

03;04

Концевые эффекты при обтекании плазменного актуатора

© И.А. Моралев¹, И.В. Селивонин²¹ Объединенный институт высоких температур, Москва² Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва

E-mail: morler@mail.ru

Поступило в Редакцию 27 сентября 2016 г.

Исследована структура течения, формирующегося в пограничном слое за боковой границей разрядной зоны плазменного актуатора на основе диэлектрического барьерного разряда. Показано, что в окрестности границы плазменного слоя существует область с ненулевой компонентой тангенциальной скорости. На некотором удалении от электрода формируется концентрированный вихрь, ось которого ориентирована вдоль линий тока внешнего течения. При наличии двух близко расположенных границ плазменной области формируется пара вихрей с противоположным направлением вращения. Также впервые визуализированы вихревые возмущения, инициированные в пограничном слое отдельными микроразрядами.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.04.44301.16500

Актуаторы на основе диэлектрического барьерного разряда (ДБР) широко исследуются как перспективное устройство для управления пограничным слоем в различных задачах аэродинамики. При сравнительно низкой амплитуде воздействия и электромеханической эффективности основными преимуществами этих устройств является высокое быстродействие, а также хорошая робастность, что позволяет интегрировать их в сложные системы управления с обратными связями. Одним из наиболее перспективных приложений является управление с помощью плазменных актуаторов возмущениями и волнами в пограничных и сдвиговых слоях [1–3]. Такие исследования проводились для управления двумерными и трехмерными пограничными слоями для различных типов возмущений [4,5], а также для управления аэроакустическими характеристиками сдвиговых слоев в соплах и кавернах [3,6–8]. Использование актуатора в качестве источника начальных возмущений в

пограничном слое зачастую требует точной информации о геометрии воздействия, в том числе в окрестности боковых кромок электродов.

Актuator на основе диэлектрического барьерного разряда представляет собой два электрода, разделенных слоем диэлектрика, из которых один (ответный) покрыт слоем диэлектрика, а второй (коронирующий) обтекается набегающим потоком [9]. При подаче переменного напряжения на кромке коронирующего электрода возникает периодический пробой газа, который на интегральных фотографиях выглядит как однородный плазменный слой. Механизм действия разряда на поток связан с дрейфом ионного облака, формирующегося после распада плазмы микроаряда, в электрическом поле, что приводит к формированию пристенной струи, параллельной поверхности диэлектрика. При моделировании разряда стандартными гидродинамическими пакетами часто используется упрощенная модель, в которой разряд моделируется объемной силой, сосредоточенной в тонком слое вблизи поверхности диэлектрика.

На „рабочей“ длине электрода воздействие считается двумерным, т.е. вектор объемной силы полагается всюду нормальным кромке электрода [10]. На самом деле разряд состоит из отдельных микроарядов, структура объемной силы в окрестности которых определяется распределением заряда поверхности диэлектрика после пробоя. Структура объемной силы в окрестности одиночного микроаряда имеет как поперечную, так и продольную составляющие [11]. Формирование двумерной струи происходит в результате сложения продольной (нормальной электроду) компоненты скорости от отдельных микроарядов и взаимоничтожения тангенциальных (параллельных электроду) компонент. В случае, когда положение микроарядов по тем или иным причинам постоянно во времени, возникает средняя по времени тангенциальная сила. Было показано, что для случая контрагированного ДБР эта сила приводит к возникновению сложного трехмерного течения в окрестности микроаряда [12].

Аналогичная ситуация возникает на краю области плазмообразования, где компенсация тангенциальной компоненты объемной силы становится невозможной. При установке такого актуатора во внешний поток ее действие должно приводить к внесению в пограничный слой продольной завихренности и формированию продольных вихрей. Подробно механизм формирования продольных вихрей в вихрегенераторах на основе плазменных актуаторов (PSVG) рассмотрен в [13,14]. В свою

очередь, перенос импульса в вихрях должен приводить к существенным изменениям структуры пограничного слоя. Данная работа посвящена изучению продольных вихрей, возникающих на границе области плазмообразования в диэлектрическом барьерном разряде.

Плазменный актуатор представлял собой пару электродов толщиной $20\ \mu\text{m}$, наклеенных на пластину из алундовой керамики ВК-94 ($\epsilon = 10.4$). Неоднородность начального электрического поля, необходимая для формирования боковой границы плазменного слоя, достигалась модификацией подстилающего электрода. Были рассмотрены три конфигурации (рис. 1, *a*): кромка 1, выступ 2 и щель 3. Ширина выступа и зазора была равна $2\ \text{mm}$, что вдвое больше толщины керамической пластины. Во всех случаях длина подстилающего электрода значительно превышала длину разряда. Для питания разряда использовался транзисторный ВЧ-генератор, на выходе которого устанавливался резонансный фильтр. Амплитуда напряжения на разряднике варьировалась в интервале $U_a = 2\text{--}4\ \text{kV}$, частота в большинстве экспериментов была равна $f = 150\ \text{kHz}$. Мощность, выделившаяся в разряде, определялась методом интегрирования вольт-кулоновских циклограмм и составляла приблизительно $100\ \text{W/m}$ при амплитуде питающего напряжения $3.2\ \text{kV}$. Фотографии разряда в различных конфигурациях приведены на рис. 1, *b*.

Экспериментальное исследование течения за актуатором в пограничном слое проводилось в аэродинамической трубе Д-2 в ОИВТ РАН. Труба открытого типа имеет восьмиугольную рабочую часть с размерами $100 \times 100 \times 600\ \text{mm}$. Поджатие потока в сопле составляет $1 : 16$, для снижения уровня турбулентности перед соплом установлены хонейкомб и мелкоячеистая сетка. Уровень турбулентности свободного потока при $30\ \text{m/s}$ составляет менее 0.2% . Пограничный слой формировался на плоской пластине, установленной под нулевым углом атаки. Размеры пластины составляли $320 \times 100 \times 8\ \text{mm}$. Передняя кромка пластины выполнена в виде суперэллипса с соотношением осей $1 : 8$. Задняя кромка на обратной стороне модели срезана под углом 6° для предотвращения отрыва потока. Плазменный актуатор устанавливался на расстоянии приблизительно $200\ \text{mm}$ от передней кромки, заподлицо с поверхностью пластины. Эксперименты выполнялись при скорости потока $7\ \text{m/s}$, при этом толщина пограничного слоя в месте установки актуатора составляла $\delta_{99} = 3\ \text{mm}$.

Для исследования структуры вихревого течения за актуатором использовалась PIV-система. Измерения проводились в плоскости,

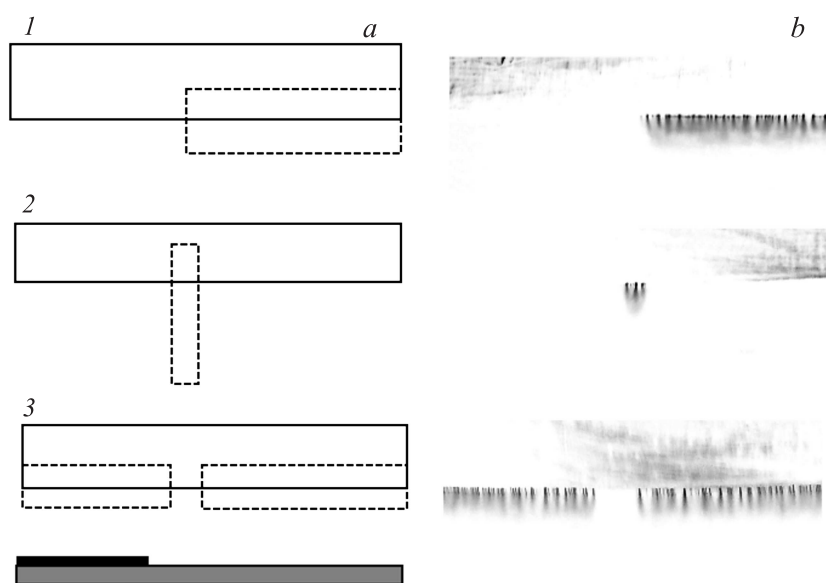


Рис. 1. *a* — схема расположения электродов. Сверху — вид в плане: 1 — „кромка“, 2 — „выступ“, 3 — „щель“. Внизу — вид сбоку. *b* — интегральные фотографии разряда. Яркость инвертирована.

перпендикулярной направлению потока (рис. 2). Для минимизации ошибки в определении поперечных компонент скорости, вызванной перспективными искажениями, направление зрения камеры было выбрано перпендикулярным плоскости наблюдения. Для вывода изображения из аэродинамической трубы использовалось зеркало размером 30×50 мм, установленное под углом 45° к оси потока на расстоянии более 100 мм от задней кромки модели. Обработка изображения велась с помощью кросс-корреляционного алгоритма с размером окна 32×32 px и перекрытием 75%. На стадии постобработки использовалось отсечение данных по критерию сигнал-шум. Для получения одиночного поля скоростей в выбранной плоскости проводилось осреднение по 70 мгновенным реализациям течения. Разрешение получаемого поля течения составляло $100 \times 100 \mu\text{m}$ в плоскости лазерного ножа. Трехмерное поле двух компонент скорости получалось с помощью перемещения

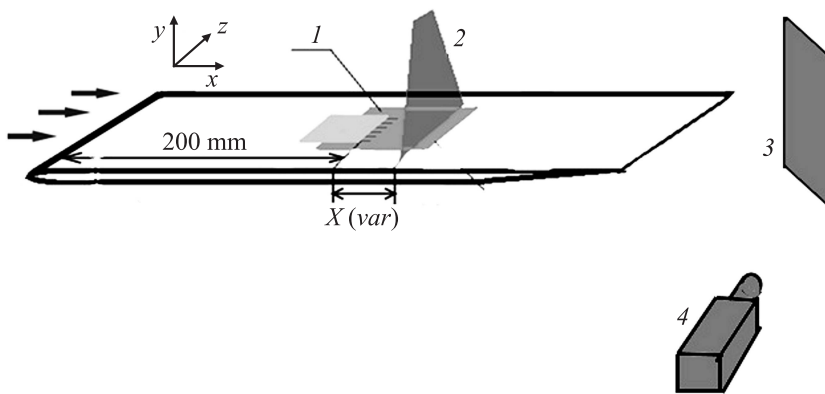


Рис. 2. Схема эксперимента по визуализации продольных вихрей в пограничном слое за разрядом: 1 — актуатор, 2 — лазерный нож, 3 — зеркало, 4 — камера.

объекта измерений в плоскости, нормальной лазерному ножу, с шагом в $0.5\text{--}1\text{ мм}$. Засев потока проводился с помощью частиц TiO_2 размером $0.1\text{--}1\text{ мкм}$. Частицы добавлялись в форкамеру аэродинамической трубы перед хонейкомбом и сетками.

Структура течения в пограничном слое для различных конфигураций электрода показана на рис. 3. Для всех конфигураций разряда течение можно подразделить на две области. В первой, расположенной у основания разрядных каналов и над коронирующим электродом, происходит подсос воздуха из внешней части пограничного слоя в направлении поверхности диэлектрика. Этот подсос обусловлен вертикальным градиентом давления, который возникает при увлечении воздуха вдоль поверхности диэлектрика ионным ветром, генерируемым разрядом. Формирование самой пристенной струи, создаваемой разрядом в продольном направлении, не показано, так как ориентация струи нормальна плоскости наблюдения.

При удалении от кромки коронирующего электрода видно (рис. 3, а), что на границе разряда возникает область с отличной от нуля продольной завихренностью, где течение направлено вдоль размаха пластины (и кромки коронирующего электрода). При еще больших расстояниях от кромки эта область сворачивается в хорошо различимый изолиро-

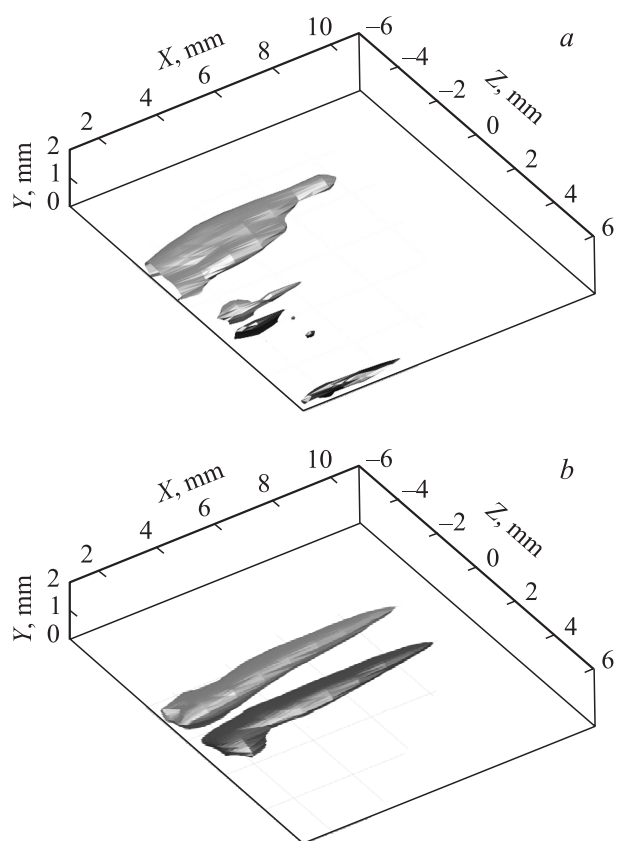


Рис. 3. Структура течения за актуатором для различных конфигураций ответного электрода: *a* — кромка, *b* — выступ, *c* — щель. Показаны трехмерные изоповерхности продольной завихренности по уровню $\omega_x = \pm 200 \text{ s}^{-1}$. *d* — поля скорости в сечениях $X = 0 \text{ mm}$ и $X = 3 \text{ mm}$ за разрядом в конфигурации „выступ“.

ванный вихрь, ось которого направлена вдоль линий тока основного течения. Характерная скорость течения в вихре составляет до 1 m/s, что соответствует до 20% от скорости продольной струи, инициируемой актуатором, и порядка 15% от скорости внешнего потока. Пиковая ве-

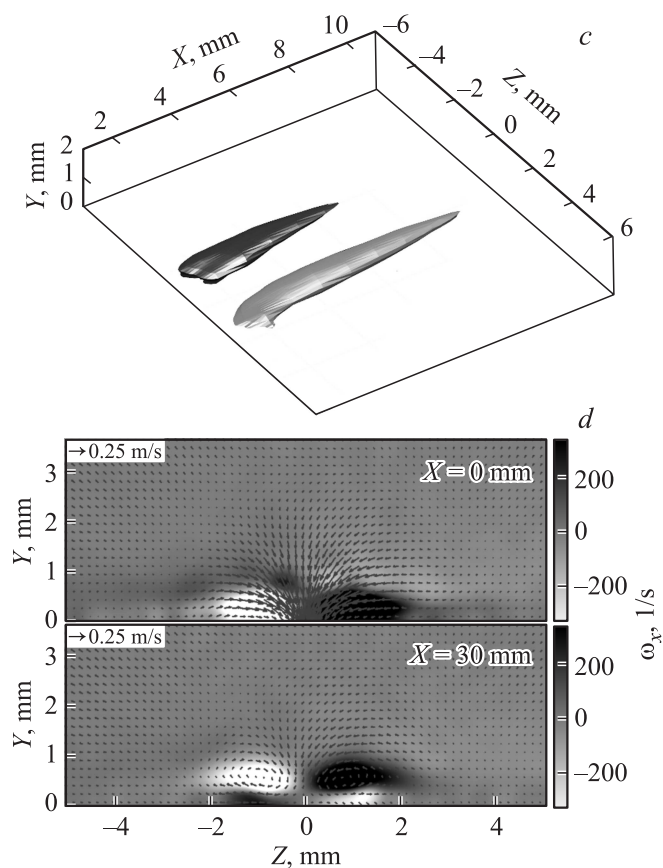


Рис. 3 (продолжение).

личина продольной завихренности достигает 500 s^{-1} , или порядка 20% от средней величины завихренности в исходном пограничном слое.

Для конфигураций „выступ“ и „зазор“ (рис. 3, b и c соответственно) можно наблюдать формирование пары продольных вихрей, каждый из которых соответствует границе зоны формирования микроразрядов. Вихри вращаются в противоположном направлении. Поскольку расстояние между вихрями достаточно мало, наблюдается взаимодействие

между ними, которое может приводить к отходу пары от поверхности диэлектрика.

В структуре поля продольной завихренности, полученного для конфигураций 1 и 3, хорошо различимы чередующиеся области отрицательной и положительной завихренности, которые не соответствуют боковым кромкам ответного электрода. Расстояние между этими областями составляет 2–3 мм. Эти области соответствуют парам продольных вихрей, которые возникают за отдельными микроразрядами в „однородной“ плазменной области.

Анализ влияния параметров разряда (напряжение питания и частота) на структуру течения показывает, что само наличие эффекта трехмерности возмущений, генерируемых на боковой границе области плазмообразования, не зависит от частоты и амплитуды питающего напряжения. Вместе с тем существует хорошо различимое влияние этих параметров на амплитуду тангенциальных скоростей. С ростом питающего напряжения и частоты растет вкладываемая в разряд мощность. При увеличении мощности сверх пороговой происходит контракция разряда — образование выделенных протяженных каналов с повышенной плотностью тока. Результатом контракции разряда является существенное увеличение амплитуды продольных вихрей, ассоциированных с одиночным филаментом.

Таким образом, показано, что на краю плазменной области в ДБР-актуаторе происходит формирование течения с отличной от нуля тангенциальной компонентой скорости потока. При установке актуатора в пограничный слой эта область генерирует концентрированный вихрь с продольным направлением завихренности. Соответственно при наличии двух границ области плазмообразования наблюдается формирование пары противоположно вращающихся вихрей. Обнаружено, что отдельные микроразряды в „однородном“ плазменном слое являются источниками аналогичных возмущений меньшего размера и амплитуды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента МК.4743.2016.8.

Список литературы

- [1] *Kriegseis J., Simon B., Grundmann S.* // *Appl. Mech. Rev.* 2016. V. 68. P. 020802.
- [2] *Курячий А.П.* // *Прикладная математика и механика.* 1985. Т. 1. С. 85.

- [3] *Kopiev V.F.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 505201.
- [4] *Grundmann S., Tropea C.* // Exp. Fluids. 2008. V. 44. P. 795.
- [5] *Hanson R.E.* et al. // Exp. Fluids. 2010. V. 49. P. 1339.
- [6] *Kopiev V.F.* et al. // Acoust. Phys. 2012. V. 58. P. 434.
- [7] *Chan S., Zhang X., Gabriel S.* // AIAA J. 2007. V. 45. P. 1525.
- [8] *Ely R., Little J.* // Proc. 51st AIAA Meeting. 2013. P. 1012.
- [9] *Roth J.R., Sherman D.M., Wilkinson S.P.* // AIAA J. 2000. V. 38. P. 1166.
- [10] *Kriegseis J.* et al. // Proc. 50th AIAA Meeting. 2012. P. 2411.
- [11] *Nishida H., Nonomura T., Abe T.* // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 133301.
- [12] *Moralev I.* et al. // Exp. Fluids. 2014. V. 55. P. 1747.
- [13] *Jukes T.N., Choi K.-S.* // J. Fluid Mech. 2013. V. 733. P. 370.
- [14] *Wicks M., Thomas F.O., Corke T.C.* // AIAA J. 2015. V. 53. P. 1.