

03.3

Структура течения газа при движении субмиллиметрового дугового разряда в поперечном магнитном поле

© М.А. Ядренкин, Ю.В. Громыко, В.П. Фомичев, И.А. Фомичев

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

Поступило в Редакцию 12 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 20 февраля 2024 г.

Принято к публикации 29 марта 2024 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований структуры пристеночного течения, возникающего при движении плазмы субмиллиметрового дугового разряда в магнитном поле в покоящемся газе вблизи поверхности. Благодаря высокой точности синхронизации процессов удалось получить векторные поля скорости течения с помощью адаптивного PIV-метода при их осреднении на серии снимков. Впервые показаны основные стадии эволюции течения при различной величине магнитного поля, характеризующиеся устойчивой динамикой перехода однородной струи в сложную вихревую структуру.

Ключевые слова: субмиллиметровый дуговой разряд, магнитное поле, структура течения.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58302.19837

Различные газодинамические процессы, возникающие при взаимодействии набегающего газового потока с поверхностью под действием сил вязкого трения, можно наблюдать при обтекании элементов конструкции летательных аппаратов, стенок каналов различных устройств и двигательных установок. Ввиду совершенствования технологий накопления и генерации энергии сегодня находят применение методы управления пристеночными течениями, основанные на использовании магнитоплазменных технологий [1–3]. Их главными преимуществами являются скорость влияния на течение, локальный характер взаимодействия и вариативность реализуемых пространственных и энергетических параметров. Особое место занимают исследования, связанные с применением различных типов электрических разрядов для управления структурой течения вблизи обтекаемых тел и в каналах различной геометрии [4–7]. В последнее время появились работы, нацеленные на создание актуаторов на основе дугового разряда, движущегося во внешнем магнитном поле [8,9]. Дуговой разряд отличается простотой технической реализации и устойчивой формой горения в широком диапазоне параметров окружающей среды. Исследуемый в настоящей работе способ создания объемных сил в тонком пристеночном слое газа с использованием субмиллиметровых дуговых разрядов в постоянном магнитном поле направлен на изменение структуры потока непосредственно в толщине пограничного слоя, что может повысить эффективность метода даже в условиях сверхзвукового обтекания.

Экспериментальные исследования влияния величины магнитного поля на структуру течения, возникающего при движении плазмы субмиллиметрового дугового разряда в неподвижном газе, были проведены с использованием открытой камеры, связанной с атмосферой. Внутри камеры располагалась пластина с электродами

и источником магнитного поля (рис. 1, *a*). Одиночный импульс электрического разряда длительностью около $50 \mu\text{s}$ (рис. 1, *b*) был инициирован между двумя точечными электродами круглой формы, расположенными заподлицо с диэлектрической поверхностью на расстоянии 2.2 mm друг от друга. Для реализации высокочастотных импульсов электрического тока был использован генератор, разработанный в ИФП СО РАН. Особенность работы генератора заключалась в использовании поджигающего высоковольтного импульса длительностью менее $1 \mu\text{s}$ и наложенного на него исполняющего импульса напряжения с изменяемой длительностью в диапазоне $10\text{--}100 \mu\text{s}$, что обеспечивало пробой газа в широком диапазоне давлений и дальнейшее горение разряда при относительно низком энергокладе. Для создания постоянного магнитного поля величиной до 0.15 T были использованы редкоземельные магниты различной толщины, располагавшиеся под тонким верхним слоем рабочей поверхности. Магнитное поле было направлено перпендикулярно поверхности так, чтобы результирующая электромагнитная сила обеспечивала движение разряда вдоль поверхности (рис. 1, *a*).

Визуализация наблюдаемых процессов осуществлялась методом трассирующих частиц (particles image velocimetry, PIV [10]), который был реализован на комплексе Dantec Dynamics: камера Hi-Sence mk2 с разрешением $1344 \times 1024 \text{ px}$, лазер Litron NanoL с мощностью импульса 135 MJ . Запыление области измерений производилось с помощью генератора сажи. Плоскость лазерного ножа располагалась перпендикулярно обтекаемой поверхности в направлении движения разряда. Восстановление поля скорости по изображениям трассеров проводилось с использованием кросс-корреляционных адаптивных алгоритмов с непрерывным смещением окна, однократным делением сетки и

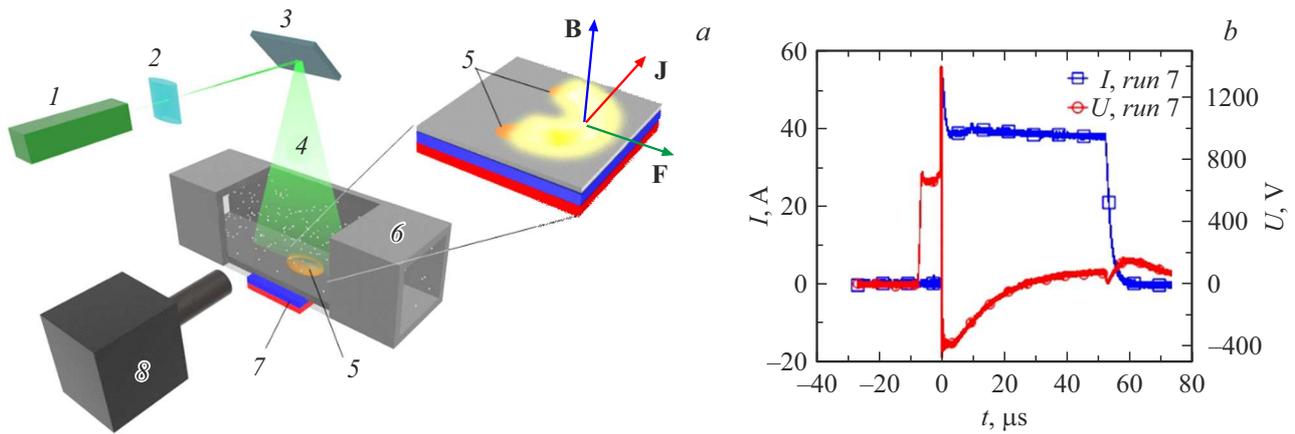


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и осциллограммы тока и напряжения разряда (б). 1 — PIV-лазер, 2 — система линз, 3 — зеркало, 4 — лазерный нож, 5 — электроды, 6 — рабочая камера, 7 — магнит, 8 — скоростная видеокамера.

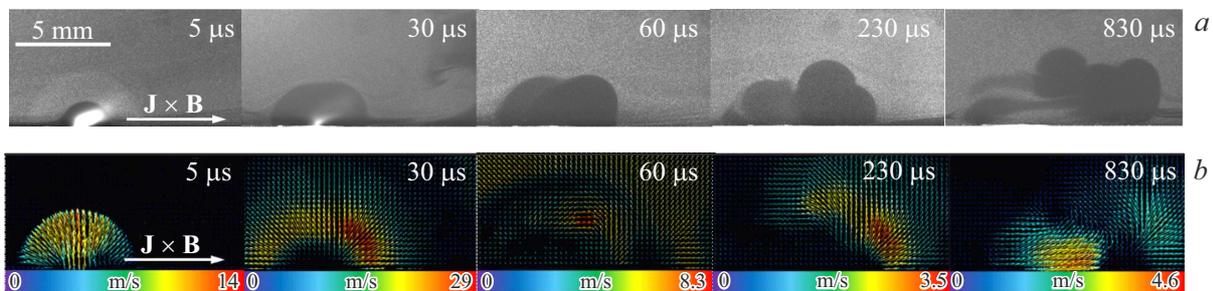


Рис. 2. Формирование течения воздуха при движении разряда в магнитном поле 0.1 Т. а — мгновенные фотографии распределения трассирующих микрочастиц в области взаимодействия, б — результаты PIV-визуализации структуры течения.

деформацией расчетной области [11]. Размер наблюдаемой области составил 17×23 mm. Размер ячеек, в которых рассчитывались локальные значения векторов скорости, составлял 16×16 px, итоговое поле скоростей состояло соответственно из 127×145 векторов. Для повышения точности определения полей скоростей трассерных частиц использовалось усреднение скоростных полей по 50–100 парам кадров. При воспроизведении электрических импульсов генератором и синхронизации процесса с PIV-съемкой с точностью не менее 100 ns удалось получить картины течений, соответствующие конкретным моментам от начала пробоя. Установлено, что реализуемая в центральной плоскости движения разряда картина течения проявляется с высокой степенью повторяемости в каждом реализуемом импульсе тока в течение не менее 1 ms. Благодаря этому с помощью PIV-метода удалось получить усредненные поля скоростей с высокой степенью детализации.

В ходе работы был изучен процесс формирования дозвукового течения при движении разряда в магнитном поле. Анализ полученных кадров показал, что цикл жизни одиночного импульса разряда можно разделить на характерные стадии эволюции наблюдаемого процесса. На рис. 2, а показаны исходные фотографии микрочастиц в газе, подсвеченных лазерным ножом в течение 15 ns.

Видно, что в результате электрического пробоя, сопровождающегося скачкообразным ростом температуры и давления, в приэлектродной области газа возникает каверна низкой плотности — темная область с очень низкой плотностью трассерных частиц. Одновременно с этим образуется цилиндрическая ударная волна, которая на удалении порядка длины межэлектродного промежутка преобразуется в волну с формой, близкой к сферической. Положение и форму ударной волны через 5 μs после начала разряда можно определить по геометрии области газа, занятой частицами с большей плотностью через 5 μs после пробоя. Внешняя граница светлой области расположена на некотором расстоянии от ударной волны, соответствующем скорости релаксации трассерных частиц. На рисунке также видно, что плазма электрического разряда вытягивается вдоль поверхности под действием электромагнитной силы $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$, где \mathbf{J} — плотность тока в дуге, \mathbf{B} — величина магнитного поля. После затухания разряда, длившегося около 50 μs, наступает стадия, характеризующаяся продолжающимся ростом области каверны, форма которой вытягивается в направлении изначально приложенного импульса в наблюдаемом сечении. По мере расширения каверна теряет скорость движения, однородность формы и плотности. Видно, что в область пониженного давления

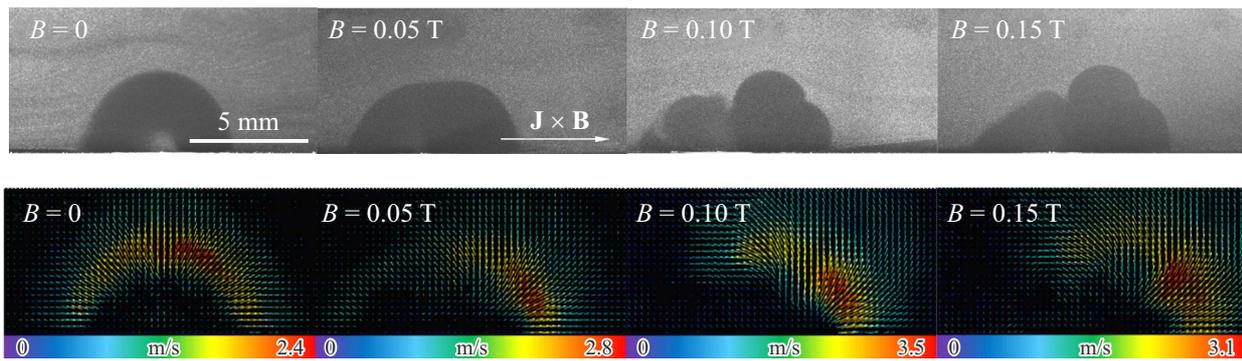


Рис. 3. Изменение структуры образуемого разрядом течения через $230 \mu\text{s}$ после пробоя при различной величине магнитного поля.

в ее хвосте устремляются частицы из окружающего газа. Через $200 \mu\text{s}$ наступает стадия схлопывания каверны, сопровождающаяся нарушением ее целостности и однородности. Поля мгновенных скоростей течения, полученные в результате обработки исходных данных, представлены на рис. 2, б. Данные измерения позволяют качественно определить области с высокими и низкими значениями скорости газа, а также динамику изменения интенсивности движения газа по мере распространения каверны низкого давления. Видно, что если в течение времени действия электромагнитной силы происходит значительный рост скорости газа в головной части каверны, то на стадии схлопывания каверны возникает значительный рост скорости газа в ее хвосте. Необходимо отметить, что в силу нестационарного характера воздействия разряда на окружающий газ траассирующие частицы движутся не равноускоренно. Поэтому данный метод, вероятно, приводит к значительному различию мгновенной скорости частиц и реальной скорости газа.

Процесс эволюции течения вблизи поверхности, образованного в результате действия электромагнитной силы или в ее отсутствие, был рассмотрен при различных значениях магнитного поля вблизи рабочей поверхности ($B = 0\text{--}0.15 \text{ T}$). На рис. 3 показаны картины течения, полученные через $230 \mu\text{s}$ после начала разряда. Как видно из рисунка, с ростом магнитного поля происходит увеличение скорости распространения каверны низкой плотности в направлении действия электромагнитной силы, что подтверждается „расползанием“ области каверны вдоль поверхности. Кроме того, однородная сферическая форма каверны, образуемая без магнитного поля, переходит в сложную вихревую структуру течения, состоящую из двух областей, которые особенно хорошо видны при $B = 0.1$ и 0.15 T . Таким образом, величина магнитного поля влияет не только на максимальную скорость образуемой струи газа, но и на скорость распада течения, что объясняется его ранней турбулизацией при более высоких локальных числах Рейнольдса. Данное предположение подтверждается максимальными значениями мгновенной скорости газа, измеренной PIV-методом. Следует еще раз отметить, что картины векторных полей скорости позволяют сравнить наблюдаемые

нестационарные явления лишь качественно. Определение истинной скорости газа требует дополнительных исследований динамики ускоряемых частиц при нестационарном воздействии. Однако на основе полученных данных можно с уверенностью сделать вывод, что при увеличении магнитного поля рост области влияния разряда на неподвижный газ происходит преимущественно вдоль поверхности.

Таким образом, в работе впервые показана эволюция пристеночного течения, образованного в результате движения плазмы субмиллиметрового электрического разряда под действием электромагнитной силы при различной величине магнитного поля при атмосферном давлении воздуха. Результаты работы позволяют утверждать, что рассмотренный тип актуатора может быть применен для эффективного воздействия на структуру пристеночного течения, образуемого при обтекании плоскости как дозвуковым, так и сверхзвуковым потоком.

Благодарности

Авторы выражают благодарность В.Н. Ищенко (Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН) за консультации по вопросам организации питания электроразрядных устройств и предоставление во временное пользование оборудования — разработанного им генератора высокочастотных импульсов.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП „Механика“ (ИТПМ СО РАН).

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-00825 (<https://rscf.ru/project/23-29-00825/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H.-S. Yang, H. Liang, S.-G. Guo, M.-X. Tang, C.-B. Zhang, Y. Wu, Y.-H. Li, *Adv. Aerodyn.*, **4** (1), 18 (2022). DOI: 10.1186/s42774-022-00105-1
- [2] J.S. Shang, S.T. Surzhikov, R. Kimmel, D. Gaitonde, J. Menart, J. Hayes, *Prog. Aerospace Sci.*, **41** (8), 642 (2005). DOI: 10.1016/j.paerosci.2005.11.001
- [3] R. Joussot, S. Courmar, V. Lago, *J. Aerospace Lab*, N 10, AL10-04 (2015). DOI: 10.12762/2015.AL10-04
- [4] V.P. Fomichev, T.A. Korotaeva, M.A. Yadrrenkin. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **61** (5), 727 (2020). DOI: 10.1134/OO21894420050065
- [5] С.В. Бобашев, Р.В. Васильева, А.В. Ерофеев, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев, Д.М. Ван Ви, *ЖТФ*, **73** (2), 43 (2003). [S.V. Bobashev, R.V. Vasil'eva, A.V. Erofeev, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, D.M. Van Wie, *Tech. Phys.*, **48** (2), 177 (2003). DOI: 10.1134/1.1553557].
- [6] М.В. Устинов, *Уч. Зап. ЦАГИ*, **46** (8), 3 (2015).
- [7] G. Neretti, in *Recent progress in some aircraft technologies*, ed. by R.K. Agarwal (Springer, 2016), p. 57–76. DOI: 10.5772/61381.
- [8] I. Moralev, P. Kazanskii, V. Biturin, A. Bocharov, A. Firsov, E. Dolgov, S. Leonov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **53** (42), 425203 (2020). DOI: 10.1088/1361-6463/ab9d5a
- [9] П.А. Семенёв, П.Д. Токталиев, И.А. Моралев, П.Н. Казанский, В.А. Битюрин, А.Н. Бочаров, *Авиационные двигатели*, № 2 (7), 35 (2020).
- [10] F. Scarano, in *Particle image velocimetry. Topics in Applied Physics* (Springer, Berlin–Heidelberg, 2007), vol. 112, p. 445–563. DOI: 10.1007/978-3-540-73528-1_24
- [11] Е.К. Ахметбеков, Ю.А. Ложкин, А.В. Бильский, Д.М. Маркович, М.П. Токарев, А.Н. Тюрюшкин, *Вычислительные методы и программирование*, **7** (3), 79 (2006).