

03;04

Исследование нестационарного поля течения, генерируемого барьерным разрядом

© П.А. Поливанов, О.И. Вишняков, А.А. Сидоренко, А.А. Маслов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
E-mail: polivanov@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 7 декабря 2010 г.

Поиск новых способов управления течением газа в настоящее время является чрезвычайно актуальным для авиастроения, поскольку возможности традиционных методов ограничивают эффективность летательных аппаратов. Одним из перспективных способов является применение электрогазодинамических устройств, основанных на прямом преобразовании электрической энергии в силовое воздействие на течение. Рассматривается активатор, основанный на принципе диэлектрического барьерного разряда. При помощи измерения электродинамических параметров разряда, а также измерения полей индуцированной скорости методом PIV исследуются нестационарные характеристики активатора. Получены мгновенные и интегральные параметры разгона газа, а также определена эффективность активатора.

В последнее время интенсивно ведутся исследования возможности управления потоками при помощи электрического разряда. Электрогазодинамическое воздействие на поток имеет ряд преимуществ: простор для конструкции разрядников и возможность их интеграции в поверхность, а также отсутствие ограничений, позволяющих вводить периодические возмущения высокой частоты. В качестве одного из перспективных методов плазменного управления течениями рассматривается диэлектрический барьерный разряд (ДБР). Идея о возможности управления отрывным течением на крыле при помощи ДБР впервые была высказана в работе [1]. К настоящему времени выполнено большое количество экспериментальных работ (см., например, обзор [21]), в которых была показана практическая осуществимость данного метода управления. В ИТПМ СО РАН на протяжении ряда лет подобные исследования успешно ведутся в аэродинамических трубах и летном

эксперименте [3,4]. В трубном эксперименте была доказана эффективность применения ДБР для управления отрывом на прямых и стреловидных крыльях [5].

На настоящий момент эффективное управление потоком с использованием такого разряда возможно только на умеренных скоростях. Для улучшения эффективности влияния ДБР на поток и расширения его применимости требуется доскональное понимание всех процессов, связанных с возникновением и существованием разряда. Наиболее интересный эффект, заключающийся в ускорении потока разрядом, не имеет однозначного объяснения. Существует несколько различных теоретических моделей, описывающих процессы в ДБР (см., например, [6–7]), но выбор корректной модели может быть сделан только на основании сравнения с детальными экспериментальными данными. Несмотря на обилие экспериментов по измерению средней скорости, индуцируемой в разряде, наблюдается нехватка данных об изменении поля скорости в течение периода колебаний напряжения. Данное экспериментальное исследование посвящено измерению нестационарного поля скоростей, генерируемого диэлектрическим барьерным разрядом, электродинамических характеристик барьерного разряда, а также сил, действующих на поток со стороны ДБР.

Эксперимент проводился в покоящемся газе, при атмосферном давлении и комнатной температуре. Разрядник изготавливался из стеклотекстолитовой пластины, пара медных электродов располагалась на двух противоположных сторонах пластины (рис. 1). Внутренний электрод был заземлен и изолировался от воздуха слоем эпоксидного компаунда. Длина электродов составляла 150 mm. Начало системы координат в работе привязано к правому краю открытого электрода.

На электроды подавалось гармоническое напряжение частотой 8 kHz и амплитудой 7.2 kV. Ток и напряжение на электродах измерялись цифровым осциллографом RIGOL DS1102E через индукционный токовый пробник Tektronix P6021 и высоковольтный пробник напряжения Tektronix P6015A. Измерения скорости осуществлялись PIV комплексом „ПОЛИС“. Поток засеивался микрочастицами со средним размером 1 μ m. Восстановление поля скорости по изображениям трассеров производилось с использованием кросс-корреляционных адаптивных алгоритмов с непрерывным смещением окна, однократным делением сетки и деформацией расчетной области. Случайная ошибка измерений векторов скорости в данных экспериментах не превышала 1–2%.

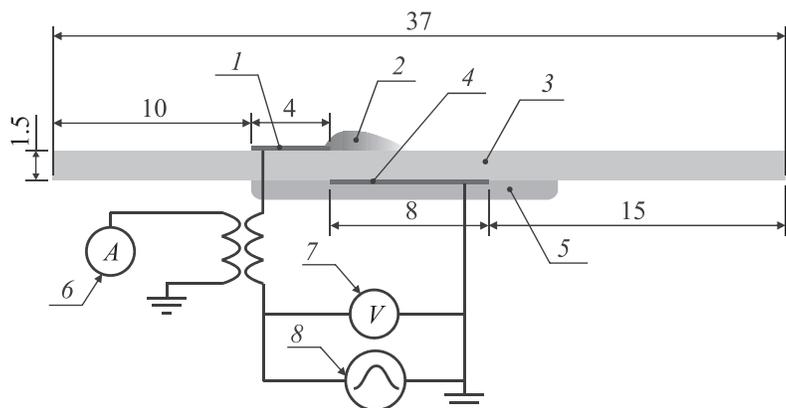


Рис. 1. Схема диэлектрического барьерного разряда: 1 — внешний электрод, 2 — зона ионизации, 3 — стеклотекстолитовая пластина, 4 — внутренний электрод, 5 — эпоксидный компаунд, 6 — токовый пробник, 7 — пробник высокого напряжения, 8 — высоковольтный источник переменного напряжения.

На рис. 2 представлены два поля скорости для момента окончания горения разряда при отрицательной и положительной разности потенциалов между электродами (завершение отрицательной и положительной фаз разряда). Из рисунков видно, что линии тока приходят сверху и уходят в направлении заземленного электрода. При этом максимальная скорость, индуцируемая разрядом, составляет приблизительно 5.4 м/с и достигается при отрицательном напряжении (рис. 2, *a*). На рис. 2, *b* индуцируемая скорость уменьшается, при этом изменение скорости происходит только в области ионизации. Поскольку вязкостные силы в данном случае оказывают слабый эффект по сравнению с ускорением потока электрическим полем, можно утверждать, что в течение одного периода колебаний происходит как ускорение, так и торможение газа электрогазодинамическими силами.

Для дальнейшего анализа по измеренным полям скорости были вычислены пространственные распределения ускорений. Интегрирование продольной компоненты ускорения по пространству позволило получить продольную объемную силу F_x . Оценка мгновенной мощности, вкладываемой ДБР в разгон потока, осуществлялась интегрированием

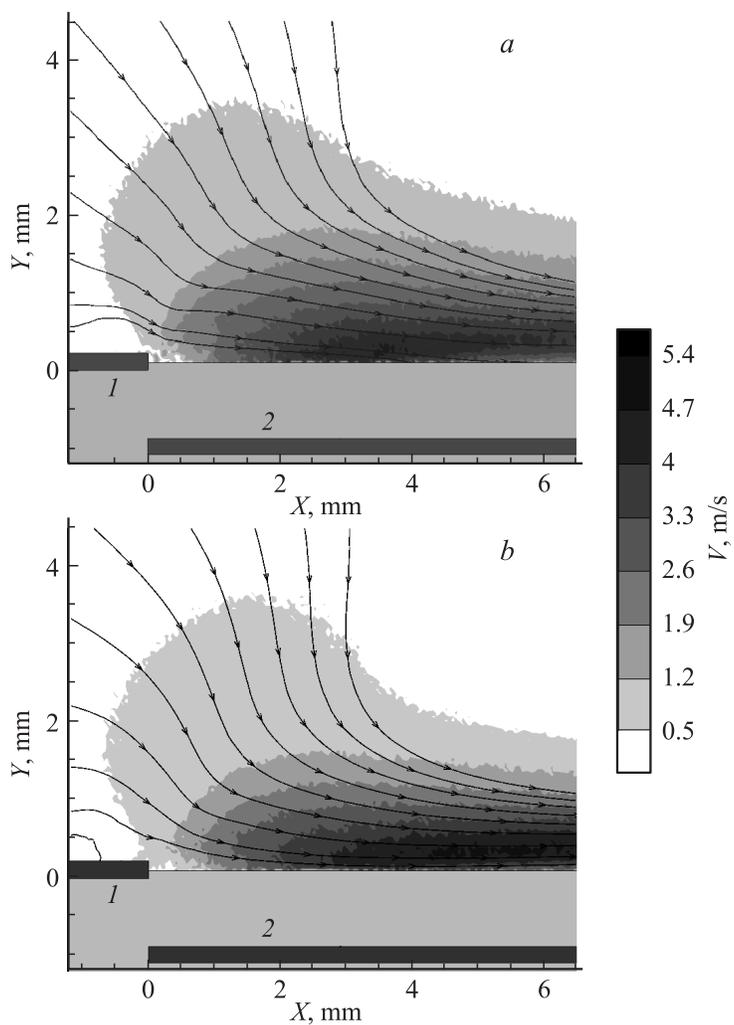


Рис. 2. Поля скоростей в момент исчезновения плазмы: *a* — отрицательная разность потенциалов ($t = 70.2 \mu\text{s}$), *b* — положительная разность потенциалов ($t = 7.8 \mu\text{s}$); 1 — внешний электрод, 2 — внутренний электрод (заземленный).

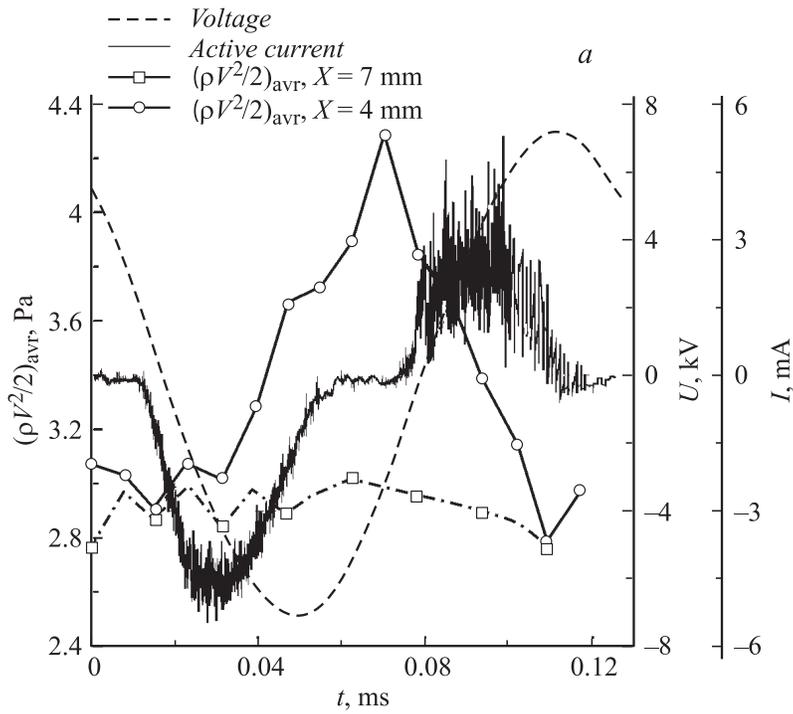


Рис. 3. Осциллограммы напряжения и активной компоненты тока на фоне: *a* — среднего динамического давления в разных сечениях, *b* — кинетической мощности потока и продольной компоненты силы (F_x).

по пространству произведения скорости на ускорение в каждой точке измерений. Положительная мощность соответствует ускорению потока, а отрицательная — торможению. В характерных сечениях производились вычисления осредненного динамического напора.

Основные полученные результаты показаны на рис. 3. Во время горения разряда возникают нестационарные плазменные образования — стримеры, которые видны на осциллограмме тока в виде зашумленных областей. Другим характерным признаком возникновения разряда является появление активной компоненты тока, связанной с протеканием

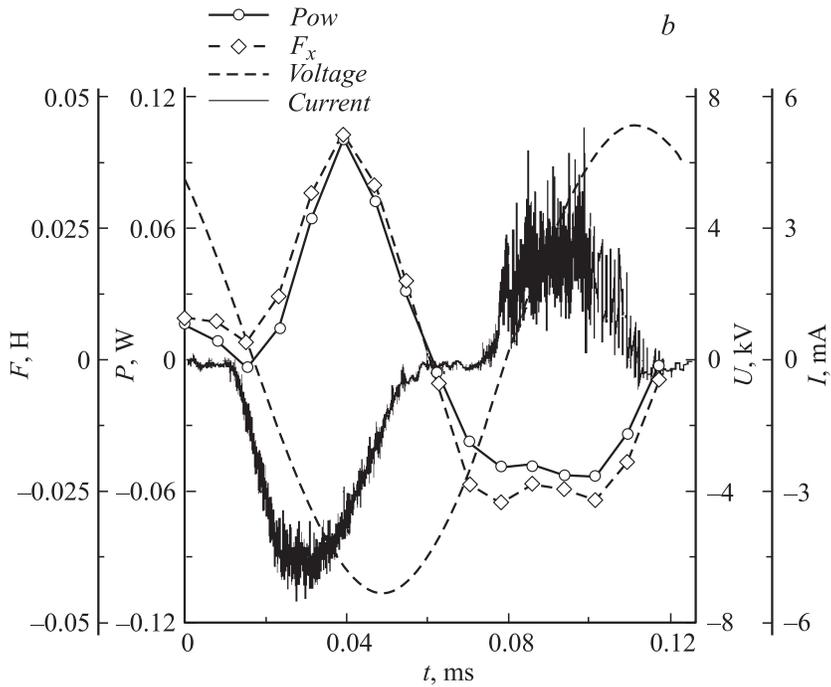


Рис. 3 (продолжение).

тока в плазме. Это позволяет отчетливо различать области горения разряда на осциллограммах.

Для построения электродинамической модели разряда рассмотрим изменение сил и динамического напора в течение цикла разряда. Начало осциллограмм совпадает с завершением положительной фазы разряда. Горение разряда завершается из-за выравнивания потенциалов между открытым электродом и поверхностью диэлектрика, что вызвано уменьшением скорости роста напряжения между электродами, при этом разность потенциалов достигает своего максимума. В этот момент динамический напор минимален, а значение продольной компоненты силы (F_x) близко к нулю.

Далее напряжение уменьшается, динамический напор практически не меняется, а значение F_x слабо колеблется. Данные осцилляции могут быть вызваны распределением в пространстве положительных (появившихся после завершения положительной фазы горения разряда) и отрицательных (оставшихся после отрицательной фазы) ионов в сложном электрическом поле, создаваемым двумя электродами и поверхностью диэлектрика.

При достижении напряжения пробоя начинается отрицательная фаза горения разряда. Значение динамического напора непрерывно растет, F_x вначале так же резко растет и, достигнув максимума в момент максимального значения тока в плазме, падает до нуля к окончанию отрицательной фазы разряда. Такое изменение силы можно объяснить существованием некомпенсированного объемного заряда отрицательных ионов кислорода, растущего в течение отрицательной фазы горения разряда. Отрицательные ионы ускоряются в поле слева направо и разгоняют поток за счет столкновений с нейтральными атомами. Изменение силы тока в плазме происходит из-за изменения разности потенциалов между электродом и поверхностью диэлектрика. Поэтому максимум силы тока совпадает с максимумом напряженности поля, что приводит к максимальному значению продольной компоненты силы. В течение отрицательной фазы поверхность диэлектрика заряжается отрицательно.

После окончания отрицательной фазы горения разряда значение динамического напора начинает падать. Модуль F_x начинает расти, но теперь сила направлена справа налево и тормозит поток. Это вызвано ростом напряжения между электродами, что приводит к появлению положительной разности потенциалов между открытым электродом и поверхностью диэлектрика. Слабое уменьшение F_x после начала положительной фазы горения разряда показывает изменение характера течения с появлением плазмы. Далее происходит уменьшение тормозящей силы вследствие уменьшения некомпенсированного пространственного заряда отрицательных ионов.

Эффективность разгона газа ДБР часто оценивают как отношение средней кинетической мощности газового потока (P_{um}) к электрической мощности (P_s). При расчете электрической мощности в работе была использована только активная компонента тока I_A , связанная с образованием области ионизации. Для данного эксперимента такая оценка

дает величину

$$\eta = \frac{P_{um}}{P_s} = \frac{\frac{\rho l}{2} \int V^3(y) dy}{\frac{1}{T} \int_0^T I_A(t) U(t) dt} = \frac{0.00641 [W]}{6.663 [W]} \cdot 100\% = 0.096\%,$$

где V — средняя скорость потока, ρ — плотность потока, l — длина электродов, y — поперечная координата, U — напряжение на электродах, T — период колебаний.

В этом случае оценка полезной мощности учитывает только стационарное поле течения, генерируемого разрядом. Как было показано выше, в течение цикла ДБР не только ускоряет поток, но и тормозит его. Поэтому для более корректной оценки эффективности ДБР надо использовать среднюю мощность, расходуемую на генерацию периодического возмущения (P_u):

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_u}{P_s} \\ &= \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \rho l [\int |V_x(x, y) a_x(x, y)| dx dy + \int |V_y(x, y) a_y(x, y)| dx dy] dt}{\frac{1}{T} \int_0^T I_A(t) U(t) dt} \\ &= \frac{0.0475 [W]}{6.663 [W]} \cdot 100\% = 0.71\%, \end{aligned}$$

где V_x и V_y — продольная и поперечная скорости потока, a_x и a_y — продольная и поперечная компоненты ускорения потока.

Данная формула учитывает пульсационный характер течения, генерируемого разрядом. Необходимо отметить, что получившаяся в итоге эффективность по-прежнему невысока, но работа не преследовала цели улучшения эффективности разряда, и оптимизация разрядников не производилась.

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 80 и аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы“ № 2.1.1/3963.

Список литературы

- [1] *Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P.* // AIAA. Pap. 1998–0328.
- [2] *Post M.L., Corke T.C.* // AIAA J. 2004. V. 42. N 11. P. 2177–2184.
- [3] *Malmuth N., Maslov A., Sidorenko A., Fomichev V., Korotaeva T.* // AIAA. Pap. 2008–4336.
- [4] *Sidorenko A., Budovsky A., Pushkarev A., Maslov A.* // AIAA Pap. 2008–373.
- [5] *Сидоренко А.А., Будовский А.Д., Постников Б.В., Зверков И.Д., Занин Б.Ю., Козлов В.В., Маслов А.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 7. С. 22–30.
- [6] *Jayaraman B., Cho Y., Shyy W.* // AIAA Pap. 2007–4531.
- [7] *Lagmich Y., Callegari Th., Pitchford L.C., Boeuf J.P.* // J. Physics D: Appl. Phys. 2008. V. 41. N 9. Pap. 095205.