

03;12

## Исследование нестационарного поля течения, генерируемого диэлектрическим 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,  
630090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 27 июня 2011 г.)

Поиск новых способов управления обтеканием летательных аппаратов в настоящее время является чрезвычайно актуальным, поскольку возможности традиционных методов управления ограничивают эффективность авиационно-космической техники. Среди перспективных устройств выделяются активаторы, использующие низкотемпературную плазму. Одним из преимуществ этих электрогазодинамических устройств является прямое преобразование электрической энергии в силовое воздействие на течение. Рассмотрен активатор, основанный на принципе диэлектрического барьерного разряда. Исследованы нестационарные характеристики активатора при помощи измерения электродинамических параметров разряда, а также измерения полей индуцированной скорости по методу PIV. Получены мгновенные и интегральные параметры разгона газа, а также определена эффективность активатора.

### Введение

В настоящее время интенсивно развиваются так называемые активные методы управления потоком [1], основанные на внесении в течение дополнительной энергии. Перспективы использования этих методов связываются с возможностью глобальной перестройки течения при минимальном уровне контролируемого воздействия на поток, а также возможностью реализации систем управления потоком с обратной связью. Рассматривается применение таких систем для предотвращения отрыва потока, уменьшения уровня шума путем модификации пограничного слоя, управления ударно-волновыми взаимодействиями и т.д. [1]. Среди исполнительных устройств, используемых для непосредственного воздействия на поток, особо выделяются активаторы, использующие низкотемпературную поверхностную плазму. Эффект поверхностного плазменного активатора является комплексным и зависит от типа разряда. В основном сюда входит воздействие за счет генерации ионного ветра, а также изменения таких параметров газа, как температура, плотность, вязкость, и т.п. Электрогазодинамический принцип влияния на поток имеет ряд преимуществ. Это простота конструкции разрядников и возможность их интеграции в поверхность летального аппарата, а также отсутствие ограничений, позволяющих вводить периодические возмущения высокой частоты. Более того, появляется возможность напрямую трансформировать электрическую энергию в кинетическую энергию потока за счет использования ионного ветра. В качестве источника ионного ветра рассматриваются коронный и диэлектрический барьерный разряды (ДБР).

Первоначально модификацию течения ионным ветром пытались осуществить в коронном разряде [2], но некоторые успехи были достигнуты только при небольших числах Рейнольдса [3], что связано с малыми значениями индуцируемой разрядом скорости. Дальнейшего повышения импульса, привносимого ионным ветром разряда,

невозможно добиться путем увеличения разности потенциалов между электродами из-за перехода разряда в дуговую фазу. ДБР позволяет избежать данного ограничения ввиду того, что наличие диэлектрического барьера позволяет повысить напряженность поля по сравнению с коронным разрядом. Идея о возможности управления отрывным течением при помощи ДБР впервые была высказана в работе [4]. К настоящему времени выполнено большое количество экспериментальных работ (см., например, обзоры [5] и [6]), в которых была показана практическая осуществимость данного метода управления. В Институте теоретической и прикладной механики СО РАН на протяжении ряда лет подобные исследования успешно ведутся в аэродинамических трубах и летном эксперименте [7,8]. В трубном эксперименте была доказана эффективность применения ДБР для управления отрывом на прямых и стреловидных крыльях [9], а также для управления взрывом вихря на подветренной стороне дельта-крыла [10].

На настоящий момент эффективное управление потоком с использованием ДБР 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. На настоящий момент опубликовано большое количество численных работ, в которых были предприняты попытки моделирования разгона потока в ДБР (см., например, [11–13]). Анализ этих работ показывает, что наблюдается достаточно большой разброс полученных результатов. Каждая группа авторов использует свои приближения, заключающиеся в выборе рабочего газа, способах моделирования поверхностного и объемного разрядов и т.п. Выбор корректной физической модели процессов в разряде 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. Настоящее экспериментальное исследование посвящено измерению нестационарного поля скоростей, генерируемого ДБР, электродинамических и электростатических характеристик барьерного разряда, а также сил, действующих на поток со стороны ДБР.

## Экспериментальное оборудование и методика исследований

Эксперимент проводился в покоящемся газе при атмосферном давлении и комнатной температуре (295 К). Разрядник изготавливался из пластины стеклотекстолита (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 5.5$ ) толщиной 1.5 мм (см. рис. 1). Пара медных электродов располагалась на двух противоположных сторонах пластины. Длина электродов составляла 150 мм, а толщина 50 мкм. Внутренний электрод был заземлен и изолировался от воздуха слоем эпоксидной смолы. Ширина внутреннего и внешнего (открытого) электродов составляла 8 и 4 мм соответственно. Начало системы координат в работе привязано к правому краю открытого электрода.

Измерения скорости осуществлялись PIV-комплексом „ПОЛИС“. Засев потока микрочастицами производился с помощью генератора тумана „SAFEX-2010“ (средний размер частицы 1 мкм). Восстановление поля скорости по изображениям трассеров производилось с использованием кросс-корреляционных адаптивных алгоритмов с непрерывным смещением окна, однократным делением сетки и деформацией расчетной области. Получаемые при такой методике измерений векторы скорости являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси видеокамеры, регистрирующей образы частиц. Случайная

ошибка измерений векторов скорости в данных экспериментах не превышала 1–2%. Частота используемой системы PIV была ограничена частотой работы камеры и составляла 2.5 Hz, что значительно ниже частоты работы разряда (1.6 и 8 kHz).

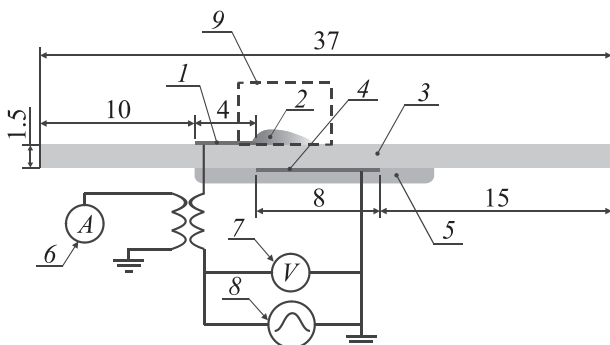
Задачей эксперимента являлось получение последовательной серии кадров в течение одного периода колебаний напряжения. Для этого система PIV была синхронизована с генерацией импульсов напряжения ДБР так, что измерения производились с программируемой задержкой относительно начала цикла разряда. Задержка моментов измерений вычислялась как  $\tau = nT + T/16$ , где  $T$  — период работы ДБР. При помощи такой методики удалось получить 16 полей скорости в течение одного периода колебаний напряжения, что соответствует временному промежутку между измерениями 7.81 и 39.06 мкс для 8 и 1.6 kHz соответственно.

Необходимо обратить внимание, что временной промежуток между импульсами лазеров системы PIV составлял 10 мкс в случае работы разряда с частотой 8 kHz и 35 мкс для частоты 1.6 kHz. Такие временные задержки были выбраны, чтобы получить достаточное смещение частиц при скоростях потока, генерируемых разрядом. Таким образом, промежуток времени измерения скорости потока сопоставим с интервалом измерений, а поля скорости являются осредненными по этому промежутку.

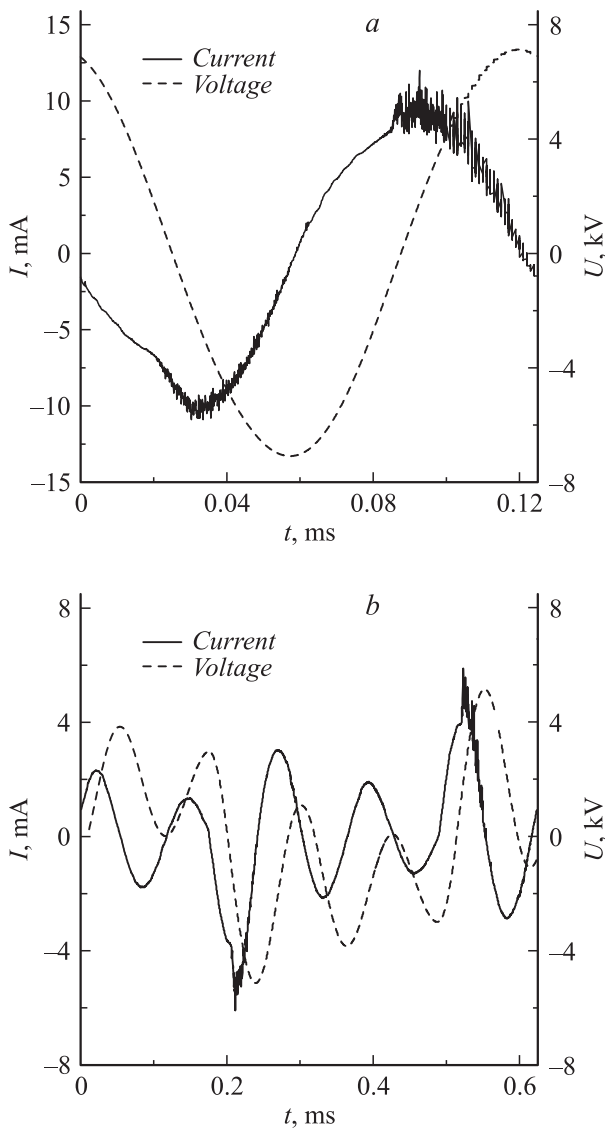
Электрическая схема эксперимента показана на рис. 1. Для генерации переменного высоковольтного напряжения использовался повышающий трансформатор, на вход которого подавался переменный прямоугольный сигнал с инвертора. К выходу повышающего трансформатора через высоковольтные кабели подключался разрядник ДБР. Так как ДБР фактически представляет собой плоский конденсатор, то наличие индуктивности во вторичной цепи приводит к образованию колебательного контура с резонансной частотой порядка 8 kHz. В ходе работы были произведены два эксперимента на различных частотах работы разряда 1.6 и 8 kHz. Ток и напряжение на электродах измерялись цифровым осциллографом RIGOL DS1102E через индукционный токовый пробник Tektronix P6021 и высоковольтный пробник напряжения Tektronix P6015A.

## Электродинамические характеристики ДБР

В первом эксперименте с инвертора на трансформатор подавался прямоугольный сигнал с частотой 8 kHz. Эта частота является околорезонансной в колебательном контуре, образованном выходным трансформатором генератора и системой кабелей—разрядник. В результате изменения напряжения и тока на ДБР были близки к синусоидальному (рис. 2, а). При таком поведении напряжения горение разряда происходит 2 раза за период. Для поверхностного разряда, работающего при атмосферном давлении, характерен стримерный пробой,



**Рис. 1.** Схема диэлектрического барьерного разряда: 1 — внешний электрод, 2 — зона низкотемпературной плазмы, 3 — стеклотекстолитовая пластина, 4 — внутренний электрод, 5 — эпоксидный компаунд, 6 — токовый пробник, 7 — пробник высоковольтного напряжения, 8 — высоковольтный источник переменного напряжения, 9 — область измерений PIV. Размеры указаны в мм.



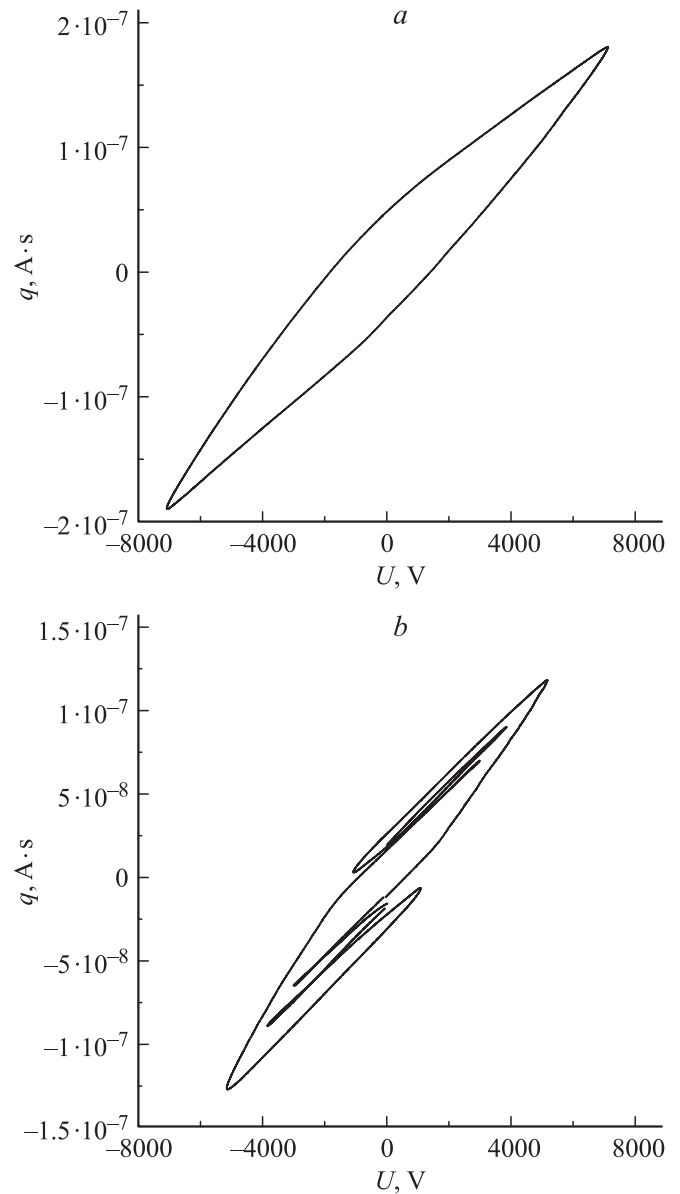
**Рис. 2.** Осциллограммы тока и напряжения: *a* —  $f = 8$ , *b* —  $f = 1.6$  kHz.

поэтому за время горения разряда возникают нестационарные плазменные образования — стримеры, которые видны на осциллограмме тока в виде зашумленных областей. Наиболее характерным признаком возникновения плазмы является появление активной компоненты тока, связанной с протеканием тока в плазме, на фоне преобладающего тока смещения. Этот признак позволяет отчетливо различать области горения разряда на осциллограммах.

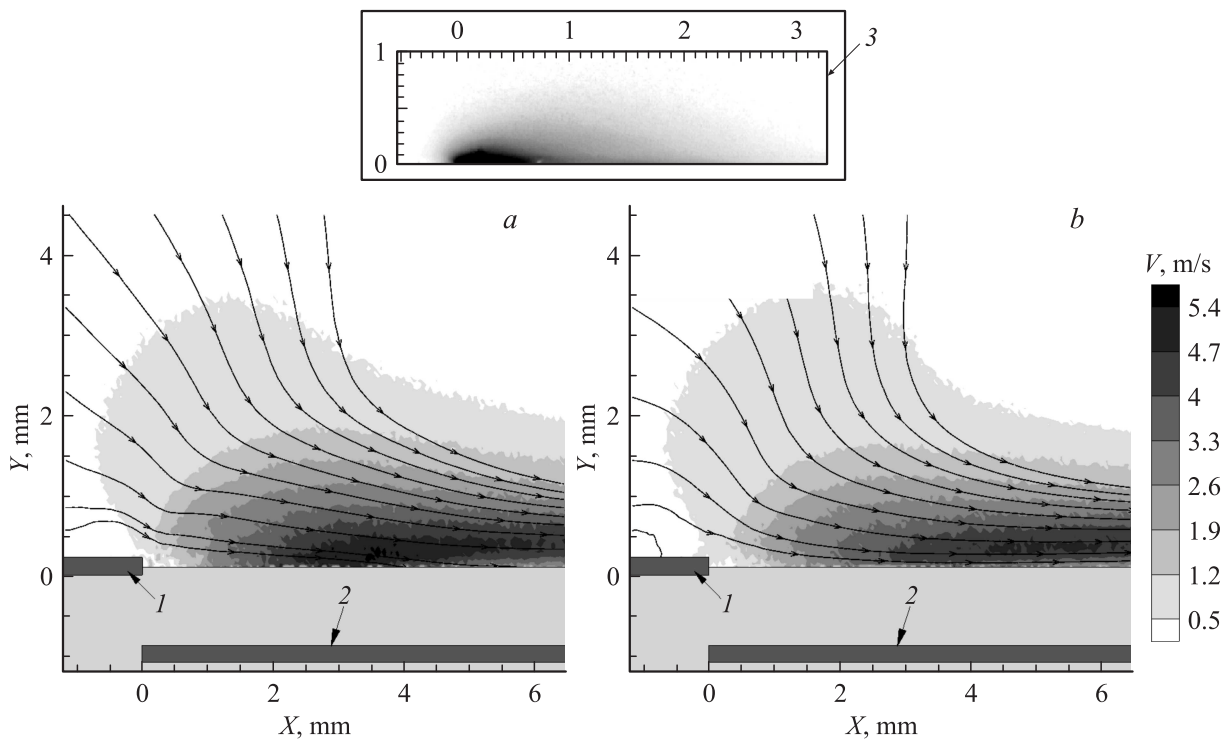
Второй эксперимент проводился при подаче на трансформатор прямоугольного сигнала частотой 1.6 kHz. Это резонансная частота. В результате напряжение и ток на ДБР изменялись сложным образом (рис. 2, *b*). Разряд возникает в моменты максимально быстрого изменения напряжения, и поэтому появление переколебательного процесса вызывает горение разряда 4 раза за период. Общая продолжительность горения разряда по отношению к периоду меньше, чем на резонансной частоте.

Проинтегрировав изменение тока по времени, можно получить изменение значения заряда на ДБР, что позволяет построить графики зависимости заряда от напряжения, показанные на рис. 3. Для обычного конденсатора эта зависимость выглядела бы как прямая линия. В случае с ДБР происходит отклонение графика от прямой, вызванное тем, что под действием электрического поля происходят эмиссия электронов или нейтрализация положительных ионов на поверхности электрода, а также образование поверхностного заряда на диэлектрике. Изменение угла наклона кривой во время горения плазмы связано с изменением интенсивности этих процессов. При отсутствии плазмы характер зависимости вновь становится линейным.

При подаче синусоидального напряжения резонансной частоты существуют две активные фазы горения разряда



**Рис. 3.** Циклограммы изменения заряда и напряжения на разряднике для частоты работы разряда: *a* — 8, *b* — 1.6 kHz.



**Рис. 4.** Поля скорости, полученные в момент исчезновения плазмы: *a* — при отрицательном напряжении,  $t = 70.2 \mu\text{s}$ ; *b* — положительном напряжении.  $t = 7.8 \mu\text{s}$ ; 1 — внешний (открытый) электрод, 2 — нижний электрод (заземленный), 3 — фотография области горения разряда.

(рис. 3, *a*). Плазма может существовать только при условии превышения некоторой разности потенциалов между открытым электродом и поверхностью диэлектрика. За счет тока, протекающего в плазме, и в зависимости от фазы разряда происходит перетекание положительного или отрицательного заряда на поверхность диэлектрика, что приводит к выравниванию потенциала между ней и открытым электродом. Соответственно для поддержания разности потенциалов, необходимой для горения разряда, требуется постоянное изменение потенциала открытого электрода.

На рис. 3, *b* можно видеть более интересную зависимость, вызванную сложным законом изменения напряжения и тока. Как было замечено выше, при частоте 1.6 kHz пробой в воздухе наступал 4 раза за период, соответственно на графике наблюдается существенное изменение наклона кривой 4 раза за период. При этом хорошо видно совпадение наклонов прямых в моменты отсутствия плазмы. Небольшое расхождение коротких участков в нижней части графика ( $Q < 0$ ) связано с недостаточной точностью измерений.

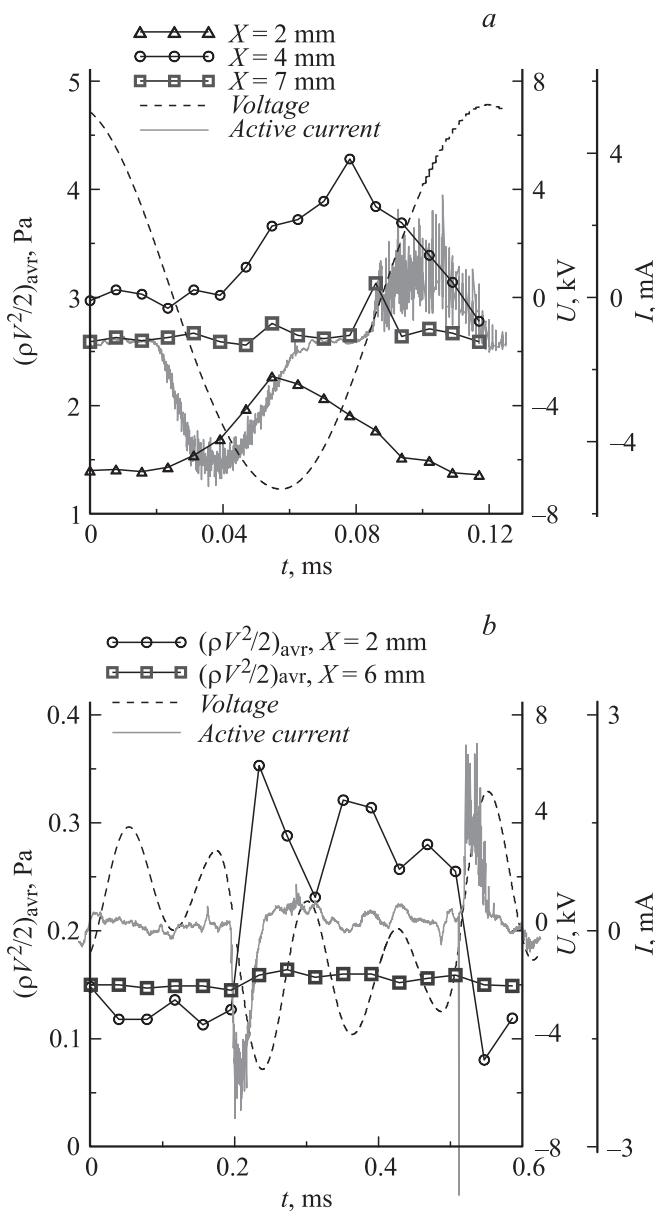
### Изучение полей скорости, индуцированной ДБР

На рис. 4 представлены два поля скорости, полученные для частоты разряда 8 kHz, и инвертированная фотография области горения барьерного разряда.

Плазменная область образуется рядом с правым краем открытого электрода и распространяется над поверхностью диэлектрика. Из-за процессов рекомбинации и вторичной ионизации в этой области происходит образование фотонов. Основное излучение происходит в области ближнего ультрафиолета и в фиолетовом диапазоне видимого света. Интенсивность излучения пропорциональна концентрации ионов. Таким образом, более темные области на рис. 4 соответствуют большей концентрации ионов в плазме.

Поля скорости приведены для момента окончания горения разряда при отрицательной и положительной разностях потенциалов между электродами. Под положительной разностью потенциалов понимается ситуация, когда открытый электрод является анодом. Из рисунков видно, что линии тока приходят сверху и уходят в направлении внутреннего электрода. При этом максимальная скорость, индуцируемая разрядом, составляет приблизительно 5.4 m/s и достигается при отрицательном напряжении. Вязкостные силы в данном случае оказывают незначительное влияние по сравнению с силовым воздействием на поток, создаваемым ионным ветром. Это позволяет предположить, что поток ускоряется при отрицательном напряжении и тормозится при положительном напряжении.

На рис. 5, *a* показаны колебания осредненного динамического напора  $(\rho V^2)/2$  для двух вертикальных сечений на фоне осциллограммы напряжения и активной составляющей тока, измеренных в течение одного пери-



**Рис. 5.** Изменение скоростного напора в разных сечениях на фоне колебания напряжения на разрядниках и тока в плазме: *a* —  $f=8$ , *b* —  $f = 1.6$  kHz.

ода. Этот график подтверждает, что разгон происходит во время горения разряда при отрицательной разности потенциалов. Видно, что изменение скорости происходит только в области горения разряда, а в дальних от внешнего электрода сечениях скоростной напор имеет почти неизменное значение в течение всего периода колебаний.

При подаче на трансформатор прямоугольного сигнала с частотой 1.6 kHz разряд горит 4 раза за период. В связи с этим на графике колебаний скоростного напора присутствуют 2 участка ускорения и 2 — торможения потока. Можно отметить, что картина течения в этом эксперименте не имеет принципиальных отличий от

приведенных выше данных. Разница заключается в том, что максимальная скорость, индуцированная разрядом (1.2 m/s), ниже, чем в эксперименте на резонансной частоте, так как разность потенциалов и размер плазменной области (в которой и происходит рост скорости) в этом случае значительно меньше. При рассмотрении изменения динамического давления в течение одного периода в разных сечениях (рис. 5, *b*) также можно отметить, что изменение скоростного напора продолжается и при отсутствии тока в плазме и коррелирует с изменением напряжения. Это означает, что процессы разгона и торможения потока происходят не только в моменты существования плазмы. Сравнивая результаты двух экспериментов, можно заметить, что для увеличения эффективности ДБР необходимо увеличивать время горения разряда и ток в плазме.

### Исследование объемной силы, генерируемой ДБР

На основе полученных полей скорости можно изучить динамику изменения силы, генерируемой ДБР. Расчет компонент силы осуществлялся интегрированием соответствующих компонент ускорений по всей области измерений. Расчет ускорений производился по измеренным распределениям скорости левой разностной производной первого порядка точности

$$a_i = \frac{V_i - V_{i-1}}{\Delta t}.$$

Операция дифференцирования производилась для продольной и нормальной компонент скорости для каждой точки пространства. Абсолютные значения ускорения, представленные далее, рассчитывались как корень из суммы квадратов компонент ускорения.

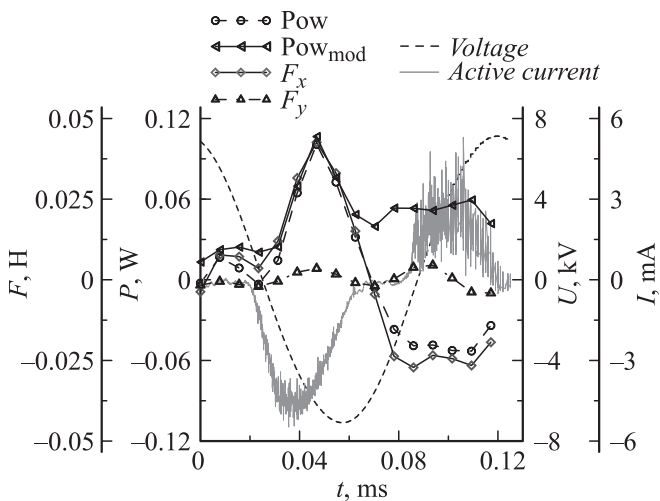
Полученные поля ускорений позволяют произвести прямую оценку мощности разряда, расходуемой на разгон и торможение потока. Эта мгновенная мощность рассчитывалась путем интегрирования произведений компонент ускорений на соответствующие компоненты скорости по всей области измерений

$$Pow = \rho l \left( \int V_x(x, y) a_x(x, y) dx dy + \int V_y(x, y) a_y(x, y) dx dy \right),$$

где  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  — плотность воздуха,  $l$  — длина электрода,  $V_x$  и  $V_y$  — продольная и поперечная компоненты скорости потока,  $a_x$  и  $a_y$  — продольная и поперечная компоненты ускорения потока.

Изучение полей ускорений также показывает, что электрогазодинамическая сила в определенные моменты времени может как тормозить поток, так и ускорять его. Для оценки полной мощности, расходу-





**Рис. 6.** Изменение мощности в течение одного периода на фоне осциллограмм активного тока и напряжения.

мой на создание подобных возмущений потока, использовалось интегрирование модулей соответствующих произведений

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

На рис. 6 представлены временные зависимости мощности и двух компонент силы, генерируемой разрядом, на фоне осциллограмм тока и напряжения для первого эксперимента. Рассмотрим изменение сил и динамического напора для этого случая (рис. 6 и 5, а).

Завершение положительной фазы горения разряда происходит из-за выравнивания потенциала между открытым электродом и поверхностью диэлектрика, что вызвано уменьшением скорости роста напряжения между электродами. При этом значение напряжения достигает своего максимума. В этот момент динамический напор также достигает минимума, а значение продольной компоненты силы близко к нулю. Далее значение напряжения начинает уменьшаться, что обуславливает появление отрицательной разности потенциалов между открытым электродом и поверхностью диэлектрика. При достижении напряжения пробоя для поверхностного разряда начинается отрицательная фаза его горения. До начала отрицательной фазы горения разряда динамический напор практически не меняется, а значение продольной компоненты силы сначала незначительно растет, а затем немного уменьшается, но остается положительным. Ниже будет показано, что это может быть вызвано превалированием отрицательно заряженных ионов кислорода на периферии и наличием положительно заряженных ионов азота около электрода (появившихся в поле завершения положительной фазы

горения разряда). Комбинация отрицательной и положительной компонент силы, генерируемых соответственно положительными и отрицательными ионами, в сложном электрическом поле, создаваемом двумя электродами и поверхностью диэлектрика, дает подобное поведение общей силы.

В течение отрицательной фазы горения разряда значение динамического напора непрерывно растет. Значение продольной компоненты силы также резко растет в начале, но достигает максимума в момент максимального значения тока в плазме. После этого сила начинает уменьшаться и достигает нуля при окончании отрицательной фазы горения разряда. Такое изменение силы можно объяснить существованием и усилением в течение отрицательной фазы горения разряда нескомпенсированного объемного заряда отрицательно заряженных ионов. Отрицательно заряженные ионы ускоряются в поле слева направо, и за счет столкновений с нейтральными атомами происходит общее ускорение потока. Изменение силы тока в плазме происходит из-за изменения разности потенциала между открытым электродом и поверхностью диэлектрика. Поэтому максимум силы тока совпадает с максимумом напряженности поля, что приводит к максимальному значению продольной компоненты силы.

После окончания отрицательной фазы горения разряда значение динамического напора начинает падать. Модуль продольной компоненты силы начинает расти, но ее направление изменяется на противоположное. 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. Под действием электрического поля отрицательные ионы начинают двигаться против потока, вызывая его торможение.

Явно выраженного максимума тормозящей силы не наблюдается. Тем не менее слабое уменьшение продольной компоненты силы и прекращение роста нормальной компоненты силы после начала положительной фазы горения разряда показывают изменение характера течения с появлением плазмы. Далее в течение горения разряда происходит уменьшение тормозящей силы. Объяснить подобное поведение можно следующим образом. Во время положительной фазы горения разряда происходит уменьшение нескомпенсированного пространственного заряда отрицательных ионов, что приводит к уменьшению величины тормозящей силы. Величина тормозящей силы зависит и от значения напряженности поля, и от величины объемного нескомпенсированного заряда.

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

оценка дает величину

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

где  $V$  — средняя скорость потока,  $U$  — 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 имеет осцилляционный характер и не только ускоряет поток, но и тормозит его. Поэтому для более корректной оценки эффективности ДБР надо учитывать еще среднюю мощность, расходуемую на генерацию периодического возмущения ( $P_{up}$ )

$$\eta_p = \frac{P_{up}}{P_s} = \frac{\frac{\rho l}{T} \int_0^T \left[ \int |V_x(x,y,t) a_x(x,y,t)| dx dy + \int |V_y(x,y,t) a_y(x,y,t)| dx dy \right] dt}{\frac{1}{T} \int I_A(t) U(t) dt} = 0.71\%.$$

Данная формула учитывает пульсационный характер течения, генерируемого разрядом. В итоге общая эффективность преобразования энергии в кинетическую энергию потока равняется  $\eta = \eta_t + \eta_p \approx 0.8\%$  и состоит соответственно из генерации среднего течения и создания периодических во времени возмущений. Необходимо отметить, что получившаяся в итоге эффективность по-прежнему невысока, но настоящая работа не преследовала цели улучшения эффективности разряда, и оптимизация разрядников не производилась.

На рис. 7 и 8 представлены поля ускорений потока в течение одного периода изменения напряжения и показаны модели распределения заряда в измерительной области (необходимо заметить, что непосредственно распределение ионов и напряженность электрического поля не измерялись, и все предположения, следующие ниже, взяты из анализа распределений ускорения потока). В последующем анализе было сделано предположение, что при наличии нескомпенсированного объемного заряда направление ускорения течения будет совпадать с напряженностью электрического поля. Рассмотрим каждое поле в отдельности.

Рис. 7, *a* ( $t = 0 \mu s$ ): данный момент времени соответствует завершению положительной фазы горения разряда. Потенциалы открытого электрода и диэлектрика практически выровнены. Наблюдается слабое влияние на поток электрогазодинамической силы, которая образуется из-за наличия поля между открытым и закрытым электродами (и, следовательно, поверхностью диэлектрика). Линии напряженности поля получаются практически вертикальными, и его влияние на отрицательные

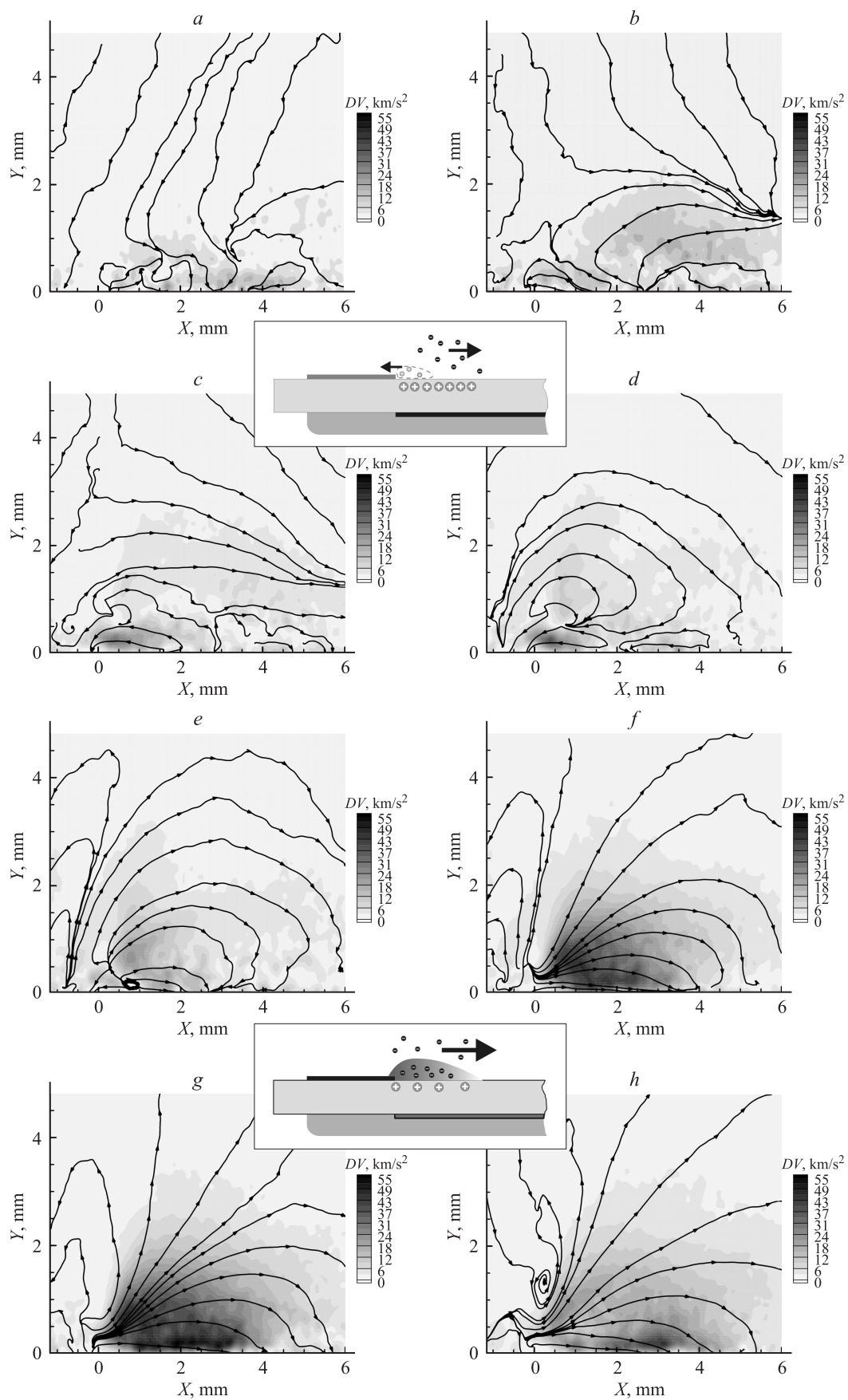
ионы создает вертикальную силу, направленную к поверхности диэлектрика. Но около поверхности в районе  $X = 0 - 1.5 \text{ mm}$  наблюдается положительная нормальная составляющая силы, что обусловлено превалированием в этой области положительно заряженных ионов, образовавшихся после завершения положительной фазы горения разряда.

Рис. 7, *b* ( $t = 7.81 \mu s$ ): из-за падения напряжения между открытым электродом и поверхностью диэлектрика образуется отрицательная разность потенциалов. Из-за удаленности закрытого электрода его влияние на поле напряженности в измеряемой области уменьшается. Под действием электрического поля положительные ионы (превалирующие в небольшой области, отмеченной выше) создают отрицательную продольную компоненту силы. А отрицательные ионы — соответственно положительную составляющую силы. Суммарная продольная сила получается положительной.

Рис. 7, *c, d* ( $t = 15.62 - 23.43 \mu s$ ): происходит дальнейшее увеличение разности потенциала между открытым электродом и поверхностью диэлектрика. Это практически полностью исключает влияние закрытого электрода на формирование поля напряженности в измеряемой области. Линии напряженности начинают замыкаться на открытом электроде и заряженной части поверхности диэлектрика, что приводит (рис. 7, *d*) к образованию линий напряженности эллиптической формы, и вклад отрицательных ионов в продольную компоненту силы становится уже не столь существен. Рядом с поверхностью линии напряженности искривлены незначительно, поэтому отрицательная продольная сила, создаваемая положительными ионами, растет быстрее. Из-за этого общая продольная компонента силы несколько уменьшается по сравнению с моментом, соответствующим рис. 7, *b*.

Рис. 7, *e* ( $t = 31.24 \mu s$ ): происходит пробой воздуха. Начинается отрицательная фаза горения разряда, она сопровождается насыщением воздуха отрицательными ионами. Действие электрического поля создает положительную компоненту продольной составляющей силы практически во всем объеме. Имеется лишь незначительная область отрицательной продольной силы около края открытого электрода, генерируемая оставшимися положительными ионами.

Рис. 7, *f, g* ( $t = 39.05 - 46.86 \mu s$ ): зона превалирования положительных ионов исчезает, а вместе с ней и отрицательная продольная компонента силы. Увеличение же разности потенциалов между открытым электродом и поверхностью диэлектрика (что следует из увеличения силы тока) приводит к дальнейшему росту продольной компоненты силы. Хочется отметить отсутствие значительных ускорений в плазменной области  $X = -0.1 - 1.5 \text{ mm}$ ,  $Y = 0 - 0.25 \text{ mm}$  (см. рис. 7, *g*). Скорее всего, это обусловлено отсутствием нескомпенсированного заряда в районе образования стримеров. Из поля ускорений можно выделить две явные зоны максимума. Первая зона находится на некотором расстоянии от кромки открытого электрода, а вторая рядом



**Рис. 7.** Поля ускорений, модель распределения заряда.



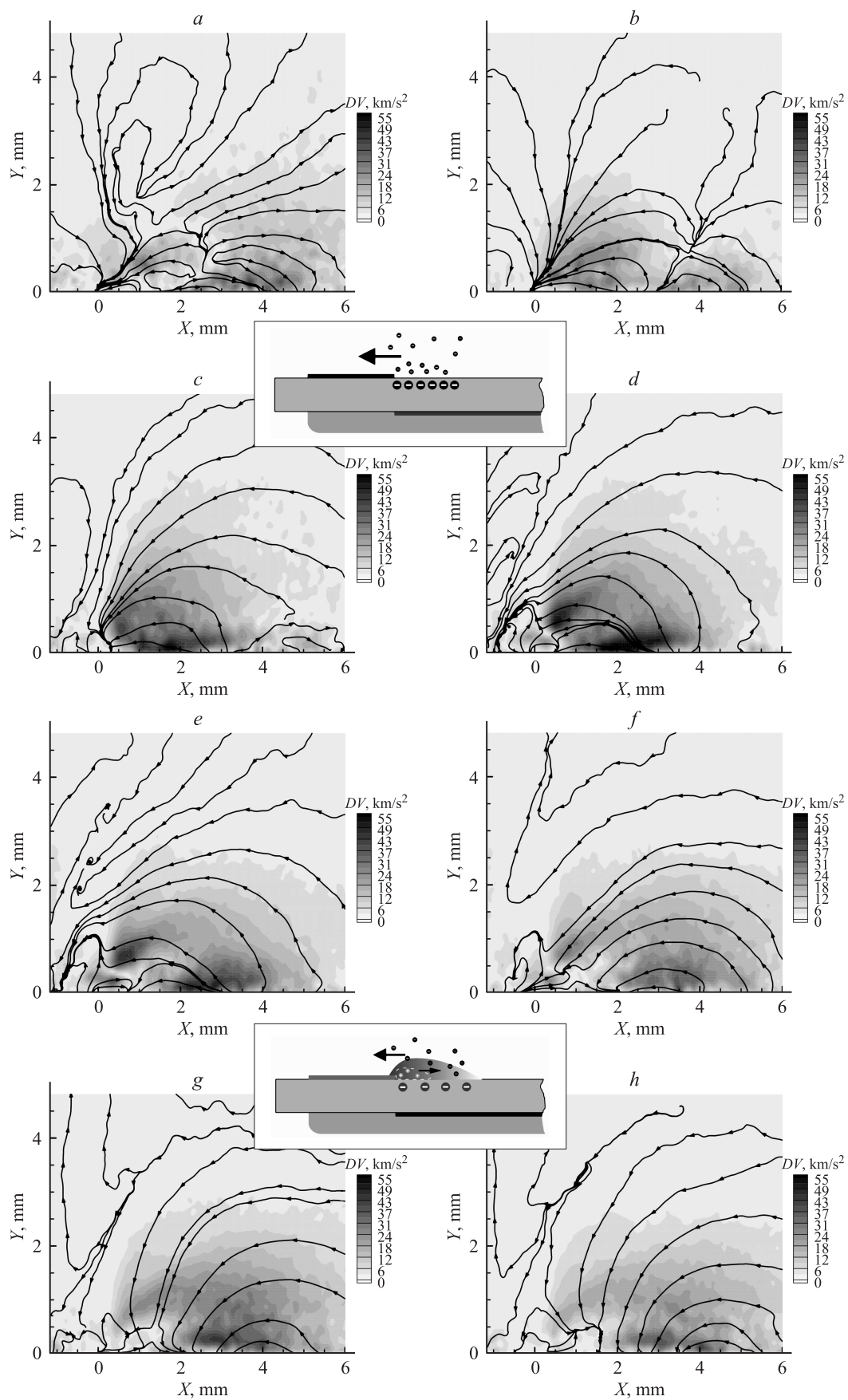


Рис. 8. Поля ускорений, модель распределения заряда.

с поверхностью диэлектрика. Очевидно, что величина ускорения зависит от произведения концентрации отрицательных ионов на величину падения потенциала. Максимальная концентрация линий напряженности без плазмы при используемой геометрии ДБР наблюдалась бы рядом с открытым электродом. Наличие плазмы изменяет картину, что приводит к отдалению максимума ускорений от электрода. Далее концентрация линий напряженности начинает падать, что приводит к уменьшению величины электрогазодинамической силы. На все это накладывается распределение отрицательных ионов, концентрация которых также, скорее всего, падает с удалением от области пробоя воздуха. В итоге это приводит к образованию максимальной силы на некотором расстоянии от электрода. Вторая зона расположена рядом с диэлектриком, ее существование объясняется концентрацией линий напряженности поля вблизи поверхности диэлектрика.

Рис. 7, *h* ( $t = 54.67 \mu\text{s}$ ): полученная картина ускорений по характеру поведения слабо отличается от полученных выше полей рис. 7 *f, g*. Но замедление роста отрицательного напряжения приводит к падению разности потенциалов между открытым электродом и поверхностью диэлектрика из-за накопления поверхностью диэлектрика отрицательного заряда. Это приводит к уменьшению значений ускорений.

Рис. 8, *a* ( $t = 62.48 \mu\text{s}$ ): несмотря на то что в большей части области измерений наблюдается ускорение потока, в непосредственной близости от открытого электрода происходит торможение потока. Возникновение такой силы из-за появления положительно заряженных ионов представляется маловероятной, так как отрицательная фаза горения разряда еще не окончена. Более вероятно, что накопление заряда поверхностью диэлектрика неравномерно и совместное влияние плазмы, открытого электрода и неравномерно заряженного диэлектрика приводит к возникновению подобного электрического поля.

Рис. 8, *b, c* ( $t = 70.29\text{--}85.91 \mu\text{s}$ ): отрицательная фаза горения разряда закончена. Уменьшение отрицательного напряжения при сохранении остаточного заряда на поверхности диэлектрика приводит к изменению направления линий напряженности на противоположное. Совместно с превалированием отрицательных ионов это приводит к возникновению силы, тормозящей поток. Но линии напряженности, выходящие из поверхности диэлектрика, заканчиваются не только на открытом электроде. Закрытый электрод также влияет на общее поле, из-за чего в области  $X > 4 \text{ mm}$  происходит разгон потока. Например, для поля на рис. 8, *b* положительная и отрицательная компоненты продольной силы практически полностью себя компенсируют. Но с ростом разности потенциалов между поверхностью диэлектрика и открытым электродом влияние закрытого электрода уменьшается. Области максимальных ускорений наблюдаются рядом с зоной накопления заряда диэлектриком и около кромки открытого электрода. Эти места соответствуют зонам с максимальной концентрацией линий напряженности.

Рис. 8, *d-f* ( $t = 93.72\text{--}101.53 \mu\text{s}$ ): начинается положительная фаза горения разряда. Это приводит к появлению положительно заряженных электродов рядом с открытым электродом  $X = -0.1\text{--}1.5 \text{ mm}$ . Под действием электрического поля в этой зоне происходит ускорение потока. Но влияние на поток положительных ионов незначительно, и основную роль по-прежнему играют отрицательные ионы, которые тормозят поток. Положительная фаза горения разряда сопровождается уменьшением отрицательного заряда воздуха, что приводит к постепенному уменьшению отрицательной компоненты продольной силы.

Рис. 8, *g, h* ( $t = 109.34\text{--}117.15 \mu\text{s}$ ): происходит дальнейшее уменьшение концентрации отрицательных ионов кислорода, что, совместно с уменьшением разности потенциалов между открытым электродом и поверхностью диэлектрика, приводит к уменьшению тормозящей силы. Уменьшение скорости роста напряжения между электродами приводит к выравниванию потенциала между открытым электродом и поверхностью диэлектрика. Это приводит к большему влиянию на электрическое поле закрытого электрода. В итоге картина ускорений все больше напоминает распределение, приведенное на рис. 7, *a*.

Из приведенного выше анализа следует, что некомпенсированный заряд достигает своей максимальной величины после завершения отрицательной фазы горения разряда и практически исчезает после положительной фазы горения разряда. Этот вывод также подтверждается поведением скоростного напора на рис. 5, *b*, где наблюдаются значительные осцилляции потока при осцилляции напряжения после завершения основной отрицательной фазы горения разряда и практически полное отсутствие осцилляции после завершения основной положительной фазы горения разряда.

## Заключение

В настоящей работе были получены и проанализированы электродинамические и электрогазодинамические характеристики ДБР. На основании измерений были построены зависимости величины заряда на электродах от напряжения, из которых было установлено, что между открытым электродом и диэлектриком происходит обмен зарядами. Были получены осциллограммы тока, протекающего в плазме, путем разделения измеренной величины тока на активную и реактивную составляющие. Это позволило однозначно определять время появления и исчезновения плазменных образований.

Анализ полей скорости показал, что временные колебания скорости происходят только в районе существования плазменной области. При удалении от плазменной области картина генерируемого разрядом течения приобретает стационарный вид. Было установлено, что ускорение потока происходит при отрицательно заряженном открытом электроде, а торможение при положительно заряженном.

Полученные поля ускорений позволили значительно расширить понимание процессов, протекающих в ДБР. Было показано, что основное влияние ДБР на покоящийся поток заключается в создании периодического возмущения, а не в индуцировании среднего течения. Это позволило ввести более корректную оценку эффективности работы разряда. Установлено, что основной механизм ускорения потока заключается в появлении некомпенсированного отрицательного электрического заряда в газе, образующегося в ходе отрицательной фазы горения разряда. После завершения положительной фазы горения происходит практически полное исчезновение ионов в потоке. Сосредоточение отрицательных ионов только вблизи плазменного образования обусловлено низкой индуцированной скоростью (и соответственно их незначительным сносом) при существующей частоте работы разряда.

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] *Joslin R.D., Miller D.* Fundamentals and Applications of Modern Flow Control / Vol. 231: Progress in Astronautics and Aeronautics Series. AIAA, Inc., 2009.
- [2] *Velkoff H., Ketchman J.* // AIAA J. 1968. Vol. 6. N 7. P. 1381–1383.
- [3] *Moreau E., Leger L., Touchard G.* // J. Electrostat. 2006. Vol. 64. P. 215–225.
- [4] *Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P.* // AIAA. P. 98–0328.
- [5] *Post M.L., Corke T.C.* // AIAA J. 2004. Vol. 42. N 11. P. 2177–2184.
- [6] *Corkel T.C., Enloe C.L., Wilkinson S.P.* // Annu. Rev. Fluid Mech. 2010. Vol. 42. P. 505–529.
- [7] *Malmuth N., Maslov A., Sidorenko A., Fomichev V., Korotaeva T.* // AIAA. 2008. P. 4336.
- [8] *Sidorenko A., Budovsky A., Pushkarev A., Maslov A.* // AIAA. 2008. P. 373.
- [9] *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. Вып. 7. С. 22–30.
- [10] *Sidorenko A.A., Maslov A.A., Postnikov B.V., Zanin B.Yu., Zverkov T.D., Kozlov V.V.* // Proc. of the 3<sup>rd</sup> European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS). Paris–Versailles, 2009.
- [11] *Lagmich Y., Callegari Th., Pitchford L.C., Boeuf J.P.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41. P. 095 205.
- [12] *Курячий А.П., Русьянов Д.А., Скворцов В.В.* // Сб. тез. IX Междунар. конф. „Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидких диэлектриков“. СПб., 2009.
- [13] *Cho Y.-C., Jayaraman B., Viana F.A.C., Hafika R.T., Shyu W.* // AIAA. 2008. P. 1381.