

УДК 534.23,534.874.1,537.523.3

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОННОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЕГО СВОЙСТВ

© 2016 г. В. Ф. Копьев\*, \*\*, М. Ю. Зайцев\*, \*\*,  
В. А. Копьев\*, Н. Н. Остриков\*, \*\*, Г. А. Фараносов\*, \*\*

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

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

E-mail: [aeroacoustics@tsagi.ru](mailto:aeroacoustics@tsagi.ru)

Поступила в редакцию 13.11.2015 г.

Рассмотрена работа униполярного импульсно-периодического коронного разряда. Предложен новый способ анализа его свойств на основе рассмотрения структуры излучаемого разрядом звука. Разложение звукового поля на азимутальные компоненты позволяет связать их с силовым или тепловым воздействием коронного разряда на среду и оценить их относительный вклад в этом случае.

*Ключевые слова:* коронный разряд, шум разряда, азимутальные моды.

DOI: 10.7868/S0320791916040080

### ВВЕДЕНИЕ

Возможности применения плазменных актуаторов для снижения аэродинамического шума, как и для других аэродинамических приложений, активно исследуются на протяжении последнего двадцатилетия (см., например, [1–10]). Основными достоинствами плазменных актуаторов являются: быстрый отклик на управляющий сигнал; отсутствие механических частей; возможность их размещения на различных поверхностях, в том числе на внутренней и внешней поверхности сопла двигателя; достаточная гибкость при создании различных пространственных конфигураций; широкий диапазон частот воздействия, вплоть до сотен кГц; принципиальная возможность работы нескольких актуаторов с заданными сдвигами фаз; возможность осуществлять воздействие в нужные периоды времени и легко отключать в другое время. Наибольший интерес при этом представляют плазменные актуаторы, в которых используются газовые разряды с относительно холодной плазмой, что позволяет избежать значительных тепловых нагрузок на конструкцию и больших энергозатрат. К таким разрядам относятся диэлектрический барьерный и коронный разряды [2, 3, 7–11]. В плазменных актуаторах, основанных на этих разрядах, создается низкотемпературная слабоионизованная плазма, ионы которой ускоряются в достаточно сильном электрическом поле вблизи активного плазмообразующего электрода. В результате упругих столкновений ускоренные ионы передают свой импульс

молекулам нейтрального газа, формируя направленный поток газа, так называемый ионный ветер, т.е. создавая объемное силовое воздействие на течение [12]. Кроме того, развитие разряда сопровождается локальным тепловыделением вблизи электрода, что также может приводить к модификации течения, т.е. к тепловому воздействию на течение газа. Таким образом, имеется два основных механизма воздействия таких разрядов на газ – силовое и тепловое, – и соотношение между ними является в настоящее время предметом ряда исследований [12–14]. С точки зрения управления потоками наибольший интерес представляет силовое воздействие разряда на газ, т.к. именно оно обуславливает возникновение гидродинамического течения вблизи электрода (микроструи), за счет которого и реализуется воздействие на основной поток. При этом непосредственное измерение силового воздействия достаточно затруднительно в силу малости области воздействия, малости абсолютной величины силы и сопутствующих технических сложностей, связанных с наличием цепи высокого напряжения, сильного электрического поля и т.п.

В аэроакустических приложениях обычно используется импульсно-периодический режим работы разряда, поскольку в этом случае целью является управление пульсационными характеристиками течения. При таком режиме разряд является источником звука, что позволяет рассмотреть вопрос о механизмах воздействия на газ с несколько иной точки зрения. Из общих физи-

ческих соображений понятно, что звуковое поле разряда может создаваться двумя типами источников, соответствующих двум упомянутым выше механизмам воздействия разряда на окружающий газ: источником монопольного типа, возникающим вследствие пульсирующего тепловыделения в разрядной зоне, и источником дипольного типа, образующимся вследствие пульсирующей силы, действующей на газ. Направление силы, а следовательно, и дипольного момента, определяется положением плазмообразующего электрода. Интенсивность дипольного звука пропорциональна амплитуде силы, поэтому акустические измерения могут дать дополнительный способ измерения объемной силы, создаваемой разрядом. Для измерения монопольного (теплого) и дипольного (силового) акустических полей может быть использован метод азимутальной декомпозиции (МАД) [15], позволяющий разделить вклад отдельных мультиполей в акустическом излучении от различных источников.

Данная работа посвящена исследованию характеристик одиночной униполярной положительной короны, создаваемой на игольчатом электроде, с использованием анализа характеристик звукового поля, генерируемого разрядом. Для исследования мультипольных характеристик звукового поля используется МАД. Насколько известно авторам, настоящая работа является первой попыткой использования МАД для исследования свойств газового разряда. Для демонстрации возможностей метода был выбран наиболее простой вид разряда как с точки зрения геометрии излучающей звук области, так и с точки зрения формы плазмообразующего электрода, позволяющей минимизировать звукоотражающую поверхность и избежать появления дополнительных мультипольных компонент, связанных не с разрядом, а с отражениями.

### МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Метод азимутальной декомпозиции, описанный в работах [15–17], позволяет при определенных условиях выделять вклады отдельных мультиполей в дальнем акустическом поле, создаваемом сложным источником — монопольным, дипольным, квадрупольным и их совокупностью. Мы исходим из того известного факта, что воздействие на поток периодической силой эквивалентно дипольному, а колебания объема (тепловые пульсации) эквивалентны монопольному источнику шума [18]. Поэтому звуковое поле, создаваемое рассмотренным актуатором, должно адекватно моделироваться суперпозицией монопольного и дипольного источников, связанных с тепловым и силовым механизмами воздействия на газ. Пусть  $q$  — удельная скорость тепловыделе-

ния в области разряда, а  $\mathbf{f} = I\mathbf{f}$  — вектор объемной силы, направленный вдоль единичного вектора  $\mathbf{l}$  по прямой, продолжающей игольчатый электрод, поскольку ориентация иглы определяет направление сильного электрического поля, сосредоточенного около острия и создающего основное силовое воздействие на газ. Тогда для дальнего звукового поля в предположении, что разряд является компактным источником звука, т.е. размер области разряда много меньше длины волны, можно приближенно записать [3, 18]

$$p'(\mathbf{r}, t) \approx \frac{1}{4\pi r c_0^2} \frac{\partial}{\partial t} \int [q] d\mathbf{r}' + \frac{1}{4\pi c_0 r} \frac{\partial}{\partial t} \int [\mathbf{f}] d\mathbf{r}'. \quad (1)$$

Здесь  $p'$  — давление в акустической волне;  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор положения наблюдателя;  $\mathbf{r}'$  — радиус-вектор положения элементарного объема  $d\mathbf{r}'$  при интегрировании;  $\rho_0$  и  $c_0$  — плотность и скорость звука вдали от разряда; квадратные скобки означают, что соответствующая величина берется в момент времени  $t - r/c_0$ . Интегрирование проводится формально по всему пространству, а по сути — главным образом, по разрядной зоне, где происходит тепловыделение и сосредоточена объемная сила.

Вводя интегральные величины тепловыделения  $Q = \int q d\mathbf{r}'$  и силы, действующей на газ,  $F = \int \mathbf{f} d\mathbf{r}'$ , а также предполагая их гармоническую зависимость от времени в виде  $Q = \hat{Q}e^{-i\omega t}$ ,  $F = \hat{F}e^{-i\omega t - i\delta}$ , где  $\delta$  — сдвиг фаз между монопольным и дипольным источниками, получим вместо (1) следующее выражение:

$$p' \approx S_m \frac{e^{-i\omega(t-r/c_0)}}{r} + S_d \frac{(\mathbf{l}\mathbf{r}) e^{-i\omega(t-r/c_0) - i\delta}}{r}, \quad (2)$$

где

$$S_m = -i\omega \frac{\hat{Q}}{4\pi c_0^2}, \quad S_d = -i\omega \frac{1}{4\pi c_0} \hat{F}. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) представляют собой простейшую модель акустического излучения рассматриваемого коронного разряда в виде суперпозиции точечного монопольного и дипольного источников.

Для дальнейшего анализа предположим, что такой источник звука расположен на линии, проходящей через центр 6-микрофонной решетки перпендикулярно ее плоскости (далее мы будем называть эту линию “ось решетки”) (рис. 1). В системе координат рис. 1 из (2) можно получить

$$p' = (A_0 + A_1 \cos \theta + B_1 \sin \theta) \frac{e^{-i\omega(t-r/c_0)}}{r}. \quad (4)$$

Здесь  $A_0 = S_m + S_d e^{-i\delta} l_x \cos \chi$ ,  $A_1 = S_d e^{-i\delta} l_y \sin \chi$ ,  $B_1 = S_d e^{-i\delta} l_z \sin \chi$  — величины, характеризующие амплитуды и фазы осесимметричной моды и двух

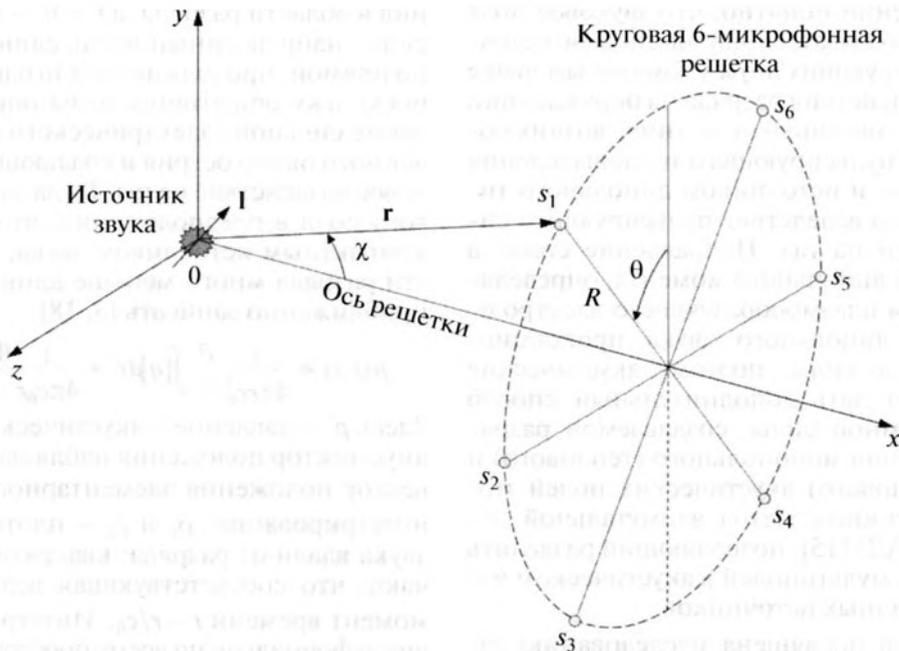


Рис. 1.

компонент 1-й азимутальной моды соответственно;  $l_x, l_y, l_z$  — компоненты вектора  $l$  вдоль осей  $x, y, z$  соответственно, определяемые пространственным положением иглы. Таким образом, при любой ориентации электрода можно ожидать появления в измерениях не более чем первых двух азимутальных мод, т.е. имеющейся в АК-2 6-микрофонной решетке достаточно для корректного разрешения этих мод, а также для оценки амплитуд мод более высокого порядка [15, 17].

Для оценки величин  $S_m, S_d$  и проверки предложенной модели эксперимент проводился с электродом, ориентированным перпендикулярно оси решетки. При этом  $l_x = l_z = 0$  и в разложении (4) будут присутствовать осесимметричная мода и 1-я косинус-мода. Тогда среднеквадратичные значения амплитуд этих мод выражаются как

$$a_0^2 = \frac{1}{2} \frac{A_0 A_0^*}{r^2} = \frac{S_m^2}{2r^2}, \quad a_1^2 = \frac{1}{2} \frac{A_1 A_1^*}{r^2} = \frac{S_d^2 \sin^2 \chi}{2r^2}, \quad (5)$$

остальные амплитуды равны нулю. При такой ориентации электрода тепловой и силовой механизмы проявляются в различных азимутальных модах, и их амплитуды не зависят от неизвестного сдвига фаз  $\delta$  между различными механизмами, что позволяет из измерений непосредственно определить величины  $S_m$  и  $S_d$ .

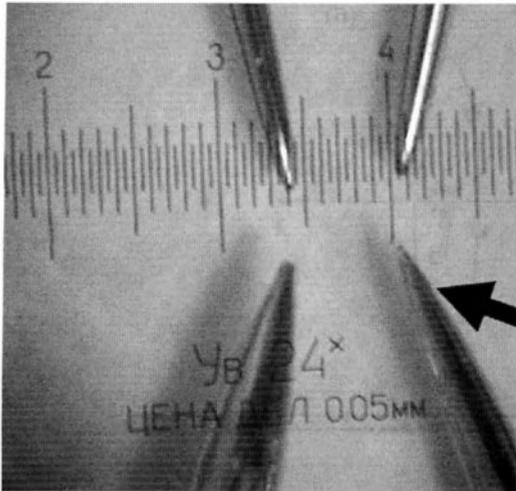
Задача состояла в проведении азимутального разложения звукового поля, создаваемого плазменным разрядом, при указанной выше ориентации электрода и в сравнении результатов измере-

ний направленностей и относительных величин азимутальных гармоник с результатами приведенной выше модели источника (5). Это позволит получить оценки объемной силы, создаваемой разрядом, и тепловыделения в разрядной зоне. Эти данные сравнивались затем с соответствующими характерными значениями, рассчитанными другими способами.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальное исследование характеристик звукового поля, создаваемого коронным разрядом, проводилось в акустической заглушенной камере АК-2 ЦАГИ. В экспериментах создавался разряд “острый анод—заземленный катод”. Поскольку интерес представляла только прианодная область, в качестве катода был выбран удаленный от коронирующего острия пол акустической камеры, что позволяло избежать паразитных отражений в акустическом сигнале. В качестве коронирующего электрода использовались стальные иглы диаметром 0.4 мм с длиной конической части 5 мм и с радиусом кривизны закругления острия не более 0.05 мм (рис. 2).

Для создания коронного разряда использовался генератор высоковольтных импульсов, который позволял получать последовательности прямоугольных импульсов напряжения положительной полярности с плавно регулируемой амплитудой, длительностью и скважностью импульсов с частотой



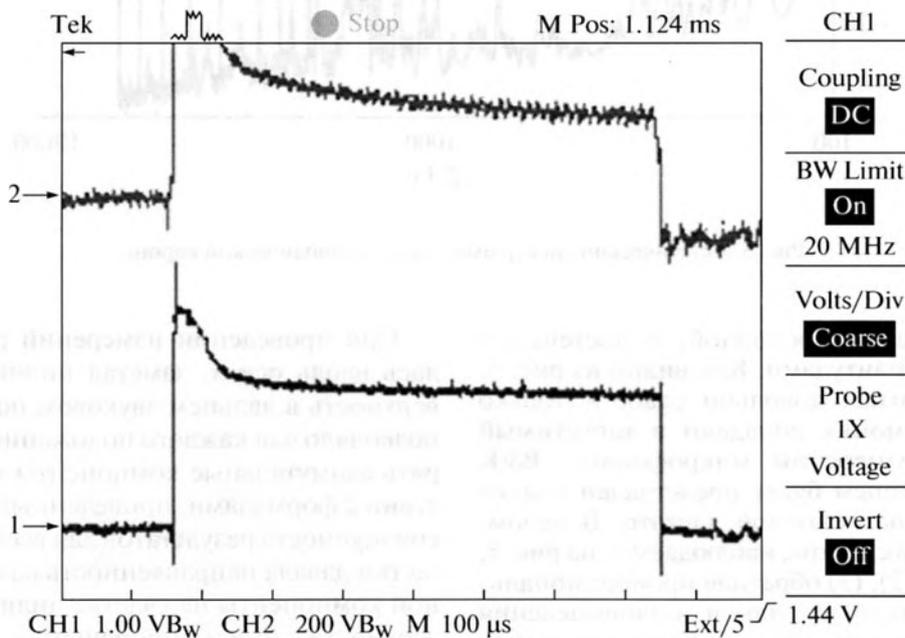
**Рис. 2.** Иглы, используемые в качестве актуаторов. Исследование радиусов кривизны острия под микроскопом для выбора наиболее острых игл. Стрелка указывает на иглу с острием наибольшей кривизны, используемую в описанном эксперименте.

той повторения от 0.5 до 2.5 кГц, длительность фронта не превышала 10 мкс. Отрицательный полюс генератора был заземлен. Для контроля тока с положительного коронирующего электрода, находившегося под высоким потенциалом, использовалась схема с оптоэлектронной развязкой. Форма и амплитуда импульсов напряжения и тока контролировалась с помощью осциллографа TDS2004B с полосой пропускания 20 МГц.

Эксперименты проводились в импульсно-периодическом режиме, форма импульса — меандр (прямоугольный импульс со скважностью 2), амплитуда 16 кВ, частота следования 700 Гц. В течение импульса возникал ток с амплитудой до 12 мкА, осциллограммы импульсов напряжения (нижний луч) и тока (верхний луч) приведены на рис. 3.

Схема эксперимента представлена на рис. 4. Акустические измерения в дальнем поле выполнены с помощью решетки из шести полудюймовых микрофонов Briel&Kjaer тип 4189C (частотный диапазон 6.3 Гц–20 кГц, чувствительность 50 мВ/Па, динамический диапазон 14.6–146 дБ). Микрофоны располагались в вершинах правильного шестиугольника на окружности диаметром 0.85 м. Микрофонная решетка могла перемещаться с помощью траверсной системы FESTO вдоль продольной оси  $x$ . Сигналы микрофонов подавались на анализатор Briel&Kjaer PULSE 3560D.

Коронирующий электрод располагался перпендикулярно оси решетки так, чтобы разрядная область находилась примерно на “оси решетки”. На рис. 5 показан записанный одним микрофоном решетки акустический спектр шума, создаваемого униполярной короной, работающей в импульсно-периодическом режиме, при положении решетки  $x = -0.3$  м. В спектре преобладает тональная составляющая, частота которой совпадает с частотой следования импульсов приложенного к электроду высокого напряжения. В силу того, что формы импульсов тока и напряжения имеют форму меандра, в спектре шума появляются пики



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения (нижний луч) и тока (верхний луч) короны.

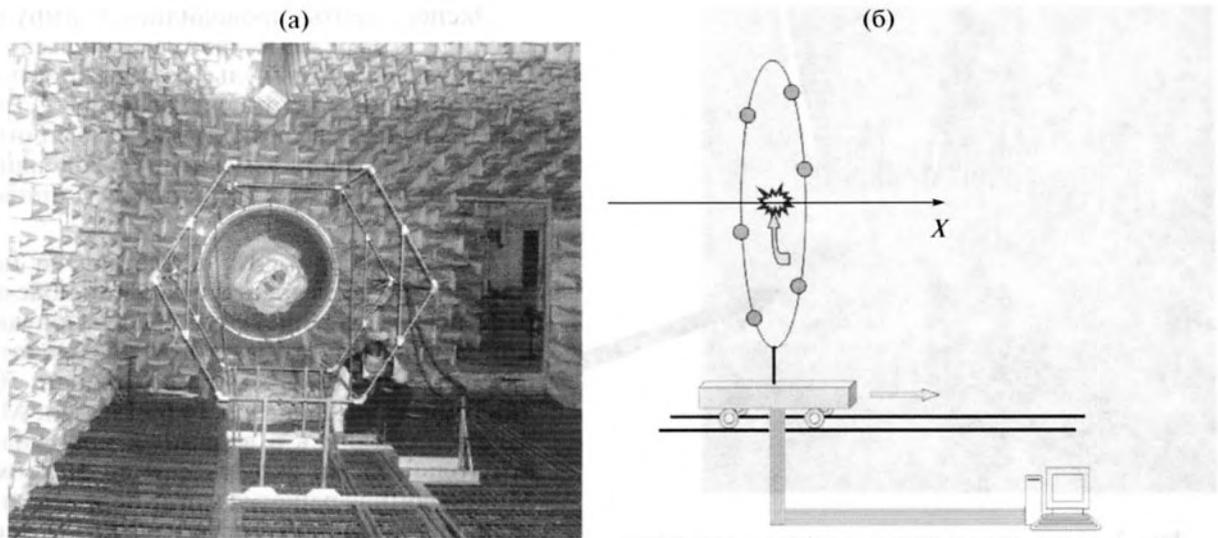


Рис. 4. Экспериментальная установка: (а) решетка микрофонов в АК-2; (б) схема измерений (электрод перпендикулярен “оси решетки”,  $x = 0$  соответствует положению источника звука – разрядной зоны).

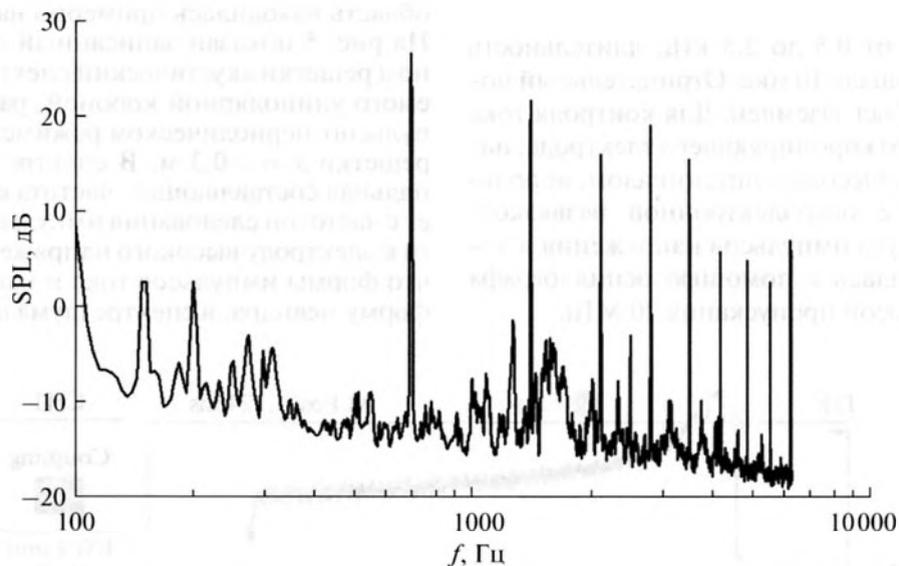


Рис. 5. Акустический спектр импульсно-периодической короны.

на частотах, кратных основной, с постепенно убывающими амплитудами. Как видно из рис. 5, акустический сигнал довольно слаб, и только первые пять гармоник попадают в допустимый диапазон для измерений микрофонами V&K 4189C. В дальнейшем будет представлен анализ сигнала только на основной частоте. В целом, убывание пиков в спектре, наблюдаемое на рис. 5, и следующая из (2), (3) обратная пропорциональность частоте амплитуд силы и тепловыделения позволяют утверждать, что основная гармоника вносит доминирующий вклад в интересующий нас процесс.

При проведении измерений решетка смещалась вдоль оси  $x$ , заметая цилиндрическую поверхность в дальнем звуковом поле (рис. 3). Это позволяло для каждого положения решетки измерять азимутальные компоненты шума в соответствии с формулами, приведенными в [17], так что совокупность результатов для всех положений решетки давала направленность каждой азимутальной компоненты на участке цилиндрической поверхности, заметаемой решеткой. Во всех экспериментах анализировался звуковой сигнал в полосе частот шириной 200 Гц с центром на ча-

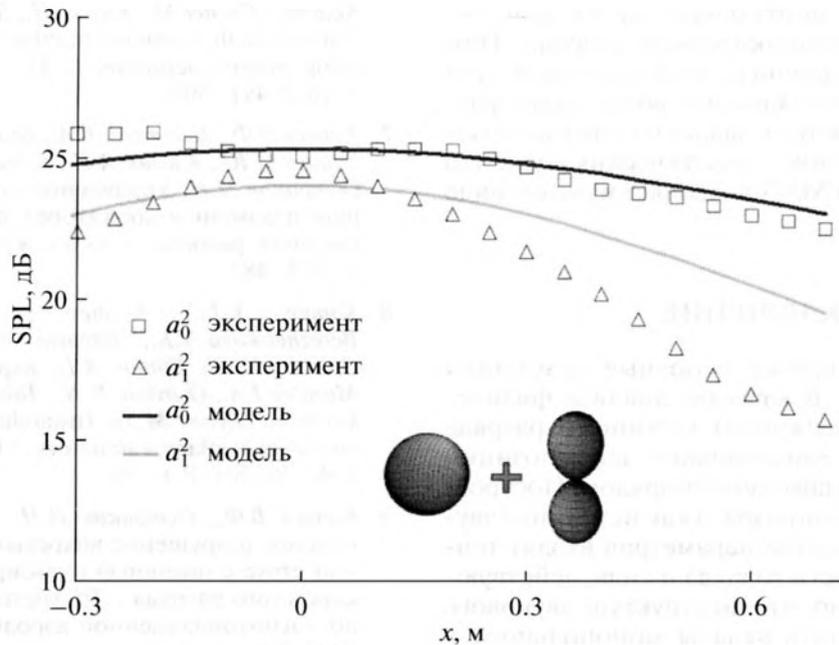


Рис. 6. Диаграммы направленности азимутальных мод.

стоте 700 Гц, равной основной частоте возбуждения разряда.

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

С помощью описанной процедуры построены диаграммы направленности измеренных в эксперименте азимутальных мод (рис. 6). Как отмечалось выше, в нашем случае для одиночной импульсно-периодической короны акустический источник может представлять лишь суперпозицию двух низших мультиполей: монополя как следствие импульсного локального вложения тепла и диполя как следствие создания действующей на газ пульсирующей объемной силы. При этом создаваемая короной сила направлена вдоль прямой, продолжающей игольчатый электрод. Следовательно, при расположении коронирующей иглы перпендикулярно оси  $x$  в дальнем поле следует ожидать присутствия осесимметричной азимутальной моды, создаваемой тепловым источником, и первой азимутальной моды, создаваемой пульсирующим силовым источником. Именно это и демонстрируют результаты эксперимента (рис. 6). Как и ожидалось согласно приведенной выше модели, вклад более высоких мод пренебрежимо мал.

Таким образом, результаты азимутального состава акустического излучения коронного разряда подтверждают предположение о его монополюсно-дипольной структуре. На рис. 6 сплошными линиями также представлены направленности точечного монополя и диполя, расположенных в

начале координат. Наблюдаемое увеличивающееся отличие измеренной направленности первой моды от модельной дипольной при удалении от источника связано с ослаблением сигнала первой моды практически до нижнего предела динамического диапазона микрофона.

Из (2), (3) получим оценку для интегральных амплитуд силы и тепловыделения в области разряда:  $\hat{Q} \sim 0.14$  Вт и  $\hat{F} \sim 4 \times 10^{-4}$  Н. Отметим, что эти значения найдены непосредственно из анализа звукового поля разряда. Оценим величины  $\hat{Q}$  и  $\hat{F}$  из других соображений. Действительно, величину объемной силы можно получить из энергетических соображений [3]: если объем газа с плотностью  $\rho$  и с характерным размером  $\sim d$ , на который действует указанная сила, разгоняется на расстоянии  $\sim L$  под ее действием до скорости  $\sim v$ , то из оценки изменения кинетической энергии имеем оценку для амплитуды силы:  $\hat{F} \sim \rho d^3 v^2 / 2L$ . Характерные скорости микроструй газа, генерируемые коронным разрядом с близкими параметрами, составляют  $v \sim 10$  м/с [3]. Размер разрядной зоны и микроструй, наблюдаемых при визуализация течения [3, 10], измеряется миллиметрами, т.е.  $d \sim L \sim 10^{-3}$  м. При таких параметрах получаем  $\hat{F} \sim 10^{-4}$  Н. Величину тепловыделения можно оценить через ток и напряжение в разряде, что дает  $\hat{Q} \sim 0.19$  Вт. Таким образом, оценки указанных величин совершенно различными способами дают близкие результаты. Метод, основанный на анализе азимутальных мод, можно рассматривать

как бесконтактный метод оценки силы, действующей на газ при возникновении разряда. При этом важно, что различные по физической сути тепловой и силовой механизмы воздействия разряда на газ проявляются в дальнем поле в виде одного и того же явления — акустических волн, что при использовании МАД позволяет в явном виде провести их оценку.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулируем кратко основные результаты настоящей работы. В качестве анализа физических свойств униполярного коронного разряда использован метод азимутальной декомпозиции звукового поля, создаваемого разрядом. Построена простейшая модель разряда как источника звука, в которую в качестве параметров входят тепловыделение в области разряда и сила, действующая на газ. Показано, что по структуре звукового поля можно разделить вклады монополярного и дипольного источников, соответствующих тепловому и силовому воздействию разряда на газ, и оценить их величины. Значения тепловыделения и силы, полученные акустическим методом, соответствуют оценкам, полученным другими методами. Таким образом, предложен новый бесконтактный способ оценки характеристик разряда, который может быть использован при оптимизации режимов работы плазменных актуаторов, предназначенных для воздействия на поток.

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ по постановлению № 220 “О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования” по договору № 14.Z50.31.0032.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cattafesta L.N., Sheplak M.* Actuators for active flow control // Annual Rev. Fluid Mechan. 2011. V. 43. P. 247–272.
2. *Corke T.C., Lon Enloe C., Wilkinson S.P.* Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control // Annual Rev. Fluid Mechan. 2010. V. 42. P. 505–529.
3. *Kopiev V.F., Belyaev I.V., Kopiev V.A., Ostrikov N.N., Faranosov G.A.* Instability wave control by plasma actuators: problems and prospects // AIAA. Paper 2011–973.
4. *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.
5. *Moreau E.* Airflow control by non-thermal plasma actuators // J. Appl. Phys. D. 2007. V. 40. P. 605–636.
6. *Kearney-Fischer M., Kim J.-H., Samimy M.* Noise control of a high Reynolds number high speed heated jet using plasma actuators // Int. J. Aeroacoust. 2011. V. 10. P. 491–509.
7. *Копьев В.Ф., Битюрин В.А., Беляев И.В., Годун С.М., Зайцев М.Ю., Климов А.И., Копьев В.А., Моралев И.А., Остриков Н.Н.* Управление шумом струи с помощью плазменных актуаторов диэлектрического барьерного разряда // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 473–482.
8. *Kopiev V.F., Akishev Y.S., Belyaev I.V., Berezhetskaya N.K., Bityurin V.A., Faranosov G.A., Grushin M.E., Klimov A.I., Kopiev V.A., Kossyi I.A., Moralev I.A., Ostrikov N.N., Taktakishvili M.I., Trushkin N.I., Zaytsev M.Yu.* Instability wave control in turbulent jet by plasma actuators // J. Appl. Phys. D. 2014. V. 47. 505201. P. 1–18.
9. *Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Зайцев М.Ю.* Резонансное разрушение вихревых колец в турбулентной струе с помощью пульсирующих микроструй коронного разряда / Тр. третьей школы-семинара по магнитоплазменной аэродинамике. М.: ОИВТ РАН, 2008. С. 123–131.
10. *Копьев В.Ф., Остриков Н.Н., Каравосов Р.К., Иншаков С.И., Гурьяшкин Л.П.* Визуализация микроструй коронного разряда при постоянном и импульсном напряжении / Тр. IX Межд. научно-техн. конф. ОМИП. Москва, 26–29 июня 2007. С. 456–459.
11. *Верещагин И.П.* Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985.
12. *Loiseau J.F., Batina J., Noel F., Peyrous R.* Hydrodynamical simulation of the electric wind generated by successive streamers in a point-to-plane reactor // J. Appl. Phys. D. 2002. V. 35. P. 1020–1031.
13. *Soloviev V.R., Krivtsov V.M.* Surface barrier discharge modelling for aerodynamic applications // J. Appl. Phys. D. 2009. V. 42. P.125208.
14. *Akishev Yu., Aponin G., Balakirev A., Grushin M., Karalnik V., Petryakov A., Trushkin N.* Stepwise expansion of a surface dielectric barrier discharge as a result of alternation in formation of streamers and leaders // J. Appl. Phys. D. 2013. V. 46. № 13. P. 135204.
15. *Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф.* Механизм генерации звука турбулентностью вблизи твердого тела // Изв. РАН. МЖГ. 2008. Т. 43. №. 1. С. 98–109.
16. *Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Chernyshev S.A.* Sound radiation from a free vortex ring and a ring crossing an obstacle // AIAA. Paper 1998–2371.
17. *Копьев В.Ф., Фараносов Г.А.* Обобщение метода азимутальной декомпозиции звукового поля компактного источника на случай измерений вблизи жесткой поверхности // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 65–75.
18. *Crighton D.G., Dowling A.P., Ffowcs-Williams J.E., Heckl M.A., Leppington F.A.* Modern Methods in Analytical Acoustics (Lecture Notes). Berlin: Springer-Verlag, 1992.