УДК 532.5

КОМПЛЕКСНАЯ ОПТИКО-ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ЗА МОДЕЛЬЮ РОТОРА ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

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

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

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследования кинематических характеристик дальнего следа за моделью ротора ветрогенератора. Исследования проводились одновременным использованием методов лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА) и цифровой трассерной визуализации (PIV). Метод PIV позволил диагностировать и восстановить мгновенную структуру трехмерного поля скорости в продольном и поперечном сечениях вихревого следа за трехлопастной моделью ротора при разных быстроходностях. Методом ЛДА были измерены пульсационные характеристики осевой компоненты скорости в различных областях в следе за ротором. Экспериментально обнаружено постоянство числа Струхаля в зависимости от быстроходности в дальнем следе, свидетельствующее о наличии крупномасштабного колебания потока, аналогичное встречаемому в задачах обтекания цилиндра и сферы. При помощи условного осреднения методом PIV восстановлено мгновенное поле скорости основной гармоники колебания.

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% уже к 2020 году. Поэтому у исследователей снова возрос интерес к роторной аэродинамике, к поиску новых путей повышения производительности ветровых турбин.

Изучение вихревых следов в натуральном масштабе является сложной задачей из-за размеров турбин, а также из-за того, что невозможно контролировать набегающий поток ветра и синхронизовать информацию о набегающем потоке и следом за ветровой турбиной. Одни из первых экспериментов с ветрогенераторами в натуральную величину были проведены с использованием технологии светового обнаружения и определения дальности ЛИДАР [1]. В этих измерениях была зарегистрирована только ограниченная часть в конической области в следе за осью турбины. Последующие эксперименты имели дело с моделями турбин. В настоящее время стала очень популярной методика цифровой трассерной визуализации (PIV). Ранние примеры PIV измерений в следе за моделями турбин представлены в работе [2]. Следующая успешная попытка была предпринята в рамках крупного европейского проекта «MEXICO» [3] с проведением PIV-измерений течения за трехлопастным ротором (диаметр ротора - 4.5 м) в аэродинамической трубе. В работе, из-за больших размеров модели ветряка, удалось исследовать незначительную область следа, которая ограничивалась двумя радиусами вниз по потоку с измерительными окнами, не перекрывающими всю область следа. За последние несколько лет количество исследований с использованием методики PIV

значительно возросло, напрмер работа [4]. Авторы исследовали концевые и осевые вихри для модели турбины в водяном канале. Это исследование, как и многие другие, использовали двухкомпонентную PIV измерительную технику. Во многих исследованиях применялись относительно простые лопасти ротора - плоские пластины. Такие лопасти сильно влияют на динамику возмущенного течения и на образование концевых вихрей. Следующие эксперименты с PIV-диагностикой и восстановлением мгновенной структуры трехмерного поля скорости течения за трехлопастными моделями ветряков были выполнены в водяных каналах. Изучались модели роторов радиусов 186 мм [5] и 115 мм [6] с оптимизированными по Глауэрту лопастями [7]. В работе [5] с помощью визуализации и стерео PIV-системы были изучены два режима обтекания ротора с быстроходностями 5 и 6, а в [6] использовался методика планарного PIV с фазовой привязкой к углу поворота ротора для быстроходности 6. В работе [5] были зарегистрированы поля осевой, радиальной и тангенциальной компонент скорости в продольном сечении вихревого следа. За счет удачно выбранной компоновки оптических элементов стерео PIV системы в работе [8], были устранены теневые зоны от лопаток и расширена область диагностирования. В результате были установлены особенности развития вихревого течения и его характеристик, как в ближнем следе, так и достаточно далеко за турбиной. Эти данные оказались в хорошем согласии с отдельными предположениями и гипотезами классических теорий ротора и с расчетным оптимумом для лопастей, форма которых определена по Глауэрту [7].

Для изучение структуры вихревого следа важно знать его модовый состав. Методом ЛДА были измерены временные реализации скорости и восстановлены спектральные плотности осевой компоненты скорости в различных областях потока. При анализе экспериментальных данных необходимо использовать безразмерные критерии, поскольку в динамике жидкости постоянство безразмерного критерия указывает на некое динамическое подбие между различными режимами течения. Безразмерным параметром, описывающим кинематику вихреобразования вокруг твердых тел, является число Струхаля. Число Струхаля определяется как Sh = FD/V, где F - частота основной гармоники в следе, D - размер тела и V - скорость потока. Как известно, при вихревом обтекании цилиндра число Струхаля приблизительно равно Sh ≈ 0.2 в широком диапазоне чисел Рейнольдса (800 < Re < 200 000) [9]. Аналогичное постоянство числа Струхаля существует для трехмерного обтекания сферы трехмерными спиралевидными вихрями в следе, но в меньшем диапазоне чисел Рейнольдса [10]. Также следует отчетить, что крупномасштабная неустойчивость наблюдается также и в ближнем следе на расстоянии одного диаметра от ротора [11]. В работе [12] показана зависимость числа Струхаля как функция от напора, быстроходности или числа лопаток. Их измерения показали, что существует некоторый набор такого рода зависимостей в интервале (0.1 < Sh < 0.3), но эти зависимости не обладают таким постоянством, как постоянство числа Струхаля при обтекании твердого тела. Основная гармоника возмущений находилась в спектре осевой компоненты скорости, измеренного на расстооянии 4-х диаметров вниз по течению в следе за ротором для значения быстроходности $\lambda = 5.8$, где $\lambda = \Omega R/V$, а Ω ¾ угловая скорость вращения ротора.

В работе [13] была предпринята попытка найти экпериментальную зависимость числа Струхаля в зависимости от быстроходности трехлопастного ротора ветрогенератора по сериям мгновенных полей скорости, полученных стереоскопической системой PIV в различных сечениях вдоль и поперек набегающего потока вниз по течению.

Данная работа является продолжением работ [5, 8 и 13]. В ней впервые применена комплексная оптико-лазерная диагностика в следе за моделью ротора ветротурбины в водяном канале. Для диагностики характеристик вихревого следа использовались совместные измерения PIV и ЛДА [14]. Метод PIV позволил диагностировать и восстановить мгновенную структуру трехмерного поля скорости в поперечном сечении вихревого следа за трехлопастной моделью ротора при разных ее быстроходностях, в то время как ЛДА были измерены спектральные плотности осевой компоненты скорости в различных областях в следе за ротором.

Целью работы было исследовать зависимость числа Струхаля от различным параметров в дальнем следе, а также зарегистрировать поля скорости с учетом условного осреднения методом PIV.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Модель ротора помещалась в водяной канал. Длина водяного канала составляла 35 м, ширина - 3 м и рабочая высота - 0,9 м [5, 8]. 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. Модель трехлопастного ротора (рис.1) была специально изготовлена для качественной и количественной визуализации течения в следе за ротором. Диаметр ротора составлял 2R = 0,376 м, а длина лопасти ротора ¾ 0,159 м. Значение скорости потока в месте расположения модели ротора равнялась V = 0,38 м/с. Колебания скорости потока в ходе экспериментов не превышали 3 %.

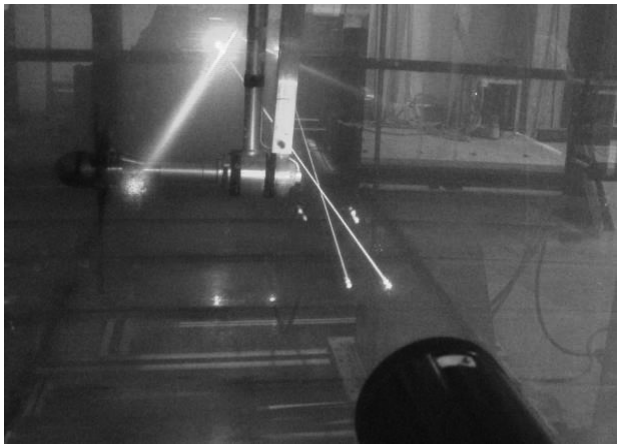

Рис.1 Фотография ротора в водяном канале. На фотографии видны лучи лазера системы ЛДА.

В качестве профиля для лопастей был взят профиль CD7003 [1]. Хорда лопасти и угол ее установки были рассчитаны по теории Глауэрта для оптимального ветряка [7] с быстроходностью $\lambda = 5$. 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 м позади ротора, чтобы минимизировать возмущения набегающего потока в плоскости ротора. Модель ротора был установлен на высоте 0,5 м от дна, чтобы свести влияние неоднородности профиля набегающего потока к минимуму [5]. 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 %.

Диагностика течения производилась методикой стереоскопической цифровой трассерной визуализации stereoPIV и методом лазерной доплеровской анемометрии ЛДА с учетом выполненной в работе визуализации. Подробное описание установки и калибровки системы PIV дано в работе [5].

Для диагностики течения использовался стерео PIV фирмы Dantec. 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).

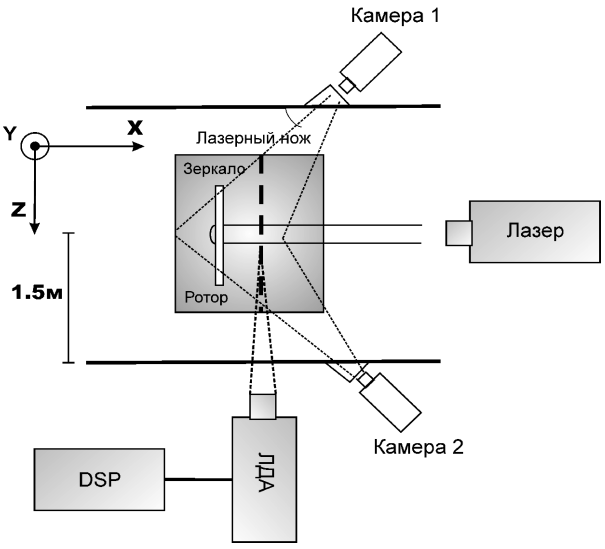

Рис.2 Схема расположения измерительных систем для диагностики поля скорости потока в сечениях, перпендикулярных к оси ротора.

Регистрация изображения проводилась на две камеры Dantec HiSense II с разрешением 1344x1024 пикселов. Для вычисления трех-

мерного поля скорости использовалось программное обеспечение PIV ¾ Dantec Dynamic Studio Version 2.21. При измерениях Stereo PIV камеры располагалась перпендикулярно друг к другу и под углом 45° к каналу (рис. 2). Для уменьшения искажений между камерой и стенкой канала были установлены оптические призмы, заполненные водой. . Была проведена калибровка системы, необходимая для восстановления трехмерного поля скорости, обеспечивающая погрешность измерения на уровне 3-5 %.

Для разрешения вихревых структур в следе за ротором измерительная область делилась на 6 отдельных измерительных окна размером 220 х 350 мм (см. рис. 3). 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. Размер суммарного восстановленного трехмерного поля скорости был 2060 х 290 мм, с необходимым перекрытием полей для минимизации ошибок, связанных с краевыми эффектами измерений.

Для измерения пульсационных характеристик компонент скорости использовался *2D* лазерный доплеровский анемометр (Dantec 2-D Fiberflow LDA). Схема его расположения в эксперименте показана на рис.2. Анемометр выполнен на аргоновом лазере мощностью 2W и коммерческом процессоре *DSP* для обработки доплеровских сигналов (BSA57N2). В данном LDA применяется дифференциальная двухчастотная оптическая конфигурация (частота сдвига 40 MHz). Диаметр оптической головки равен 112, фокусное расстояние 600, диаметр лазерных пучков 1.35 mm. Длины волн лазерного излучения составляли 514.5 (зеленый свет) и 488 mm (синий свет). Размер измерительной зоны ЛДА - 0.12x0.12x1.52mm. Доплеровский сигнал от светорассеивающих частиц обрабатывался сигнальным процессором *DSP* и на персональном компьютере.

Для повышения точности измерения было применено условное фазовое осреднение мгновенных полей скорости в дальнем следе по характерным пульсационным особенностям потока [14].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 показаны мгновенные распределения трех компонент скорости для двух режимов с быстроходностью $\lambda = 5$. Мгновенные поля [6], представлены для $\alpha = 0°$. Представленные данные измерений отчетливо диагностируют сложную вихревую систему в следе за ротором. Прежде всего, это относится к ярко выраженной системе трех концевых лопастных вихрей винтообразной формы. Для распределений компонент осевой и радиальной скорости 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 тангенциальной компоненты, объясняется исчезновением окружной скорости на границе следа за ротором в области существования концевых вихрей. Кроме концевых вихрей для распределений компонент осевой и тангенциальной скорости хорошо фиксируется наличие вихревой пелены, сходящей с острой кромки лопастного профиля вдоль всей его длинны. Это отражается периодичным изменением значения скоростей примерно с одинаковым шагом в осевом направлении вниз по течению за лопаткой. Вдоль роторной оси присутствует зона концентрации вращения течения, что соответствует центральному колоннообразному вихревому шнуру в следе за ротором. В области x = 1.8 - 3.6 R, y = - 1,5..0 R регулярная лопастная структура разрушается и происходит спаривание соседних концевых вихрей вблизи x = 3R. В нижнем ряду рисунка 3 показаны поля осевой компоненты скорости, измеренной в поперечном сечении в следе за ротором на расстояниях x= 5 R, 8 R, 10 R. Из рисунков видно, что на расстояниях x= 5 R имеется замедление осевой скорости за ротором, которое постепенно пропадает по мере приближения к области x=10 R.

С помощью лазерного допплеровского анемометра были проведены исследования пульсационных характеристик в следе за ротором. Области измерения ЛДА показаны на рис. 4 черными точками. Характерные распределения спектральной плотности осевой компоненты скорости показаны ниже на рис. 4.

Измерения проводились для значения быстроходности равной 5. Из графиков видно, что в экспериментах преобладали 3 выделен-

ные частоты F_{rot} = 1,9 Гц , F_{blade}= 5.7 Гц и частота F = 0,25 Гц в дальнем следе за ротором. Частота F_{rot} соответствует частоте вращения ротора. Действительно, если пересчитать значение частоты для заданной скорости набегающего потока и заданной быстроходности получим $F_{rot}=\lambda V_0/(2\pi R)$ = 1.91 Гц. Лопаточная частота для трехлопастного ротора будет равна $F_{blade}= 3\ F_{rot}$= 5.73 Гц.

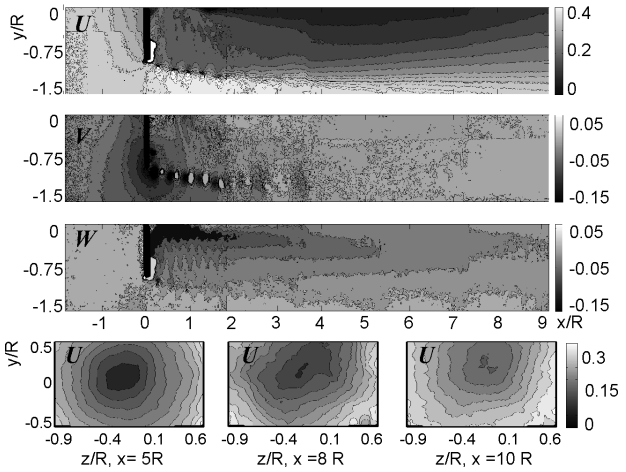

Рис.3 Изоконтуры мгновенной осевой (U), радиальной (V), тангенциальной (W), компонент скорости для быстроходности λ = 5. Координаты обезразмерены на радиус лопатки. Измерения проводились в сечении XY. В нижнем ряду показыны поля проекции осевой компоненты скорости в поперечном сечении в следе за ротором нарасстояниях x=5 R, 8 R , 10 R.

Наличие выделенной низкой частоты дает основание полагать, что в дальнем следе ротор обтекается как твердое тело.

Для исследования природы третьей частоты был проведен анализ числа Струхаля для различных значений быстроходности, а также скоростей набегающего потока в области дальнего следа. В исслендованиях было уделено особое внимание числу Струхаля, поскольку именно оно описывает кинематику возмущения при обтекании тел. Измерения частот в дальнем следе (точка 6 на рис. 4) показало, что при изменении угловой скорости вращения ротора – изменении быстроходности, частота в дальнем следе не меняется (рис. 5а).

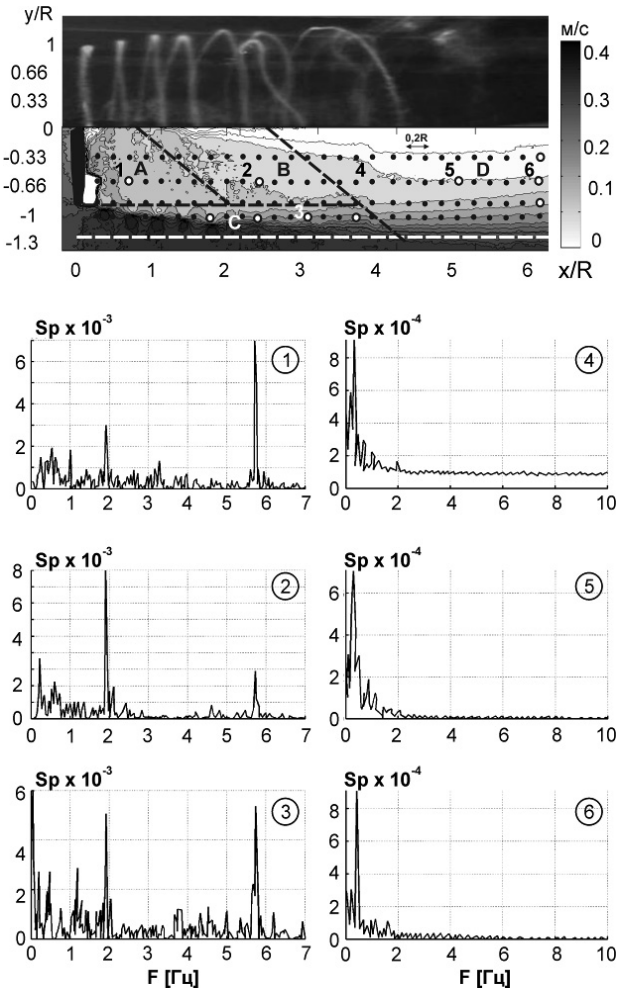

Рис.4 Области измерения распределений спектральной плотности осевой компоненты скорости и пример визуализации течения для быстроходности λ = 5 (вверху). Примеры спектральной плотности осевой компоненты скорости в точках 1,2,3,4 ,5 и 6.

Но частота меняется согласно формулы, при изменении скорости набегающего потока (рис. 5 б)

Таким образом, найдено, что в следе за ротором (рис. 4 область D) наблюдается постоянство числа Струхаля *Sh* (рис. 5), такое же, как постоянство Числа Струхаля для осцилляций в следе за обтеканием твердого тела, как показано в работе [9,10].

Механизмы, объясняющие нерегулярности в дальнем следе, пока в полной мере не ясны и все эти процессы отнесены к одному типу колебаний, биению следа, которые изначаль-

но описываются двумерными биениями следа при различных условиях отклонения в горизонтальной плоскости [12].

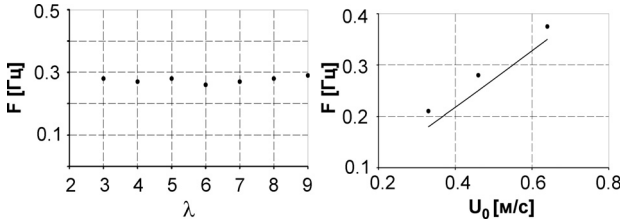

Рис.5 Постоянство числа Струхаля в дальнем следе за ротором (рис. 4 область D) для различных значений быстроходности (λ) и скорости свободного потока (V).

Все типы крупномасштабных нерегулярностей в дальнем следе были названы колебаниями. Это может быть некорректно, поскольку их проявление может иметь различную природу. Поэтому используя PIV измерения было уделено особое внимание обнаружению и категоризации этих возмущений. Из совместной визуализации и реконструкции полей скорости, мы обнаружили, что эта динамика связана с прецессией (вращением) вихревого ядра (рис. 6).

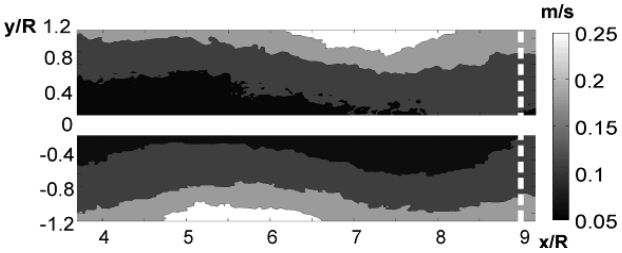

Рис.6 Пример трехмерной спиральной структуры продольного поперечного сечения в дальнем следе для продольных осцилляций при числе Струхаля Sh = 0.2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований кинематических характеристик дальнего следа за моделью ротора ветрогенератора. Исследования проводились при комплексном использовании методов Лазерной допплеровской анемометрии (ЛДА) и цифровой трассерной визуализации (PIV). Метод PIV позволил диагностировать и восстановить мгновенную структуру трехмерного поля скорости в поперечном сечении вихревого следа за трехлопастной моделью ротора при разных ее быстроходностях. Методом ЛДА были измерены спектральные плотности осевой компоненты скорости в различных областях в следе за ротором. Экспериментально обнаружено постоянство числа Струхаля от быстроходности в дальнем следе, свидетельствующее о наличии крупномасштабного колебания вихревого потока. При помощи метода PIV восстановлено поле скорости основной гармоники колебания. Интересным является факт, что частота пульсаций не зависит от угловой скорости вращения ротора, при близких к оптимальному режиму работы ветрогенератора, что позволяет провести аналогию с потоком, наблюдаемому при обтекании цилиндра и сферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gunnar C. L. et al. TOPFARM - next generation design tool for optimisation of wind farm topology and operation// Technical report, Riso National Laboratory for Sustainable Energy Technical University of Denmark, 2011. Riso-R-1805(EN).
2. Whale J., Papadopoulos K. H., Anderson C. G., Helmmis C. G., Skyner D. J. A study of the near wake structure of a wind turbine comparing measurements from laboratory and full-scale experiments// Solar Energy. - 1996. - Vol. 56.- N. 6. - P. 621–633.
3. Schepers J. G., Snel H. Model experiments in controlled conditions// Technical report, Energy research center of the Netherlands, 2007. ECN-E-07-042.
4. Sherry M., Sheridan J., David L. J. Characterisation of a horizontal axis wind turbine's tip and root vortices//Experiments in Fluids. - 2013. - Vol. 54. - P. 1417-1437.
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. - 2012. - Т. 19. - N. 3. - С. 267-278. Naumov I.V., Rahmanov V.V., Okulov V.L., Velte K.M, Meyer K.E, Mikkelsen R.F. Diagnostic of flow behind the model of windmill turbine//Thermophysics and aeromechanics. - 2012. - Vol. 19. - N 3. - P. 267-278.

6. 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.
7. H. Glauert. Airplane propellers Aerodynamic Theory. Springer, 1935. pp. 169-360.
8. Кабардин И.К., Наумов И.В., Микельсен Р., Павлов В.А., Бакакин Г.В., Окулов В.Л. Экспериментальное исследование структуры трехмерного поля скорости за моделью ротора ветряной турбины и определение средних характеристик течения // Вестник НГУ: Серия Физика. – 2013 (принята в печать). Kabardin I.K.,Naumov I.V., R. Mikkelsen, Pavlov V.A., Bakakin G.V., Okulov V.L. Experimental investigation of 3D velocity field structure downstream the windmill rotor model and flow mean characteristic calculation // Vestnik of NSU: Physics. 2013. (Accepted for the publishment).
9. Sumer B. M. , Fredsøe J. Hydrodynamic s around cylindrical structures, Advanced Series on Ocean Engineering 26 (revised ed.), World Scientific, ISBN 981-270-039-0, 530 pages.
10. Achenbach E. Vortex shedding from spheres// J. Fluid Mech. - 1974. - Vol. 62. - N. 2. -P 209-221.
11. Medici D., Alfredsson P.H. Measurements behind model Wind Turbine // Wind Energy.-2008. - Vol. 11. - P 211-217.
12. Chamorro L.P., Hill C., Morton S., Ellis C., Arndt R., Sotiropoulos F. On the interaction between a turbulent open channel flow and an axial-flow turbine // J. Fluid Mech. - 2013. -Vol. 716. - P. 658 - 670.
13. K.E. Meyer, I. V. Naumov, I. Kabardin, R. Mikkelsen and J. N. Sorensen PIV in a model wind turbine rotor wake // Proc. The 10th International Symposium on PIV. -1 - 3 July 2013, Delft, Netherlands.
14. Наумов И.В. Формирование и оптико-лазерная диагностика винтовых вихревых структур в жидкости. // Автореф. диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. - ИТ СО РАН, 2012 г. 36 с. Naumov I.V. Forming and laser-optic diagnostic of vortex structures in liquid. (Ref. dissertation for the Doctor of Ingeneering). IT SB RAS. 2012. 36 pp.