

03

Вертикальная циркуляция воздуха в низкоскоростной ветротурбине поперечного потока с поворотными лопастями

© Вик.В. Чебоксаров, Вал.В. Чебоксаров

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
E-mail: VChebox@gmail.com

В окончательной редакции 29 мая 2007 г.

Предлагается модель и описываются условия численного аэродинамического исследования крупногабаритной ветротурбины поперечного потока с поворотными лопастями. Результаты численных экспериментов показывают, что при обтекании турбины наблюдается существенная вертикальная (осевая) циркуляция, повышающая коэффициент мощности турбины. Во внутреннем пространстве турбины образуются два устойчивых вихря, через которые замедленные струи после обтекания наветренной стороны частично покидают турбину и перед подветренной стороной замещаются более быстрыми струями из соседних воздушных слоев.

PACS: 89.30.Ec

В процессе первоначального исследования [1] энергетических характеристик недавно предложенной крупногабаритной морской ветротурбины, относящейся к классу низкоскоростных ветротурбин поперечного потока, было обнаружено ее весьма высокое качество. В частности, для пока еще не оптимизированной конструкции коэффициент мощности C_P , отражающий утилизируемую турбиной долю кинетической энергии ветрового потока в ее поперечном сечении, достигает 0.52, что уже весьма близко к теоретическому пределу Бетца ($C_{P_{\max}} \approx 0.59$) [2]. Учитывая необычность этой цифры для низкоскоростных турбин, считающихся малоэффективными, встала задача более тщательного анализа и, в частности, выявления аэродинамических эффектов, повышающих эффективность предложенной турбины.

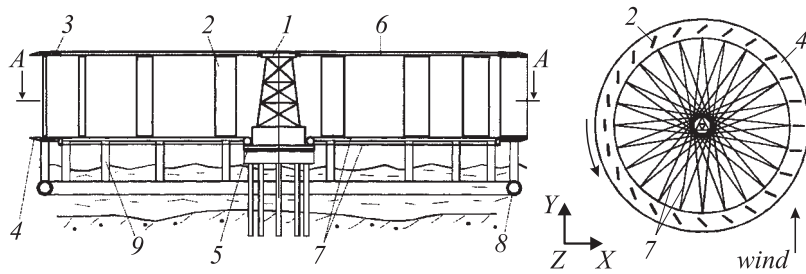


Рис. 1. Упрощенная схема исследуемой ветротурбины поперечного потока; справа — сечение А – А: 1 — центральная башня, 2 — лопасть, 3 — верхнее кольцо, 4 — нижнее кольцо, 5 — ступица ротора, 6 — верхний радиальный трос, 7 — нижние тросы, 8 — понтон, 9 — колонна.

Исследуемая турбина (рис. 1) отличается наличием крупногабаритного плавучего ротора с вертикальной осью вращения и лопастями, каждая из которых может устанавливаться под оптимальным углом атаки к воздушному потоку в локальной точке. Опоры осей лопастей располагаются в верхнем и нижнем кольцах, примерно равных по ширине хорде лопастей. Кольца соединяются со ступицами ротора системой тросов. Аэродинамический профиль лопастей представлен в работе [1].

Физические эксперименты в аэродинамической трубе с уменьшенной масштабной моделью не подходят для исследования воздушных потоков на турбине. Из-за больших размеров (в расчетах принимается радиус ротора $R = 100$ м, хорда лопасти $b = 8$ м, длина лопасти $H_b = 40$ м при высоте нижней кромки над поверхностью воды $h_b = 10$ м, число лопастей $n = 45$) соблюдение подобия по числу Рейнольдса становится практически невозможным. В таких условиях единственно пригодными остаются методы компьютерной динамики жидкости (CFD), допускающие аэродинамический анализ без масштабирования геометрии ветротурбины. Экспериментально проверено, что при корректном построении расчетной области и сетки, с правильной моделью турбулентности и обработкой пограничного слоя CFD-методы гарантируют получение адекватных результатов [3]. Результаты проверок CFD-методов на небольших высокоскоростных ветротурбинах (см., например, [4]) позволяют прогнозировать их пригодность и для

анализа воздушных потоков на крупногабаритных низкоскоростных ветротурбинах.

Проводим аэродинамический расчет потока в области, разделенной на две зоны: вращающуюся, охватывающую ближайшее к лопастям воздушное пространство в форме кольца, а также стационарную, окружающую вращающуюся зону в форме прямоугольного параллелепипеда размерами $1000 \times 1100 \times 150$ м. Вращающаяся система координат рассматривается инерциальной, так как момент инерции ротора очень велик. Поток считается установившимся, пренебрегая нестационарностью скорости ветра. Устанавливаем углы поворота лопастей, как найдено в работе [1]. Аэродинамическим сопротивлением центральной башни, тросов и колонн можно пренебречь, поэтому исключаем их из области расчета.

В основу программы расчета положены уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (уравнения Навье–Стокса), которые для стационарной зоны могут быть записаны в тензорном виде соответственно как (1) и (2):

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}). \quad (2)$$

Во вращающейся системе координат, связанной с ротором, аналогичные уравнения имеют вид

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0, \quad (3)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial X_j} = -\frac{\partial p}{\partial X_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial X_j \partial X_j} + \frac{\partial}{\partial X_j} (-\rho \overline{U'_i U'_j}) + \rho (A_{ij} X_j + B_{ij} U_j). \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4) (x_1, x_2, x_3) — декартовы координаты в абсолютной системе с центром на оси ротора на поверхности воды, (X_1, X_2, X_3) — декартовы координаты в системе, связанной с ротором, (u_1, u_2, u_3) — среднее значение абсолютной скорости потока, (U_1, U_2, U_3) — среднее значение скорости потока во вращающейся системе координат, (u'_1, u'_2, u'_3) — флуктуация абсолютной скорости,

(U'_1, U'_2, U'_3) — флуктуация скорости во вращающейся системе координат, ρ — плотность воздуха, p — давление, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ и $-\rho \overline{U'_i U'_j}$ — напряжения Рейнольдса, определяемые по формулам

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = -\rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (5)$$

$$-\rho \overline{U'_i U'_j} = -\rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right), \quad (6)$$

где μ и ρ — соответственно вязкость и плотность воздуха, μ_t — турбулентная вязкость, k — турбулентная кинетическая энергия, δ_{ij} — символ Кронекера. Выражения для линейных матриц A_{ij} и B_{ij} , а также для матриц перехода от абсолютных к относительным скоростям и координатам могут быть найдены в работе [1].

Рассматривались модели турбулентности $k-\varepsilon$, SA (с коррекцией) и SST $k-\omega$ (см. например, [3]), которые показали близкие результаты расчетов. Исходя из этого, в качестве базовой для данного исследования выбрана стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности как наиболее экономичная при приемлемой точности. Здесь уравнения (1)–(6) дополняются уравнениями транспорта турбулентной кинетической энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ε , а также выражением турбулентной вязкости μ_t :

$$\rho u_t \frac{\partial k}{\partial x_i} = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} - \rho \varepsilon, \quad (7)$$

$$\rho u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (9)$$

Константам ($C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε , C_μ) в уравнениях (7)–(9) назначаются стандартные значения (1.44, 1.92, 1.0, 1.3, 0.09) выбранной модели.

Уравнения (1)–(9) решаются методом конечных объемов. Использована схема пространственной дискретизации второго порядка как наиболее точная для выбранной шестигранной формы ячеек сетки, а также стандартная схема дискретизации по давлению и SIMPLE-метод связи давление–скорость. Сгенерированная неконформная сетка включает

около $4 \cdot 10^6$ ячеек с максимальной плотностью у поверхности лопастей и колец. Высота первого слоя ячеек равна 10 mm, что гарантирует корректный расчет потоков в пограничном слое с помощью стандартной пристенной функции.

Граничные условия на входе воздушного потока в расчетную область задаем как: $u_2 = u_\infty = 25$ m/s; $u_1 = u_3 = 0$. Здесь u_∞ — скорость невозмущенного потока. Типичные турбулентные параметры для морской поверхности: турбулентная интенсивность 12%, $\mu_t/\mu = 10$. На выходе потока задано: $p = 0$. Угловая скорость вращающейся зоны $\omega = 0.7u_\infty/R$.

Помимо однородного входного потока также рассматривается характерная для моря логарифмическая вертикальная стратификация скорости [5]:

$$u_2(x_3) = u_{10} + u_* \ln(x_3/10)/0.4, \quad (10)$$

где $u_{10} = 25$ m/s — средняя скорость для $x_3 = 10$ m и динамическая скорость

$$u_* = u_{10} \sqrt{0.001 \cdot (1.5 \cdot (1 + \exp(-(u_{10} - 12.5)/1.56))^{-1} + 1.04)}. \quad (11)$$

В результате расчета получается распределение крутящего момента M_i по лопастям ветротурбины, которое представлено на рис. 2 в функции азимутального угла θ . Видно, что лопасти на задней (подветренной) стороне турбины ($\theta < 180^\circ$) в целом работают весьма эффективно, несмотря на их затенение лопастями передней (наветренной) стороны турбины ($\theta > 180^\circ$). Очевидно, что на работу задних лопастей влияет плотность лопастей передней стороны. И действительно, с уменьшением числа лопастей n при $b = \text{const}$ картина распределения крутящего момента M_i на передней и задней стороне ветротурбины постепенно выравнивается.

Однако численные эксперименты показали, что и при высокой плотности, когда поток сжат передними лопастями и, замедляясь, эффективно отдает им энергию, на задних лопастях по-прежнему присутствует существенный крутящий момент. Это может происходить лишь вследствие притока дополнительной энергии во внутреннее пространство ветротурбины. Другими словами, в турбине поперечного потока присутствует существенная циркуляция в осевом (вертикальном) направлении, влияющая на эффективность турбины.

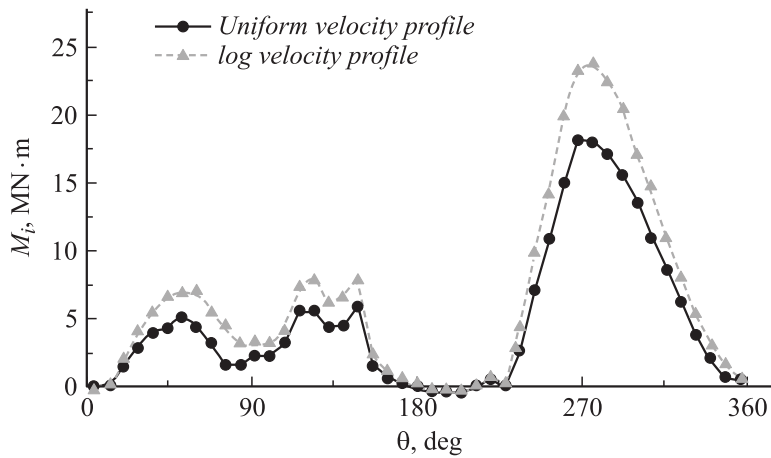


Рис. 2. Распределение крутящего момента лопастей M_i в функции азимутального угла θ .

Проанализируем картину вертикальной циркуляции более подробно. Сначала проследим линии потока, проходящего через турбину в вертикальной осевой плоскости (рис. 3, вверху). Легко заметить, что поток, миновавший лопасти наветренной стороны 1, сильно отклоняется навстречу вращению, а значительная часть уже замедленных струй 3 выходит из турбины, не достигая подветренной стороны 2. Очевидно, что им на смену во внутреннее пространство турбины перед подветренными лопастями должны войти более быстрые струи.

На центральном фрагменте рис. 3 представлены контуры вертикальной скорости в горизонтальной плоскости на срезе верхнего кольца ($x_3 = H_b + h_b = 50$ m). Здесь светлый участок 4 (положительные значения скорости) указывает на место, где медленные струи выходят из внутреннего пространства турбины, а темный участок 5 (отрицательные значения скорости) указывает место, где в турбину входят быстрые струи. Эти области существенно вытянуты вдоль потока.

На нижнем фрагменте рис. 3 представлены векторы абсолютных скоростей возле движущихся навстречу ветру лопастей (видны справа) в поперечной плоскости, проходящей через области максимальной вертикальной циркуляции ($x_2 = 20$ m). Палитра оттенков указывает на

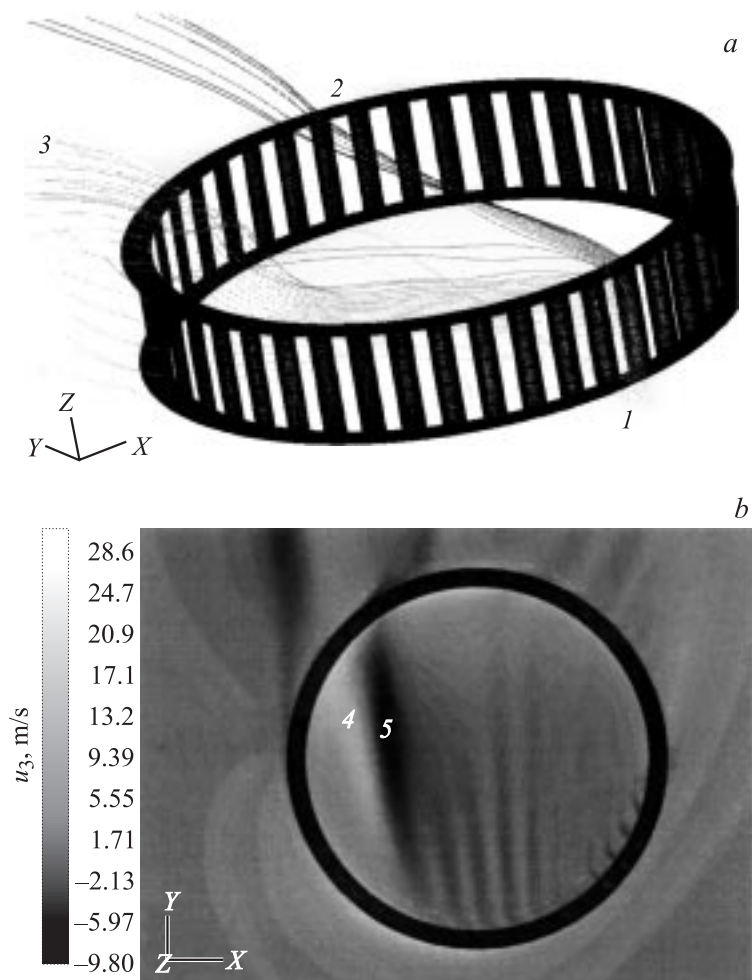


Рис. 3. Результаты аэродинамических расчетов для логарифмического профиля скоростей: *a* — линии потока в вертикальной плоскости, *b* — контуры вертикальной скорости на срезе верхнего кольца, *c* — векторы абсолютных скоростей в поперечной плоскости возле лопастей, движущихся навстречу ветру: *1* — наветренная сторона турбины, *2* — подветренная сторона, *3* — замедленные струи, покинувшие турбину, *4* — участок восходящего потока, *5* — участок нисходящего потока.

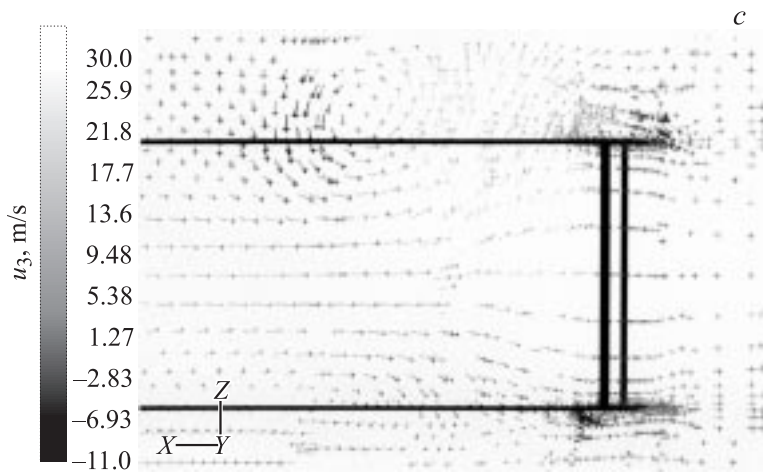


Рис. 3 (продолжение).

величину вертикальной составляющей скорости. Хорошо видны два вихря, образующиеся сверху и снизу ветротурбины. Нижний вихрь сплюснут в поперечном сечении соседней границей (водной поверхностью), а верхний представляет собой почти правильный цилиндр. В верхнем вихре интенсивность несколько выше из-за логарифмической стратификации скоростей. Здесь вертикальная составляющая скорости достигает половины скорости невозмущенного потока u_∞ . Указанные вихри и являются каналом, по которому осуществляется подсос дополнительной энергии в ветротурбину из соседних (верхних и нижних) воздушных слоев, формально добавляющий несколько процентов к коэффициенту мощности C_p .

Причиной образования вихрей является то, что воздушный поток, стекая с закрылков лопастей наветренной стороны ветротурбины, внутри турбины отклоняется в поперечном направлении навстречу движению данных лопастей. Вследствие этого у лопастей, движущихся навстречу ветру и из-за нулевого угла атаки стоящих здесь более плотно, появляется область повышенного давления и струи вытесняются из турбины, закручивая поток. Указанное явление должно прослеживаться не только в турбинах с поворотными лопастями, но и в других турбинах поперечного потока, не имеющих ограждений по торцам.

Обнаруженное явление вертикальной циркуляции имеет важное практическое значение для проектирования ветротурбин. Оно позволяет повышать единичную мощность и эффективность ветротурбин поперечного потока за счет увеличения их диаметра, а не осевых размеров.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ по гранту № 06-01-89505-ННС_а.

Список литературы

- [1] *Cheboxarov Victor V., Cheboxarov Valery V., Bekker A.T.* // Int. J. Offshore and Polar Eng. ISOPE. 2004. V. 14. N 3. P.233–238.
- [2] *Tony Burton et al.* // Wind Energy Handbook. P. 45. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2001. 617 p.
- [3] *Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачев А.Е.* // Теплофизика и аэродинамика. 2006. Т. 13. № 1. С. 63–73.
- [4] *Maeda T., Kamada Y., Edmond I., Koma A.* // Proc. EXPO World Conf. on Wind Energy. Renewable Energy, Fuel Cell, Hamamatsu, Japan, 2005. 4 p. (CD-ROM).
- [5] *Amorocho J., de Vrees J.* // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. NC1. P. 435–442.