

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.

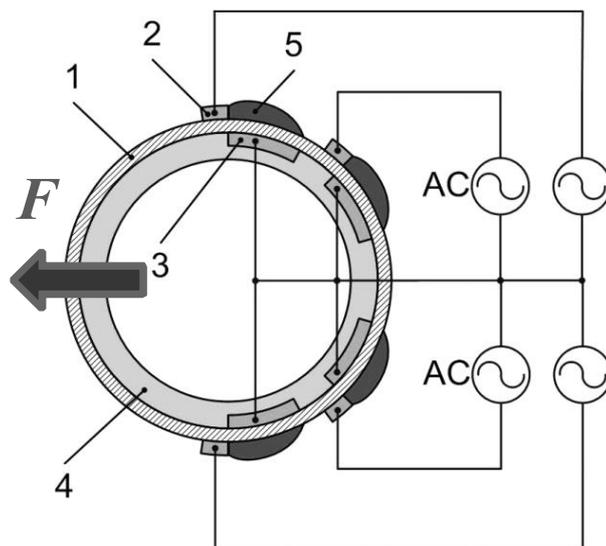


Рис. 1. Модель цилиндра с четырьмя плазменными актуаторами [20] (1 – цилиндр, 2 – открытый электрод, 3 – изолированный электрод, 4 – внутренний изолятор, 5 – области образования плазмы)

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).

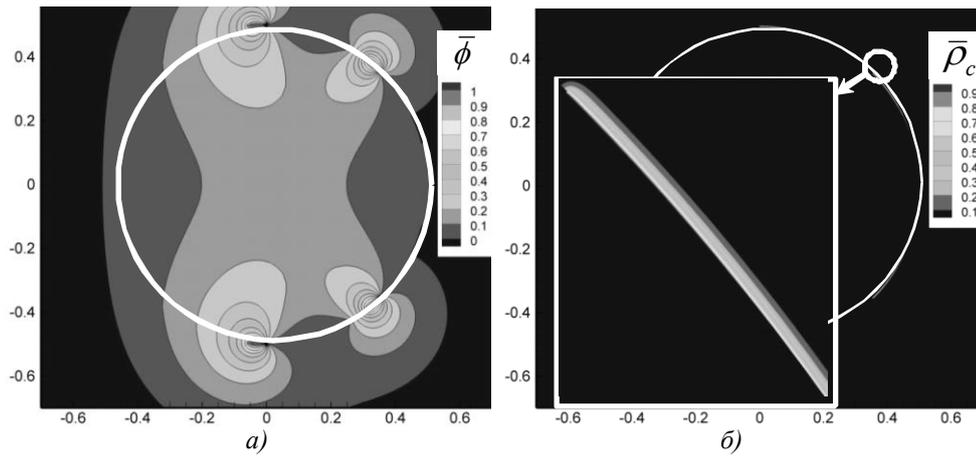


Рис. 2. Распределение электрического потенциала (а) и плотности заряженных частиц (б) в области

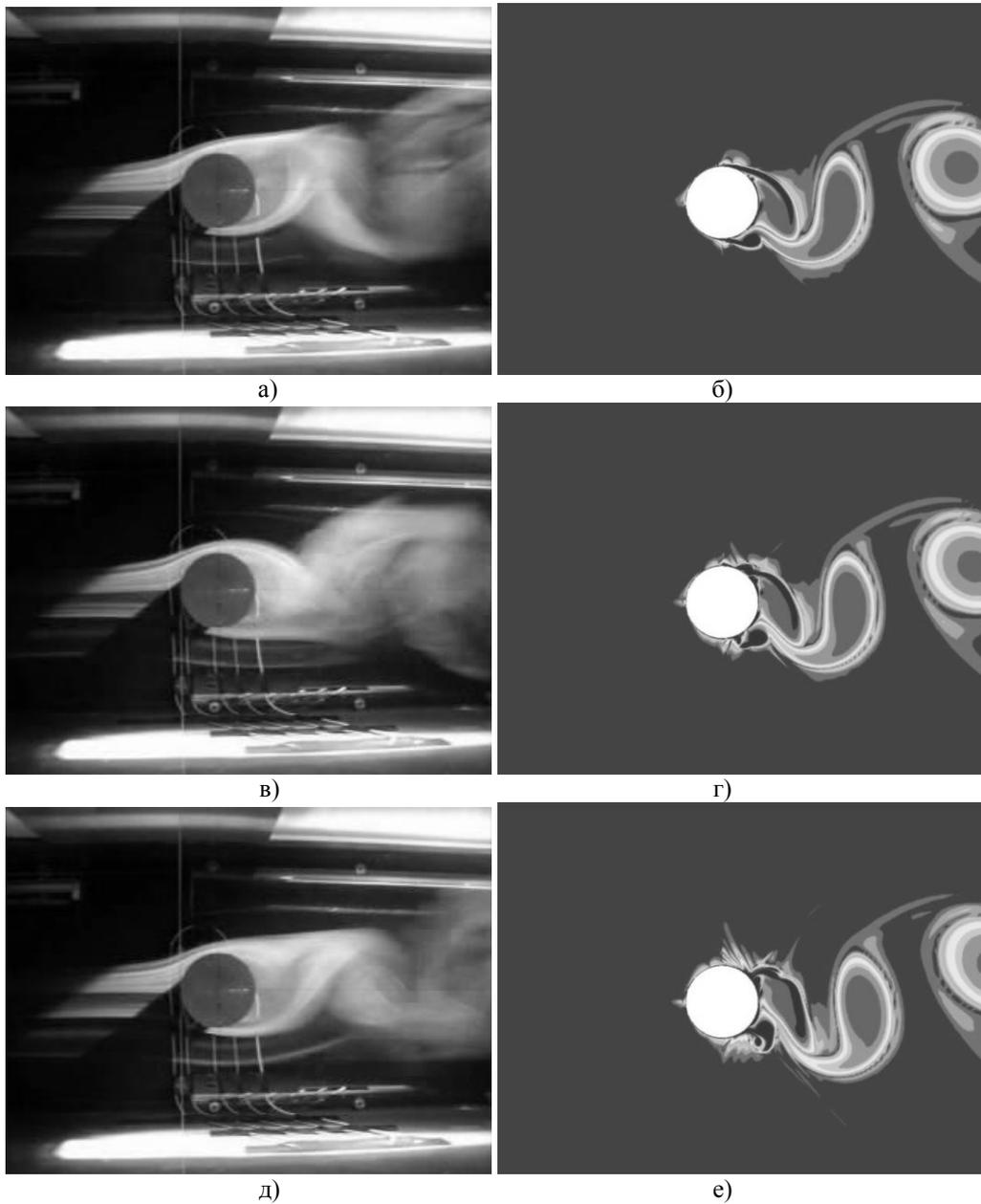


Рис. 3. Турбулентное обтекание цилиндра с включенными плазменными актуаторами для моментов безразмерного времени  $t = 40.1$  (а, б),  $t = 40.2$  (в, г),  $t = 40.3$  (д, е) (а, в, д – эксперимент [20], б, г, е – настоящая работа)

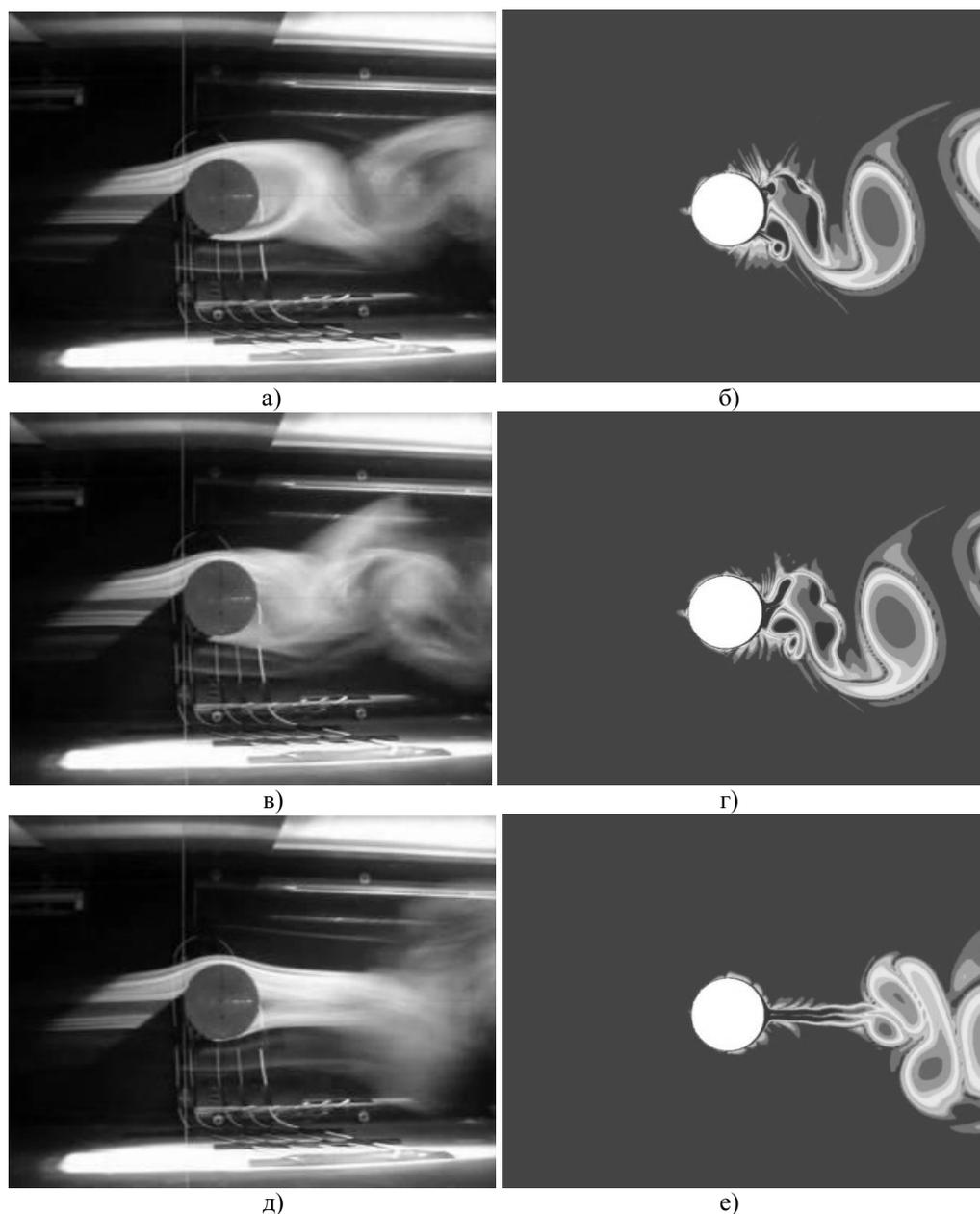


Рис. 4. Турбулентное обтекание цилиндра с включенными плазменными актуаторами для моментов безразмерного времени  $t = 40.4$  (а, б),  $t = 40.5$  (в, г),  $t = 41.0$  (д, е) (а, в, д – эксперимент [20], б, г, е – настоящая работа)

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).

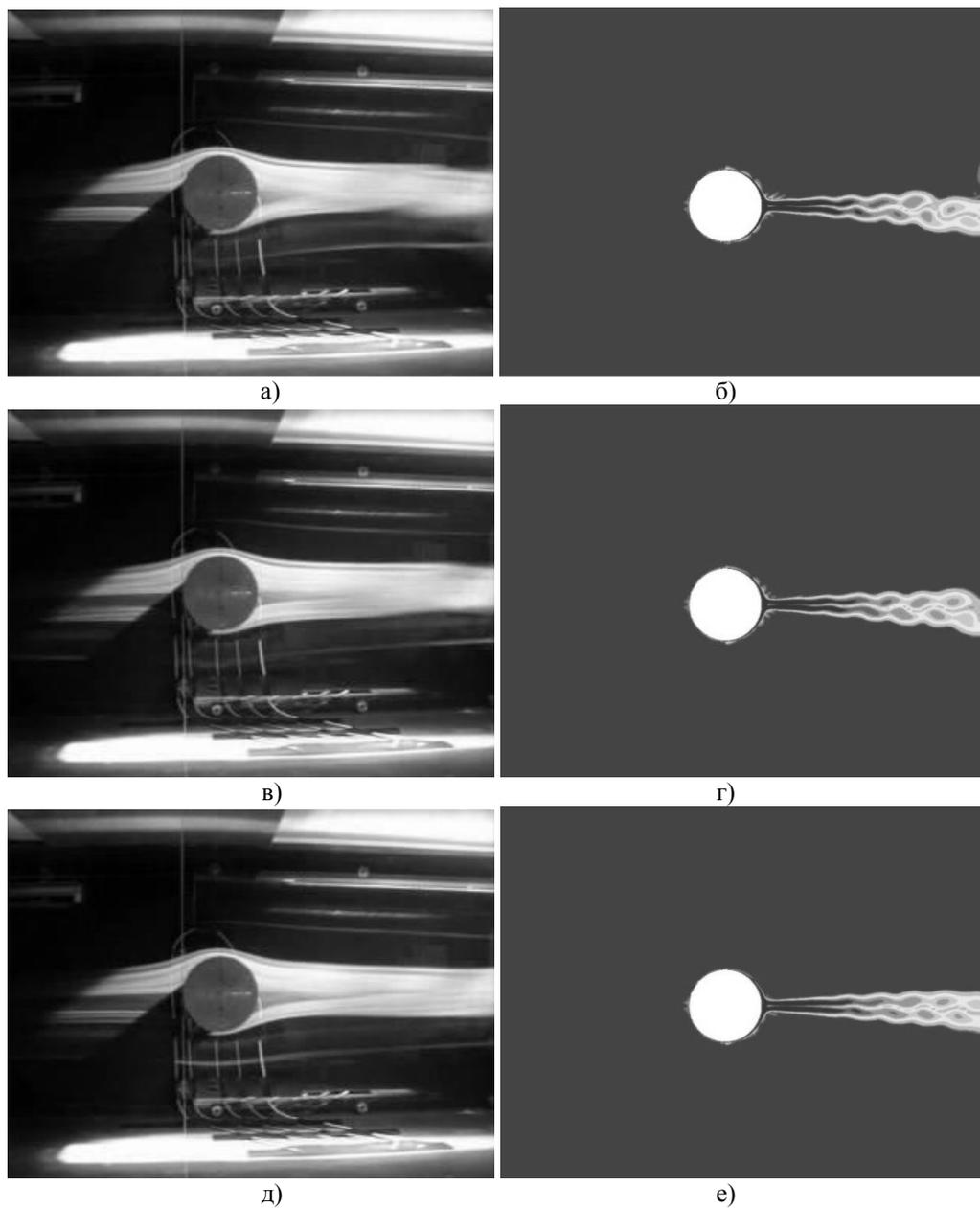


Рис. 5. Турбулентное обтекание цилиндра с включенными плазменными актуаторами для моментов безразмерного времени  $t = 42.0$  (а, б),  $t = 43.0$  (в, г),  $t = 44.0$  (д, е) (а, в, д – эксперимент [20], б, г, е – настоящая работа)

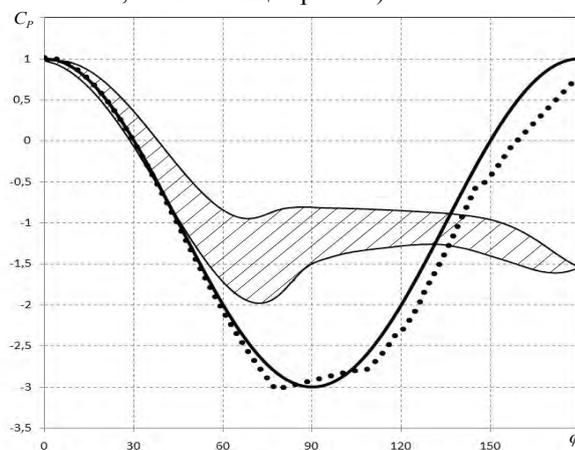


Рис. 6. Распределения коэффициента давления для различных режимов обтекания кругового цилиндра

**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.