УДК 537.52:533.9.07

# ДИНАМИКА ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В СОЛЕНОИДАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**Бобашев С.В.[1, 2], Монахов Н.А.[1, 2], , Попов П.А.[1], Сахаров В.А.[1]**

[1]*ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, Санкт-Петербург, Россия*

Работа поддержана Программой Президиума РАН №25 и грантом РФФИ №
Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 13-08-01327).

**АННОТАЦИЯ**

Данная работа является продолжением исследований, проводимых в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и посвященных проблеме МГД-управления сверхзвуковыми потоками. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований динамики импульсного газового разряда, создаваемого в вакуумной камере. Рассмотрен разряд в покоящемся газе при различных давлениях и напряжениях источника разряда, а также поперечный разряд в сверхзвуковом потоке с числом Маха M=5. Основным предметом изучения было распределение и эволюция термоэмиссионных центров на поверхности кольцевого электрода. Показано, что основным фактором, влияющим на динамику газового разряда, является так называемое обратное движение катодных пятен. Также обнаружено существенное влияние сверхзвукового потока на форму и поведение импульсного газового разряда.

## ВВЕДЕНИЕ

В работах, проводимых в ФТИ по проблеме магнитогидродинамического управления сверхзвуковым течением, в качестве объекта исследования применялась модель с электромагнитным устройством, которая располагалась в выходном сечении сверхзвукового сопла. Модель представляет собой конус, сопряженный с цилиндром диаметром 34 mm, на поверхности которого расположен соленоид. Один конец соленоида соединен с металлическим кольцевым электродом, расположенным на поверхности модели в месте сопряжения конуса и цилиндра. Другой конец соленоида подключен к одному из полюсов внешнего импульсного источника тока. Другой полюс источника соединен с центральным электродом на вершине конуса.

При обтекании модели сверхзвуковым потоком азота в промежутке между центральным и кольцевым электродами зажигается электрический разряд, поддерживаемый внешним источником тока. При этом пондеромоторная сила вращает газовый разряд вокруг оси модели, осуществляя изменение газодинамической структуры течения вблизи модели. В исследования [1] была обнаружена существенная зависимость динамики такого разряда от полярности подключения электромагнитного устройства к источнику тока, в частности, при изменении полярности подключения частота вращения разряда изменялась в 2 раза. Для выяснения причин такой зависимости была создана экспериментальная установка и проведены дополнительные исследования [2], в которых было показано, что движение разряда определяется динамикой катодного пятна на поверхности электрода и действием пондеромоторной силы. Интерференция этих двух физических процессов может привести к различным эффектам, например к перераспределению тепловой нагрузки на поверхности модели, что отмечено авторами [2].

Настоящая работа посвящена изучению динамики газового разряда в соленоидальном магнитном поле в условиях, когда существенное влияние оказывают физические процессы на поверхности электрода. Под этим прежде всего понимается так называемое аномальное движение катодного пятна, суть которого заключается в способности катодного пятна в тангенциальном магнитном поле переме-

© Бобашев С.В., Монахов Н.А., Попов П.А., Сахаров В.А.

щаться в направлении, противоположном направлению действия пондеромоторной силы. Общепринятого объяснения этого эффекта на данный момент нет, однако многочисленные экспериментальные исследования [3–5] в этой области позволяют сформулировать некоторые общие свойства поведения катодного пятна. При умеренном давлении газовой среды, в которой происходит разряд, скорость обратного движения катодного пятна в тангенциальном по отношению к поверхности электрода магнитном поле возрастает по мере увеличения последнего. При значении индукции магнитного поля ~ 0.01 T скорость движения катодного пятна может достигать величины ~ $10^6$ m/s. С увеличением давления газа скорость обратного движения уменьшается, и при некотором критическом значении пятно начинает двигаться в противоположном направлении.

Величина этого критического давления возрастает при увеличении магнитного поля и уменьшении тока и в зависимости от этих параметров изменяется в широких пределах.

В настоящей работе используется импульсный разряд между коаксиально расположенными электродами, ось которых совпадает с осью магнитной катушки. Исследуются динамика импульсного газового разряда в соленоидальном магнитном поле, а также поведение термоэмиссионных центров (катодных пятен) на поверхности кольцевого электрода

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки, состоящей из вакуумной камеры *1*, электронного регистратора изображений *2* в оптическом диапазоне и импульсного источника напряжения *3*. Вакуумная камера имеет форму цилиндра диаметром 0.3 m и высотой 0.4 m. Установка оборудована вакуумным насосом *4* для откачки воздуха и системой контроля давления. Опыты проводились при постоянном давлении воздуха в камере равном 2 kPa.

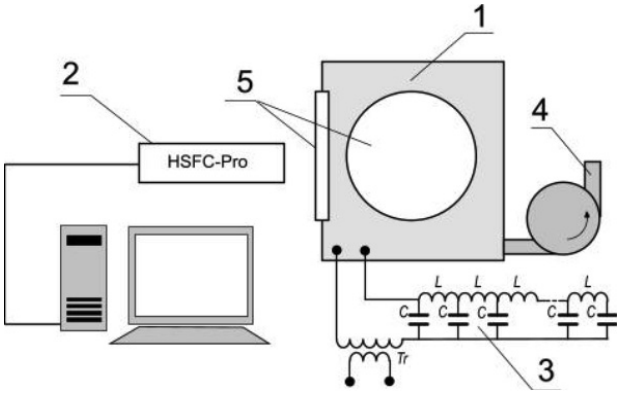


Рис.1 Схема экспериментальной установки.

Давление измерялось ртутным манометром с точностью не хуже 1 Pa. На боковой поверхности камеры расположены наблюдательные окна *5*, через которые производится оптическая регистрация исследуемого процесса. В качестве регистратора используется 3-х канальная цифровая камера HSFC-Pro, позволяющая получить в одном опыте до 6 изображений размером 1280×1024 пикселей с длительностью экспозиции $10^{-6}$ s. Электронные изображения с камеры передаются на компьютер для последующей их обработки и анализа.

Импульсный источник представляет собой *LC*-линию с сосредоточенными параметрами, заряжаемую перед экспериментом до нужного напряжения. Последовательно в цепь разряда включен высоковольтный трансформатор *Tr* малой индуктивности, на первичную обмотку которого подается короткий импульс длительностью ~ $10^{-6}$ s. На вторичной обмотке формируется импульс амплитудой до 30 kV для инициирования работы электромагнитного устройства. Через герметичные разъемы источник тока соединяется с электромагнитным устройством исследуемой модели. В данных исследованиях были использованы модели двух типов.

Для исследования динамики газового разряда в покоящемся газе использовалась модель, схема которой показана на рис. 2. Она изготовлена из диэлектрического материала в форме цилиндрического стакана 1 диаметром 100 mm. Электромагнитное устройство состоит из магнитной катушки 2, содержащей 16 витков медного провода диаметром 1 мм, и двух электродов. В центре торца стакана расположен центральный электрод 3, второй электрод 4 в форме незамкнутого кольца расположен на цилиндрической поверхности рядом с магнитной катушкой, один из концов которой соединен с кольцевым электродом. Другой конец катушки и центральный элек-

трод подключаются к полюсам внешнего источника напряжения.

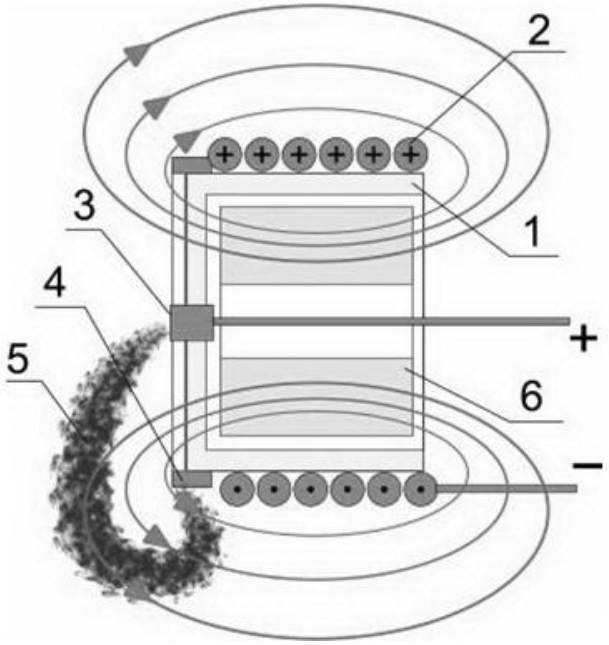


Рис.2 Схема цилиндрической модели.

Инициирующий высоковольтный импульс вызывает электрический пробой 5 между центральным и кольцевым электродом с внешней стороны торца цилиндра и замыкает цепь разряда внешнего источника, состоящую из последовательно соединенной магнитной катушки и воздушного промежутка между электродами. Разряд источника тока происходит в течение ~ $10^{-3}$ s, сила тока достигает величины ~ $10^3$ A. В магнитном поле катушки газовый разряд под действием пондеромоторной силы приобретает вращательное движение вокруг оси модели.

Для исследования динамики газового разряда в сверхзвуковом потоке описанное выше электромагнитное устройство было установлено в сопле. Вдоль оси сверхзвукового конического сопла располагался металлический стержень, выполняющий роль центрального электрода (см. рис. 3).

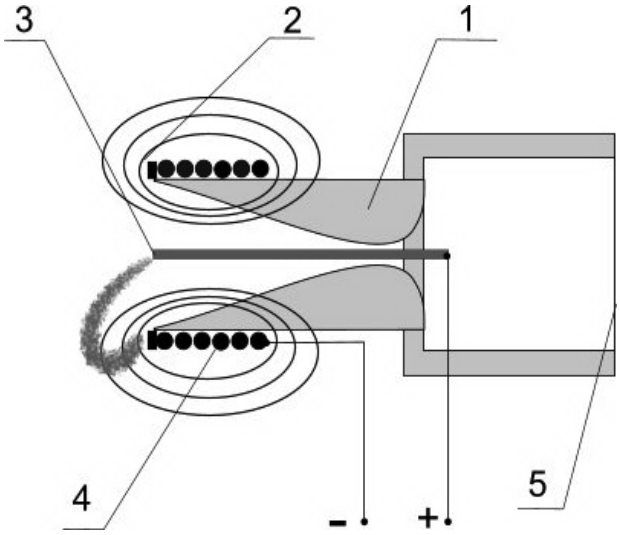


Рис.3 Электромагнитное устройство на основе конического сверхзвукового сопла.

На внешней части сопла вблизи выходного сечения располагалась магнитная катушка. Кольцевой электрод был расположен на обечайке сопла, так что разряд осуществлялся в выходном сечении. Сопло располагалось внутри вакуумной камеры, его вход отделялся от атмосферы пластиковой диафрагмой, с разрывом которой запускалось сопло и электромагнитное устройство.

## РАЗРЯД ОКОЛО ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА

Основным предметом исследования в данной работе были свечение и структура газового разряда, а также поведение термоэмиссионных центров на поверхности кольцевого электрода. Эти данные были получены путем анализа оптических изображений, полученных с помощью высокоскоростной фотосъемки. Результаты, приведенные в данном разделе, получены при давлении в вакуумной камере, равном 2 kPa, и двух различных режимах работы электромагнитного устройства, которые характеризуются средними значениями силы тока разряда I=1 kA и I=1.7 kA. Поскольку катушка, создающая магнитное поле, включена последовательно в цепь разряда, то величина создаваемого ей магнитного поля определяется током разряда и равна 0.2 T и 0.3 T для каждого из указанных выше режимов, соответственно.

Согласно проведенным ранее исследованиям, воздействие магнитного поля на газовый разряд более эффективно в случае, когда коль-

цевой электрод подключен к отрицательному полюсу источника напряжения. По этой причине все приведенные ниже результаты получены при таком подключении источника к электромагнитному устройству.

На рис. 4 показаны изображения свечения разряда, сделанные со стороны торца модели в различные моменты времени (a – 0.3 ms, b – 0.4 ms, c – 0.5 ms, d – 0.6 ms) и соответствующие различным режимам работы электромагнитного устройства (верхний ряд – средний ток разряда равен 1 kA, нижний ряд – средний ток разряда равен 1.7 kA).

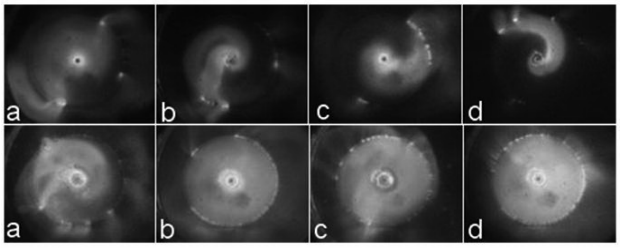


Рис.4 Свечение газового разряда в различные моменты времени от начала процесса: a — 0.3, b — 0.4, c — 0.5, d — 0.6 ms.

В центре каждого кадра темным цветом на ярко светлом фоне отображается центральный электрод диаметром 6 mm, который является анодом (к нему подключен положительный полюс источника тока). Практически круглой формы светлое пятно, окружающее центральный электрод, соответствует интенсивному свечению разряда в области анода, где происходит концентрация тока разряда. По нашим оценкам, сделанным на основании анализа полученных изображений, плотность тока в этой области составляет величину ~ $10^7$–$10^8$ A/m$^2$.

Положению кольцевого электрода на снимках соответствует изображение ярких одиночных точек на верхних снимках и группы точек на нижних, расположенных вокруг центра. Это катодные пятна (группы пятен), которые являются центрами термоэмиссии электронов поверхности кольцевого электрода.

На снимках верхнего ряда (режим 1) в промежутке между электродами отчетливо виден единственный токовый канал, спирально закрученный пондеромоторной силой по часовой стрелке. Внутренняя структура канала неоднородна в поперечном сечении — наблюдаются раздельные каналы, замыкающиеся на более яркие катодные пятна.

С течением времени число катодных пятен меняется незначительно, в некоторый момент времени (рис. 4, c) отдельные пятна образуют компактную группу, а затем по мере уменьшения тока разряда вновь приобретают форму одиночных центров. Наблюдаются также светлыепятна, не связанные с анодом токовым каналом. Предположительно это затухающие ”старые“ катодные пятна, ток через которые мал или прекратился, но поверхность электрода еще не достаточно остыла и продолжает светиться.

Как было сказано выше, пондеромоторная сила направлена по направлению движения часовой стрелки. Однако спиральный токовый канал перемещается в противоположную сторону, что легко обнаружить при последовательном просмотре снимков. Определенно утверждать невозможно, является ли это движением одних и тех же пятен или проявляются ”новые“ взамен ”старых“.

С увеличением тока разряда и магнитной индукции (режим 2) картина существенно меняется. Число катодных пятен на поверхности кольцевого электрода значительно увеличивается. Они располагаются группами, и их распределение по окружности становится более равномерным. Пространство между электродами за исключением областей, непосредственно примыкающих к электродам, также приобретает равномерную засветку, что, по-видимому, связано с более равномерным распределением тока, чем в предыдущем случае (режим 1). При этом интенсивность свечения токового канала в обоих режимах практически одинакова.

Фотографирование модели сбоку во время работы электромагнитного устойства позволило определить, что токовый канал не локализован около поверхности торца модели, а распространяется как за границы цилиндра, так и в направлении нормали к торцу на расстояние, примерно равное радиусу цилиндра. На показанных здесь фотографиях, сделанных со стороны торца, это отражается появлением с внешней стороны кольцевого электрода светлых ”хвостов“, примыкающих к катодному пятну. ”Хвосты“ отклоняются по ходу часовой стрелки пондеромоторной силой, направление действия которой одинаково по обе стороны от кольцевого электрода.

Варьированием начального напряжения источника тока достигается одновременное изменение как величины тока разряда, так и

магнитной индукции. Поэтому для определения влияния магнитного поля на динамику разряда сравнивались изображения, полученные на модели с магнитным сердечником и без него при одном и том же значении среднего тока разряда. Анализ показал, что магнитный сердечник, увеличивающий магнитную индукцию в среднем в 1.4 раза, не вносит заметных изменений в динамику газового разряда и расположение катодных пятен на кольцевом электроде. Возможно, что это связано со значительным удалением токового канала от торца модели, где магнитное поле сравнительно мало.

## РАЗРЯД НА ВЫХОДЕ СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА

Все исследования разряда в сверхзвуковом потоке проводились при той же полярности подключения кольцевого электрода к источнику питания, как и в случае с разрядом на торце цилиндра. Для сравнения с результатами оптической регистрации разряда на торце цилиндра были также проведены исследования динамики газового разряда на выходе сверхзвукового сопла в покоящемся газе с давлением 100 Pa. Результаты данных исследований приведены на рис. 5.

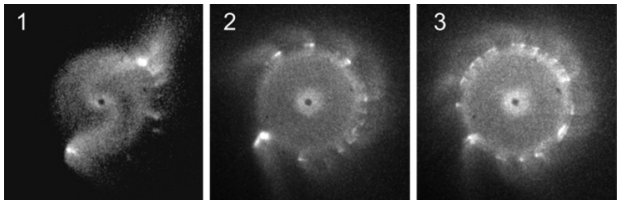


Рис.5 Разряд в покоящемся газе при различных значениях тока разряда (1 –$I_{max}$=1 kA, 2 – $I_{max}$=1.7 kA, 3 – $I_{max}$=2 kA).

Анализ данных результатов показывает, что в целом динамика газового разряда в этом случае схожа с динамикой газового разряда на торце цилиндра. При уменьшении давления свечение разряда становится более однородным, а при увеличении тока увеличивается количество катодных пятен на кольцевом электроде.

Наличие сверхзвукового потока существенно изменяет распределение катодных пятен по кольцевому электроду. На рис. 6 приведены изображения газового разряда в сверхзвуковом потоке с M = 5 (1 – вид сбоку, 2 – вид со стороны выхода сопла). На рис. 6-1 белый эллипс соответствует положению кольцевого электрода.

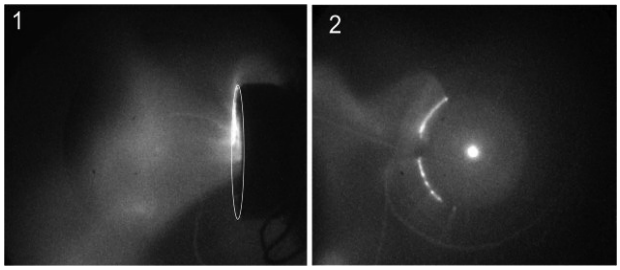


Рис.6 Разряд в сверхзвуковом потоке воздуха M = 5.5 (1 – вид сбоку, 2 – вид со стороны выходного сечения сопла).

Видно, что токовый канал (яркая область изображения) вытянут по направлению сверхзвукового потока и занимает только часть объема сверхзвуковой струи. Две яркие области на рис. 6-2 обозначают положения групп катодных пятен. Видно, что катодные пятна распределены несимметрично относительно оси сопла, при этом свечение токового канала равномерно заполняет межэлектродный промежуток. “Хвосты” разряда, выходящие за пределы окружности, обозначающей кольцевой электрод, в данном случае распространяются заметно дальше от кольцевого электрода, чем в случае покоящегося газа.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- Подтверждается сделанное ранее предположение, что основные физические процессы, управляющие динамикой газового разряда в соленоидальном магнитном поле, локализованы вблизи поверхности электродов.
- Наблюдаемая в экспериментах динамика газового разряда определяется совместным

действием пондеромоторной силы и движением катодных пятен.

- Одновременное увеличения силы тока разряда и индукции магнитного поля ведет к увеличению однородности распределения катодных пятен по кольцевому электроду, а также к увеличению однородности свечения межэлектродного простанства
- При наличии сверхзвукового потока распределение катодных пятен по кольцевому электроду становится асимметричным, а разрядный канал вытягивается вдоль потока.

**ЛИТЕРАТУРА**


1. Сахаров В.А. Магнитогидродинамическое управление сверхзвуковым обтеканием тела / В.А. Сахаров, Н.П. Менде, С.В. Бобашев, D.M. Van Wie // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т.32, №14. – С.40–45. Sakharov, V.A. and Mende, N.P. and Bobashev, S.V. and Van Wie, D.M. (2006). "Magnetohydrodynamic control of a supersonic flow about a body", *Pisma v ZhTF*, Vol.32, no.14, pp.40-45.
2. Бобашев С.В. Экспериментальное исследование магнитогидродинамического воздействия на тепловой поток к поверхности модели / С.В. Бобашев, Н.П. Менде, П.А. Попов, В.А. Сахаров // ЖТФ. – 2010. – Т.80. №12. – С.51–56. Bobashev, S.V. and Mende, N.P. and Popov, P.A. and Sakharov, V.A. (2010). "Experimental investigation of magnetohydrodynamic action on a heat flux toward the surface of a model", *Pisma v ZhTF*, Vol.80, no.12, pp.51-56.
3. Любимов Г.А. Катодное пятно вакуумной дуги / Г.А. Любимов, В.И. Раховский // УФН. – 1978. – Т.125. №8. – С.665–706. Lyubimov, G.A. and Rakhovskii, V.I. (1978) "The cathode spot of a vacuum arc", UFN, Vol.125, no.8, pp.665-706.
4. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. / В.Л.Грановский – М.: Наука, 1971. – 544 с. Granovskii, V.L. (1971) *Electricheskii tok v gaze. Ustanovivshiisia tok* [Electric current in gas. Stationary current], Science, Moscow, USSR.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. / Ю.П.Райзер – М.: Наука, 1992. – 536 с. Raizer, Yu.P. (1992) *Fizika gazovogo razriada* [Physics of gas discharge], Science, Moscow, USSR.