

**И. К. Кабардин¹, И. В. Наумов¹, Р. Микельсен², В. А. Павлов¹
Г. В. Бакакин¹, В. Л. Окулов^{1,2}**

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 1, Новосибирск, 630090, Россия

² Датский политехнический университет
2800, Люнбю, Дания

E-mail: kabardin@itp.nsc.ru; vokulov@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТРЕХМЕРНОГО ПОЛЯ СКОРОСТИ ЗА МОДЕЛЬЮ РОТОРА ВЕТРЯНОЙ ТУРБИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЯ *

Данная работа существенно дополняет и расширяет исследования по определению структуры течения при обтекании модели трехлопастного ротора ветряной турбины, начатые в 2011 г. За счет изменения компоновки оптических элементов стерео PIV-системы были устранены теневые зоны от лопаток и расширена зона диагностирования. В результате установлены особенности развития течения и его характеристик как в ближнем следе, так и достаточно далеко за турбиной. Оценка эффективности работы турбины на разных режимах проведена с помощью тензометрических измерений силовых характеристик ротора. Эти данные оказались в согласии с отдельными предположениями и гипотезами классических теорий ротора и с расчетным оптимумом для лопастей, форма которых определена по импульсной теории ротора в сечениях.

Ключевые слова: пропеллеры, воздушные винты, роторы, ветряные турбины, винтовые вихри, вихревой след, цифровая трассерная визуализация (PIV).

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 г. 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. Однако из-за больших размеров модели ветряка авторам удалось исследовать незначительную область следа, которая ограничивалась двумя радиусами вниз по потоку с измерительными окнами, не перекрывающими область следа. Отметим, что первые сопоставления данных измерений пока не очень хорошо совпадают с результатами расчета [2]. Следующие эксперименты с PIV-диагностикой и восстановлением мгновенной структуры трехмерного поля

* Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (ГК № 11.519.11.6022).

скорости течения за трехлопастными моделями ветряков были сделаны в водяных каналах [3; 4]. Изучались модели роторов с радиусами 186 [3] и 115 мм [4] с оптимизированными по Глауэрту лопастями [5]. В работе [3] с помощью визуализации и стерео PIV-системы были изучены два режима обтекания ротора с быстроходностями 5 и 6, а в [4] использовался двумерный PIV с фазовой привязкой к углу поворота ротора для быстроходности 6. В обеих работах измерительная область за ротором была больше почти в два раза, чем в [1], однако этого оказалось все-таки не достаточно для выявления и изучения дальней зоны, где профиль следа начинает сглаживаться. Кроме того, в [3] была использована неудачная компоновка оптической системы, которая приводила к потере данных в окрестности лопатки из-за тени от нее во всех положениях, кроме ее нулевого угла поворота от вертикальной плоскости светового ножа. Этот факт не позволил найти для других поворотов ротора мгновенные и соответственно осредненные скорости в следе.

В данной работе, в отличие от [3], изменена оптическая компоновка элементов PIV, чтобы устранить тень и увеличить измерительное окно. Это позволило изучить зону следа за ротором намного дальше, до 9 его радиусов, провести измерения мгновенных полей для любых углов поворота ротора и по ним получить средние характеристики течения.

Исследуемая модель трехлопастной ветровой турбины представляла собой ротор диаметра 0,376 м с ребром лопатки 0,159 м.

В качестве профиля лопатки был выбран профиль CD7003 из [6]. Скорость потока в месте расположения ротора всегда поддерживалась близкой к 0,38 м/с, а ее колебания не превышали 3 %. Ось ротора располагалась на высоте 0,5 м от дна канала и на расстоянии 1,5 м от стенок канала. Более подробно экспериментальная установка описана в [3]. Течение исследовалось стерео PIV-системой фирмы «Dantec», которая позволяет измерять три компоненты скорости в области лазерного ножа. В качестве источника излучения использовался лазер Nd:YAG со следующими характеристиками: энергия импульса – 120 мДж, длина волны – 532 нм, максимальная частота импульсов – 15 Гц.

Лазерный нож толщиной 2 мм светил через дно канала и был ориентирован вертикально, проходя вдоль оси ротора (рис. 1, а). Изображения регистрировались двумя камерами Dantec HiSense II с разрешением $1\,344 \times 1\,024$ пикселей. Трехкомпонентное поле скорости рассчитывалось программой Dantec Dynamic Studio 2.21. Камеры располагались перпендикулярно по отношению друг к другу и под углом 45° по отношению к стенкам канала (рис. 1, б).

Для уменьшения расхождения лучей при прохождении через стенку канала на стенки канала устанавливались призмы, заполненные водой. Поскольку камеры располагались под углом к лазерному ножу, фокусная плоскость выставлялась с помощью узла независимой регулировки приемного объектива и матрицы, регистрирующей изображение камеры.

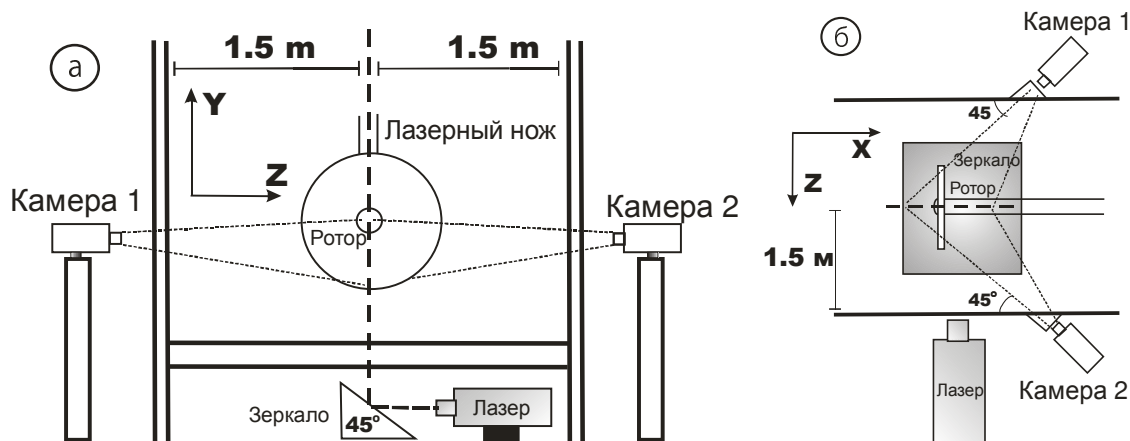


Рис. 1. Схема измерения поля скорости методом стерео PIV



Рис. 2. Схема установки ротора и 12 измерительных окон в сечении лазерного ножа для 3D PIV-диагностики

Измерительная область делилась на 12 измерительных окон размером $0,22 \times 0,35$ м для достижения большего разрешения вихревых структур в следе ротора (рис. 2). Выбор позиций окон был основан на результатах предшествующей визуализации [3] и для диагностирования ядер концевых вихрей с разрешением 2,5 мм. Чтобы избежать лишних калибровок измерительной стереосистемы, чувствительной к малым дисбалансам и смещениям лазерного ножа и камер, она в экспериментах оставалась неподвижной. Для смены измерительных окон перемещалась модель ротора, закрепленная на передвижной платформе. Окна перекрывали друг друга на 0,1 м, что обеспечивало более гладкую сшивку между ними. После сшивок с отбрасыванием зон перекрытия трехмерное поле скорости было окончательно определено в области с полным размером $2,06 \times 0,29$ м.

Дополнительно точность измерения повышалась статистическим осреднением нескольких мгновенных полей скорости, полученных при одинаковых положениях лопаток после каждого их поворота на полный угол между ними, т. е. фазовое осреднение привязывалось к частоте прохождения лопаток [3]. Для реализации этой схемы на вал вращения ротора устанавливался угловой энкодер ROTACAM ASR58 с угловым разрешением $0,1^\circ$, который формировал стробоскопический сигнал для запуска измерений, когда лопатка проходила заданное положение. Результирующее поле скорости для каждого измерительного окна получалось путем фазового осреднения 100 мгнов-

венных полей скорости, что позволило, как и в стационарном случае, существенно уменьшить случайную ошибку измерений, и практически полностью устранить ошибку смещения, связанную с нестационарными изменениями структуры потока.

Изучение кинематических характеристик потока

С традиционной точки зрения существуют несколько стадий развития следа за ротором. Прежде всего, выделяют ближний след с относительно стабильной и расширяющейся вихревой структурой, в которой средняя осевая скорость уменьшается по сравнению с ее значением на роторе. Теория предсказывает значения скоростей на роторе и в дальнем следе в $2/3$ и $1/3$ от скорости набегающего потока при сохранении вихревой структуры следа. Однако структура течения, визуализированная в [1], показала стабильным только начальный участок следа, затем в некоторой переходной зоне начинала проявляться неустойчивость, спаривание концевых вихрей до полного их разрушения в зоне, которую принято ассоциировать с турбулентным следом. Возникает закономерный вопрос, успеет ли замедление потока достигнуть значения, предсказанного теорией для дальнего следа, и как далее будет развиваться профиль осевой скорости в турбулентной зоне следа. Ответить на эти вопросы в предшествующей работе [1] по указанным выше причинам не удалось, поэтому здесь мы делаем

особый упор на изучении развития стадий и вихревых структур в следе, сопровождая его определением изменений средней скорости торможения.

Рис. 3 и 4 показывают мгновенные и усредненные распределения трех компонент скорости для двух режимов с быстроходностями $\lambda = 5$ и 6. В измерениях углы поворота лопатки, к которым привязывался энкодер, составляли $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105^\circ$. При дальнейшем повороте ротора считалось, что картина повторяется. Например, картина течения при угле поворота $\alpha = 120^\circ$ совпадает с картиной течения при угле поворота $\alpha = 0^\circ$.

Мгновенные поля, как и в [3], представлены для $\alpha = 0^\circ$. Усредненное поле скорости

соответствует среднему значению, полученному фазовым усреднением полей скорости, соответствующих углам поворота ротора $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105^\circ$. Каждая проекция получена для угла поворота $\alpha = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105^\circ$ путем фазового усреднения по 200 мгновенным полям скорости. В области ($x = 1,8-3,6R, y = -1,5..0R$) регулярная лопастная структура разрушается, и происходит спаривание соседних концевых вихрей, причем для всех углов поворота лопатки спаривание происходит примерно в одной области, вблизи $x = 3R$. Из-за спаривания вихрей частоты пульсаций потока становятся отличными от частоты вращения ротора и лопастной частоты, и усреднение необходимо проводить в диапа-

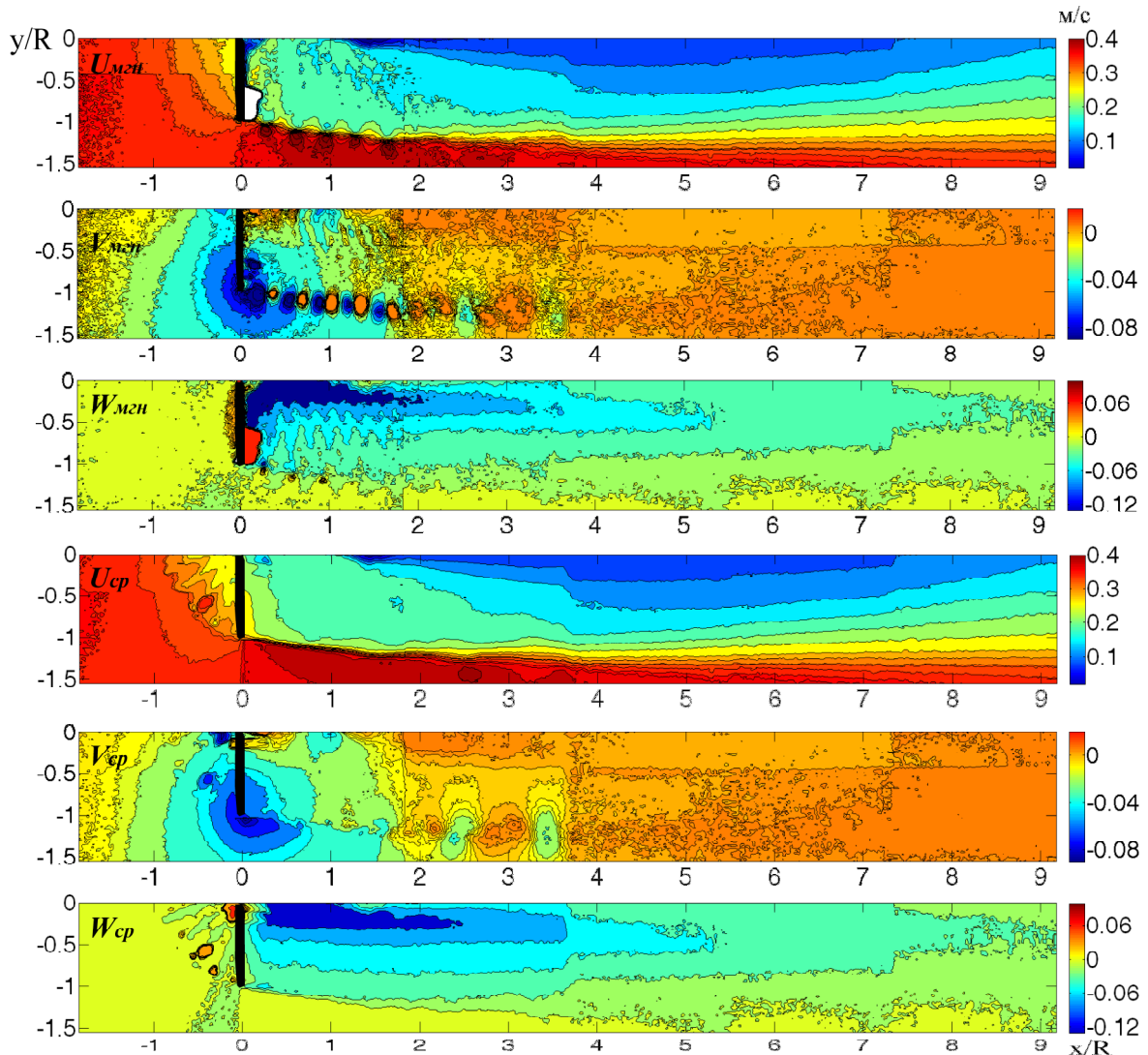


Рис. 3. Изоконтурные мгновенные осевой ($U_{\text{мгн}}$), радиальной ($V_{\text{мгн}}$), тангенциальной ($W_{\text{мгн}}$), компонент скорости и средних осевой ($U_{\text{ср}}$), радиальной ($V_{\text{ср}}$), тангенциальной ($W_{\text{ср}}$), компонент скорости для быстроходности $\lambda = 5$. Координаты обезразмерены на радиус лопатки

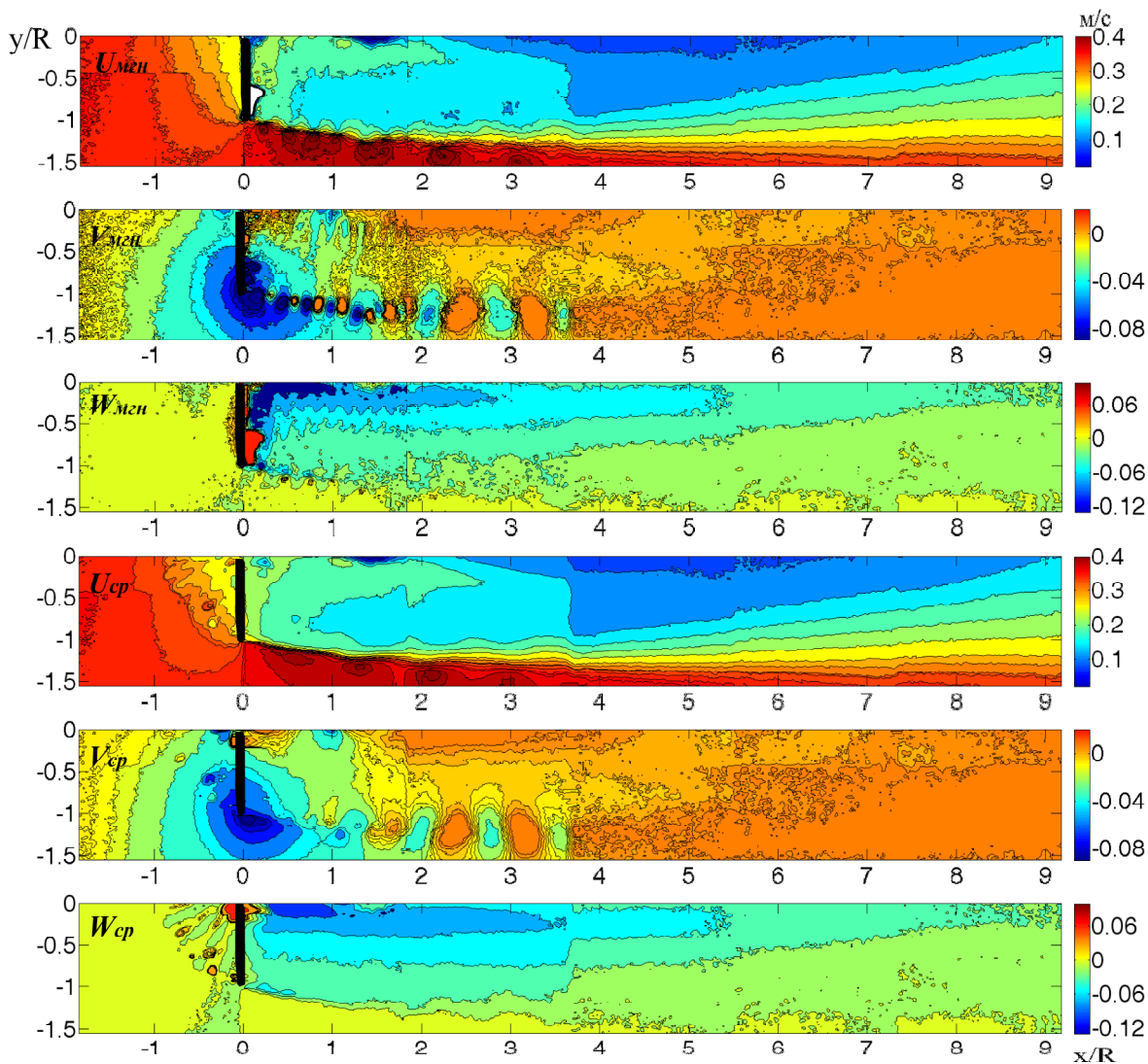


Рис. 4. Изоконтурные мгновенных осевой ($U_{\text{мгн}}$), радиальной ($V_{\text{мгн}}$), тангенциальной ($W_{\text{мгн}}$), компонент скорости и средних осевой ($U_{\text{ср}}$), радиальной ($V_{\text{ср}}$), тангенциальной ($W_{\text{ср}}$), компонент скорости для быстроходности $\lambda = 6$. Координаты обезразмерены на радиус лопатки

зоне не $0-120^\circ$, а $0-360^\circ$. Поэтому на представленном осредненном поле скорости наблюдаются регулярные структуры.

На рис. 5 показан пример сравнения профилей мгновенной и средней скоростей в трех одинаковых сечениях следа: перед, вблизи и далеко за ротором. Несмотря на достаточно близкое попарное сходство профилей, изоконтурные карты мгновенной и средней скоростей (см. рис. 3, 4) не очень похожи друг на друга. Это объясняется потерей при осреднении информации о винтообразной структуре концевых вихрей, ярко выраженных для мгновенных полей осевой и радиальной скоростей в ближнем следе.

Для тангенциальной компоненты скорости эти свойства менее выражены потому, что эта компонента исчезает на границе и вне следа (см. рис. 5). В дополнение к спиральной вихревой структуре концевых вихрей PIV-измерения показывают хорошо воспроизводимый вихрь вокруг оси ротора, который, напротив, лучше диагностируется для тангенциальной компоненты. Вывод о его винтовой структуре здесь следует также после сравнения мгновенных – пилообразных и гладких средних контуров. Другой видимой формой вихря является вихревая пелена, которая сходится с задней кромки лопатки.

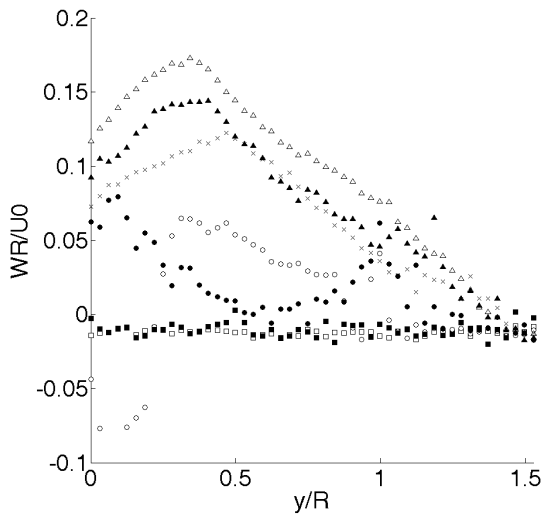
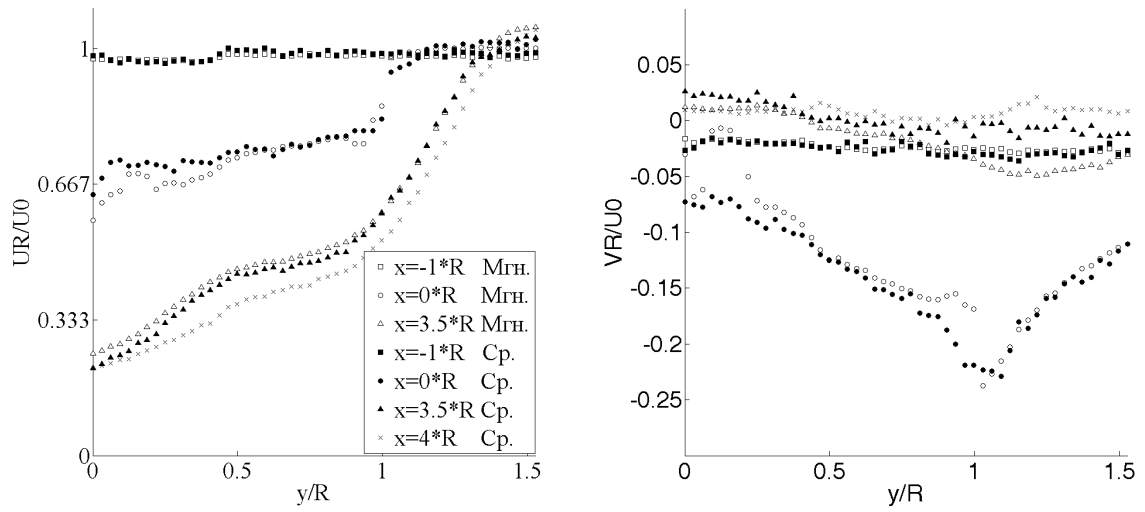


Рис. 5. Сравнение мгновенной и средней скорости для $\lambda = 5$

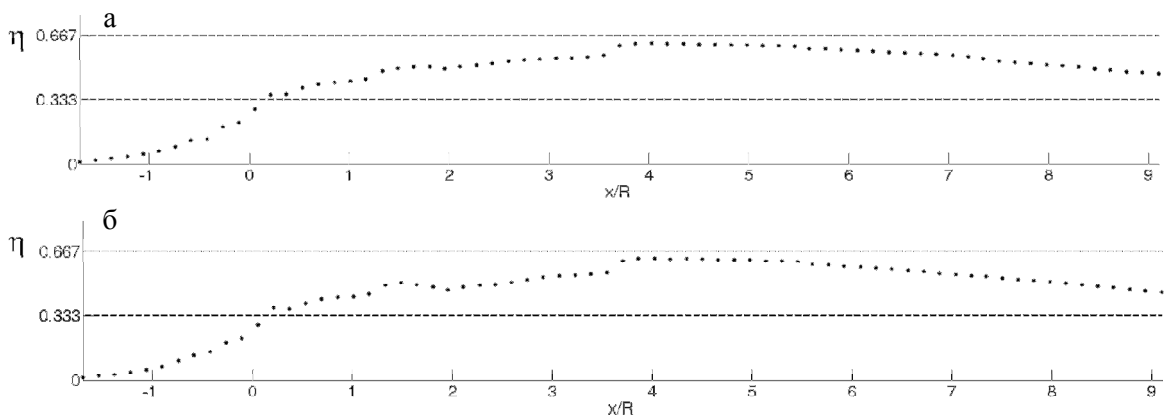


Рис. 6. Изменение коэффициента торможения вдоль следа: а – для $\lambda = 5$; б – для $\lambda = 6$

Этот тип вихревого следа можно наблюдать в мгновенных PIV-образах вблизи ротора. Пелена наблюдается как вертикальные «языки» и «мостики» с примерно одинако-

вым периодом в осевом направлении за лопаткой. Осреднение, конечно, сглаживает эту сложную структуру вихревого следа, но играет важную роль при оптимизации рото-

ра, поскольку осредненные характеристики отражают баланс между силами на роторе и потерями энергии в следе.

Очень важной такой осредненной характеристикой течения является коэффициент торможения:

$$\eta(x) = \frac{\int_0^{1,54R} (V_0 - u(x, r)) \cdot 2\pi r dr}{\pi(1,54r)^3},$$

который отражает уменьшение расхода в следе по сравнению с расходом набегающего потока в одном и том же сечении. На рис. 6 показана зависимость коэффициента торможения для двух быстроходностей. С его помощью можно более корректно определить зону ближнего следа, так как обычно ближний след связывают с уменьшением средней осевой скорости от $2/3$ на роторе до $1/3$ в следе от значения начальной скорости набегающего потока. Соответственно коэффициент торможения должен возрасти от $1/3$ до $2/3$. Действительно, такой участок существует на рис. 6 и простирается от ротора с нулевой координатой до 3,7 радиусов за ним. Затем примерно до 5 радиусов идет участок с практически постоянным (около $2/3$) значением коэффициента торможения. Условно его можно считать дальним следом. Дальнейшее уменьшение коэффициента торможения обычно связывают с разрушением вихревой структуры следа, называя этот участок турбулентным следом. Действительно, в дальней и турбулентной зонах следа не наблюдается его вихревой структуры на изображениях мгновенных полей скорости (см. рис. 3, 4).

Как и в [3], вновь полученные экспериментальные данные были сопоставлены с некоторыми положениями и выводами общепринятых теорий ротора. В частности, вывод теории Фруда об увеличении сечения следа в 1,22 раза от размера ротора [8] был здесь еще раз проверен. Как и в работе [3], для ближнего следа этот факт наглядно демонстрируется ростом радиуса концевых вихрей примерно до предсказанного значения, на изображениях для мгновенных скоростей (см. рис. 3, 4). Другое предположение теории для ротора с конечным числом лопастей о постоянном шаге между концевыми вихрями было снова подтверждено. Новые измерения показывают, что осевое расстояние между ядрами соседних концевых вихрей не подвергается какому-либо

существенному изменению и остается примерно постоянным, как это было установлено в [3; 9]. В аналитической модели для ротора с постоянной циркуляцией вокруг лопатки [10] важным является предположение об отсутствии вращения концевых вихрей в следе. Измерения тангенциальной скорости на рис. 3, 4 и 5 еще раз его подтвердили.

Новым фактом, впервые установленным здесь и подтвердившим основной вывод теории Фруда [7] об удвоении индуцированной скорости торможения в дальней следе по сравнению с его значением на роторе, стал расчет коэффициента торможения (рис. 6).

Последним интересным заключением из кинематических измерений потока является четкое наблюдение неустойчивости концевых вихрей (разрушение и отсутствие их ядер) в дальнем следе на участке без его расширения и с постоянным значением коэффициента торможения (около $2/3$). Неустойчивость таких винтовых вихрей была неоднократно доказана аналитически [11–13], а вот в эксперименте, с четким выделением зоны дальнего следа, она в данной работе установлена впервые.

Измерение силовых характеристик ротора

Необходимым дополнением, упущенным в [3; 4], к описанному выше рассмотрению кинематических характеристик потока стало изучение силовых характеристик ротора. Были проведены измерения крутящего момента на валу ротора M и действующей в осевом направлении силы упора T . Тогда снимаемая ротором мощность $P = M \cdot \omega$, где ω – угловая скорость вращения ротора. Ее удобно выразить через быстроходность λ , т. е. $\omega = \lambda V_0/R$, где V_0 – скорость набегающего потока, R – радиус ротора. Для удобства обычно используют безразмерные коэффициенты мощности и упора:

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

В формуле (1) известные параметры принимают следующие значения: $\rho = 1\,000$ кг/м³, $\pi = 3,1415$, $R = 0,188$ м и $V_0 = 0,38$ м/с с точностью определения 2%. Значения M и T

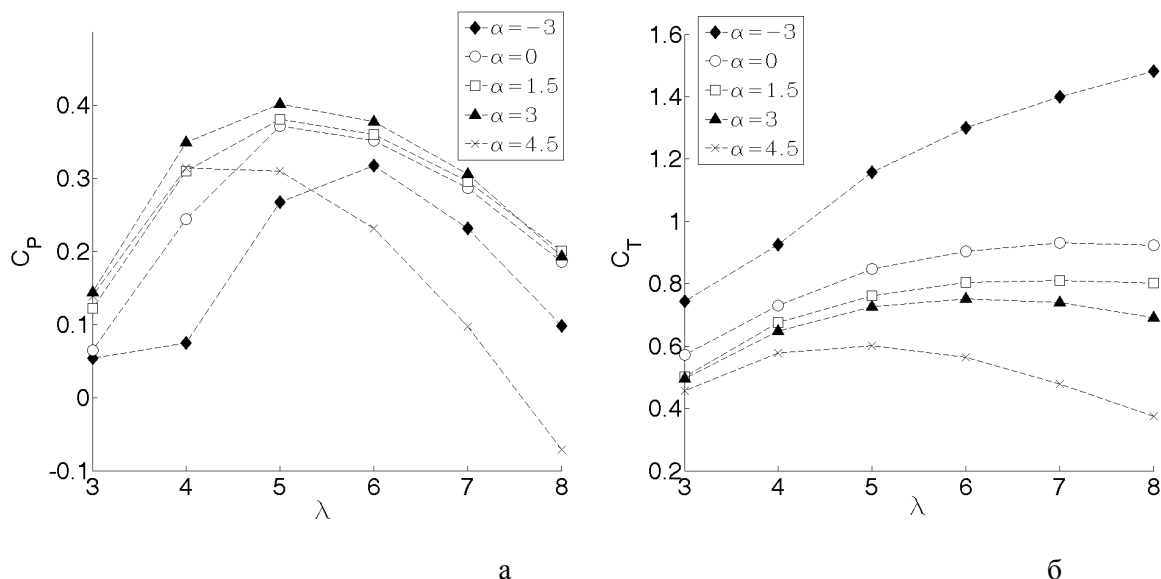


Рис. 7. Зависимость коэффициента момента (а) и упора (б) от быстроходности при различных углах установки лопаток α

измерялись в ходе наших дальнейших экспериментов.

Измерение крутящего момента M и осевой силы упора T проводилось тензометрическими датчиками, которые 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 60 с. Суммарно проводилось 6 000 отсчетов на одно измерение.

Для перевода значений напряжений в единицы Н и Н·м была проведена калибровка. Для калибровки силы упора ротор извлекался из канала и располагался так, чтобы плоскость винта была горизонтальной. На ротор помещались грузы 0,5, 1, 2 кг. Записывались соответствующие значения напряжений и усреднялись. По полученным данным строилась калибровочная зависимость. Для калибровки момента плоскость ротора располагалась вертикально. Ось ротора фиксировалась так, чтобы он не прокручивался, но в то же время усилие с лопастей передавалось на тензометрические датчики. На одну из лопаток на заданных радиусах от оси (10 и 15 см) помещался груз с массой (0,5, 1, 2 кг). Системой сбора дан-

ных измерялось напряжение, и строилась калибровочная кривая. Значения, полученные в экспериментах, подставлялись в формулу (1).

Дополнительной целью проведения силовых измерений была проверка построения оптимальной лопатки по импульсной теории в сечениях лопасти [5]. Исследовалась зависимость силовых характеристик (1) для разных быстроходностей и углов поворота лопатки вокруг оси их заделки во втулку ротора по отношению к рассчитанному оптимальному положению «0».

Полученные результаты приведены на рис. 7. Они подтвердили значение оптимальной быстроходности 5, для которой была спроектирована лопатка (максимум крутящего момента на рис. 7, б). Однако расчетный угол установки $\alpha = 0^\circ$ дал меньшее значение крутящего момента по сравнению с углом установки $\alpha = +3^\circ$. Этот неожиданный факт требует более тщательного осмысления процедуры проектирования и изготовления лопаток с проведением дополнительных, более детальных и целенаправленных, экспериментов.

Заключение

В новом исследовании по сравнению с предыдущим была изменена компоновка элементов стерео PIV-системы, что позво-

лило расширить область диагностики в окрестности ротора и за ним путем устранения теневых зон от лопатки и за счет увеличения измерительного окна. Это дало возможность точнее диагностировать и восстановить мгновенную структуру трехмерного поля скорости в продольном сечении течения за трехлопастной моделью ротора. Дополнительно к мгновенным характеристикам были исследованы средние характеристики течения и определен характер их изменения в ближнем и дальнем следе для разных значений быстроходности ротора. В данном исследовании были еще проведены тензометрические измерения для определения силовых характеристик ротора. Новые измерения не только снова оказались в согласии с отдельными предположениями и гипотезами классических теорий ротора, но и подтвердили новые факты, известные из теорий, а также общепринятый метод конструирования оптимальной формы лопасти по импульсной теории ротора в сечениях.

Список литературы

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. Shen W. Z., Zhu W. J., Sørensen J. N. Actuator Line and Navier-Stokes Computations for the MEXICO Rotor: Comparison with Detailed Measurements // Wind Energy. 2012. Vol. 15. P. 811-825.
3. Наумов И. В., Рахманов В. В., Окулов В. Л., Вельте К. М., Майэр К. Е., Микельсен Р. Ф. Диагностика течения за моделью ротора трехлопастной турбины // Теплофизика

зика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 3. С. 267-278.

4. Nemes A., Sherry M., Jacono D. Lo, Blackburn H. M., Sheridan J. Generation, Evolution and Breakdown of Helical Vortex Wakes // Proc. of 18th Australian Fluid Mechanics Conf. Launceston, 2012. P. 352-355.
5. Glauert H. Airplane Propellers. Division L in Aerodynamic Theory / Ed. by W. F. Durand. Berlin: Springer, 1935. Vol. 4. P. 169-360.
6. Selig M. S., Guglielmo J. J., Broeren A. P., Giguere P. Summary of Low-Speed Airfoil Data. Virginia: SolarTech Publication, 1995. Vol. 1. 292 p.
7. Froude R. E. On the Part Played in Propulsion by Differences of Fluid Pressure // Trans. Inst. of Naval Architect. 1889. Vol. 30. P. 390-405.
8. Hansen M. O. L. Aerodynamics of Wind Turbines. L.: Earthscan, 2008. 181 p
9. Nilsson K., Shen W. Z., Sørensen J. N., Ivanell S. Determination of the Tip Vortex Trajectory behind the MEXICO Rotor // Abstr. Wake Conf. Gotland University. Visby, 2011. P. 94-99.
10. Okulov V. L., Sørensen J. N. Stability of Helical Tip Vortices in a Rotor Far Wake // J. Fluid Mech. 2007. Vol. 576. P. 1-25.
11. Okulov V. L. On the Stability of Multiple Helical Vortices // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 521. P. 319-342.
12. Okulov V. L., Sørensen J. N. Stability of Helical Tip Vortices in Rotor Far Wake // J. Fluid Mech. 2007. Vol. 576. P. 1-25.
13. Okulov V. L., Sørensen J. N. Applications of 2D Helical Vortex Dynamics // Theor. Comput. Fluid Dyn. 2010. Vol. 24. P. 395-401.

Материал поступил в редколлегию 18.02.2013

I. K. Kabardin, I. V. Naumov, R. Mikelsen, V. A. Pavlov, G. V. Bakakin, V. L. Okulov

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF INSTANTANEOUS AND MEAN FLOW CHARACTERISTICS BEHIND THE ROTOR MODEL OF WIND TURBINE

This work sufficiently appends and extends experimental investigation of flow structure downstream of the triblade turbine model, which was started in 2011. Shadow zones from blades were removed and a measuring zone was increased as a result of changing in optical system of PIV. These changes made possible to carry out measurements in much more far zone downstream the rotor model. As a result new features of flow were found out in near and far wake downstream the turbine. The estimation of turbine work efficiency on different work regimes was carried out due to tensometric measurements of rotor force characteristics. This data corresponds to assumptions and hypothesis of classical theories of rotors and to a form for the optimum blades designed by the BEM method.

Keywords: propeller, rotor, wind turbine, helical vortices, vortex wake, Stereoscopic Particle Image Velocimetry.