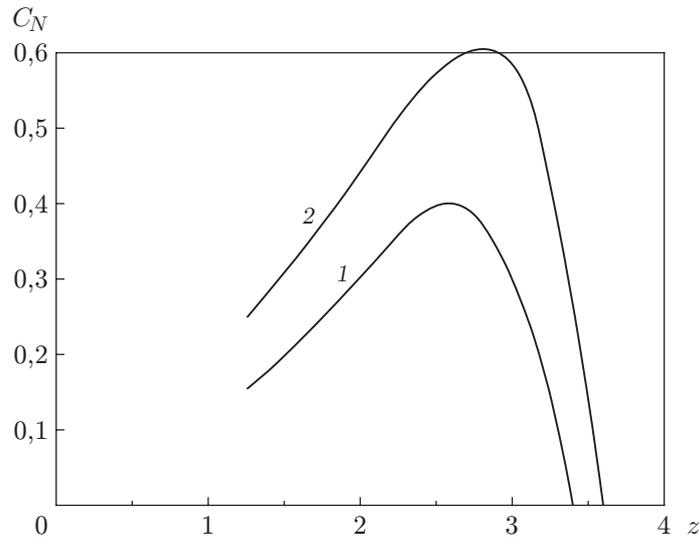


Рис. 6. Зависимость коэффициента C_N от величины z для двухъярусного идеального ротора Дарье при различных значениях угла установки лопастей: 1 — $\varphi = 0^\circ$, 2 — $\varphi = 4^\circ$

формулами для такого расчета являются соотношения

$$S = n_r D l, \quad \lambda = l/b, \quad \sigma = n_b b/D, \quad (7)$$

содержащие четыре размерные величины: b , l , S , D . Три из этих величин могут быть выражены через одну величину, в качестве которой целесообразно выбрать длину хорды лопасти b . Тогда

$$l = \lambda b, \quad D = \frac{n_b}{\sigma} b, \quad S = n_r D l = n_h D \lambda b = \lambda n_r \frac{n_b}{\sigma} b^2. \quad (8)$$

Основным размерным параметром ротора является площадь его поперечного сечения S . При проведении аэродинамического расчета ротора площадь его поперечного сечения определяется по формуле (2) через ожидаемую полезную мощность для заданной (расчетной) скорости ветра. Поэтому длину хорды лопасти целесообразно выразить через S . Из последнего соотношения в (8) получаем

$$b = k\sqrt{S}, \quad k = \sqrt{\sigma/(\lambda n_b n_r)}. \quad (9)$$

Формула (9) определяет длину хорды лопасти через площадь поперечного сечения ротора S , удлинение лопасти λ , коэффициент заполнения σ , число лопастей в одном ярусе n_b и число ярусов в роторе n_r . Из экспериментальных данных, приведенных на рис. 2–6, следует, что оптимальному ротору соответствуют следующие условия:

$$\lambda > 5, \quad 0,3 < \sigma < 0,4, \quad n_b = 2, 3, \quad n_r > 1. \quad (10)$$

Под оптимальным ротором понимается ротор с высокими энергетическими характеристиками, способный самостоятельно запускаться и вращаться вокруг своей вертикальной оси практически равномерно. Для выполнения этих требований к условиям (10) следует добавить еще несколько условий. Во-первых, внутри ротора не должны находиться элементы конструкции, замедляющие вращение ротора и возмущающие поток перед лопастями. Траверсы, соединяющие лопасти с валом, должны иметь обтекаемую форму и по возможности размещаться на концах лопастей (см. рис. 1). Во-вторых, лопасти в каждом

ярус должны размещаться с заданным смещением относительно лопастей в соседних ярусах. Можно рекомендовать размещать лопасти на каждом следующем ярусе со смещением $2\pi R/N_b$, где $N_b = n_b n_r$ — число лопастей в роторе. При этом профиль каждой лопасти должен быть симметричным с относительной толщиной $15 \div 20$ % (такой же профиль имеет хвостовой плавник дельфина). Наконец, целесообразно устанавливать лопасти под положительным углом $\varphi = 3 \div 7^\circ$ (см. [1]).

Проведем расчет геометрических параметров двухъярусного ротора Дарье с тремя лопастями в каждом ярусе с помощью формул (8), (9). В этом случае $n_r = 2$, $n_b = 3$. В соответствии с (10) выберем удлинение лопастей и коэффициент заполнения равными $\lambda = 5$, $\sigma = 0,35$ соответственно. Пусть расчетная скорость ветра $V = 10$ м/с, а ожидаемая полезная мощность $N = 3kW$ при значении коэффициента использования энергии воздушного потока $C_N = 0,4$. Плотность воздуха на уровне земли равна $\rho = 1,25$ кг/м³. Из формулы (2) следует, что для получения ожидаемой полезной мощности площадь поперечного сечения ротора должна быть не менее $S = 12$ м². Подставляя выбранные значения S и параметров n_b , n_r , λ , σ в формулы (8), (9), получаем следующие значения длин лопасти, хорды и радиуса ротора: $b = 0,37$ м, $l = 1,87$ м, $R = 1,60$ м. Лопасти в разных ярусах должны быть смещены относительно друг друга на угол 60° , а угол установки лопастей выбираем равным $\varphi = 4 \div 5^\circ$. По геометрическим параметрам такой расчетный ротор оказался близким к реальному ротору [9], который имеет хорошие энергетические характеристики и запускается при скорости ветра 2 м/с.

Выводы. Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

Современное состояние базы экспериментальных данных позволяет проводить расчет основных геометрических параметров ротора Дарье с прямыми лопастями при заданных условиях его работы. Методика такого расчета построена в настоящей работе.

Основным способом повышения энергетических характеристик ротора Дарье является выбор конструкции траверс и угла установки лопастей. Для решения этой задачи необходимо проведение дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Теоретические исследования аэродинамики ветроколес с вертикальной осью вращения включая ротор Дарье следует проводить на основе нелинейной теории крыла в нестационарном потоке с учетом толщины профиля лопастей. В настоящее время такие исследования практически отсутствуют.

Полученные в данной работе результаты могут быть использованы при проектировании ветроэнергетических установок и проведении исследований аэродинамики ротора Дарье.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Иванов И. И., Иванова Г. А., Перфилов О. Л. Модельные исследования роторных рабочих колес ветроэнергетических станций // Сб. науч. тр. Гидропроекта. 1988. Вып. 129. С. 106–113.
3. Горелов Д. Н., Вьюгов В. В., Кривоспицкий В. П. Экспериментальное исследование двухъярусного ротора Дарье // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 243–248.
4. Горелов Д. Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 3. С. 325–333.
5. Горелов Д. Н. Аналогия между машущим крылом и ветроколесом с вертикальной осью вращения // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 2. С. 152–155.

6. **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.
7. **Горелов Д. Н.** Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. Омск: Полиграф. центр КАН, 2012.
8. **Горелов Д. Н.** Проблемы аэродинамики ветроколеса Дарье // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 1. С. 47–51.
9. **Горелов Д. Н., Кривоспицкий В. П.** Перспективы развития ветроэнергетических установок с ортогональным ротором // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 1. С. 163–167.

*Поступила в редакцию 5/II 2014 г.,
в окончательном варианте — 4/IV 2014 г.*
