

УДК 03;04;12

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В СОЛЕНОИДАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Бобашев С.В., Менде Н.П., Попов П.А., Сахаров В.А.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Работа была поддержана проектами МНТЦ № 3475р и РФФИ (грант № 08-08-00414а), Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракт № 02.740.11.0201).

АННОТАЦИЯ

При исследованиях влияния магнитного поля на сверхзвуковое обтекание модели с электромагнитным устройством была обнаружена существенная зависимость формы газового разряда и частоты его вращения от полярности подключения электромагнитного устройства к внешнему источнику напряжения. С целью выяснить основные механизмы, определяющие динамику разряда в соленоидальном магнитном поле, были проведены эксперименты в

неподвижном газе. Основным средством диагностики в этих опытах была цифровая скоростная съемка газового разряда, вращающегося в магнитном поле. Выявлен ранее не учитываемый фактор, обусловленный обратным (аномальным) движением катодного пятна. Именно этот механизм определяет динамику разряда при изменении полярности подключения электромагнитного устройства к внешнему источнику напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

На ударной трубе изучалось влияние магнитного поля на сверхзвуковое обтекание осесимметричных моделей (форма конус-цилиндр) с электромагнитным устройством [1,2]. На конической поверхности модели располагались электроды, между которыми создавался на поверхности конуса длительный (~1 мс) разряд, вращающийся в соленоидальном магнитном поле вокруг оси модели. Поле создавалось индуктором на цилиндрической части

модели. Работа устройства осуществлялась от внешнего источника напряжения. Модель размещалась в выходном сечении клиновидного сопла, обеспечивающего сверхзвуковой поток длительностью 1.5 мс. При сверхзвуковом обтекании моделей была обнаружена существенная зависимость формы газового разряда и частоты его вращения от полярности подключения электромагнитного устройства.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

С целью детального изучения движения газового разряда в магнитном поле нами была использована скоростная цифровая камера (1) HSFC-Pro (см. рис.1), которая имеет 3 канала регистрации и позволяет получать до 6 электронных изображений размером 1280×1024 пикселей и малым временем экспозиции. Управление камерой и просмотр изображений осуществляется через компьютер (2). Предпочтительным с точки зрения информативности является ракурс съемки со стороны конической поверхности в направлении вдоль оси модели. Однако сделать это в условиях сверхзвукового обтекания модели технически невозможно, поэтому настоящие исследования мы провели в атмосфере покоящегося воздуха. Для этого была использована специальная емкость (3), оборудованная прозрачными окнами (4) для наблюдения и устройством для откачки воздуха (5). Исследуемая модель (6)

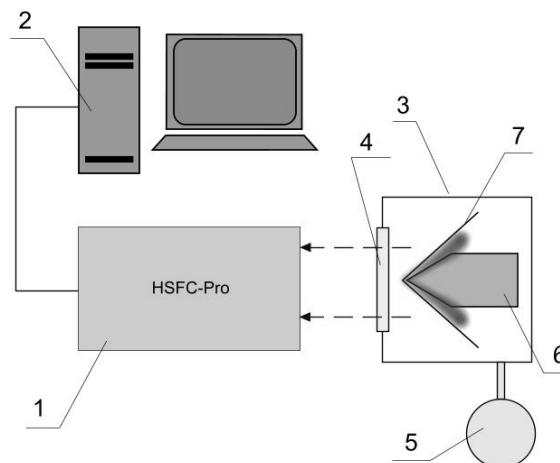


Рис.1 Схема установки

помещалась в камеру, производилась откачка до требуемого давления и осуществлялась регистрация процесса.

Как показали эксперименты, при разряде в атмосфере покоящегося газа отход плазмы от поверхности модели больше, чем при сверхзвуковом обтекании, где плазма сосредоточена между конической поверхностью и ударной волной. Для имитации воздействия потока на разряд коническая часть модели размещалась внутри стеклянной воронки (7) с подходящим углом раствора. Это позволило удержать разряд около поверхности модели и проводить скоростную съемку процесса. Такой прием, естественно, не моделирует условия сверхзвукового обтекания модели, но позволяет выявить основные факторы, определяющие динамику газового разряда в магнитном поле.

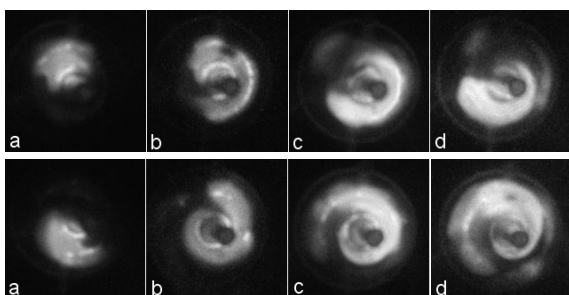


Рис.2 Форма разряда вокруг модели с сердечником в моменты времени: a – 0.1 ms, b – 0.2 ms, c – 0.6 ms, d – 0.8 ms от начала процесса. Верхние картины соответствуют подключению кольцевого электрода к положительному полюсу источника, нижние – к отрицательному.

На рис.2 показаны изображения разряда, полученные с помощью камеры HSFC-Pro в различные моменты времени с экспозицией 1 μ s. На рисунке видно, что при подключении кольцевого электрода к положительному полюсу источника тока (верхние картины) вращение разряда происходит по направлению часовой стрелки, при противоположном подключении – против часовой стрелки. Направление силы Лоренца при переключении полярности кольцевого электрода остается неизменным (в данном случае эта сила направлена по часовой стрелке), поскольку одновременно изменяется направление тока разряда и магнитного поля. На рис.2 также видно, что при подключении кольцевой электрод – катод вращение разряда происходит быстрее, чем при противоположной полярности этого электрода.

Движение разряда в направлении противоположном направлению силы Лоренца (кольцевой электрод в этом случае является катодом) обусловлено так называемым эффектом обратного движения катодного пятна во внешнем магнитном поле. Это явление [3] известно в физике электрического разряда с начала прошлого века, однако, до сих пор не имеет общепринятого объяснения.

Явление заключается в том, что катодное пятно разряда в тангенциальном по отношению к поверхности катода магнитном поле движется в направлении, противоположном направлению силы Лоренца. Этот эффект был изучен на большом числе металлов катода и в атмосфере различных газов. При этом установлены следующие факты.

Скорость обратного движения катодного пятна возрастает по мере увеличения магнитного поля. При достаточно больших полях ($\sim 10^4$ A/m) скорость движения катодного пятна достигает значения $\sim 10^6$ m/s. При увеличении давления газа скорость обратного движения уменьшается и при некотором критическом значении пятно начинает двигаться в противоположном направлении. Величина этого критического давления возрастает при

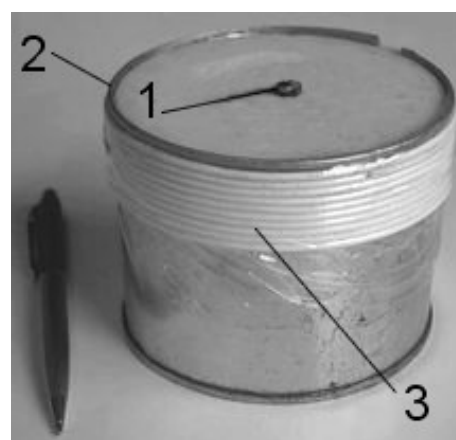


Рис.3 Внешний вид модели диаметром 100 mm

увеличении магнитного поля и уменьшении тока и, в зависимости от этих параметров, изменяется в широких пределах.

Названные выше особенности поведения катодного пятна относятся к случаю постоянного тока разряда. Тем не менее, как показали опыты, в условиях импульсного тока разряда, характерного для настоящих исследований, указанные особенности движения катодного пятна также имеют место.

На показанных изображениях, соответствующих случаю подключения к кольцевому электроду отрицательного полюса источника (рис.2 внизу), видно, что на электроде возникает несколько катодных пятен.

Столь необычное поведение катодного пятна потребовало более детального изучения его динамики и, в частности, выяснения того, как величина тока разряда влияет на его форму. Для этого была изготовлена модель цилиндрической формы диаметром 100 mm, внешний вид которой показан на рис.3.

На оси цилиндра из диэлектрика располагался центральный электрод (1), кольцевой электрод (2) представляет собой металлическую поверхность и

расположен на внешней поверхности модели. Поверх нее намотана катушка из 10 витков медного провода. Один конец катушки подключен к выступающему краю кольцевого электрода, второй – к отрицательному полюсу импульсного источника напряжения. Положительный полюс источника подключен к центральному электроду. Запуск устройства осуществлялся высоковольтным иницирующим импульсом, формирующим пробой между электродами (1) и (2). Модель располагалась торцом к объективу высокоскоростной камеры HSFC-Pro в рабочей емкости, давление в которой составляло 20 мб. Эксперименты проводились при двух значениях величины тока разряда, максимальные значения которого I_{\max} составляли 1.3 кА и 2.3 кА.

На рис.4 показано изображение разряда в различные моменты времени при двух значениях тока разряда 1.3 кА (верхний ряд) и 2.3 кА (средний ряд). Обращает на себя внимание то, что при меньшем токе (верхний ряд) разряд остается локализованным и занимает сравнительно малую часть области взаимодействия в отличие от опыта с током почти вдвое большим (средний ряд). В последнем случае разряд распределен довольно равномерно по области взаимодействия, а количество катодных пятен существенно больше. Катодные пятна в этих опытах двигаются против хода часовой стрелки, а сила Лоренца направлена в противоположную сторону, что приводит к закручиванию плазмы разряда по ходу часовой стрелки по обе стороны от кольцевого электрода. Это хорошо видно на изображениях в верхнем ряду.

Как уже отмечалось выше, в экспериментах со сверхзвуковым обтеканием плазма разряда прижата к поверхности модели, где магнитное поле сравнительно велико. В данных опытах влияние силы Лоренца на разряд ослаблено из-за свободного расширения плазмы в направлении, перпендикулярном

ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование вращения газового разряда в соленоидальном магнитном поле вокруг модели с электромагнитным устройством показало, что приэлектродные процессы являются существенным фактором, влияющим на динамику разряда. При подключении к кольцевому электроду

ЛИТЕРАТУРА

1. Bobashev,SV; Mende,NP; Sakharov,VA; Van Wie,DM. "Control of a supersonic nitrogen flow by a magnetic field". AIAA Meeting Papers on Disc, Vol. 10, No. 1-4, 43-rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 10 - 13 January 2005, Reno, Nevada, pp. 5227-5231.
2. Сахаров В.А., Менде Н.П., Бобашев С.В., Van

Wie D.M. "Магнитогидродинамическое управление сверхзвуковым обтеканием тела". ПЖТФ, 2006, том 32, вып. 14. СС.40-45.

Wie D.M. "Магнитогидродинамическое управление сверхзвуковым обтеканием тела". ПЖТФ, 2006, том 32, вып. 14. СС.40-45.

Как показали опыты, удаление разряда от торца модели составляет примерно 50 mm. Для ограничения разлета плазмы и усиления влияния на разряд силы Лоренца перед моделью была поставлена стеклянная пластина на расстоянии 10 mm от ее торца. Изображение разряда в этом случае показано в нижнем ряду рис.4.

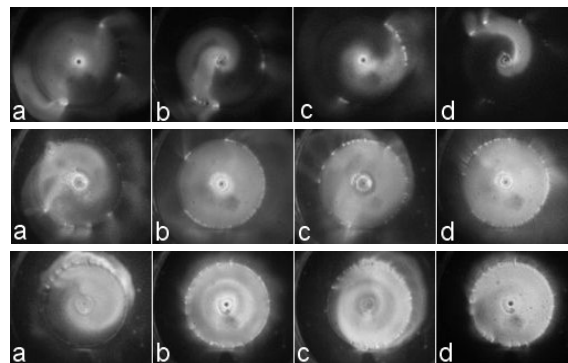


Рис.4. Изображение разряда в различные моменты времени от начала процесса (a – 0.3 ms, b – 0.4 ms, c – 0.5 ms, d – 0.6 ms) при токе разряда $I_{\max}=1.3$ кА (верхний ряд), $I_{\max}=2.3$ кА (средний ряд) и наличие экрана и токе разряда $I_{\max}=2.3$ кА (нижний ряд)

На этих картинах видно, что в области взаимодействия появились неоднородности свечения, что вызвано, по-видимому, воздействием на плазму пондеромоторной силы. Наблюдается также увеличение количества катодных пятен и более равномерное их распределение по длине кольцевого электрода по сравнению с предыдущими опытами.

отрицательного полюса источника внешнего напряжения движение разряда определяется, так называемым, обратным (аномальным) движением катодного пятна. При этом разряд движется в сторону, противоположную направлению действия пондеромоторной силы.

3. Любимов Г.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги. Успехи физических наук. Т. 125, № 4. 1978. С. 665–706.