

## УПРАВЛЕНИЕ ШУМОМ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМЕННЫХ АКТУАТОРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

© 2015 г. В. Ф. Копьев\*\*\*, И. В. Беляев\*\*\*, М. Ю. Зайцев\*\*\*, П. Н. Казанский\*\*\*, В. А. Копьев\*, И. А. Моралёв\*\*\*

\*ФГУП ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ  
105005 Москва, ул. Радио 17

\*\*Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
614990 Пермь, Комсомольский просп. 29

\*\*\*Объединенный институт высоких температур РАН  
125412 Москва, ул. Ижорская 13  
E-mail: vkopiev@mksagi.ru

Поступила в редакцию 25.08.2014 г.

Проведено экспериментальное исследование влияния плазменных актуаторов высокочастотного диэлектрического барьерного разряда на шум обтекания кругового цилиндра. Показано, что применение плазменных актуаторов позволяет снизить вихревой шум цилиндра в диапазоне скоростей, характерных для аэроакустических приложений.

*Ключевые слова:* вихревой шум цилиндра, снижение шума, плазменные актуаторы, диэлектрический барьерный разряд.

DOI: 10.7868/S0320791915010074

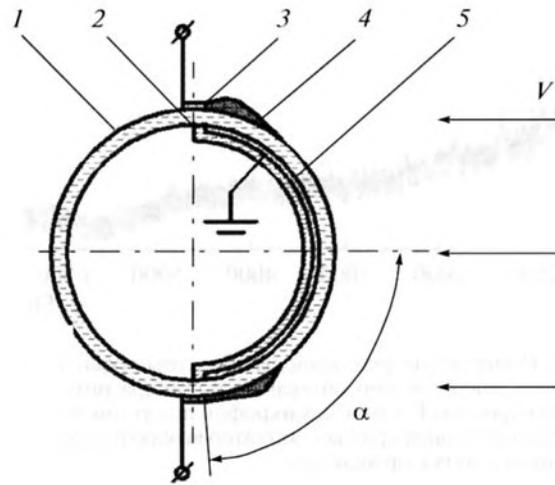
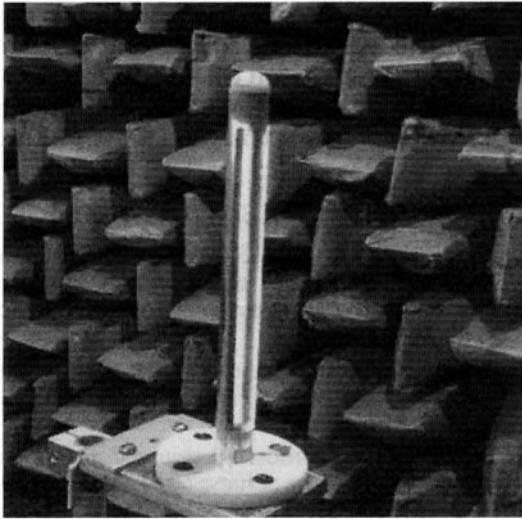
### ВВЕДЕНИЕ

Плазменные актуаторы являются перспективным и активно исследуемым методом управления потоком и шумом [1]. Одним из направлений их применения в аэроакустике является снижение шума обтекания плохо обтекаемых тел (например, шасси или элементов механизации крыла [2, 3]). Данная работа посвящена исследованию влияния плазменных актуаторов высокочастотного диэлектрического барьерного разряда на шум цилиндра при его поперечном обтекании. Принцип действия плазменных актуаторов диэлектрического барьерного разряда основан на ускорении ионов силой Кулона в распадающейся плазме разряда вблизи стенки, а также на формировании возмущений в пограничном слое, вызванных импульсным тепловыделением в разряде.

Управление обтеканием кругового цилиндра в поперечном потоке с помощью актуаторов диэлектрического барьерного разряда исследовано в работах [4, 5]. Показано, что работа актуатора влияет на сход вихрей в кормовой части цилиндра. В работах [6, 7] была продемонстрирована возможность влияния высокочастотного диэлектрического барьерного разряда на характеристики ближнего следа за круговым цилиндром при скоростях потока до 100 м/с и показано, что рабо-

та актуатора влияет на осредненный профиль скоростей за моделью. Анализ параметрических зависимостей эффективности разряда от вложенной мощности, а также сравнение с постоянным нагревом поверхности цилиндра, показали, что основным фактором воздействия на обтекание цилиндра является энтропийно-вихревое возмущение, созданное выше по потоку от точки отрыва импульсным воздействием высокочастотного разряда на пограничный слой. Преобладание того или иного механизма воздействия — генерация электрогазодинамических струй или локальный нагрев газа — определяется удельным энерговыделением в разряде.

Что касается снижения шума обтекания цилиндра с помощью плазменных актуаторов, предыдущие исследования были ограничены малыми скоростями набегающего потока (4 м/с в [4], 20 м/с в [6, 9]). Эти скорости потока сравнимы со скоростью течения, индуцируемого самим разрядом (<10 м/с [1]), так что относительные возмущения, вносимые актуатором в поток, были достаточно сильными. Однако успешное применение плазменных актуаторов в аэроакустических приложениях (например, для управления шумом шасси) предполагает, что они могут подавлять шум и при более высоких скоростях потока (так, соответствующие скорости самолета при заходе на посадку ~70–80 м/с).



**Рис. 1.** Фотография модели цилиндра с двумя поверхностными плазменными актуаторами, установленными в положении  $\alpha = \pm 85^\circ$ . Схема расположения электродов в модели цилиндра: 1 – кварцевый цилиндр, 2 – диэлектрическая заливка, 3 – высоковольтный внешний электрод, 4 – поверхностный диэлектрический барьерный разряд, 5 – заземленный внутренний электрод.

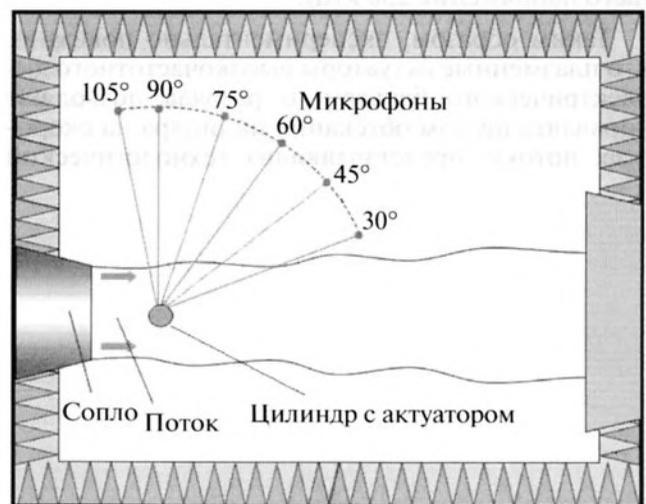
В данной работе исследовалось влияние плазменных актуаторов диэлектрического барьерного разряда на шум цилиндра для скорости набегающего потока до  $V = 80$  м/с (максимальное число Рейнольдса  $Re = Vd/\nu \approx 2.1 \times 10^5$ , где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха). Плазменные актуаторы аналогичны успешно примененным авторами ранее для снижения шума турбулентной струи [10]. Фотография цилиндра с включенным плазменным актуатором и схема модели представлены на рис. 1. Модель цилиндра состоит из кварцевой трубки 1 диаметром 40 мм с толщиной стекла 4 мм, на поверхности которой наклеены высоковольтные электроды 3 в положении  $\alpha = \pm 85^\circ$  относительно лобовой точки цилиндра. Длина цилиндра составляет  $L = 200$  мм ( $L/d = 5$ ). На внутреннюю поверхность трубки наклеен заземленный электрод 5, покрытый диэлектриком 2. При включении генератора на поверхности модели зажигался диэлектрический барьерный разряд 4 таким образом, что индуцированная актуатором струя направлена навстречу набегающему потоку.

Для создания и стационарного поддержания плазмы в разряде использовался высокочастотный генератор на основе транзисторных ключей, на выходе которого устанавливался резонансный повышающий трансформатор. Разряд питался синусоидальным напряжением амплитудой 6–9 кВ и частотой 250 кГц, мощность, выделяемая в разряде, составляла порядка 500 Вт на метр длины электрода.

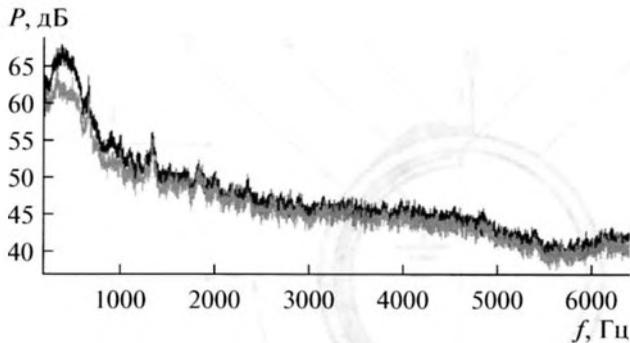
Цилиндр располагался на расстоянии 25 см от среза сопла, ось цилиндра была перпендикулярна

оси потока. Нижний край цилиндра располагался на линии кромки сопла, верхний – в ядре потока. На торце модели цилиндра располагался обтекатель шарообразной формы.

Акустические измерения проводились в заглушенной камере с потоком ЦАГИ АК-2. С помощью системы сбора и обработки данных фирмы Briel & Kjaer PULSE 3560D в режиме реального времени регистрировались узкополосные спектры (разрешение по частоте 1 Гц) излучаемого шума. Максимальная скорость обработки системы составляет 200 кГц на канал, точность измерения интенсивности звука – 0.3 дБ. Микрофоны рас-



**Рис. 2.** Схема расположения микрофонов в акустической заглушенной камере с потоком АК-2 (вид сверху).



**Рис. 3.** Измеренные узкополосные спектры уровней звукового давления при обтекании цилиндра потоком со скоростью  $V = 80$  м/с, микрофон под углом  $90^\circ$  к оси потока: черная кривая – актуатор выключен, серая кривая – актуатор включен.

полагались в дальнем поле на дуге окружности радиусом 1.5 м с центром на оси цилиндра под углами  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $105^\circ$  к оси потока (рис. 2). Каждый спектр усреднялся по 2000 реализациям. Спектры исследовались в диапазоне частот  $f$  от 200 Гц до 6.4 кГц.

Результаты акустических измерений показаны на рис. 3, где приведены спектры шума обтекания цилиндра (уровень звукового давления  $P$ ) при выключенном и включенном актуаторе, записанные микрофоном, расположенным под углом  $90^\circ$  к оси потока (см. рис. 2). Воздействие плазменного актуатора приводит к снижению шума обтекания цилиндра в диапазоне чисел Струхала  $St = 0.1$ – $0.4$ , соответствующем максимуму вихревого шума, на величину 3.5 дБ, а во всем исследуемом диапазоне частот – на величину 3.1 дБ. Актуатор работал в квазинепрерывном режиме (частота зажигания разряда соответствовала частоте питающего напряжения 250 кГц).

Таким образом, экспериментально показано, что плазменные актуаторы высокочастотного диэлектрического барьерного разряда позволяют управлять шумом обтекания цилиндра на скоростях потока, представляющих технологический

интерес; в частности, это позволяет надеяться, что данные актуаторы могут использоваться для снижения шума шасси самолета.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства образования и науки РФ № 14.Z50.31.0032.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang J.J., Choi K.S., Feng L.H., Jukes T.N., Whalley R.D. Recent developments in DBD plasma flow control // Progress in Aerospace Sciences. 2013. V. 62. P. 52–78.
2. Кузнецов В.М. Проблемы снижения шума пассажирских самолетов // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 3. С. 293–317.
3. Dobrzynski W. Almost 40 years of airframe noise research: what did we achieve? // J. Aircraft. 2010. V. 47. № 2. P. 353–367.
4. Thomas F.O., Kozlov A.V., Corke T.C. Plasma actuators for cylinder flow control and noise reduction // AIAA J. 2008. V. 46. № 8. P. 1921–1931.
5. Jukes T.N., Choi K. Flow control around a circular cylinder using pulsed dielectric barrier discharge surface plasma // Phys. Fluids. 2009. V. 21. P. 084103.
6. Huang X., Zhang X. Plasma actuators for noise control // Int. J. Aeroacoust. 2010. V. 9. № 4–5. P. 679–703.
7. Казанский П.Н., Климов А.И., Моралёв И.А. Управление воздушным потоком вблизи кругового цилиндра с помощью ВЧ актуатора. Влияние параметров разряда на аэродинамическое сопротивление цилиндра // ТВТ. 2012. Т. 50. № 3. С. 346–354.
8. Boichov C.J., Klimov A.I., Kazansky P.N., Moralev I.A. Flow control over circular cylinder airfoil model by surface HF plasma actuator / The 11th International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. 2012. P. 17.
9. Kozlov A.V., Thomas O.F. Bluff-body flow control via two types of dielectric barrier discharge plasma actuation // AIAA J. 2011. V. 49. № 9. P. 1919–1931.
10. Копьёв В.Ф., Битюрин В.А., Беляев И.В., Годин С.М., Зайцев М.Ю., Климов А.И., Копьёв В.А., Моралёв И.А., Остриков Н.Н. Управление шумом струи с помощью плазменных актуаторов диэлектрического барьерного разряда // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 473–481.