

УДК 532.516

С.В. ТАРАСОВ, Д.А. РЕДЧИЦ, А.С. ТАРАСОВ

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины

С.В. МОЙСЕЕНКО

Херсонский национальный технический университет

**АЭРОДИНАМИКА J-ПРОФИЛЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА  
ПРИ КРУГОВОЙ ПРОДУВКЕ**

*В работе проведено численное изучение физических особенностей турбулентного обтекания J-лопасти ротора Дарье вертикально-осевой ветроэнергетической установки для произвольного угла атаки. Численное моделирование выполнено на базе разработанного специализированного CFD пакета. Для моделирования турбулентности использовались два подхода. Первый, основанный на моделировании на базе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS), с использованием дифференциальной однопараметрической модели Spalart-Allmaras, адаптированной к тензору скоростей деформаций (SALSA), а второй – гибридный подход, основанный на моделировании отсоединенных вихрей с задержкой (DDES). Выделены этапы зарождения, развития и срыва вихрей при обтекании J-профиля лопасти ротора Дарье. Рассчитаны значения основных аэродинамических характеристик для произвольных углов атаки. Результаты вычислительных экспериментов показали, что подход, основанный на моделировании крупных вихрей с задержкой (DDES), лучше воспроизводит нестационарные физические особенности, возникающие при обтекании J-профиля.*

*Ключевые слова:* J-профиль, ротор Дарье, уравнения Навье-Стокса, модель турбулентности

С.В. ТАРАСОВ, Д.О. РЕДЧИЦЬ, А.С. ТАРАСОВ

Институт транспортних систем і технологій НАН України

С.В. МОЙСЕЄНКО

Херсонський національний технічний університет

**АЭРОДИНАМИКА J-ПРОФИЛЮ В ТУРБУЛЕНТНОМУ ПОТОЦІ ПОВІТРЯ  
ПРИ КРУГОВІЙ ПРОДУВЦІ**

*В роботі проведено чисельне вивчення фізичних особливостей турбулентного обтікання J-лопати ротора Дар'є вертикально-осьової вітроенергетичної установки для довільного кута атаки. Чисельне моделювання виконано на базі розробленого спеціалізованого CFD пакету. Для моделювання турбулентності використовувалося два підходи. Перший, заснований на моделюванні на базі усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (URANS), з використанням диференціальної однопараметричної моделі Spalart-Allmaras, адаптованої до тензора швидкостей деформацій (SALSA), а другий - гібридний підхід, заснований на моделюванні відокремлених вихорів з затримкою (DDES). Виділено етапи зародження, розвитку і зриву вихорів при обтіканні J-профілю лопати ротора Дар'є. Розраховані значення основних аеродинамічних характеристик для довільних кутів атаки. Результати обчислювальних експериментів показали, що підхід, заснований на моделюванні великих вихорів з затримкою (DDES), краще відтворює нестационарні фізичні особливості, що виникають при обтіканні J-профілю.*

*Ключові слова:* J-профіль, ротор Дар'є, рівняння Нав'є-Стокса, модель турбулентності

S.V. TARASOV, D.O. REDCHYTS, A.S. TARASOV

Institute of Transport Systems and Technologies of Ukrainian National Academy of Science

S.V. MOISEENKO

Kherson National Technical University

**AERODYNAMICS OF J-AIRFOIL IN TURBULENT FLOW OF AIR  
AT ARBITRARY ANGLE OF ATTACK**

*The numerical study of the physical features of the turbulent flow past the J-blade of the Darrieus rotor of a vertical-axis wind turbine for an arbitrary angle of attack is carried out. The results of the experiments are presented in the form of graphs reflecting the dependence of the aerodynamic characteristics of the J-airfoil on the angle of attack. Numerical simulation was performed on the basis of the developed specialized CFD code. Two approaches were used to simulate of turbulence. The first, based on simulation based on the Reynolds averaged Navier-Stokes equations (URANS), using the differential one-equation strain-adaptive linear Spalart-Allmaras model (SALSA), and the second – a hybrid approach based on the detached eddy simulation with a delay (DDES). The stages of generation, development and stalling of vortices are described in the flow around the J-airfoil of the Darrieus rotor blade. The results of computational experiments showed that the approach based on the detached eddy simulation with a delay (DDES) better reproduces the nonstationary physical phenomena around J-airfoil.*

*Keywords:* J-airfoil, Darrieus rotor, Navier-Stokes equations, turbulence model

### Введение

За последнее десятилетие большое распространение получили вертикально-осевые (ВО) ветроэнергетические установки (ВЭУ). В их конструкциях используются хорошо известные роторы Савониуса, Дарье и их комбинации. Ротор Савониуса работает за счет силы лобового сопротивления в отличие от ротора Дарье, использующего действие подъемной силы.

Дальнейший прогресс в совершенствовании ВО ВЭУ может быть связан с внедрением аэродинамических профилей нового типа. Новая форма профиля, так называемый J-профиль, получается, если у стандартного профиля вырезать часть несущей поверхности [2]. Предполагается, что данная форма профиля позволяет работать лопасти ротора Дарье, как за счет подъемной силы, так и за счет силы лобового сопротивления. Применение J-профиля лопасти может повысить эффективность работы ВЭУ в целом, избежать возникновения «мертвых зон» и снизить минимальную скорость ветра необходимую ротору Дарье для самозапуска и работы. В сравнении с классическими, сверхкритическими и многоэлементными профилями J-профиль представляет собой новое семейство профилей, аэродинамические свойства которого фактически не изучены.

В настоящее время отсутствуют результаты численного моделирования этого класса течений на основе уравнений Навье-Стокса. Имеются отдельные разрозненные данные по применению J-профиля в качестве лопасти в экспериментальных ВО ВЭУ [10]. Однако это скорее эвристический подход, чем продуманная техническая конструкция.

### Цель работы

Целью настоящей работы является систематическое численное исследование аэродинамики J-профиля ротора Дарье на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса несжимаемой жидкости. Рассматривается турбулентное обтекание данного профиля для произвольного угла атаки. Кроме того необходимо выбрать адекватный подход к моделированию турбулентности, который позволит качественно и количественно передать нестационарную структуру обтекания J-профиля в широком диапазоне углов атаки при наличии массивного отрыва потока.

**1. Краткое описание натурального эксперимента.** Экспериментальные исследования модели лопасти вертикально-осевой ВЭУ, имеющей профиль с разомкнутым контуром (J-профиль) проводились в аэродинамической трубе Т-5, которая находится в лаборатории кафедры аэрогидромеханики и энергопереноса Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара. Данная аэродинамическая труба представляет собой установку замкнутого типа с открытой рабочей частью.

В натурном эксперименте длина хорды J-профиля составляет 0.185 м, толщина 0.001 м. Передняя часть профиля представляет собой часть окружности радиусом 0.03 м. В нижней части окружность сопрягалась с кривой, которая формирует закрытую часть профиля. Скорость набегающего потока составляла 30 м/с. Число Рейнольдса, рассчитанное по хорде и скорости набегающего потока, составляет  $3.7 \cdot 10^5$ . Геометрия J-профиля в безразмерных величинах приведена на рис. 1.

**2. Постановка задачи математического моделирования.** Проведено численное моделирование обтекания J-профиля с целью выявления физических особенностей процесса, изучения аэродинамических свойств в широком диапазоне углов атаки и выбора адекватной модели турбулентности при наличии массивного отрыва. Процессы аэродинамики J-профиля лопасти ротора Дарье описываются осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса несжимаемой жидкости. Для моделирования турбулентности используется два подхода. Первый, основанный на моделировании на базе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, а второй – гибридный подход, основанный на моделировании отсоединенных вихрей с задержкой (DDES). В качестве базовых использовались многоблочные пересекающиеся структурированные сетки (типа Chimera). Такой вид сеток позволяет адекватно разрешать пограничные слои вблизи поверхности и строить сетки вокруг тел сложной геометрии. Результат генерации, согласования и оптимизации расчетных сеток приведен на рис. 2. Расчетная сетка содержала  $1.2 \cdot 10^5$  узлов. Нулевой угол атаки соответствует расположению J-профиля на рис. 1. 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 выходной границе ставилось условие Неймана.

**3. CFD пакет и его верификация.** Для численного решения поставленной задачи использовался разработанный специализированный пакет вычислительной аэродинамики (CFD пакет) на основе уравнений Навье-Стокса, включая несколько дифференциальных моделей турбулентности, для расчета стационарных и нестационарных ламинарных и турбулентных течений.

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 [5].

Интегрирование системы исходных уравнений осуществлялось численно с использованием метода контрольного объема. Для конвективных потоков использовалась противопоточная аппроксимация Rogers-

Kwak [5], основанная на схеме Roe третьего порядка точности. В моделях турбулентности для аппроксимации конвективных слагаемых применялась схема TVD с ограничителем потоков ISNAS третьего порядка. 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(k) предобуславливанием.

В качестве верификации разработанного CFD пакета рассмотрено обтекание неподвижного и вращающегося цилиндра; докритическое и закритическое обтекание неподвижного и колеблющегося профиля; турбулентное обтекание многоэлементного профиля; роторов ВО ВЭУ Дарье и Савониуса [1, 3, 4].

**4. Результаты и обсуждение.** Турбулентное обтекание J-профиля в широком диапазоне углов атаки носит нестационарный характер (рис. 3). На качество воспроизводства массивных вихрей и течения в целом ключевую роль играет выбор подхода к моделированию турбулентности.

Результаты вычислительных экспериментов для нулевого угла атаки (рис. 3) показали, что подход, основанный на моделировании крупных вихрей с задержкой (DDES), лучше воспроизводит нестационарные физические особенности, возникающие при обтекании J-профиля (рис. 3 в, г). Во внутренней полости J-профиля формируется каскад вихрей, которые взаимодействуют между собой и вихрями, сходящими с острой кромки. Образуется нестационарная отрывная область, из которой периодически выбрасываются вихревые структуры в область основного течения. Осредненные по времени аэродинамические характеристики (рис. 4) для данного угла атаки также отличаются, хотя и не так принципиально.

Существенные нестационарные явления наблюдаются при больших углах атаки профиля, хотя применяемые подходы дают несколько разную численную реконструкцию структуры потока (рис. 3 б, г, е). Так использование модели SALSА приводит к массивному отрыву с формированием в верхней части профиля одного крупного вихря, сопоставимого по размерам с хордой профиля. Наличие массивных вихрей в подветренной области профиля связано со слабым восстановлением давления в этой области, что дает завышенные значения осредненного коэффициента лобового сопротивления (рис. 4 а). В то же время применение DDES подхода приводит к формированию несколько меньшей зоны отрыва с серией мелких вихрей большей интенсивности (рис. 3 г). Такая картина обтекания представляется более реалистичной, обеспечивает лучшее согласование с экспериментальными данными (рис. 4). Общая тенденция такова: чем массивнее отрыв, тем больше расхождение между расчетными данными, полученными по модели SALSА и экспериментальными данными, особенно для осредненного по времени коэффициента лобового сопротивления (рис. 4 а). Детальное изучение физики процесса обтекания J-профиля и сравнение моделей турбулентности проведем при угле атаки  $90^\circ$ . Данный угол атаки соответствует расположению профиля поперек потока, открытой стороной в направлении набегающего потока. Характер обтекания носит нестационарный характер с массивными отрывными зонами и крупномасштабными вихрями в следе.

В начальный момент времени  $t = 0$  (рис. 5 а, б) в подветренной части J-профиля располагается крупномасштабный вихрь *a*. На верхней и нижней части зарождаются вихри *б* и *в*. Результаты, полученные по модели SALSА (рис. 5 а), отличаются от тех, что получены с помощью DDES (рис. 5 б), более крупными размерами и меньшей интенсивностью вихрей.

В следующий момент времени  $t = 2$  продолжается рост вихрей *б* и *в* в подветренной области профиля (рис. 5 в). Вихрь *a* перемещается вниз по потоку. В то же время вихрь *a* (рис. 5 г) смещается вверх и начинает взаимодействовать с каскадом вихрей, сошедших с верхнего края лопасти. Вихри в этой области намного меньше тех, что получены с использованием модели SALSА (рис. 5 в). Вихри *б* отличаются по своей интенсивности, хотя по размерам они очень схожи.

В момент времени  $t = 4$  (рис. 5 д, е) вихри *a* почти полностью покидают рассматриваемую область. Вихри *б* увеличиваются в размерах и сносятся вниз по потоку. Вихри *в* продолжают формироваться на острой кромке J-профиля. Для моментов времени  $t = 6$  (рис. 6 а) и  $t = 8$  (рис. 6 в) вихрь *б* сохраняет свою устойчивую форму и сносятся вниз по потоку. Вихрь *в* увеличивается в размерах и занимает половину длины хорды профиля. В те же моменты времени вихрь *б* распадается на каскад мелких вихрей, которые взаимодействуют друг с другом и основным потоком (рис. 6 б и рис. 6 г). Такое поведение вихрей более свойственно нестационарной структуре турбулентности. При  $t = 10-16$  (рис. 6, 7) в районе задней кромки профиля начинает образовываться вихрь *д*. Причем для модели SALSА этот вихрь имеет стабильную структуру, в то время как для DDES он распадается на десяток более мелких вихрей.

#### Заключение

В результате проведенных экспериментальных и численных исследований аэродинамики J-профиля ротора Дарье ВО ВЭУ получены нестационарные поля течений, а также рассчитаны значения аэродинамических характеристик в широком диапазоне углов атаки. Применение DDES подхода приводит к формированию несколько меньшей зоны отрыва с серией мелких вихрей большей интенсивности. Такая картина обтекания представляется более реалистичной, обеспечивает лучшее согласование с экспериментальными данными. Для выработки рекомендаций о применимости J-профиля в роторе Дарье ВО ВЭУ необходимо провести ряд дополнительных исследований в сравнении с классическими аэродинамическими профилями.

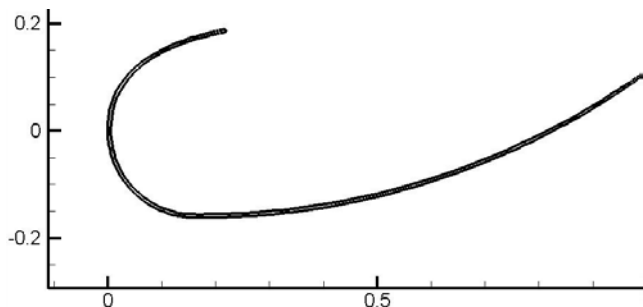


Рис. 1. Геометрия J-профиля

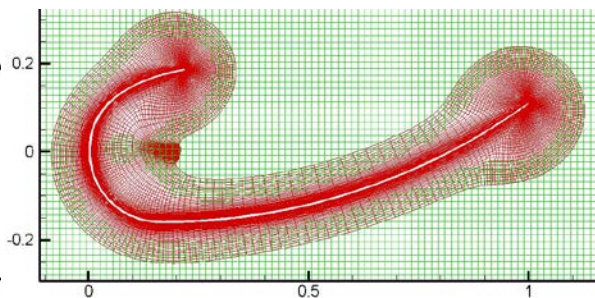
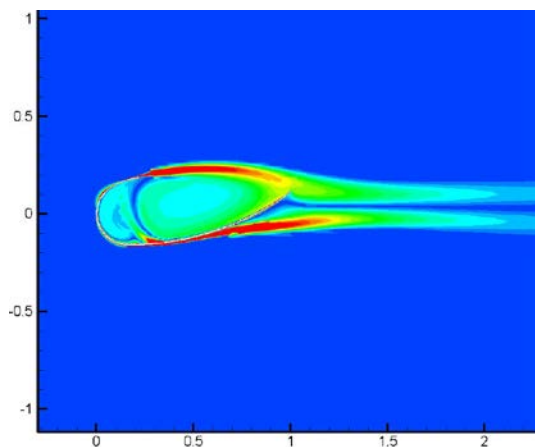
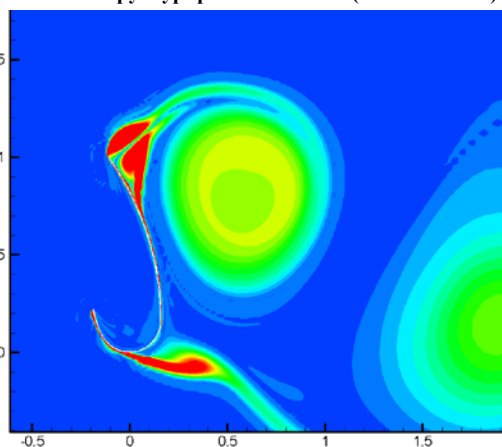


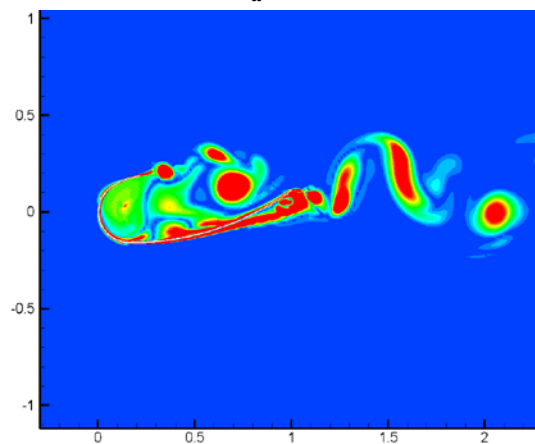
Рис. 2. Многоблочная пересекающаяся структурированная сетка (типа Chimera)



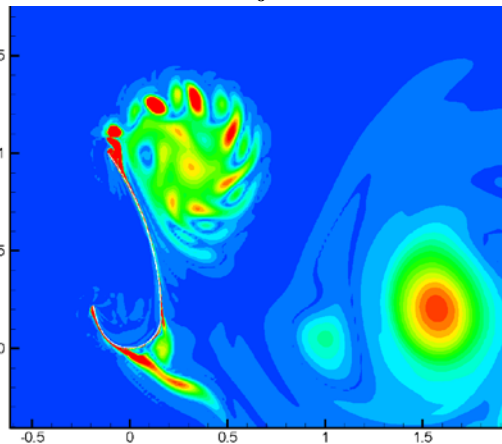
а



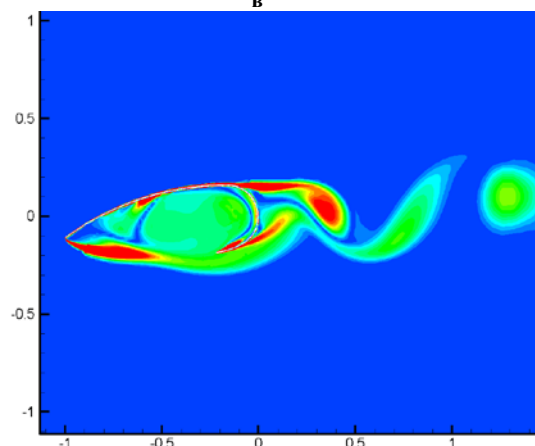
б



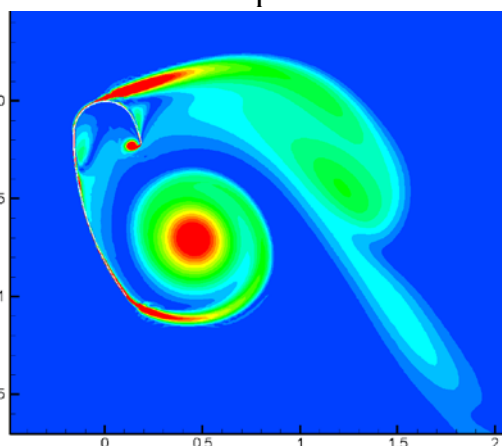
в



г



д



е

Рис. 3. Турбулентное обтекание J-профиля при углах атаки 0° (а), 90° (б, г), 180° (д) и 270° (е) моделями турбулентности SALSA (а, б, д, е) и DDES (в, г)

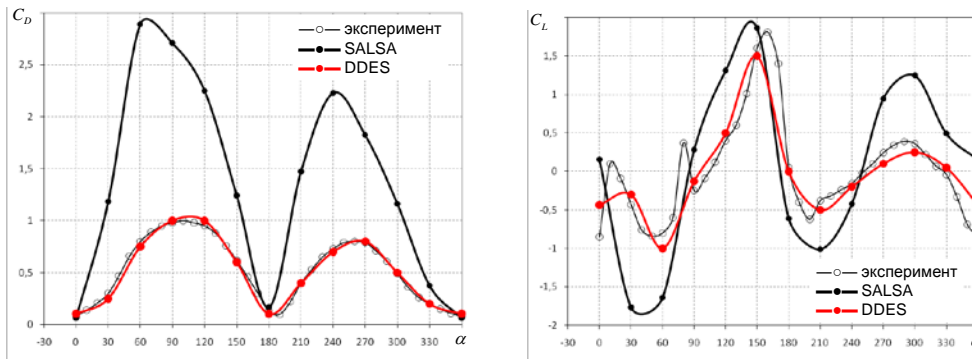


Рис. 4. Зависимость осредненных по времени коэффициентов лобового сопротивления (а) и подъемной силы (б) J-профиля от угла атаки

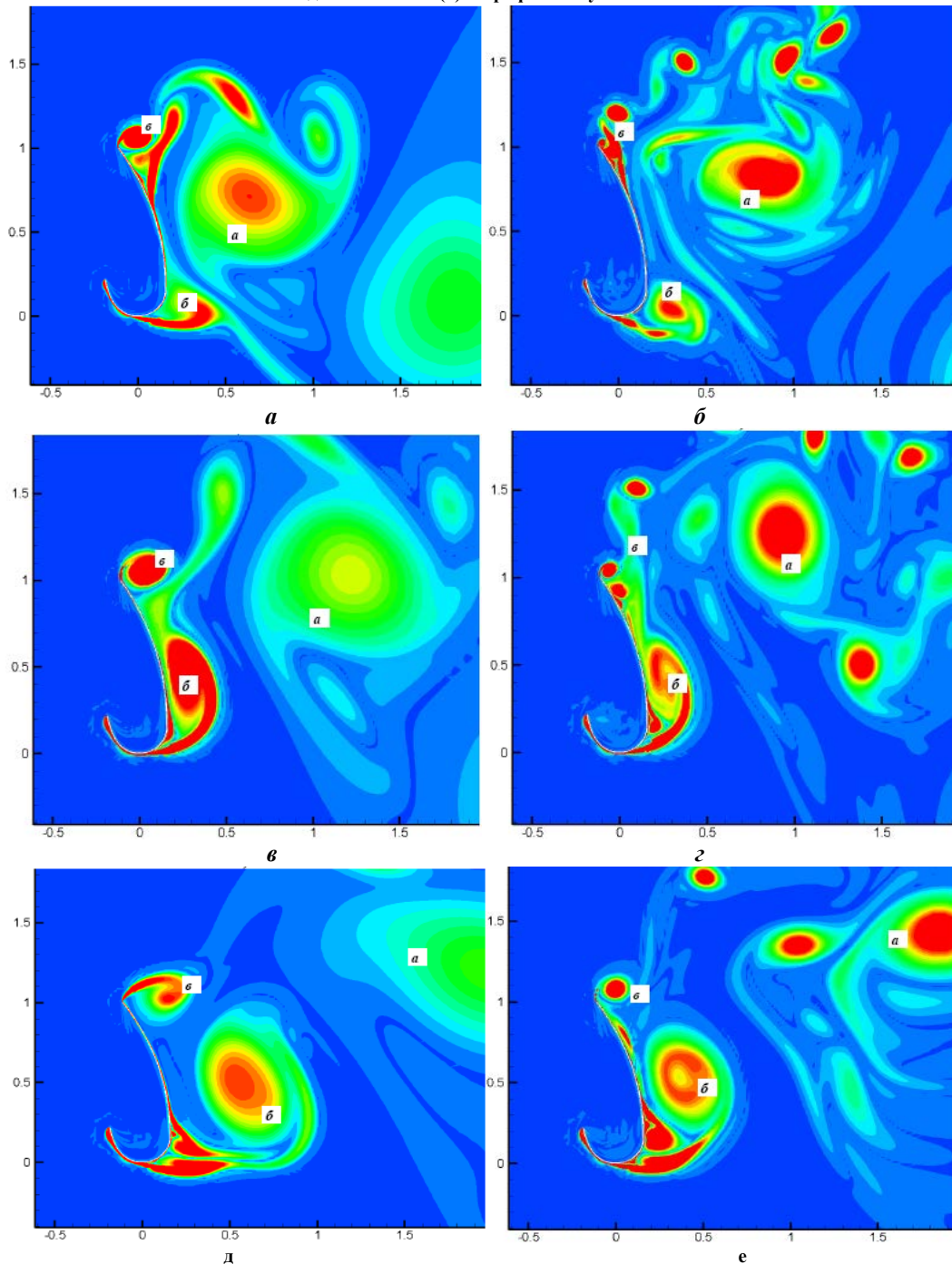


Рис. 5. Развитие течения при обтекании J-профиля (угол атаки 90°) в моменты времени 0 (а, б), 2 (в, г), 4 (д, е) моделями турбулентности SALSA (а, в, д) и DDES (б, г, е)

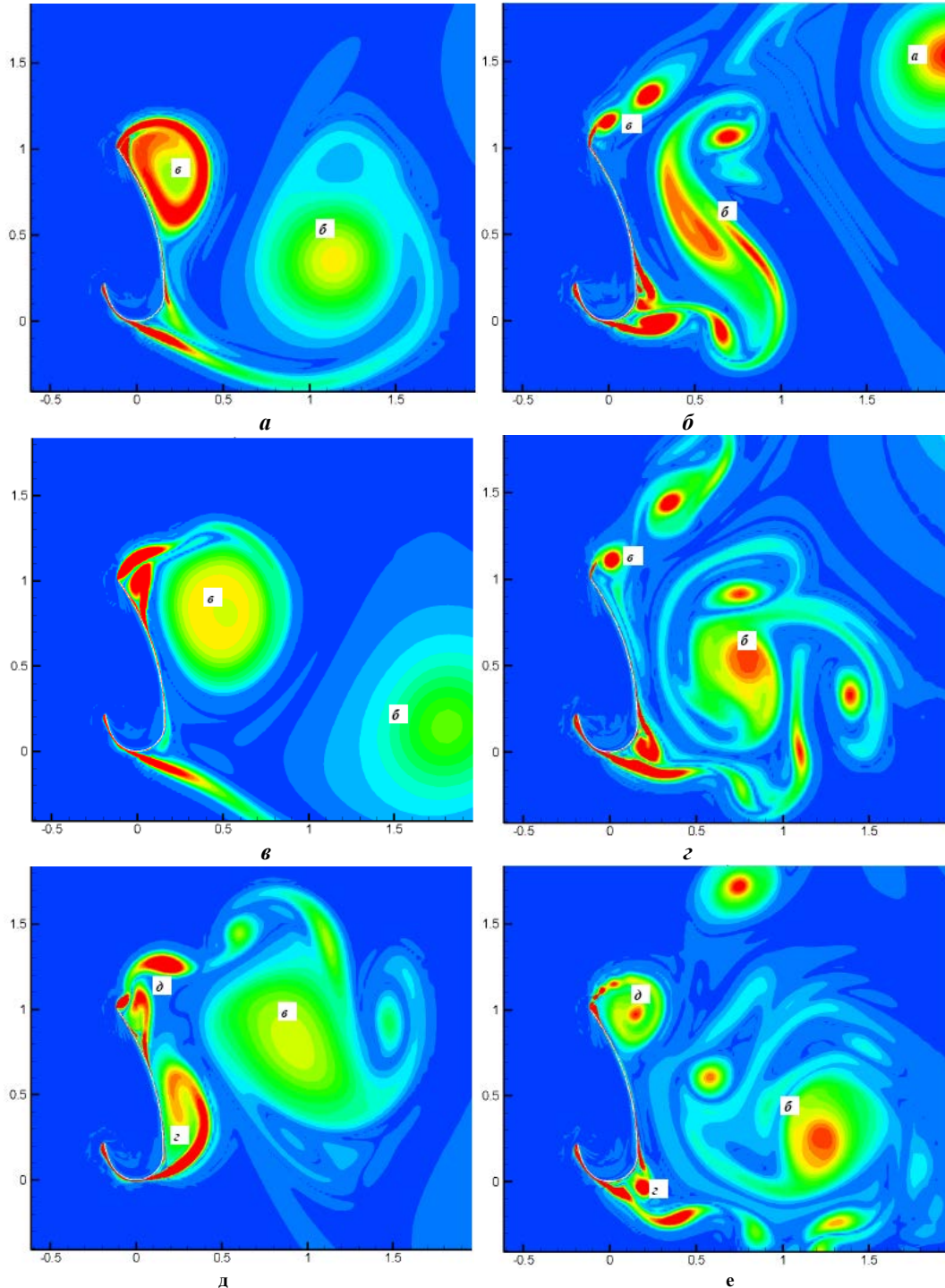


Рис. 6. Развитие течения при обтекании J-профиля (угол атаки 90°) в моменты времени 6 (а, б), 8 (в, г), 10 (д, е) моделями турбулентности SALSA (а, в, д) и DDES (б, г, е)

**Список использованной литературы**

1. Дзензерский, В. А. Математическое моделирование аэродинамики вертикально-осевой ветроэнергетической установки с роторами Дарье и Савониуса [Текст] / В. А. Дзензерский, С. В. Тарасов, Д. А. Редчиц, Н. М. Хачапуридзе // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій.– 2012. – № 19. – С. 96–111.
2. Волков, Н. И. Аэродинамика ортогональных ветродвигателей (некоторые математические модели и численная реализация) [Текст] : навч. посіб. / Н. И. Волков. – Сумы: Мрія-1, 1996. – 198 с.
3. Редчиц, Д. А. Математическое моделирование отрывных течений на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса [Текст] / Д. А. Редчиц // Научные ведомости Белгород. гос. ун-та. Серия Математика Физика. – 2009. – № 13. Вып. 17. – С. 118–146.

4. Редчиц, Д. А. Математическое моделирование физических особенностей турбулентного обтекания многоэлементного профиля [Текст] / Д. А. Редчиц // Вестник Херсонского национального технического ун-та. – 2010. Вып. 3(39). – С. 398–403.
5. Rogers, S. An upwind differencing scheme for the incompressible Navier-Stokes equations [Text] / S. Rogers, D. Kwak // Journal Numerical Mathematics. – 1991. – Vol. 8. – P. 43 – 64.
6. Rung, T. Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation [Text] / T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele // AIAA Journal. – 2003. – Vol. 4, № 7. – P.1396–1399.
7. Spalart, P. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow [Text] / P. Spalart, S. Allmaras // AIAA Paper. – 1992. – № 0112. – P. 439 – 478.
8. Spalart, P. Comments on the feasibility of wings and on a hybrid RANS/LES approach [Text]/ P. Spalart, W. Jou, M. Strelets, S. Allmaras // Proc. of first AFOSR Int. Conf. on DNS/LES. – USA. – 1997. – P. 137–147.
9. Spalart, P. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities [Text] / P. Spalart, S. Deck, M. Shur, K. Squires, M. Strelets, A. Travin // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. – 2006. – № 20. – P. 181– 195.
10. Vertical Axis Wind Turbines: Products and application [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cygnus-power.com>

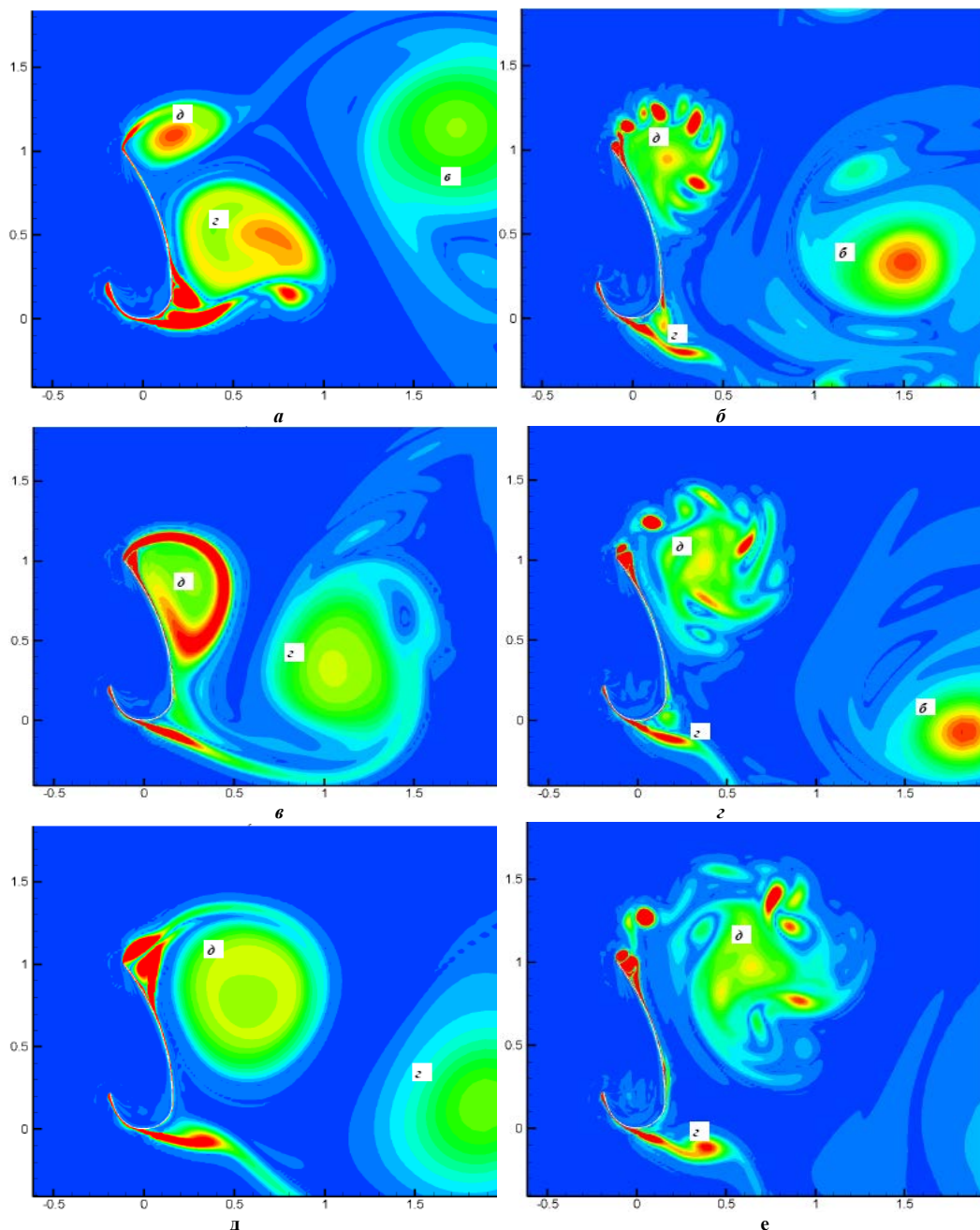


Рис. 7. Развитие течения при обтекании J-профиля (угол атаки 90°) в моменты времени 12 (а, б), 14 (в, г), 16 (д, е) моделями турбулентности SALSA (а, в, д) и DDES (б, г, е)