УДК 533.695.8; 621.548

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ РОТОРА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Кабардин И.К.[1], Наумов И.В.[1], Окулов В.Л.[1,2], Микельсон Р.Ф.[2], Вельте К.М.[2]

[1]*Институт Теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия*
[2]*Датский технический университет, Люнгби, Дания*

АННОТАЦИЯ

В работе представлены исследования производительности и силовых характеристик модели ротора ветрогенератора, изготовленного для комплексных оптико-лазерных исследований вихревого следа. Благодаря тензометрическим датчикам, установленных в креплении ротора, были произведены измерения крутящего момента и напора на ротор для быстроходности λ =3-8. Была произведена калибровка измерительной системы. По калибровочным зависимостям получены зависимости крутящего момента и напора в единицах [Н*м] и [Н] соответственно. Получены зависимости для безразмерных коэффициентов отбора мощности и напора. В экспериментах было определено, что оптимальный режим спроектированной лопатки модели трехлопастного ротора ветрогенератора действительно соответствует быстроходности λ = 5, а оптимальный угол атаки находится в интервале α = 0-3 ^{0}. Однако расчётный угол установки α =0° дал меньшее значение крутящего момента по сравнению с углом установки α =+3°.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития аэродинамики ротора, безусловно, связан с бурным развитием ветроэнергетики, с изменением ее статуса от использования одиночных альтернативных источников энергии до превращения в индустриальную отрасль - важнейшую составляющую мирового энергетического потенциала. Сегодня в энергетическом балансе отдельных стран уже до 10-20% составляет ветровая электроэнергия и прогнозируется дальнейший ее рост, например в Дании планируется достичь обеспечения энергетических потребностей до 50% к 2020 году. Поэтому у исследователей снова возрос интерес к роторной аэродинамике, к поиску новых путей повышения производительности ветровых турбин. Первая попытка была предпринята в рамках крупного европейского проекта «MEXICO» [1] с проведением PIV-измерений течения за трехлопастным ротором в аэродинамической трубе, В работе из-за больших размеров модели ветряка авторам удалось исследовать незначительную область следа, которая ограничивалась двумя радиусами вниз по потоку с измерительными окнами, не перекрывающими всю область следа. Следующие эксперименты с PIV-диагностикой и восстановлением мгновенной структуры трехмерного поля скорости течения за трехлопастными моделями ветряков были сделаны в водяных каналах [2,3]. Изучались модели роторов радиусов 186 мм [1] и 115 мм [3] с оптимизированными по Глауэрту лопастями [4]. В работе [2] с помощью визуализации и стерео PIV-системы были изучены два режима обтекания ротора с быстроходностями 5 и 6, а в [3] использовался двумерный PIV с фазовой привязкой к углу поворота ротора для быстроходности 6.

Несмотря на наличие комплексных оптико-лазерных измерений динамики в следе за моделью ротора необходимо исследование производительности и силовых характеристик модели ротора для того, чтобы удостовериться насколько хорошо была спроектирована модель и насколько близко по производительности она позволяет подойти к тео-

© Кабардин И.К., Наумов И.В., Окулов В.Л., Микельсон Р.Ф., Вельте К.М.

ретическому пределу отъема энергии ветра, а также насколько правильно выбраны те измерительные режимы, в которых производились эксперименты. Данная работа является продолжением работы[2]. Целью данной работы было исследовать производительность и силовые характеристики модели ротора в водяном канале.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Модель ротора помещалась в водяной канал. Длина водяного канала составляла 35 м, ширина - 3 м и рабочая высота - 0,9 м. Для проведения оптических измерений на расстоянии 20 м от начала канала располагался измерительный участок длиной 3 м, все стенки и дно которого выполнены из стекла. Водяной поток поступал в канал через конфузор и хонейкомб ¾ сотовое устройство для линеаризации скорости течения по сечению канала.

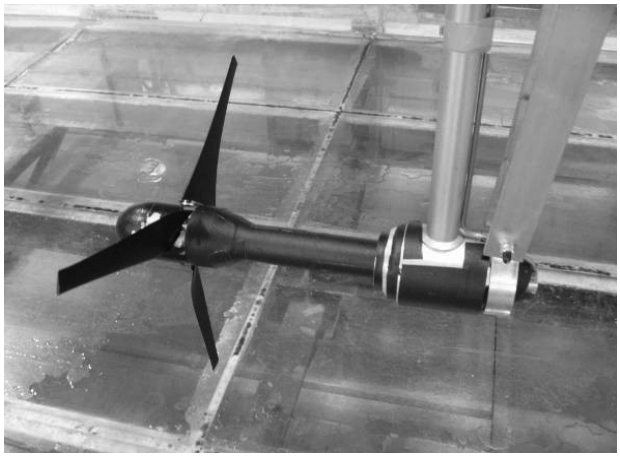

Рис.1 Фотография ротора в сухом канале.

Модель трехлопастного ротора (рис.1) была специально изготовлена для качественной и количественной визуализации течения позади ротора. Диаметр ротора составлял 2R = 0,376 м, а длина лопасти ротора ¾ 0,159 м.

Контроль скорости потока осуществлялся независимым гидрометрическим измерителем скорости OTT Z400 в течении всего эксперимента. Значение скорости потока в месте расположения модели ротора равнялась V = 0,38 м/с Колебания скорости потока в ходе экспериментов не превышали 3 %.

В качестве профиля для лопастей был взят профиль CD7003 из [4]. Хорда лопасти и угол ее установки были рассчитаны по теории Глауэрта для оптимального ветряка [5] с быстроходностью $\lambda = 5$, где $\lambda = \Omega R/V$, а Ω ¾ угловая скорость вращения ротора. Предусматривалась регулировка угла установки лопаток. Числа Рейнольдса $Re = \rho\Omega Rb/\mu$, (ρ и μ ¾ плотность и динамическая вязкость рабочей жидкости ¾ водопроводной воды, b ¾ длина хорды лопасти (1 см) в проведенных экспериментах находятся вблизи 20 000 для быстроходности $\lambda = 5$, при рабочей температуре 20°C. Крепление и фиксация ротора были выполнены на перемещаемой над каналом платформе на расстоянии 0,3 позади ротора, чтобы минимизировать возмущения набегающего потока в плоскости ротора. Кроме того, в экспериментах ось ротора была размещена на высоте 0,5 м от дна, чтобы свести влияние неоднородности профиля набегающего потока к минимуму. Для вращения ротора с постоянной угловой скоростью применялся серводвигатель JVL Industry Elektronik MAC400. Вращательный момент двигателя передавался на ось ротора через зубчатую передачу. Программное обеспечение управления серводвигателем MacTalk обеспечивало установку необходимого вращения ротора и его контроль с погрешностью менее 2 %.

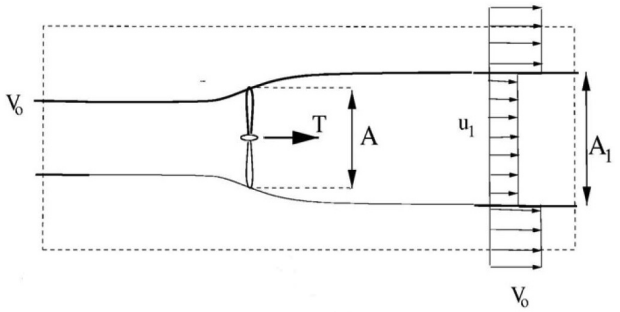

Рис.2 Измерительный объем вокруг ротора турбины.

В работе были проведены исследования производительности модели ротора, для проведения сравнения полей скорости, полученных для различной быстроходности и классической теории ротора. Для этой цели были выполнены измерения крутящего момента и нагрузки на ротор при различной быстроходности.

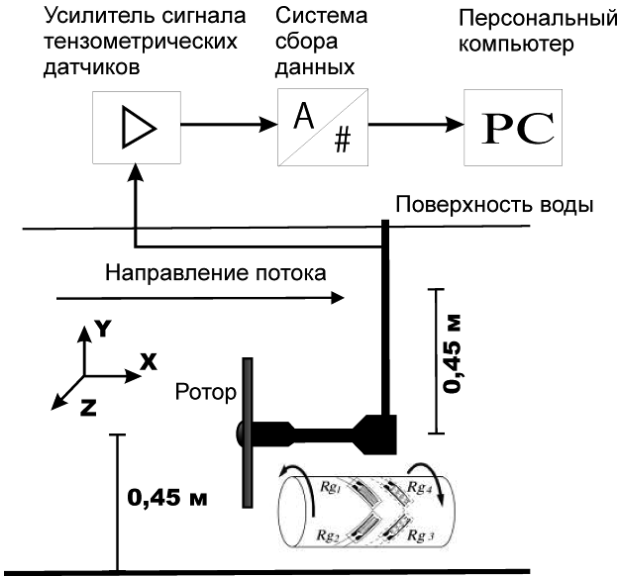

Рис.3 Схема измерения момента и напора.

Далее приводится вывод формул для производительности и крутящего момента ротора. Пусть жидкость натекает на ротор с постоянной скоростью V_0, как показано на рис. 2. После взаимодействия с вращающимся ротором жидкость утекает со скоростью u_1. Напор - это сила сонаправленная с движением потока, возникающая вследствие скачка давления на роторе в результате торможения потока со скорости V_0 до скорости u_1.

Известны простые соотношения, связывающие Vo, u_1, напор T и снимаемую ротором мощность P= M ·ω,где P - снимаемая мощность, M - момент сил, создаваемый на валу ротора, ω - угловая скорость вращения ротора. Поскольку одним из определяемых параметров эксперимента является быстроходность

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0},$$

удобно выразить угловую скорость через быстроходность:

$$\omega = \frac{V_0 \lambda}{R} \quad (1),$$

где V_0- скорость набегающего потока, λ - быстроходность, R - радиус ротора. Из [6] известны соотношения для коэффициентов напора и мощности:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V_0^3 A}, C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 A} \quad (2),$$

где C_P и C_T - коэффициенты мощности и лобового сопротивления (напора) соответственно, $A = \pi R^2$ -площадь поперечного сечения ротора. Подставляя выражение (1) в (2) и используя формулу для поперечного сечения ротора, получаем:

$$C_p = \frac{M\lambda}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 \pi R^3}, \quad C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_0^2 \pi R^2} \quad (3)$$

НАСТРОЙКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Значения M и T для различных углов атаки лопасти ротора и различной быстроходности измерялись в ходе эксперимента. Измерение параметров момента M и напора T производились тензометрическими датчиками (рис. 3). Тензометрические датчики устанавливались в блоке крепления ротора. Напряжение с датчиков усиливалось предусилителем Scout 55, произведенным фирмой Hootinger Baldwin Messtechnik, и подавалось на систему сбора данных фирмы National Instruments.

Система сбора данных регистрировала электрический сигнал с тензометрических датчиков с частотой 100 Гц в течение 60с. Суммарно было выполнено 6000 отсчетов на одно измерение.

Измерения проводились по следующей схеме. Поток воды в канале останавливался. Ротор вынимался из канала. Задавался необходимый угол атаки. Ротор устанавливался в канал. В программном комплексе, управляющим ротором, снималось напряжение с электродвигателя, приводящего в движение ротор, чтобы снять напряжения с вала ротора.

Выставлялся ноль предусилителя тензометрических датчиков. Устанавливался ноль усилителя тензометрических датчиков. Запускался поток в канале с необходимой скоростью. Задавалась необходимая быстроходность. Выжидался интервал времени 30 сек, необходимый для установления течения в следе за ротором. Электрический сигнал с тензометрических датчиков регистрировался системой сбора данных с частотой 100 Гц в течение 60 с. Результаты измерений сохранялись в виде текстового файла в две колонки. Одна колонка содержала информацию о значениях момента, другая - о значениях напора.

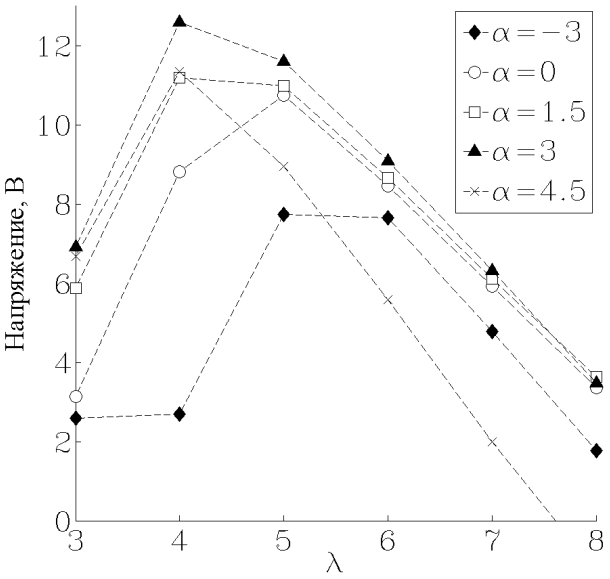

Рис.4 Значения крутящего момента, выраженного в единицах напряжения, в зависимости от быстроходности при различных установленных углах атаки.

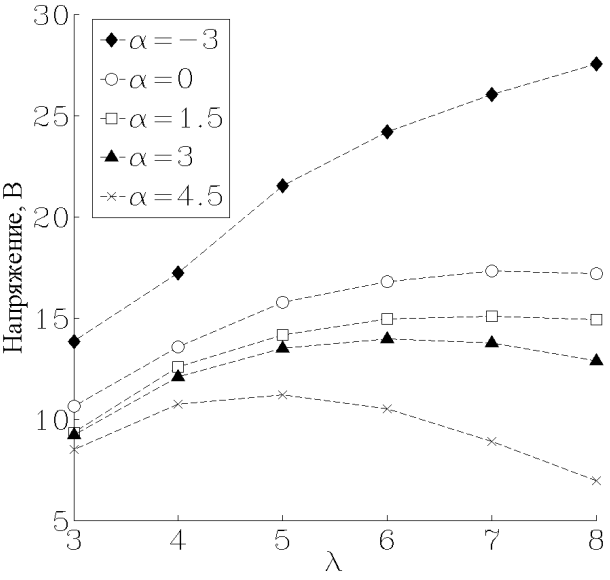

Рис.5 Значения напора, выраженного в единицах напряжения, в зависимости от быстроходности при различных установленных углах атаки.

Имя файла кодировало время и дату проведения измерения, а также несло информацию о текущем значении быстроходности и параметрах усилителя сигнала с тензодатчиков. Затем устанавливалось другое значение быстроходности и измерения производились в указанном выше порядке.

Для калибровки напора ротор извлекался из канала и располагался так, чтобы плоскость винта была горизонтальной. На ротор помещались грузы различной массы: 0.5, 1, и 2 кг. Записывались соответствующие значения напряжений и усреднялись. По полученным данным была определена калибровочная зависимость:

$$T\ [H] = 55{,}189 * U\ [B] - 0{,}0612, \quad (4)$$

где U - значения напряжения, соответствующего напору.

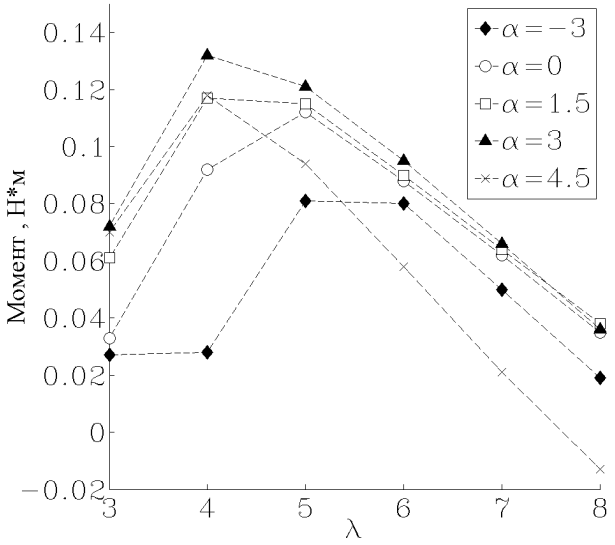

Рис.6 Зависимость крутящего момента от быстроходности при различных углах атаки.

Калибровка момента производилась следующим образом. Ротор располагался так, чтобы плоскость винта была вертикальной. Ось ротора фиксировалась таким образом, чтобы ротор не прокручивался, но в то же время усилие с лопастей передавалось на тензометрические датчики. На отдельно выбранную лопатку на заданном радиусе (10 и 15 см) помещался груз известной массой (0,5, 1, 2 кг). Системой сбора данных измерялось напряжение, соответствующему моменту и усреднялось.

По полученным значениям, используя формулы (3), были вычислены зависимости коэффициентов напора C_T и передачи мощ-

ности C_p (рис. 8) от быстроходности при различных углах атаки лопастей модели ротора. Оптимальные значения коэффициентов напора и передачи мощности находятся в диапазоне от α = 0° до α = 4.5°.

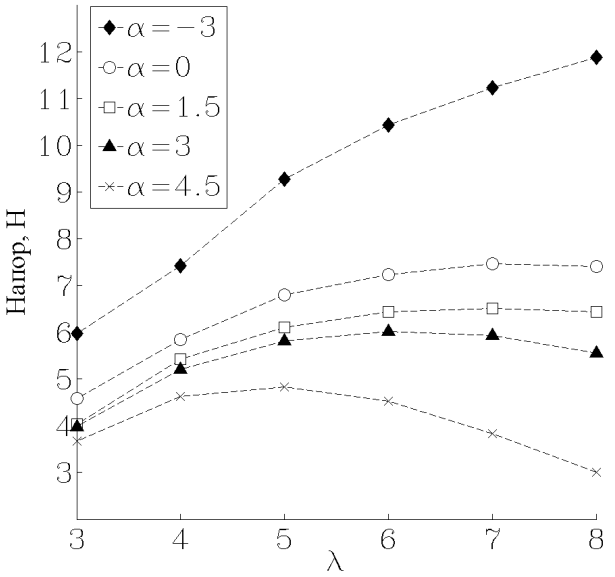

Рис.7 Зависимость напора от быстроходности при различных углах атаки.

По полученным данным была получена калибровочная зависимость для момента:

$$M\ [Н{\cdot}м] = 1{,}3362 * U[В] - 0{,}1078 \quad (5),$$

где U - значение напряжения, соответствующее измеренному крутящему моменту. По полученным калибровочным зависимостям значения напряжения, соответствующие моменту и напору, были пересчитаны в единицы [Н] и [Н·м].

Графики зависимостей момента и напора от быстроходности при различных углах атаки представлены на рис.6 и 7.

Таким образом, было определено и экспериментально подтверждено, что оптимальный режим спроектированной лопатки модели трехлопастного ротора ветрогенератора действительно соответствует быстроходности λ = 5, а оптимальный угол атаки находится в интервале 0-3 ^{0}. Они подтвердили значение оптимальной быстроходности 5, для которой была спроектирована лопатка (максимум крутящего момента на рис. 8). Однако расчётный угол установки α =0° дал меньшее значение крутящего момента по сравнению с углом установки α =+3°. Этот неожиданный факт требует более тщательного осмысления процедуры проектирования и изготовления лопаток с проведением дополнительных более детальных и целенаправленных экспериментов.

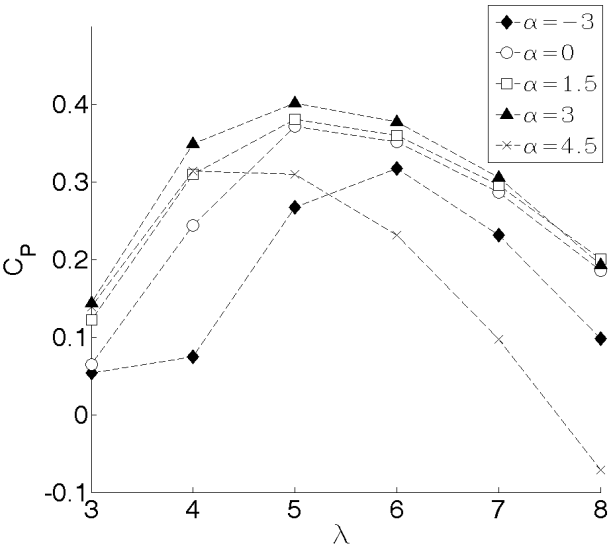

Рис.8 Зависимость коэффициента передачи мощности от быстроходности при различных углах атаки.

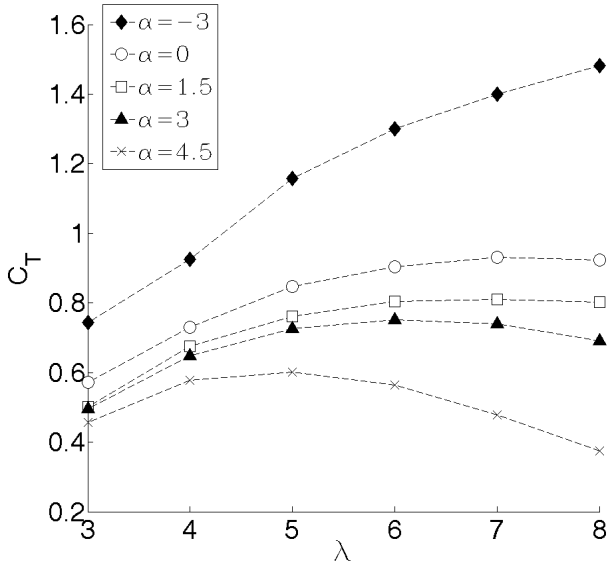

Рис.9 Зависимость коэффициента напора от быстроходности при различных углах атаки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены исследования производительности и силовых характеристик модели ротора ветрогенератора, изготовленного для комплексных оптико-лазерных исследований вихревого следа за моделью ротора ветрогенератора. Благодаря тензометрическим датчикам, установленных в креплении ротора, были произведены измерения крутящего момента и напора на ротор для быстроходности λ =3-8. Была произведена калибровка измерительной системы. По калибровочным зависимостям получены зависимости крутящего момента и напора в единицах [Н*м] и [Н] соответственно. По формулам (3) получены зависимости для безразмерных коэффициентов отбора мощности и напора. В экспериментах было определено, что оптимальный режим спроектированной лопатки модели трехлопастного ротора ветрогенератора действительно соответствует быстроходности λ = 5, а оптимальный угол атаки находится в интервале $\alpha = 0\text{-}3\ ^0$. Однако расчётный угол установки α =0° дал меньшее значение крутящего момента по сравнению с углом установки α =+3°. Этот неожиданный факт требует более тщательного осмысления процедуры проектирования и изготовления лопаток с проведением дополнительных более детальных и целенаправленных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Snel H., Schepers J. G., Montgomerie B. The MEXICO (Model Experiments in Control Conditions): the database and first results of the data process and interpretation//J. Physics:Conf.Ser. 2007.Vol. 75. P. 12-14.
2. Наумов И.В., Рахманов В.В., Окулов В.Л., Вельте К.М., Майер К.Е., Микельсон Р.Ф. Диагностика течения за моделью ротора трехлопастной турбины // Теплофизика и аэромеханика, 2011. Т. 19(3). С. 267-278. Naumov I.V., Rahmanov V.V., Okulov V.L., Velte K.M, Miyer K.E, Mikkelsen R.F. Diagnostic of flow bihind the model of windmill turbine//Thermphysics and aeromechanics, 2011. Vol. 19. # 3. P. 267-278.
3. Nemes A., Sherry M., Jacono D. Lo, Blcackburn H.M., Sheridan J. Genration, evolution and breakdown of helical vortex wakes// Proc. of 18th Australian fluid mechanics conference. Launceston. Australia. 2012 P. 352-355.
4. Selig M. S., Guglielmo J. J., Broeren A. P., Giguere P. Summary of low-speed airfoil data// SolarTech Publication (Virginia Beach: Virginia) 1995. Vol. 1 P. 292.
5. Glauert H. 1935 Airplane propellers. Division L in Aerodynamic Theory, vol. IV, (ed. Durand W.F.). Springer: Berlin. P. 169–360.
6. Hansen M.O.L. Aerodynamics of wind turbines. 2-nd ed. London: Earthscan, 2008. 18.