ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2012, том 50, № 3, с. 346–353

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ

УДК 533.6.011.32

УПРАВЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ ВБЛИЗИ КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА С ПОМОЩЬЮ ВЧ-АКТУАТОРА. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРЯДА НА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРА

© 2012 г. П. Н. Казанский, А. И. Климов, И. А. Моралев

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступила в редакцию 20.10.2011 г.

Изучено влияние поверхностного емкостного ВЧ-разряда на обтекание кругового цилиндра при скорости набегающего потока 20–100 м/с и числах Рейнольдса $Re < 2.4 \times 10^5$. Подводимая в разряд мощность модулировалась с частотой 10^2–10^4 Гц, что соответствует числу Струхаля $St = 0.1$–10. Показано, что разряд оказывает существенное влияние на распределение давления в следе за цилиндром. Наблюдается уменьшение средних размеров следа. Измерены параметры разряда: температура газа, темп нагрева газа в разрядной зоне, скорость распространения разряда.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время становится все сложнее улучшить аэродинамические характеристики летательных аппаратов (такие, как сопротивление, подъемная сила крыла и другие) с помощью традиционных методов. Кроме того, создание активных механических элементов управления потоком из-за их быстродействия и больших массогабаритных характеристик наталкивается на ряд технических трудностей. Поэтому возникает необходимость искать новые, нетрадиционные методы управления потоком. Целью нового научного направления, названного магнитоплазменной аэродинамикой, является управление потоком с помощью различных типов плазменных актуаторов. В рамках данного направления изучению возможностей управления параметрами пограничного слоя с помощью поверхностных плазменных актуаторов посвящено огромное количество работ.

Первые работы по управлению пограничным слоем и отрывом потока были проведены с применением коронных разрядов. В [1, 2] продемонстрировано, что с помощью такого разряда можно влиять на точку отрыва потока на поверхности тела. В [3, 4] сообщалось, что электрический ветер со скоростью несколько м/с, создаваемый коронным разрядом вдоль поверхности, приводил к уменьшению сопротивления обтекаемого тела. В [5] экспериментально наблюдалось уменьшение аэродинамического сопротивления при зажигании коронного разряда постоянного и переменного токов на плоской пластине при скоростях воздушного потока до 2 м/с.

В середине 1990-х годов проф. Росс впервые разработал новый тип поверхностного актуатора на основе барьерного разряда, способного работать при атмосферном давлении [6, 7]. Разряд создавался между двумя электродами, расположенными с двух сторон тонкой диэлектрической пластины (или пленки). Автор показал, что барьерный разряд вызывает индуцированный воздушный поток со скоростью несколько м/с параллельно поверхности тела. Для управления пограничным слоем впервые был использован метод фазировки отдельных плазменных актуаторов, который позволил использовать свойства плазмо-аэродинамического резонанса (скорость волны индуцированного пробоя подбиралась близкой к скорости потока вблизи поверхности тела).

Влияние поверхностного барьерного плазменного актуатора (БР-актуатора) на обтекание цилиндра исследовалось в работах [8–11].

В [8] авторам удалось с помощью БР-актуатора синхронизовать сход вихрей с поверхности цилиндра при скорости набегающего потока ~2 м/с и числе Рейнольдса 10^3.

Работа [9] посвящена управлению потоком вблизи цилиндра с помощью БР-актуатора при небольших числах Рейнольдса ($Re < 10^3$). Авторы проводили сравнение картин обтекания цилиндра для двух различных расположений БР-актуатора на его поверхности. При этом индуцированный разрядом ионный ветер был направлен вдоль потока или против него. К двум парам электродов, расположенным в верхней точке цилиндра ($\alpha_1 = 90°$) и его нижней точке ($\alpha_2 = -90°$), прикладывалось переменное напряжение амплитудой 2 кВ и частотой 10 кГц ($\alpha_3 = 0°$ соответствовала лобовой точке цилиндра). Авторами обнаружено, что без разряда точка соприкосновения двух вихрей в отрывной зоне за цилиндром находится на расстоянии 2.5 диаметров от его центра. При распро-

странении разряда по потоку эта точка перемещается в сечение, расположенное на расстоянии 2.0 диаметра от оси цилиндра, а в режиме распространения разряда против потока смещение сокращается до 1.5 диаметров. Это свидетельствует об уменьшении отрывной вихревой области за цилиндром при создании БР-плазмы. Кроме того, из эксперимента следует, что происходит изменение распределения скоростей в следе за цилиндром. Представленные графики демонстрируют, что при реализации барьерного разряда навстречу потоку в точке $x/D = 1.5$, $y/D < 0.7$ происходит увеличение скорости потока в следе почти в 2.5 раза. Данный эффект авторы связывают с дополнительной турбулизацией потока с помощью БР-актуатора. В работе приводятся данные, которые показывают, что именно в режиме зажигания барьерного разряда против потока происходит увеличение амплитуды турбулентных пульсаций скорости u'/U в три раза. PIV-визуализация потока в отрывной зоне за цилиндром подтверждает газодинамические измерения и показывает, что область пониженных скоростей за цилиндром сокращается в случае зажигания разряда навстречу потоку.

В статье [10] авторы исследовали влияние импульсного барьерного разряда на поток вблизи кругового цилиндра. Работа проводилась при $\mathrm{Re} = 1.5 \times 10^4$. Разряд располагался в верхней точке ($\alpha_1 = 90°$) и нижней точке ($\alpha_2 = -90°$) цилиндра аналогично работе [9]. Было установлено, что аэродинамическое сопротивление и флуктуации подъемной силы уменьшились на 32% и 72% соответственно при числе Струхаля $\mathrm{St} = 2.0$. Авторы также наблюдали увеличение флуктуаций подъемной силы на 85% и аэродинамического сопротивления на 8% при $\mathrm{St} = 0.2$. Уменьшение сопротивления и флуктуаций подъемной силы наблюдалось при $\mathrm{St} > 0.6$. В статье представлена PIV-визуализация потока вблизи цилиндра при зажигании разряда. На полученных картинах течения отчетливо прослеживается уменьшение диаметра следа за цилиндром при $\mathrm{St} = 2.0$. Авторы объясняют механизм влияния разряда на поток следующим образом. Разряд создает возмущение пограничного слоя, которое порождает сход вихря в точке отрыва потока. При $\mathrm{St} > 0.6$ внешняя инициация схода вихрей с поверхности цилиндра приводит к нарушению взаимодействия вихревых структур в дорожке Кармана. При $\mathrm{St} < 0.6$ сход вихрей синхронизируется с одной из гармоник частоты воздействия, что ведет за собой увеличение интенсивности вихрей в следе за цилиндром.

В работе [11] демонстрируется влияние диэлектрического барьерного разряда на поверхности цилиндра ($D = 0.1$ м, $\mathrm{Re}_D = 3.3 \times 10^4$, $U_\infty = 4$ м/с) на вихревой след. БР-актуаторы были установлены заподлицо в положении ±90°, ±135° относительно лобовой точки. Сравнивались три режима работы актуатора: постоянная работа верхних и нижних актуаторов без модуляции, согласованная модуляция разряда и несогласованная модуляция верхних и нижних актуаторов. Источник питания работал с частотой 10 кГц и напряжением в 11.5 кВ. Мощность, подводимая к каждому актуатору, составляла 100 Вт (200 Вт на погонный метр модели). В отсутствие разряда за цилиндром существовала развитая дорожка Кармана и мелкомасштабные возмущения сдвигового слоя. Визуализация течения с помощью масляного дыма показала, что при включении разряда в непрерывном режиме точка отрыва смещается назад по поверхности цилиндра, вихревой дорожки в следе за цилиндром не наблюдается. При работе разряда в режиме модуляции ВЧ-напряжения наблюдался сход вихрей на субгармониках частоты возбуждения, причем оптимальная частота воздействия соответствовала $\mathrm{St} = 1$. При этом диаметр следа сокращался. В случае отсутствия модуляции наблюдалось более сильное поджатие потока в донной части цилиндра. Согласованный и несогласованный режимы работы верхних и нижних актуаторов существенно не отличались. Измерения термоанемометром показали, что среднеквадратичные пульсации скорости в сечении $x/D = 4$ в отсутствие разряда выше в два раза, чем в случае модулированного разряда, и в четыре, чем в случае немодулированного. Скорость потока в сечении $x/D = 4$ на оси симметрии ($y = 0$) восстанавливается полностью: $U/U_\infty = 1$ при отсутствии модуляции, $U/U_\infty = 0.8$ при симметричной или асимметричной модуляции, $U/U_\infty = 0.7$ при отсутствии разряда.

Перечисленные выше работы проводились в диапазоне скоростей до 20 м/с и числах $\mathrm{Re} < 3.3 \times 10^4$. Влияние разряда на обтекание цилиндра при высоких скоростях и числах Рейнольдса в них не исследовалось. Кроме того, физический механизм, ответственный за взаимодействие вихревой структуры за цилиндром с плазмой барьерного разряда, до конца выяснен не был.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию влияния поверхностного емкостного ВЧ-разряда на течение за круговым цилиндром при $U_\infty < 100$ м/с, $\mathrm{Re} < 2.4 \times 10^5$ и является продолжением ранее опубликованных трудов [11–13].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Аэродинамическая модель устанавливалась в рабочей камере на диэлектрических креплениях к боковым окнам. Диагностическая аппаратура была размещена в экранированной

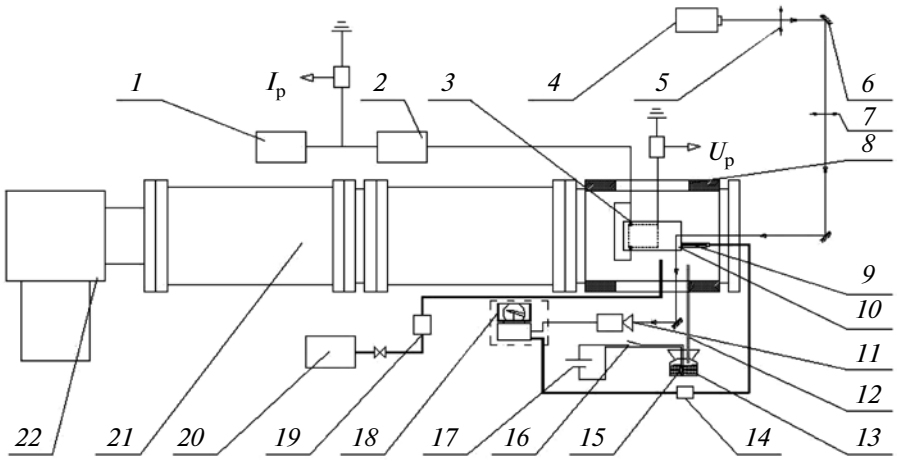

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – ВЧ-генератор; *2* – модулятор; *3* – электрод; *4* – лазер; *5* – фокусирующая линза; *6* – направляющее зеркало; *7* – цилиндрическая линза; *8* – рабочая камера с угломером модели; *9* – трубки для измерения статического и динамического давлений, установленные на автоматизированной электроподвижке; *10* – исследуемая модель; *11* – скоростная камера; *12* – трубка подачи ацетона; *13* – емкость с ацетоном; *14* –датчик давления; *15* – нагревательный элемент; *16* – ключ замыкания цепи питания нагрева ацетона; *17* – автомобильный аккумулятор; *18* – компьютер и осциллограф в металлическом шкафу; *19* – патрон с зарядом, генерирующим дым; *20* – компрессор; *21* – элемент аэродинамической трубы; *22* – воздуходувка.

металлической стойке. Воздушный поток создавался воздуходувкой *22,* для выравнивания поля скорости потока по сечению аэродинамической трубы использовался хонейкомб. Скорость в аэродинамической трубе достигала $V \leq 30$ м/с, статическое давление $P_{st} = 1$ Бар.

Схема аэродинамической модели цилиндра представлена на рис. 2. Модель *3* состоит из кварцевой трубки диаметром 40 мм с толщиной стекла 4 мм, на поверхности которой расположены высоковольтные электроды *2.* Ширина цилиндра составляет 100 мм, что соответствует ширине аэродинамической трубы. На внутреннюю поверхность трубки наклеен заземленный электрод, покрытый диэлектриком (силиконовый компаунд КПТД). Расстояние между электродами *2* составляет 50 мм.

Для возбуждения и стационарного поддержания плазмы в разряде использовался модифицированный ВЧ-генератор марки ППВЧ-3-440 ГР, который имел следующие параметры: колебательная мощность – 1.5 кВт, выходное напряжение – 5 кВ, рабочая частота – 0.44 МГц. Резонансный трансформатор Тесла применялся для того, чтобы увеличить амплитуду выходного напряжения до 30 кВ на выводах плазмогенератора. Мощность, вкладываемая в разряд, модулировалась широтно-импульсным методом с частотой от 0.1 до 10 кГц. Модуляция осуществлялась с помощью генераторов импульсов Г5-82 и генератора сигналов Aktakom 1001.

Динамическое давление на расстоянии одного диаметра за цилиндром измерялось с помощью гребенки, состоящей из отдельных трубок Пито. Диаметр трубок составлял 0.7 мм, длина – 4 см. Трубки Пито были соединены резиновыми шлангами длиной 40 см с датчиками давления NetScannerModel 9116, преобразующими сигнал давления в сигнал напряжения, с временной разрешающей способностью около 2 мс. Разрешение датчиков давления составляло $\Delta P < 25$ Па. Итоговое давление получалось осреднением не менее четырех измеренных значений давления.

Для измерения тока в экспериментах применялся токовый зонд Tektronix P6021 (относительная погрешность измерения тока – $\delta < 3\%$, задержка измерения – 5.8 нс). Для измерения напряжений использовался высоковольтный делитель Tektronix P6015A (погрешность измерения напряжения $\delta < 5\%$, задержка измерения – 14.7 нс). Осциллограммы тока и напряжения регистрировались осциллографом TDS 2014B. Мощность, вложенная в разряд, определялась методом прямого перемножения осциллограмм тока и напряжения за несколько периодов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерение параметров импульсно-периодического ВЧ-разряда. В эксперименте были измерены основные параметры разряда. Типичный вид разряда при различных напряжениях на электродах показан на рис. 3. Из него видно, что при напряжении на электроде $U_{HF} \approx 3$ кВ структура разряда практически однородна. При увеличении напряжения происходит формирование выделенных плазменных каналов (филаментов). При этом сами каналы имеют сложную фрактальную

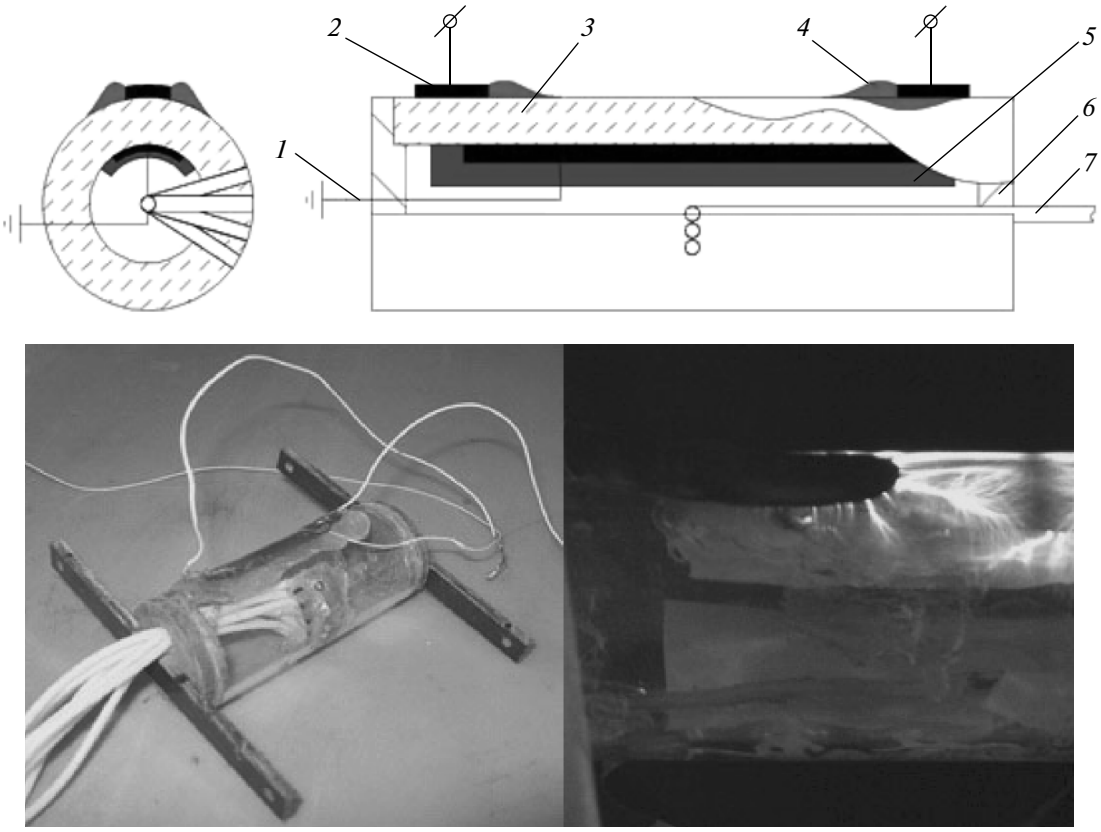

Рис. 2. Схема аэродинамической модели цилиндра с поперечным разрядом; внешний вид модели и разряда на ВЧ-электродах: *1* – заземленный электрод, *2* – ВЧ-электрод, *3* – кварцевый диэлектрический цилиндр, *4* – область разряда, *5* – полиэтилен, *6* – диэлектрическая крышка-державка, *7* – шланги, предназначенные для измерения статического давления на поверхности цилиндра.

структуру, основания которой находятся на расстоянии около 2 см друг от друга (ширина пластины составляет 10 см). Типичная длина этих филаментов достигала 2–6 см в зависимости от приложенного напряжения, диаметр не превышал 1 мм. Скорость прорастания отдельного плазменного филамента была измерена с помощью метода скоростной фоторегистрации и составила 2 км/с при напряжении на разрядном промежутке 16 кВ. Скорость струи, индуцированной поверхностным ВЧ-разрядом, была оценена по измеренному полному давлению и составила 6 м/с. Получены обзорные и детальные оптические спектры излучения плазмы. Обработка спектров проводилась методом подгонки расчетных и экспериментальных спектров в рамках программы Specair [12]. По спектру N_2^{2+} оценены вращательная T_R и колебательная T_V температуры газа в разрядной плазме. Измеренные температуры составили соответственно $T_R \sim 1500$ K и $T_V \sim 3500$ K. Средняя скорость нагрева газа в ВЧ-плазме превышала 30 K/мкс при мощности импульсного разряда 500 Вт и напряжении 20 кВ ($T_i = 40$ мкс). Характерные осциллограммы тока, напряжения и мощности во времени приведены на рис. 4. Огибающая разрядного импульса изменялась от эксперимента к эксперименту в связи с различной настройкой выходного контура генератора.

Визуализация акустических волн импульсно-периодического ВЧ-разряда. Визуализация теневым

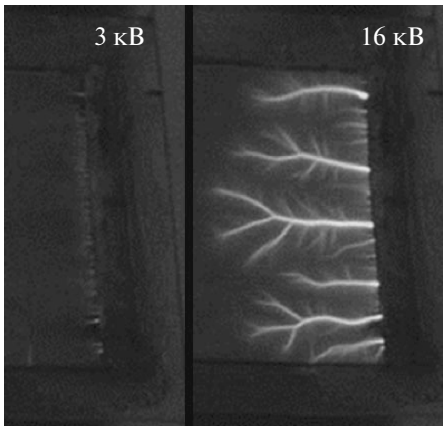

Рис. 3. Вид диэлектрического барьерного разряда при различных напряжениях на электродах.

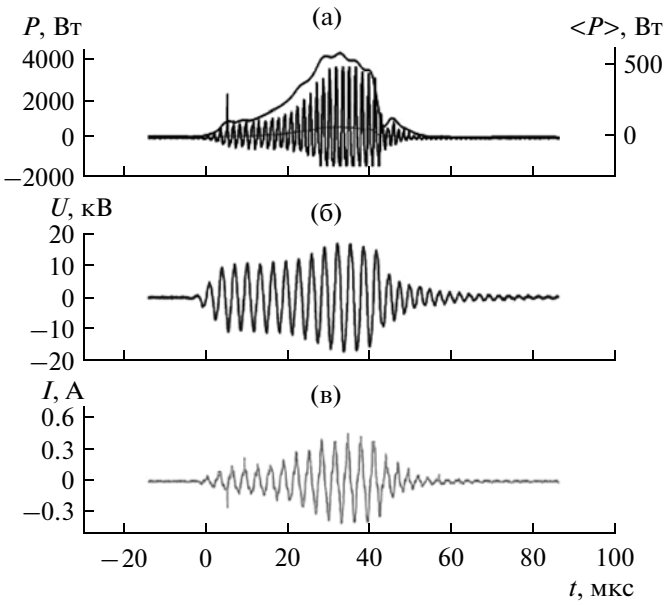

Рис. 4. Зависимость тока, напряжения и мощности разряда от времени.

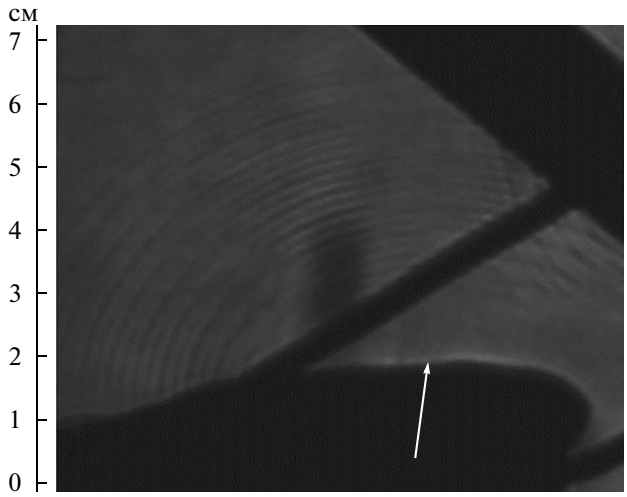

Рис. 5. Акустические возмущения, вызванные зажиганием разряда.

методом в отсутствие набегающего воздушного потока при нормальных условиях позволила наблюдать акустические возмущения, вызванные импульсным нагревом воздуха в модулированном ВЧ-разряде (рис. 5). Место зажигания разряда показано на рисунке стрелкой. Длина ультразвуковой волны – 3 мм, что соответствует удвоенной несущей частоте $2f \sim 1$ МГц. Обнаружено, что количество минимумов и максимумов плотности в акустической волне совпадает с удвоенным количеством ВЧ-периодов в импульсе разряда. Также из рисунка следует, что от плоской преграды происходит отражение акустических волн. Это доказывает, что наблюдаемая периодическая волновая структура на теневых картинах имеет акустическую природу.

Измерения параметров следа за цилиндром датчиками давления. Газодинамические измерения в следе за цилиндром были проведены при различных местоположениях актуатора на его поверхности и частотах модуляции разряда. Зависимость увеличения давления в следе за цилиндром от угла положения актуатора на цилиндре представлена на рис. 6. Лобовая точка соответствует углу $\alpha = 0°$. Измерения давления проводились в сечении, расположенном на расстоянии одного диаметра цилиндра. На графиках видно, что динамическое давление для датчиков, расположенных на границе следа, значительно увеличивается при горении разряда на поверхности цилиндра в диапазоне углов $60 < \alpha < 90°$. Также следует подчеркнуть, что статическое давление в следе изменялось незначительно, поэтому в последующих экспериментах насадок Прандтля был заменен на трубку Пито. Увеличение полного давления в данном случае свидетельствует об уменьшении диаметра следа.

Было обнаружено, что ВЧ-актуатор, расположенный в лобовой точке цилиндра, работает неэффективно (рис. 6). При смещении актуатора вдоль поверхности цилиндра максимальное изменение диаметра следа за цилиндром наблюдается при его расположении в точке $\alpha = 90°$. При этом ВЧ-разряд находится вблизи точки отрыва потока. При расположении ВЧ-актуатора на поверхности модели за точкой отрыва потока ($\alpha = 120°$) воздействия на поток не наблюдается.

Для изучения влияния частоты модуляции ВЧ-разряда на газодинамические характеристики следа была проведена отдельная серия экспериментов. Типичная зависимость полного давления в точке на границе следа от частоты модуляции (числа Струхаля $\mathrm{St} = f_{\text{мод}} D / v_{\text{пот}}$) приведена на рис. 7. На данной зависимости видно, что имеются два характерных максимума. Первый максимум наблюдается при низком числе Струхаля $\mathrm{St} \sim 0.2$, второй – при высоком числе $\mathrm{St} \sim 2$. При увеличении числа Струхаля эффект выходит на стационар.

Уменьшение диаметра следа происходит начиная с пороговой импульсной мощности $N_{\mathrm{HF}} \geq 500$ Вт (рис. 8). При меньшей импульсной мощности данного эффекта не наблюдается. Эксперимент проводился при постоянной средней мощности, вкладываемой в разряд, (изменялась скважность радиоимпульсов).

Вопрос о предельной скорости, при которой еще сохраняется влияние актуатора на течение, имеет принципиальное значение для применимости той или иной технологии. В случае поверхностного импульсно-периодического ВЧ-емкостного разряда влияние плазменных образова-

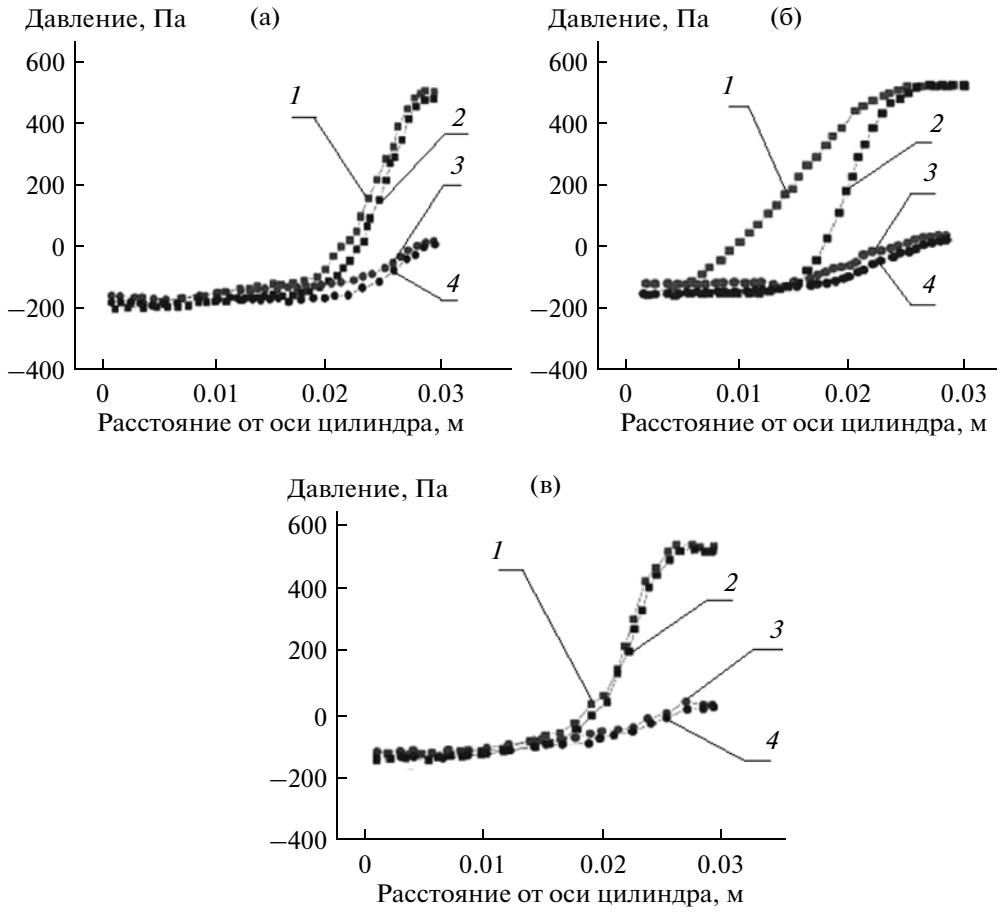

Рис. 6. Влияние разряда на восстановление динамического и статического давлений в следе за цилиндром при различных положениях актуатора: $\alpha = 30°$ (а), 90° (б), 120° (в); *1* – динамическое давление с разрядом, *2* – динамическое давление без разряда, *3* – статическое давление с разрядом, *4* – статическое давление без разряда.

ний на обтекание цилиндра было обнаружено при скорости набегающего потока до $V = 100$ м/с (рис. 9).

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зависимость эффективности разряда от частоты модуляции, представленная на рис. 7, имеет два максимума. Первый низкочастотный максимум наблюдается при числе Струхаля $F^+ = (fx_{sp})/U_\infty \approx 0.2$ (f – частота модуляции, x_{sp} – характерный размер зоны отрыва потока, U_∞ – скорость набегающего потока), что соответствует собственной частоте схода вихрей с плеча цилиндра [14]. Аналогичные результаты получены в [10]. Авторы подчеркивают, что в близком режиме наблюдается существенное увеличение флуктуаций подъемной силы и лобового сопротивления. Второй максимум не является резким. Данный эффект коррелирует с исследованиями подавления вихревой дорожки Кармана.

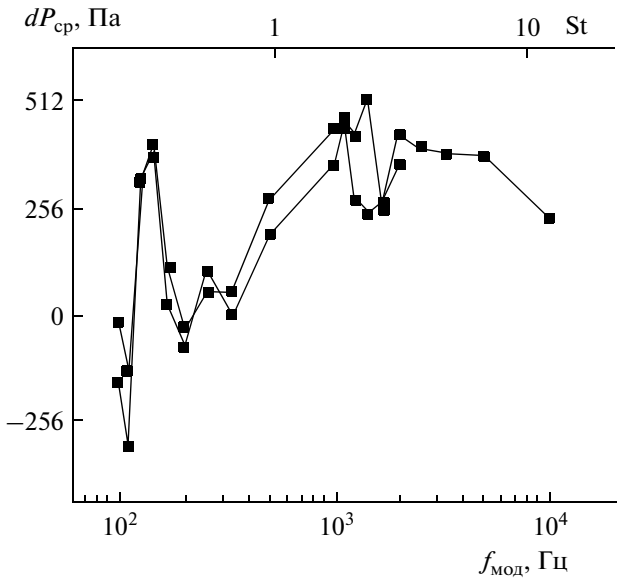

Рис. 7. Зависимость увеличения среднего давления $dP_{ср}$ в следе за цилиндром от частоты модуляции и числа Струхаля.

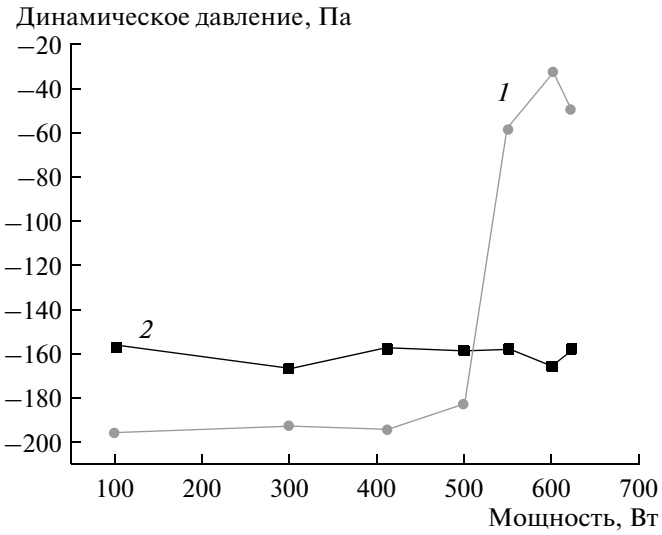

Рис. 8. Зависимость восстановления давления в вихревой зоне цилиндра от вложенной мощности в разряд: *1* – с разрядом на цилиндре, *2* – без разряда на цилиндре.

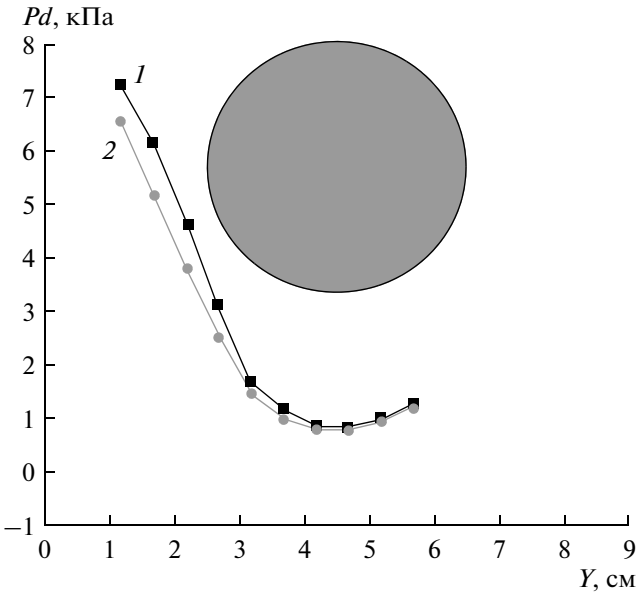

Рис. 9. Зависимость восстановления давления в вихревой зоне цилиндра при скорости набегающего потока $V = 100$ м/с: *1* – с разрядом на цилиндре, *2* – без разряда на цилиндре.

Анализ влияния положения актуатора на его эффективность показывает, что разряд влияет на отрыв потока опосредованно – через газодинамические возмущения, создаваемые в пограничном слое. Действительно, энтропийно-вихревые возмущения потока и плазменные неоднородности могут только сноситься потоком вниз по цилиндру. В то же самое время акустические возмущения, созданные разрядом, могут распространяться как вниз, так и вверх по потоку. Из рис. 7 видно, что актуатор неэффективен при установке в отрывной зоне. Поэтому непосредственное влияние акустических волн, созданных разрядом, на положение точки отрыва потока, по-видимому, является незначительным.

Исследования зависимости обтекания цилиндра от параметров разряда позволяют сделать выводы о механизме возникновения возмущений в пограничном слое. Таких механизмов можно предположить два:

– ускорение потока в пограничном слое с помощью электрического разряда,

– интенсификация смешения в пограничном слое за счет образования дополнительных локальных вихревых структур, созданных электрическим разрядом.

Экспериментальные результаты свидетельствуют в поддержку второго механизма. Обнаружено, что насыщение скорости ионного ветра от разряда наступает при существенно меньших мощностях, чем это необходимо для реализации наблюдаемых эффектов. Эффект восстановления давления в следе за цилиндром носит пороговый характер в зависимости от импульсной мощности (рис. 8). Также не наблюдается изменений в структуре течения при термическом нагреве пограничного слоя выше точки отрыва нихромовой нитью. Это свидетельствует о том, что за наблюдаемые явления отвечает механизм резкого тепловыделения в разряде, приводящий к периодическим колебаниям давления и возникновению в его окрестности волн сжатия.

Известно, что воздействие на слой одиночным импульсом наносекундного барьерного разряда также приводит к задержке отрыва пограничного слоя ниже по потоку от точки воздействия. Однако периодическое воздействие на высокой частоте ($f_{HF} = 0.5$–1 МГц) может играть собственную роль в возмущении пограничного слоя. Толщина ламинарного пограничного слоя в точке отрыва оценивается как $\delta = 0.5D/(0.5\mathrm{Re})^{1/2} \sim 0.11$ мм. Масштаб возмущений от разряда соответствует несущей высокой частоте, т.е. $\lambda_{HF} = U_{SEP}/f_{HF} = 1.4U_\infty/f_{HF} = 0.1$ мм, где U_{SEP} – скорость потока вблизи точки отрыва за пределами пограничного слоя. Период акустических возмущений от разряда имеет масштаб порядка 1 мм. Таким образом, исходный размер создаваемых разрядом возмущений сопоставим с толщиной пограничного слоя, что делает теоретически возможным перенос импульса к поверхности тела. В свою очередь этот перенос должен приводить к формированию длинноволновых возмущений, так как неустойчивость пограничного слоя развивается на длинах волн $\lambda_{SL} = 37D/\mathrm{Re}^{1/2} \sim 6$ мм для данного случая.

Как бы то ни было, для окончательного выяснения вопроса о механизме влияния разряда на пограничный слой необходимы дальнейшие детальные исследования течения в окрестности точки отрыва потока и области разрядного воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что существует возможность влияния емкостного ВЧ-разряда на характеристики ближнего следа за круговым цилиндром при скоростях потока до 100 м/с.

Оптимальное положение ВЧ-актуатора находится перед точкой отрыва потока.

Зависимость эффективности разряда от частоты модуляции имеет два максимума: при $St \sim 0.3$ и $St \gg 1$. Наличие резонанса при $St \sim 0.2$ позволяет при одинаковой мощности за импульс существенно (порядка 10 раз) снизить необходимую для уменьшения лобового сопротивления цилиндра среднюю мощность, вложенную в разряд.

Анализ параметрических зависимостей эффективности разряда от вложенной мощности, а также сравнение с постоянным нагревом пограничного слоя позволяет предположить, что основным механизмом воздействия на обтекание цилиндра являются энтропийно-вихревые возмущения, созданные выше по потоку от точки отрыва импульсным подводом тепла в ВЧ-разряде.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 08-02-01429-а, № 07-02-00526-а), а также МВЗ им. Миля. Авторы выражают благодарность В.А. Битюрину за участие в обсуждении результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Velkoff H., Ketchman J.* Effect of an Electrostatic Field on Boundary Layer Transition // AIAA J. 1968. V. 16. P. 1381.
2. *Velkoff H., Godfrey R.* Low Velocity Heat Transfer to a Plate in the Presence of a Corona Discharge in Air // J. Heat Transfer. 1979. V. 101. P. 157.
3. *Bushnell D.* Turbulent Drag Reduction for External Flows // AIAA Paper 83-0227. 1983.
4. *Malik M.R., Weinstein L., Hussaini M.Y.* Ion Wind Drag Reduction // AIAA Paper 83-0231. 1983.
5. *Soetomo F.* The Influence of High Voltage Discharge on Flat Plate Drag at Low Reynolds Number Air Flow // MS Thesis Iowa State University. Iowa, 1992. P. 5.
6. *Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P.* Boundary Layer Flow Control with a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma // AIAA Paper 98-0328. 1998.
7. *Roth J.R.* Electrohydrodynamically Induced Airflow in a One Atmosphere Uniform Glow Discharge Surface Plasma // 25th IEEE Int. Conf. Plasma Sci. 1998. P. 272.
8. *Mclaughlin T.E.* Plasma-Based Actuatours for Cylinder Wake Vortex Control // AIAA 2004-2129.
9. *Shunsuke Yamada, Koui Shibata, Hitoshi Ishikawa, Shinji Honami, Masahiro Motosuke.* Flow Behavior behind a Circular Cylinder by DBD Plasma Actuators in Low Reynolds Number // AIAA 2010-549.
10. *Timothy N. Jukes, Kwing-So Choi.* Flow Control Around a Circular Cylinder Using Pulsed Dielectric Barrier Discharge Surface Plasma // Phys. Fluids. 2009. V. 21. 084103.
11. *Thomas F.O., Kozlov A., Corke T.C.* Plasma Actuators for Cylinder Flow Controland Noise Reduction // AIAA J. 2008. V. 46. № 8. P. 1921.
12. *Laux C.O.* Radiation and Nonequilibrium Collisional-Radiative Models // Von Karman Institute Lecture Series 2002-07. Physico-Chemical Modeling of High Enthalpy and Plasma Flows / Eds. Fletcher D., Charbonnier J.-M., Sarma G.S.R., Magin T. Rhode-Saint-Genuse, Belgium, 2002. P. 7.
13. *Little J., Nishihara M., Adamovich I., Samimy M.* Separation Control from the Flap of a High-Lift Airfoil using DBD Plasma Actuators // AIAA 2009-145.
14. *Williamson C.H.K.* Vortex Dynamicsinthe Cylinder Wake // Annu. Rev. Fluid. Mech. 1996. V. 28. P. 477.