Теплофизика и аэромеханика, 2025, том 32, № 1

УДК 533

Особенности генерации вихревого течения в условиях импульсного магнитогидродинамического взаимодействия вблизи поверхности*

М.А. Ядренкин, Ю.В. Громыко

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

E-mail: yadrenkin@itam.nsc.ru, yurkonsk@itam.nsc.ru

С помощью оптических методов (шлирен-метод и PIV-томография) детально исследована пространственная эволюция структуры течения, образуемого при движении субмиллиметрового импульсного дугового разряда в магнитном поле около плоской диэлектрической поверхности. Благодаря хорошей управляемости динамическими и электрическими характеристиками разряда при высокой точности синхронизации оборудования удалось добиться высокой степени детализации картины течения на малых масштабах. Показано формирование поперечно расположенного тороидального вихря, распространяющегося в направлении генерируемой электромагнитной силы. Обнаружено возникновение вторичного течения в хвосте струи, что можно объяснить эжекцией окружающего газа в область пониженной плотности.

Ключевые слова: импульсный дуговой разряд, магнитное поле, структура пристеночного течения, PIV-томография (Particle Image Velocimetry).

Введение

Проектирование и создание перспективных транспортных средств (ТС) требует новых подходов в управлении их аэродинамическими характеристиками. В настоящее время геометрия средств доставки людей и грузов (самолеты, скоростные поезда, космические аппараты), а также способы оптимизации формы обтекаемых поверхностей достаточно хорошо изучены. Существенно улучшить аэродинамику ТС сегодня можно либо с помощью новых материалов, которые позволят обеспечить технологически недоступные пока характеристики поверхности, либо с помощью активных систем управления структурой пристеночных течений на сверхкритических режимах обтекания (перераспределение давления, управление пограничным слоем и отрывами). Применение магнитоплазменных технологий для управления высокоскоростными газовыми течениями является перспективным подходом в аэродинамике [1 – 3]. Ввиду совершенствования способов накопления, генерации и передачи энергии магнитоплазменные методы

* Исследование выполнено при поддержке РНФ (грант № 23-29-00825, https://rscf.ru/project/23-29-00825/); работа проведена с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

© **Ядренкин М.А., Громыко Ю.В., 2025**

воздействия на поток находят применение в науке и технике уже сегодня [4, 5]. Эти технологии позволяют эффективно управлять отрывами, ударно-волновой структурой потока [6, 7], изменять сопротивление тел, снижать тепловые потоки к поверхности [8 – 10]. В работах [11 – 13] было показано значительное влияние актуаторов на основе дугового разряда, движущегося во внешнем магнитном поле, на пристеночное течение. Использование актуаторов данного типа имеет ряд преимуществ по сравнению с такими механическими способами управления потоком, как изменение геометрии поверхности, использование отклоняющихся элементов, отсос и выдув газа с поверхности и др. К ним относятся простота конструкции, малый вес исполняющих элементов, надежность системы, высокие динамические и частотные характеристики, возможность использования в составе MEMS-технологий для управления течением с обратной связью. Кроме того, дуговой разряд отличается от других типов разрядов простотой технической реализации и устойчивой формой горения в широком диапазоне параметров окружающей среды. К недостаткам газоразрядного актуатора стоит отнести: короткий фронт нарастания импульса силы и энергии (менее 1 мкс), значительный локальный нагрев газа и образование неустойчивых зон с пониженной плотностью. Вследствие этого возникает необходимость исследования горения дуги разряда и эволюции порождаемого им течения.

В работе [13] с помощью PIV-метода (Particle Image Velocimetry) были показаны характерные особенности пристеночного течения, образованного в результате движения плазмы субмиллиметрового электрического разряда в магнитном поле. В настоящей работе выполнено комплексное исследование пространственной конфигурации и эволюции течения вблизи актуатора на основе субмиллиметрового дугового разряда, движущегося в постоянном магнитном поле в воздухе. Такие технологии визуализации и диагностики течения, как шлирен-метод и PIV-анемометрия, как правило, дают неполные сведения об общей картине развития нестационарного течения, собирая данные либо интегрально, либо в выделенной области потока. В предлагаемой работе предпринята попытка глубокого исследования процесса с помощью разработанной технологии PIV-томографии зоны взаимодействия.

1. Оборудование и методы обработки

Исследования эволюции структуры течения, образованной при движении субмиллиметрового дугового разряда в постоянном магнитном поле, были проведены с помощью технологии PIV [14] и высокоскоростной шлирен-съемки. Эксперименты были проведены в прямоугольной камере, связанной с внешней атмосферой, внутри которой располагалась диэлектрическая пластина с актуатором, состоящим из электродов и источника магнитного поля — неодимового магнита (рис. 1*a*). Медные электроды диаметром 0,8 мм были расположены заподлицо с поверхностью на расстоянии 2 мм друг от друга. Величина магнитного поля в зоне взаимодействия составила около 0,15 Тл. Рабочее тело — воздух при атмосферном давлении. Для реализации дугового разряда использовался высоковольтный генератор напряжения. На электроды подавался комбинированный импульс, состоящий из пробойного высоковольтного импульса длительностью около 1 мкс и наложенного прямоугольного импульса меньшего напряжения длительностью 50 мкс (рис. 1*b*). Частота следования импульсов в условиях эксперимента составила 1 Гц. Электроды были расположены таким образом, что вектор электрического поля был направлен вдоль оси *Z*, вектор магнитного поля — перпендикулярно ему и поверхности — вдоль оси *Y*. Это приводило к движению разряда под действием электромагнитной силы, направленной вдоль оси *X*, вблизи диэлектрической поверхности.

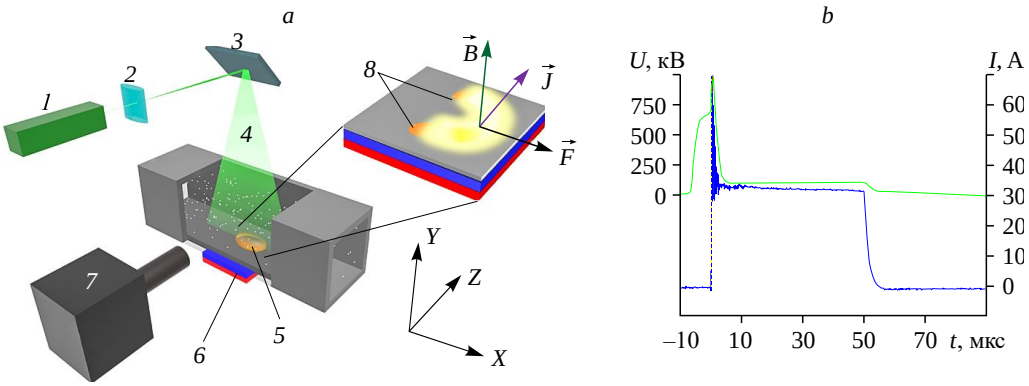

Рис. 1. Схема PIV-эксперимента (*a*) и осциллограммы импульса тока и напряжения субмиллиметрового дугового разряда в магнитном поле (*b*).

1 — PIV-лазер, *2* — оптическая система, *3* — зеркало, *4* — лазерный нож, *5* — разряд, *6* — магнит, *7* — камера, *8* — электроды.

Метод PIV-томографии, используемый в настоящем исследовании, представляет собой комбинацию традиционного метода PIV и последующей томографической реконструкции. Для реализации метода использовался комплекс Dantec Dynamics, в состав которого входит камера Hi-Sence mk2 с разрешением 1344×1024 пиксел и импульсный лазер Litron NanoL (энергия импульса 135 МДж). Засев области измерений производился с помощью генератора сажи. Плоскость лазерного ножа располагалась перпендикулярно диэлектрической поверхности. Суть метода заключается в следующем: вместо использования сложной системы с несколькими камерами для получения трехмерного поля скорости применяется одна камера, которая фиксирует последовательность двумерных изображений потока в различных сечениях. Возможность реализации такого подхода обусловлена высокой воспроизводимостью импульсного процесса горения дугового разряда в магнитном поле, подтвержденной стабильностью его электрических характеристик. Точная синхронизация PIV-съемки с началом импульса дала возможность поэтапно сканировать пространство лазерным ножом в заданные моменты времени, перемещая плоскость сканирования в окрестности электродов.

Сканирование производилось в плоскостях, параллельных плоскости $\vec{B}\vec{J}$ $(0, Y, Z)$, направленной поперек направления движения разряда, и плоскости $\vec{B}\vec{F}$ $(X, Y, 0)$, направленной вдоль его движения (см. рис. 1), в диапазонах сканирования от -6 до 6 мм (9 сечений) и от –6 до 11 мм (11 сечений) соответственно. Начало координат совмещено с центральной точкой между электродами. Полученные в каждом сечении изображения обрабатывались методом кросскорреляционного анализа с использованием адаптивных алгоритмов, включающих непрерывное смещение окна, однократное деление сетки и деформацию расчетной области [15]. Размер области наблюдения составлял 17×23 мм, а разрешение ячейки расчета вектора скорости — 32×16 пиксел, что формировало итоговое поле скоростей размерностью 61×149 векторов. Ввиду низкой концентрации частиц внутри каверны, образующейся в результате быстрого нагрева газа электрическим разрядом, точность расчета полей скорости в этой области снижалась. Для повышения детализации пространственного распределения скорости использовалось статистическое осреднение по ансамблю реализаций. Для каждого фиксированного момента времени от начала пробоя Δt (5, 25, 55, 205, 805 мкс) было получено и обработано от 50 до 100 пар кадров.

На финальном этапе происходила томографическая реконструкция течения, при которой трехмерный массив векторов скорости формировался путем объединения данных, полученных в различных сечениях. Пространственное разрешение повышалось за счет интерполяции компонент скорости. Итоговое разрешение в диапазонах –6 мм < X < < 11 мм, 0 < Y < 8 мм и –6 мм < Z < 6 мм составило 50×60×70 векторов соответственно. Компонента скорости V_X определялась из сечений, параллельных плоскости XY, компонента V_Z — из сечений, параллельных плоскости ZY. Компонента V_Y рассчитывалась как среднеквадратичное значение этой компоненты скорости в плоскостях, параллельных как XY, так и ZY. Это позволило учесть возможные различия значений V_Y в местах пересечения этих плоскостей и обеспечить более точные результаты.

Таким образом, оригинально реализованный метод PIV-томографии позволил получить информацию о трехмерном поле скорости, используя данные, полученные с помощью одной камеры, что значительно упрощает и удешевляет эксперимент по сравнению с классическим томографическим методом PIV, требующим нескольких камер.

Для визуализации градиентов плотности газа в зоне взаимодействия был использован теневой метод (шлирен-метод) в сочетании с высокоскоростной видеокамерой Photron Fastcam SA-Z. Выбор этого метода обусловлен его способностью визуализировать оптические неоднородности в прозрачных средах, вызванные изменением показателя преломления. В качестве источника света использовался твердотельный зеленый лазер с длиной волны 532 нм. Формирование плоскопараллельного пучка света, проходящего через исследуемую область, осуществлялось с помощью длиннофокусных объективов. Роль оптического ножа, отсекающего отклоненные лучи, выполнял адаптивный визуализирующий транспарант [16]. Высокая частота съемки (100 кГц) и короткая экспозиция (1 мкс) позволили зафиксировать динамику процесса взаимодействия с высоким временным разрешением. Пространственное разрешение полученных изображений составило 0,1 мм/пикс. Для повышения контрастности и четкости изображений применялась техника вычитания фонового кадра. Из каждого кадра, полученного во время эксперимента, вычитался кадр, снятый до начала взаимодействия. Это позволило нивелировать влияние на конечное изображение таких нежелательных явлений, как лазерные спеклы, неравномерность освещенности и интерференционные искажения.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Анализ и эволюция плазменного образования в магнитном поле: сопоставление данных PIV и шлирен-визуализации

На рис. 2 представлены результаты PIV-диагностики в сечении (X, Y, 0) и инвертированные кадры шлирен-визуализации процесса МГД-взаимодействия плазменной дуги с окружающим газом для различных моментов времени после инициирования пробоя. Сопоставление данных этих методов позволяет детально проанализировать динамику плазменного образования и окружающего газа под действием электромагнитной силы.

В момент инициации разряда (Δt = 5 и 25 мкс) наблюдается формирование каверны низкой плотности (КНП) вокруг электрической дуги. Этот процесс сопровождается интенсивным нагревом газа, возникновением разряженного течения и образованием ударной волны (УВ), распространяющейся в окружающем газе. На шлирен-изображениях (см. рис. 2*c*) область пониженной плотности, соответствующая КНП, окружена темным

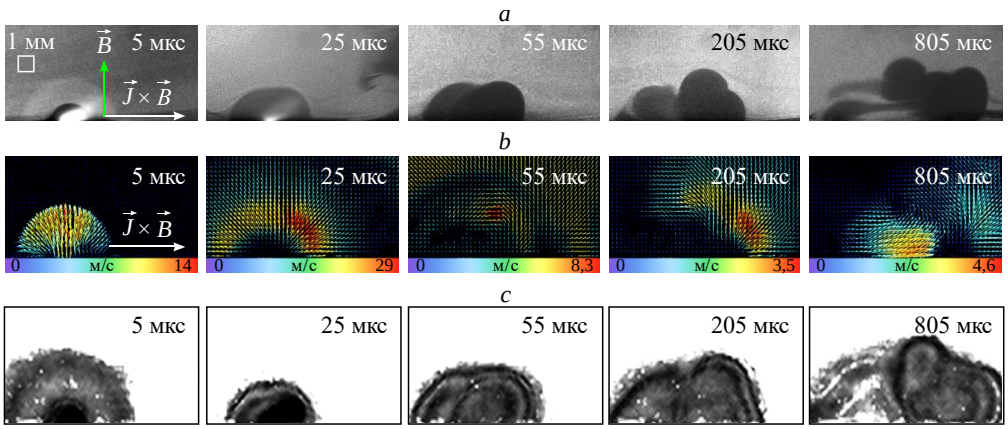

Рис. 2. Формирование течения воздуха при движении разряда в магнитном поле.
a — трассеры, *b* — PIV-визуализация скорости, *c* — скоростная шлирен-визуализация.

кольцом, свидетельствующим о резком изменении показателя преломления на фронте УВ. Трассерная визуализация (см. рис. 2*a*) также подтверждает формирование УВ, однако более светлая область, наличие которой обусловлено повышенной плотностью трассерных частиц, слегка запаздывает относительно фронта УВ. Это запаздывание объясняется временем релаксации трассерных частиц, т.е. временем, необходимым им для достижения скорости окружающего газа. Низкая концентрация трассирующих вблизи дуги частиц (см. рис. 2*a*) объясняется их выталкиванием из зоны интенсивного нагрева, что дает возможность весьма точного определения изменения границ КНП во времени. При этом, ввиду малого количества данных непосредственно в зоне наблюдения, для повышения детализации пространственного распределения скорости использовалось статистическое осреднение по ансамблю реализаций (50 – 100 пар кадров).

Важно отметить, что нестационарный характер воздействия разряда на окружающую среду приводит к неравномерному движению трассерных частиц [17]. Это может вносить некоторую погрешность в определение абсолютных значений скорости газа методом PIV. Тем не менее PIV-диагностика позволяет с высокой достоверностью определить области с различной интенсивностью движения газа и проследить динамику картины течения.

В интервале времени от 5 до 25 мкс наблюдается вытягивание плазменного канала вдоль поверхности под действием электромагнитной силы $\vec{J} \times \vec{B}$, где J — плотность тока в дуге, B — величина магнитного поля. Этот эффект отчетливо виден как на шлирен-изображениях, где разряд представляет собой черную область, так и на кадрах скорости, полученных методом PIV. После окончания разряда ($\Delta t > 50$ мкс) движение КНП продолжается по инерции. По мере расширения каверна теряет скорость, ее форма изменяется, а распределение плотности газа становится неоднородным. К моменту времени $\Delta t = 805$ мкс наступает стадия схлопывания каверны, сопровождающаяся потерей ее целостности. Окружающий газ начинает заполнять каверну, прежде всего в ее задней части.

Анализ полей мгновенных скоростей, полученных методом PIV (см. рис. 2*b*), подтверждает описанную динамику. В момент действия электромагнитной силы наблюдается значительный рост скорости газа в передней части каверны, тогда как на стадии схлопывания максимальная скорость фиксируется в ее задней части.

Совместное использование PIV-диагностики и шлирен-визуализации позволило получить детальную картину динамики плазменного образования и окружающего газа

в магнитном поле. Было показано, что формирование и эволюция каверны низкой плотности определяются сочетанием интенсивного нагрева, электромагнитных сил и инерционных эффектов.

2.2. Трехмерная реконструкция и анализ динамики течения

Для детального исследования пространственной структуры и эволюции течения была проведена PIV-диагностика в нескольких сечениях с последующей томографической реконструкцией векторных полей скорости. На рис. 3 представлены изоповерхности компонент скорости V_X, V_Y, V_Z и поле скорости в центральном сечении $(X, Y, 0)$ для различных моментов времени после начала разряда (Δt = 55, 205 и 805 мкс)

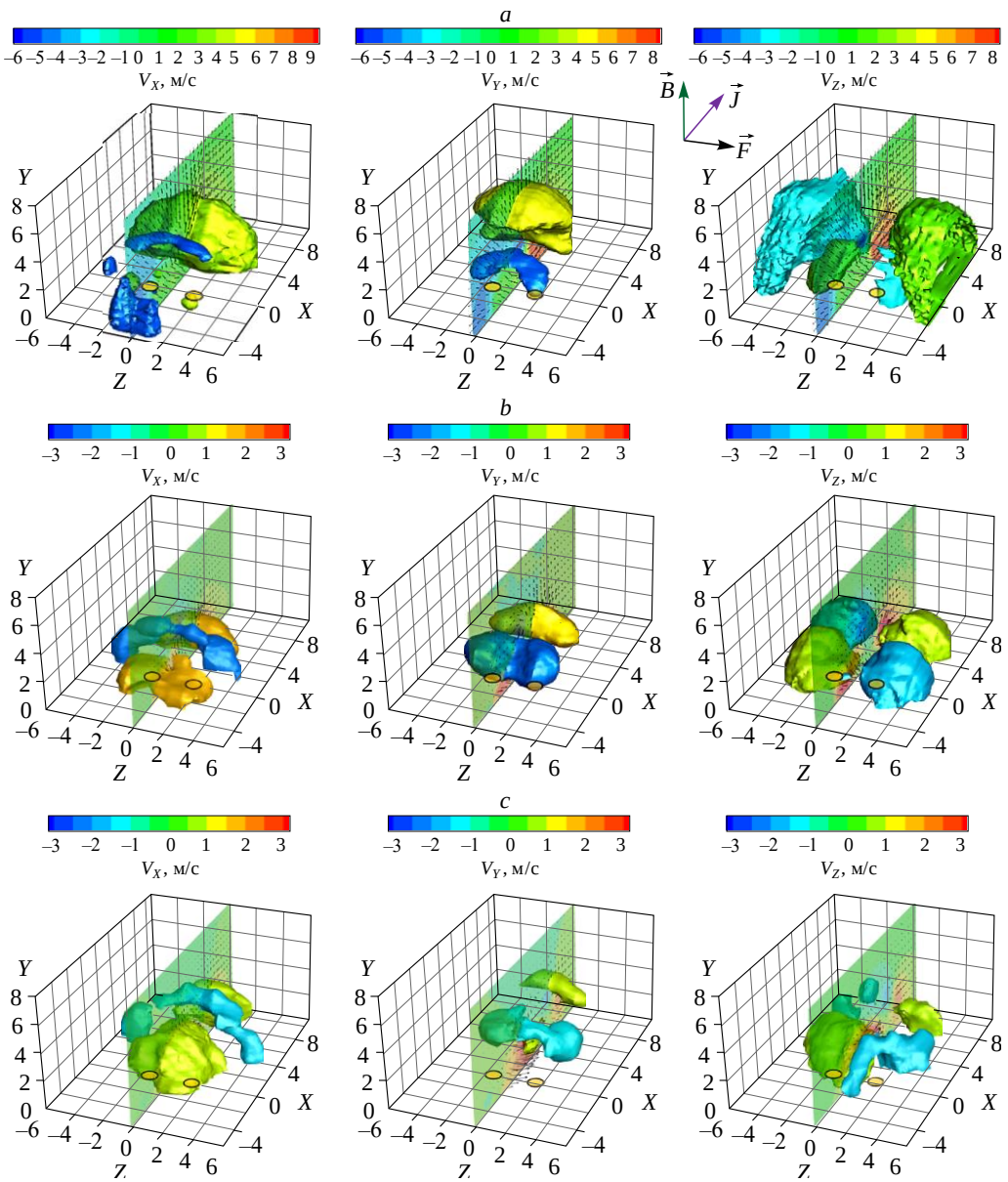

Рис. 3. Изоповерхности компонент скорости *VX*, *VY*, *VZ* газа через 55 мкс (*a*), 205 мкс (*b*) и 805 мкс (*c*) после начала разряда в магнитном поле 0,15 Тл.

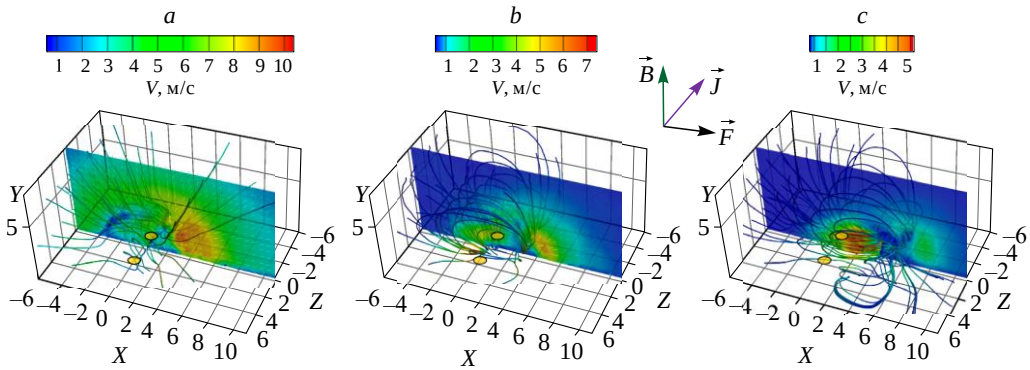

Рис. 4. Линии тока и поля скоростей в центральном сечении сканируемой области через 55 мкс (*a*), 205 мкс (*b*) и 805 мкс (*c*) после начала разряда в магнитном поле 0,15 Тл.

при величине магнитного поля 0,15 Тл. Как отмечено выше, к моменту времени Δt = = 55 мкс разряд практически угасает и дальнейшая динамика течения определяется преимущественно инерционными силами. Это проявляется в постепенном уменьшении амплитуды всех компонент скорости со временем. При этом изоповерхности V_X, V_Y, V_Z сохраняют квазисимметричную форму относительно плоскости (X, Y, 0) вплоть до Δt = 805 мкс.

Трехмерная визуализация позволяет детально проследить за формированием и эволюцией струйного течения, возникающего в головной части разряда уже при Δt = 55 мкс. Анализ изоповерхностей V_X выявляет значительные изменения в области –6 мм < X < 0 к моменту времени Δt = 205 мкс. Эти изменения свидетельствуют о формировании вторичного течения в хвостовой части струи, обусловленного увлечением окружающего газа в область пониженной плотности (КНП). Следует отметить, что изоповерхности компоненты V_Z демонстрируют наибольшую деформацию в процессе наблюдения. Это может свидетельствовать о наличии неоднородностей и неустойчивостей в распределении скорости вдоль оси Z.

На рис. 4 представлены линии тока, построенные по трехмерному массиву векторных полей скорости, а также поле скорости в центральном сечении (X, Y, 0). Видно, что после прекращения действия электромагнитной силы $\vec{J} \times \vec{B}$ в окрестности разряда формируется тороидальный вихрь. В начальный момент времени (Δt = 55 мкс) скорость максимальна в передней части вихря. Однако по мере развития течения под действием вязких сил скорость в головной части струи снижается, тогда как скорость газа, увлекаемого в область КНП, возрастает. К моменту распада КНП вторичное течение в хвостовой части струи становится доминирующим.

Выводы

Проведенное экспериментальное исследование позволило детально изучить структуру и динамику струи воздуха, формирующейся при движении импульсного субмиллиметрового дугового разряда в постоянном магнитном поле. Установлено, что локальное МГД-взаимодействие вблизи плоской поверхности приводит к образованию полусферической ударной волны и каверны низкой плотности, вытянутой в направлении электромагнитного импульса.

Применение скоростной шлирен-видеосъемки и оригинального метода PIV-томографии обеспечило получение высокодетальной картины эволюции нестационарного

течения. Высокая точность синхронизации оборудования и управление параметрами процесса позволили выявить стабилизирующую роль магнитного поля, определяющего направление электромагнитной силы и, как следствие, сценарий развития газовой струи.

Сопоставление данных PIV-диагностики и шлирен-визуализации продемонстрировало сложный механизм формирования и эволюции каверны низкой плотности, обусловленный взаимодействием интенсивного нагрева, электромагнитных сил и инерционных эффектов.

Трехмерная реконструкция течения выявила его вихревую структуру после угасания разряда: формирование струи в головной части, развитие вторичного течения в хвостовой части и диссипацию энергии в вязкой среде, сопровождающуюся снижением амплитуды компонент скорости с наиболее заметной деформацией поперечной компоненты.

Полученные результаты имеют высокую научную и практическую ценность. Детальное описание физических процессов, протекающих при взаимодействии импульсного дугового разряда с магнитным полем, открывает новые возможности для оптимизации технологических процессов с использованием электромагнитных актуаторов, разработки усовершенствованных экспериментальных методик, а также моделирования и анализа высокоскоростных течений.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных параметров разряда и магнитного поля на характеристики формирующейся струи, а также на разработку моделей, описывающих наблюдаемые явления с учетом теплообмена и турбулентности.

Авторы благодарят В.Н. Ищенко, ведущего научного сотрудника Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, за предоставленный в пользование генератор высокочастотных импульсов и техническую поддержку.

Список литературы

1. **Yang H.S., Liang H., Guo S.G., Tang M.X., Zhang C.B., Wu Y., Li Y.H.** Research progress of hypersonic boundary layer transition control experiments // Adv. Aerodynamics. 2022. Vol. 4, No. 1. P. 1–54.
2. **Shang J.S., Surzhikov S.T., Kimmel R., Gaitonde D., Menart J., Hayes J.** Mechanisms of plasma actuators for hypersonic flow control // Progress in Aerospace Sciences. 2005. Vol. 41, No. 8. P. 642–668.
3. **Joussot R., Courmar S., Lago Vol.** Plasmas for high speed flow control // Aerospace Lab. 2015. No. 10. P. 1–11.
4. **Яцких А.А., Ермолаев Ю.Г., Косинов А.Д., Семенов Н.В.** Эволюция волновых пакетов в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 1. С. 17–28.
5. **Patent US10337539B1.** Drag reduction and energy generation apparatus and method for transport vehicles / Shah N.Z. U.S. July 2, 2019.
6. **Фомичев В.П., Коротаева Т.А., Ядренкин М.А.** Развитие методов магнитоплазменной аэродинамики в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН // Прикл. механика и техн. физика. 2020. Т. 61, № 5. С. 52–67.
7. **Бобашев С.В., Васильева Р.В., Ерофеев А.В., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Ван Ви Д.М.** Локальное воздействие магнитного и электрического полей на положение присоединенного скачка в сверхзвуковом диффузоре // Журн. техн. физики. 2003. Т. 73, вып. 2. С. 43–50.
8. **Устинов М.В.** Устранение неустойчивости поперечного течения в пограничном слое на скользящем крыле с помощью диэлектрического барьерного разряда // Учен. зап. ЦАГИ. 2015. Т. 46, № 8. С. 3–15.
9. **Neretti G.** Recent progress in some aircraft technologies / Ed. by Ramesh K. Agarwal. Rijeka, Springer, 2016. P. 57–76.
10. **Стариковский А.Ю., Александров Н.Л.** Управление газодинамиескими потоками с помощью сверохбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // Физика плазмы. 2021. Т. 47, вып. 2. С. 126–192.
11. **Moralev I., Kazanskii P., Bityurin V., Bocharov A., Firsov A., Dolgov E., Leonov S.** Gas dynamics of the pulsed electric arc in the transversal magnetic field // J. Physics D: Appl. Phys. 2020. Vol. 53, No. 42. P. 425203-1–425203-18.

12. Семенёв П.А., Токталиев П.Д., Моралев И.А., Казанский П.Н., Битюрин В.А., Бочаров А.Н. Численное моделирование дугового разряда в воздухе при воздействии внешнего магнитного поля в магнитогазодинамическом приближении // Авиац. двигатели. 2020. № 2. С. 35–44.

13. Ядренкин М.А., Громыко Ю.В., Фомичев В.П., Фомичев И.А. Структура течения газа при движении субмиллиметрового дугового разряда в поперечном магнитном поле // Письма в Журн. техн. физики. 2024. Т. 50. С. 13–16.

14. Scarano F. Overview of PIV in supersonic flows // Topics in applied physics, Particle Image Velocimetry: New Developments and Recent Applications. Berlin: Heidelberg, 2008. Vol. 112. P. 445–463.

15. Павлов А.А., Павлов Ал.А. Развитие АВТ-метода для диагностики сильных фазовых неоднородностей // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине: докл. V Всерос. конф. Новосибирск, 2013. Т. 2. С. 125–129.

16. Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н. Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислит. методы и программирование. 2006. Т. 7, № 3. С. 79–85.

17. Поплавский С.В. Динамика частиц и капель в ускоряющемся потоке газа // Динамика многофазных сред: тезисы докл. XVIII Всерос. семинара. Бердск, 2023. С. 81–82.

Статья поступила в редакцию 7 октября 2024 г.,
принята к публикации 8 ноября 2024 г.