

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТРЕХЛОПАСТНОГО РОТОРА ДАРЬЕ

Для численного моделирования обтекания трехлопастного ротора Дарье применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса. При моделировании турбулентности используются однопараметрические дифференциальные модели турбулентности. Представлены результаты расчета ротора Дарье. Выполнен анализ поля течения вокруг роторов.

Для численного моделирования обтекания трилопастного ротора Дарье используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса. При моделировании турбулентности используются однопараметрические дифференциальные модели турбулентности. Представлены результаты расчета трилопастного ротора Дарье. Выполнен анализ поля течения вокруг роторов.

The Reynolds averaged Navier-Stokes equations are used for a numerical simulation of the flow around the Darrieus three-bladed rotor. The one-parameter turbulence models are used for the turbulence simulation. The results of calculations of the Darrieus rotor are reported. The flow field near rotors is analyzed.

Введение. Эффективность работы любой ветроэнергетической установки (ВЭУ) определяется коэффициентом использования энергии ветра [1]. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что высокими значениями коэффициента мощности обладают быстроходные горизонтально-осевые (ГО) ВЭУ пропеллерного типа, а также роторы Дарье с фиксированным и изменяемым углом установки лопасти [8]. И при хорошем аэродинамическом проектировании вертикально-осевые ВЭУ фактически не уступают широко распространенным ГО ВЭУ пропеллерного типа.

Повышение мощности ВЭУ и увеличение коэффициента использования энергии ветра требуют учета взаимного влияния лопастей, поля скоростей вокруг самого ротора и в дальнем следе ВЭУ. Таким образом, возникла потребность в изучении процессов формирования и распада вихрей, а также их влияния на аэродинамические характеристики ВЭУ.

При проектировании ВЭУ следует проводить комплексное исследование аэродинамических характеристик лопастей, траверс и ротора в целом с учетом как нестационарных, так и пространственных эффектов. Экспериментальная аэродинамика зачастую оперирует ограниченными объемами данных. Кроме того, натурные эксперименты не всегда возможны как по техническим, так и экономическим соображениям.

Существующие методики проектирования роторов ВЭУ основаны на полуэмпирических соотношениях и на экспериментальных данных по авиационным профилям [7]. Такой подход не позволяет должным образом учесть все особенности обтекания роторов, кроме того требует промежуточных экспериментальных исследований с последующей корректировкой и уточнением расчетной методики. Это весьма дорогостоящий и длительный путь эволюции технических образцов. По этому пути шло развитие авиации, кораблестроения, турбиностроения.

Главными трудностями в расчете нестационарных процессов при обтекании роторов вертикально-осевой (ВО) ВЭУ являются эффекты динамического срыва потока. До настоящего времени ни одна из известных упрощенных методик не давала возможности адекватно рассчитать аэродинамические характеристики роторов в этом случае.

Современные тенденции в проектировании сложной техники связаны с применением полных математических моделей механики жидкости и газа,

основанных на самых общих физических законах (сохранение массы, импульса, энергии), реологических соотношениях, динамике турбулентных вихрей. Такие модели являются, с математической точки зрения, сложными системами нелинейных дифференциальных уравнений, для решения которых требуется использование мощных вычислительных комплексов. Решение таких систем создает качественно новый уровень проектирования – проведение численных экспериментов, полностью воспроизводящих условия натуральных экспериментов. Такой подход является основой вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD).

На сегодняшний день вычислительная гидродинамика является одной из составляющих процесса проектирования во многих отраслях промышленности, что обусловлено меньшей стоимостью численных экспериментов по сравнению с натурными. Основная задача CFD – воспроизведение реальных физических процессов с максимальной степенью достоверности. За счет этого удается глубже понять происходящие процессы, выработать рекомендации по аэродинамическим формам проектируемого устройства, близким к оптимальным. Подобные расчеты позволяют получить подробные характеристики устройства задолго до его изготовления и внедрения, существенно сокращая затраты на дорогостоящие продувки в аэродинамических трубах, которые присутствуют при стандартных методах проектирования.

В общем случае при моделировании обтекания роторов ВЭУ необходим учет трехмерных процессов, нестационарности поля течения, вязких эффектов, включая турбулентность и ее крупномасштабную часть. В настоящее время реализация такого полного подхода доступна лишь крупным исследовательским организациям, использующим суперкомпьютеры или кластеры персональных компьютеров и имеющим достаточный уровень финансирования.

В связи с созданием вертикально-осевых ветроэнергетических установок в последнее время начато комплексное исследование различных аэродинамических характеристик, связанных с работой таких установок. Среди них важное место занимает исследование физических процессов, происходящих при работе ротора ВЭУ. Несмотря на экспериментальные данные, полученные при вращении вертикально-осевых роторов [9, 9], их работа изучена недостаточно полно, что объясняется как сложностью физических процессов, происходящих при обтекании ротора ВЭУ, так и просто небольшим временем изучения таких установок. В ранее проведенной работе [9] были приведены гидродинамические спектры, полученные при значениях быстроходности $\lambda = 4 \div 12$. Однако, в некоторых проектах рабочий диапазон быстроходности лежит в окрестности значений $\lambda = 3$. Поэтому целью настоящей работы было изучение структуры потока, обтекающего модель ротора, при небольших значениях быстроходности и сравнение с экспериментальными данными [9].

1. Постановка задачи. Одним из наиболее эффективных путей моделирования обтекания ротора вертикально-осевых ветроэнергетических установок является применение численных методов решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса.

Исходные уравнения. Для исследования процессов аэродинамики ротора ВО ВЭУ применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (2)$$

где x_i , $i=1,2$ – декартовы координаты; t – время; u_i – декартовы составляющие вектора скорости; p – давление; ρ – плотность.

Моделирование турбулентности. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса используется дифференциальная однопараметрическая модель Spalart–Allmaras, адаптированная к тензору скоростей деформаций SALSA [3].

Начальные и граничные условия. В качестве начальных условий задавались параметры невозмущенного потока во всей расчетной области. На внешней границе применялись неотражающие граничные условия. На поверхности твердого тела ставилось условие прилипания.

2. Численный алгоритм. Система исходных уравнений записывалась относительно произвольной криволинейной системы координат. Согласование полей давления и скорости осуществлялось с помощью метода искусственной сжимаемости, модифицированного для расчета нестационарных задач. Для создания дискретного аналога исходных уравнений в качестве базовых использовались регулярные сетки. В неодносвязных областях применялись многоблочные вычислительные технологии, в которых размерность отдельных пересекающихся сеток (блоков) не связана между собой. Такой подход позволил выработать единую методологию расчета течений вязкой жидкости вокруг тел сложной геометрической формы.

Интегрирование системы исходных уравнений осуществлялось численно с использованием метода контрольного объема. Для конвективных потоков использовалась противопоточная аппроксимация Rogers–Kwak, основанная на схеме Roe третьего порядка точности [5]. В моделях турбулентности для аппроксимации конвективных слагаемых применялась схема TVD с ограничителем потоков ISNAS третьего порядка [6]. Производные в вязких членах аппроксимировались центрально-разностной схемой второго порядка.

Алгоритм решения уравнений базируется на трехслойной неявной схеме с подитерациями по псевдовремени второго порядка точности по физическому времени. Полученная блочно-матричная система линейных алгебраических уравнений решалась методом минимизации обобщенной невязки GMRES с ILU(0) предобуславливанием.

3. Результаты и обсуждение. Ниже представлены описание оборудования и аппаратуры в натурном эксперименте, результаты численного моделирования обтекания ветровым потоком трехлопастного ротора Дарье, а также сравнение полученных данных с натурным экспериментом.

Описание оборудования и аппаратуры в натурном эксперименте. Исследование структуры потока, обтекающего модель ротора ВЭУ, было проведено в гидродинамической трубе ГТ-400, описание которой приведено в работе [11].

Основные характеристики модели были следующими: диаметр $D = 0,195$ м, профиль сечения лопастей NACA 0018, количество лопастей $N = 3$, хорда лопастей $b = 0,026$ м, угол установки лопастей $\gamma = 0$.

С помощью электродвигателя и редуктора частота вращения модели могла варьироваться от 15 до 25 об/мин. Скорость водяного потока о помощью задвижки изменялась от 2 до 7,5 см/с.

Гидродинамические спектры были получены фотографированием, причем струйки подкрашенной жидкости выпускались из специальных гребенок, расположенных как параллельно, так и перпендикулярно оси вращения модели ротора ВЭУ. Подкрашенные струйки выпускались также из концевых частей лопастей модели ротора ВЭУ.

Описание вычислительного эксперимента. В настоящей работе выполнено численное моделирование обтекания трехлопастного ротора Дарье при следующих параметрах:

- угловая скорость вращения – $\omega = 2$ рад/с;
- скорость водяного потока – $U = 0,065$ м/с;
- кинематическая вязкость воды ($t=15$ °С) – $\nu = 1,15 \times 10^{-6}$ м²/с;
- коэффициент быстроходности – $\lambda = 3$;
- число Рейнольдса $Re = Ub/\nu = 1470$.

После выхода трехлопастного ротора Дарье на периодический режим обтекания (период составляет 120°) выделены этапы зарождения, развития, срыва и диссипации вихрей на различных участках траектории лопастей. Значение угла $\theta = 0^\circ$ соответствует положению ротора, когда первая лопасть расположена перпендикулярно набегающему потоку в наветренной части траектории.

Исходя из анализа контуров завихренности (рис. 1 а), при угле поворота первой лопасти $\theta = 0^\circ$ (местный угол атаки лопасти составляет $\alpha = -19^\circ$) на внутренней поверхности происходит динамический срыв потока. Пограничный слой отрывается вблизи задней кромки, и положение точки отрыва смещается в направлении передней кромки лопасти. Это приводит к срыву вихря с носовой части лопасти и последующим движением вдоль хорды по направлению к задней кромке. На носике лопасти 1 формируются вихри, которые затем смещаются вдоль поверхности (рис. 1 б – г).

При угле поворота ротора 80° происходит подавление динамического срыва вихрей и начинается присоединение потока (рис. 1 д). Процесс начинается вблизи передней кромки и смещается в направлении задней кромки. Срыв вихрей с внутренней поверхности первой лопасти наблюдается до тех пор, пока угловое положение ротора не приблизится к 90° .

В начале подветренного участка траектории $\theta = 90^\circ$ и до углового положения ротора $\theta = 120^\circ$ обтекание потоком лопасти 1 носит присоединенный характер (рис. 1 е). Отрыв потока начинается при угловом положении ротора $\theta = 120^\circ$, что соответствует местному углу атаки лопасти $\alpha = 17^\circ$ (рис. 1 ж). Как и в случае динамического срыва с внутренней поверхности, вихри срываются с передней кромки лопасти и начинают движение вдоль поверхности (рис. 1 ж – з). При угле поворота ротора $\theta = 120^\circ$ (рис. 1 з) положение первой лопасти соответствует положению лопасти 3 при $\theta = 0$. Поток повторно присоединяется к поверхности лопасти 2, когда угол поворота ротора составит $\theta = 310^\circ$ (рис. 1 ж). В следе начинает формироваться периодическое

течение, по структуре напоминающее вихревую дорожку Кармана за цилиндром.

При коэффициенте быстроходности $\lambda = 3$ динамический срыв потока с лопасти ротора Дарье наблюдается на большей части траектории. Он характеризуется отрывом потока с передней кромки лопасти и формированием больших вихревых структур, которые сносятся вдоль хорды лопасти.

Изменение абсолютной скорости по окружности вращения лопасти приводит к большей области динамического срыва в той части траектории, где скорости лопасти и потока имеют одно направление. В этой зоне набегающий поток сносит вихри в направлении движения лопасти. На второй половине траектории поток переносит вихри в сторону, противоположную движению лопасти. В этом случае продолжительность динамического срыва потока меньше, чем в предыдущем.

Основной причиной доминирования динамического срыва вихрей на большей части траектории лопасти является низкое число Рейнольдса $Re = 1470$, что соответствует начальному этапу перехода от ламинарного режима обтекания к турбулентному.

В результате проведенного в работе [9] физического эксперимента получены мгновенные картины обтекания трехлопастного ротора Дарье. Фотографии, полученные при съемке с торца работающей модели ротора ВЭУ, иллюстрирующие процессы формирования и диффузии вихрей, сошедших с концов лопастей, при различных угловых положениях лопасти и значении быстроходности $\lambda = 3$, приведены на рис. 2 – 5. Проанализируем картины визуализации течения при работе ротора Дарье в условиях динамического срыва потока на основе натурального (а) и вычислительного (б) экспериментов.

Мгновенная картина течения характеризуется наличием системы крупных вихрей, которые вращаются в противоположные стороны. При коэффициенте быстроходности $\lambda = 3$ наблюдается асимметрия между различными участками траектории лопасти.

Вихри, сошедшие с лопастей, движущиеся навстречу потоку, в большинстве обладают большей интенсивностью, чем вихри, сошедшие с лопастей, движущиеся по потоку. Это объясняется тем, что относительная скорость потока на этом участке траектории лопасти выше, чем на противоположном. Ниже по потоку видны следы сгущений вихрей с лопастей, движущихся по потоку, после некоторой их диффузии.

Визуализация структуры течения для различных азимутальных положений модели ротора приведена на рис. 2 – 5. Так, на рис. 2 в передней части модели ротора ВЭУ видны сгущения вихрей, сошедших с первой лопасти. Ниже по потоку видны сгущения вихрей, сошедших с предыдущих лопастей.

Положительный эффект был обнаружен при выпуске красящих веществ не из торцов, как это было при проведении предыдущей работы, а из отверстий, расположенных на расстоянии 0,02 полуразмаха лопастей ротора.

Наблюдается асимметрия в размерах и скоростях движения вихрей между верхней и нижней (относительно оси X) частями ротора. Нижняя область характеризуется наличием больших вихревых структур, которые являются следствием динамического срыва потока с внутренней поверхности лопасти. Верхняя область – вихрями средней интенсивности в следе за лопастью. Это объясняется тем, что в первом случае вихри подталкиваются движущимися по потоку лопастями, а во втором случае они, наоборот, подтормаживаются, за счет действия вязких эффектов.

Образующаяся система вихрей влияет на структуру течения вблизи лопастей ротора Дарье. Вихри, сорвавшиеся с лопасти идущей впереди, турбулизируют поток для лопасти, идущей за ней.

В течении одного оборота скорость потока относительно профиля лопасти изменяется циклически по величине и направлению. В инженерных методиках абсолютная скорость набегающего потока принимается равной векторной сумме скоростей лопасти и ветра. В действительности эта скорость зависит также от скорости вихрей, сошедших с лопастей и опорной башни ротора. Нестационарные эффекты, вызванные взаимодействием системы вихрей с лопастью, играют существенную роль при определении аэродинамических сил, действующих на ротор.

В целом картина течения вблизи ротора Дарье характеризуется существенными нестационарными явлениями. К ним относятся: динамический срыв потока, образование сложной системы вихрей, повышение уровня турбулентности в затененной области, взаимодействие вихрей различных размеров, скоростей движения и интенсивности с твердыми поверхностями роторов ВО ВЭУ. Полученная картина течения хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными.

При наличии сложных взаимосвязанных нестационарных эффектов для расчета аэродинамических сил, действующих на роторы, следует применять методики, способные адекватно передать реальную структуру течения.

Выводы.

1. Сформулирована постановка задачи численного моделирования аэродинамики роторов вертикально-осевых ветроэнергетических установок.

2. Разработано программно-методическое обеспечение для расчета аэродинамических и энергетических характеристик вертикально-осевых ВЭУ на базе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса несжимаемой жидкости.

3. В результате проведенных исследований выполнен анализ поля течения вокруг трехлопастного ротора Дарье ($\lambda = 3$) и проведено его сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

4. Получено удовлетворительное совпадение картины обтекания ротора Дарье с экспериментальными данными. Разработанный комплекс программ позволяет воспроизводить реальные аэродинамические процессы при вращении роторов вертикально-осевых ВЭУ.

5. Следует продолжить исследования физической картины обтекания вертикально-осевой ВЭУ при различных углах установки лопастей и режимах работы ротора с целью улучшения его аэродинамических и энергетических характеристик.

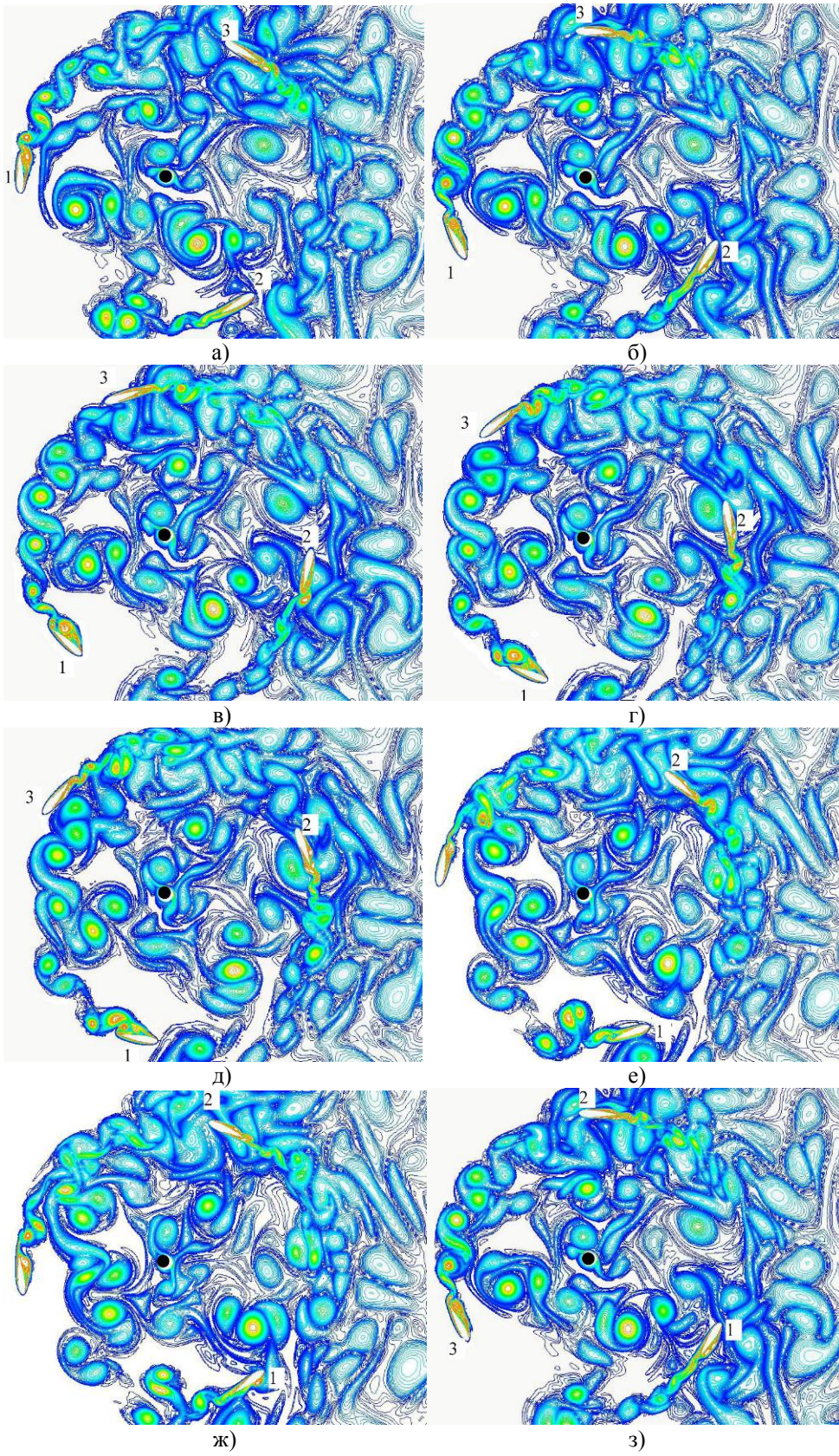
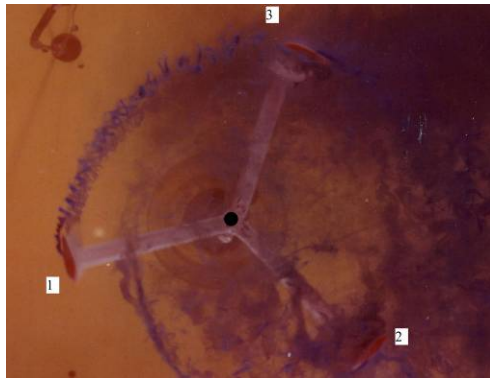
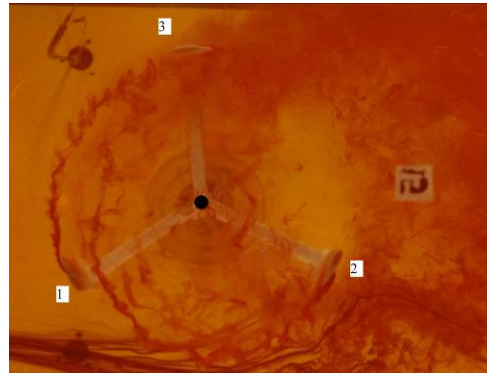


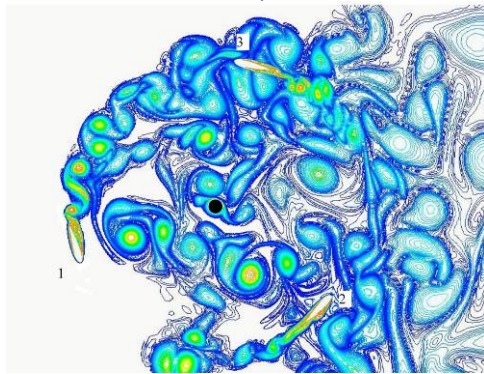
Рис. 1



a)

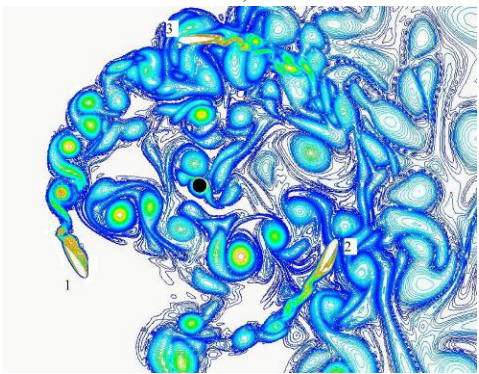


a)



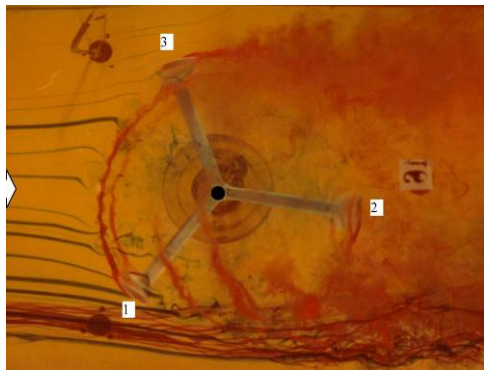
б)

Рис. 2

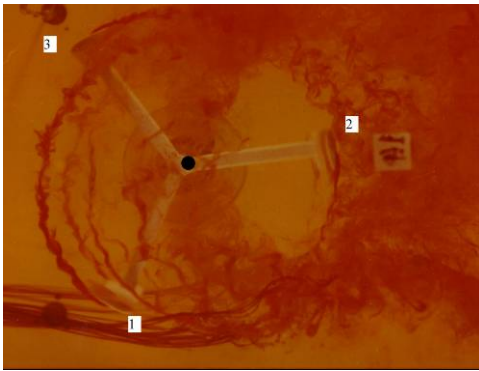


б)

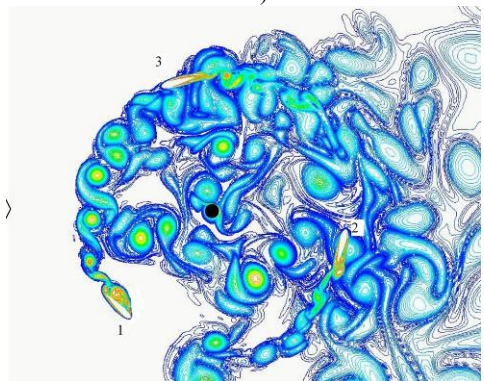
Рис. 3



a)

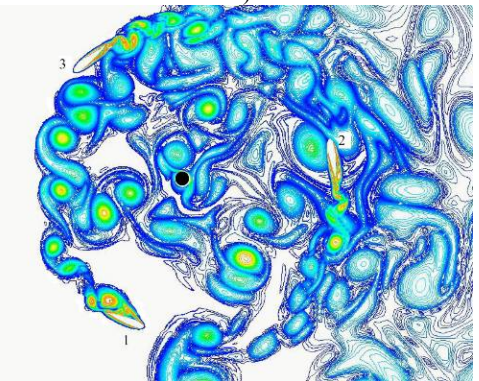


a)



б)

Рис. 4



б)

Рис. 5

1. *Кривцов В. С.* Неисчерпаемая энергия /В. С. Кривцов, А. М. Олейников, А. И. Яковлев. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2003. – 919 с.
2. *Rogers S. E* An upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations / *S. E. Rogers, D. Kwak* // AIAA Journal. –1990. –Vol.28, № 2. – P. 253 – 262.
3. *Rung T.* Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation / *T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele* // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 4, № 7. – P.1396 – 1399.
4. *Rogers S. E.* An upwind differencing scheme for the time-accurate incompressible Navier-Stokes equations / *S. E. Rogers, D. Kwak* // AIAA Journal. –1990. –Vol. 28, № 2. – P. 253 – 262.
5. *Roe P. L.* Approximate riemann schemes/ *P. L. Roe* // J.of Comp.Physics. –1981. –Vol.43. – P. 357 – 372.
6. *Zijlema M.* On the construction of third-order accurate TVD scheme using Leonards normalized variable diagram with application to turbulent flows in general domains / *M. Zijlema* // Delft University of Technology: Technical Report DUT-TWI-94-104. –1994. –25 p.
7. *Абрамовский Е. П.* Аэродинамика ветродвигателей: учеб. пособие / *Е. П. Абрамовский, С. В. Гордьюко, Н. В. Свиридов.* – Д. : ДГУ, 1987. – 220 с.
8. *Paraschivoiu I.* Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept / *I. Paraschivoiu.* – Canada : Polytechnic international press, 2002. – 438 p.
9. *Лятхер В. М.* Аэродинамические нагрузки на элементы ветроагрегатов с вертикальной осью вращения / *В. М. Лятхер, А. Н. Милутеев, Д. Н. Милутеев* // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1986. – № 4. – С. 65 – 73.
10. Разработка теории и систем левитирующего транспорта и автономных новейших интегрированных систем энергообеспечения с использованием солнечных систем и ветроэнергоустановок и энергонакопителей : Отчет о НИР (закл.) / ИТСТ НАН Украины «Трансмаг» ; рук. *Дзензерский В. А.*; исполн. *Тарасов С. В.* – Днепропетровск, 2010. – 681с. – № гос.рег. 0105U007964.
11. *Тетервжов Я. И.* Описание гидродинамической трубы ГТ-400, НИО-5. – 1976.

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины,
Днепропетровск

Получено 15.12.11,
в окончательном варианте 06.02.12