

УДК 621.48

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЪЯРУСНОГО РОТОРА ДАРЬЕ

Д.Н. ГОРЕЛОВ¹, В.В. ВЬЮГОВ², В.П. КРИВОСПИЦКИЙ³

¹*Омский филиал Института математики СО РАН*

²*Новосибирская государственная академия водного транспорта*

³*ГРЦ-Вертикаль, Миасс*

Приведены результаты экспериментального исследования двухъярусного ротора Дарье с прямыми лопастями в гидроканале. Подтверждена возможность самозапуска ротора и получения им более высоких энергетических характеристик, чем у ветроколеса пропеллерного типа.

В 1931 г. французский инженер Дарье изобрел новый тип ротора с изогнутыми лопастями и вертикальной осью вращения. В 1975 г. Масгроув в Канаде предложил заменить в роторе Дарье изогнутые лопасти прямыми. Основная особенность ротора Дарье — независимость его работы от направления ветра. Теоретические и экспериментальные исследования ротора Дарье интенсивно ведутся с 80-х годов. В ряде стран начали разрабатываться новые конструкции вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВЭУ) с ротором Дарье. В настоящее время накоплен большой опыт в разработке и эксплуатации таких ВЭУ [1, 2]. Но дальнейшее совершенствование конструкции ВЭУ с ротором Дарье требует решения ряда серьезных проблем. Основное место среди них занимают проблемы аэродинамического расчета, самозапуска ротора и ограничение его оборотов, а также выбор параметров конструкции, при которых энергия ветрового потока используется наиболее эффективно. Решению этих проблем посвящены работы [3–7].

В частности, в [3, 4] приведены результаты экспериментальных исследований роторов Дарье с прямыми лопастями в широком диапазоне изменения конструктивных параметров, в [5] предложена методика расчета ротора на основе теории подъемной силы, в [6, 7] установлена аналогия между вращающимися лопастями ротора Дарье с машущим крылом и, как следствие этого, показана возможность получения ротором Дарье энергии из потока больше, чем идеальным ветроколесом пропеллерного типа. Кроме того, в [7] предложен новый эффективный способ аэродинамического регулирования числа оборотов ротора. Настоящая работа является продолжением работ [6, 7] и содержит результаты экспериментальных исследований двухъярусного ротора Дарье с прямыми лопастями. Эти результаты подтверждают основные выводы работ [6, 7] и показывают большие возможности применения ротора Дарье в ВЭУ.

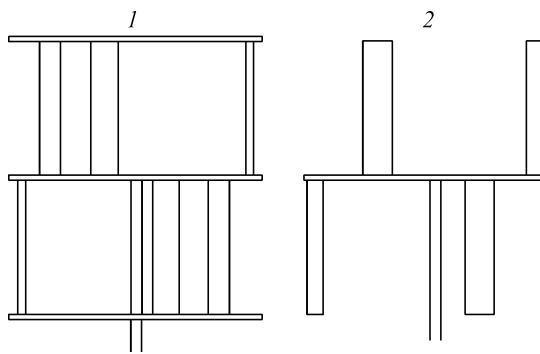


Рис. 1. Схема исследуемых 2-ярусных роторов.

1 — 6-лопастной, 2 — 4-лопастной.

ЗАДАЧИ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Целью экспериментальных исследований является поиск оптимальных параметров конструкции двухъярусного ротора,

при которых достигается высокая эффективность преобразования энергии потока во вращательное движение ротора и обеспечивается его самозапуск.

Эксперимент проводился в гидроканале Новосибирской государственной академии водного транспорта. Методика эксперимента изложена в работе [6]. Полезная мощность W , развиваемая лопастями, определялась как разность между мощностями, затрачиваемыми на вращение ротора в воздухе (W_0) и в воде (W). Коэффициент использования энергии потока $\eta = \Delta W/W_f$, где W_f — мощность потока, проходящего через ротор.

Исследовались два типа роторов: с тремя и двумя лопастями в каждом ярусе (рис. 1). Диаметр ротора у всех моделей равен $D = 0,6$ м. Длина всех лопастей также одинакова и равна $l = 0,34$ м.

Таким образом, для всех моделей относительное удлинение ротора, равное отношению его высоты к диаметру, оказывается фиксированным и равным $H/D = 1,133$. Что касается лопастей, то было предусмотрено три варианта их ширины (хорды): $b = 0,071, 0,084$ и $0,105$ м при относительной толщине профилей, равной $0,2 b$. Соответствующие им удлинения лопастей равны $\lambda = 4,79, 4,05$ и $3,24$. Переменным оказывается и коэффициент затенения лопастей $\sigma = bn_b/D$.

Модель ротора крепилась на тележке, которая перемещалась с заданной скоростью в гидроканале. В соответствии с методикой и условиями эксперимента скорость тележки была выбрана равной $v = 0,5$ м/с. Частота вращения ротора менялась в диапазоне от 20 до 70 об/мин. При этих условиях число Струхала, с учетом ожидаемых результатов, может меняться в пределах $1 < \mu < 4$.

ИССЛЕДОВАНИЕ 6-ЛОПАСТНОГО РОТОРА

Главной особенностью конструкции 6-лопастного ротора является кольцевой бандаж по концам лопастей в каждом ярусе. Поэтому чрезвычайно важным было оценить потери мощности, связанные с взаимодействием кольцевого бандажа с потоком. Был проведен эксперимент на полной модели 6-лопастного ротора (хорда лопастей $b = 0,084$ м) и на модели того же ротора без кольцевого бандажа. Получено, что потери мощности за счет кольцевого бандажа малы и оказываются на уровне точности проведения эксперимента.

Совсем иной характер потерь имеет место при вращении средней траверсы. Уровень этих потерь весьма значителен, что существенно сказывается на величине полезной мощности ΔW , развиваемой ротором. Для оценки этого влияния была определена полезная мощность ΔW_i виртуального идеального ротора без траверсы. Разность $\Delta W_i - \Delta W$ определяет потери мощности на преодоление сил сопротивления, действующих на вращающиеся траверсы в потоке. Соответствующие коэффициенты использования энергии потока η, η_i в зависимости от числа Струхала $\mu = \omega R/v$ представлены на рис. 2. Приведенные результаты показывают, что для

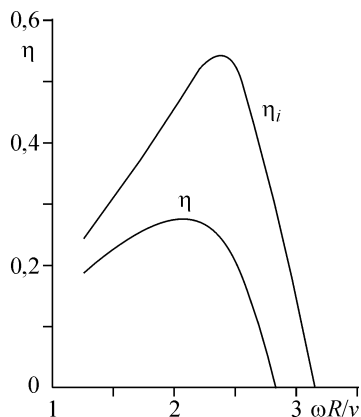


Рис. 2. Коэффициент использования энергии потока 6-лопастным ротором.

η — ротор с траверсами, η_i — идеальный ротор без траверс ($b = 0,084$ м, $\lambda = 4,05$,

$$\sigma = 0,42, \varphi = 4).$$

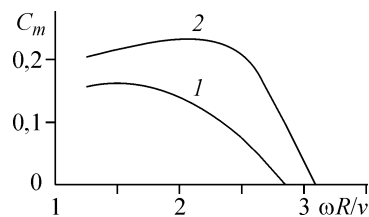


Рис. 3. Зависимость коэффициента вращающего момента от числа Струхалия для 6-лопастного ротора.

1 — ротор с траверсами, 2 — идеальный ротор без траверс.

рассматриваемого 6-лопастного ротора потери мощности потока при обтекании траверс приводят к двухкратному снижению максимального значения полезной мощности, развиваемой идеальным ротором без траверс.

Зависимость $\eta = \eta(\mu)$ позволяет определить аэродинамический момент, вращающий ротор. Этот момент M связан с полезной мощностью ротора ΔW и мощностью потока W_f соотношениями

$$\Delta W = M\omega, \Delta W = W_f\eta.$$

Представим вращающий аэродинамический момент M в виде

$$M = \rho v^2 SRC_m/2,$$

где C_m — безразмерный коэффициент вращающего аэродинамического момента. С учетом написанных формул

$$C_m = v\eta/(\omega R) = \eta/\mu.$$

Результаты расчета коэффициента C_m для 6-лопастного ротора представлены на рис. 3. Экстраполяция функции $C_m(\mu)$ на интервал $0 < \mu < 1$ позволяет сделать вывод, что $C_m > 0$ при всех значениях числа Струхалия μ , включая предельный случай $\mu = 0$. Отсюда следует вывод о возможности самозапуска рассматриваемого 6-лопастного ротора.

ИССЛЕДОВАНИЕ 4-ЛОПАСТНОГО РОТОРА

Влияние различных параметров конструкции на энергетические характеристики наиболее полно исследованы для 4-лопастного ротора. Варьировалась длина хорды ($b = 0,071, 0,084, 0,105$ м) и угол установки лопастей ($\varphi = 0, 4^\circ$) при одинаковом радиусе R и высоте H (те же, что и у 6-лопастной модели). Изменение хорды приводит к изменению удлинения $\lambda = 1/b$ и коэффициента затенения $\sigma = n_b b/D$. Исследуемые модели имели только средние траверсы без кольцевого бандажа. Основные результаты приведены на рис. 4–6 для идеального ротора без траверс.

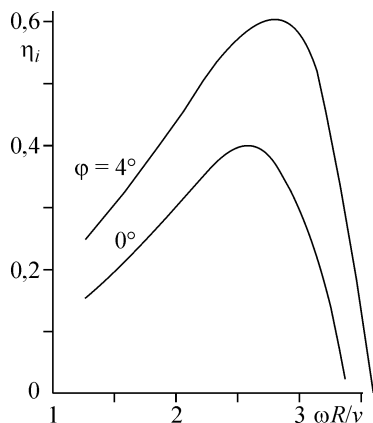


Рис. 4. Оценка эффективности угла установки лопастей 4-лопастного идеального ротора без траверс.
 $b = 0,084$ м, $\lambda = 4,05$, $\sigma = 0,28$.

Влияние угла установки лопастей оценивалось на модели ротора с лопастями шириной $b = 0,084$ м (рис. 4). Эффект этого влияния оказался большим. Изменение угла установки с $\varphi = 0$ до 4° привело к увеличению максимального значения коэффициента использования энергии потока в полтора раза. Причем такой эффект имеет место и для модели ротора с траверсами. Следует отметить, что этот результат полностью согласуется с данными эксперимен-

тальных исследований, опубликованных в [3]. Из этих данных следует, что оптимальный угол установки лопастей зависит от их ширины (увеличивается с увеличением длины хорды) и от относительной толщины профиля лопасти.

Оценка влияния ширины лопастей на энергетические характеристики идеального ротора (при угле установки $\varphi = 4^\circ$) приведена на рис. 5. Представленные результаты показывают, что ротор, лопасти которого имеют хорду $b = 0,084$ м, взаимодействует с потоком намного эффективнее, чем ротор с лопастями $b = 0,105$ и $0,071$ м. Причем с увеличением длины хорды лопасти происходит сдвиг максимального значения коэффициента η_i в сторону меньших значений числа Струхала.

Следует отметить, что для реальной модели ротора с траверсами при ширине лопастей $b = 0,084$ м ($\sigma = 0,28$) и $0,105$ м ($\sigma = 0,35$) наблюдались устойчивые режимы работы во всем диапазоне изменения числа Струхала μ , тогда как для узкой лопасти ($b = 0,071$ м, $\sigma = 0,237$) вблизи значения $\mu = 1$ возникал большой разброс по мощности, затрачиваемой на вращение ротора.

Влияние ширины лопасти на величину вращающего аэродинамического момента показано на рис. 6. С увеличением ширины лопасти растет величина аэродинамического момента и улучшаются условия для самозапуска ротора.

Проведенные эксперименты позволили исследовать влияние траверс на энергетические характеристики ротора Дарье. Для всех моделей ротора были определены потери мощности потока, обусловленные вращением траверс. Уровень этих потерь оказался чрезвычайно высок (до 40 %) и имеет одинаковый порядок для всех исследованных моделей. Основными причинами таких потерь мощности являются силы вязкого трения и отрывной характер обтекания траверс. Но потери энергии при отрывном обтекании траверс и за счет сил вязкого трения на них по-разному зависят от геометрических характеристик ротора и числа Рейнольдса. Поэтому потери энергии на вращение траверс в модельных испытаниях и в натуральных условиях будут, видимо, различны. Можно ожидать, что в натуральных условиях эти потери будут несколько меньше.

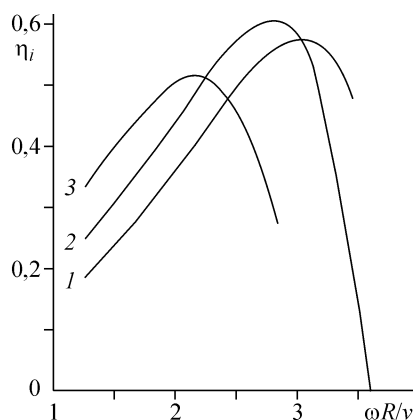
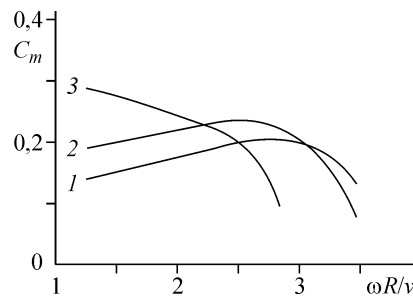


Рис. 5. Влияние ширины лопасти на эффективность идеального 4-лопастного ротора для $\varphi = 4^\circ$.
 $b = 0,071$ (1), $0,084$ (2), $0,105$ м (3).

Рис. 6. Зависимость коэффициента вращающего момента от числа Струхалия для 4-лопастного идеального ротора при $\varphi = 4^\circ$.
 $b = 0,071$ (1), $0,084$ (2), $0,105$ м (3).



Следует отметить, что коэффициент использования энергии потока для идеального ротора без траверс при некоторых значениях параметров достигал в эксперименте величины 60 %, что выше соответствующего теоретического коэффициента идеального ветроколеса пропеллерного типа [6]. Это обстоятельство еще раз показывает, что механизм взаимодействия потока с лопастями для ротора Дарье иной, чем для ветроколеса пропеллерного типа [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные испытания показали перспективность применения двухъярусного ротора Дарье с прямыми лопастями в ветро-энергетических установках. Такой ротор при правильном выборе параметров конструкции обеспечивает самозапуск и позволяет получить более высокий коэффициент использования энергии ветра, чем традиционное ветроколесо пропеллерного типа.

Основным резервом улучшения энергетических характеристик ротора Дарье является совершенствование конструкции траверс с целью уменьшения потерь энергии на их вращение в потоке.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

R, D — радиус и диаметр ротора;	W — мощность, затрачиваемая на вращение ротора в потоке;
l, b — длина и хорда лопасти;	W_0 — мощность, затрачиваемая на вращение ротора в воздухе;
$H = 2l$ — высота ротора;	$\Delta W = W_0 - W$ — полезная мощность, создаваемая ротором;
$S = HD$ — площадь поперечного сечения ротора;	ΔW_T — мощность, теряемая на вращение траверс в потоке;
H/D — относительное удлинение ротора;	$\Delta W_i = \Delta W - \Delta W_T$ — полезная мощность, создаваемая идеальным ротором;
$\lambda = l/b$ — удлинение лопасти;	$\eta = \Delta W/W_f, \sigma/i = \Delta W_i/W_f$ — коэффициенты использования энергии потока ротором с траверсами и без траверс;
n_b — число лопастей в одном ярусе ротора;	$C_m = 2\Delta W/(\rho v^2 S \omega R) = \eta/\mu$ — коэффициент аэродинамического момента.
$\sigma = bn_b/D$ — коэффициент затенения ротора;	
φ — угол установки лопастей;	
ω — угловая скорость вращения ротора;	
v — скорость набегающего потока;	
$\mu = \omega R/v$ — число Струхалия;	
ρ — плотность среды;	
$W_f = \rho v^3 S/2$ — мощность потока;	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галась М.И., Дымковец Ю.П., Акаев Н.А., Костиюков И.Ю. О целесообразности создания вертикально-осевых ветроэлектрических установок мегаваттного класса // Энергетическое строительство. — 1991. — № 3. — С. 33–37.
2. Турян К.Дж., Стрикленд Дж.Х., Берг Д.Э. Мощность ветроэлектрических агрегатов с вертикальной осью вращения // Аэрокосмическая техника. — 1988. — № 8. — С. 105–121.
3. 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.

4. **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.
5. **Ершина А.К., Ершин Ш.А., Жапбасбаев У.К.** Основы теории ветротурбины Дарье. — Алматы: КазгосИНТИ, 2001. — 104 с.
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.** Проблемы аэродинамики ветроколеса Дарье // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 10, № 1. — С. 47–51.

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2005 г.