

УДК 621.311

## **Определение аэрогидродинамических характеристик лопастей турбин с вертикальной осью вращения**

**Б.П. Хозяинов, И.Г. Костин**

*Кузбасский государственный технический университет, Кемерово*

E-mail: khozyainov-bp@mail.ru, Svarog1983@yandex.ru

Приводятся результаты испытаний лопастей турбин с вертикальной осью вращения для определения их аэрогидродинамических характеристик. Испытывались 3 типа лопастей с профилями в виде полуцилиндра, полуэллипса и полуэллипса со стабилизирующей плоскостью. Последний тип лопасти испытан со стационарной и с поворотной стабилизирующими плоскостями.

**Ключевые слова:** лопасть, вертикальная ось вращения, аэрогидродинамический коэффициент.

Важнейшей частью любого ветро- и гидродвигателя являются лопасти, приводящие во вращение турбину. В большой степени эффективность работы таких двигателей зависит от аэрогидродинамических коэффициентов лопастей, которые изменяются в зависимости от принимаемого профиля.

Существуют две наиболее распространенные конструкции ветродвигателей — с горизонтальной и вертикальной осью вращения ветротурбины. Наиболее исследованными, в силу различных обстоятельств, оказались ветродвигатели с горизонтальной осью вращения. Однако установки с вертикальной осью вращения по своим эксплуатационным качествам не уступают, а по отдельным параметрам превосходят ветродвигатели с горизонтальной осью вращения. С перспективами развития ветродвигателей с вертикальной осью вращения можно познакомиться в работе [1].

Целью испытаний настоящей работы стало определение и выбор наиболее эффективных аэрогидродинамических коэффициентов лопастей, работающих в турбинах с вертикальной осью вращения, а также сравнение с эффективностью предлагаемой лопасти [2] (см. рис. 3). Профили испытываемых моделей лопастей показаны на рис. 1, 2, 3.

Испытания проводились в аэродинамической трубе 3-АТ-17,5/3 (научно-исследовательская и проектно-строительная фирма УНИКОН, Новосибирск). В этой трубе проводятся испытания объектов при малых дозвуковых скоростях постоянного действия с замкнутым аэродинамическим контуром, она оснащена длинной рабочей секцией с открытым и закрытым участками и одним обратным каналом, расположенным в горизонтальной плоскости. Ширина входного сечения сопла 3500 мм, высота — 3000; выходное сечение сопла прямоугольной формы

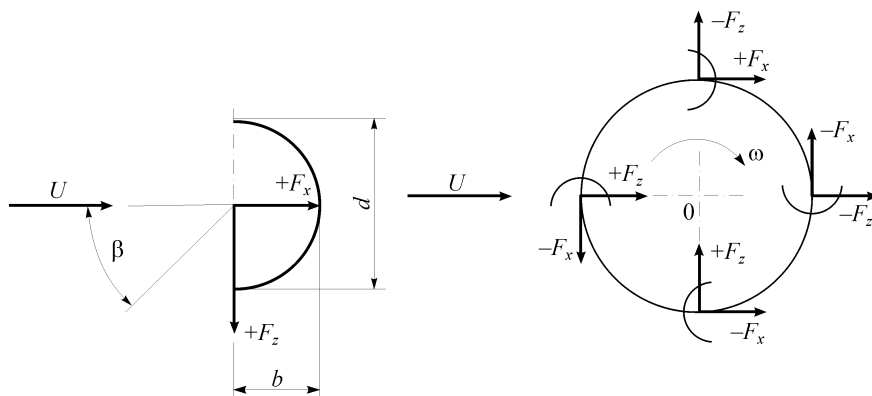


Рис. 1. Профиль первой модели лопасти и расположение ее в турбине.

Определение аэродинамических характеристик лопастей турбин с вертикальной осью вращения.

имеет ширину 2000 мм и высоту 1500 мм. Степень поджатия потока —  $S_{\text{вх}}/S_{\text{вых}} = 3,1$ . Длина открытого участка рабочей секции составляет 3100 мм, длина закрытого — 14400 мм, общая длина рабочей секции 17500 мм (рис. 4) [3]. Скорость потока на оси рабочей секции изменяется от 1 до 22 м/с в плоскости выходного сечения сопла, распределение скорости по сечению рабочей секции равномерное, уровень турбулентных пульсаций скорости  $\varepsilon = 1,8\%$ . Измерения силы лобового сопротивления  $F_x$  (тангенциальной силы) и боковой силы  $F_z$  (нормальной) проводились весовым методом в связанной системе координат. Эти составляющие сохраняют свое положение относительно главных осей полуцилиндра независимо от угла  $\beta$  направления скорости набегающего потока  $U$ . Ротор вращается с угловой скоростью  $\omega$  относительно оси 0. Сила  $+F_x$  направлена по касательной к траектории движения лопасти, т. е. к окружности, и обеспечивает вращение ротора, сила  $+F_z$  направлена вдоль радиуса этой окружности. Направление сил сохраняется независимо от азимутального положения лопасти и показано на рис. 1, 2, 3.

Первая модель лопасти в сечении представляет собой полый полуцилиндр диаметром  $d = 73$  мм и длиной 225 мм, закрепленный на платформе аэродинамических тензочувствительных торцами между двумя пластинами, которые предотвращают перетекание воздушных струй через торцы модели. Таким образом, обеспечивается двумерное обтекание модели. Для чистоты опытов аэродинамические силы поддерживающих устройств и приспособлений вычитались из суммарных сил, зарегистрированных при опыте с моделями.

В конструкции второй модели были сохранены высота модели и размер  $d$ , а размер  $b$  принят таким же  $b = d$  (см. рис. 1 и 2). Конструкция третьей модели отличается от второй наличием стабилизирующей плоскости. Высота стабилизи-

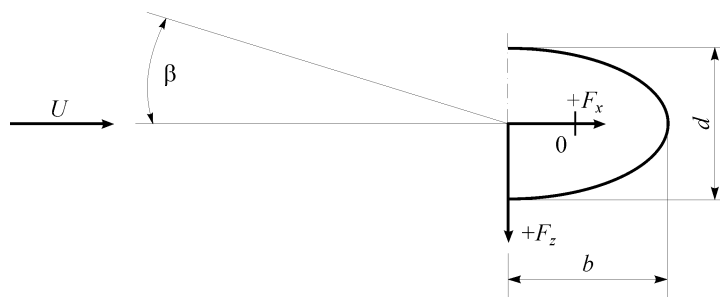


Рис. 2. Профиль второй модели лопасти.

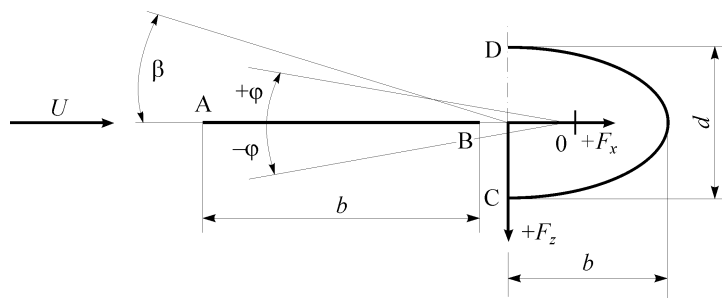


Рис. 3. Профиль третьей модели лопасти.

рующей плоскости принята равной высоте модели, а ширина плоскости равна размеру  $d$ . Третья модель испытывалась в нескольких модификациях: стабилизирующая плоскость закреплена стационарно ( $\varphi = 0$ ), стабилизирующая плоскость свободно поворачивается в секторе, ограниченном углом  $\varphi = \pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ, \pm 34^\circ$ .

Результаты испытаний второй и третьей моделей представлены на рис. 5. Обдувание всех моделей проводилось с поворотом их вокруг вертикальной оси на  $360^\circ$  с шагом в  $5^\circ$ . Определение величины аэродинамических коэффициентов  $C_x$  и  $C_z$  выполнялось по формулам:

$$C_x = \frac{K_x(X - X_0)}{q S}, \quad C_z = \frac{K_z(Z - Z_0)}{q S},$$

где  $K_x, K_z$  — тарировочные коэффициенты аэродинамических весов соответственно: силы лобового сопротивления и боковой силы лопасти. В опытах использовались весы с коэффициентами  $K_x = K_z = 1,11 \times 10^4$  кг/В. Показания регистрирующего прибора для силы лобового сопротивления  $X, (B)$ , боковой силы  $Z, (B)$  соответственно.  $X_0, (B)$  — начальное показание регистрирующего прибора для силы лобового сопротивления,  $Z_0, (B)$  — показания регистрирующего прибора для боковой силы,  $\rho U^2 / 2 = q$  — скоростной напор ветра.

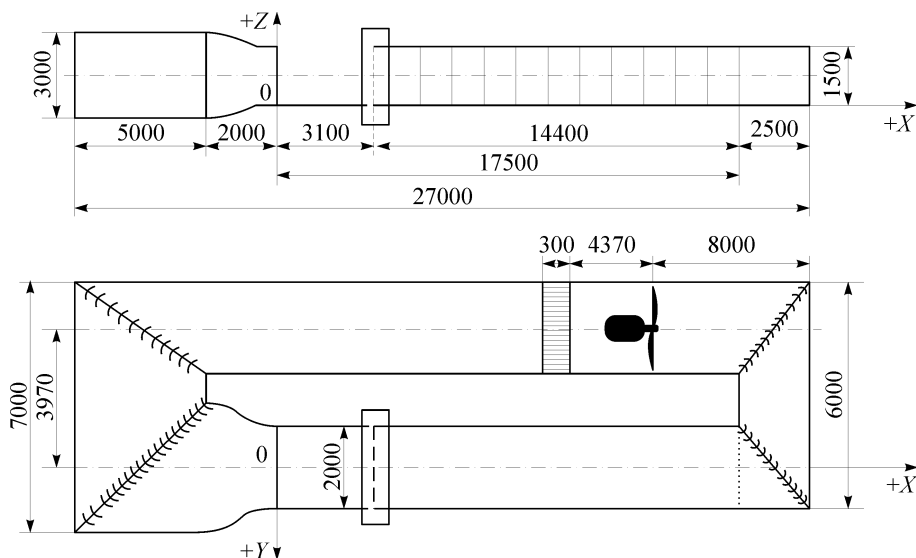


Рис. 4. Схема аэродинамической трубы 3-АТ-17,5/3.

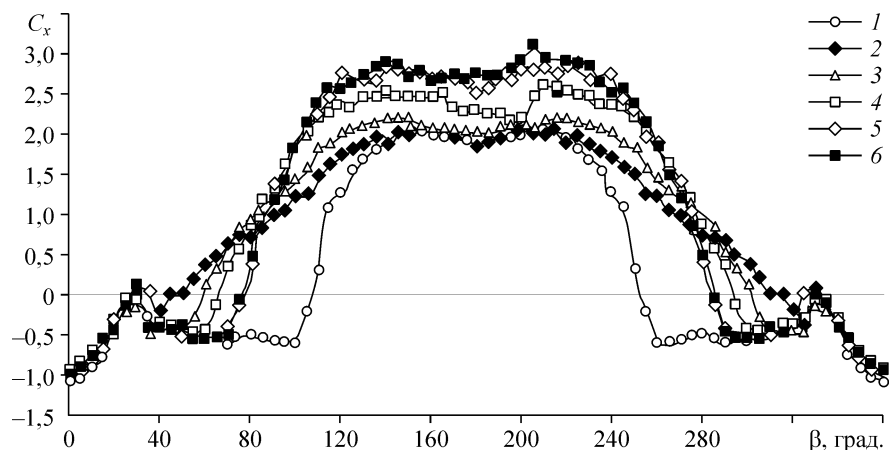


Рис. 5. Аэродинамический коэффициент  $C_x$  во второй и третьей моделях при обдувании их воздушным потоком под углом от 0 до 360°.

1 —  $C_{x2}$ , 2 —  $C_x(\varphi = 0)$ , 3 —  $C_x(\varphi = 10)$ , 4 —  $C_x(\varphi = 20)$ , 5 —  $C_x(\varphi = 30)$ , 6 —  $C_x(\varphi = 34)$ .

Результаты испытаний показали следующее:

1. Среднее значение коэффициента  $C_z$  при полном повороте модели на 360° оказалось практически равным нулю  $C_z = 0,0036$ , несмотря на то, что колебания его были в пределах от +0,689 до -0,689;

2. Колебания величин коэффициента  $C_x$  оказались в большем диапазоне — от +1,639 до -1,330. Однако среднее значение этого коэффициента оказалось положительным, но незначительной величины —  $C_x = 0,231$ ;

3. Поскольку коэффициент  $C_x$  является решающим в работе ветродвигателя с вертикальной осью вращения, то такая низкая величина  $C_x$  не позволяет эффективно использовать энергию воды или ветра. Следовательно, использование полуцилиндра в качестве лопасти двигателя возможно, но неэффективно.

На графике, представленном на рис. 5, даны условные обозначения:  $C_{x2}$  — гидроаэродинамические коэффициенты для второй модели, в которой отсутствует стабилизирующая плоскость,  $C_x(\varphi = 0)$  — гидроаэродинамические коэффициенты для третьей модели, в которой присутствует стабилизирующая плоскость и она стационарно закреплена ( $\varphi = 0$ ),  $C_x(\varphi = 10)$  — гидроаэродинамические коэффициенты для третьей модели, оборудованной стабилизирующей плоскостью, которая может свободно поворачиваться в секторе при  $\varphi = \pm 10^\circ$ ,  $C_x(\varphi = 20)$  — то же самое при  $\varphi = \pm 20^\circ$ ,  $C_x(\varphi = 30)$  — то же самое при  $\varphi = \pm 30^\circ$ ,  $C_x(\varphi = 34)$  и  $C_z(\varphi = 34)$  — при  $\varphi = \pm 34^\circ$ .

Анализ графика, представленного на рис. 5, показывает, что вторая модель лопасти, в которой отсутствует стабилизирующая плоскость, имеет значительно худшие гидроаэродинамические характеристики в сравнении с третьей моделью лопасти, в которой стабилизирующая плоскость присутствует. Даже в модели, где стабилизирующая плоскость закреплена постоянно по оси лопасти, среднеарифметический гидроаэродинамический коэффициент при обдувании ее при полном повороте на 360° составляет  $C_x = 0,8707$ , что в 2,37 раза выше, чем во второй модели. Можно констатировать также, что наличие стабилизирующей плоскости в лопасти дает резкий скачок в сторону улучшения гидроаэродинамических характеристик  $C_x$ . Поворот же стабилизирующей плоскости на угол  $\varphi$  дает постепенный

Таблица

Гидроаэродинамические коэффициенты

$\beta$ , град	$C_{x2}$	$C_x(\varphi = 0)$	$C_x(\varphi = 10)$	$C_x(\varphi = 20)$	$C_x(\varphi = 30)$	$C_x(\varphi = 34)$
$C_x$ , средн	0,366	0,8707	0,9192	1,045	1,093	1,0945
$\beta$ , град	$C_{z2}$	$C_z(\varphi = 0)$	$C_z(\varphi = 10)$	$C_z(\varphi = 20)$	$C_z(\varphi = 30)$	$C_z(\varphi = 34)$
$C_z$ , средн	0,9306	1,5638	1,415	1,4758	1,3587	1,33

незначительный рост (см. таблицу). Небольшая несимметричность, представленная на графике с пиками в диапазоне от  $190$  до  $240^\circ$ , объясняется запаздыванием поворота стабилизирующей плоскости. Следует учесть, что постоянные повороты плоскости могут вызывать значительные повреждения лопасти. Поэтому здесь можно идти несколькими путями: на усиление узлов лопасти или же выполнить стабилизирующую плоскость постоянно закрепленной, без поворота, тогда лопасть будет работать надежнее, сохраняя при этом свои лучшие гидроаэродинамические характеристики.

Рассматривая график изменения гидроаэродинамических коэффициентов  $C_z$ , показанный на рис. 6, нетрудно заметить, что для второй модели средние величины  $C_z$  также значительно меньше  $C_{z2} = 0,9306$  по сравнению с моделями, в которых присутствовала стабилизирующая плоскость (см. табл.).

Представленный ряд коэффициентов  $C_z$  показывает, что наибольшие значения получены при испытании модели, в которой стабилизирующая плоскость установлена стационарно (без поворота), затем идет снижение при  $C_z(\varphi = 34)$  — на 15 %. Однако, как уже замечалось ранее, гидроаэродинамическая характеристика  $C_z$  мало влияет на эффективность работы ветротурбины. Эти характеристики востребованы в основном для расчета непосредственно конструкции лопасти и поддерживающей конструкции всего двигателя.

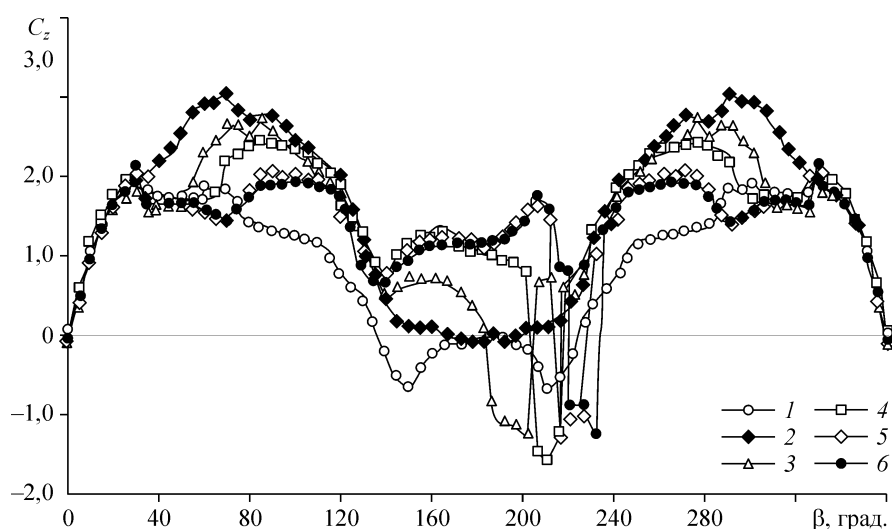


Рис. 6. Аэродинамический коэффициент  $C_z$  во второй и третьей моделях при обдувании их воздушным потоком под углом от  $0$  до  $360^\circ$ .

1 —  $C_{z2}$ , 2 —  $C_x(\varphi = 0)$ , 3 —  $C_x(\varphi = 10)$ , 4 —  $C_x(\varphi = 20)$ , 5 —  $C_x(\varphi = 30)$ , 6 —  $C_x(\varphi = 34)$ .

## ВЫВОДЫ

При испытании моделей лопастей турбин двигателей, использующих в качестве источника энергии движение воды или воздуха, выявлено следующее:

1. Испытания модели лопасти с профилем в виде полуцилиндра показали низкие гидроаэродинамические коэффициенты. Следовательно, использование полуцилиндра в качестве лопасти двигателя возможно, но неэффективно;

2. Замена профиля лопасти в виде полуцилиндра на полуэллипс незначительно улучшило коэффициент  $C_x$  (для сравнения в первой модели  $C_x = 0,231$ , во второй —  $C_x = 0,366$ ) и значительно увеличило коэффициент  $C_z$  (в первой модели  $C_z = 0,0036$ , во второй —  $C_z = 0,9306$ );

3. Стационарная постановка стабилизирующей плоскости заметно повысила коэффициент  $C_x = 0,8707$ , а также и  $C_z = 1,5638$ . Такая конструкция лопасти повышает ее гидроаэродинамические коэффициенты и эффективность работы турбины, однако приведет к большему расходу материалов и как следствие к ее утяжелению;

4. Способность поворота стабилизирующей плоскости приводит к некоторому повышению коэффициентов  $C_x$  до 25,7 % при  $\varphi = \pm 34^\circ$  ( $C_x = 1,0945$ ) и снижению коэффициентов  $C_z$  на — 15 % при  $\varphi = \pm 34^\circ$  ( $C_z = 1,33$ );

5. Испытания моделей лопастей с вышеперечисленными профилями выявили, что наиболее эффективными лопастями турбин двигателей с вертикальной осью вращения при горизонтальном движении жидкой и газообразной сред можно назвать модели с профилем в виде полуэллипса, снабженного стабилизирующей плоскостью, способной свободно поворачиваться вокруг вертикальной оси. Однако конструкция лопасти будет легче и надежней, если стабилизирующая плоскость будет стационарной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания моделей лопастей с вышеперечисленными профилями выявили, что наиболее эффективными лопастями турбин двигателей с вертикальной осью вращения при горизонтальном движении жидкой и газообразной сред можно назвать модели с профилем в виде полуэллипса снабженного стабилизирующей плоскостью, способной свободно поворачиваться вокруг вертикальной оси. Однако конструкция лопасти будет легче и надежней, если стабилизирующая плоскость будет выполнена стационарной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Хозяинов Б.П., Хозяинов Д. Б., Лобанова М.Б. Патент РФ № 2292484. Бюл. № 3. МПК F 03 D 3/00. 2007.
3. Хозяинов Б.П., Березин М.А. Методика проведения испытаний моделей ветроэнергетической установки в аэродинамической трубе 3-АТ-17.5/3 фирмы УНИКОН. // Вестн. КузГТУ. 2000. № 4. С. 38–42.
4. Каликов В.Н., Некрасов И.В. и др. Моделирование взаимодействия ветра с различными инженерными и природными объектами в аэродинамических трубах // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ, 1986. Т. 20. С. 139–209.

*Статья поступила в редакцию 14 мая 2007 г.,  
после переработки 25 марта 2009 г.*