

УДК 621.4

Диагностика течения за моделью ротора трехлопастной турбины*

**И.В. Наумов^{1,2}, В.В. Рахманов^{1,2}, В.Л. Окулов^{1,3}, К.М. Велте³,
К.Е. Майер³, Р.Ф. Миккельсен³**

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск*

³*Датский технический университет, Лундби, Дания*

E-mail: naumov@itp.nsc.ru

В работе представлены результаты исследования структуры вихревого следа и измерения мгновенных распределений трехмерного поля скорости за моделью ротора трехлопастной турбины. Изучены два режима обтекания ротора с разными значениями быстроходности. Сначала структура следа была визуализирована, а количественные данные были получены методом определения поля скорости по трекам частиц: стерео PIV системой цифровой трассерной визуализации.

Проведенные исследования не только позволили диагностировать и восстановить мгновенную структуру трехмерного поля скорости в продольном сечении течения за трехлопастным ротором при разных его быстроходностях, но и позволили подтвердить и обосновать некоторые предположения и гипотезы классических теорий ротора.

Ключевые слова: роторные системы, винтовые вихри, вихревой след, цифровая трассерная визуализация.

Развитие исследований по аэродинамике ротора (гребного винта, пропеллера, ветряка и т. д.) всегда было связано с интенсивным развитием соответствующей отрасли техники, причем теоретические исследования здесь всегда существенно опережали экспериментальную диагностику течений.

Отправной точкой создания элементарной теории ротора следует считать первые попытки решения проблем парового мореплавания с использованием гребных винтов. В результате появилась простейшая теория гребного винта Рэнкина–Фруда [1], или теория нагруженного диска, который, как считалось, соответствовал ротору с бесконечным числом лопастей. В начале XX века развитие роторной аэродинамики стимулировал бурный рост авиации. В то время при формировании концепции оптимального ротора доминировали две научные школы: Н.Е. Жуковского в России и Л. Прандтля с его учеником А. Бецом (в некоторых источниках встречается Бетц — устаревшее написание фамилии Betz) в Германии,

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке в рамках проектов Минобрнауки РФ (проект № 2.1.2/1270, ГК № 14.740.11.0144 и ГК № 11.519.11.6022), грантов РФФИ (№ 10-08-01093) и Danish Energy Technology Development and Demonstration Program (No. 64011-0094).

предложившие два разных типа оптимальных винтов: с постоянным распределением циркуляции вдоль лопасти [2] и с лопастью, генерирующей равномерно сходящую винтообразную вихревую пелену [3]. Они, по сути, сформулировали новую вихревую концепцию ротора, вполне пригодную для расчета винта с любым конечным числом лопастей. Однако все свои решения они получили для равномерно-непрерывного распределения завихренности по окружности проницаемого диска, заменяющего ротор, или опять для ротора с бесконечным числом лопастей. В 1929 г. для ротора Беца [3] с числом лопаток 1, 2, 3 и 4 С. Гольдштейну удалось найти решение в виде тригонометрических рядов Каптейновского типа с коэффициентами из произведений модифицированных функций Бесселя [4]. Тем не менее, данные ряды оказались трудными для вычислений, поэтому в дальнейшем для расчета роторов развивались только разные численные или полуэмпирические модели, описанные, например, в [5] или в недавнем обзоре [6], посвященном методам аэродинамического расчета роторов ветровых турбин бурно развивающейся сейчас отрасли энергетики. Однако и в теоретических исследованиях был недавно достигнут значительный прогресс: используя решения для мультиплетов из винтовых вихрей [7], оба типа ротора с любым конечным числом лопастей были аналитически решены в [8].

Экспериментальная аэродинамика ротора развивалась несравненно хуже, иногда становясь препятствием для утверждения верных теорий ротора, а часто, напротив, из-за неверной трактовки наблюдений давала пищу для развития ложных концепций. Например, в начале прошлого века неверное восприятие и трактовка эксперимента Парсонсом более 30 лет не позволяли утвердиться верной теории несущего диска Фруда [9]. В самом деле, течение за вращающимся лопаточным колесом очень сложное, требует специальных методов и приемов диагностики. Между тем, в первых экспериментах использовали простейшие методы: визуализацию воздуха вихревой структуры за винтом в воде и определение неоднородностей поля течения за счет отклонения бумажных полосок или волосков в следе за ротором. Именно такая визуализация Фламма за винтом и фиксация неоднородности потока за пропеллером Рябушинским легли в основу рассуждений Н.Е. Жуковского при создании им вихревой теории гребного винта [2]. Затем наступил достаточно продолжительный период изучения средних характеристик закрученного течения в следе за ротором сначала разными контактными методами — трубками Пито, термоанемометрами, а потом и бесконтактными — стробоскопической визуализацией и точечными лазерными доплеровскими анемометрами (ЛДА), широко применяемыми для исследования характеристик потока за моделью гидротурбины [10] а также вихревого следа за корабельными винтами, в частности в Болгарском институте гидродинамики судна [11]. Положительным на этом этапе развития диагностики роторных течений было то, что удалось получить численные оценки скоростей, однако вместе с осреднением потерялась важная информация о вихревой структуре течения за ротором, которая фиксировалась при визуализации и использовалась при создании классической вихревой теории ротора. Знание о течении в среднем стимулировало развитие некоторых полуэмпирических и инженерных методов расчета роторов, но оно было ограниченным и не оправдало ожиданий как в развитии теорий, так и для верификации численных расчетов. Наверное, поэтому недавно в рамках европейского проекта «MEXICO» [12] была предпринята попытка полномасштабного исследования течения за ротором в аэродинамической трубе. Хотя обработка результатов диагностики течения еще полностью не закончена, но первые сопоставления данных этих измерений пока очень хорошо совпадают с результатами расчета [13]. Другое наиболее полное исследование структуры течения за корабельным винтом в воде базировалось на

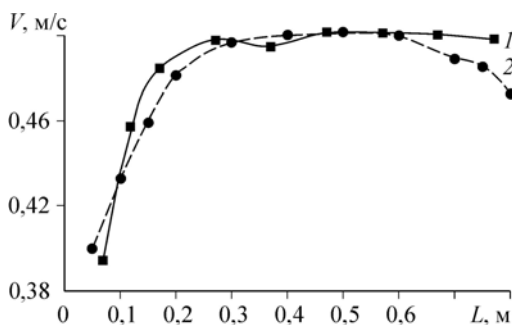
Рис. 1. Модель ротора ветрогенератора в “сухом” канале.



скоростной визуализации в сочетании с ЛДА измерением поля течения при фазовом осреднении в нескольких поперечных сечениях следа [14].

Целью настоящей работы является PIV диагностика и восстановление мгновенной структуры трехмерного поля скорости течения в продольном сечении водяного канала за трехлопастным ротором модели ветрогенератора в момент, когда через сечение проходит лопатка (рис. 1). 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 — сотовое устройство для линейаризации скорости течения по сечению канала. Для определения оптимального положения ротора в канале, чтобы скорость набегающего потока была близкой к постоянному значению, измерены профили скорости в горизонтальном и вертикальном сечении измерительного участка (рис. 2). Значение скорости потока в месте расположения ротора всегда была близка к $V = 0,5$ м/с и ее колебания в ходе эксперимента не превышали 3 %. Контроль скорости потока осуществлялся независимым гидрометрическим измерителем скорости ОТТ Z400 в течении всего эксперимента.

Модель трехлопастного ротора была специально изготовлена для качественной и количественной визуализации течения позади ротора. Диаметр ротора составлял $2R = 0,376$ м, а длина лопасти ротора — 0,159 м. В качестве профиля для лопастей был взят профиль CD7003 из [15]. Хорда лопасти и угол ее установки были рассчитаны по теории Глауэрта для оптимального ветряка [16] с быстроходностью $\lambda = 5$, где $\lambda = \Omega R/V$, а Ω — угловая скорость вращения ротора. Регулировка угла установки лопаток не предусматривалась, их положение было выставлено для оптимального режима $\lambda = 5$ единожды и было фиксированным для всех тестируемых режимов. Числа Рейнольдса $Re = \rho \Omega R b / \mu$, (ρ и μ — плотность и динамическая вязкость рабочей жидкости — водопроводной воды, b — длина хорды лопасти (1 см)) в проведенных экспериментах находятся вблизи 20 000 для быстроходности $\lambda = 5$ при рабочей температуре 20 °С. Крепление и фиксация ротора были выполнены на перемещаемой над каналом платформе на 0,6 м позади ротора, чтобы минимизировать возмущения набегающего потока в плоскости ротора (рис. 3). Кроме того, в экспериментах ось ротора была размещена на высоте 0,5 м от дна и



удалена на 0,7 м от стенки канала, чтобы свести влияние неоднородности профиля набегающего потока к минимуму (рис. 2). Для вращения ротора с постоянной угловой скоростью применялся серводвигатель JVL Industri Elektronik

Рис. 2. Распределение скорости в горизонтальном (1) и вертикальном (2) сечении канала.

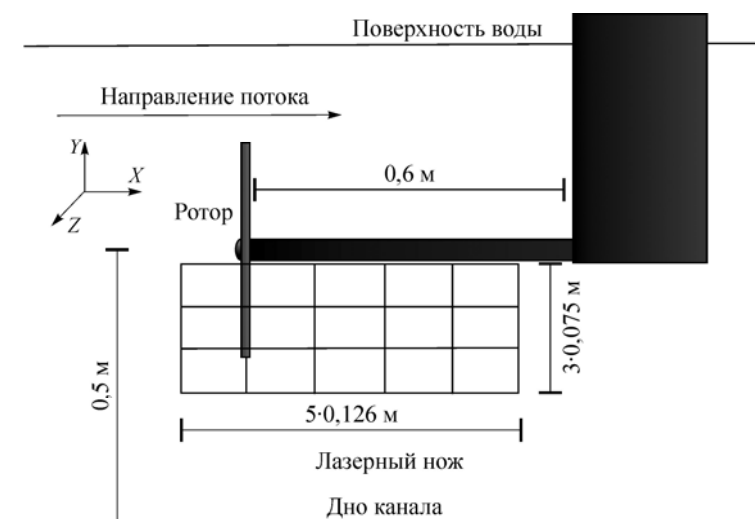


Рис. 3. Схема области восстановления трехмерного поля скорости и положение измерительных окон.

MAC400. Вращательный момент двигателя передавался на ось ротора через жесткую зубчатую ременную передачу. Программное обеспечение управления серводвигателем MacTalk обеспечивало установку необходимого вращения ротора и его контроль с погрешностью менее 2%. Таким образом, для быстроходностей $\lambda = 5$ и 6 частота вращения ротора составляла 2,18 и 2,54 Гц соответственно.

Нестационарность и трехмерная структура течения за ротором делают чрезвычайно трудными любые измерения, особенно при диагностике мгновенных картин течения, когда нужно тестировать большое количество измерительных точек с одновременным измерением характеристик течения. Применение PIV-трековых методов диагностики позволяет относительно быстро выполнять одновременные измерения скорости во многих точках и наблюдать мгновенную картину течения, но только в двумерной плоскости светового ножа, пересекающего исследуемую область потока [17]. В нашем случае необходимо исследовать поле скорости в поперечном сечении, проходящем вдоль геометрической оси ротора, когда световой нож расположен перпендикулярно к плоскости вращения ротора, а значит перпендикулярно к значительной по величине и неоднородно распределенной окружной составляющей вектора скорости в тестируемой плоскости. За время между двумя последовательными кадрами, фиксирующими положение светорассеивающих частиц для определения их смещения, часть из них выходит из светового сечения, при этом другие частицы могут появиться в нем. Это естественно приводит к искажениям восстанавливаемого поля скорости и возникновению случайных ошибок. Безусловно, точность измерения можно существенно повысить при статистическом осреднении нескольких мгновенных полей скорости. Как было показано в работе [18], данный прием хорошо работает для стационарных режимов течения в контейнере, генерирующем вихревую структуру, существенно уменьшает случайную ошибку и отлично согласуется с другими методами диагностики течения и с результатами численного моделирования. Однако при изучении пульсирующего течения такое осреднение теряет информацию о нестационарных особенностях потока, оно приводит к накоплению ошибки смещения за счет дополнительного отклонения треков частиц от мгновенного направления скорости из-за реальных временных изменений в структуре течения. Решением данной проблемы может стать фазовое статистическое осреднение, предложенное в работе [19].

Предположив, что картины течения повторяются при повороте ротора на полный угол между ближайшими лопатками, нужно привязать фазовое осреднение к частоте прохождения лопаток, например, через крайнее нижнее их положение. Для реализации этой схемы на вал вращения ротора устанавливался угловой энкодер ROTACAM ASR58, который формировал стробоскопический сигнал во время нахождения одной из лопастей ротора в плоскости светового ножа в момент, когда нужно было измерять мгновенное поле скорости.

Для диагностики течения использовалось стерео PIV измерительное оборудование фирмы Dantec, чтобы получить информацию обо всех трех компонентах скорости, включая перпендикулярную световому ножу. В качестве осветителя для формирования светового ножа применялся Nd: YAG импульсный лазер с характеристиками: 120 мДж энергии в импульсе, длина волны — 532 нм, частота срабатывания — 15 Гц. Лазерный нож толщиной 2 мм проходил вертикально в направлении основного набегающего потока через дно канала и ось ротора (рис. 4, а). Регистрация изображения проводилась на две камеры Dantec HiSense II с разрешением 1344×1024 пикселей. Для вычисления трехмерного поля скорости использовалось программное обеспечение PIV — Dantec Dynamic Studio Version 2.21.

При измерениях Stereo PIV камеры располагались перпендикулярно друг к другу и под углом 45° к каналу (рис. 4, б). Поскольку камеры расположены не фронтально, а под углом к световому сечению, для того чтобы обеспечить фокусировку всей области светового сечения на плоскости матрицы, был использован узел независимой регулировки приемного объектива и регистрирующей изображение матрицы камеры. Для уменьшения искажений между камерой и стенкой канала были установлены оптические призмы, заполненные водой, что обеспечивало параллельность плоскости матрицы камеры и границы раздела воздух–стекло–вода. Такое размещение регистрирующего оборудования может породить некоторые проблемы с регистрацией движения частиц лазерным ножом в областях течения с относительно большими значениями градиента скорости, например, вокруг ядер концевых вихрей. Для решения этой проблемы в ходе калибровки и тестовых экспериментов с помощью выбора между толщиной лазерного ножа, временем между лазерными импульсами и размерами (окном) регистрируемого изображения был найден компромисс для получения оптимального числа движущихся частиц–пикселей в регистрируемых вихревых структурах.

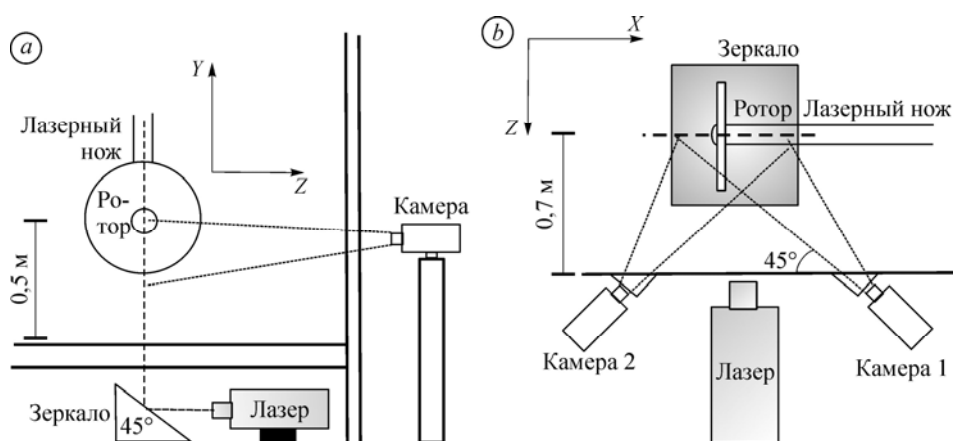


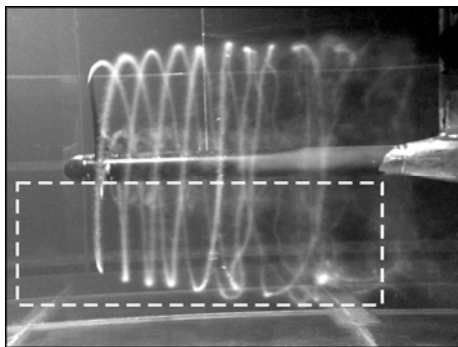
Рис. 4. Схема стереоизмерительной системы для цифровой трассерной визуализации.

Для проведения калибровки стерео PIV системы использовались точечная мишень (поле с нанесенными точками размером 5 мм и расстояниями между центрами точек 10 мм) и регулируемое крепление для перемещения мишени в области измерений. Калибровочное устройство было установлено на платформе над каналом и выровнено по центру лазерного ножа. Для точной настройки области фокусировки между двумя камерами использовался режим калибровки в программе Dynamic Studio. Для регистрации калибровочных изображений и реконструкции трехмерного пространства в программном обеспечении мишень регулированием винта микрометра была помещена на 2 мм назад за калибровочную плоскость в z -направлении (рис. 4). Снимки делались в каждом положении от $z = -2$ мм до $z = 2$ мм с шагом 1 мм. После перемещения мишени в новое положение, она фиксировалась. Затем производился калибровочный снимок мишени. Таким образом, были сформированы 5 калибровочных плоскостей в пространстве, необходимые для восстановления трехмерного поля скорости, обеспечивающие погрешность измерения на уровне 3–5 %.

Для обеспечения более детального разрешения вихревых структур в следе за ротором в наших экспериментах измерительная область делилась на 15 отдельных измерительных окон размером 80×130 мм (см. рис. 3). Данный выбор окон основан на результатах визуализации (рис. 5) и обусловлен тем, что характерный размер концевых вихрей, сходящих с кромок лопастей, доходит до 20 мм. Все области исследования выбирались так, чтобы они накладывались друг на друга с пересечением на 5 мм, тем самым гарантируя восстановление всего поля скорости. В итоге размер суммарного восстановленного трехмерного поля скорости был 220×630 мм, с необходимым перекрытием полей для минимизации ошибок, связанных с краевыми эффектами измерений.

Позиционирование каждого измерительного окна производилось перемещением подвижной платформы, на которой была установлена модель ротора. Данное координатное устройство позволяло перемещать ротор по высоте водяного канала (ось Y) и вдоль его длины (ось X) согласно рис. 3. Это перемещение модели ротора позволяло менять измерительные окна без изменения положения оптической системы (лазерного ножа и регистрирующих изображение камер). Таким образом, удавалось избежать описанной выше достаточно трудоемкой процедуры калибровки стерео PIV для каждого измерительного окна.

Результирующие поле скорости для каждого измерительного окна получалось путем фазового осреднения 100 мгновенных полей скорости, которые измерялись по сигналу кодирующего устройства из расчета: 1 световой импульс на один полный оборот вращения ротора. Угловой энкодер ROTACAM ASR58 с угловым разрешением $0,1^\circ$, установленный на вал ротора, формировал импульс для запуска измерений через полный оборот ротора, когда одна из лопаток проходила через свое крайнее нижнее положение. Такое кратно периодическое осреднение



мгновенных 100 полей скорости позволяет, как и в стационарном случае, существенно уменьшить случайную ошибку измерений, и с другой стороны оно практически полностью устраняет ошибку смещения, связанную с нестационарными изменениями структуры потока. В результате обработки изобра-

Рис. 5. Визуализация вихревой структуры следа для быстроходности $\lambda = 6$.

жений программой Dynamic Studio в плоскости светового ножа XU были определены 2 компоненты скорости (u , v) и ортогональная им третья w в направлении оси Z . После получения значений скорости в каждом измерительном окне для получения картины течения в полном тестируемом сечении проводилось их сшивание путем равномерного обрезания зон перекрытия измерительных окон.

Исследуемая структура течения хорошо известна и иллюстрируется визуализацией (рис. 5). На вращающиеся лопатки рабочего колеса (рис. 1) набегают изначально равномерный поток. В относительном движении, когда лопатка покоится, на каждое ее сечение набегают поток под некоторым углом атаки, что при безотрывном обтекании для исследуемых оптимального ($\lambda = 5$) и близкого к нему ($\lambda = 6$) режимов приводит к скачку скорости на выходной кромке лопатки или сходу непрерывной вихревой пелены со всей длины острой кромки. За счет постоянного сноса пелены основным потоком формируется сложная винтообразная вихревая поверхность. На краю лопасти эти вихри достигают наибольшей интенсивности и сворачиваются в мощный концевой вихрь. Концевые вихри хорошо визуализируются как непрерывные винтовые линии практически правильной формы с небольшим их расширением в осевом направлении вниз по потоку за ротором. Трехлопастной ротор формирует три подобных концевых вихря (рис. 5). Расстояние между витками (вихревой шаг) зависит от быстроходности λ и с ее увеличением уменьшается. Вблизи оси ротора формируется подобная приосевая вихревая структура, которая слабо выражена на визуализации (рис. 5) и может быть воспринята как единый суммарный приосевой вихрь, охватывающий вал ротора. В целом, винтообразный характер вихревой системы ротора турбины индуцирует окружное, против вращения ротора, и возвратное течения внутри следа за турбиной. Т. е. в следе за турбиной поток закручен и существенно замедлен. В области ближнего следа на расстоянии до 1–2 диаметров за ротором концевые вихри хорошо воспроизводимы и устойчивы. За этой областью в зоне перехода вихри становятся неустойчивыми, деформируются и спариваются. Затем в области дальнего следа концевые вихри разрушаются, след характеризуется высокой степенью турбулентности. Описанная динамика развития структуры следа хорошо видна при визуализации (рис. 5) и подтверждается измерениями (рис. 6).

Действительно, на основании описанной выше измерительной процедуры были получены трехмерные распределения мгновенных полей скорости для двух режимов работы ротора турбины с быстроходностью $\lambda = 5$ и 6, представленные на рис. 6. Для каждой быстроходности на трех изображениях последовательно сверху вниз для значений декартовых компонент скорости u , w , v показаны по 13 линий уровня с равномерным шагом и возрастанием интенсивности окраски от минимального до максимального значения, приведенного в таблице. Отметим, что распределение декартовых компонент u , w , v показано в измененном порядке, так как в тестируемом сечении компоненты скорости u , w , v отвечают соответственно положительной осевой, отрицательной окружной и отрицательной радиальной скоростям течения. На изображениях также показано положение равномерно окружающую лопатку зоны шириной $0,35 R$, где из-за тени и бликов от лопатки не удавалось получить достоверных значений поля скорости. На рис. 7 дополнительно изображены профили тех же скоростей в сечении на расстоянии $0,4 R$: перед ротором — квадраты, а за ротором на расстоянии $2,5 R$ — кружки. Точками показаны профили, которые соответствуют полусумме скоростей до и после лопатки сразу до и после зоны влияния тени от нее. Представленные данные измерений отчетливо диагностируют сложную вихревую систему в следе за ротором

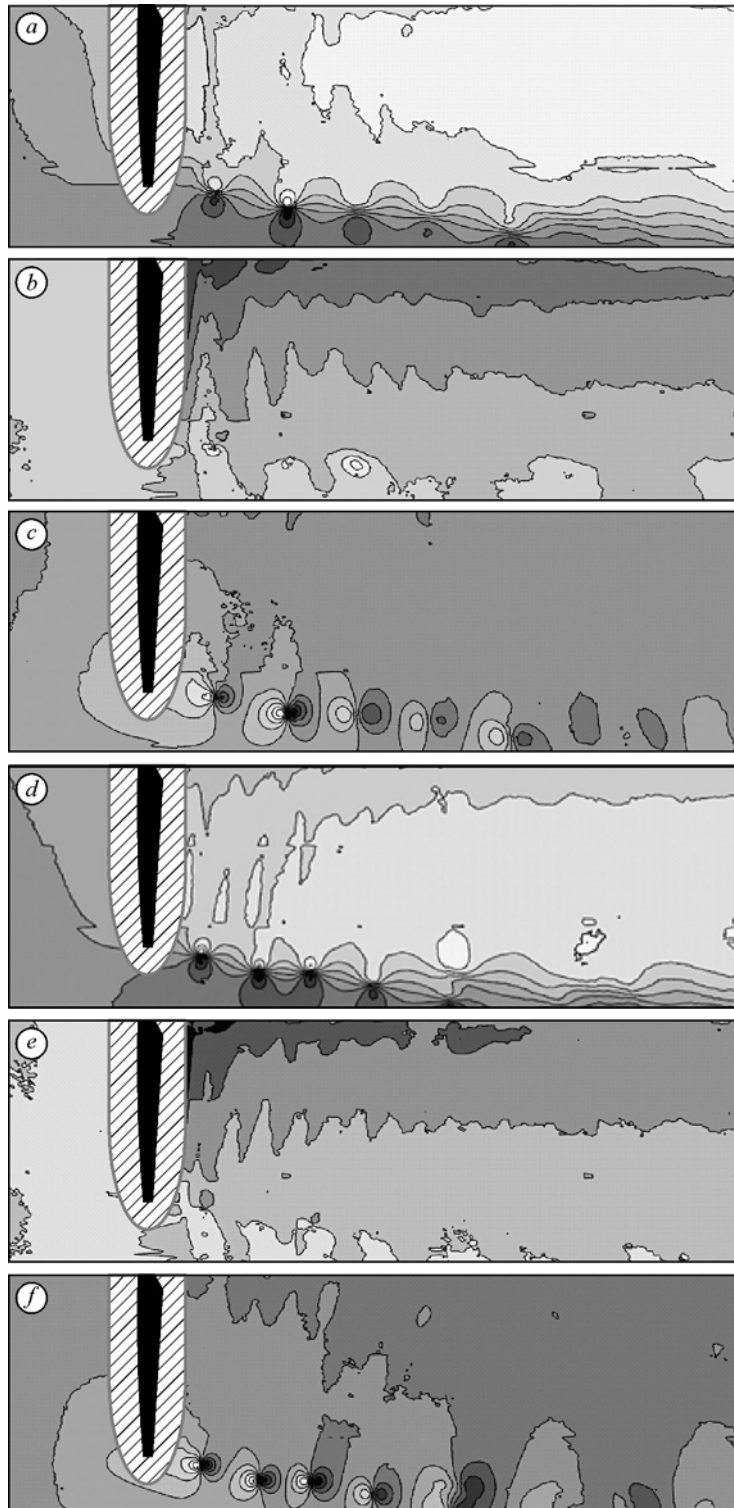


Рис. 6. Распределения a, d — осевой (u), b, e — окружной (w), c, f — радиальной (v) компонент скорости в вихревом следе позади модели ротора ветрогенератора для режимов разной быстроходности: $\lambda = 5$ (a, b, c), 6 (d, e, f).

Таблица

Максимальные и минимальные значения скоростей

Быстроходность	Компонента скорости	Минимальное значение (м/с)	Максимальное значение (м/с)	Шаг изолиний
5	u	0,122	0,692	0,044
	w	-0,128	0,212	0,026
	v	-0,316	0,183	0,038
6	u	0,029	0,716	0,053
	w	-0,095	0,191	0,022
	v	-0,414	0,204	0,048

для обеих быстроходностей. Прежде всего, это относится к ярко выраженной системе трех концевых лопастных вихрей винтообразной формы, хорошо регистрируемых при визуализации (рис. 5). Для распределений компонент скорости u и v в плоскости лазерного ножа сечения ядер концевых вихрей хорошо фиксируются цепочкой неоднородностей дипольного вида, следующих от конца лопасти в осевом направлении вниз по течению. Очень слабое их проявление, а иногда и полное отсутствие для третьей компоненты w объясняется исчезновением окружной скорости на границе следа за ротором в области существования концевых вихрей, (средние графики на рис. 7). Кроме концевых вихрей, для распределений компонент u и w хорошо фиксируется наличие вихревой пелены, сходящей с острой кромки лопастного профиля вдоль всей его длины. Это отражается периодическим изменением значения скоростей примерно с одинаковым шагом в осевом направлении вниз по течению за лопаткой. На рис. 6 для осевой компоненты, профиль которой более менее равномерен внутри следа (см. u/V для $0 < r/R < 1$ на рис. 7), вихревая пелена фиксируется в виде непрерывных “мостиков” повышенной скорости вдоль радиального направления за лопаткой. Для распределения окружной скорости w из-за ее резкого изменения вдоль радиуса (см. w/V для $0 < r/R < 1$ на рис. 7) наличие пелены на рис. 6 проявляется выраженными радиально вытянутыми “языками”. Укажем, что для обеих быстроходностей, подобных концевым вихрям, диполеобразных неоднородностей осевой и радиальной скоростей (u и v) в приосевой завихренности выявлено не было. Однако вдоль роторной оси присутствует зона концентрации вращения течения, что соответствует центральному колоннообразному вихревому шнуру в следе за ротором [2].

Следует подчеркнуть, что полученные результаты подтверждают многие основные положения существующих теорий ротора. Прежде всего это относится к простейшей теории Фруда [1], которая для расчетной быстроходности $\lambda = 5$ оптимального колеса тестируемой ветровой турбины предполагает двойное замедление осевой скорости в дальнем следе по сравнению с его замедлением на турбине. Действительно u/V для $\lambda = 5$ (см. рис. 7) на турбине (точки) замедляется на $1/3$, а в дальнем следе на $2/3$, как и предсказывает теория Фруда. Для быстроходности выше оптимальной ($\lambda = 6$), как и ожидалось, замедление потока на турбине становится более одной трети. Следующим элементом классических теорий является предсказание расширения следа за ветровыми турбинами при оптимальном режиме примерно в 1,22 раза [20]. Действительно, для $\lambda = 5$ (рис. 6) по мере удаления от турбины радиус концевых вихрей увеличивается практически до нижней горизонтальной границы области наблюдения, приблизительно отстоящей от оси вращения на $1,28 R$.

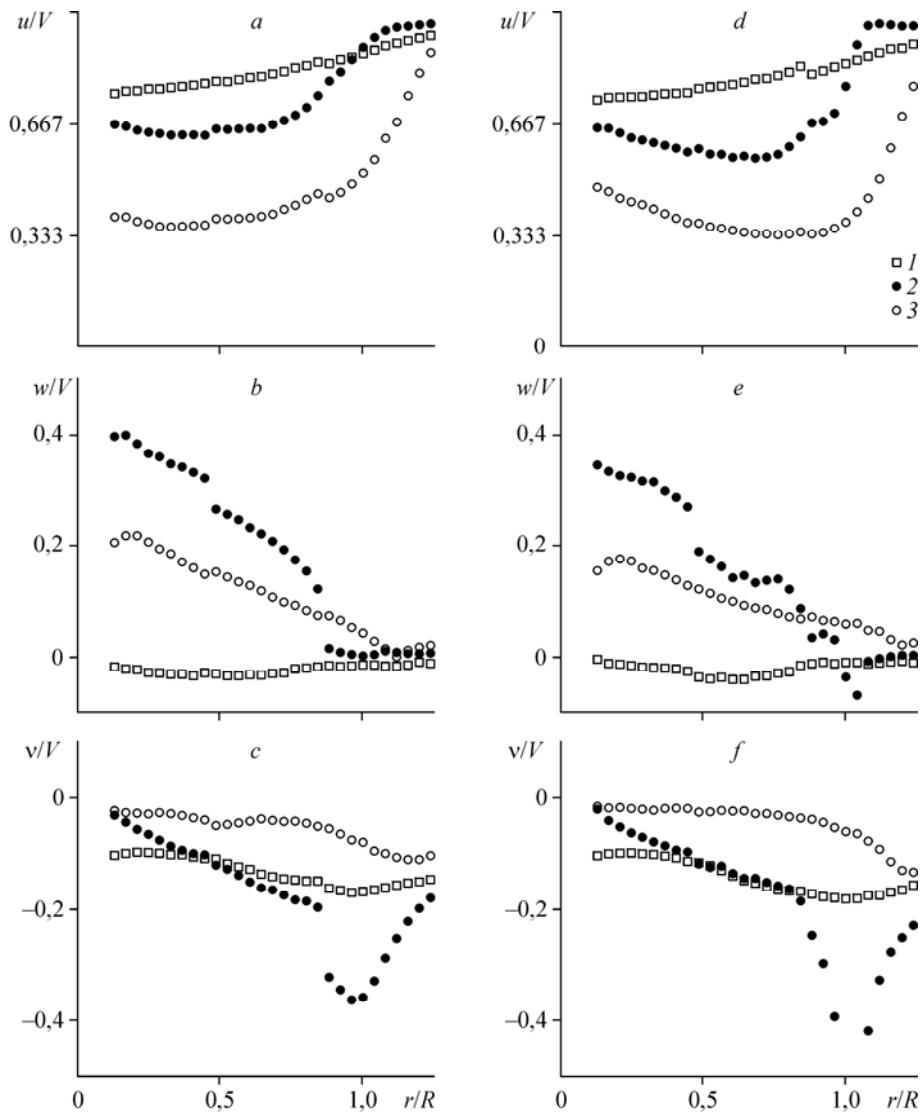


Рис. 7. Профили a, d — осевой (u), b, e — окружной (w), c, f — радиальной (v) компонент скорости перед ротором (1), при его прохождении (2) и далеко в следе за ним (3) для двух режимов разной быстроходности: $\lambda = 5$ (a, b, c), 6 (d, e, f).

Важным элементом для теорий ротора с конечным числом лопастей является предположение о постоянстве шага между витками вихревой структуры следа в осевом направлении. Несмотря на отмеченное выше двукратное замедление осевой скорости в следе, осевое расстояние между ядрами двух ближайших концевых вихрей не претерпевает таких значительных изменений, а практически остается постоянным. Данный важный факт для утверждения вихревых теорий ротора с конечным числом лопастей был также отмечен в воздушных измерениях в аэродинамической трубе за моделью ветровой турбины в рамках проекта «MEXICO» [21]. Еще одним важным предположением аналитической модели [8] с постоянной циркуляцией вдоль лопасти, разработанной в рамках концепции оптимального ротора Н.Е. Жуковского [2], было предположение полного отсутствия тангенци-

ального вращения у концевых вихрей. Результаты данных измерений для оптимального режима (см. w/V для $\lambda = 5$ на рис. 7) этот факт подтверждают. Еще одно интересное наблюдение данных измерений связано с обнаружением закрутки потока перед пропеллером турбины, которое ранее фиксировалось в визуализациях Рябушинского. В связи с этим следует, наверное, по-новому подойти к оценке возможности использования его оригинальной вихревой модели для ротора, описанной в первом параграфе статьи Н.Е. Жуковского [2]. Последний интересный вывод данных измерений связан с подтверждением модели дальнего следа, предложенной при теоретическом исследовании устойчивости концевых вихрей [22]. В модели дальнего следа внутренняя структура следа была равномерной, предполагалось, что неоднородности, связанные с вихревой пеленой в виде зафиксированных ранее «мостиков» и «языков», сгладятся и нивелируются на расстоянии 3 радиусов от ротора турбины. Действительно, для обоих режимов наблюдается исчезновение указанных структур вниз по потоку за турбиной.

Таким образом, проведенные исследования дали возможность не только диагностировать мгновенную структуру трехмерного поля скорости в продольном сечении течения за трехлопастным ротором при разных режимах течения, но и позволили подтвердить и обосновать некоторые предположения и гипотезы классических теорий ротора.

Список литературы

1. **Froude R.E.** On the part played in propulsion by differences of fluid pressure // *Trans. Inst. of Naval Architects*. 1889. Vol. 30. P. 390–405.
2. **Жуковский Н.Е.** Вихревая теория гребного винта. В IV статьях // I–III в Тр. Отд. Физических наук Общества Любителей Естествознания: I, 1913, т. 16(1); II, 1914, т. 17(1); III, 1915, т. 17(2); IV в Тр. авиационного расчетно-испытательного бюро, 1918, № 3.
3. **Betz A.** Schraubenpropeller mit geringstem Energieverlust: mit einem Zusatz von L. Prandtl // *Gottingen Nachrichten*, Gottingen, 1919.
4. **Goldstein S.** On the vortex theory of screw propellers // *Proc. Roy. Soc. London, A*. 1929. Vol. 123, No. 792. P. 440–465.
5. **Бавин В.Ф., Завадовский Н.Ю., Левковский Ю.Л., Мишкевич В.Г.** Гребные винты. Современные методы расчета. Л.: Судостроение. 1983. 296 с.
6. **Sørensen J.N.** Aerodynamic aspects of wind energy conversion // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2011. Vol. 43. P. 427–448.
7. **Okulov V.L.** On the stability of multiple helical vortices // *J. Fluid Mech.* 2004. Vol. 521. P. 319–342.
8. **Okulov V.L., Sørensen J.N.** Maximum efficiency of wind turbine rotors using Joukowski and Betz approaches // *J. Fluid Mech.* 2010. Vol. 649. P. 497–508.
9. **Окулов В.Л., ван Куик Г.А.М.** Предел Беца-Жуковского для максимального значения коэффициента использования энергии ветра // *Альтернативная энергетика и экология*. 2009. Vol. 77, № 9. С. 106–111.
10. **Ciocan G.D., Iliescu M.S., Vu T.C., Nennemann B., Avellan F.** Experimental study and numerical simulation of the FLINDT draft tube rotating vortex // *J. Fluids Eng.* 2007. Vol. 129. P. 146–158.
11. **Khadzhiisky N.** The laser-doppler anemometer at BSHC — performance characteristics and typical applications // *Proc. of SMSSH'90*. Varna. 1990. Vol. 1, BSHC.
12. **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. of Physics: Conf. Ser.* 2007. Vol. 75. P. 012014.
13. **Shen W.Z., Zhu W.J., Sørensen J.N.** Actuator line / Navier–Stokes computations for the MEXICO rotor: comparison with detailed measurements // *Wind energy*. 2011. (DOI: 10.1002/we.510).
14. **Felli M., Camussi R., Di Felice F.** Mechanisms of evolution of the propeller wake in the transition and far fields // *J. Fluid Mech.* 2011. Vol. 682. P. 5–53.
15. **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.

16. **Glauert H.** Airplane propellers / Ed. Durand W.F. // Aerodynamic Theory, Berlin: Springer, 1935. Vol. IV. Division L. P. 169–360.
17. **Adrian R.J.** Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics // Ann. Rev. Fluid Mech. 1991. Vol. 23. P. 261–304.
18. **Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н.** Особенности оптической диагностики пульсирующих течений // Журнал технической физики. 2007. Т. 77, № 5. С. 47–57.
19. **Наумов И.В., Окулов В.Л., Майер К.Е., Соренсен Ж.Н., Шен В.** LDA-PIV диагностика и трехмерный расчет пульсирующего закрученного потока в цилиндрическом контейнере // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 2. С. 151–156.
20. **Hansen M.O.L.** Aerodynamics of wind turbines. 2-nd ed. London: Earthscan, 2008. 181 p.
21. **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, Sweden, 8–9 June, 2011. P. 94–99.
22. **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.

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2011 г.