

Библиографические ссылки

1. Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнение воздуха / М.Е. Берлянд.–Л., 1985.–273с.
2. Абрамовский, Е.Р. Атмосфера больших городов / Е.Р. Абрамовский, Н.Н. Переметчик. – Д., 2007.–187с.
3. Аравин, В.И. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде / В.И. Аравин, С.Н. Нумеров. – М., 1953.–616с.
4. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский – М., 1970.–904с.
5. Обухов, А.М. Турбулентность и динамика атмосферы / А.М. Обухов – Л., 1988.–413с.
6. Бызова, Н.Л. Рассеивание примесей в пограничном слое атмосферы / Н.Л. Бызова – Л., 1977.–190с.

Надійшла до редколегії 05.12.09

УДК 532.516

С. В. Тарасов, Э. П. Яскевич, Д. А. Редчиц, И. Ю. Костюков
Институт транспортных систем и технологий НАН Украины «ТРАНСМАГ»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ТЕЧЕНИЯ ВОКРУГ ОДИНОЧНОЙ ЛОПАСТИ Н-РОТОРА ДАРЬЕ

Представлены результаты вычислительного эксперимента по изучению аэродинамики лопасти вращающегося ротора Дарье. Для численного моделирования аэродинамики лопасти применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навьета-Стокса несжимаемой жидкости. При моделировании турбулентности используется однопараметрическая дифференциальная модель турбулентности. Решение системы исходных уравнений получены с помощью неявного оконечного численного алгоритма, который базируется на методе искусственной сжимаемости. Выполнен анализ поля течения вокруг лопасти ротора Дарье. Выделены основные стадии формирования вихревой структуры. Установлено, что для большинства угловых положений одиночной лопасти ротора Дарье центр давления находится на расстоянии 0.17-0.42 длины хорды.

Ключевые слова: ротор Дарье, уравнения Навье-Стокса, модель турбулентности, численное моделирование.

Представлено результати обчислювального експерименту з вивчення аеродинаміки лопати ротора Дар'є, що обертається. Для чисельного моделювання аеродинаміки лопаті застосовуються осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса нестисливої рідини. При моделюванні турбулентності використовується однопараметрична диференціальна модель турбулентності. Розв'язок системи вихідних рівнянь отримано за допомогою неявного скінчено-об'ємного чисельного алгоритму, що базується на методі штучної стисливості. Виконано аналіз поля течії навколо лопаті ротора Дар'є. Виділено основні стадії формування вихревої структури. Установлено, що для більшості кутових положень одиночної лопаті ротора Дар'є центр тиску перебуває на відстані 0.17–0.42 довжини хорди.

Ключові слова: ротор Дар'є, рівняння Нав'є-Стокса, модель турбулентності, чисельне моделювання.

The results of computing experiment on studying of aerodynamics of the rotated blade of Darrieus rotor are presented. The incompressible Reynolds averaged Navier-Stokes equations are applied to numerical simulation of blade aerodynamics. One-equation differential turbulence model is used. Solution of system of the initial equations is based on the implicit finite-volume numerical algorithm and artificial compressibility method. The analysis of flow field around blade of Darrieus rotor is carried out. The basic stages of formation of vortex structure are allocated. The pressure centre is on distance of 0.17-0.42 chord lengths for the majority of angular positions of single blade of Darrieus rotor.

Keywords: Darrieus rotor, Navier-Stokes equations, turbulence model, numerical simulation.

© С. В. Тарасов, Э. П. Яскевич, Д. А. Редчиц, И. Ю. Костюков, 2010

Введение. В последнее время быстро развивается новое направление ветроэнергетики – вертикально-осевые ветроустановки с Н-ротором Дарье. Этот прогресс, в первую очередь, связан с такими особенностями вертикально-осевых ветроустановок с Н-ротором Дарье, как независимость работы от постоянно изменяющегося направления ветра, относительно низкие скорости вращения, пониженный уровень шумов и вибраций, которые позволяют им успешно конкурировать с традиционными горизонтально-осевыми ветроустановками. Аэродинамическая схема и динамика Н-ротора Дарье значительно сложнее горизонтально-осевых роторов. Лопастей горизонтально-осевых ветроустановок при постоянной скорости ветра на всей траектории вращаются с постоянным углом атаки, что обеспечивает постоянное распределение давления по поверхности профиля лопасти и, следовательно, постоянный вращающий момент. Угол атаки лопастей Н-ротора Дарье изменяется в зависимости от их азимутального положения и коэффициента быстроходности. При этом диапазон изменения угла атаки может быть значительным, что приводит к нестационарному обтеканию профиля лопасти, характеризующееся динамическим или полным срывом потока. Такое нестационарное обтекание вызывает пульсацию распределения давления по поверхности лопасти, и как следствие, циклические колебания аэродинамической силы и величины вращающего момента, что приводит к неравномерности движения лопастей по окружности вращения. На динамические процессы, происходящие в конструкции Н-роторов Дарье, также оказывают влияние аэроупругие явления, вызванные колебаниями лопастей и траверс в дозвуковом воздушном потоке. В настоящее время, во многих странах проводятся теоретические и экспериментальные исследования аэродинамики Н-роторов Дарье, которые позволят полной мерой реализовать преимущества этой схемы [1].

Решение задач динамики при проектировании Н-роторов Дарье требует в качестве исходных параметров, в первую очередь, знание реального характера изменения коэффициента давления, обуславливающего миграцию центра давления вдоль хорды лопасти, и коэффициента момента. Эти характеристики являются базовыми при определении напряженно-деформированного состояния лопастей ротора и оптимизации системы регулирования ветроустановки.

Исходные уравнения. Математическое моделирование аэродинамики одиночной лопасти ротора Дарье проводилось на основе нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса несжимаемой жидкости, записанных в обобщенных криволинейных координатах [1]. При моделировании турбулентности используется однопараметрическая дифференциальная модель турбулентности Spalart-Allmaras, адаптированная к тензору скоростей деформаций (SALSA) [3].

В качестве начальных условий задавались параметры невозмущенного потока во всей расчетной области. На внешней границе применялись неотражающие граничные условия, для расчета которых использовался метод характеристик. На поверхности твердого тела ставилось условие прилипания. В модели турбулентности SALSA значение рабочей переменной на теле задавалось равным нулю, на входной границе 0.1, на выходной – ставилось условие Неймана. Начальная угловая скорость ротора полагалась равной нулю.

Численный алгоритм. Исходные уравнения, замкнутые дифференциальной моделью турбулентности, интегрировались численно с использованием метода контрольного объема. Разработанный численный алгоритм базируется на трехслойной неявной схеме Rogers-Kwak [4], имеющей второй порядок точности интегрирования по времени, третий порядок противоточной аппроксимации конвективных слагаемых, и второй порядок центрально-разностной аппроксимации диффузион-

ных членов. Полученная блочно-матричная система алгебраических уравнений решалась методом итераций Гаусса-Зейделя.

В модели турбулентности для аппроксимации конвективных слагаемых применялась схема TVD с ограничителем потоков ISNAS третьего порядка [5].

Обсуждения результатов. В настоящей работе выполнено численное моделирование обтекания вращающейся лопасти ротора Дарье.

Основные параметры вычислительного эксперимента:

- профиль лопасти: NASA 0020;
- хорда лопасти: $c = 0.708$ м;
- угловая скорость вращения: $\omega = 6.94$ рад/с;
- диаметр ротора: $D = 7.2$ м;
- скорость ветра: $U = 10$ м/с;
- кинематическая вязкость воздуха ($t = 15$ °C): $\nu = 1.47 \cdot 10^{-5}$ м²/с;
- коэффициент быстроходности: $\lambda = 2.5$;
- число Рейнольдса по хорде лопасти: $Re_c = Uc / \nu = 5 \cdot 10^5$;
- коэффициент заполнения: $\sigma = 0.2$.

При вращении по окружности лопасти ротора Дарье местный угол атаки α и абсолютная скорость U_a являются функциями двух переменных: текущего углового положения θ и угловой скорости вращения ω (рис. 1).

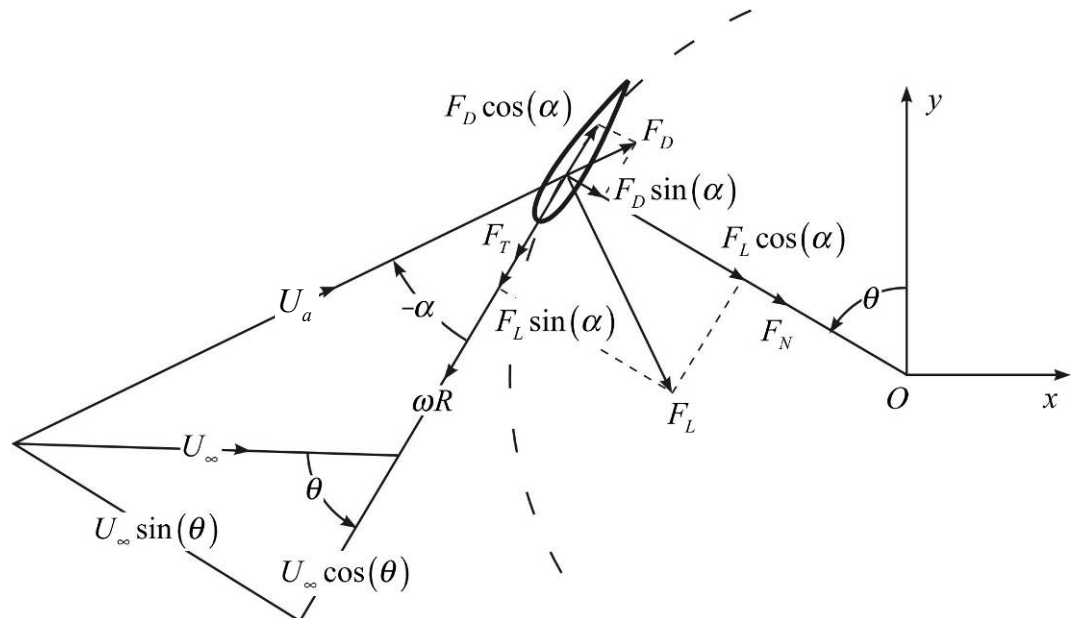


Рис. 1. Векторная диаграмма для определения местного угла атаки α и абсолютной скорости U_a через скорость ветра U_∞ , линейную скорость вращения ωR и текущее угловое положение лопасти θ

Следовательно, местный угол атаки и абсолютная скорость лопасти могут быть определены по формулам (1) и (2), соответственно:

$$\alpha = -\arctan\left(\frac{U_\infty \sin \theta}{\omega R + U_\infty \cos \theta}\right) = -\arctan\left(\frac{\sin \theta}{\lambda + \cos \theta}\right), \quad (1)$$

$$U_a = \sqrt{(U_\infty \sin \theta)^2 + (\omega R + U_\infty \cos \theta)^2} = U_\infty \sqrt{\sin^2 \theta + (\lambda + \cos \theta)^2}. \quad (2)$$

Циклическое изменение местного угла атаки α и абсолютной скорости U_a от углового положения θ для различных коэффициентов быстроходности λ приведены на рис. 2 и рис. 3. Амплитуда изменения угла атаки α при увеличении коэффициента быстроходности λ стремится к нулю.

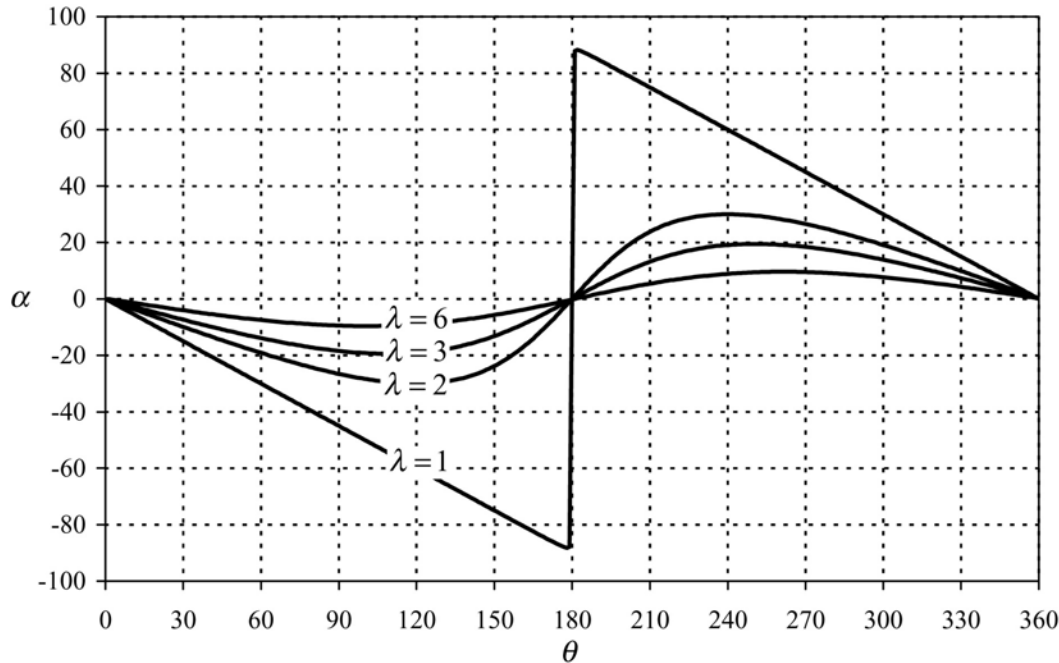


Рис. 2. Циклическое изменение местного угла атаки α от углового положения лопасти θ и коэффициента быстроходности λ

Определение аэродинамических характеристик роторов Дарье на основе аналитических методов усложняется тем фактом, что лопасть, описывающая криволинейную траекторию, ведет себя не так как лопасть, осуществляющая движение по прямой, так что статические эксперименты в аэродинамической трубе не всегда дают точное отражение работы лопасти ротора Дарье. Проанализируем поля течения при вращении лопасти ротора Дарье для коэффициента быстроходности $\lambda = 2.5$.

Контуры завихренности (рис. 4–7), изменение коэффициентов крутящего момента лопасти ротора Дарье относительно передней кромки лопасти (рис. 8, а), центра оси вращения (рис. 8, б), действующего на лопасть, и положения центра давления (рис. 8, в) от углового положения ротора θ получены на пятом обороте лопасти. Значение угла $\theta = 0^\circ$ соответствует положению ротора, когда передняя кромка лопасти направлена навстречу потоку.

Движение лопасти ротора Дарье навстречу потоку в наветренной части траектории сопровождается отрывом потока вблизи задней кромки (рис. 4, а–е). Однако на самой лопасти течение носит присоединенный характер. На данном участке траектории с увеличением угла поворота ротора и местного угла атаки, наблюдается падение коэффициента давления на внутренней поверхности лопасти. Это приводит

к росту подъемной силы, которая вносит основной вклад в тангенциальную силу, а, следовательно, и в крутящий момент (рис. 4, б).

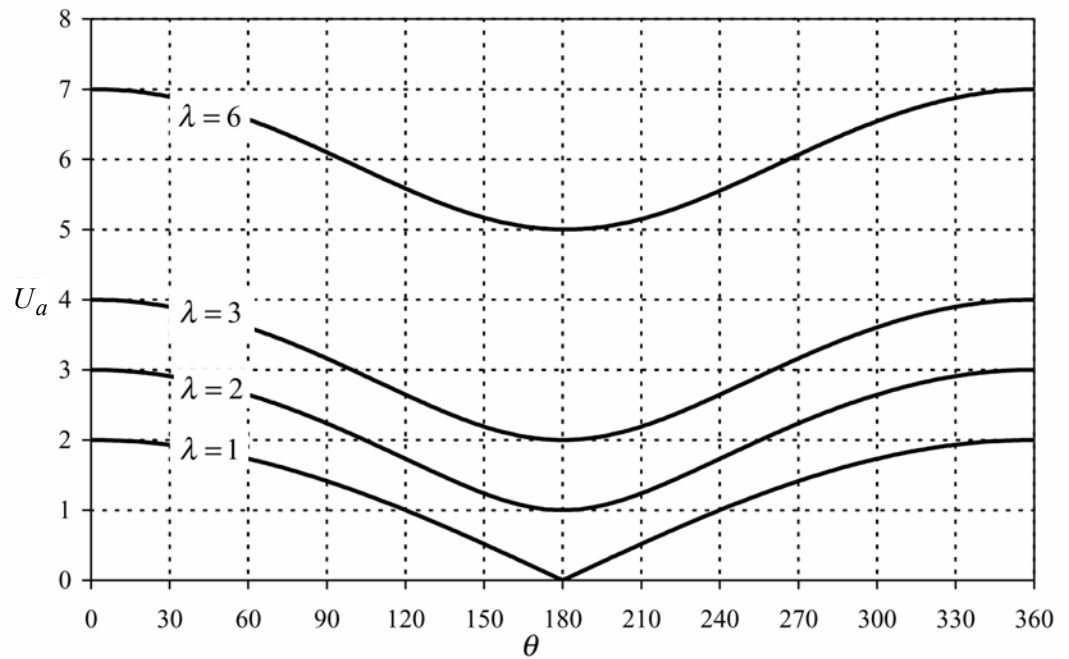


Рис. 3. Циклическое изменение относительной скорости U_a от углового положения лопасти θ и коэффициента быстроходности λ

Исходя из анализа контуров завихренности (рис. 5, а) при угле поворота лопасти $\theta = 90^\circ$ (местный угол атаки лопасти составляет $\alpha = -22^\circ$) на внутренней поверхности происходит динамический срыв потока.

Пограничный слой отрывается вблизи задней кромки лопасти, 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 кромки лопасти. Происходит падение коэффициента давления, что приводит к колебаниям коэффициентов подъемной силы и лобового сопротивления. На передней кромке лопасти формируются вихри, которые затем смещаются вдоль поверхности (рис. 5, б–г). Движение каскада вихрей оказывает значительное влияние на распределение коэффициента давления по внутренней поверхности лопасти. В результате происходит падение значений коэффициентов подъемной и тангенциальной сил. Наблюдается срыв вихрей с внутренней поверхности до тех пор, пока угловое положение ротора не приблизится к 180° .

При угле поворота ротора 180° происходит присоединение потока (рис. 6, а) (начинается вблизи передней кромки и смещается в направлении задней кромки).

В начале подветренного участка траектории $\theta = 180^\circ$ и до углового положения ротора $\theta = 270^\circ$ обтекание лопасти потоком носит присоединенный характер (рис. 6, рис. 7 а). Увеличение угла поворота ротора Дарье приводит к понижению минимума коэффициента давления на внешней поверхности лопасти. Отрыв потока начинается при угловом положении ротора $\theta = 270^\circ$, что соответствует местному углу атаки лопасти $\alpha = 18^\circ$. Увеличение местного угла атаки, при котором

происходит динамический срыв потока на подветренном участке траектории связано с уменьшением местной скорости потока из-за извлечения части его кинетической энергии на наветренном участке. В результате наблюдается локальный рост коэффициента быстроходности. Как и в случае динамического срыва с внутренней поверхности, вихри срываются с передней кромки лопасти и начинают движение вдоль поверхности (рис. 7, б-д). Как следствие, происходит резкий рост лобового сопротивления, уменьшение значений коэффициентов тангенциальной силы и крутящего момента (рис. 8, б). Поток повторно присоединяется к поверхности лопасти, когда угол поворота ротора составит $\theta = 345^\circ$ (рис. 7, е). В следе начинает формироваться периодическое течение по структуре напоминающее вихревую дорожку Кармана за цилиндром.

При коэффициенте быстроходности $\lambda = 2.5$ обтекание воздухом лопасти ротора Дарье 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 сравнительно большой области динамического срыва в наветренной части траектории. В этой зоне набегающий поток сносит вихри в направлении движения лопасти. На второй половине траектории (подветренный участок), поток переносит вихри в сторону, противоположную движению лопасти. В этом случае продолжительность динамического срыва потока меньше, чем в предыдущем.

Зависимость неосредненных значений крутящего момента от углового положения ротора для коэффициента быстроходности $\lambda = 2.5$ за один (данные получены на пятом обороте ротора) и восемь оборотов ротора приведены на рис. 8, 9. После достижения максимума $C_Q = 0.35$ ($\theta = 80^\circ$) происходит его падение до значений $C_Q = -0.18$, соответствующее углу поворота ротора $\theta = 140^\circ$. В этом диапазоне угловых положений ротор Дарье подвержен динамическому срыву потока. В последствии, когда происходит присоединение потока $\theta = 180^\circ$, значение момента вращения имеет положительное значение до угла $\theta = 290^\circ$. Дальнейшее увеличение угла поворота ротора приводит к динамическому срыву потока с внешней поверхности лопасти и коэффициент крутящего момента становится отрицательным.

Анализируя зависимость коэффициента крутящего момента от углового положения ротора (рис. 8, б, рис. 9, б) можно сделать вывод, что основной момент вращения создается на наветренном участке траектории лопасти. Это объясняется тем, что поток, проходя через наветренный участок траектории лопасти, теряет часть своей кинетической энергии. Поэтому, крутящий момент лопасти больше на этом участке, чем на подветренном.

Положение центра давления вращающейся лопасти носит динамический характер (рис. 8, в). При принятых параметрах вычислительного эксперимента для большинства угловых положений одиночной лопасти ротора Дарье центр давления находится на расстоянии 0.17 – 0.42 длины хорды. При угловых положениях лопасти, где доминирует динамический срыв вихрей ($\theta = 90^\circ - 180^\circ$), происходит резкое изменение положение центра давления.

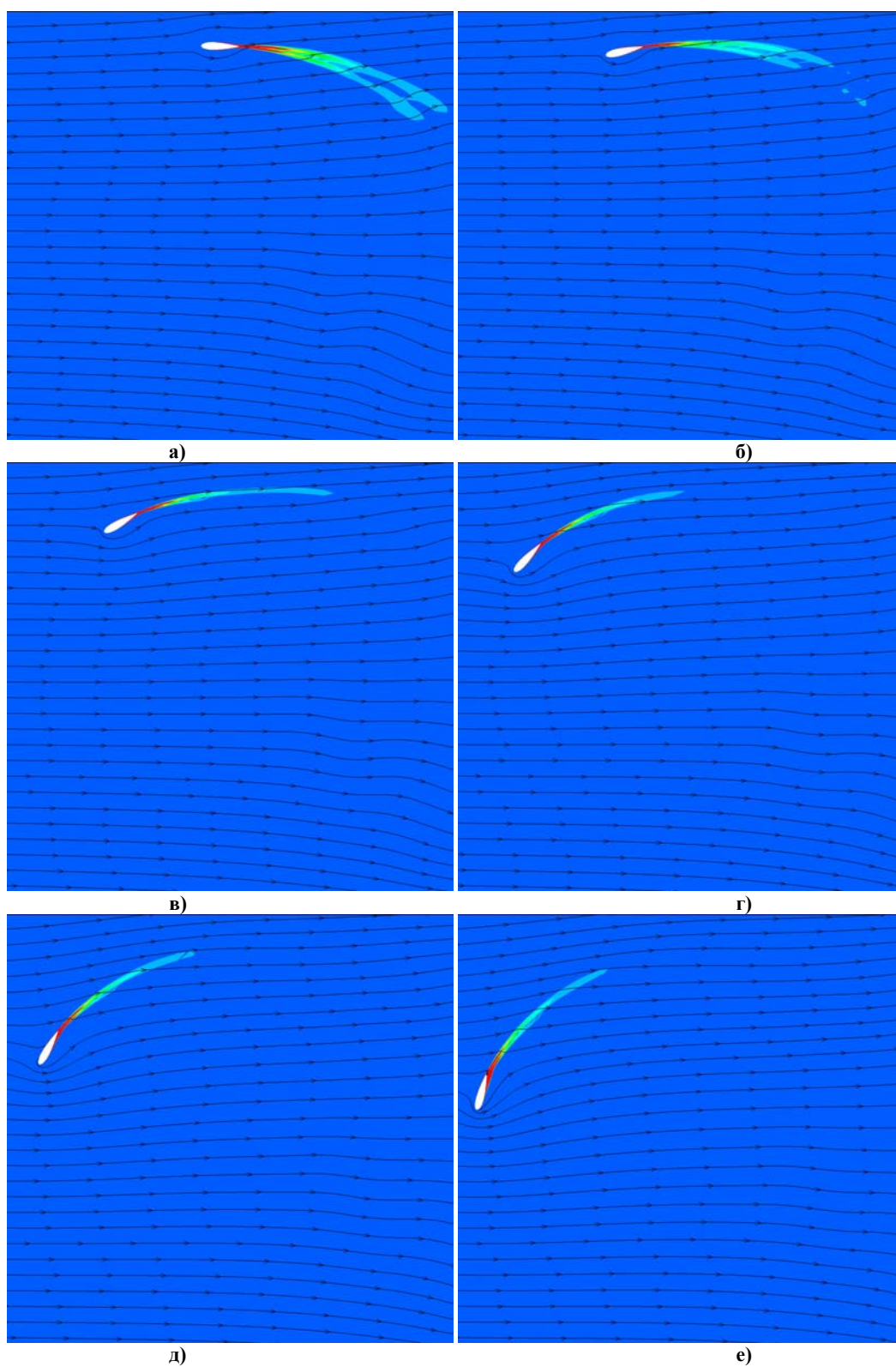


Рис. 4. Контуры завихренности при вращении однолопастного ротора Дарье ($\lambda = 2.5$) для углового положения а) $\theta = 0^\circ$; б) $\theta = 15^\circ$; в) $\theta = 30^\circ$; г) $\theta = 45^\circ$; д) $\theta = 60^\circ$; е) $\theta = 75^\circ$

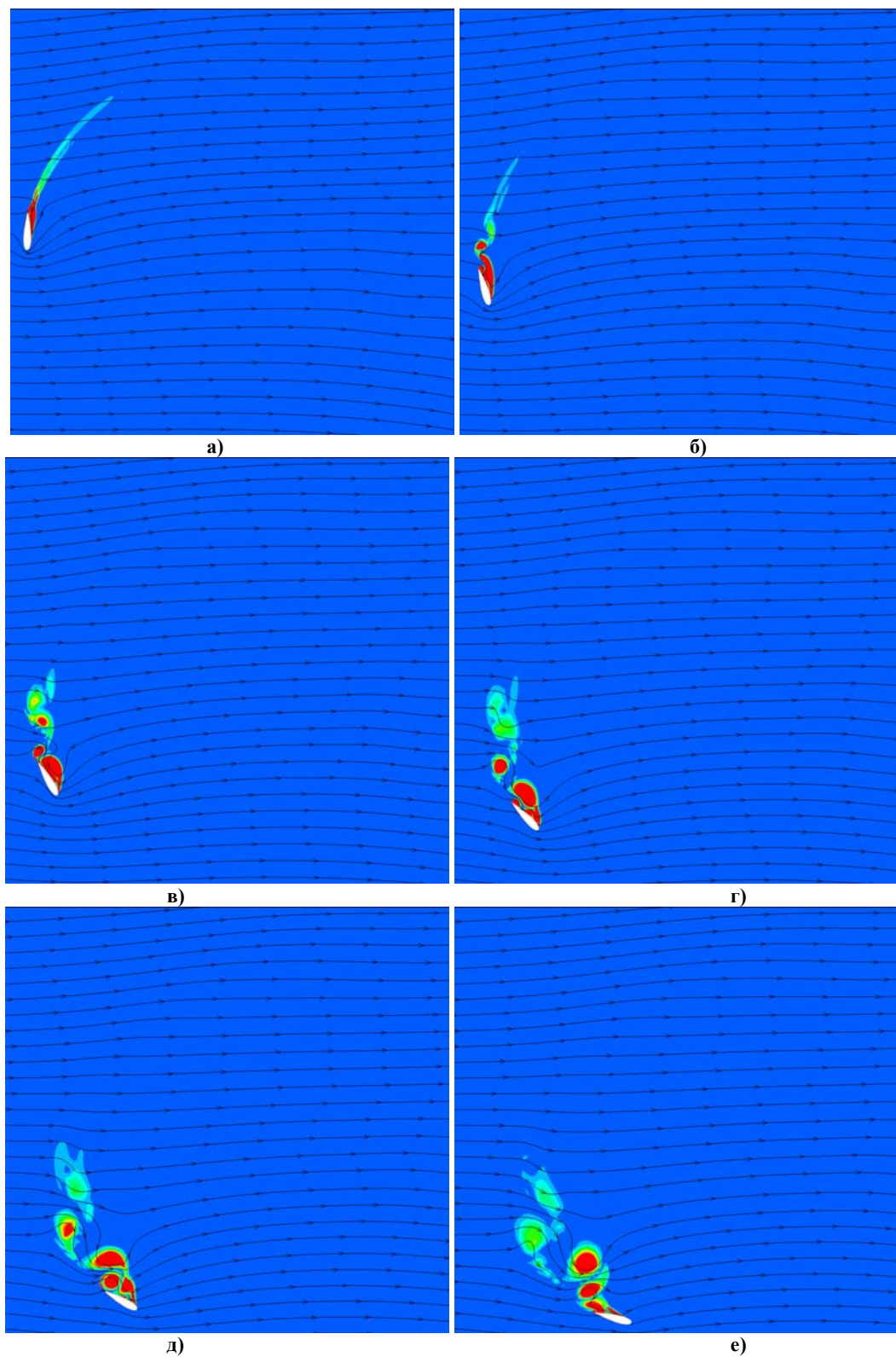


Рис. 5. Контуры завихренности при вращении однолопастного ротора Дарье ($\lambda = 2.5$) для углового положения а) $\theta = 90^\circ$; б) $\theta = 105^\circ$; в) $\theta = 120^\circ$; г) $\theta = 135^\circ$; д) $\theta = 150^\circ$; е) $\theta = 165^\circ$

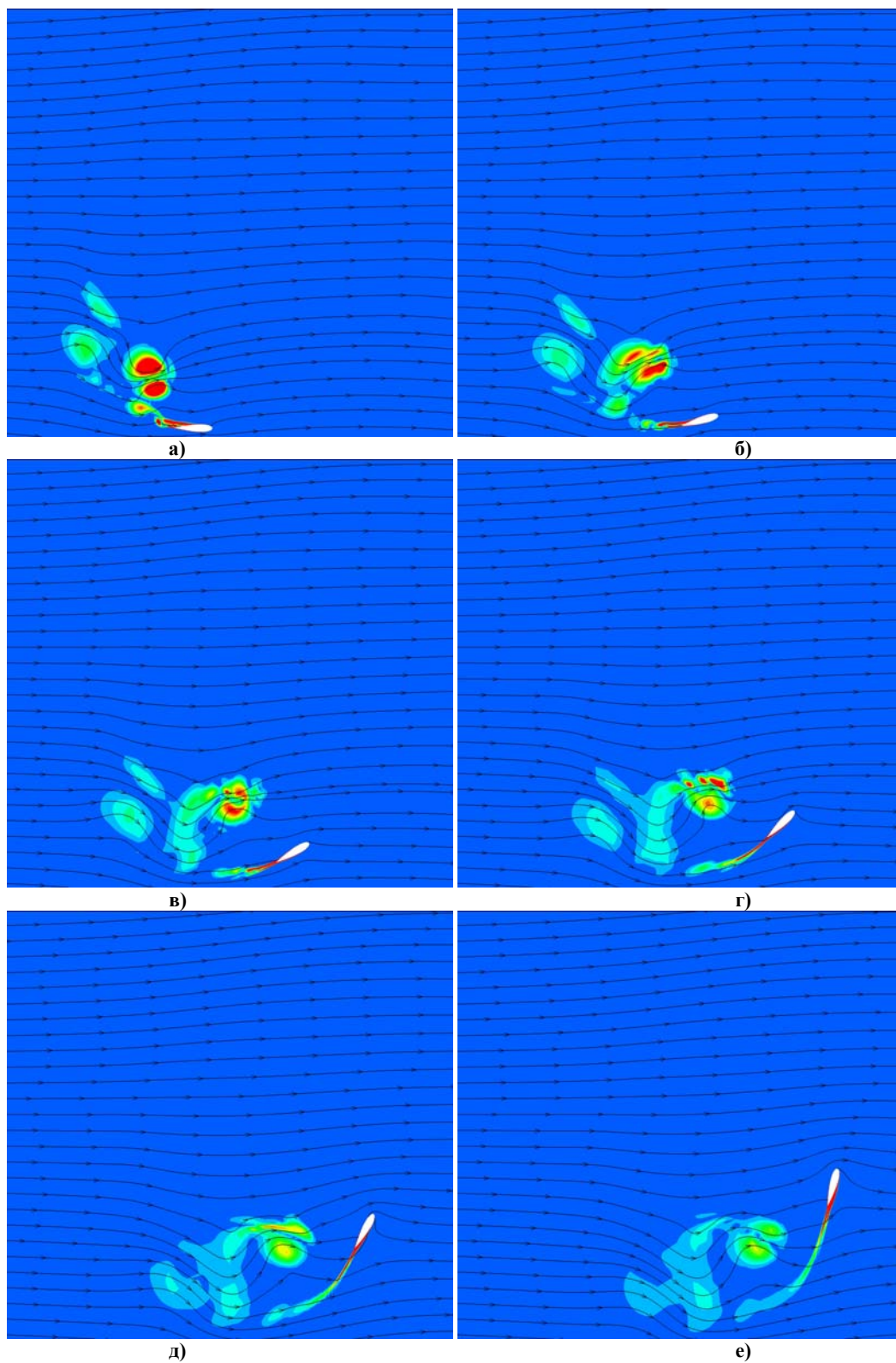


Рис. 6. Контуры завихренности при вращении однолопастного ротора Дарье ($\lambda = 2.5$) для углового положения а) $\theta = 180^\circ$; б) $\theta = 195^\circ$; в) $\theta = 210^\circ$; г) $\theta = 225^\circ$; д) $\theta = 240^\circ$; е) $\theta = 255^\circ$

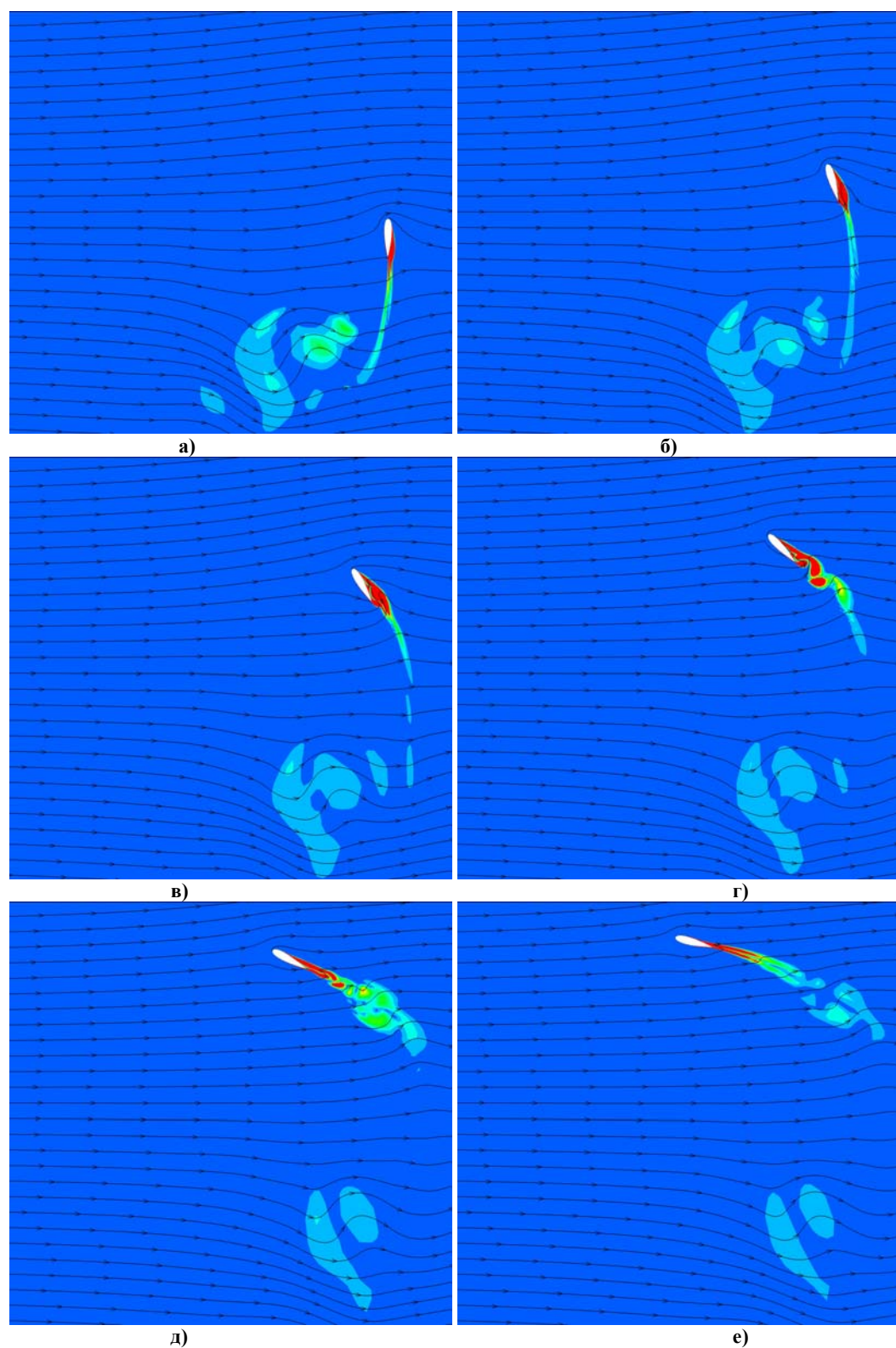
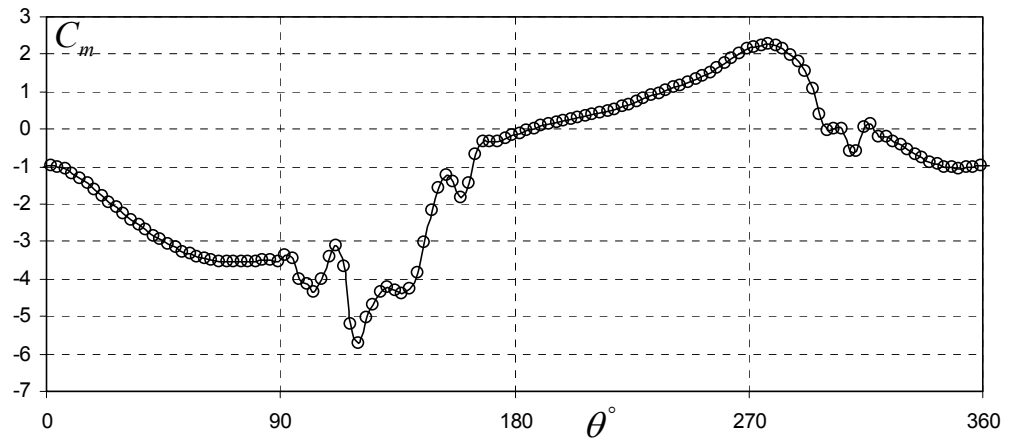
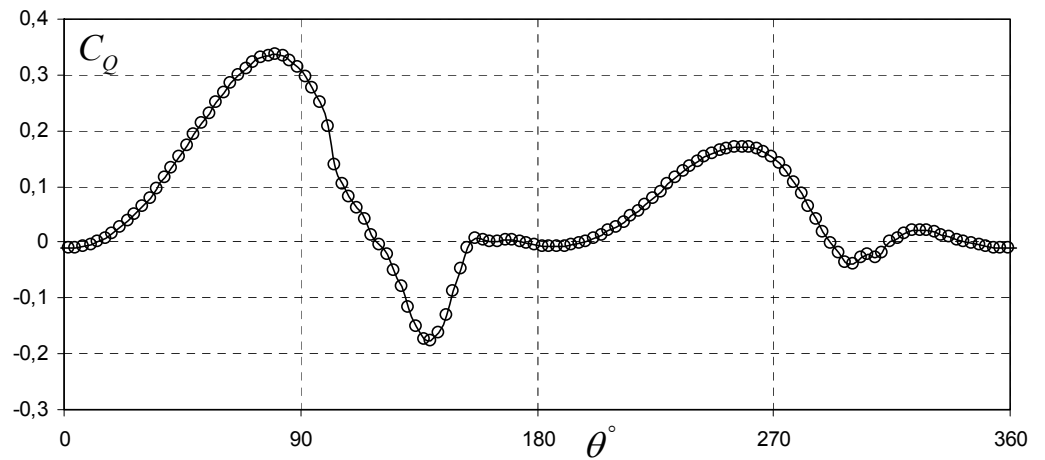


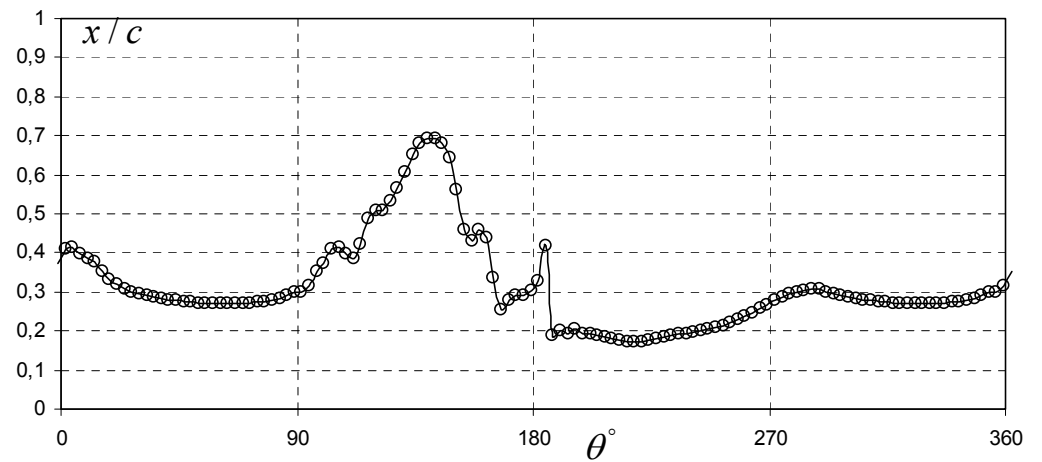
Рис. 7. Контуры завихренности при вращении однолопастного ротора Дарье ($\lambda = 2.5$) для углового положения а) $\theta = 270^\circ$; б) $\theta = 285^\circ$; в) $\theta = 300^\circ$; г) $\theta = 315^\circ$; д) $\theta = 330^\circ$; е) $\theta = 345^\circ$



а)

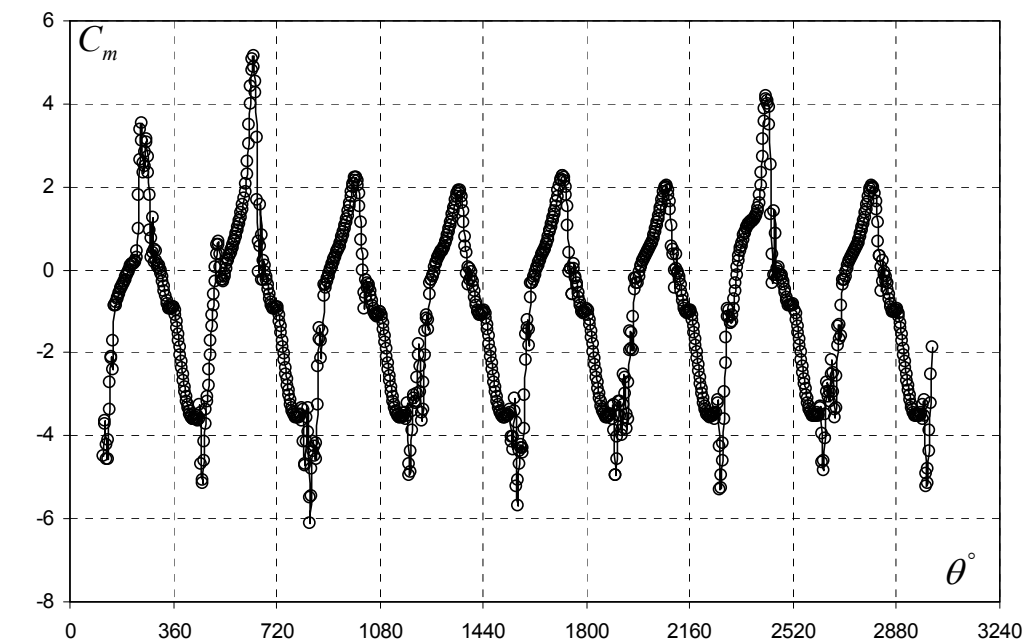


б)

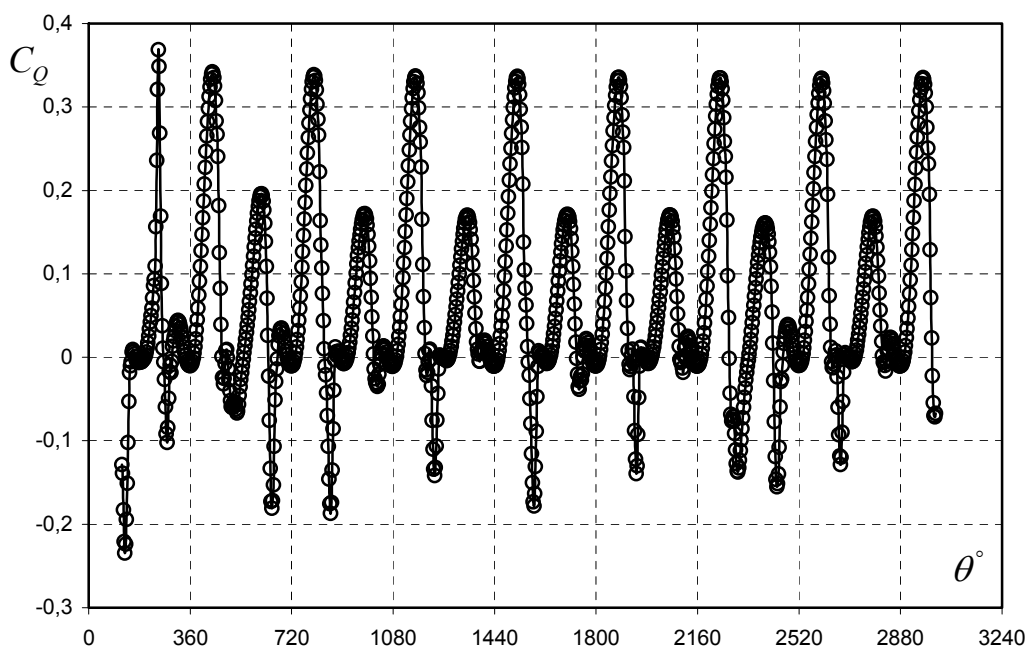


в)

Рис. 8. Изменение коэффициентов крутящего момента лопасти ротора Дарье относительно передней кромки (а), центра вращения (б), действующего на лопасть, и положения центра давления (в) от углового положения ротора θ на пятом обороте лопасти



а)



б)

Рис. 9. Изменение коэффициентов крутящего момента лопасти ротора Дарье относительно передней кромки (а) и центра вращения (б), действующего на лопасть от углового положения ротора θ

В начале этапа, на котором начинают зарождаться крупные вихревые структуры на внутренней поверхности лопасти $\theta = 90^\circ$ (рис. 5, а), происходит смещение положения центра давления в сторону задней кромки лопасти. Это объясняется формированием и прохождением крупных вихрей над обтекаемой поверхностью лопасти, а, следовательно, резким изменением распределения давления по поверхности лопасти, подверженной динамическому срыву потока. Максимальное отклонение наблюдается при угловом положении $\theta = 135^\circ$ (рис. 5, г) и равно 0.7 (рис. 8, в).

После схода крупных вихрей положение центра давления начинает смещаться в сторону передней кромки лопасти.

На остальном участке траектории, где обтекание лопасти носит безотрывный характер или влияние вихрей не столь существенно, положение центра давления находится в указанном выше диапазоне (0.17–0.42 длины хорды).

Выводы.

1. В результате проведенных исследований на основе уравнений Навье-Стокса выполнен анализ структуры и закономерностей развития нестационарных турбулентных несжимаемых течений при обтекании одиночной лопасти ротора Дарье ($\lambda = 2.5$). Рассчитаны коэффициенты крутящего момента лопасти относительно носика, центра вращения, а также положение центра давления от углового положения ротора.
2. Выделены основные стадии формирования вихревой структуры. Показано, что вязкие и динамические эффекты играют существенную роль в работе ротора Дарье. Основной крутящий момент при принятых параметрах создается на наветренном участке траектории лопасти.
3. Установлено, что для большинства угловых положений одиночной лопасти ротора Дарье центр давления находится на расстоянии 0.17 – 0.42 длины хорды.

Библиографические ссылки

1. **Howell R.** Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine / R. Howell. – University of Sheffield, 2009. – P.10.
2. **Флетчер К.** Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер – М., 1991. – Т. 1. – 501 с. – Т. 2. – 552 с.
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. **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.

Надійшла до редколегії 12.01.10

УДК 532.516

А.А. Пилипенко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ НА ПРОФИЛЕ НАСА 0012

© А.О. Пилипенко, 2010