

УДК 533.9

СРАВНЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ БАРЬЕРНЫМ И СКОЛЬЗЯЩИМ РАЗРЯДАМИ

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mail: vis_ol@itam.nsc.ru

Проведено сравнение двух типов электрических разрядов, которые предполагается использовать для управления течением воздуха. В эксперименте измерены электрические характеристики разрядов, а также скорость генерируемого ими потока. Показано, что в скользящем разряде скорость ионного ветра меньше, чем в диэлектрическом барьерном разряде. Проведена оценка объемных сил, действующих со стороны разряда на воздух, а также эффективности электрогазодинамического воздействия. Установлено, что наличие у скользящего разряда дополнительного электрода оказывает существенное влияние на распределение пространственного заряда и приводит к изменению сил при неизменных электрических характеристиках.

Ключевые слова: ионный ветер, барьерный и скользящий разряды, PIV-метод измерения скорости.

Введение. В последнее время исследуются различные способы управления течениями вблизи поверхностей летательных аппаратов с помощью электрических разрядов. Устройства, основанные на использовании разрядов, воздействуют на поток за счет создания низкотемпературной слабоионизованной плазмы. Основными преимуществами этих устройств являются простота конструкции, отсутствие движущихся частей (что повышает ее надежность) и возможность встраивания разрядников в обшивку летательного аппарата. Также применение электроразрядных активаторов позволяет вводить в поток периодические возмущения высокой частоты, что необходимо для управления высокоскоростными течениями.

Существует большое количество работ, в которых исследуется возможность управления течением с помощью электроразрядных активаторов (см., например, [1]). В первых экспериментах воздействие на поток осуществлялось коронным разрядом [2, 3]. Недостатком этого способа является опасность перехода разряда в дуговую фазу. Чтобы избежать этого перехода, было предложено использовать поверхностный диэлектрический барьерный разряд (ДБР) и скользящий разряд (СР). В экспериментах, проведенных в аэродинамических трубах, доказана эффективность применения ДБР для управления отрывом на прямых и стреловидных крыльях [4], а также для управления взрывом вихря на подветренной стороне дельта-крыла [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-01-31093мол.а).

© Поливанов П. А., Вишняков О. И., Сидоренко А. А., Маслов А. А., 2013

Типичная конструкция барьерного разряда представляет собой два электрода, расположенные асимметрично на противоположных поверхностях диэлектрика. Один (основной) электрод подключен к источнику высокого переменного напряжения, а другой (закрытый) заземлен и изолирован от окружающей среды. Скользящий разряд отличается от ДБР наличием дополнительного электрода на верхней поверхности диэлектрика, что позволяет увеличивать плазменную область, в которой и происходит разгон газа. Поэтому в настоящее время этот тип разряда активно изучается.

В работе [6] проведено экспериментальное исследование течения, создаваемого СР. На основной электрод подавался переменный высоковольтный сигнал, а на закрытый и дополнительный открытый электроды — постоянное напряжение. Установлено, что в зависимости от комбинации напряжений вблизи открытых электродов можно формировать разнонаправленные струи. Такой же характер генерируемого течения наблюдался в экспериментах [7], в которых использовался активатор, состоящий из двух ДБР. Кроме того, из результатов работы [6] следует, что изменение переменного напряжения на основном открытом электроде оказывает большее влияние на ионный ветер, чем варьирование постоянного напряжения на дополнительном электроде. Однако в [6] отсутствует объяснение такого влияния.

В работе [8] проведено исследование динамики потока, создаваемого ДБР, в течение периода колебаний напряжения и показано, что поток является нестационарным. Разгон и торможение газа происходят под действием электрического поля, возникающего в результате взаимодействия заряда на электродах и заряда, накапливающегося на поверхности диэлектрика. Значительное влияние поверхностного заряда на электрическое поле было подтверждено, например, в работе [9].

В настоящей работе исследуется влияние дополнительного открытого электрода СР на формирование поверхностного и пространственного зарядов, а также на динамику индуцированного течения. Проводится сравнение динамики течений, генерируемых ДБР и СР.

1. Постановка эксперимента. Эксперимент проводился в покоящемся воздухе при комнатной температуре и атмосферном давлении. Конфигурация разрядников была однотипной, разрядники различались лишь наличием третьего (дополнительного) электрода в случае СР (рис. 1). Разрядники располагались на стеклянной подложке. Диэлектрический барьер толщиной приблизительно 1 мм состоял из 15 слоев самоклеящейся полиимидной пленки (Kapton 3M). Электроды изготавливались из фольги толщиной 40 мкм. Ширина закрытого электрода составляла 7 мм. Поверхности открытых электродов не пересекали поверхность инкапсулированного электрода, ширина электродов составляла 4 мм. При использовании ДБР заземляющим являлся закрытый электрод, а при использовании

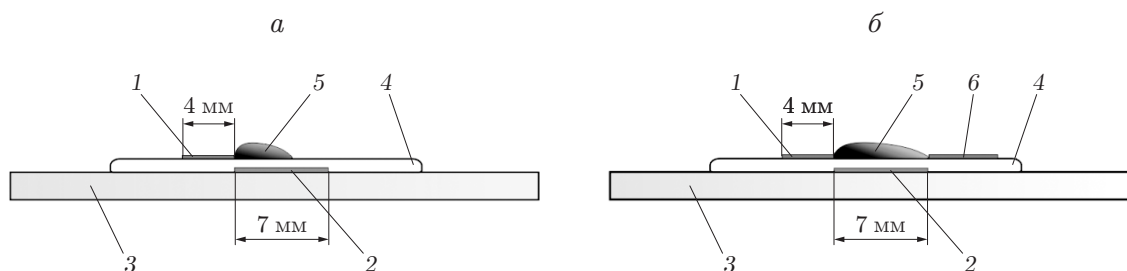


Рис. 1. Схемы ДБР (а) и СР (б):

1 — основной электрод, 2 — заземленный электрод, 3 — стеклянная подложка, 4 — диэлектрический барьер из полиимидной пленки, 5 — плазменная область, 6 — дополнительный электрод

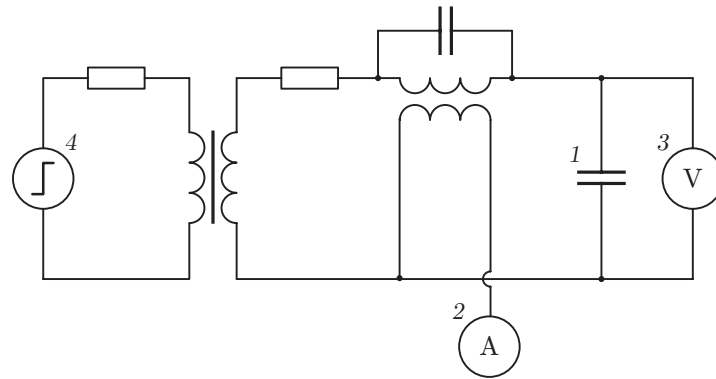


Рис. 2. Электрическая схема питания разряда:

1 — разряд (ДБР или СР), 2 — индукционный токовый пробник, 3 — высоковольтный пробник, 4 — источник высокого напряжения

СР заземлялся также дополнительный открытый электрод. В обоих случаях переменное напряжение подавалось на основной открытый электрод. Система координат привязана к правому краю основного электрода. Измерения скорости проводились PIV-комплексом DantecDynamics, методика измерений аналогична описанной в работе [8].

Электрическая схема создания разряда в эксперименте (рис. 2) содержит колебательный контур, образованный вторичной обмоткой трансформатора и разрядником. Ток и напряжение на электродах измерялись аналогово-цифровым преобразователем TiePie HandyScore через индукционный токовый пробник Tektronix P6021 и высоковольтный пробник напряжения Tektronix P6015A.

2. Анализ электрических характеристик. В обоих экспериментах с инвертора на трансформатор подавался прямоугольный сигнал с частотой 13,5 кГц. Выбор данной частоты обусловлен тем, что она является резонансной для колебательного контура. В результате изменение напряжения и тока на ДБР было близким к синусоидальному. При этом в течение периода горение разряда происходит два раза. Наиболее характерный признак возникновения плазмы — появление на фоне тока смещения (реактивного тока) активной компоненты тока (тока проводимости) в плазме. Это позволяет четко различать области горения разряда на осциллограммах. При горении разряда возникают нестационарные плазменные образования — стримеры, что обуславливает появление на осциллограмме тока зашумленных областей. Стримеры образуются в областях, где поле является наиболее неоднородным и происходит пробой. Стримерный механизм пробоя наиболее характерен для поверхностных разрядов при высоких давлениях. Также следует отметить, что пробой вызван не разностью потенциалов между электродами, а разностью потенциалов между открытым электродом и поверхностью диэлектрика, поэтому наличие тока в плазме обеспечивается не прикладываемым напряжением, а величиной его градиента по времени.

На рис. 3 представлены осциллограммы тока и напряжения для ДБР и СР. Видно, что кривые 1, 2 практически совпадают. Это означает, что мощности обоих разрядов приблизительно равны. Заметим, что моменты начала горения разряда (зашумленные области на осциллограммах тока) также совпадают.

Полученные данные показывают, что и в случае ДБР, и в случае СР при используемых напряжениях основная мощность затрачивается на создание плазмы в окрестности основного электрода. Однако, судя по изменению активного тока, небольшая доля ионов покидает эту область и замыкает электрическую цепь между основным и дополнительным заземленным электродами.

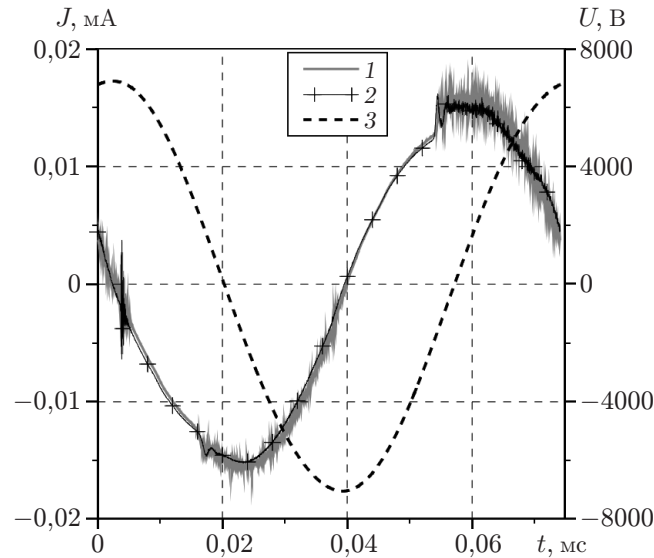


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения:

1 — осциллограмма тока для ДБР, 2 — осциллограмма тока для СР, 3 — осциллограмма напряжения

3. Анализ газодинамических характеристик. Течение, генерируемое разрядом, является нестационарным и имеет периодический по времени характер. На рис. 4 представлены поля скоростей, осредненных по одному периоду колебаний напряжения. Разгон потока начинается на кромке основного электрода, находящейся в точке $(0; 0)$. Линии тока опускаются сверху, так как разряд, разгоняя поток, создает разрежение, вследствие чего газ движется по направлению к поверхности. Далее линии тока становятся параллельными поверхности диэлектрика.

При использовании ДБР максимум средней за период скорости составляет $4,4 \div 4,7$ м/с при $x = 2,8 \div 3,7$ мм. В случае СР в интервале $x = 4,1 \div 5,1$ мм достигается максимум средней за период скорости, приблизительно равный 4 м/с. Поскольку течение, создаваемое разрядом, не является постоянным в течение периода колебаний напряжения, абсолютный максимум скорости не совпадает с максимумом средней за период скорости.

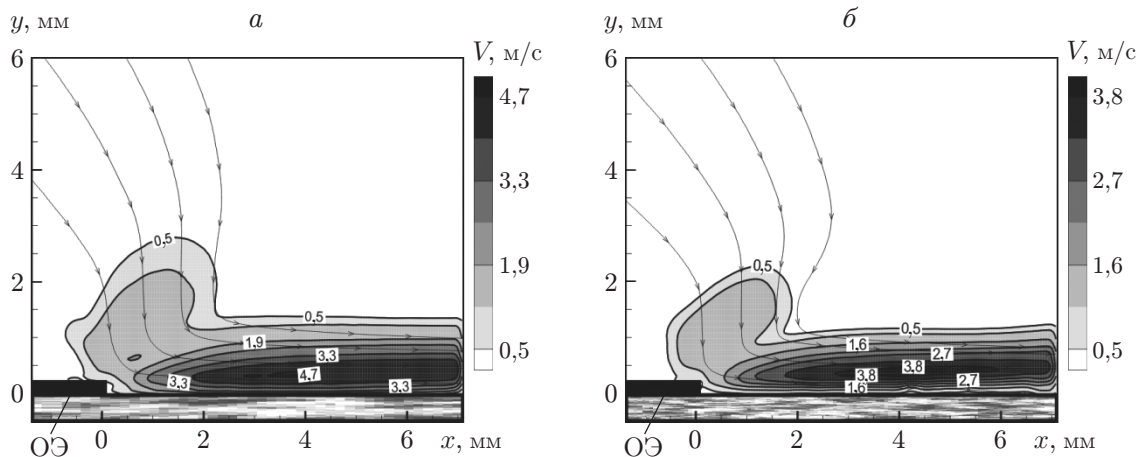


Рис. 4. Поля осредненных по времени скоростей, полученные для ДБР (а) и СР (б): ОЭ — основной электрод

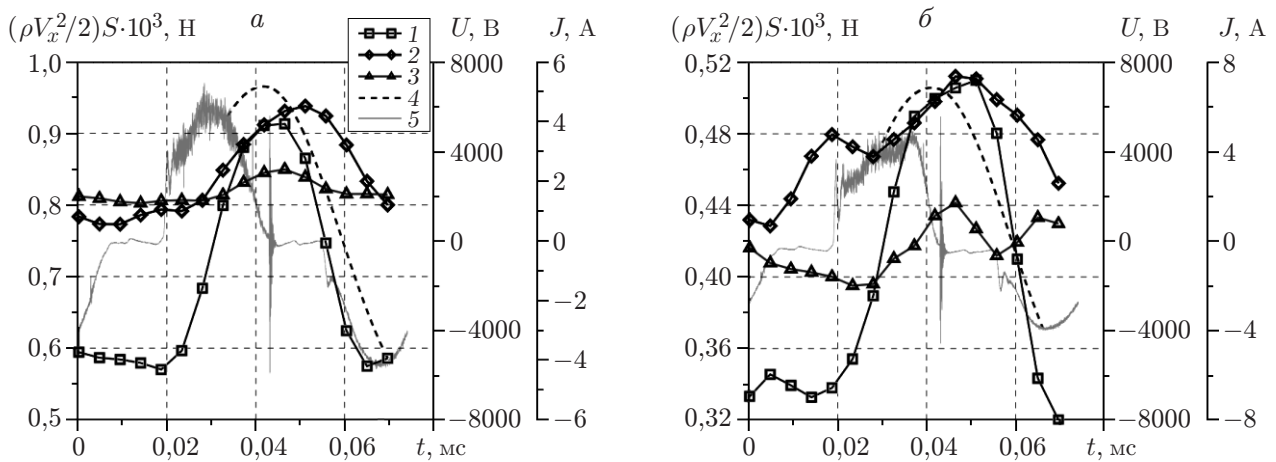


Рис. 5. Осциллограммы продольной компоненты скоростного напора (1–3), напряжения (4) и активной компоненты тока (5):
 а — для ДБР, б — для СР; 1 — $x = 2,5$ мм, 2 — $x = 4$ мм, 3 — $x = 6,5$ мм

При использовании ДБР максимальная за период скорость достигается в сечении $x = 2,8$ мм и в момент времени $t = 0,048$ мс составляет 5,3 м/с. В случае СР максимальная за период скорость, равная 4,1 м/с, достигается в момент времени $t = 0,053$ мс и приблизительно постоянна при $x = 2,7 \div 4,1$ мм.

Приведенные выше данные позволяют сделать вывод, что в целом характеры течения для обоих типов разряда подобны, но СР индуцирует менее интенсивный ионный ветер. Анализ осредненной по периоду скорости течения показывает, что при использовании СР максимум скорости расположен дальше от кромки основного электрода, вероятно, вследствие увеличения области ионизации и изменения поля напряженности, обусловленного наличием дополнительного электрода.

На рис. 5 представлены осциллограммы мгновенного продольного скоростного напора в течение одного периода колебаний напряжения для нескольких характерных сечений. В сечении $x = 2,6$ мм для обоих типов разряда среднеквадратичные пульсации скоростного напора близки к максимальным. В сечении $x = 4$ мм для обоих типов разряда достигается максимальная средняя индуцируемая скорость. Сечение $x = 6,5$ мм расположено вблизи границы области измерений (вблизи открытого дополнительного электрода).

Из рис. 5 следует, что для СР и ДБР осциллограммы напряжения совпадают, но на осциллограмме активной компоненты тока СР в течение положительной фазы горения разряда наблюдается смещение максимума. Для обоих типов разряда характерно ускорение потока в отрицательной фазе горения и торможение в положительной фазе. В случае использования ДБР при движении от сечения к сечению наблюдается смещение кривой зависимости индуцируемого скоростного напора от времени, при этом характер кривой не меняется. При использовании СР в сечениях, расположенных вниз по потоку, также происходит смещение кривых, но в отличие от случая ДБР их характер меняется. Появляются дополнительные максимумы, в частности в сечении $x = 6,5$ мм.

4. Анализ сил, действующих на газ со стороны разрядников. На основе анализа измеренных полей скорости можно изучить динамику изменения объемной силы, генерируемой разрядом. Компоненты силы рассчитывались по формуле

$$a_i = (V_i - V_{i-1})/\Delta t,$$

где V_i , a_i — компоненты векторов скорости и ускорения в области измерений.

С использованием значений ускорений можно оценить мгновенную мощность разряда, расходуемую на разгон и торможение потока:

$$P_{ut}(t) = \rho l \left(\int V_x(x, y, t) a_x(x, y, t) dx dy + \int V_y(x, y, t) a_y(x, y, t) dx dy \right).$$

Здесь V_x, V_y — продольная и поперечная компоненты скорости потока; a_x, a_y — продольная и поперечная компоненты ускорения потока; $l = 15$ см — длина электродов.

Поскольку в течение периода колебаний напряжения разряд не только разгоняет, но и тормозит течение, для определения полной механической мощности, подводимой в поток, использовалась формула

$$P_{up}(t) = \rho l \left(\int |V_x(x, y, t) a_x(x, y, t)| dx dy + \int |V_y(x, y, t) a_y(x, y, t)| dx dy \right).$$

На рис. 6 представлены временные зависимости мгновенной мощности и продольной компоненты силы, генерируемой разрядом, а также осциллограммы тока и напряжения. Продольная компонента силы рассчитывалась по формуле

$$F_x = \rho l \int a_x(x, y, t) dx dy.$$

На рис. 7 показано изменение во времени распределения продольной компоненты силы $\langle f_x(x, t) \rangle$, создаваемой ДБР и СР:

$$\langle f_x(x, t) \rangle = \rho l \int a_x(x, y, t) dy.$$

Проведем анализ рис. 6, 7. Подробное описание взаимосвязи сил, действующих со стороны разряда на газ, с электрическими параметрами разряда приведено в [8]. В настоящей работе основное внимание уделено сравнению влияния СР и ДБР на поток.

В интервале $t = 0 \div 0,018$ мс для обоих типов разряда значение силы колеблется в окрестности $F_x = 0$. Затем происходит пробой и начинается отрицательная фаза горения разряда. При использовании ДБР значение силы сразу увеличивается, в то время как в случае СР рост силы начинается с задержкой на $1/16$ периода. При этом в случае ДБР сила возникает в области $x = 0 \div 1,5$ мм, а в случае СР — в области $x = 0 \div 3,5$ мм. Далее сила и ток проводимости увеличиваются в течение половины периода, после чего начинают уменьшаться. В случае ДБР скорость уменьшения силы выше, чем в случае СР, и к моменту окончания отрицательной фазы горения разряда сила становится равной нулю. Это можно объяснить тем, что в случае ДБР область ускорения со временем смещается от основного электрода, а в его окрестности сила резко уменьшается до нуля, что обусловлено быстрым накоплением заряда на поверхности диэлектрика вблизи основного электрода. Это приводит к ослаблению электрического поля в данной области. В случае СР влияние дополнительного открытого электрода приводит к изменению формы линий напряженности, что обуславливает изменение траектории ионов и более равномерное накопление заряда на поверхности диэлектрика. В результате в каждый конкретный момент времени объемная сила действует на большую область потока. Тем не менее для обоих типов разряда наиболее интенсивное накопление заряда происходит вблизи высоковольтного электрода.

По окончании отрицательной фазы горения разряда в момент $t = 0,04$ мс в сечениях, расположенных вблизи заземленного открытого электрода, продолжается разгон потока, в то время как возле кромки основного электрода возникает тормозящая сила. Это обусловлено падением напряжения, которое приводит к появлению положительной разности потенциалов между основным электродом и поверхностью диэлектрика. Под действием

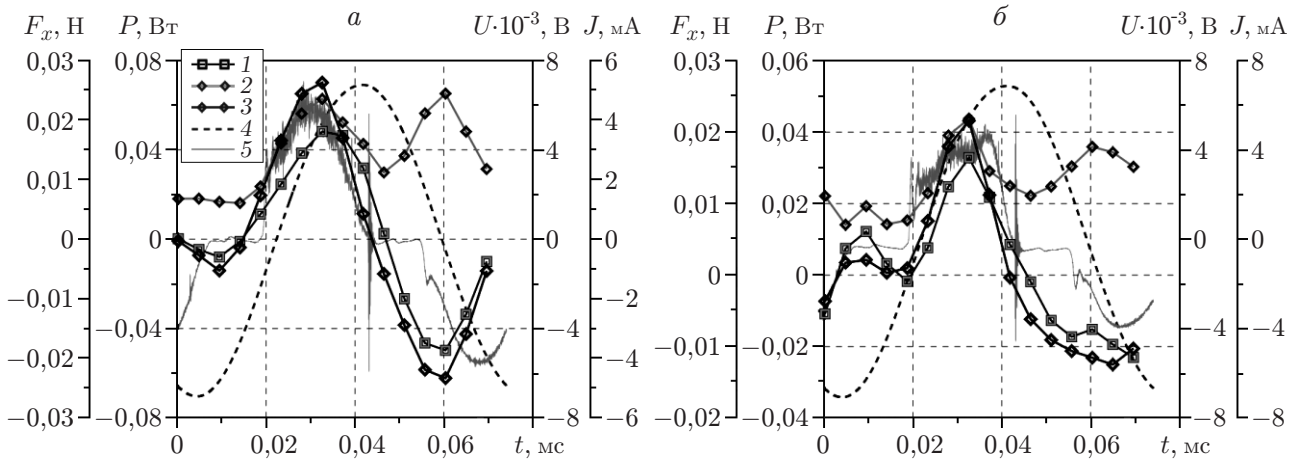


Рис. 6. Изменение мощности (1), модуля мощности (2), продольной компоненты силы (3), напряжения (4) и активной компоненты тока (5) в течение одного периода:
a — для ДБР, *б* — для СР

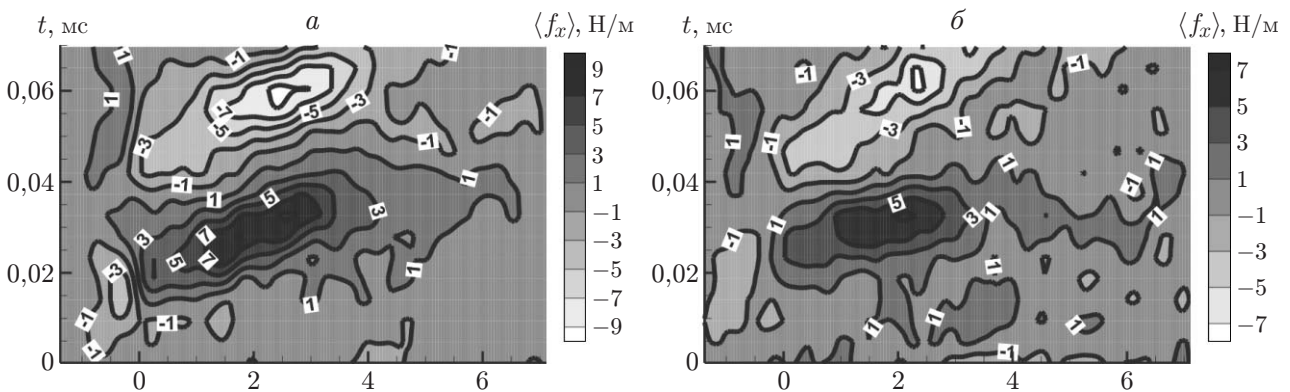


Рис. 7. Изменение во времени распределенной вдоль оси *x* продольной компоненты силы:
a — для ДБР, *б* — для СР

электрического поля отрицательные ионы начинают двигаться в направлении, противоположном направлению потока, что приводит к его торможению. Сначала зона торможения появляется вблизи основного электрода, что обусловлено большей величиной поверхностного потенциала диэлектрика. Затем максимум тормозящей силы начинает смещаться вдоль оси *x*.

В случае ДБР тормозящая сила имеет четко выраженный максимум, совпадающий с максимумом тока. В случае СР фаза торможения более продолжительная и максимум силы смещается на большее расстояние от основного электрода. При торможении кривая силы для СР является более плавной, чем для ДБР, т. е. возникает ситуация, обратная ситуации, имеющей место при отрицательной фазе горения: в случае ДБР заряд более равномерно распределен в пространстве, чем в случае СР.

Далее в процессе горения разряда происходит уменьшение тормозящей силы. Это обусловлено тем, что величина тормозящей силы зависит и от напряженности поля, и от величины объемного некомпенсированного заряда. В течение положительной фазы горения разряда происходит уменьшение некомпенсированного пространственного заряда отрицательных ионов, что приводит к уменьшению величины тормозящей силы.

Оценим эффективность разгона газа:

— в случае ДБР

$$\eta_t = \frac{1}{P_s} \int P_{ut}(t) dt \cdot 100 \% = \frac{0,0032}{8,73} \cdot 100 \% = 0,037 \%;$$

— в случае СР

$$\eta_t = \frac{1}{P_s} \int P_{ut}(t) dt \cdot 100 \% = \frac{0,0015}{9,02} \cdot 100 \% = 0,016 \%$$

(P_s — затрачиваемая электрическая мощность).

В данном случае полезной считается только работа по разгону газа. Как показано выше, в течение периода разряд не только ускоряет поток, но и тормозит его. Поэтому для более корректной оценки эффективности разряда необходимо учитывать мощность, расходуемую на генерацию периодического возмущения:

— в случае ДБР

$$\eta_p = \frac{1}{P_s} \int P_{up}(t) dt \cdot 100 \% = \frac{0,025}{8,73} \cdot 100 \% = 0,31 \%;$$

— в случае СР

$$\eta_p = \frac{1}{P_s} \int P_{up}(t) dt \cdot 100 \% = \frac{0,14}{9,02} \cdot 100 \% = 0,15 \%.$$

Несмотря на то что в случае СР значение P_s оказалось немного больше, чем в случае ДБР, значения как средней, так и пульсационной полезной мощности существенно меньше. По-видимому, это обусловлено воздействием на газ меньшего количества ионов вследствие их перетекания и последующей нейтрализации на открытом дополнительном электроде.

Определим отношение пульсационной и средней мощностей для обоих типов разряда:

— для ДБР

$$\frac{P_{up}}{P_{ut}} = \frac{0,025}{0,0032} = 7,8;$$

— для СР

$$\frac{P_{up}}{P_{ut}} = \frac{0,014}{0,0015} = 9,3.$$

Данное отношение характеризует асимметричность воздействия разрядников на поток. Из полученных данных следует, что в случае СР расход энергии на генерацию пульсационного течения больше, чем в случае ДБР.

Заметим, что в случае СР и ДБР процессы, происходящие вблизи основного электрода, подобны. Основное различие заключается в появлении дополнительной компоненты тока вследствие замыкания цепи между основным и дополнительным электродами. Это приводит к незначительному изменению электрических характеристик работы разряда и существенному изменению процесса генерации ионного ветра.

Заключение. В ходе исследования получены и проанализированы электро- и газодинамические характеристики плазменного активатора на основе диэлектрического барьерного и скользящего разрядов.

Анализ полей скоростей показал, что генерируемый ионный ветер является существенно нестационарным. Показано, что направление объемной силы, формируемой ДБР и СР в плазменной области, изменяется в течение периода колебаний напряжения. При этом средняя скорость ионного ветра определяется слабой асимметрией генерируемой силы.

Использование СР не позволило увеличить скорость ионного ветра по сравнению со скоростью ионного ветра, генерируемого с помощью ДБР, несмотря на то что размеры плазменной области увеличиваются. Сравнение распределения сил, создаваемых ДБР и СР, во времени и пространстве показывает, что наличие дополнительного электрода приводит к значительному изменению пространственного распределения заряда и, следовательно, конфигурации электрического поля. Это, в свою очередь, обуславливает меньшую величину объемной электрогазодинамической силы в случае СР.

Таким образом, имеется возможность изменения параметров генерируемого ионного ветра без существенного изменения электрических характеристик разрядника.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Moreau E.** Airflow control by non-thermal plasma actuators // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2007. V. 40. P. 605–636.
2. **El-Khabiry S., Colver G. M.** Drag reduction by a DC corona discharge along an electrically conductive flat plate for small Reynolds number flow // *Phys. Fluids.* 1997. V. 9. P. 587–599.
3. **Léger L., Moreau E., Artana G., Touchard G.** Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined flat plate // *J. Electrostat.* 2001. V. 50/51. P. 300–306.
4. **Сидоренко А. А., Будовский А. Д., Постников Б. В. и др.** Управление отрывным течением на скользящем крыле с помощью электрического разряда // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36, вып. 7. С. 22–30.
5. **Budovskiy A. D., Sidorenko A. A., Maslov A. A., et al.** Plasma control of vortex flow on delta-wing at high angles of attack // *Proc. of the 3rd Eur. conf. for aerospace sciences (EUCASS 2009)*, Paris, 6–9 July 2009. [Electron. resource]. Paris: S. n., 2009.
6. **Sosa R., Arnaud E., Memin E., Artana G.** Study of the flow induced by a sliding discharge // *IEEE Trans. Dielectric. Electric. Insulat.* 2009. V. 16, iss. 2. P. 305–311.
7. **Bénard N., Jolibois J., Moreau E., et al.** Aerodynamic plasma actuators: A directional micro-jet device // *Thin Solid Films.* 2007. V. 516, iss. 19. P. 6660–6667.
8. **Поливанов П. А., Вишняков О. И., Сидоренко А. А., Маслов А. А.** Исследование нестационарного поля течения, генерируемого диэлектрическим барьерным разрядом // *Журн. техн. физики.* 2012. Т. 82, вып. 4. С. 31–41.
9. **Opaits D. F., Shneider M. N., Miles R. B., et al.** Surface charge in dielectric barrier discharge plasma actuators // *Phys. Plasmas.* 2008. V. 15, N 7. 073505.

Поступила в редакцию 29/X 2012 г.
