

Исследование и применение наносекундных разрядов для визуализации структуры сверхзвуковых потоков

И.В. Мурсенкова¹, А.А. Иванова², А.С. Сазонов³

Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-7181-4533, murs_i@physics.msu.ru

² ORCID: 0009-0005-5588-5824, militcina.aa18@physics.msu.ru

³ ORCID: 0000-0002-7930-9283, as.sazonov@physics.msu.ru

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование пространственного распределения излучения наносекундных поверхностного скользящего разряда и комбинированного объемного разряда в сверхзвуковых потоках воздуха с обтекаемым осесимметричным телом в канале. Течение в разрядной камере включало ударные волны, генерируемые при обтекании тела, и отраженные от стенок канала. Структура потока визуализировалась прямым теневым методом и путем регистрации свечения разрядов фотокамерами и электронно-оптической камерой. Сверхзвуковые потоки с числами Маха 1.36–1.60 создавались за плоскими ударными волнами с числами Маха 3.0–4.4 в канале ударной трубы прямоугольного сечения. Разряды реализовались при импульсном напряжении 25 кВ на поверхности или в объеме протяженностью 100 мм в направлении потока. Проанализированы пространственные характеристики излучения разрядов, инициированных на различных стадиях газодинамического течения. Проведены цифровая обработка и анализ изображений свечения, полученных при развитии разрядов, а также их сравнение с теневыми изображениями поля течения. Показана связь распределения свечения скользящего поверхностного разряда в сверхзвуковых потоках с характером и состоянием пограничного слоя на стенке канала. Сопоставление изображений свечения разрядов с кадрами теневой съемки позволило восстановить трехмерную структуру сверхзвукового течения с головной ударной волной перед обтекаемым телом и наклонными скачками уплотнения.

Ключевые слова: сверхзвуковой поток, ударная волна, поверхностный скользящий разряд, наносекундный комбинированный объемный разряд, газоразрядная визуализация, высокоскоростная теневая регистрация.

Введение

Методы визуализации газодинамических потоков с помощью электрических разрядов приобрели широкое распространение в решении задач плазменной аэродинамики [1–5]. Использование разрядов различного типа позволяет не только организовать разные режимы управления потоков, но и получать информацию об их структуре [3–5]. Традиционные методы визуализации, такие как прямой теневой метод, шпирен-метод и интерференционный метод, доказали свою эффективность при исследовании сверхзвуковых течений в каналах, где наблюдаются резкие изменения параметров среды, в том числе плотности и показателя преломления [1, 2, 6].

Кроме классических методов, за последние десятилетия развиваются способы визуализации, основанные на регистрации свечения различных типов газовых разрядов [1, 3–6]. Такие методы применимы при низких давлениях газа, когда локальная интенсив-

ность свечения газоразрядной плазмы может быть связана с величиной приведенного электрического поля и плотностью газа [4-7]. В частности, взаимодействие ударных волн с телами и пограничными слоями создает сложное поле течения (скачки уплотнения, зоны разрежения, отрыв потока), которое может влиять на форму и интенсивность свечения разрядов. Объемные и поверхностные разряды наносекундной длительности, короткой по сравнению с газодинамическими временами (~ 1 мкс), позволяют хорошо визуализировать структурные элементы высокоскоростных потоков, такие как ударные волны, косые скачки уплотнения и другие характерные элементы течения даже при высоких скоростях потока [4-6]. В комбинации с классическими методами регистрация свечения газового разряда может дать дополнительную информацию о трёхмерной структуре сверхзвукового потока.

Наносекундный поверхностный скользящий разряд, распространяющийся вдоль диэлектрической поверхности, привлекает внимание благодаря своему потенциалу в плазменном управлении высокоскоростными потоками. Скользящий разряд формирует квазиоднородную плазму, распределенную по площади диэлектрика [7, 8]. По сравнению с другими типами поверхностных разрядов, скользящий разряд создаёт существенно более широкую зону воздействия, что делает его удобным для применения в газодинамических потоках [7, 9, 10].

Целью работы являлось изучение распределения свечения импульсного поверхностного скользящего разряда и свечения комбинированного объемного разряда в сверхзвуковых потоках воздуха, обтекающих осесимметричное затупленное тело. На основе сравнения полученных изображений и результатов теневого зондирования анализировалась возможность восстановления трехмерной структуры газодинамического течения в канале.

Условия проведения экспериментов

Экспериментальные исследования проводились на ударной трубе с разрядной камерой прямоугольного сечения 24×48 мм² ($y \times z$) (рис. 1). В качестве рабочего газа использовался воздух при начальном давлении 10–30 торр. После разрыва диафрагмы в канале ударной трубы формировалось течение с плоской ударной волной, за которой следовал однородный спутный поток [6, 7]. Сверхзвуковые потоки воздуха с числами Маха 1.36-1.60 генерировались за фронтом плоских ударных волн с числами Маха 3.0-4.4. Однородный спутный поток за фронтом ударной волны имел длительность 200-500 мкс. По центру разрядной секции под нулевым углом атаки к набегающему потоку было установлено осесимметричное тело – цилиндр со сферическим затуплением, диаметром 7.5 мм и длиной около 200 мм. Носовая часть тела длиной 15-25 мм располагалась внутри разрядного объема, имеющего протяженность 100 мм вдоль направления потока. Для измерения скорости ударной волны использовались пьезодатчики давления, подключённые к осциллографу.

Визуализация течения в разрядной камере осуществлялась прямым теневым методом через плоскопараллельные кварцевые боковые стенки разрядной секции [2, 6]. Оптическая схема прямого теневого метода включала создание плоскопараллельного пучка лучей, просвечивающего исследуемую область вблизи обтекаемого тела. Теневые изображения регистрировались высокоскоростной камерой с частотой 150 000 кадров в секунду. В качестве источника света использовался непрерывный лазер с длиной волны 532 нм. Оптическая система формировала параллельный пучок света шириной около 40 мм, который проходил через стекла разрядной секции и зондировал поле течения [6].

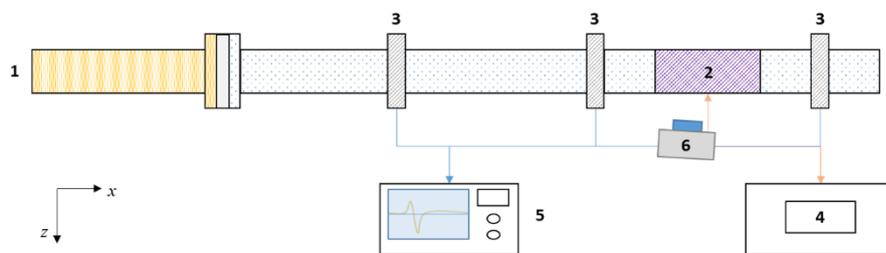


Рис. 1. Схема экспериментальной установки и диагностической аппаратуры: 1 — ударная труба, 2 — разрядная камера, 3 — пьезоэлектрические датчики давления, 4 — блок запуска разряда, 5 — осциллограф, 6 — фотокамера/ электронно-оптическая камера

Поверхностный скользящий разряд площадью $30 \times 100 \text{ мм}^2$ ($z \times x$) инициировался на нижней стенке разрядной камеры при импульсном напряжении 25 кВ; ток разряда составлял 1-2 кА [7]. Для формирования комбинированного объемного разряда использовалась специальная электрическая схема, включающая два поверхностных скользящих разряда на верхней и нижней стенках разрядной секции, расположенных на расстоянии 24 мм друг от друга [11]. При приложении импульсного напряжения скользящие разряды формировали верхний и нижний плазменные электроды, обеспечивая предварительную ионизацию объема ультрафиолетовым излучением. При импульсной разрядке конденсатора происходил объемный пробой газа, ток разряда достигал 1 кА. Длительность тока разрядов была менее 500 нс.

В экспериментах разряды двух типов реализовывались на различных стадиях нестационарного течения после прохождения ударной волной носовой части тела до окончания спутного потока. Момент инициирования разрядов задавался генератором импульсов относительно прохождения ударной волной пьезоэлектрического датчика давления, размещенного в канале ударной трубы (рис. 1).

Свечение разрядов регистрировалось фотоаппаратами через прозрачные кварцевые стекла разрядной камеры под разными углами (время экспозиции соответствовало времени излучения разряда в видимом спектральном диапазоне); и электронно-оптической камерой с наносекундным разрешением. Свечение поверхностного скользящего разряда, инициированного на нижней стенке разрядной секции, регистрировалось под большим углом наклона к плоскости разряда. Излучение разрядов в воздухе при высоких значениях напряженности электрического поля определяется в основном полосами второй положительной системы молекулярного азота, имеющей максимум в ультрафиолетовом диапазоне [7, 10, 12]. Фотоизображения обрабатывались с помощью графического редактора для повышения резкости и контрастности изображений. Сопоставление изображений свечения разрядов и соответствующих теневых картин течения проводилось для установления связи излучения плазмы разрядов с характером газодинамического течения около обтекаемого тела в канале.

Формирование сверхзвукового течения в разрядной камере

Высокоскоростная теневая съемка показала формирование сложной системы ударных волн при установлении сверхзвукового обтекания тела в разрядной камере, областей отрыва пограничного слоя. При прохождении ударной волной носовой части затупленного тела происходила дифракция, завершающаяся образованием головной ударной волны и установлением стационарного обтекания. Стационарное течение формировалось в течение 30-50 мкс в процессе дифракции плоской ударной волны и продолжалось до 500 мкс в пределах длительности однородного спутного течения при экспериментальных условиях. После окончания стационарной стадии течение перестраивалось с изменением ударно-волновой конфигурации. Переход к нестационарной фазе происходил после окончания спутного течения или после прихода отраженных

ударных волн, движущихся навстречу потоку. На рис. 2 показано теневое изображение течения около тела на стационарной стадии обтекания, включающее головную ударную волну, наклонные ударные волны, отраженные от стенок канала и от тела скачки уплотнения. Эти ударные волны взаимодействовали с пограничными слоями, формирующимся на плоских стенках разрядной камеры.

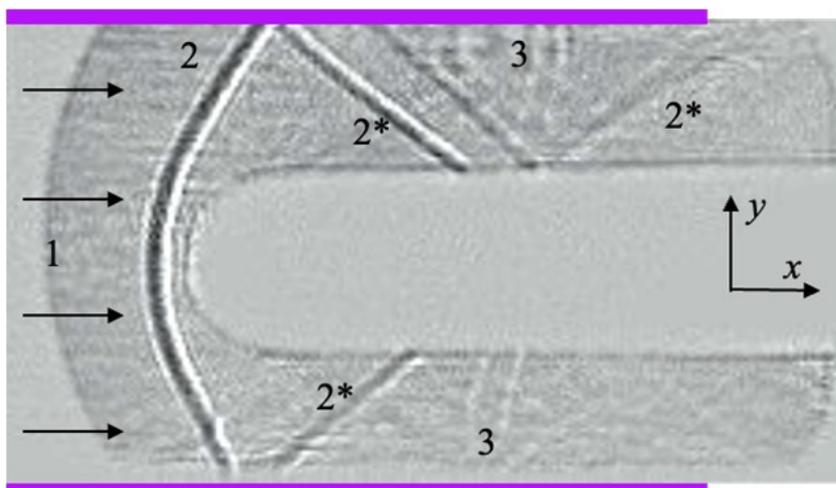


Рис. 2. Теневое изображение сверхзвукового обтекания модели при числе Маха потока 1,60 (плотность $0,10 \text{ кг/м}^3$) с обозначением элементов течения: 1 — поток; 2 — головная ударная волна; 2* — наклонные ударные волны; 3 — зона отрыва. Цветом выделена область приложения импульсного напряжения.

Излучение поверхностного скользящего разряда в неоднородных сверхзвуковых потоках

В неподвижном воздухе свечение поверхностного скользящего разряда достаточно однородно, с проявлением некоторой филаментации при повышении плотности газа (рис. 3 а). Распределение свечения разряда в сверхзвуковых потоках показывает четкую корреляцию с газодинамической структурой приповерхностного течения (рис. 3 б-г). За время регистрации фотоизображений смещение элементов потока не превышало 0,5 мм. Локальное излучение плазмы разрядов связано с локальной концентрацией возбужденных молекул газа [9, 13], которая зависит от концентрации электронов, и, соответственно, величины приведенного электрического поля E/N (E — напряженность электрического поля, N — концентрация молекул газа) [13]. Фотоизображения свечения практически мгновенно визуализируют структуру течения. На фрагментах б, в, г рисунка 3 показаны изображения свечения разряда, инициированного на стадиях установления сверхзвукового обтекания.

На всех изображениях хорошо видна изогнутая линия пересечения плоскости разряда с головной ударной волной перед обтекаемым телом. Она отделяет область однородного свечения в набегающем потоке от области повышенной плотности за головной ударной волной, где свечение отсутствует. Такая четкая картина распределения свечения указывает на объемный характер импульсного пробоя газа. В каждой точке приповерхностного слоя воздуха одновременно развиваются электронные лавины, электроны с большой энергией возбуждают молекулы азота, которые излучают фотоны. В области повышенной плотности процесс ионизации не происходит, свечение отсутствует.

На начальной стадии установления обтекания (рис. 3 б) хорошо видна область пересечения головной ударной волны перед телом и пограничного слоя. В этой области свечение разряда имеет характерное закругление, после которого свечение на некотором протяжении отсутствует. Яркое свечение в правой части изображения свечения реализуется в зоне отрыва на краю разрядного промежутка. Пограничный слой на стенках разрядной камеры на этой стадии является ламинарным (рис. 3 б), на более позд-

них стадиях течения он становится турбулентным [14]. Состояние пограничного слоя влияет на характер свечения поверхностного скользящего разряда, что видно на полученных изображениях в набегающем однородном потоке (рис. 3 г, слева). Состояние пограничного слоя также влияет на формирование области низкой плотности при взаимодействии с наклонной ударной волной, в которой реализуется повышенное свечение разряда в правой части изображения (рис. 3 б-г.).

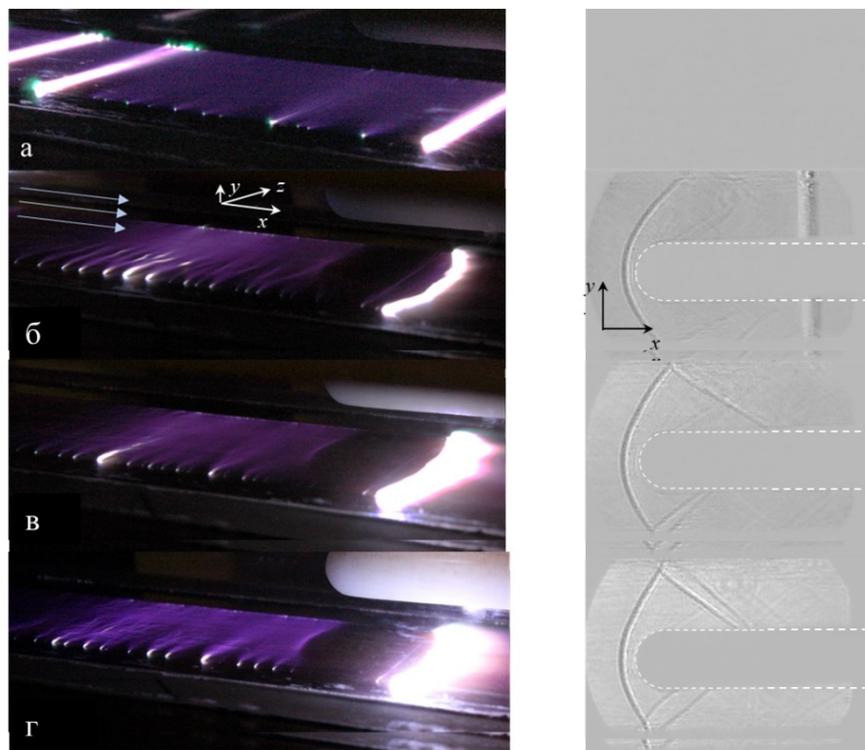


Рис. 3. Свечение поверхностного скользящего разряда (слева) и соответствующие теневые изображения поля течения (справа) в неподвижном воздухе (а), в сверхзвуковых потоках с числами Маха 1.54 (б-г). Плотность воздуха 0.09 кг/м^3 . Разряд инициирован через 31 мкс после начала дифракции ударной волны на теле (б), 42 мкс (в), 54 мкс (г).

На стационарной стадии обтекания область, где свечение разряда отсутствует, становится шире, что соответствует картине стационарного обтекания, наблюдаемой на теневых изображениях (рис. 3 в, г). Яркая область свечения разряда находится в зоне низкой плотности, образовавшейся при взаимодействии наклонной ударной волны с турбулентным пограничным слоем [7, 15]. Начало нестационарной газодинамической стадии течения характеризуется изменением положения и формы головной ударной волны перед обтекаемым телом. Распределение свечения в области потока перед телом изменяется, свечение разряда в зоне отрыва модифицируется.

Сопоставление кадров теневой визуализации с изображениями свечения демонстрирует явную связь между положением газодинамических неоднородностей и распределением свечения плазмы поверхностного скользящего разряда. При резко неоднородном распределении плотности в потоках в областях низкой плотности скорость ионизации повышена, и ток разряда концентрируется в локализованных каналах [7, 15]. Соответственно, области низкой плотности в пограничном слое хорошо визуализируются свечением поверхностным скользящим разрядом. Таким образом, пространственное распределение свечения поверхностного скользящего разряда служит своего рода "отображением" структуры приповерхностного течения – плазма наиболее интенсивно излучает там, где имеются области разрежения или резкие градиенты плотности, связанные с газодинамическими структурами в сверхзвуковом потоке.

Свечение комбинированного объемного разряда в сверхзвуковом потоке около обтекаемого тела

В неподвижном воздухе свечение объемной фазы разряда характеризуется высокой однородностью [11, 13]. Серия фотоизображений свечения разряда в сверхзвуковых потоках при обтекании тела (Рис. 4) дала возможность проанализировать его пространственное распределение, связанное с особенностями протекания разрядного тока. В набегающем однородном потоке объемное свечение однородно. В области между головной ударной волной и носовой частью обтекаемого тела свечение отсутствует. Далее по потоку интенсивность объёмного излучения заметно снижается. В приповерхностных зонах распределение свечения скользящих поверхностных разрядов также неоднородно: в потоке до фронта головной ударной волны свечение сохраняется равномерным, затем отсутствует в области повышенной плотности за головной ударной волной и вновь усиливается в зонах взаимодействия косых скачков уплотнения с пограничным слоем (Рис. 4, 5). Таким образом, пространственное распределение свечения визуализирует распределение плотности в потоке: области с низкой плотностью, где, соответственно, увеличена концентрация электронов, излучают интенсивнее, тогда как зоны с повышенной плотностью характеризуются сниженной интенсивностью свечения.

Цифровая обработка изображений свечения разряда показала, что распределение излучения позволяет с высокой точностью определять положение и форму фронта головной ударной волны, а также других элементов ударно-волновой конфигурации.

На рисунке 5 а показано фотоизображение свечения комбинированного объемного разряда на стационарной стадии сверхзвукового обтекания тела. Видно, что пространственное распределение свечения тесно связано с параметрами ударно-волновой конфигурации, показанной на трёхмерной схеме течения около осесимметричной модели (рис. 5 б). Головная ударная волна плавно огибает тело, а вокруг формируется система наклонных скачков уплотнения, включая волны, отраженные от стенок канала и поверхности модели. Все эти структуры устойчивы в стационарной фазе течения, когда инициировался разряд и регистрировалось его свечение (рис. 5 а).

Однородное объемное свечение наблюдается в однородном спутном потоке до головной ударной волны, хорошо визуализируя ее изогнутый фронт. В области между головной ударной волной и косыми скачками уплотнения объемное свечение отсутствует. Далее по потоку, в зоне отрыва, объемное свечение характеризуется меньшей интенсивностью. Свечение поверхностных скользящих разрядов на верхней и нижней стенках визуализирует течение в пограничных слоях, а также в областях взаимодействия косых скачков уплотнения с пограничным слоем. В этих зонах пониженная плотность газа сопровождается повышенной концентрацией электронов, что приводит к более интенсивному свечению поверхностных разрядов. При развитии турбулентности в пограничных слоях локальные изменения плотности вблизи стенок приводят к усилению свечения в областях с низкой плотностью (рис. 5 а). Таким образом, распределение свечения разрядов обладает высокой чувствительностью к мелкомасштабным неоднородностям потока.

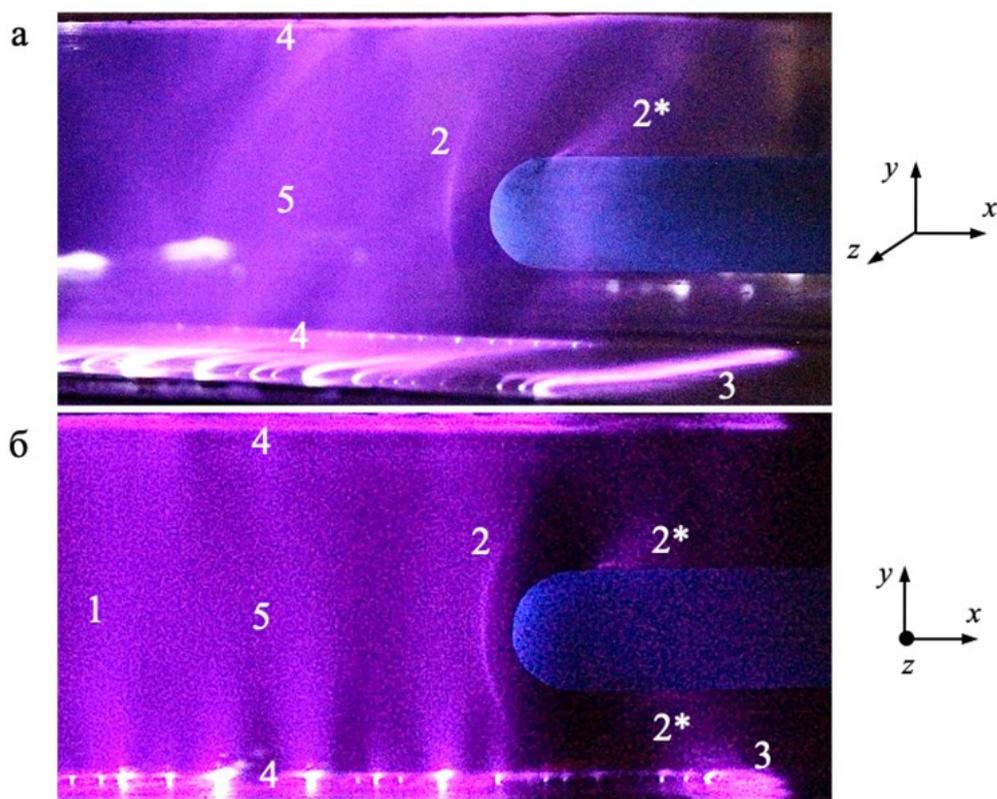


Рис. 4. Фотоизображения свечения разряда при стационарном сверхзвуковом обтекании тела потоком с числом Маха 1,55 (плотность 0,07 кг/м³) при регистрации под разными углами.

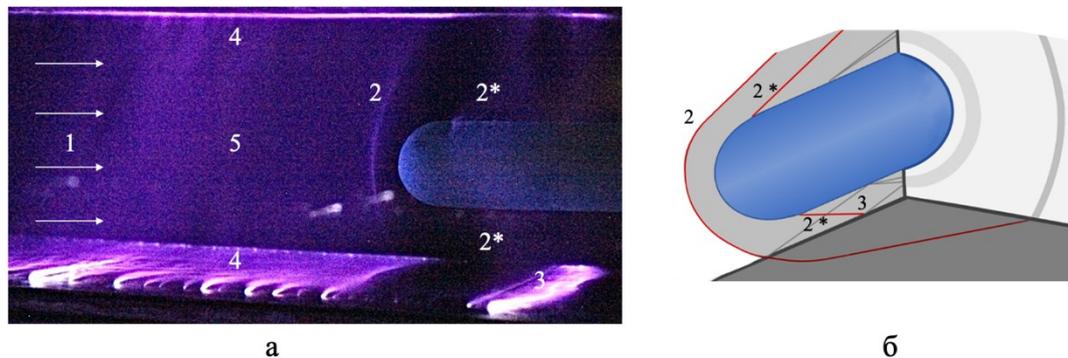


Рис. 5. Фотоизображение свечения разряда при стационарном сверхзвуковом обтекании тела потоком с числом Маха 1,52 (плотность 0,09 кг/м³) (а) и трехмерная схема течения около осесимметричного тела (б): 1 — поток, 2 — головная ударная волна, 2* — наклонные ударные волны, 3 — зона отрыва; 4 — свечение поверхностных скользящих разряды, 5 — объемное свечение.

Обсуждение результатов

Фоторегистрация свечения наносекундных поверхностного скользящего разряда и комбинированного объемного разряда в сверхзвуковых потоках воздуха показала хорошие перспективы для визуализации структуры сверхзвуковых потоков в канале.

Регистрация свечения разрядов электронно-оптической камерой с наносекундным разрешением показала, что длительность свечения объемной фазы комбинированного объемного разряда не превышает 300 нс, а послесвечение поверхностных скользящих разрядов может длиться до 1000 нс. При таких временах экспозиции фотоизображений

элементы потока не успевают сместиться, что позволяет визуализировать структуру ударно-волновой конфигурации перед обтекаемым телом практически мгновенно.

Сопоставление фотоизображений и теневых изображений дало информацию для определения трехмерной структуры течения. Визуализация свечением объемного разряда позволяет получать информацию о структуре потока в объеме, в отличие от двумерных теневых изображений. Так как излучает весь плазменный объем, регистрацию можно вести под различными углами и с разных ракурсов. Это позволяет восстанавливать трёхмерную картину сверхзвукового течения и выявлять детали, которые остаются скрытыми при традиционных оптических методах. Такой подход особенно ценен для анализа сложных газодинамических структур, например, областей взаимодействия ударных волн, зон отрыва и турбулентных образований в потоке.

Заключение

Экспериментально исследовано неоднородное сверхзвуковое течение в канале при обтекании затупленного тела путем регистрации излучения поверхностного скользящего разряда и комбинированного объемного разряда наносекундной длительности и прямым теневым методом. Показано, что характер протекания тока и пространственное распределение свечения наносекундного поверхностного скользящего разряда тесно связаны с газодинамической структурой приповерхностного неоднородного потока. Ток разряда может локализоваться в областях пониженной плотности, преимущественно в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем. Корреляция между свечением разряда и положением ударных волн, наклонных скачков уплотнения, границ отрывных областей демонстрирует возможность использования импульсного поверхностного скользящего разряда в качестве диагностического инструмента для визуализации приповерхностных течений газа. Пространственное распределение свечения поверхностного скользящего разряда позволяет визуализировать турбулентные структуры в пограничном слое сверхзвукового потока.

Применение наносекундного комбинированного объемного разряда в качестве оптического диагностического инструмента показало свою высокую эффективность при исследовании пространственной структуры сверхзвукового потока. Комплексный метод, сочетающий регистрацию свечения разряда и высокоскоростную теневую съемку, позволил получить подробную информацию о структуре потока, включающей ударные волны, косые скачки уплотнения и области их взаимодействия с пограничными слоями. Результаты работы подтверждают перспективность дальнейшего использования данных методов в задачах плазменной аэродинамики и могут способствовать совершенствованию подходов к диагностике и контролю сверхзвукового обтекания тел.

Полученные экспериментальные результаты также дают возможность уточнить механизмы, связывающие характеристики наносекундных разрядов с локальной структурой высокоскоростных потоков и ударно-волновыми конфигурациями, а также определить направления для оптимизации плазменных актуаторов нового поколения.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. Знаменская И.А. Методы панорамной визуализации и цифрового анализа теплофизических полей. Обзор // Научная визуализация. 2021. Т. 13. № 3. С. 125-158.
2. Settles G.S., Hargather M.J. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques // Measurement Science and Technology. 2017. V. 28. № 4. 042001.
3. Алферов В.И., Дмитриев Л.М. Электрический разряд в потоке газа при наличии градиентов плотности. ТВТ, 1985, т.23, No 4 с.677 682.

4. Leger L., Sellam M., Barbosa E. and Depussay E. Visualization by discharge illumination technique and modification by plasma actuator of rarefied Mach 2 airflow around a cylinder // *Meas. Sci. Technol.* 2013. V. 24. N 6. 065401
5. Jiang W., Qiu H., Yang Y., Shi Y., Wang J., Li J., Long Z., and Mao C. High frequency AC electric glow discharge visualization technology and application in big diameter hypersonic low-density wind tunnel // *Adv. Aerodyn.* 2021. V. 3, N 1. 14.
6. Mursenkova I., Ivanova A., Ivanov I., Sysoev N., Karimov A. High-speed flow visualization by a nanosecond volume discharge during shock wave diffraction on an obstacle. *Scientific Visualization*, 2023. V. 15, № 3. С. 40-49.
7. Мурсенкова И.В., Сазонов А.С., Ляо Ю., Иванов И.Э. Визуализация области взаимодействия косого скачка уплотнения с пограничным слоем свечением наносекундного поверхностного скользящего разряда // *Научная визуализация.* 2019. Т. 11. № 3. С. 76-87.
8. Bayoda K. D., Benard N., Moreau E. Nanosecond pulsed sliding dielectric barrier discharge plasma actuator for airflow control: electrical, optical, and mechanical characteristics // *Journal of Applied Physics.* 2015. Vol. 118. 063301. DOI: 10.1063/1.4927844.
9. Стариковский А.Ю., Александров Н.Л. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонеравновесной импульсной плазме // *Физика плазмы.* 2021. Т. 47. № 2. С. 126-192.
10. Поливанов П.А., Вишняков О.И., Сидоренко А. А., Маслов А.А. Сравнение течений, индуцированных диэлектрическим барьерным и скользящим разрядами // *Прикладная механика и техническая физика.* 2013. Т. 54, № 3. С. 21–29.
11. Архипов Н.О., Знаменская И.А., Мурсенкова И.В. и др. Эволюция наносекундного комбинированного объемного разряда с плазменными электродами в потоке воздуха // *Вест. Моск. ун-та. Сер. 3: Физ. астрон.* 2014. Т. 1. С. 88-95.
12. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда.* М., 1987. 592 с.
13. А. А. Иванова, И. В. Мурсенкова. Экспериментальное исследование движения ударной волны в плазме импульсного объемного разряда в воздухе // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон.* 2023., № 2.
14. Знаменская И. А., Латфуллин Д. Ф., Мурсенкова И. В. Ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое при иницировании импульсного поверхностного разряда // *Письма в Журнал технической физики.* 2008. Т. 34, № 15. С. 75–80.
15. Мурсенкова И.В., Иванов И.Э., Сазонов А.С., Сысоев Н.Н. Исследование наносекундного поверхностного скользящего разряда в нестационарном сверхзвуковом потоке воздуха в канале // *Известия РАН, Сер. МЖГ,* 2025. № 1. С. 202-213. DOI: 10.31857/S1024708425010115

Investigation and Application of Nanosecond Discharges for Supersonic Flow Structure Visualization

I.V. Mursenkova¹, A.A. Ivanova², A.S. Sazonov³

Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0002-7181-4533, murs_i@physics.msu.ru

² ORCID: 0009-0005-5588-5824, militcina.aa18@physics.msu.ru

³ ORCID: 0000-0002-7930-9283, as.sazonov@physics.msu.ru

Abstract

An experimental study was carried out on the spatial distribution of glow in a nanosecond surface sliding discharge and a combined volume discharge in supersonic air flows around a streamlined axisymmetric body in a channel. The flow in the discharge chamber included shock waves generated by the flow around the body and those reflected from the channel walls. Flow visualization was performed by the direct shadowgraphy and by recording the discharge glow with photo cameras and ICCD camera. Supersonic air flows with Mach numbers of 1.36–1.60 were generated behind plane shock waves with Mach numbers of 3.0–4.4 in a rectangular shock tube channel. Discharges were initiated under a voltage pulse of 25 kV either along the surface or within the volume, extending up to 100 mm along the flow direction. Spatial emission characteristics of the discharge initiated at various stages of gas-dynamic flow were analyzed. Digital image processing and analysis of the glow captured during discharge development were carried out and compared with shadowgraphy images of the flow field. A correlation was demonstrated between the emission distribution of the sliding surface discharge in supersonic flows and the state of the boundary layer on the channel wall where the discharge develops. Comparison of volume discharge images with shadowgraphy frames enabled the reconstruction of the three-dimensional structure of the supersonic flow, featuring a bow shock in front of the body and the oblique shock waves downstream.

Keywords: supersonic flow, shock wave, surface sliding discharge, nanosecond combined volume discharge, gas-discharge visualization, high-speed shadowgraphy.

References

1. I.A. Znamenskaya. Methods for Panoramic Visualization and Digital Analysis of Thermophysical Flow Fields. A Review // *Scientific Visualization*, 2021. Vol. 13. N 3. P. 125 – 158. DOI: 10.26583/sv.13.3.13
2. G.S. Settles, M.J. Hargather. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques // *Measurement Science and Technology*. 2017. V. 28. № 4. 042001.
3. V.P. Alfyorov, L.M. Dmitriev. Electric-discharge in a gas-flow in the presence of density gradients // *High Temperature*. 1986. Vol. 23. N. 4. P. 539-543.
4. L. Leger, M. Sellam, E. Barbosa and E. Depussay. Visualization by discharge illumination technique and modification by plasma actuator of rarefied Mach 2 airflow around a cylinder // *Meas. Sci. Technol.* 2013. V. 24. N 6. 065401. DOI 10.1088/0957-0233/24/6/065401
5. W. Jiang, H. Qiu, Y. Yang, Y. Shi, J. Wang, J. Li, Z. Long, and C. Mao. High frequency AC electric glow discharge visualization technology and application in big diameter hypersonic low-density wind tunnel // *Adv. Aerodyn.* 2021. V. 3, N 1. 14. DOI: 10.1186/s42774-021-00067-w

6. I.V. Mursenkova, A.A. Ivanova, I.E. Ivanov, N.N. Sysoev, A.S. Karimov. High-speed flow visualization by a nanosecond volume discharge during shock wave diffraction on an obstacle // *Scientific Visualization*, 2023. V. 15, № 3. C. 40-49. DOI: 10.26583/sv.15.3.05
7. I.V. Mursenkova, A.S. Sazonov, Yu. Liao, I.E. Ivanov. Visualization of the interaction region of an oblique shock wave with a boundary layer by the radiation of a nanosecond surface sliding discharge // *Scientific Visualization*, 2019. Vol. 13. N 3. P. 76 – 87. DOI: 10.26583/sv.11.3.07
8. Bayoda K. D., Benard N., Moreau E. Nanosecond pulsed sliding dielectric barrier discharge plasma actuator for airflow control: electrical, optical, and mechanical characteristics // *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 118. 063301. DOI: 10.1063/1.4927844.
9. A.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov. Gasdynamic Flow Control by Ultrafast Local Heating in a Strongly Nonequilibrium Pulsed Plasma // *Plasma Physics Reports*. 2021. V. 47. P. 148. <https://doi.org/10.1134/S1063780X21020069>
10. P.A. Polivanov, O.I. Vishnyakov, A.A. Sidorenko, A.A. Maslov. Comparison of flows induced by a dielectric barrier discharge and a sliding discharge // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2013. 54:3, 359–366. <https://doi.org/10.1134/S0021894413030036>
11. N.O. Arkhipov, I.A. Znamenskaya, I.V. Mursenkova, I.Yu. Ostapenko, N.N. Sysoev. Development of nanosecond combined volume discharge with plasma electrodes in an air flow // *Moscow Univ. Phys. Bull.* 2014. V. 69, N 1. P. 96. <https://doi.org/10.3103/S0027134914010020>
12. Yu.P. Raizer. *Gas Discharge Physics*. Berlin: Springer, 1991
13. A.A. Ivanova and I.V. Mursenkova. Experimental Study of the Motion of a Shock Wave in the Plasma of a Pulsed Volume Discharge in Air // *Moscow Univ. Phys. Bull.*, 2023. V. 78, 204–213. DOI: 10.3103/S0027134923020066
14. I.A. Znamenskaya, D.F. Latfullin, and I.V. Mursenkova. Laminar-turbulent transition in a supersonic boundary layer during initiation of a pulsed surface discharge // *Techn. Phys. Letters*, 2008, vol. 34, no. 8, pp. 668–670. DOI: 10.1134/S1063785008080130
15. Ivanov I.E., Mursenkova I.V., Sazonov A.S., Sysoev N.N. Investigation of a nanosecond sliding surface discharge in time-dependent supersonic air flow in a channel // *Fluid Dynamics*. 2025. Vol. 60, (8). DOI: 10.1134/S0015462824603565