

УПРАВЛЕНИЕ ОТРЫВОМ ПОТОКА ВОЗДУХА НА ЦИЛИНДРЕ
С ПОМОЩЬЮ ЧЕТЫРЕХ ПЛАЗМЕННЫХ АКТУАТОРОВ

Постановка проблемы. Задача управления отрывом потока воздуха является актуальной для развития авиационной и ракетно-космической техники, двигателе- и турбиностроения, ветроэнергетики. Применение плазменных актуаторов (ПА) на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР) относится к числу современных и перспективных способов изменения структуры течения. В отличие от классических способов использования ДБР является менее энергозатратным и не требует конструктивных изменений (перфорирования поверхности, установки инцепторов или дополнительных подвижных элементов).

Анализ публикаций по теме исследований. Изучению низкотемпературной неравновесной плазмы ДБР при работе ПА посвящено большое количество экспериментальных [2, 3, 6, 8, 12] и теоретических [4, 5, 7, 9, 10, 11, 15, 17, 19, 20] работ. Несмотря на успешную демонстрацию возможностей ДБР при работе ПА для управления потоком и кажущуюся простоту устройства, фундаментальное понимание физики их действия является неполным.

К настоящему времени выработано общее представление о взаимодействии между электрическим полем, заряженными частицами плазмы и несущей средой. В результате воздействия электромагнитного поля плазменного актуатора на заряженные частицы возникает массовая сила (сила Лоренца), которая приводит к передаче импульса окружающему воздуху.

Теоретические исследования ДБР опираются, как правило, на математические модели низкого уровня с использованием многочисленных эмпирических констант, значения которых зависят от конкретного вида течений. Несмотря на преимущества ПА на основе ДБР их применение пока еще ограничено лабораторным уровнем без широкого внедрения в современную технику.

Основная часть. В настоящей работе рассматривается частично ионизированная квазинейтральная идеальная низкотемпературная неравновесная плазма, генерируемая диэлектрическим барьерным разрядом при работе плазменного актуатора в сплошной вязкой среде.

Исходные уравнения динамики вязкой несжимаемой жидкости. При малых скоростях воздуха (локальные числа Маха $M < 0.3$) эффектами сжимаемости пренебрегают, и воздух можно рассматривать как несжимаемую жидкость. Процессы динамики вязкой несжимаемой жидкости описываются осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье–Стокса с учетом массовых сил.

Моделирование турбулентности. Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса используется дифференциальная однопараметрическая модель Spalart–Allmaras, адаптированная к тензору скоростей деформаций (SALSA) [16], которая разработана для задач внешней дозвуковой аэродинамики и является развитием оригинальной модели Spalart–Allmaras [18].

Начальные и граничные условия для уравнений динамики вязкой несжимаемой жидкости. 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 [21]. На поверхности твердого тела ставилось условие прилипания.

Исходная система уравнений электродинамики. Для данного класса задач плазму можно рассматривать как ионизированный квазинейтральный газ [19]. В общем случае она может быть описана четырьмя уравнениями Максвелла. Можно полагать [19], что заряды в плазме имеют достаточно времени (по сравнению с гидродинамическим временем) для перераспределения в области и система становится квазистационарной. В этом случае электрический ток, напряженность магнитного поля и магнитная индукция равны нулю. К тому же производные по времени электрической индукции и магнитной индукции равны нулю. Принимая во внимание вышесказанное, из системы уравнений Максвелла остаются только два уравнения, представляющие собой закон Гаусса для электрической индукции и уравнение для электрического потенциала.

Начальные и граничные условия для исходной системы уравнений электродинамики. В качестве начальных условий задавалось нулевое распределение электрического потенциала и плотности зарядов в области. Уравнение для электрического потенциала решается, используя приложенное напряжение к электродам как граничное условие, а также соответствующие значения относительной диэлектрической проницаемости для воздуха и диэлектрика. На границе раздела сред используется среднее значение относительной диэлектрической проницаемости [19]. Переменное напряжение прикладывается к открытому (верхнему) электроду, а к изолированному электроду – нулевой потенциал. На внешних границах ставится условие Неймана [19]. Нормальный градиент для плотности результирующего заряда на поверхности твердого тела полагался равным нулю, за исключением области над изолированным электродом. На внешней границе плотность результирующего заряда равнялась нулю.

Численный алгоритм. Разработан специализированный пакет вычислительной гидродинамики (CFD) на основе уравнений Навье-Стокса для расчета стационарных и нестационарных ламинарных и турбулентных течений. Для моделирования ДБР при работе ПА дополнительно решались два уравнения, описывающие распределение приложенного напряжения и плотности заряженных частиц, которые были интегрированы в разработанный CFD пакет. Воздействие ДБР на окружающую среду осуществлялось через силу Лоренца, входящую как источниковый член в уравнения Навье-Стокса.

Система исходных уравнений гидродинамики и электродинамики записывалась относительно произвольной криволинейной системы координат в безразмерном виде. Интегрирование уравнений плазменной аэродинамики осуществлялось численно с использованием метода контрольного объема. Для конвективных потоков в уравнениях гидродинамики использовалась противопоточная аппроксимация Rogers-Kwak [14], основанная на схеме Roe [13], третьего порядка точности.

Результаты и обсуждение. Для решения задачи об управлении отрывом потока рассматриваются плазменные актуаторы, расположенные на цилиндре. Все исходные данные для настоящей работы взяты из [20]. Модель представляет собой цилиндр, сделанный из кварца ($D = 100$ мм), с четырьмя плазменными актуаторами, расположенными как показано на рис. 1. К плазменным актуаторам прикладывается переменное напряжение $\phi = 11.5$ кВ частотой 10 кГц. Стенки цилиндра сделаны в форме диэлектрического барьера толщиной 2.5 мм. Открытый электрод изготовлен из медной фольги шириной 5.6 мм и толщиной 0.04 мм. Ширина изолированного электрода 25.4 мм, а толщина – 0.04 мм. Внутренний диэлектрик представляет собой 5 слоев каптона толщиной 0.125 мм. В настоящей работе математическое моделирование ДБР при работе ПА проводилось в безразмерном виде.

В результате проведенного численного эксперимента получено распределение электрического потенциала и плотности заряженных частиц вблизи электродов и в области в целом (рис. 2). Максимальные значения плотности результирующего пространственного заряда наблюдаются в областях с максимальной напряженностью электрического поля.

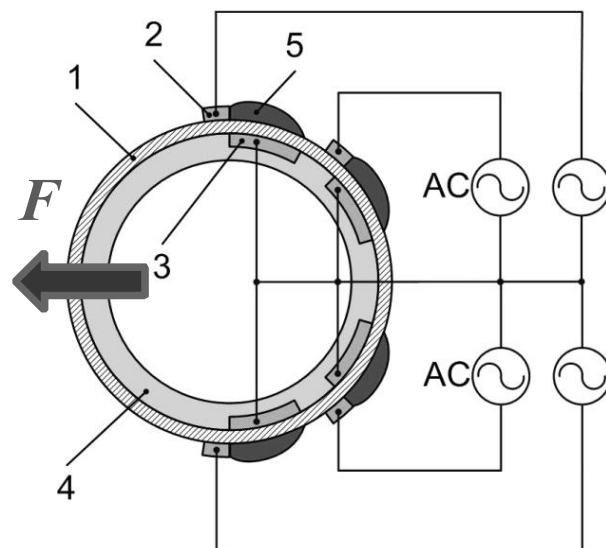


Рис. 1. Модель цилиндра с четырьмя плазменными актуаторами [20] (1 – цилиндр, 2 – открытый электрод, 3 – изолированный электрод, 4 – внутренний изолятор, 5 – области образования плазмы)

В настоящей работе проведено численное моделирование воздействия диэлектрического барьерного разряда при работе четырех плазменных актуаторов на обтекающий цилиндр поток воздуха при числе Рейнольдса $Re = 30000$. Для визуализации структуры течения в эксперименте применялась дымовая визуализация потока, а в настоящей работе использовались изолинии модуля завихренности.

Турбулентное обтекание цилиндра характеризуется наличием в следе вихревой дорожки Кармана (рис.3-4). Вследствие действия сил вязкости вблизи поверхности цилиндра частицы жидкости теряют часть кинетической энергии, которой уже недостаточно, чтобы преодолеть повышение давления в кормовой части цилиндра. Возле точки отрыва формируется возвратное течение, из которого развивается большой вихрь. Через некоторое время этот вихрь отрывается от тела и уплывает вниз по течению. В завихренной зоне позади кормовой части цилиндра, давление сильно понижено по сравнению с давлением в невозмущенном потоке. На некотором удалении за цилиндром формируется последовательность вихрей, вращающихся попеременно в разных направлениях.

Включение четырех плазменных актуаторов ($\phi = 11.5$ кВ), расположенных на поверхности цилиндра $\pm 90^\circ$, $\pm 135^\circ$, приводит к подавлению вихревой дорожки Кармана, и обтекание цилиндра носит присоединенный характер (рис. 5).

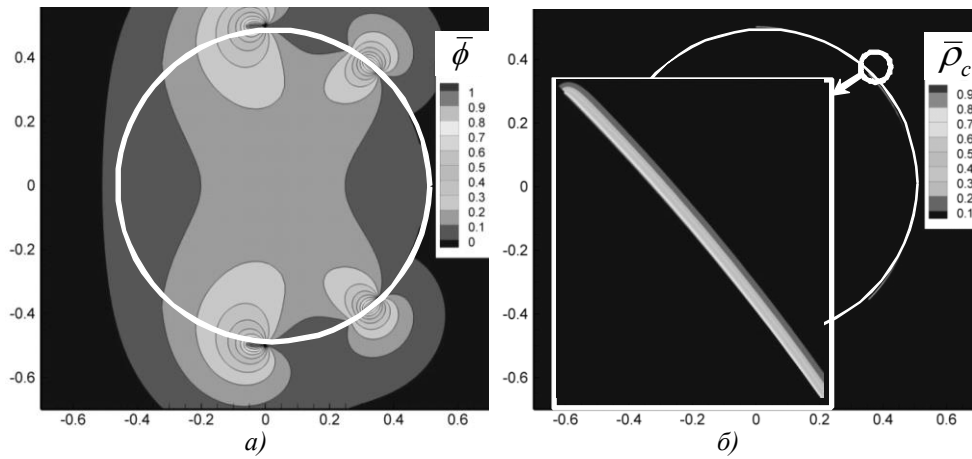


Рис. 2. Распределение электрического потенциала (а) и плотности заряженных частиц (б) в области

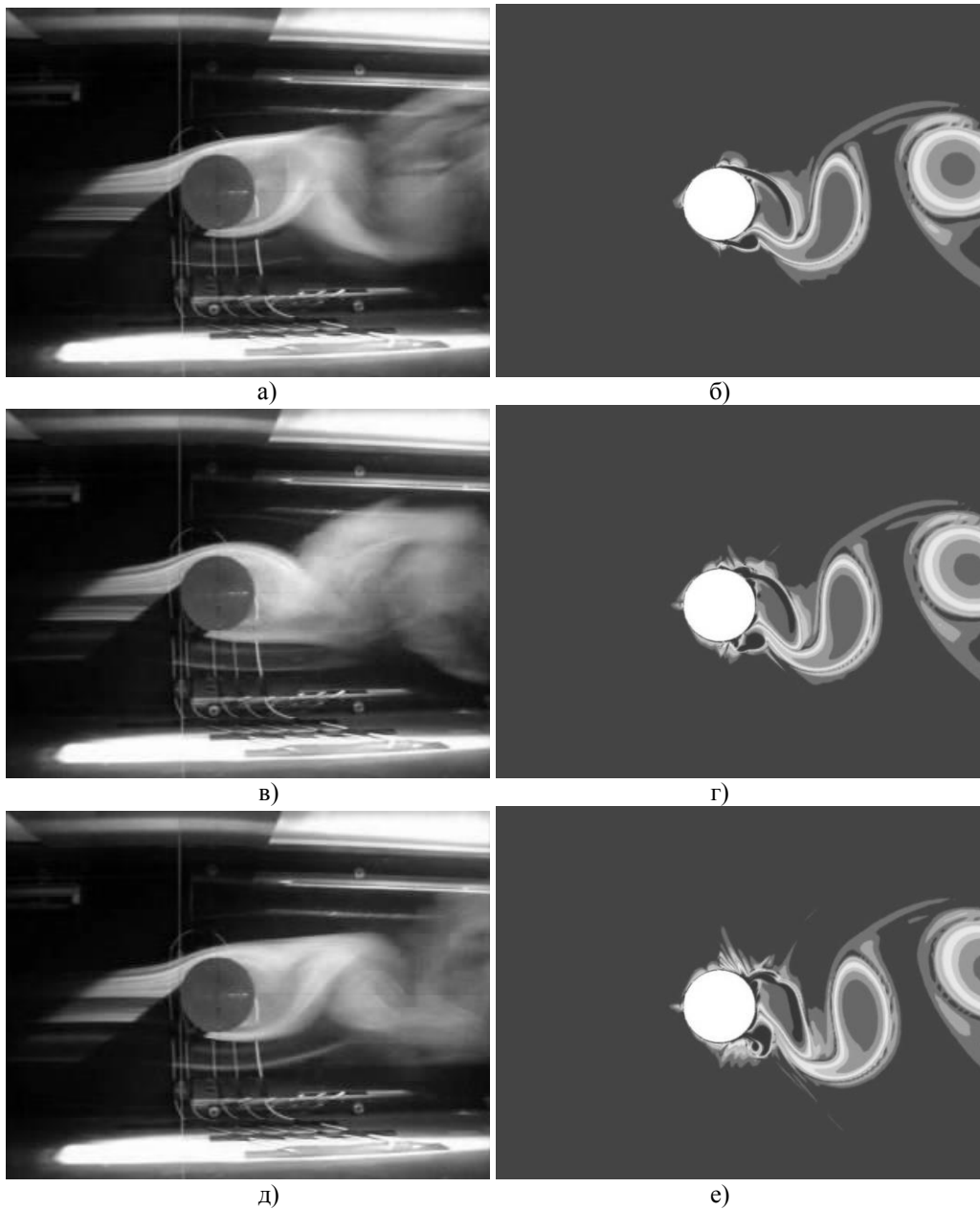


Рис. 3. Турбулентное обтекание цилиндра с включенными плазменными актуаторами для моментов безразмерного времени $t = 40.1$ (а, б), $t = 40.2$ (в, г), $t = 40.3$ (д, е) (а, в, д – эксперимент [20], б, г, е – настоящая работа)

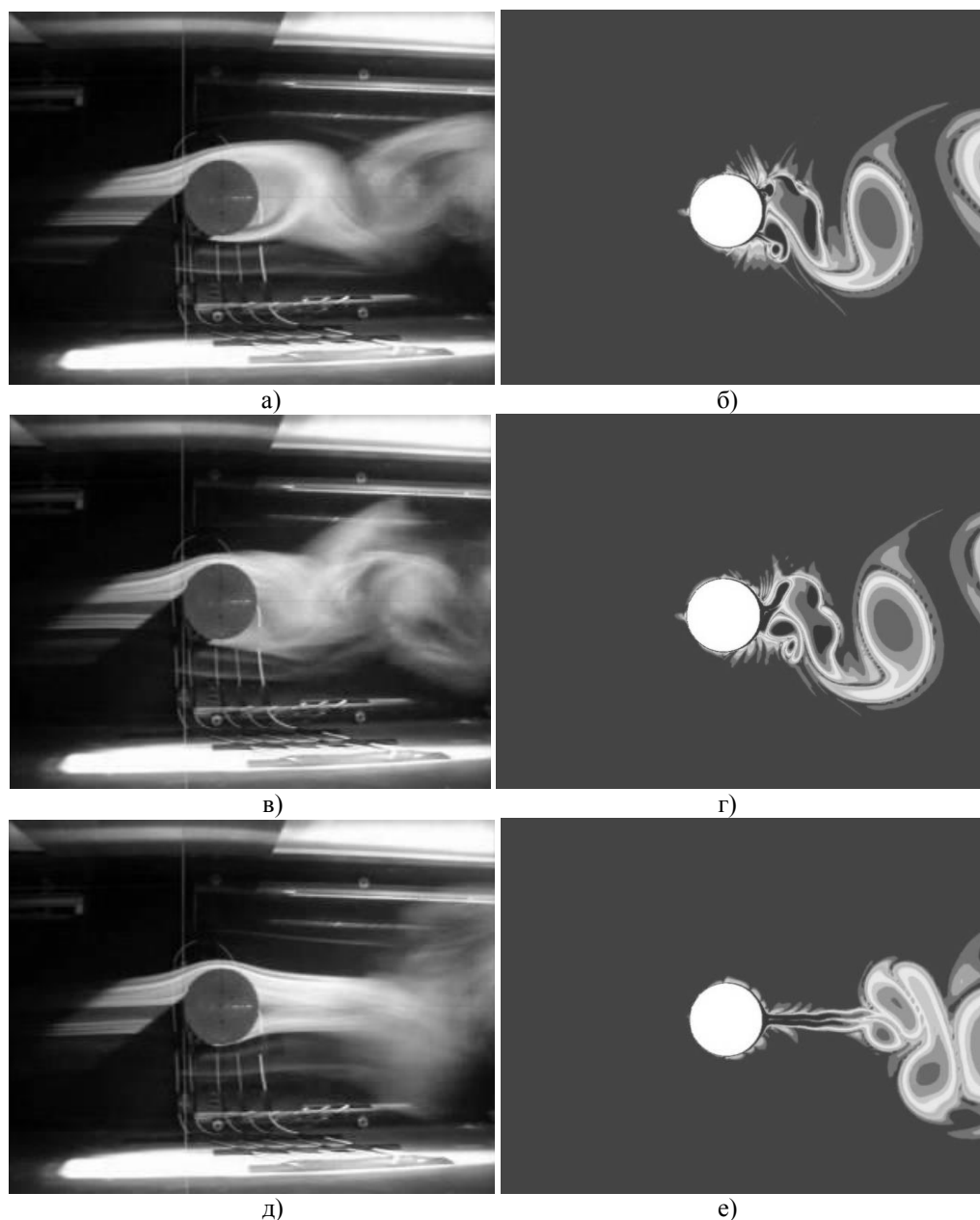


Рис. 4. Турбулентное обтекание цилиндра с включенными плазменными актуаторами для моментов безразмерного времени $t = 40.4$ (а, б), $t = 40.5$ (в, г), $t = 41.0$ (д, е) (а, в, д – эксперимент [20], б, г, е – настоящая работа)

На рис. 6 приведены распределения коэффициента давления для различных режимов обтекания кругового цилиндра. Сплошная линия соответствует потенциальному бесциркуляционному обтеканию $C_p = 1 - 4 \sin^2 \varphi$ [1]. Здесь происходит полное восстановление донного давления, что в отсутствие сил трения приводит к парадоксу Даламбера – нулевой силе сопротивления. В вязких течениях трение вносит сравнительно небольшой непосредственный вклад в лобовое сопротивление, однако наличие трения ведет к отрыву потока и существенному перераспределению давления на поверхности цилиндра.

Для развитой дорожки Кармана значения коэффициента давления находятся в зоне, обозначенной штриховыми линиями на рис. 6. Подавление вихревой дорожки Кармана с помощью плазменных актуаторов приводит к восстановлению донного давления и снижению лобового сопротивления (●●● линия на рис.6). В зависимости от числа Рейнольдса; режима обтекания цилиндра (ламинарное, переходное, турбулентное); интенсивности работы плазменных актуаторов значение коэффициента сопротивления C_D может уменьшаться от 5 до 40 раз.

Полученные результаты обтекания цилиндра для случая с выключенным и включенными плазменными актуаторами удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными [20] (рис. 3-5).

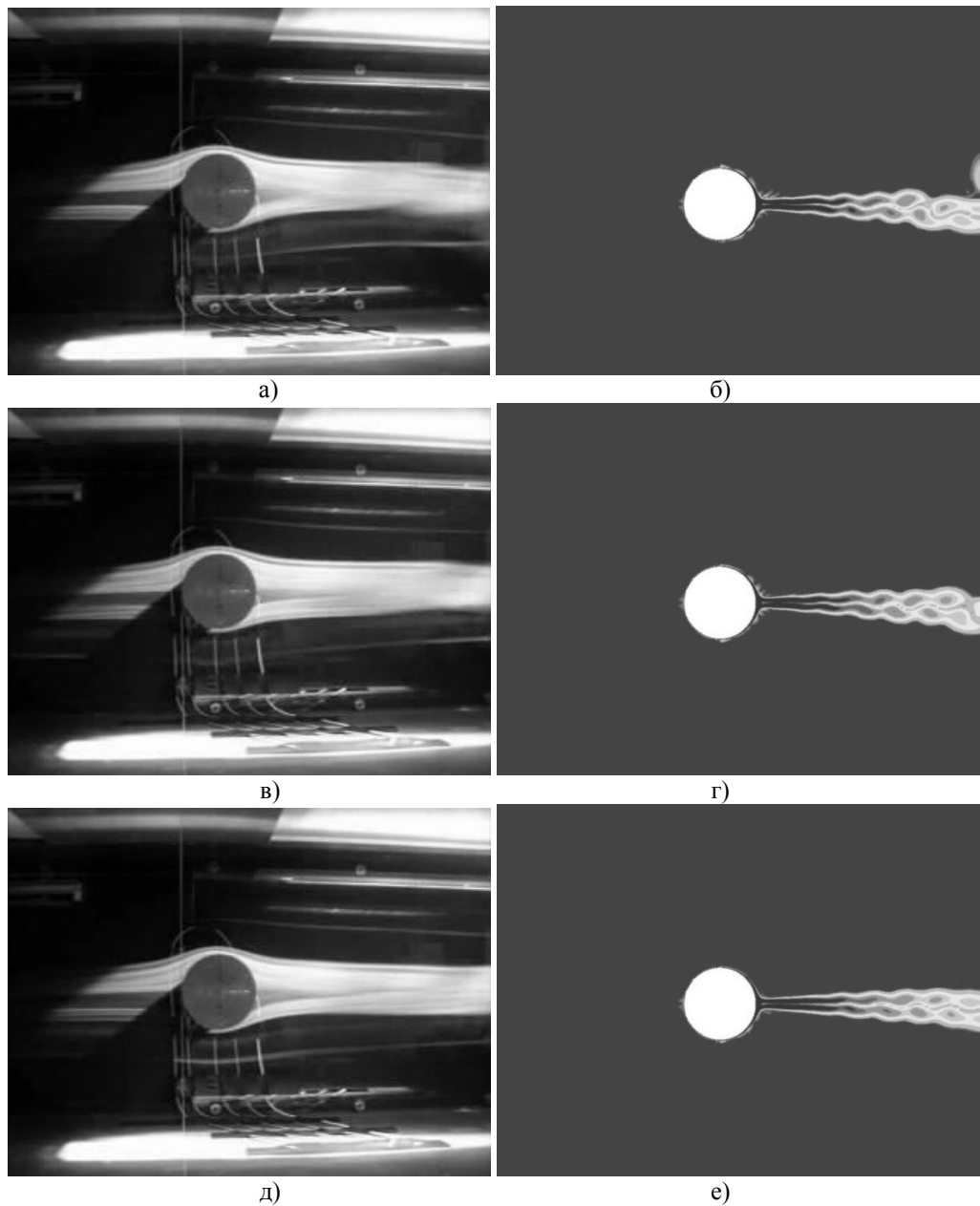


Рис. 5. Турбулентное обтекание цилиндра с включенными плазменными актуаторами для моментов безразмерного времени $t = 42.0$ (а, б), $t = 43.0$ (в, г), $t = 44.0$ (д, е) (а, в, д – эксперимент [20], б, г, е – настоящая работа)

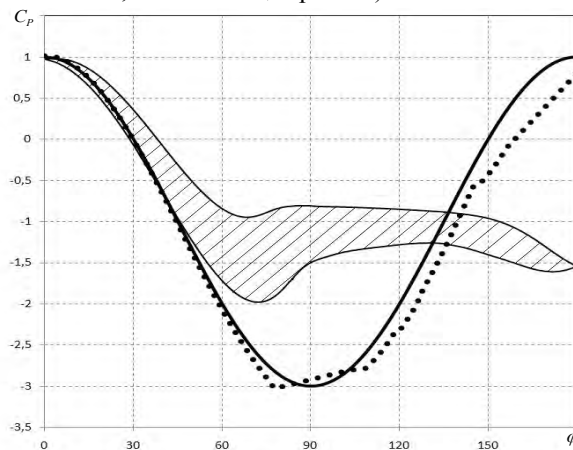


Рис. 6. Распределения коэффициента давления для различных режимов обтекания кругового цилиндра

Выводы. На основе физической модели диэлектрического барьерного разряда построена математическая модель, описывающая нестационарные электро- и аэродинамические процессы при работе плазменного актуатора. С помощью метода контрольного объема разработан численный алгоритм решения уравнений электродинамики плазмы вместе с уравнениями динамики вязкой несжимаемой жидкости, включая турбулентность, в криволинейной системе координат на подвижных сетках для моделирования диэлектрического барьерного разряда. Показана возможность уменьшения коэффициента сопротивления цилиндра с помощью плазменного актуатора за счет подавления вихревой дорожки Кармана. Предложенная методика учитывает физические особенности рассматриваемого класса задач и обладает высокой вычислительной эффективностью. Данный подход применим к моделированию динамики низкоскоростных потоков жидкости и газа при наличии электростатического поля.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
2. Abe T., Takagaki M. Momentum coupling and flow induction in a DBD plasma actuator // AIAA Paper. – 2009. – № 1622. – 8 p.
3. Corke T. Application of weakly ionized plasmas as wing flow control devices / T. Corke, E. Jumper, M. Post, D. Orlov// AIAA Paper. – 2002. – № 350. – P. 15.
4. Corke T. Boundary Layer Instability on a Sharp Cone at Mach 3.5 with Controlled Input / T. Corke, D. Cavalieri, E. Matlis// AIAA Journal. – 2002. – Vol. 40, № 5. – P. 1015–1018.
5. Durscher R. Induced flow from serpentine plasma actuators acting in quiescent air/ R. Durscher, S. Roy // AIAA Paper. – 2011. – № 957. – P. 12.
6. Enloe C. Plasma structure in the aerodynamic plasma actuator/ C. Enloe, T. McLaughlin, R. VanDyken, J. Fuscher // AIAA Paper. – 2004. – № 844. – P. 9.
7. Font G. Plasma Discharges in Atmospheric Pressure Oxygen for Boundary Layer Separation Control / G. Font, W. L. Morgan // AIAA Paper. – 2005. – № 4632. – P. 16.
8. Forte M., Jolibois J., Moreau E., Touchard G., Cazalens M. Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity – application to airflow control // AIAA Paper. – 2006. – № 2863. – 9 p.
9. Hall K.D. Potential flow model for plasma actuation as a lift enhancement device / K.D. Hall// Master's thesis, University of Notre Dame, 2004.
10. Likhanskii A. Modeling of interaction between weakly ionized near surface plasmas and gas flow / A. Likhanskii, M. Shneider, S. Macheret, R. Miles//AIAAPaper.–2006. –№1204. –P.11.
11. Massines F. Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmospheric pressure controlled by dielectric barrier / F. Massines, A. Rabehi, P. Decomps// Journal of Applied Physics. – 1998. – Vol. 83, № 6. – P. 2950–2957.
12. Nudnova M., Kindusheva S., Aleksahdrov N., Starikovskiy A. Rate of plasma thermalization of pulsed nanosecond surface dielectric barrier discharge // AIAA Paper. – 2010. – № 465. – 15 p.
13. Roe P.L. Approximate riemann schemes / P.L. Roe // Journal of Computational Physics. – 1981. – Vol. 43. – P. 357–372.
14. Rogers S.E. Comparison of implicit schemes for the incompressible Navier–Stokes equations and artificial compressibility // AIAA Journal. – 1995. – Vol.33, № 11. – P. 2066–2072.
15. Roy S. Modeling surface discharge effects of atmospheric RF on gas flow control / S. Roy, D.V. Gaitonde// AIAA Paper. – 2005. – № 160. – P. 14.
16. 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.
17. Shyy W. Modeling of glow discharge–induced fluid dynamics / W. Shyy, B. Jayaraman, A. Andersson// Journal of applied physics. – 2002. – Vol. 92. – P. 6434 – 6443.
18. Spalart P.R. A one–equation turbulence model for aerodynamic flow / P.R. Spalart, S.R. Allmaras // AIAA Paper. – 1992. – № 439. – P. 21.
19. Suzen Y.B. Numerical simulations of plasma based flow control applications/ Y.B. Suzen, P.G. Huang, J.D. Jacob// AIAA Paper. – 2005. – № 4633. – P. 14.
20. Thomas F.O. Numerical simulations of plasma based flow control applications/ F. O. Thomas, A. I. Kozlov, T. C. Corke // AIAA Paper. – 2006. – № 2845. – P. 16.
21. Whitfield D.L. Numerical solution of the two–dimensional time–dependent incompressible Euler equations / D.L. Whitfield, L.K. Taylor // Mississippi state university NASA–CR–195775. – 1994. – P. 65.

РЕДЧИЦ Дмитрий Александрович – к.ф.-м.н., ст.н.с., старший научный сотрудник Института транспортных систем и технологий НАН Украины.

Научные интересы:

- вычислительная гидродинамика (CFD), математическое моделирование.