

03

Управление воздушным потоком вокруг цилиндрической модели с помощью вращающейся электрической дуги во внешнем магнитном поле. Часть I

© Д.С. Мунхоз, В.А. Битюрин, А.И. Климов, П.Н. Казанский,
И.А. Моралев, Л.Б. Поляков, Б.Н. Толкунов

Объединенный институт высоких температур РАН,
124412 Москва, Россия
e-mail: dasmunhoz@yahoo.com.br

(Поступило в Редакцию 25 октября 2016 г.)

Изучены структура и динамика пристеночного газового потока вокруг цилиндрической модели, созданного электрической дугой во внешнем магнитном поле без набегающего потока. Для создания электрической дуги на модели использован комбинированный электрический разряд (слаботочный ВЧ разряд + сильноточный импульсно-периодический разряд). Постоянные магниты с индуктивностью $B \approx 0.1$ Т размещены внутри цилиндрической модели. Кольцевые электроды расположены на поверхности модели. Для изучения структуры и динамики пристеночного газового потока вокруг цилиндрической модели использованы высокоскоростная съемка, теневой и PIV-методы (Particle–Image–Velocity method).

DOI: 10.21883/JTF.2017.07.44668.2082

Введение

Изучение обтекания цилиндрического тела имеет большое значение для решения целого ряда прикладных задач. Параметры и характер обтекания такого тела зависят от числа Рейнольдса и числа Струхала. Нестационарное обтекание цилиндрического тела вызывает колебания инженерных конструкций и их резонанс (крыльев самолетов, высотных зданий, длинных мостов, кабелей и морских инженерных сооружений), создает акустический шум [1–4]. Хорошо известны различные методы управления потоком за обтекаемыми цилиндрическими телами: вращение поверхности самого тела (эффект Магнуса [5–11]), использование отсоса пограничного слоя [2], а также использование плазменных актуаторов (активных электроразрядных устройств) [12–24]. Основным достоинством плазменных актуаторов является их быстроедействие, основанное на электронном управлении параметрами электрических разрядов. Это свойство позволяет использовать плазменные актуаторы для управления параметрами потока вблизи обтекаемых тел и реализовывать обратные связи для контроля различных газодинамических возмущений в потоке вблизи обтекаемых тел. Например, с помощью таких актуаторов можно контролировать момент перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный, отрыв потока и др. Такие задачи являются типичными для новой области науки и техники, называемой магнитной плазменной аэродинамикой (МПА). Эта научная область появилась и начала бурно развиваться не более 30 лет назад. Важной задачей в МПА является управление циркуляцией потока вокруг обтекаемого тела, например вокруг цилиндра или крыла. Однако экспериментальных работ, посвященных этому вопросу, мало [12–24]. Настоящая работа восполняет пробел в этой области

и посвящена изучению создания циркуляции потока вокруг цилиндрической модели с помощью магнитоплазменного актуатора (МГПА) и ее обтекания внешним газовым потоком. Для создания циркуляции потока на цилиндре используется вращающаяся электрическая дуга во внешнем магнитном поле, создаваемая силой Лоренца. Электрическая дуга обеспечивает сопутствующее увлечение газового потока вблизи поверхности цилиндрической модели и поэтому может вызывать появление стимулированной циркуляции потока вокруг нее. При создании МГПА учитывался опыт, полученный в работе [23], по стимулированному перемещиванию топливно-воздушных смесей с помощью вращающейся электрической дуги во внешнем магнитном поле, а также опыт управления потоком на поверхности цилиндра с помощью плазменных актуаторов [12,14–17,19,22].

1. Экспериментальная установка

1.1. Аэродинамическая модель и МГПА

Аэродинамическая модель, используемая в настоящей работе, представляет собой цилиндр, выполненный из кварцевой трубки, диаметром 20 мм и длиной 95 мм с толщиной стенок 2 мм (рис. 1, а, 1). На модели устанавливался МГПА, который состоит из медных кольцевых электродов 2 для создания дугового электрического разряда на ее поверхности и встроенных цилиндрических постоянных магнитов 5. Электродные кольца размещены на расстоянии 10 мм друг от друга. Для привязки разряда в определенном месте модели электроды гальванически связаны с обострителями электрического поля 3, которые способствуют инициации разряда в заданной области модели. Кольцевые магниты из Nd–Fe–B 5 размещаются внутри кварцевой трубки таким образом,

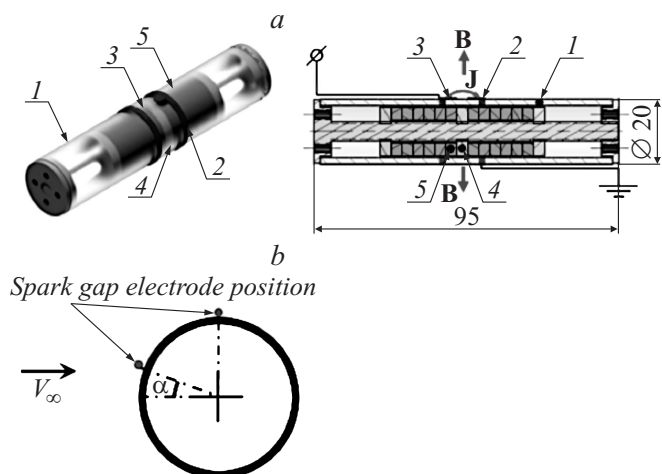


Рис. 1. Общий вид модели и схема МППА на цилиндрической модели с одним разрядным промежутком: 1 — кварцевая трубка, 2 — медное кольцо, 3 — обостритель, 4 — гайка и винт из полиамида, 5 — Nd-Fe-B магнит (а). Схема расположения обострителей на цилиндрической модели в позиции $\alpha = 5^\circ$ или 90° по отношению к направлению воздушного потока или к линии горизонта (при отсутствии потока) (б).

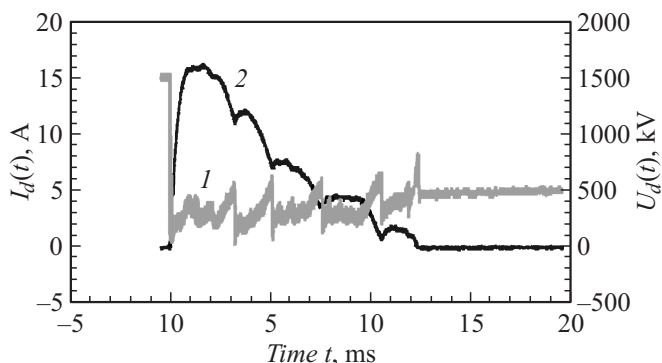


Рис. 2. Импульсный ток I_d (1) и напряжение U_d (2) в МППА. Импульсно-периодический режим.

чтобы создать зону радиального магнитного поля вблизи разрядной зоны на поверхности цилиндра. Внутри модели имеются шпилька и гайки 4, выполненные из диэлектрического материала полиамида-6 (капролона). Назначение этих деталей — удержание и крепление дисковых магнитов на определенном расстоянии между ними. Отметим, что имеется значительное отталкивание между одноименными полюсами этих магнитов, создающих радиальное магнитное поле. Измеренная индукция магнитного поля на поверхности модели (между электродами) достигает величины $B \approx 0.1$ Т.

1.2. Источники питания для аэродинамической модели

Для создания электрического дугового разряда был разработан и испытан высоковольтный источник питания. В настоящем МППА использовались два ти-

па источников питания: источник постоянного тока (DC-генератор), а также источник питания для создания мощного импульсно-периодического разряда. Для инициации этих разрядов использовался высоковольтный импульсный разряд, созданный ВЧ генератором Теслы. Технические характеристики источника импульсно-периодического разряда были следующие: частота повторения импульсов $F_i < 3$ kHz, максимальное напряжение на выходе источника питания $U_{max} < 20$ kV, максимальный ток разряда $I_{max} \leq 30$ А, максимальная импульсная мощность $P_{max} < 8$ kW, средняя мощность $P_{med} \leq 200$ W.

Технические характеристики двух DC-генераторов были следующие:

1. $U_{max} < 8$ kW, $I_{max} \leq 2$ А, $P_{med} \leq 2$ kW.
2. $U_{max} < 15$ kW, $I_{max} \leq 0.64$ А, $P_{med} \leq 0.6$ kW.

Для измерения электрического тока и напряжения были использованы датчики Tektronix P6021 и Tektronix P6015A.

На рис. 2 показаны типичные сигналы напряжения и тока, измеренные на разрядном промежутке МППА на цилиндрической модели в экспериментах по визуализации потока. Видно, что максимальная величина импульсного тока на поверхности модели достигает значения порядка $I_{max} \approx 16$ А, длительность силового импульса составляет $T_i = 12$ ms, частота повторения импульсов равна $F_i = 7$ Hz. Амплитуда электрического напряжения составляет $U_d = 1.5$ kV. Величина импульсной мощности может достигать порядка $P_{max} \leq 8$ kW, средняя мощность $P_{med} \approx 200$ W.

Параметры импульсно-периодического разряда в экспериментах по измерению силовых аэродинамических характеристик модели были следующие: импульсно-периодический ток $I_{max} \sim 30$ А, длительность импульса $T_i < 1$ ms, частота повторения импульсов $F_i < 1200$ Hz, напряжение разряда $U_d < 4.4$ kV.

1.3. Аэродинамические трубы и оптическая система визуализации газового потока

В экспериментах использовались две аэродинамические трубы (АДТ-1 и АДТ-2).

Технические характеристики АДТ-1. Рабочая секция аэродинамической трубы АДТ-1 выполнена из диэлектрического материала (полиамид-6) и имеет наружные размеры $500 \times 200 \times 250$ mm. Внутреннее сечение этой секции имеет размеры 100×100 mm. Эта секция оснащена кварцевыми окнами диаметром 200 mm и толщиной 10 mm. Цилиндрическая аэродинамическая модель с актуатором была приклеена на кварцевом окне. В АДТ-1 создается воздушный поток со скоростью до 20 m/s ($Re \approx 2.6 \cdot 10^4$). Измерения скорости воздушного потока проводились с помощью термоанемометра. Теневые измерения индуцированной циркуляции вокруг цилиндрической модели в режиме без внешнего потока и с потоком и ее обтекания с работающим МППА были выполнены именно на этой аэродинамической трубе АДТ-1.

Технические характеристики АДТ-2. Измерение силы сопротивления и подъемной силы было проведено именно на этой установке. Экспериментальная установка АДТ-2 состоит из следующих узлов и блоков: аэродинамическая модель, источник питания и многоосный силовой датчик MC15-3B (аэродинамические весы). Измерение силы сопротивления и подъемной силы, действующих на модель, осуществлялось с помощью датчика MC15-3B и динамического преобразователя Tenzo-M ПД-004. Обработка полученных сигналов осуществлялась с помощью программы LabVIEW. Частота опроса датчика силы в этом эксперименте была $f_m = 115.2 \text{ kHz}$. Оценка ошибки измерения силы составляет 10% или 0.04 Н. Аэродинамическая труба АДТ-2 позволяет получать воздушный поток со скоростями до 70 м/с (максимальное число $Re \approx 9 \cdot 10^4$ намного выше, чем на установке АДТ-1). Уровень турбулентности на входе в рабочую часть этой трубы был малым и не превышал 0.02%. Относительная ошибка определения скорости потока составляет 3%. Все части АДТ-2 были металлическими, за исключением рабочей секции установки, которая сделана из диэлектрического материала полиметилметакрилата (органическое стекло). Эта секция имеет герметические высоковольтные разъемы, которые позволяют подключать источник питания к аэродинамической модели.

Диагностическое оборудование АДТ-1 и АДТ-2. Теневая установка включает в себя: эксимерный KrF-лазер, зеркала, объективы и экран для проецирования изображения. Эксимерный лазер имеет длину волны $\lambda = 248 \text{ nm}$, длительность импульса 10 ns, импульсную энергию 10 mJ. Оптическое изображение газовых неоднородностей на экране регистрируется высокоскоростной видеокамерой.

Ряд экспериментов был выполнен с помощью теневой техники с диодным лазером типа TD ГП 130, который имел следующие характеристики: средняя мощность 200 mW, длина волны $\lambda = 532 \text{ nm}$.

PIV-измерения индуцированной циркуляции вокруг цилиндрической модели в режиме без внешнего потока и с потоком и ее обтекания с МГПА выполнялись только на аэродинамической трубе АДТ-2.

Стандартный 2D-PIV метод используется для измерения двух компонентов скорости в средней плоскости между кольцевыми электродами. В эксперименте используется одна ПЗС камера и система PIV LaVision FlowMaster. Запись изображения производится в режиме двойных синхронизированных кадров. Имеется также привязка этих кадров к началу времени включений электрического тока. Время задержки между лазерными импульсами составляет 7 ms. Затем используется автоматизированный расчет обработки векторов с использованием стандартного алгоритма кросскорреляции быстрого преобразования Фурье (FFT). Количество измерений для усреднения каждой PIV-картины — 70.

2. Экспериментальные результаты

Особое внимание в экспериментах уделялось изучению динамики и структуры дугового разряда на модели в воздушном потоке и без него. В настоящей работе рассмотрены экспериментальные результаты для режима без внешнего набегающего потока.

2.1. Режим дугового разряда постоянного тока во внешнем магнитном поле без потока

Динамика и структура вращающейся плазменной дуги на цилиндрической модели изучались в этом режиме с помощью теневого метода с диодным лазером. На рис. 3 показаны типичные теневые снимки движения электри-

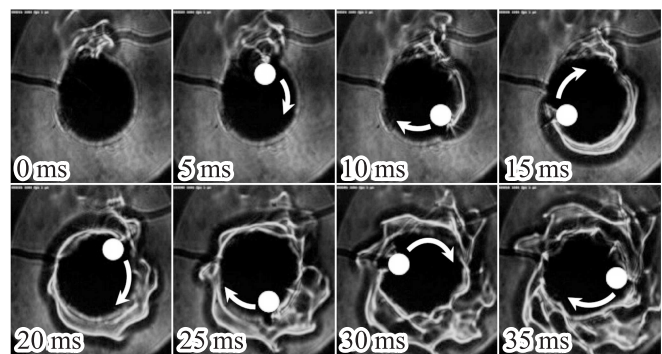


Рис. 3. Движение дугового разряда вокруг цилиндрической модели во внешнем магнитном поле во времени без внешнего потока. Постоянный ток $I_d = 0.64 \text{ A}$. Белый кружок обозначает положение головной части дугового разряда.

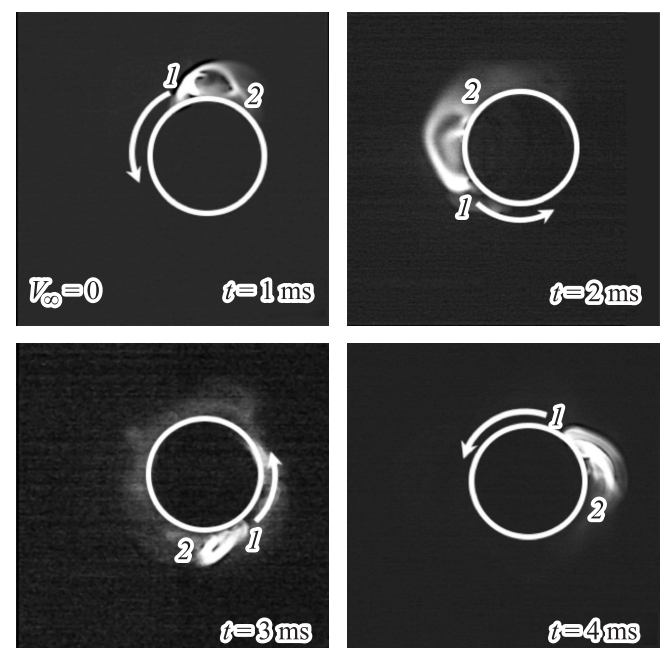


Рис. 4. Движение дугового разряда на модели без внешнего потока при импульсно-периодическом разряде. Расстояние между кадрами 1 ms. 1 — головная часть дугового разряда, 2 — хвостовая часть дугового разряда.

ческой дуги вокруг модели без внешнего потока, созданной разрядом постоянного тока $I_d = 0.64$ А (средняя мощность менее 0.6 kW). На этих снимках хорошо видны газодинамические неустойчивости на поверхности нагретых спиральных рукавов. Кроме того, можно видеть процесс „подныривания“ головной части вращающейся дуги под слой горячего газа, нагретого предыдущим ее циклом вращения дуги, и последующее формирование спиральной структуры.

Особенности структуры электрического разряда и его движение вокруг цилиндра при импульсно-периодическом подводе энергии к нему без внешнего потока изучались с помощью высокоскоростной видеокамеры Motion Pro. Типичные кадры, полученные в этом эксперименте, показаны на рис. 4. Видно, что происходит формирование головы разряда и его хвоста, связанное, по-видимому, с наличием различных скоростей скольжения разряда по анодному и катодному электродам. Средняя часть разряда приподнимается над поверхностью модели. Причина такого подъема не ясна и требует дополнительного исследования.

2.2. PIV-измерение поля течения вокруг цилиндрической модели с работающим МГПА

С помощью метода PIV было измерено поле скоростей $V(X, Y)$ газового потока вблизи поверхности цилиндрической модели, индуцированное вращающейся электрической дугой, созданной импульсно-периодическим разрядом во внешнем магнитном поле (рис. 5). Обостритель разряда находится в положении $\alpha = 5^\circ$. Из рис. 5 следует, что плазменная дуга устойчиво вращается вокруг цилиндра в этом режиме. Средняя скорость индуцированного течения достигает $V_i \approx 8$ m/s. Типичная толщина слоя завихренного потока составляет $h \sim 10$ mm.

С помощью комбинированного PIV-метода и скоростной видеосъемки в этом эксперименте было обнаружено, что:

- электрическая дуга имеет сложный трехмерный вид. Головная часть разряда обгоняет ее хвост. Цен-

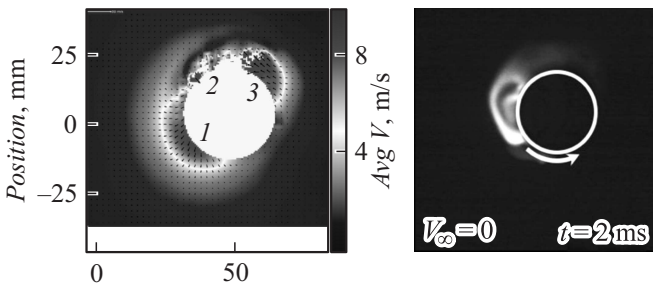


Рис. 5. Усредненная PIV-картина полей скоростей вокруг цилиндра с вращающейся плазменной дугой, созданной импульсно-периодическим разрядом, и соответствующий кадр скоростного видеофильма с вращающейся электрической дугой. Время после зажигания разряда 2 ms. Режим — без внешнего потока.

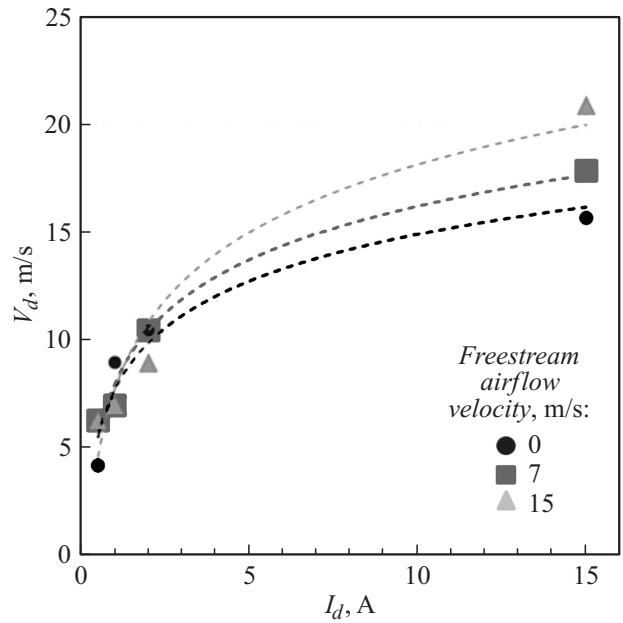


Рис. 6. Зависимость линейной скорости вращающейся дуги V_d на поверхности от величины разрядного тока I_d .

тральная часть разряда поднимается над поверхностью модели. Типичная высота такого подъема может достигать $h_d \sim 10–15$ mm. Отметим, что эта величина значительно превышает соответствующую высоту подъема дуги над поверхностью в разряде постоянного тока (см. разд. 2.1);

- головная часть разряда расталкивает газ в радиальном направлении (I , рис. 5). Как следствие, концентрация пылевых частиц, используемых в PIV-методе, в зоне разряда резко уменьшается. Поэтому, обработка PIV-результатов в этой зоне затруднена (2, рис. 5);

- за зоной разряда формируется зона подсоса (3, рис. 5) окружающего газа и формирование гигантского вихря;

- пристеночная закрутка газа вокруг цилиндра реализуется самой дугой и зоной подсоса газа в ее хвостовой части;

- соотношение радиальной и окружной скорости газа вблизи модели изменяется с уменьшением разрядного тока.

В эксперименте была получена зависимость линейной скорости вращения электрической дуги V_d на поверхности цилиндра во внешнем магнитном поле без внешнего потока и при его наличии (см. разд. 2). Экспериментальная зависимость скорости вращающейся дуги на поверхности цилиндра от величины разрядного тока показана на рис. 6. Было обнаружено, что линейная скорость вращения дугового разряда без потока увеличивается при возрастании величины разрядного тока. Важно заметить, что зависимость скорости вращения дуги является линейной только в интервале $I_d < 3$ А.

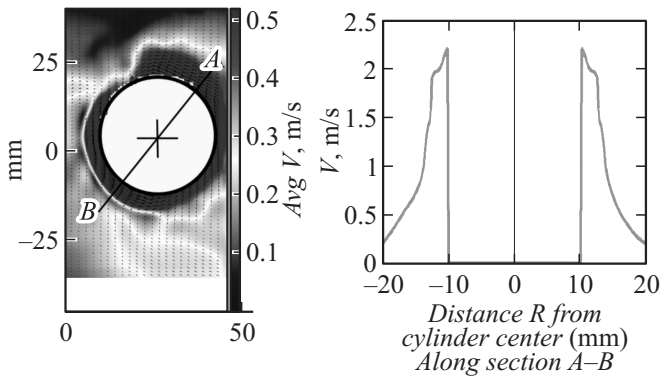


Рис. 7. Усредненное поле скоростей $V(X, Y)$ вокруг цилиндрической модели, созданное вращающейся электрической дугой. Постоянный ток $I_d = 0.64$ А. Режим — без внешнего потока.

Поле скоростей вблизи поверхности цилиндра, индуцированного вращающейся электрической дугой в магнитном поле при постоянном токе $I_d = 0.64$ А, показано на рис. 7. Получено, что в этом режиме средняя скорость индуцированного вихревого течения вблизи поверхности модели составляет $V_i \approx 2.0$ м/с. Типичная толщина возмущенного завихренного пристеночного слоя газового потока составляет $h \leq 2.5$ мм. Анализ теневых снимков, температуры дуги [19–23] и PIV-кадров позволил сделать вывод, что во всем пристеночном слое вокруг цилиндра, за исключением зоны вблизи электрической дуги, реализуется режим слабо сжимаемого течения (а именно имеются малые изменения плотности и скорости потока, $\delta/\rho_0 \ll 1$, $\delta V/V_0 \ll 1$, где ρ_0 — плотность воздуха, V_0 — скорость потока). Величина циркуляции Γ внутри пристеночного слоя толщиной $h \leq 2.5$ мм может быть определена с помощью следующего выражения [25]:

$$\begin{aligned} \Gamma &= \iint_S (\nabla \times V) ds \\ &= \int_0^{2\pi} \int_{R_0}^{R_0+h} (\nabla \times V) R_0 d\theta dr \approx 0.0124 \text{ м}^2/\text{с}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_0 = 10$ мм и $h = 2.5$ мм. Член в скобках под знаком интеграла (завихренность потока ξ) связан с величиной угловой скорости потока ω по формуле из работы [25]:

$$\xi = \nabla \times V = \text{Rot } V = 2\omega. \quad (2)$$

В эксперименте был обнаружен важный результат: значение индуцированной скорости пристеночного газового потока вблизи поверхности модели V_i в 1.5–2.5 раза меньше, чем значение характерной скорости электрической дуги V_d вокруг цилиндра. Этот факт необходимо учитывать при оценке эффективности работы МГПА.

Заключение

1. Созданный МГПА способен эффективно создавать вихревое течение в пристеночном слое вокруг цилиндрической модели как в режиме разряда постоянного тока, так и в режиме импульсно-периодического разряда во внешнем магнитном поле. Величина максимальной скорости в таком индуцированном вихревом потоке зависит от силы тока, создающего вращающуюся электрическую дугу, которая имеет сложную трехмерную геометрию.

2. Важно отметить, что типичная ширина энтропийного вихревого газового потока, возмущенного электрической дугой, вокруг цилиндра составляет величину порядка 10 мм и существенно превышает светящуюся зону электрической дуги, диаметр которой не превышает 1 мм.

3. В будущих экспериментах планируется использовать скоростную 3D-съемку и 3D-PIV для детального изучения структуры и динамики электрической дуги и индуцированного вихревого потока вокруг цилиндра.

Работа поддержана Международным фондом CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Бразилия), в рамках Программы „Наука без границ“, 2012–2015 гг. (грант CNPq 200205/2012-9).

Список литературы

- [1] Williamson C.H.K. // An. Rev. Fluid Mech. (1996). Vol. 28. P. 477–539.
- [2] Schlichting H., Gester K. // Boundary Layer Theory. 8th Edition, Springer, 2000. 824 p.
- [3] Zdravkovich M.M. // Flow Around Circular Cylinders. Vol. 1. 672 p.; Vol. 2. 1264 p. Oxford Science Publications, 1997.
- [4] Tropea C., Yarin A., Foss J.F. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. (2007). 1557 p.
- [5] Hoerner S.F., Borst H.V. Fluid-Dynamic Lift: Practical Information on Aerodynamic and Hydrodynamic Lift. Brick Town, NJ. L.A. Hoerner: Hoerner Fluid Dynamics, 1975. 505 p.
- [6] Mittal S. // J. Appl. Mech. (2004). Vol. 71. N 1.
- [7] Thouault N., Breitsamter J.S., Badalamenti C., Prince S.A., Adams N.A. // Proc. of the 27th Intern. Cong. Aeronautical Sciences. 2010.
- [8] Tokumaru P.T., Dimotakis P.E. // J. Fluid Mech. 1993. Vol. 255. P. 1–10.
- [9] Carstensen S., Mandviwalla X. // J. Ocean and Wind Energy. 2014. Vol. 1. N 1. P. 41–49.
- [10] Asrokin A., Rizal Ramly M., Ahmad A.H. 2nd Intern. Conf. on Mechanical Engineering Research. 2013.
- [11] Yuan J.K., Olinger D.J. 20th AIAA Applied Aerodynamics Conf. Sessions of Unsteady Aerodynamics. St. Louis, 2002. AIAA-2002–3057.
- [12] Biturin V.A., Kazansky P.N., Klimov A.I., Moralev I.A. // Proc. Join EROCOFTAC-PLASMAERO Workshop. Toulouse, France, 2012. P. 8.

- [13] *Moralev I.A., Bityurin V.A., Kasansky P.N., Klimov A.I., Chertov D.* Proc. of the 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference in conjunction with the 18th International Conference on MHD Energy Conversion (ICMHD). Honolulu, Hawaii, 2011. AIAA P. 2011-3733.
- [14] *Климов А.И., Казанский П.Н., Моралев И.А.* // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 346–353.
- [15] *McLaughlin T., Munska M., Vaeth J., Dauwalter T., Goode J., Siegel S.* // 2004. AIAA. P. 2004-2129.
- [16] *Thomas F.O., Kozlov A., Corke T.C.* // AIAA J. 2008. Vol. 46. N 8.
- [17] *Jukes T.N., Choi K.* // Phys. Fluid. 2009.
- [18] *Leroy A., Podlinski J., Devinant P., Aubrun S.* // Proc. of the 6th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). Krakow. 2015.
- [19] Автореф. канд. дис. *Казанский П.Н.* Управление потоком вблизи аэродинамических тел с помощью плазменного высокочастотного актуатора: МЭИ, 2012.
- [20] Автореф. канд. дис. *Моралев И.А.* Взаимодействие газоразрядной плазмы с закрученными течениями: ОИВТ РАН, 2010.
- [21] Автореф. докт. дис. *Бочаров А.Н.* Физические и численные модели магнитоплазменной аэродинамики: ОИВТ РАН, 2011.
- [22] *Битюрин В.А., Завершинский И.П., Климов А.И., Молевич Н.Е., Моралев И.А., Мунхоз Д., Поляков Л.Б., Порфирьев Д.П., Судак С.С.* // ТВТ. 2016. Т. 54. № 4. С. 1–4.
- [23] *Bityurin V., Bocharov A.* // Proc. of the 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, USA, AIAA-2001-0793.
- [24] *Piqueras L., Henry D., Jeandel D., Scott J., Wild J.* // Intern. J. Heat Mass Transfer, 2008. Vol. 51. P. 4973–4984.
- [25] *Anderson J.D.* Fundamentals of Aerodynamics, 6th McGraw-Hill Education, 2016. 1152 p.