

03

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

© Д.С. Мунхоз,<sup>1</sup> И.П. Завершинский,<sup>3</sup> А.И. Климов,<sup>1</sup> П.Н. Казанский,<sup>1</sup> Н.Е. Молевич,<sup>2,3</sup>  
И.А. Моралев,<sup>1</sup> Л.Б. Поляков,<sup>1</sup> Д.П. Порфирьев,<sup>2,3</sup> С.С. Сугак,<sup>3</sup> Б.Н. Толкунов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН,  
124412 Москва, Россия

<sup>2</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (филиал),  
443011 Самара, Россия

<sup>3</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева,  
443086 Самара, Россия  
e-mail: dasmunhoz@yahoo.com.br

(Поступило в Редакцию 25 октября 2016 г.)

Изучено влияние закрутки пристеночного газового потока вокруг цилиндрической модели, индуцированной магнитно-плазменным актуатором, на ее обтекание внешним дозвуковым газовым потоком.

### Введение

В предыдущей работе [1] были описаны результаты экспериментальных измерений по изучению структуры и динамики пристеночного завихренного газового потока вокруг цилиндрической модели, индуцированного вращающейся электрической дугой в магнитном поле, без внешнего потока. В настоящей работе изучалось влияние закрутки пристеночного газового потока вокруг цилиндрической модели, индуцированной магнитно-плазменным актуатором (МГПА), на ее обтекание внешним дозвуковым газовым потоком ( $M < 0.2$ ,  $Re < 9 \cdot 10^4$ ). В эксперименте измерялись: профиль потока вокруг цилиндра, аэродинамические силы, действующие на цилиндр (сила сопротивления и подъемная сила). Для измерения профиля скорости возмущенного потока вокруг цилиндра использовались высокоскоростная съемка, теневой и PIV-методы.

Для изучения обтекания цилиндра с работающим МГПА использовалась модель с четырьмя разрядными промежутками (рис. 1). В этой модели плазма максимально покрывала ее поверхность, что позволило измерить аэродинамические силы, действующие на эту модель.

### Режим вращения дугового разряда во внешнем магнитном поле на цилиндрической модели, обтекаемой воздушным потоком

На рис. 2 показан интегральный снимок обтекания цилиндрической модели с вращающейся дугой и четырьмя разрядными промежутками. Обостритель разряда на модели располагается в положении угла атаки  $\alpha = 5^\circ$  по отношению к направлению воздушного потока. Величина максимального импульсного тока на поверхно-

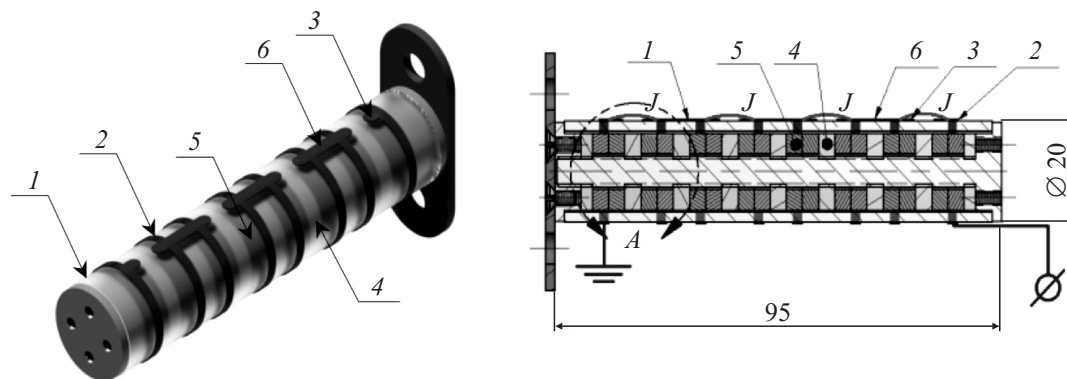
сти модели достигает значения порядка  $I_{\max} \sim 16$  А в этом эксперименте. Длительность силового импульса составляет  $T_i < 3$  мс. Характерное число Рейнольдса набегающего потока  $Re \approx 6 \cdot 10^3$  ( $V_\infty \approx 5$  м/с).

Экспериментальные данные по измерению линейной скорости вращающейся дуги по поверхности обтекаемого цилиндра, полученные в этом эксперименте, приведены на рис. 3. Из рисунка следует, что максимальная достигнутая скорость дуги составляет  $V_i \approx 20$  м/с при величине максимального импульсного тока порядка 16 А. Обнаружено, что значение скорости вращения дуги без внешнего потока и с ним близки друг другу.

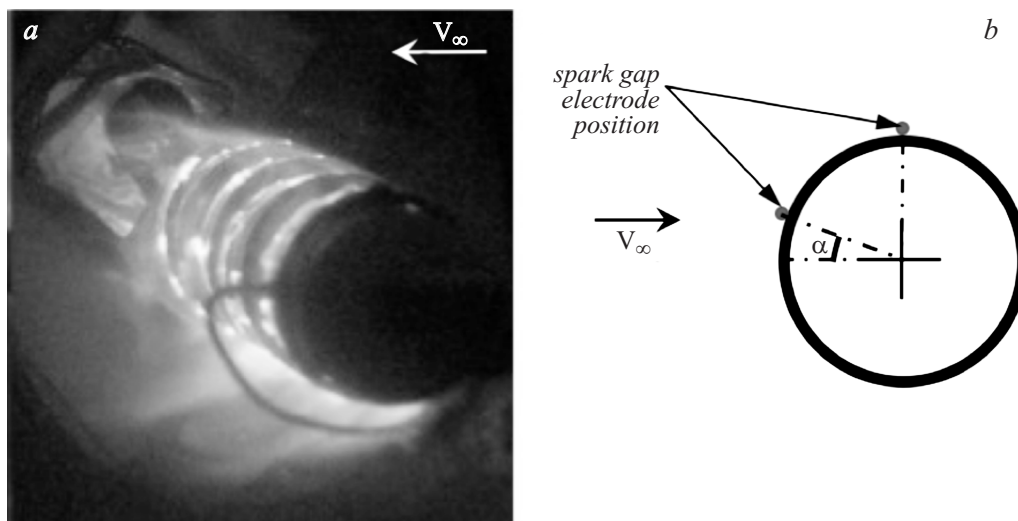
### PIV-измерения поля течения вокруг обтекаемой модели с работающим МГПА

Усредненное поле скоростей вокруг цилиндрической модели с работающим МГПА обтекаемым внешним потоком со скоростью  $V_\infty \approx 6$  м/с ( $Re \approx 7.4 \cdot 10^3$ ), показано на рис. 4. В этих экспериментах использовался источник питания с постоянным током  $I_d = 0.64$  А. Из рисунка следует, что в этом эксперименте реализуется значительное изменение положения точки отрыва потока на модели. Смещение точки отрыва потока может достигать угла  $\Delta\theta = 40^\circ$ .

Для того чтобы изучить влияние МГПА на отрыв потока, на модели использовался режим внешней синхронизации видеосъемки и PIV-установки. Измеренная частота вращения дугового разряда в этом эксперименте составляла  $F_r \approx 290$  Hz. В этом эксперименте использовался импульсно-периодический разряд со следующими характеристиками:  $F_i = 7$  Hz,  $U_{\max} < 15$  kV,  $I_{\max} < 30$  А,  $P_{\max} < 70$  kW,  $P_{\text{med}} = 200$  W. На рис. 5 показаны типичные сигналы напряжения и тока, измеренные на разрядном промежутке МГПА. Скорость воздушного



**Рис. 1.** Общий вид и схема цилиндрической модели с многозвенным МГД актуатором: 1 — кварцевая трубка, 2 — медное кольцо, 3 — обостритель, 4 — диэлектрическая гайка и шпилька из полиамида, 5 — Nd-Fe-B-магниты, 6 — соединяющая перемычка между электродными кольцами.



**Рис. 2.** Интегральный кадр обтекания модели с вращающейся дугой с четырьмя разрядными промежутками (а). Скорость воздушного потока порядка  $Re \sim 6.2 \cdot 10^3$  ( $V_\infty \sim 5$  м/с). Схема расположения обострителей на цилиндрической модели в позиции  $\alpha = 5^\circ$  или  $\alpha = 90^\circ$  по отношению к направлению воздушного потока (b).

потока составляла  $Re = 8 \cdot 10^3$  ( $V_\infty = 6.5$  м/с). Обостритель находился в положении  $\alpha = 5^\circ$ . Поле скоростей вблизи обтекаемой цилиндрической модели с работающим МГПА во внешнем потоке в этом режиме показано на рис. 6. Количество измерений для усреднения каждой PIV-картины — 70. При этих условиях обнаружено значительное влияние вращающейся дуги на обтекание самой модели. На рис. 6 показано поле течения вокруг обтекаемой модели с МГПА при завершении второго оборота дуги вокруг модели. В этом режиме возмущается все поле скоростей вокруг модели, в том числе в ее головной части и донной частях. На рисунке имеется также синхронное видеоизображение вращающегося разряда в соответствующий момент времени. Из анализа этого рисунка также следует, что изменение циркуляции потока вокруг модели происходит как в головной части дугового разряда (1), так и в его хвостовой

части (2). Отметим, что зона стимулированной циркуляции пристеночного потока имеется и в донной области модели. При этом практически отсутствует отрыв потока в этой области вплоть до углов  $\theta \approx 260^\circ$ . Этот результат позволяет определить усредненное поле индуцированной завихренности вокруг модели в данном эксперименте. Анализ теневых снимков, температуры дуги [2–5] и PIV-кадров позволяет сделать вывод, что во всем слое пристеночного потока вокруг цилиндра, за исключением зоны вблизи электрической дуги, реализуется режим слабо сжимаемого течения (имеются малые изменения плотности,  $\delta\rho/\rho_0 \ll 1$ , где  $\rho_0$  — плотность воздуха, и мало изменение скорости индукционного потока,  $\delta V/V_0 \ll 1$ , где  $V_0$  — скорость потока).

Оценим стимулированную циркуляцию потока вблизи цилиндра с работающим МГПА в этом эксперименте (рис. 6). Величина стимулированной циркуляции  $\Gamma$

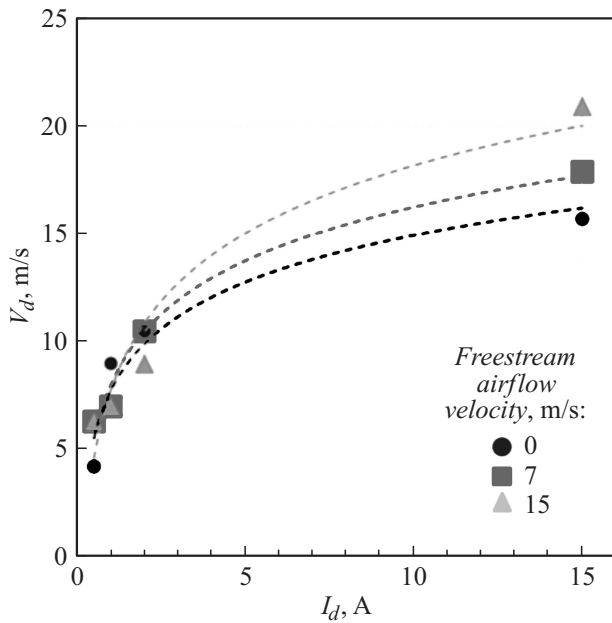


Рис. 3. Зависимость линейной скорости вращающейся дуги  $V_d$  на поверхности от величины разрядного тока  $I_d$ .

вблизи поверхности цилиндра определялась с помощью следующего выражения [1]:

$$\Gamma = \int_S (\nabla \times V) dS = \int_0^{2\pi} \int_{R_0}^{R_0+h} (\nabla \times V) R_0 d\theta dr \approx 0.095 \text{ m}^2/\text{s}, \quad (1)$$

где  $R_0 = 10 \text{ mm}$  и  $h = 4 \text{ mm}$ .

Значение стимулированной завихренности потока вокруг модели ([1], (2)) получилось равной  $\xi \approx 2000 \text{ s}^{-1}$ , где

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

Такое большое значение завихренности  $\xi$  по сравнению с работой [1] было получено вследствие использования разряда с высокой величиной импульсного тока в эксперименте.

## Измерение силовых характеристик модели

Измерения аэродинамических характеристик цилиндрической модели с работающим МГПА проводились на аэродинамической трубе АДТ-2 [1]. На этой модели размещались четыре разрядных промежутка. Параметры настоящих экспериментов были следующие: импульсный ток  $I_{\max} \approx 30 \text{ A}$ , длительность импульса  $T_i < 1 \text{ ms}$ , частота повторения импульсов  $F_i < 1200 \text{ Hz}$ , напряжение

разряда  $U_d < 4.4 \text{ kV}$ , скорость воздушного потока изменялась от 10 до 74 m/s, инициатор разряда располагался в положениях  $\alpha = 5^\circ$  или  $90^\circ$ .

Было обнаружено, что:

1. Подъемная сила была практически равной нулю, когда МГПА не был включен.

2. Сила сопротивления не изменялась при включении МГПА (с точностью до 10%).

3. Подъемная сила достигала больших значений  $L = 0.37 \text{ N}$  при включении МГПА.

Типичные сигналы с датчика подъемной силы показаны на рис. 7, а. Обнаружено, что величина подъемной силы  $L$  для модели с работающим МГПА всегда отлична от нуля. Ее величина зависит от величины стимулированной циркуляции пристеночного потока на модели.

При положении инициатора на цилиндре  $\alpha = 90^\circ$  величина подъемной силы увеличивалась до  $L = 0.45 \text{ N}$ .

Оценим величину безразмерного коэффициента подъемной силы

$$C_{L,\text{exp}} = L/(\rho_\infty V_\infty^2 wd/2) \approx 0.3, \quad (3)$$

где размер плазменной зоны между четырьмя электродными промежутками на цилиндре  $w = 40 \text{ mm}$ , диаметр модели  $d = 20 \text{ mm}$ , величина измеренной подъемной силы  $L = 0.37 \text{ N}$  и  $V_\infty = 52 \text{ m/s}$  ( $\text{Re} \approx 6.4 \cdot 10^4$ ).

При положении инициатора на цилиндре  $\alpha = 90^\circ$  оценка величины  $C_L$  достигает величины 0.6.

## Обсуждение полученных результатов

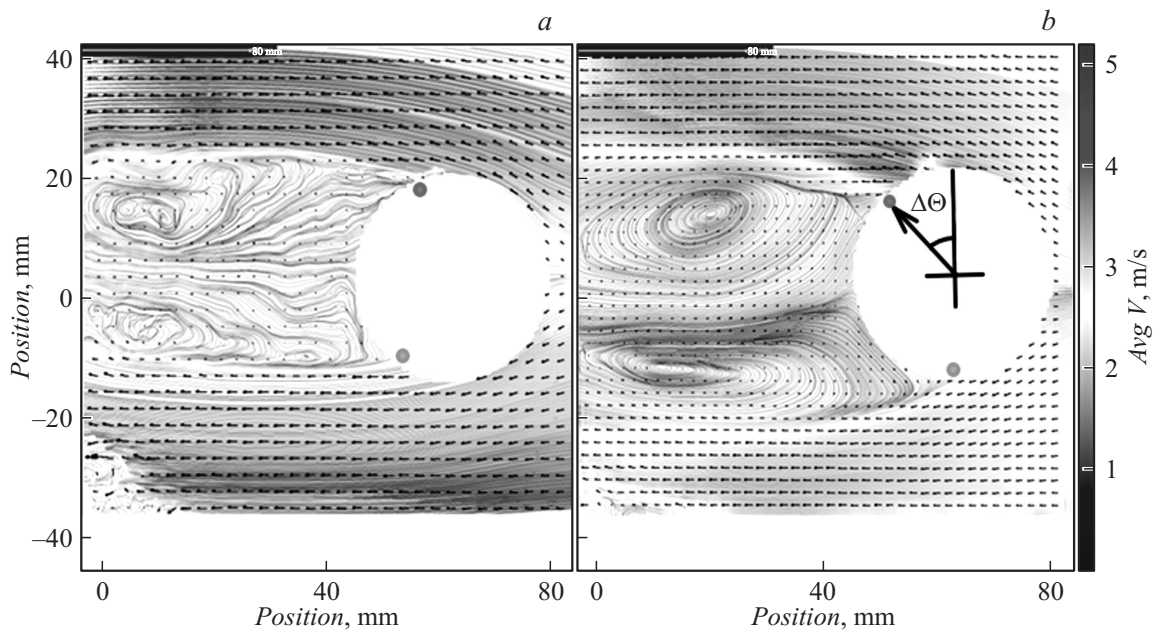
На рис. 6 отчетливо видно, что имеется несимметричное обтекание цилиндра, вызванное индуцированной циркуляцией потока вокруг модели, созданного вращающейся электрической дугой. Такое несимметричное обтекание модели внешним газовым потоком может привести к возникновению боковой подъемной силы цилиндра. Практическое отсутствие отрыва потока на модели и слабо сжимаемый режим течения пристеночного газа в этом эксперименте [1] позволяют сделать упрощенные оценки величины подъемной силы (модифицированной силы Жуковского) и величины коэффициента подъемной силы  $C_{L,t}$  за счет создания стимулированной циркуляции  $\Gamma$  на основании формулы из работы [6]:

$$C_{L,t}(t) = 2\Gamma(t)/(V_\infty d) + \{2R[d\Gamma(t)/dt]\}/(V_\infty^2) + C_{lw}^{(v)}, \quad (4)$$

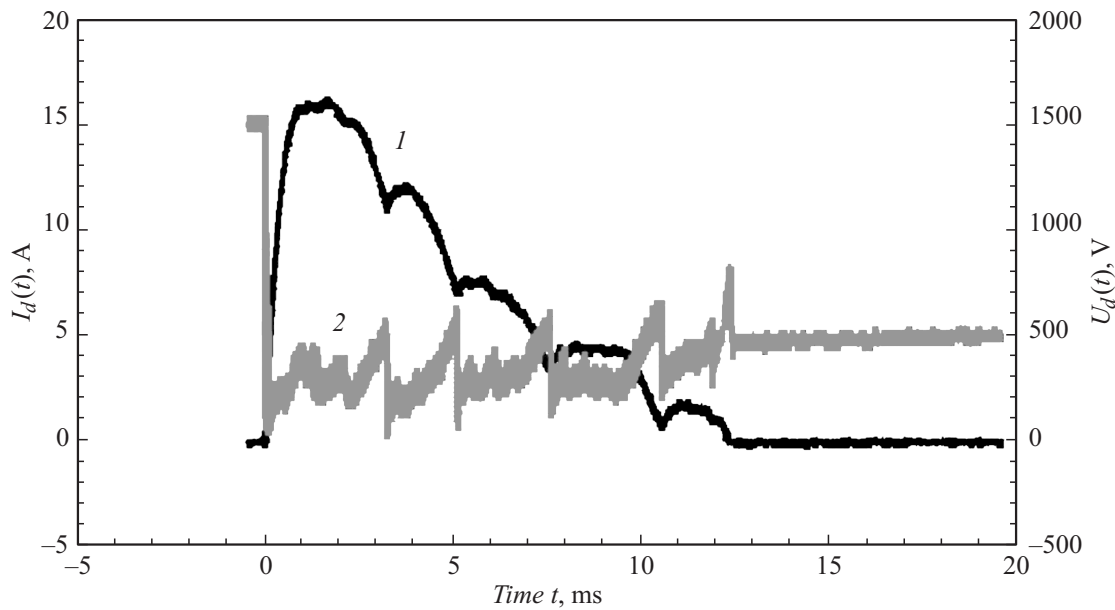
где первый член — квазистационарный коэффициент подъемной силы  $C_{L,u}$ , второй — нестационарная сила и третий — вихревая сила. Будем считать, что  $C_{L,u}$  можно рассматривать как первое приближение для определения полного коэффициента подъема силы цилиндрической модели. Его величина достигает значения

$$C_{L,u} = 2\Gamma/(V_\infty d) \approx 0.2, \quad (5)$$

где  $\Gamma = 0.095 \text{ m}^2/\text{s}$  (3),  $V_\infty = 42 \text{ m/s}$  ( $\text{Re} \approx 5.2 \cdot 10^4$ )



**Рис. 4.** Среднее поле скоростей вокруг цилиндрической модели, измеренное PIV-методом. *a* —  $Re \approx 7.4 \cdot 10^3$  ( $V_\infty \approx 6$  m/s); *b* — режим с работающим МГПА, разряд постоянного тока  $I_d \approx 0.64$  А.



**Рис. 5.** Импульсный ток  $I_d$  (1) и напряжение  $U_d$  (2) в МГПА.

Удивительно, что величина расчетного значения  $C_{L,u}$  вычисленная по формуле (5) оказалась близкой к экспериментальному значению  $C_{L,exp} \approx 0.3$ . Их близкие значения позволяют предположить, что наши допущения, используемые при оценке  $C_{L,u}$ , являются правдоподобными. Детальное изучение этого вопроса будет проведено в наших следующих работах.

Можно оценить величину безразмерного коэффициента числа Струхалия в этом эксперименте

$$St^* = fD/V = 0.4 \quad (6)$$

при размере плазменной зоны между четырьмя электродными промежутками на цилиндре  $w = 40$  mm, диаметре модели  $D = 20$  mm, положении инициатора разряда  $\alpha = 5^\circ$ , величине подъемной силы  $L = 0.37$  N, частоте повторения разрядных импульсов  $F_i \approx 1$  kHz и  $Re \approx 6.4 \cdot 10^4$ . ( $V_\infty = 52$  m/s).

При положении инициатора  $\alpha = 90^\circ$  и величине  $C_L \approx 0.6$  число Струхалия достигает  $St^* = 0.25$ .

Отсюда следует, что экспериментальные значения чисел Струхалия  $St^* = 0.25-0.4$  близки к нижнему кри-

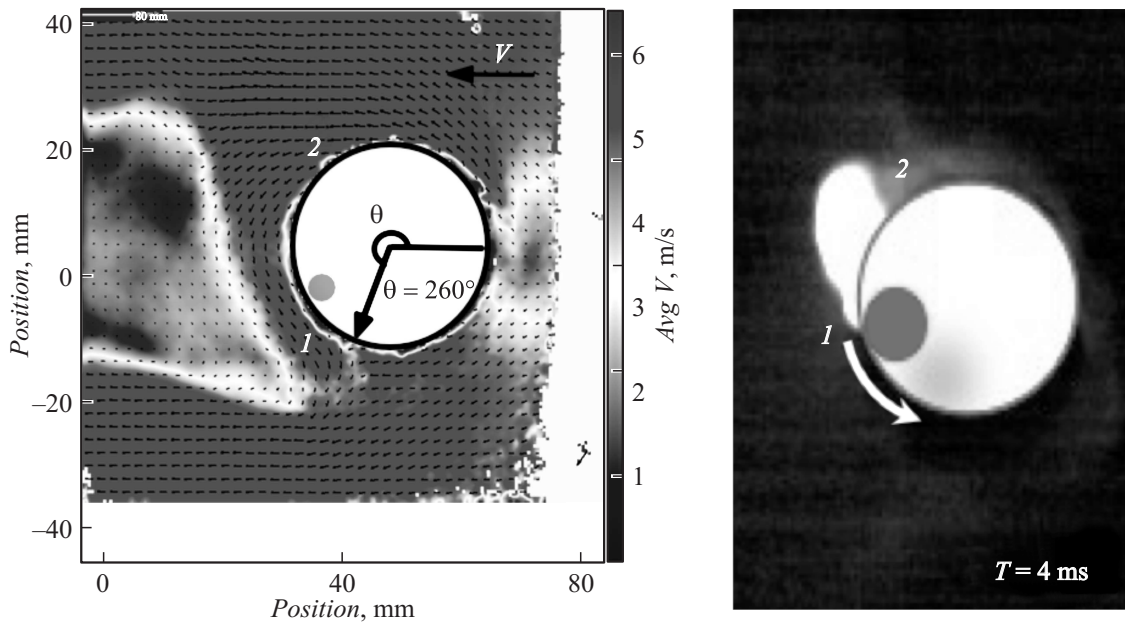


Рис. 6. Усредненная PIV-картина поля скоростей вокруг цилиндра с вращающейся плазменной дугой. Характерное число Рейнольдса набегающего потока  $Re = 8 \cdot 10^3$  ( $V_\infty \approx 6.5$  m/s). Время задержки после включения разряда  $T_2 = 4$  ms.

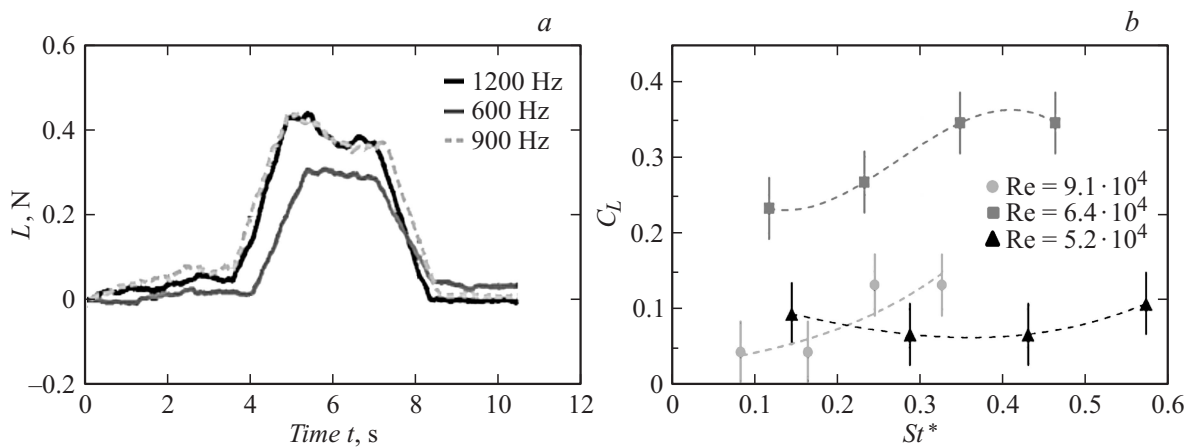


Рис. 7. Подъемная сила  $L$  на цилиндрической модели при включении МПА ( $t < 3.5$  s и  $t > 9$  s) и его выключении ( $5.5 < t < 7$  s) и  $V_\infty = 42$  m/s (a). Зависимость коэффициента подъемной силы  $C_L$  от числа Струхала  $St^*$  импульсно-периодического разряда (b).

тическому его значению  $St^* = 0.3-0.5$ , при котором происходит отрыв потока на цилиндре и формирование крупномасштабных вихревых возмущений [7]. Поэтому в наших экспериментах с работающим МГПА наблюдается формирование несимметричных крупномасштабных вихрей за обтекаемым цилиндром, которые могут приводить к несимметричному обтеканию самой модели (рис. 4, 6).

### Сравнение полученных результатов с численным расчетом

В работе [4] были проведены теоретические расчеты обтекания цилиндра с цилиндрической зоной энерго-

выделения малого диаметра, вращающейся вдоль ее поверхности, при условиях близких к настоящей работе, а именно числа Маха набегающего потока  $M = 0.15$  и  $0.21$  и погонной мощности  $100$  W/cm. При этом движущаяся электрическая дуга во внешнем магнитном поле моделировалась этой зоной теплового энерговыделения. Из расчетов следует, что область энерговыделения приводит к нарушению симметрии обтекания цилиндрической модели, появлению стимулированной циркуляции вокруг модели и подъемной силы. Там же было получено значение усредненной по времени стимулированной циркуляции потока вблизи модели.

Анализ наших экспериментальных результатов и теоретических результатов [8] показывает, что они качественно близки друг другу, но имеются количественные

различия между ними. Эти различия могут быть обусловлены разными причинами, в том числе трехмерным характером структуры электрической дуги во внешнем потоке, упрощенным моделированием канала электрической дуги и его движением во внешнем магнитном поле.

В заключении можно отметить, что созданный МГПА способен создавать вихревой пристеночный поток вокруг цилиндрической модели, который влияет на ее обтекание внешним дозвуковым потоком ( $M < 0.2$ ,  $Re < 9 \cdot 10^4$ ). Это утверждение подтверждается результатами прямых измерений с помощью PIV и теневого методов, весовыми измерениями, а также результатами теоретического расчета [4]. Обнаружено что появление подъемной силы цилиндра происходит за счет создания стимулированной циркуляции потока вокруг него [4]. Величина подъемной силы в эксперименте достигала максимальных значений порядка  $L = 0.37-0.45$  N. При этом величина коэффициента подъемной силы  $C_L$  достигала 0.3–0.6.

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] Мунхоз Д.С., Битюрин В.А., Климов А.И., Казанский П.Н., Моралев И.А., Поляков Л.Б., Толкунов Б.Н. // ЖТФ. 2017. Т. 83. Вып. 7.
- [2] Автореф. канд. дис. Моралев И.А. // Взаимодействие газоразрядной плазмы с закрученными течениями, кандидатская диссертация. ОИВТ РАН. 2010.
- [3] Автореф. канд. дис. Бочаров А.Н. // Физические и численные модели магнитоплазменной аэродинамики. ОИВТ РАН, 2011.
- [4] Битюрин В.А., Завершинский И.П., Климов А.И., Молевич Н.Е., Моралев И.А., Мунхоз Д.С., Поляков Л.Б., Порфирьев Д.П., Судак С.С. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 4. С. 1–4.
- [5] Bityurin V., Bocharov A. // Proc. of the 39<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno. USA, AIAA-2001-0793.
- [6] Yuan J.K., Olinger D.J. // Circulation methods for unsteady aerodynamics flows, 20<sup>th</sup> AIAA Applied Aerodynamics Conf. Sessions of Unsteady Aerodynamics. St. Louis, 2002. AIAA-2002-3057.
- [7] Автореф. канд. дис. Казанский П.Н. // Управление потоком вблизи аэродинамических тел с помощью плазменного высокочастотного актуатора. МЭИ 2012.
- [8] Leroy A., Podlinski J., Devinant P., Aubrun S. // Proc of the Abstract 6<sup>th</sup> European Conf. for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS). Krakow. 2015.