

03;04

Экспериментальное исследование динамики газового разряда в соленоидальном магнитном поле

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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
email: v.sakharov@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 2 апреля 2012 г.)

Газовый электрический разряд осуществлен на торце непроводящего цилиндра между центральным электродом на его оси и кольцевым электродом на боковой поверхности. Ось цилиндра совпадает с осью магнитной катушки, намотанной на его боковой поверхности. Динамика газового разряда в соленоидальном магнитном поле изучена путем наблюдения за его положением и формой, а также за распределением термоэмиссионных центров на поверхности кольцевого электрода при изменении тока разряда и магнитной индукции. Развитие разряда происходит в воздухе при давлении 2 кПа.

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 60°-ный конус, сопряженный с цилиндром диаметром 34 мм, 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. Таким образом, цепь разряда источника тока включает соленоид и промежуток между электродами, где создается газовый разряд. Разряд происходит над конической поверхностью модели в соленоидальном магнитном поле. При этом пондеромоторная сила вращает газовый разряд вокруг оси модели, осуществляя изменение газодинамической структуры течения вблизи модели. В исследовании [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 перемещаться 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 Т скорость движения катодного пятна может достигать величины $\sim 10^6$ м/с. 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.

Названные особенности поведения катодного пятна наблюдались при постоянном магнитном поле и токе разряда, который создавался, как правило, между атодом со сферическим закруглением и катодом в виде плоской пластины. В настоящей работе используется импульсный разряд между коаксиально расположенными электродами, ось которых совпадает с осью магнитной катушки. В настоящей работе 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 м и высотой 0.4 м. Установка оборудована вакуумным насосом 4 для откачки воздуха и системой контроля давления. Опыты проводились при постоянном давлении воздуха в камере, равном 2 кПа. Давление измерялось ртутным манометром с точностью не хуже 1 Па.

На боковой поверхности камеры расположены наблюдательные окна 5, через которые производится оптическая регистрация исследуемого процесса. В качестве регистратора используется 3-канальная цифровая камера HSFC-Pro, позволяющая получить в одном опыте до 6 изображений размером 1280×1024 пикселей с длительностью экспозиции 10^{-6} с. 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 $\sim 10^{-6}$ с. На вторичной обмотке формируется импульс амплитудой до 30 кВ для инициирования работы электромагнитного устройства. Через герметичные разъемы источник тока соединяется с электромагнитным устройством исследуемой модели.

Модель, схема которой показана на рис. 2, изготовлена из диэлектрического материала в форме цилиндрического стакана 1 диаметром 100 мм. 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 электрод подключаются к полюсам внешнего источника напряжения.

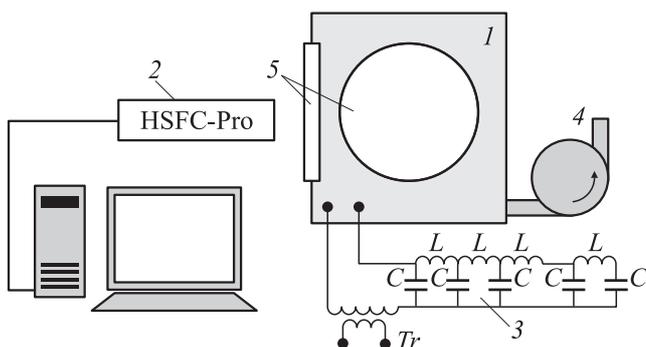


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

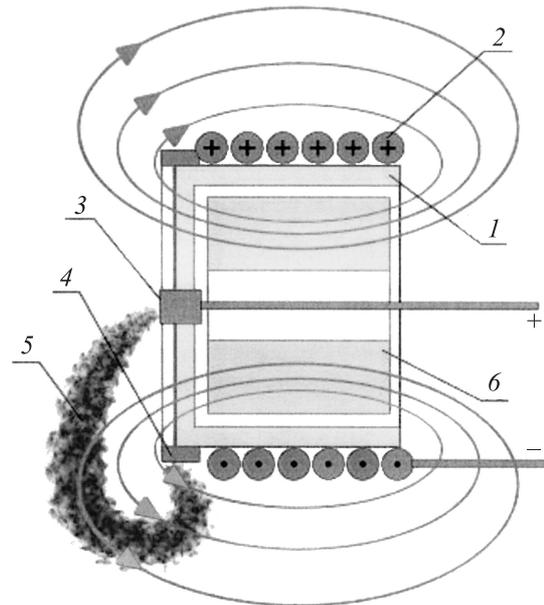


Рис. 2. Схема электромагнитного устройства.

Иницирующий высоковольтный импульс вызывает электрический пробой 5 между центральным и кольцевым электродами 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 $\sim 10^{-3}$ с, сила тока достигает величины $\sim 10^3$ А. В магнитном поле катушки газовый разряд под действием пондеромоторной силы приобретает вращательное движение вокруг оси модели.

Конструкция модели позволяет разместить внутри цилиндра магнитный сердечник 6, представляющий собой закрученную в спираль железную ленту шириной 25 мм, толщиной 0.2 мм и проложенную электроизолирующей лентой. Как показали измерения, величина магнитной индукции при наличии сердечника увеличивается в среднем на 40–50% при прочих равных условиях. Измерения индукции проводились с помощью магнитной катушки диаметром 4 мм.

Использование спирального сердечника с изолирующей прокладкой, а также незамкнутого кольцевого электрода уменьшает величину вихревых токов, возникающих в этих элементах при работе электромагнитного устройства.

Результаты исследования

Предметом изучения были форма и структура свечения газового разряда, а также расположение термоэмиссионных центров на кольцевом электроде. Эти данные получены из анализа электронных изображений, соответствующих излучению в видимой области спектра. Учитывая сложное поведение катодного пятна в магнитном поле, авторы ограничились в данном исследовании

постоянным давлением газа в рабочей камере, равным 2 кПа.

В дальнейшем изложении величину тока разряда I будем характеризовать его средним значением по длительности импульса, а в качестве масштаба магнитной индукции B примем ее значение в центре витка диаметром 100 мм с током, равным произведению среднего тока I и числа витков катушки, равного в данном случае 16. Эксперименты проводились при двух значениях начального напряжения на источнике тока. В соответствии с этим режимы работы электромагнитного устройства будем характеризовать следующими параметрами: режим 1 — средний ток разряда $I = 1$ кА, средняя величина магнитной индукции $B = 0.2$ Т; режим 2 — средний ток $I = 1.7$ кА, магнитная индукция $B = 0.3$ Т. Типичный вид импульса разрядного тока и магнитной индукции показан на рис. 3. Индукция рассчитывалась по сигналу магнитной катушки диаметром 4 мм, расположенной в некоторой точке на торце цилиндра. Ось этой катушки была перпендикулярна поверхности торца.

Так же как и в работе [1], здесь было экспериментально подтверждено, что перспективным с точки зрения воздействия на структуру газового разряда является вариант подключения к кольцевому электроду модели отрицательного полюса внешнего источника тока. Все нижеследующие результаты получены именно при таком подключении внешнего источника, а термин катодное пятно относится к термоэмиссионному центру на кольцевом электроде. Отмеченное влияние полярности кольцевого электрода при таком способе подключения, по нашему мнению, является результатом конкуренции двух процессов — действием пондеромоторной силы на газовый разряд вблизи кольцевого электрода, с одной стороны, и „аномальным“ поведением катодного пятна на поверхности электрода — с другой.

На рис. 4 показаны изображения свечения газового разряда, сделанные со стороны торца модели в различные моменты времени от начала процесса (a — 0.3, b — 0.4, c — 0.5, d — 0.6 ms) и соответствующие

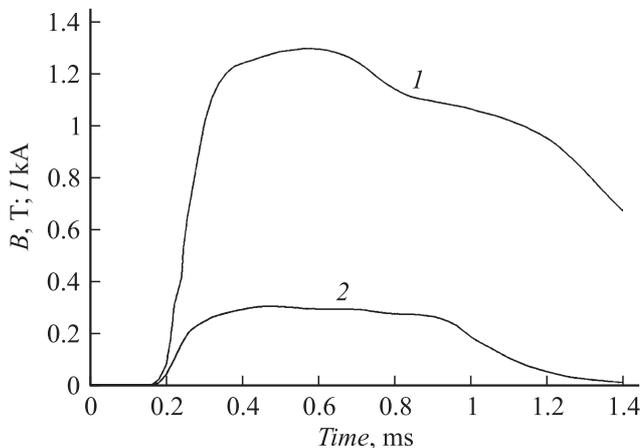


Рис. 3. Типичная форма импульса тока разряда (1) и магнитной индукции (2).

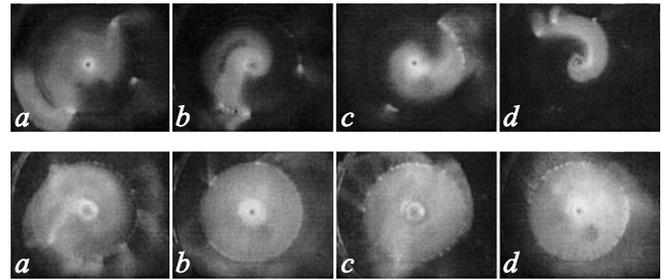


Рис. 4. Свечение газового разряда в различные моменты времени от начала процесса: a — 0.3, b — 0.4, c — 0.5, d — 0.6 ms.

разным режимам работы электромагнитного устройства (режим 1 — верхний ряд, режим 2 — нижний).

В центре каждого кадра темным цветом на ярко светлом фоне отображается центральный электрод диаметром 6 мм, 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 $\sim 10^7 - 10^8$ А/м².

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 с 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 светлые пятна, 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“. Очевидно одно, это проявление свойства катодных пятен

двигаться в сторону, противоположную направлению действия пондеромоторной силы.

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 устройства 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.

О влиянии размеров области распространения токового слоя на наблюдаемые картины можно судить по последовательности снимков модели, показанных на рис. 5. Изображения соответствуют работе электромагнитного устройства в режиме 2, но в этом случае параллельно поверхности торца цилиндра на расстоянии 8 mm от него была поставлена стеклянная пластинка, ограничивающая область распределения газового разряда. Обращает внимание заметно увеличившаяся яркость

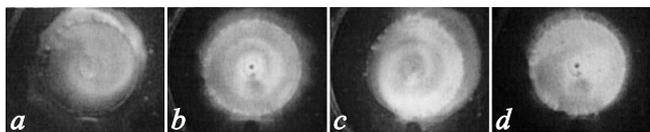


Рис. 5. Свечение газового разряда в различные моменты времени от начала процесса: *a* — 0.3, *b* — 0.4, *c* — 0.5, *d* — 0.6 ms с ограничением области разряда.

свечения в области между электродами по сравнению с предыдущими случаями, что свидетельствует о более высокой температуре газа в области разряда. В структуре разряда также наблюдается возникновение спиралевидных неоднородностей (ср. рис. 4, нижний ряд). Распределение катодных пятен по длине кольцевого электрода стало более равномерным, а длина „хвостов“ заметно уменьшилась.

Заключение

Как и в ранее проведенных исследованиях [1,2] обтекания сверхзвуковым потоком осесимметричной модели с электромагнитным устройством, в настоящем исследовании на модели с втрое большим характерным размером было установлено значительное влияние приэлектродных процессов на поведение газового разряда. Это подтверждает высказанное ранее предположение о том, что основные физические механизмы, определяющие динамику газового разряда в соленоидальном магнитном поле, локализованы в области кольцевого электрода. В случае, когда кольцевой электрод является катодом, структура и поведение разряда определяются интерференцией двух основных процессов: действием пондеромоторной силы и динамикой катодного пятна.

Оба эти процесса зависят как от величины тока, так и индукции магнитного поля. Увеличение индукции за счет использования магнитного сердечника при прочих равных условиях не отразилось заметно на структуре разряда в отличие от названных выше исследований. Одновременное увеличение тока разряда и магнитной индукции существенно влияет на исследуемый процесс — токовый канал имеет спиралевидную форму при малом токе разряда и заполняет практически равномерно все область между электродами при увеличении тока.

В экспериментах также обнаружено заметное влияние твердой поверхности на структуру разряда и размеры области, которую он занимает.

Список литературы

- [1] Сахаров В.А., Менде Н.П., Бобашев С.В., Van Wie D.M. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 14. С. 40–45.
- [2] Бобашев С.В., Менде Н.П., Попов П.А., Сахаров В.А. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 12. С. 51–56.
- [3] Любимов Г.А., Раховский В.И. // УФН. 1978. Т. 125. Вып. 4. С. 665–706.
- [4] Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 544 с.
- [5] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.