

## ИСПЫТАНИЕ ЛОПАСТЕЙ ВЕТРО - И ГИДРОТУРБИН С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ

© 2010 Б. П. Хозяинов, И. Г. Костин

Кузбасский государственный технический университет

Представлены результаты экспериментальных исследований по определению аэрогидродинамических характеристик для четырёх различных моделей лопасти турбины с вертикальной осью вращения.

*Лопасть, вертикальная ось вращения, аэрогидродинамический коэффициент.*

Как известно, эффективность работы ветро - и гидротурбин во многом зависит от аэрогидродинамических характеристик её лопастей [1]. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований, полученные при испытании различных лопастей турбин с вертикальной осью вращения.

Целью проведённого эксперимента было выявление профиля лопастей с наилучшими аэрогидродинамическими коэффициентами и наилучшими функционально-технологическими и конструктивными характеристиками. Четыре профиля испытанных лопастей представлены на рис. 1, 2, 3, 4.

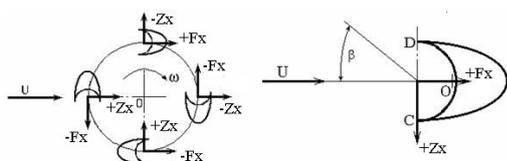


Рис. 1. Первая модель лопасти и расположение ее в турбине

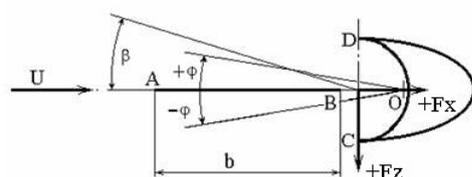


Рис.2. Вторая модель лопасти

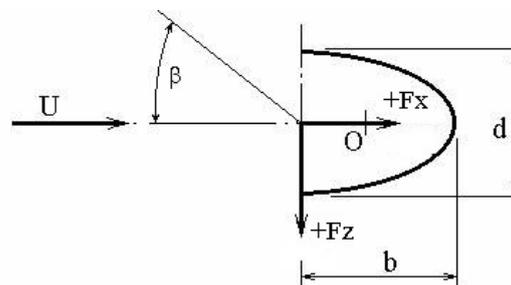


Рис.3. Третья модель лопасти

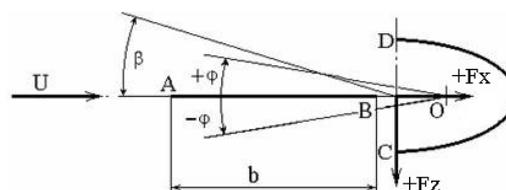


Рис.4. Четвёртая модель лопасти

Испытания проводились в аэродинамической трубе 3-АТ-17,5/3 (рис. 5), которая принадлежит научно-исследовательской и проектно-строительной фирме УНИКОН. 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. Выходное сечение сопла прямоугольной формы имеет длину 2000 мм и высоту 1500 мм. Степень поджатия потока составляет  $S_{вых}/S_{вх}=3,1$ . Длина открытого участка рабочей секции 3100 мм, длина закрытого – 14400 мм, общая длина рабочей секции 17500 мм (рис. 5). Скорость потока на оси рабочей секции изменяется от 1 до 22 м/с в плоскости выходного сечения сопла, рас-

пределение скорости по сечению рабочей секции равномерное, уровень турбулентных пульсаций скорости  $\approx 1,8\%$ . Измерения силы лобового сопротивле-

ния X (тангенциальной силы) и боковой силы Z (нормальной) проводились весовым методом в связанной системе координат.

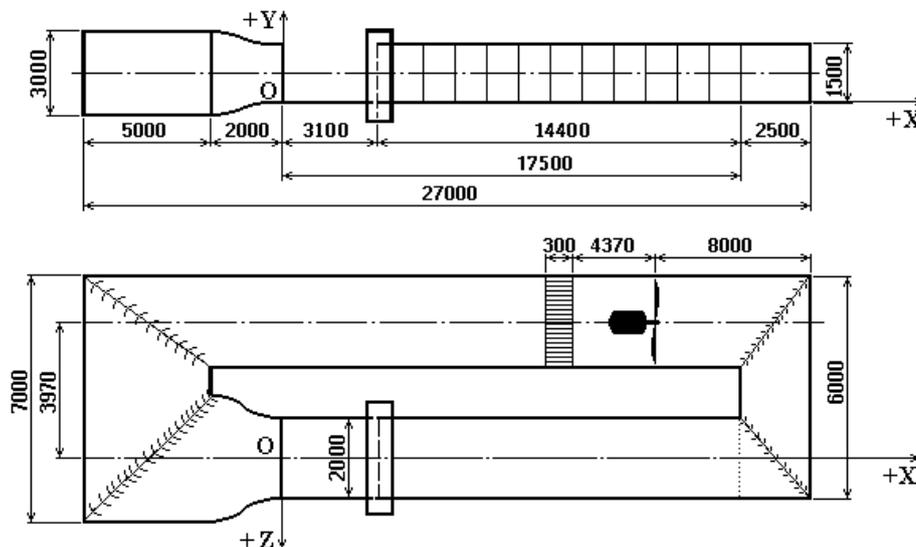


Рис. 5. Схема аэродинамической трубы 3-АТ-17,5/3

Эти составляющие сохраняют своё положение относительно главных осей профиля модели независимо от угла направления скорости набегающего потока  $U$  [2]. Ротор вращается с угловой скоростью относительно оси  $O$ . 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. Как видно из рис. 1, 2, 3, 4, направление сил сохраняется независимо от азимутального положения лопасти.

Первая модель лопасти в сечении представляет собой полуэллипс с полуокружностью, вставленной в вогнутую часть полуэллипса, без стабилизирующей плоскости. Пóлый полуцилиндр имеет диаметр  $d=73$  мм и длину 225 мм.

Вторая модель представляет собой полуэллипс с полуокружностью, вставленной в вогнутую часть полуэллипса, с дополнительно установленной стабилизирующей плоскостью шириной, равной диаметру полуокружности (рис. 2).

Конструкция третьей модели выполнена в виде полуэллипса без стабилизирующей плоскости (рис. 3).

Конструкция четвёртой модели выполнена в виде полуэллипса со стабилизирующей плоскостью (рис. 4).

Размеры входной части всех моделей лопасти были одинаковыми.

Вторая и четвёртая модели испытывались в нескольких модификациях:

- стабилизирующая плоскость закреплена стационарно ( $\varphi=0$ );
- стабилизирующая плоскость свободно поворачивается в секторе, ограниченном углом  $\varphi=\pm 10^\circ$ ;
- стабилизирующая плоскость свободно поворачивается в секторе, ограниченном углом  $\varphi=\pm 20^\circ$ ;
- стабилизирующая плоскость свободно поворачивается в секторе, ограниченном углом  $\varphi=\pm 30^\circ$ .

Основное отличие второй модели от четвёртой заключается в том, что в вогнутую часть полуэллипсного профиля вставлена полуцилиндрическая часть лопасти, что даёт возможность проводить сравнение аэродинамических характеристик лопастей с замкнутым и разомкнутым контурами входной части.

Все модели закреплялись на платформе аэродинамических тензовесов торцами

между двумя пластинами, которые предотвращали перетекание воздушных струй через торцы модели. Таким образом, обеспечивалось двумерное обтекание модели. Для чистоты опытов аэродинамические силы поддерживающих устройств и приспособлений вычитались из суммарных сил, зарегистрированных при опыте с моделями.

Обдувание 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

$$C_{x_i} = \frac{K_x(X_i - X_0)}{qS}; \quad C_{z_i} = \frac{K_z(Z_i - Z_0)}{qS},$$

где

$K_x, K_z$  – тарировочные коэффициенты аэродинамических весов: соответственно силы лобового сопротивления и боковой силы лопасти. В опытах использовались весы с коэффициентами  $K_x = K_z = 11100$  кг/В;

$X_i, Z_i$  – соответственно показания регистрирующего прибора для силы лобового сопротивления и боковой силы;

$X_0, Z_0$  – соответственно начальные показания регистрирующего прибора для силы лобового сопротивления и боковой силы лопасти;

$$q = U^2/2 \text{ – скоростной напор ветра.}$$

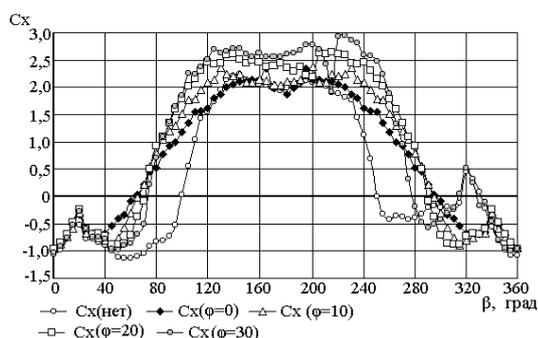


Рис. 6. График изменения аэродинамического коэффициента  $C_x$  в первой и второй моделях при обдувании ее воздушным потоком под углом от  $0^\circ$  до  $360^\circ$

На рис. 6 использованы следующие условные обозначения:

$C_x(\text{нет})$  – гидроаэродинамические коэффициенты для первой модели, в которой отсутствует стабилизирующая плоскость;

$C_x(\varphi=0)$  – гидроаэродинамические коэффициенты для второй модели, в которой присутствует стационарно закреплённая стабилизирующая плоскость ( $\varphi=0$ );

$C_x(\varphi=10)$  – гидроаэродинамические коэффициенты для второй модели, оборудованной стабилизирующей плоскостью, которая может свободно поворачиваться в диапазоне  $\varphi = \pm 10^\circ$ ;

$C_x(\varphi=20)$  – гидроаэродинамические коэффициенты для второй модели, снабженной стабилизирующей плоскостью, которая может свободно поворачиваться в диапазоне  $\varphi = \pm 20^\circ$ ;

$C_x(\varphi=30)$  – то же самое при  $\varphi = \pm 30^\circ$ . Для третьей модели определялись  $C_x(\varphi=34)$  и  $C_z(\varphi=34)$  при  $\varphi = \pm 34^\circ$ .

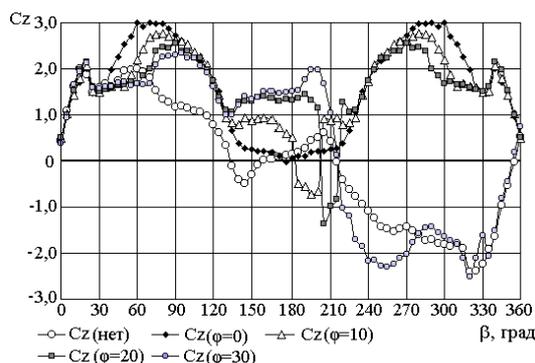


Рис. 7. Изменение аэродинамического коэффициента  $C_z$  в первой и второй моделях при обдувании воздушным потоком под углом от  $0^\circ$  до  $360^\circ$

Из рис. 7 видно, что гидроаэродинамическая характеристика  $C_z$  мало влияет на эффективность работы ветротурбины. Поэтому эти характеристики используются в основном для расчета непосредственно конструкции лопасти и поддерживающей её конструкции.

В табл.1 приводятся средние значения  $C_x$  и  $C_z$  при обдувании первой и второй моделей с различным углом поворота стабилизирующей плоскости.

Таблица 1. Средние значения аэрогидродинамических коэффициентов четырёх моделей при обдувании их воздушным потоком с поворотом на  $360^\circ$ 

$\beta$ , град	модели без плоскости	модели с плоскостью $\varphi = 0^\circ$	модели с плоскостью $\varphi = \pm 10^\circ$	модели с плоскостью $\varphi = \pm 20^\circ$	модели с плоскостью $\varphi = \pm 30^\circ$	модели с плоскостью $\varphi = \pm 34^\circ$
	(1 и 3)	(2 и 4)	(2 и 4)	(2 и 4)	(2 и 4)	(2 и 4)
Средние значения аэрогидродинамических коэффициентов 1 <sup>ой</sup> и 2 <sup>ой</sup> моделей						
Sx, средн	0,37	0,7477	0,831	0,953	1,017	
Cz, средн	-0,0099	1,6279	1,567	1,591	1,3412	
Средние значения аэрогидродинамических коэффициентов 3 <sup>ей</sup> и 4 <sup>ой</sup> моделей						
Sx, средн	0,366	0,8707	0,9192	1,045	1,093	1,0945
Cz, средн	0,9306	1,5638	1,415	1,4758	1,3587	1,33

Из анализа данных, приведённых в табл.1 и на рис. 6, можно сделать следующие выводы:

1. Появление стабилизирующей плоскости во второй модели позволило повысить среднее значение аэрогидродинамического коэффициента Sx в два раза по сравнению с коэффициентом первой модели, что может резко повысить эффективность работы турбины.

2. Постепенное увеличение угла поворота стабилизирующей плоскости  $\varphi$  от 0 до  $\pm 30^\circ$  во второй модели способствовало повышению коэффициента Sx. С поворотом стабилизирующей плоскости на  $\pm 10^\circ$  повышение составило 11,1%, на  $\pm 20^\circ$  – 27,46% и при повороте  $\pm 30^\circ$  на 36,02% по сравнению с той же моделью, имеющей стационарно закреплённую стабилизирующую плоскостью ( $\varphi = 0$ ).

3. Наличие стабилизирующей плоскости во второй модели способствовало появлению больших по величине коэффициентов Cz, которые мало влияют на эффективность работы турбины, но могут заметно увеличить массу её лопастей, а поворот плоскости лишь незначительно уменьшает эти коэффициенты с Cz=1,628 при  $\varphi = 0^\circ$  до Cz=1,341 при  $\varphi = \pm 30^\circ$ .

4. Отсутствие полуцилиндра у третьей модели (по сравнению с первой моделью) ухудшило её гидроаэродинамические характеристики, особенно

значение коэффициентов Cz. Если для первой модели они практически равны нулю, то для третьей модели Cz=0,931.

5. Появление стабилизирующей плоскости в четвёртой модели повысило на 10,7% коэффициенты Sx по сравнению со второй моделью и понизило на 5,4% коэффициенты Cz.

### Выводы

Ввиду того, что работа лопастей первой и третьей моделей в турбине неэффективна, они не могут быть рекомендованы для практического применения. Профиль четвёртой модели выглядят более предпочтительно по сравнению с профилем третьей модели, однако замкнутый профиль третьей модели может оказаться легче и, соответственно, эффективней. Поворот стабилизирующей плоскости в третьей и четвёртой моделях будет приводить к появлению динамических ударов по входной части лопасти при вращении турбины, что потребует усиления лопасти и, как следствие, увеличения её массы. Поэтому решение о выборе лопастей третьей или четвёртой моделей должно приниматься в каждом конкретном случае в зависимости от размеров турбины, скорости движения носителя энергии (воздуха или воды) и других характеристик.

### Библиографический список

1. Моделирование взаимодействия ветра с различными инженерными и природными объектами в аэродинамических трубах / В.

Н. Каликов, И. В. Некрасов и др. – Итоги науки и техники, серия механики жидкости и газа. – М.: ВИНТИ, 1986. – Т. 20. – С. 139-209.

2. Хозяинов, Б. П. Методика проведения испытаний моделей ветроэнергетической установки в аэродинамической трубе 3-АТ-17.5/3 фирмы УНИКОН [Текст] / Б. П. Хозяинов, М. А. Березин // Вестник КузГТУ. – 2000. – №4. – С. 38-42.

## References

3. Simulation of wind interaction with various engineering and natural objects in wind tunnels / V. N. Kalikov, I. V. Nekrasov [et. al.] – Totals of science and engineering, series of fluid mechanics. – М.: VINITI, 1986. – Vol. 20. – PP. 139-209.
4. Khozyainov, B. P. Procedure of carrying out tests of models of a windmill in a wind tunnel 3-AT-17.5/3, UNIKON [Text] / B. P. Khozyainov, M. A. Berezin // Vestnik (Bulletin) of Kuzbass State Technical University. – 2000. – No. 4. – PP. 38-42.

## TESTING THE BLADES OF WINDMILLS AND HYDRAULIC TURBINES WITH THE VERTICAL AXIS OF ROTATION

© 2010 B. P. Khozyainov, I. G. Kostin

Kuzbass State Technical University

The results of testing blades of turbines with a vertical axis of rotation, namely the definition of their aerohydrodynamical characteristics are presented for four models of blades.

*Blade, vertical axis of rotation, aerohydrodynamic coefficient.*

### Информация об авторах

**Хозяинов Борис Петрович**, доцент, к.т.н., заведующий кафедрой строительных конструкций. Кузбасский государственный технический университет. Область научных интересов: разработка ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. E-mail: [khozyainov-bp@mail.ru](mailto:khozyainov-bp@mail.ru).

**Костин Иван Геннадьевич**, аспирант, инженер кафедры строительных конструкций. Кузбасский государственный технический университет. Область научных интересов: разработка гидроэнергетических установок с вертикальной осью вращения. E-mail: [Svarog1983@yandex.ru](mailto:Svarog1983@yandex.ru).

**Khozyainov Boris Petrovitch**, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of building design. Kuzbass State Technical University. Area of research: development of wind power installations with a vertical axis of rotation. E-mail: [khozyainov-bp@mail.ru](mailto:khozyainov-bp@mail.ru).

**Kostin Ivan Gyenadyevitch**, post-graduate student, engineer of the department of building design. Kuzbass State Technical University. Area of research: development of hydropower installations with a vertical axis of rotation. E-mail: [svarog1983@yandex.ru](mailto:svarog1983@yandex.ru).