УДК 621.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕВОГО СЛЕДА ЗА МОДЕЛЬЮ РОТОРА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Кабардин И.К.[1], Наумов И.В.[1], 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*

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

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследования структуры вихревого следа и измерения мгновенных распределений трехмерного поля скорости за моделью ротора ветрогенератора. В примененной методике стерео PIV было устранено попадание тени от лопатки модели ротора в измерительную область и увеличена измерительная область. Проведенные исследования позволили диагностировать и восстановить мгновенную структуру трехмерного поля скорости в продольном сечении течения за трехлопастной моделью ротора при разных ее быстроходностях. Измерения позволили подтвердить некоторые предположения и гипотезы классических теорий ротора.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие исследований по аэродинамике ротора (гребного винта, пропеллера, ветряка и т. д.) всегда было связано с интенсивным развитием соответствующей отрасли техники. Отправной точкой создания элементарной теории ротора следует считать первые попытки решения проблем пароходного мореплаванья с использованием гребных винтов. В результате появилась простейшая теория гребного винта В начале XX века развитие роторной аэродинамики стимулировал бурный рост авиации. Несмотря на существование двух ведущих научных школ Н.Е. Жуковского в России и Л. Прандтля с А. Бецом в Германии, существующие в то время аналитические решения оказались трудными для вычислений. Поэтому в дальнейшем для расчета роторов развивались только разные численные или полуэмпирические модели[1-2], посвященные методам аэродинамического расчета роторов ветровых турбин для бурно развивающейся сейчас отрасли энергетики. Однако и в теоретических исследованиях был недавно достигнут значительный прогресс: используя решения для мульти-плетов из винтовых вихрей [3], оба типа ротора с любым конечным числом лопастей были аналитически решены в [4].

Для проверки некоторых гипотез теорий ротора было проведено исследование течения за моделью ротора ветрогенератора с использованием современной методики стерео PIV. Данная работа является продолжением работы, начатой в 2011 г., в Датском Техническом университете[5]. Основным недостатком работы 2011 г. было то, что при использованной в работе схеме размещения камер в методе PIV лопатка модели ротора создавала тень в измерительной области, что приводило к потере части экспериментальных данных. Другим недостатком была малая относительно размера лопатки измерительная область (80x130 мм).

Целью настоящей работы являлось устранение указанных выше недостатков и исследование вихревого следа за моделью ротора ветрогенератора в момент, когда через сечение проходит лопатка.

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 − сотовое устройство для линеаризации скорости течения по сечению канала.

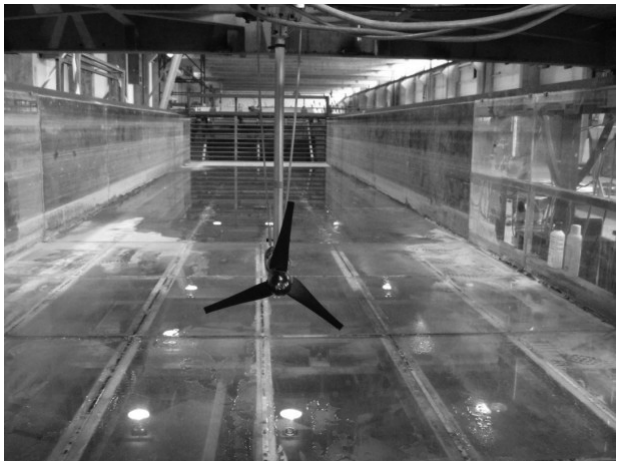

Рис.1 Фотография ротора в сухом канале.

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 − 0,159 м. Для определения оптимального положения ротора в канале, чтобы скорость набегающего потока была близкой к постоянному значению, были измерены профили скорости в горизонтальном и вертикальном сечении измерительного участка.

Контроль скорости потока осуществлялся независимым гидрометрическим измерителем скорости OTT Z400 в течение 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 [6]. Хорда лопасти и угол ее установки были рассчитаны по теории Глауэрта для оптимального ветряка [7] с быстроходностью $\lambda = 5$, где $\lambda = \Omega R/V$, а Ω − угловая скорость вращения ротора. Предусматривалась регулировка угла установки лопаток. Перед началом экспериментов угол атаки лопаток был выставлен равным 0°. Числа Рейнольдса $Re = \rho\Omega Rb/\mu$, (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 °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 (рис.2). Для вращения ротора с постоянной угловой скоростью применялся серводвигатель JVL Industri 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 %.

НАСТРОЙКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Нестационарность и трехмерная структура течения за моделью ротора 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. 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 последова-

тельными 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 [8], 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 [9]. 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 использовался метод стерео PIV, реализованный в измерительном оборудовании фирмы Dantec, чтобы получить информацию обо всех трех компонентах скорости, включая и третью в плоскости светового ножа.

В качестве осветителя для формирования светового ножа применялся Nd: YAG импульсный лазер с характеристиками: 200 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.2,а). Регистрация изображения проводилась на две камеры Dantec HiSense II с разрешением 1344x1024 пикселов. Для вычисления трехмерного поля скорости использовалось программное обеспечение PIV – Dantec Dynamic Studio Version 2.21.

При измерениях Stereo PIV камеры располагалась перпендикулярно друг к другу и под углом 45° к каналу (рис.2 a, b). 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.

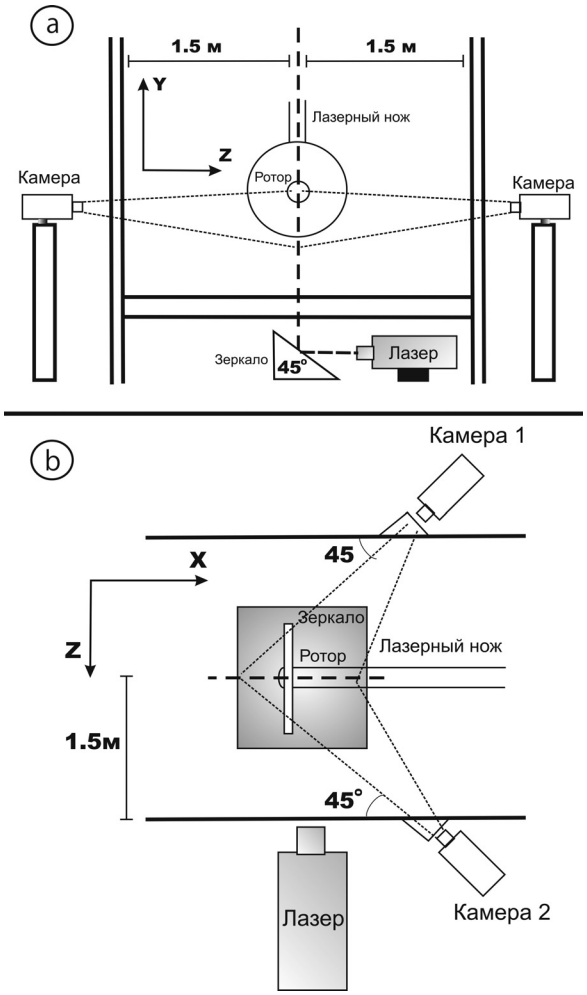

Рис.2 Схема стереоизмерительной системы для цифровой трассерной визуализации (a - поперечный вид, b вид сверху).

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 оборудо-

вания 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-пикселов в регистрируемых вихревых структурах.

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. Снимки делались в каждом положении от положения z = -2 мм до положения z = 2 мм с шагом 1 мм. После перемещения мишени в новое положение, мишень 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 %.

При расположении камер с одной стороны канала[5] в некоторых экспериментах лопатки ротора закрывали часть измерительной области. Кроме того размер измерительной области относительно размера лопатки был небольшой (80x130 мм), что давало погрешность при объединении множества зарегистрированных полей скоростей в одно поле. Чтобы избежать описанных выше проблем была использована альтернативная схема крепления камер (рис.2 a,b). В предложенной схеме камеры располагались с двух сторон канала. Из-за увеличения расстояния от камеры до объекта размер измерительной зоны увеличился до 220 x 350 мм.

Для разрешения вихревых структур в следе за ротором измерительная область делилась на 3 отдельных измерительных окна размером 220 x 350 мм (см. рис.3). Чтобы захватить вихри, сходящие с края лопатки, в экспериментах ротор приподнимался на 7 см (соответствующие измерительные области на рисунке обозначены пунктирной линией). Области исследования выбирались так, чтобы они накладывались друг на друга с пересечением на 10 мм, тем самым гарантируя восстановление всего поля скорости. Частота регистрации изображений составляла 4.3 Гц. В итоге размер суммарного восстановленного трехмерного поля скорости был 1030x290 мм, с необходимым перекрытием полей для минимизации ошибок, связанных с краевыми эффектами измерений.

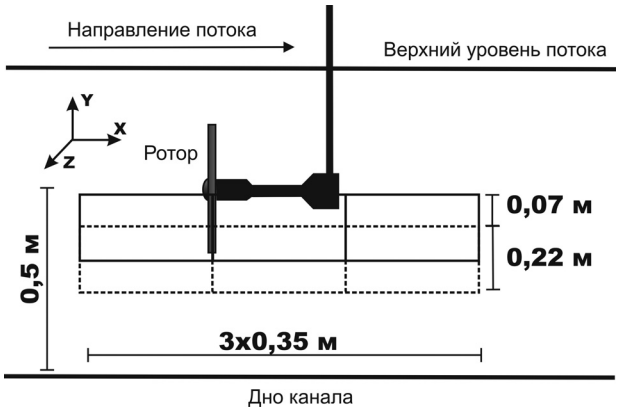

Рис.3 Область измерений.

Исследуемая структура течения хорошо известна. На вращающиеся лопатки модели ротора (рис.4 a, b, c) набегает изначально равномерный поток. В относительном движении, когда лопатка покоится, на каждое ее сечение набегает поток под некоторым углом атаки, что при безотрывном обтекании 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.

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 и может быть воспринята как единый суммарный приосевой вихрь, охватывающий вал ротора[5]. 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 турбулезации.

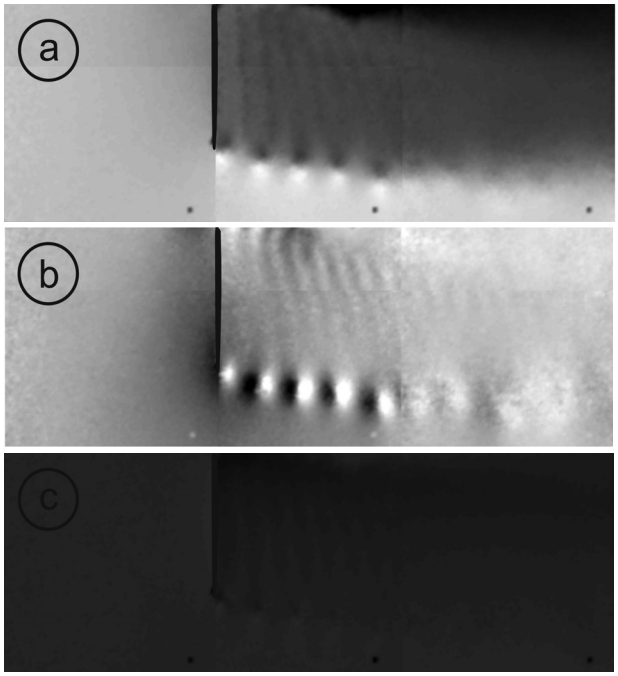

Рис.4 Распределения a - осевой(u), b - окружной (v) и c - тангенциальной (w) компонент скорости при быстроходности λ =5.

Описанная динамика развития структуры следа хорошо видна при визуализации в 2011 г.[5] и подтверждается измерениями (рис.4, 5). Действительно, на основании описанной выше измерительной процедуры были получены трехмерные распределения мгновенных полей скорости различных режимов работы ротора. На рис.4 показаны распределения осевой, окружной и тангенциальной компонент скорости при быстроходности λ = 5. На рис.6 представлены распределения осевой компоненты скорости при быстроходности λ =3(a), 5(b), 7(c).

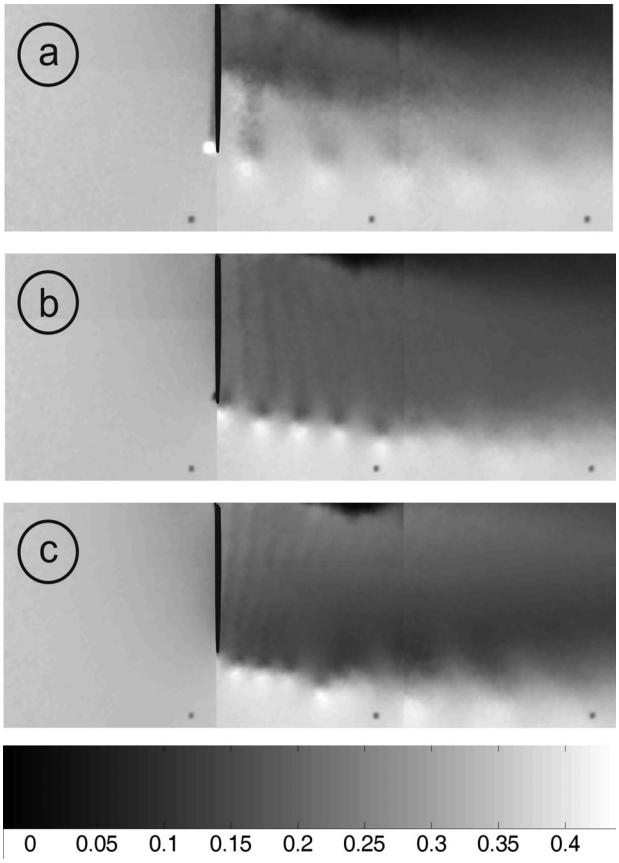

Рис.5 Распределения осевой компоненты скорости при быстроходности λ =3(a), 5(b), 7(c).

Полученные результаты подтверждают многие основные положения существующих теорий ротора. По измеренным полям скорости оказалось, что средняя скорость затухает на турбине на 1/3, а дальнем следе на 2/3 (рис.5,b), как и предполагает теория Фруда [10], которая для расчетной быстроходности λ = 5 оптимального колеса тестируемой ветровой турбины предполагает двойное замедление осевой скорости в дальнем следе по сравнению с его замедлением на турбине. Для быстроходности выше оптимальной (рис.5, c), как и ожидалось, замедление потока на турбине становится более одной трети. Также элементом классических теорий является предсказание расширения следа за ветровыми турбинами при оптимальном режиме примерно в 1,22 раза [11]. Действительно, для λ = 5 (рис.4) 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. Еще одной гипотезой является равномерное затухание скорости

за лопаткой. На рис.5 можно убедиться, что это утверждение выполняется.

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.

Таким образом, проведенные исследования не только позволили 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.

ВЫВОДЫ

В работе представлены исследования вихревого следа за моделью ротора ветрогенератора. Поля скорости измерялись по трекам частиц: методом стерео PIV. За счет размещения камер с двух сторон канала были устранены недостатки, имеющиеся на предыдущих этапах работ: устранено попадание тени от лопатки ротора в измерительную область и увеличена измерительная область (от 80x130 мм до 290x350 мм). Проведенные исследования позволили диагностировать и восстановить мгновенную структуру трехмерного поля скорости в продольном сечении течения за трехлопастным ротором при разных его быстроходностях. По полученным в ходе исследования полям скорости показано, что:

при оптимальной быстроходности λ=5 средняя скорость за моделью ротора затухает на 1/3, а дальнем следе на 2/3 , как и предполагает теория Фруда [10];

след за турбиной увеличивается в 1,22 раза, что согласуется с [11];

скорость за моделью ротора затухает равномерно вдоль лопатки;

шаг между витками вихревой структуры следа в осевом направлении остается постоянным.

Таким образом, проведенные исследования не только позволили 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. "Гребные винты. Современные методы расчета"/ В.Ф. Бавин, Н.Ю. Завадовский, Ю.Л. Левковский, В.Г. Мишкевич – Л.: Судостроение. 1983. 296 с.
2. Sørensen J.N. Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion. Annual Review of Fluid Mechanics , 2011. Vol. 43, pp. 427-448 (DOI: 10.1146/annurev-fluid-122109-160801).
3. Okulov V.L. On the stability of multiple helical vortices. J. Fluid Mech. 2004. Vol. 521, pp. 319 - 342.
4. Okulov V.L., Sørensen J.N. Maximum efficiency of wind turbine rotors using Joukowsky and Betz approaches. J. Fluid Mech. – 2010. Vol. 649. P. 497-508
5. Наумов И.В., Рахманов В.В., Окулов В.Л., Вельте К.М., Майер К.Е., Микельсон Р.Ф. Дмагностика течения за моделью ротора трехлопастной турбины // Теплофизика и аэромеханика, 2011. Т. 19(3). С. 267-278.
6. Selig M.S., Guglielmo J.J., Broeren A.P., Giguere P. Summary of low-speed airfoil data. Vol. 1. SolarTech Publication, Virginia Beach, Virginia 1995. P. 292
7. Glauert H. 1935 Airplane propellers. Division L in Aerodynamic Theory, vol. IV, (ed. Durand W.F.). Springer: Berlin. P. 169–360.
8. Окулов В.Л., Наумов И.В., Соренсен Ж.Н. Особенности оптической диагностики пульсирующих течений // Журнал технической физики, 2007. Том 77(5), С. 47-57.
9. 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.
10. Froude R.E. On the part played in propulsion by differences of fluid pressure // Transactions of the Institute of Naval Architects. 1889. Vol. 30. P. 390−405.
11. Hansen M.O.L. Aerodynamics of wind turbines. 2-nd ed. London: Earthscan, 2008. 181 p.