

03;04;12

Экспериментальное исследование магнитогидродинамического воздействия на тепловой поток к поверхности модели

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

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

(Поступило в Редакцию 26 апреля 2010 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований магнитогидродинамического (МГД) влияния на обтекание осесимметричной модели сверхзвуковым потоком азота. Эксперименты проводились на большой ударной трубе ФТИ, в торце которой находится рабочая секция со сверхзвуковым соплом. В выходном сечении сопла располагалась исследуемая модель в форме конуса, сопряженного с цилиндром. Магнитное поле создается расположенным на цилиндрической части модели соленоидом под действием импульсного электрического тока, протекающего через соленоид при разряде внешнего источника напряжения. При помощи электродов на конической поверхности модели создается газовый разряд, приобретающий в соленоидальном магнитном поле вращение вокруг оси модели. Исследуются влияние магнитного поля на газодинамическую структуру течения вблизи модели и тепловой поток к ее поверхности. В экспериментах регистрировались теневые картины обтекания, фотографические развертки свечения разряда и проводились измерения теплового потока. Обнаружено влияние магнитного поля на газодинамическую структуру течения вблизи модели и тепловую нагрузку к ее поверхности. Обнаружена также зависимость МГД-эффектов от полярности подключения внешнего источника напряжения.

Введение

Проблема теплообмена между высокоскоростными потоками слабоионизованного газа и поверхностью твердого тела стала особенно актуальной в связи с решением задачи входа аппаратов в атмосферу Земли и других планет. С ростом скоростей течений вблизи поверхности физические процессы, определяющие величину и динамику теплового потока к поверхности, заметно усложняются. В последние годы возможность активного влияния на тепловой поток к поверхности летательного аппарата с помощью электромагнитных полей привлекает внимание многих исследователей ([1–5] и ссылки в них). Поскольку поток газа вблизи поверхности высокоскоростных объектов может быть ионизован, рассматриваются также методы магнитной гидродинамики (МГД) как инструмент управления теплообменом. Сложность рассматриваемого явления диктует необходимость комплексного подхода к его изучению. При этом роль экспериментальных исследований трудно переоценить.

Эксперименты по МГД-управлению обтеканием летательного аппарата проводятся, как правило, на технически сложных установках, обеспечивающих сверхзвуковой поток слабоионизованного газа с помощью специальных устройств, например плазмотрона. Обтекаемая модель обычно простой формы снабжена либо постоянными магнитами, либо электромагнитами.

Ударная труба со сверхзвуковым соплом представляет собой сравнительно простое устройство для генерации высокотемпературных газовых потоков. Обычно для этого используется режим отражения ударной волны от торца трубы с последующим ускорением газа в при-

мыкающем к торцу сопле. Однако получить в этом случае на выходе из сопла сверхзвуковой поток плазмы с высокой проводимостью, необходимой для эффективного МГД-взаимодействия, довольно трудно. Авторами в 2002–2005 гг. по инициативе Р.В. Васильевой были проведены работы по изучению особенностей обтекания модели сверхзвуковым потоком слабоионизованного ксенона. Ксенон нагревался отраженной ударной волной до температуры ~ 8000 К и ускорялся в сверхзвуковом сопле до скорости, соответствующей числу Маха 5. В отличие от молекулярных газов ксенон обладает сравнительно малой скоростью рекомбинации, что позволило получить на выходе из сопла сверхзвуковой поток плазмы со степенью ионизации $\sim 0.5\%$. Однако полученные параметры плазмы не могли обеспечить эффективное МГД-воздействие на поток.

В настоящей работе авторами предложен новый подход экспериментального моделирования МГД-эффектов при сверхзвуковом обтекании осесимметричной модели [6]. Суть метода заключается в нагреве газа в ударном слое перед моделью с помощью электрического разряда. Разряд осуществляется в соленоидальном магнитном поле, которое придает ему вращение вокруг оси модели и формирует на ее поверхности область газа с высокой температурой.

Описание экспериментальной установки

Эксперименты по изучению МГД-воздействия на сверхзвуковое обтекание осесимметричной модели проводились на большой ударной трубе ФТИ [7], схема

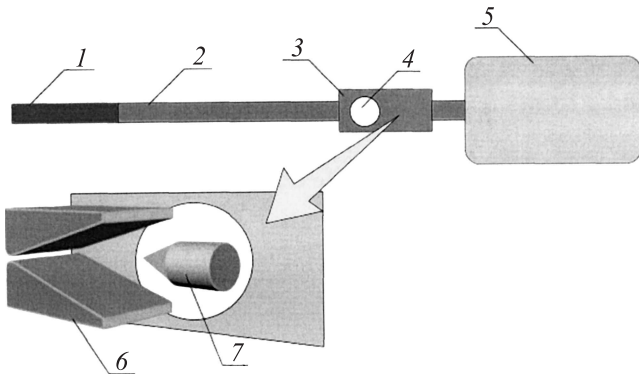


Рис. 1. Схема экспериментальной установки рабочей секции.

которой приведена на рис. 1. Ударная труба с диаметром внутреннего сечения 110 мм и длиной 16 м имеет камеру высокого давления (1) длиной 1.5 м с внешним электрическим нагревателем. Давление и температура рабочего газа — водорода — в камере могут достигать 50 МПа и 750 К соответственно. Камера высокого давления отделена от канала низкого давления (2) металлической диафрагмой, в момент разрушения которой по исследуемому газу (в этой работе азот) движется ударная волна. В конце канала низкого давления располагается рабочая секция (3) с внутренним прямоугольным сечением 210 × 75 мм и длиной 600 мм с окнами (4) на боковых стенах для визуализации течения. Другой торец рабочей секции соединен с вакуумным баком (5) объемом 6 м³.

Рабочая секция отделяется от ударной трубы тонкой пластиковой диафрагмой, перекрывающей вход в сопло. В момент отражения ударной волны от торца рабочей секции диафрагма разрушается и происходит запуск сверхзвукового сопла (6). Размер выходного сечения сопла составляет 95 × 75 мм. В качестве рабочей среды применялся азот, параметры сверхзвукового течения которого на выходе из сопла составляли: давление ~ 4–5 кПа, температура ~ 600 К, плотность ~ 0.025 кг/м³, скорость потока ~ 2 км/с, число Маха — 4, длительность стационарного истечения ~ 1.5 мс. В выходном сечении сопла располагались исследуемые модели (7) в форме 60° конуса, сопряженного с цилиндром диаметром 32 мм.

Устройство одной из моделей приведено на рис. 2. Внутри модели соосно с ней располагался магнитный сердечник (1) из стали с малой остаточной намагниченностью. На цилиндрическую часть сердечника помещена магнитная катушка (2) из 16 витков медного провода диаметром 1 мм. На магнитном сердечнике по линии сопряжения конуса и цилиндра имеется выступ (3), расположенный заподлицо с конической поверхностью модели. Внешняя поверхность этого выступа на конической поверхности модели являлась кольцевым электродом. К этому выступу подключен один из концов катушки (2), другой ее конец подключен к полюсу внешнего им-

пульсного источника напряжения, состоящего из набора LC-элементов. Перед опытом источник заряжается до требуемого напряжения. Другой полюс источника подключен к центральному электроду (4), расположенному на оси модели. Пространство между центральным электродом и магнитным сердечником заполнено эпоксидной смолой (5). Коническая часть центрального электрода (4) и кольцевой электрод (3) образуют разрыв в цепи разряда импульсного источника. Для замыкания цепи разряда в промежутке между упомянутыми электродами осуществляется короткий ~ 10⁻⁶ с высоковольтный разряд. Это инициирует разряд импульсного источника в течение ~ 10⁻³ с. Типичный вид импульса тока разряда показан на осциллограмме рис. 2. Индукция магнитного поля рассчитывалась по току разряда в соленоиде и составляла в окрестности кольцевого электрода величину ~ 0.5 Т. Газовый разряд (6) в соленоидном магнитном поле катушки (2) приобретает вращательное движение вокруг оси модели.

В экспериментах регистрировались теневые картины обтекания модели (время экспозиции составляло ~ 5 · 10⁻⁸ с), интегральное по времени свечение разряда вблизи модели, временные фотографические развертки свечения разряда.

Для регистрации тепловой нагрузки использовался датчик (7), расположенный на цилиндрической поверхности модели. Датчик теплового потока [8] представляет собой батарею последовательно соединенных термоэлементов. Каждый термоэлемент размером 0.2 × 0.2 × 6 мм был вырезан из анизотропного монокристалла висмута под определенным углом к одной из его кристаллографических осей. Термоэлементы уложены на площадке размером 4 × 6 мм таким образом, что направление тока в смежных элементах оказывается противоположным. Это обеспечивает высокую помехозащищенность теплового датчика.

Электрический сигнал теплового датчика пропорционален разности температур рабочей и тыльной поверхностей термоэлемента. Толщина датчика (0.2 мм) велика для того, чтобы использовать его для прямого измерения теплового потока с характерным временем ~ 1 мс. В этом случае для определения величины теплового

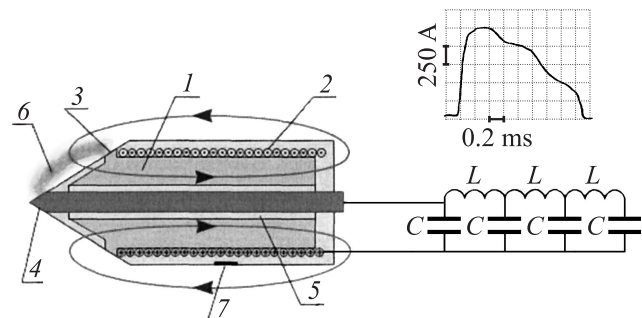


Рис. 2. Схема исследуемой модели и типичный импульс тока разряда.

потока необходима, во-первых, математическая обработка сигнала датчика на основе решения одномерного уравнения теплопроводности [9], а во-вторых, коррекция исходного сигнала с учетом прогрева тыльной поверхности датчика. Указанные процедуры достаточно сложны, однако качественно не искажают соотношения результатов измерений, поэтому для простоты изложения ограничимся проведением сравнительного анализа собственно сигналов теплового датчика.

Результаты измерений и их обсуждение

Влияние магнитного поля

В предлагаемом подходе экспериментального моделирования очевидно наличие двух физических процессов: джоулева тепловыделения и действия на газовый разряд пондеромоторной силы. Тепловыделение определяется в основном величиной тока в плазме, пондеромоторная сила зависит от упомянутого тока и величины магнитного поля.

Для выяснения роли магнитного поля при МГД-воздействии на сверхзвуковое обтекание в опытах использовались две модели одинаковой геометрии, в одной из которых отсутствовал магнитный сердечник. Наличие сердечника увеличивает магнитную индукцию примерно в 1.5 раза при прочих равных условиях. Роль кольцевого электрода в отсутствии магнитного сердечника выполняло латунное кольцо, расположенное в том же месте сопряжения конуса с цилиндром. Для уменьшения действия вихревых токов при включении импульсного магнитного поля на кольцевом электроде был сделан разрез вдоль его образующей. С целью поддержания постоянного уровня тепловыделения в опытах ток разряда оставался неизменным.

На рис. 3 представлены три теневые картины сверхзвукового обтекания моделей в момент времени, соответствующий стационарному сверхзвуковому потоку азота. На рис. 3, *a* показана картина обтекания модели без МГД-воздействия (электромагнитное устройство не работало), на двух последующих — обтекание при наличии МГД-воздействия: рис. 3, *b* соответствует обтеканию модели с магнитным сердечником, а рис. 3, *c* — течению вблизи модели без сердечника. Теневые картины получены с экспозицией ~ 50 ns. Светлая область около конической поверхности моделей на рис. 3, *b* и *c* соответствует области вращающегося разряда. Эти области экспонировались в течение времени опыта ($\sim 10^{-3}$ s), они дают представление о форме разряда около поверхностей моделей.

На теневых картинах хорошо видно, что при наличии МГД-воздействия (рис. 3, *b* и *c*) головная ударная волна располагается дальше от поверхности конуса и ее фронт несколько искривлен по сравнению со случаем невозмущенного обтекания (рис. 3, *a*). Заметны также различия в структуре течения при обтекании моделей с магнитным сердечником (рис. 3, *b*) и без него (рис. 3, *c*).

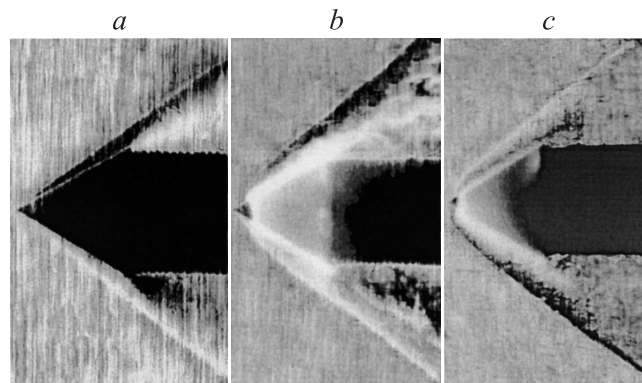


Рис. 3. Теневые картины сверхзвукового обтекания модели без МГД-воздействия (*a*) и при включенном МГД-устройстве модели с магнитным сердечником (*b*) и без него (*c*).

Свечение в области разряда на этих картинах существенно различается (около модели с сердечником свечение ярче), несмотря на то что в обоих случаях электрическая мощность, идущая на поддержание разряда, была одинаковой. Заметны также различия и в газодинамической структуре течения за ударной волной — на модели без сердечника (рис. 3, *c*) турбулентные возмущения менее выражены.

Анализ теневых картин обтекания двух различных моделей сверхзвуковым потоком азота с числом Маха 4 позволил установить, что более эффективное воздействие на поток наблюдается в опытах на модели с магнитным сердечником, в которых магнитная индукция вблизи кольцевого электрода достигала 0.7 Т. Это позволяет рассматривать модель с сердечником как наиболее перспективную с точки зрения эффективности МГД-воздействия на сверхзвуковой поток и проводить дальнейшие исследования именно с ней.

Влияние полярности кольцевого электрода на динамику разряда

В экспериментах на модели с магнитным сердечником была обнаружена существенная зависимость частоты вращения разряда и сигнала теплового датчика от полярности подключения внешнего источника. При изменении полярности подключения внешнего источника напряжения изменяется направление тока в разряде и магнитной катушке, поскольку они образуют последовательную цепь разряда источника. При этом направление пондеромоторной силы остается неизменным.

Поскольку кольцевой электрод находится вблизи магнитной катушки, где магнитная индукция и электромагнитная сила максимальны, то в дальнейшем имеет смысл рассматривать процессы, происходящие вблизи кольцевого электрода.

Для измерения частоты вращения разряда применялся ждущий фоторегистратор ЖФР-2. Свечение разряда регистрировалось с участка поверхности конуса вдоль

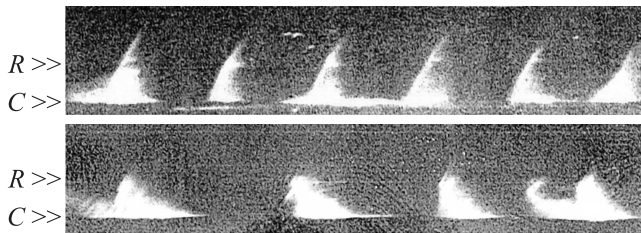


Рис. 4. Фотографические развертки свечения разряда при отрицательном кольцевом электроде (верхний снимок) и при положительном кольцевом электроде (нижний снимок). Слева символами показано место положения кольцевого (R) и центрального (C) электродов вдоль образующей конуса.

его образующей, изображение которого ограничивалось щелевой дифрагмой шириной 1 мм, параллельной образующей конуса. Изображение перемещалось по фотопленке с заданной скоростью, что позволяло вычислить среднюю частоту вращения газового разряда.

Эксперименты проводились при одинаковых параметрах сверхзвукового потока и равных токах разряда. На рис. 4 показаны две фотографические развертки, соответствующие различной полярности кольцевого электрода: катод (верхняя) и анод (нижняя). Для сравнения выбраны фрагменты разверток, соответствующие установившемуся режиму обтекания. Горизонтальное направление слева направо соответствует изменению времени. Вертикаль совпадает с направлением вдоль образующей конуса модели.

Обработка результатов фотографических разверток показала, что средняя частота вращения разряда в случае, когда кольцевой электрод является катодом, составляет ~ 30 kHz, а при обратной полярности — примерно 15 kHz. Следует также отметить, что частота вращения разряда зависит и от давления окружающего газа. Это показывают измерения, выполненные в атмосфере неподвижного воздуха [6].

Интересный результат был получен при измерениях теплового воздействия на цилиндрическую поверхность модели при противоположных полярностях подключения источника напряжения. В этой серии опытов сравнивались сигналы теплового датчика при двух значениях тока разряда и различных полярностях подключения внешнего источника напряжения. При изменении тока разряда длительность импульса тока остается практически неизменной и изменяется только его величина, поэтому для количественной характеристики тока разряда будем использовать его максимальное значение I_{\max} .

На рис. 5 показаны сигналы теплового датчика при изменении тока разряда для соединения кольцевой электрод–анод. На рисунке видно, что при увеличении тока разряда на 15% сигнал датчика увеличился в среднем в 2 раза. Наблюдается непрерывное изменение уровня сигнала датчика в течение опыта. Заметим также, что частота пульсаций на кривой 2 равна пример-

но 15 kHz, что соответствует величине, измеренной по фотографической развертке.

На рис. 6 приведены сигналы датчика для тех же значений тока разряда при подключении кольцевой электрод–катод. В отличие от предыдущего случая при увеличении тока разряда величина сигнала теплового датчика уменьшилась в 2 раза. Эти опыты показывают, что с помощью магнитного поля можно уменьшить тепловую нагрузку на исследуемую поверхность.

Столь впечатляющее влияние магнитного поля на структуру сверхзвукового обтекания и тепловое воздействие, в частности, не находит объяснения в рамках принятой модели изучаемого явления (электрический нагрев и действие пондеромоторной силы) и позволяет предположить наличие иного механизма. Интерес представляет физика приэлектродных процессов в газовом разряде и, в частности, движение катодного пятна. Изучению катодного пятна посвящены фундаментальные

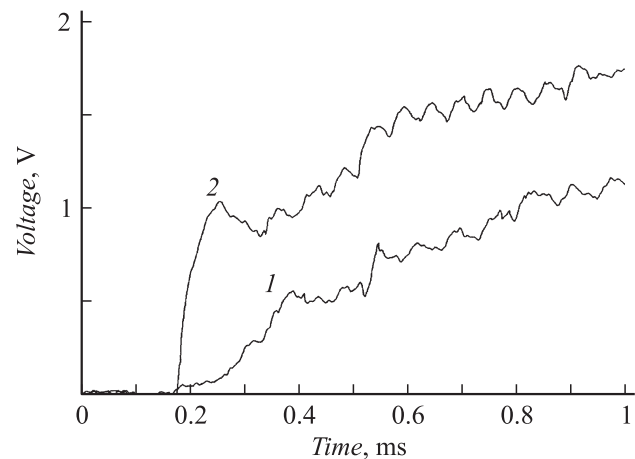


Рис. 5. Сигналы теплового датчика при изменении тока разряда ($1 - I_{\max} = 1.3$, $2 - 1.5$ kA) для соединения кольцевой электрод–анод.

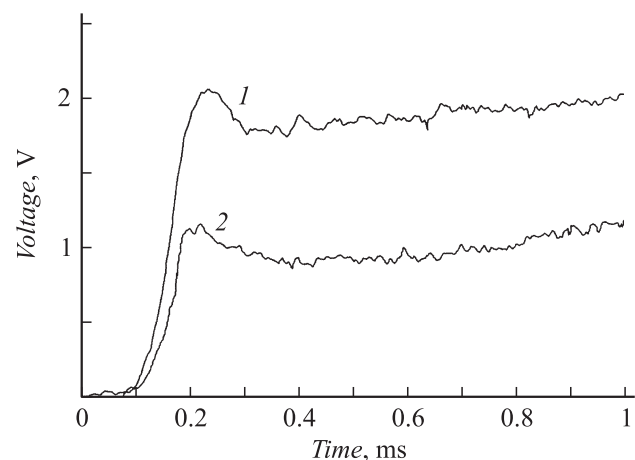


Рис. 6. Сигналы теплового датчика при изменении тока разряда ($1 - I_{\max} = 1.3$, $2 - 1.5$ kA) для соединения кольцевой электрод–катод.

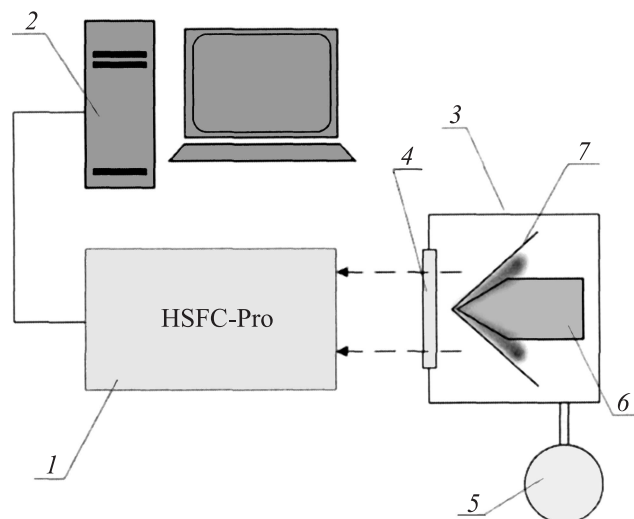


Рис. 7. Схема установки для регистрации движения катодного пятна.

труды [10–13] и многие публикации в научных журналах, однако до сих пор не существует общепринятого объяснения его некоторых свойств, например такого явления, как обратное движение пятна в тангенциальном магнитном поле [10].

Для выяснения роли приэлектродных процессов, влияющих на динамику газового разряда, были проведены дополнительные исследования на модели с магнитным сердечником при помощи скоростной цифровой камеры HSFC-Pro (PCO AG, Kelheim, Germany).

Схема установки приведена на рис. 7. Скоростная цифровая камера (1), которая имеет три канала регистрации и позволяет получать шесть электронных изображений размером 1280×1024 пикселей с задан-

ным временем экспозиции, подключена к персональному компьютеру (2). Рабочая камера (3) имеет окно (4) для наблюдения и вакуумную систему (5) для откачки воздуха до нужного давления. Исследуемая модель (6) устанавливалась в камеру так, что съемка производилась со стороны ее конической части фронтально. Поскольку в сверхзвуковом потоке газовый разряд прижат к конической поверхности ударной волной (см. рис. 3), то в данном случае для имитации воздействия потока на коническую часть модели была надета стеклянная воронка (7) с углом раствора, примерно равным углу конуса, образованного фронтом ударной волны при сверхзвуковом обтекании модели.

Давление в рабочей камере составляло 20 кПа, что примерно соответствовало давлению в ударном слое при сверхзвуковом обтекании модели. Такой прием, естественно, не моделирует в полной мере условий, имеющих место при сверхзвуковом обтекании модели, но позволяет выявить основные факторы, определяющие динамику газового разряда в магнитном поле.

На рис. 8 представлены изображения разряда, полученные с помощью камеры HSFC-Pro в различные моменты времени с экспозицией 10^{-6} с. На темных картинах видно, что разряд имеет форму спирали. На нижних картинах спираль более длинная и распределена по поверхности конуса более равномерно по сравнению с картинами в верхнем ряду. Следует отметить, что в нижнем ряду на фотографиях наблюдаются несколько катодных пятен.

Проанализировав последовательность изображений, можно заметить, что в случае, когда кольцевой электрод является анодом (верхние снимки), вращение разряда происходит по направлению часовой стрелки в соответствии с направлением пондеромоторной силы. В случае движения по кольцевому электроду катодного пятна

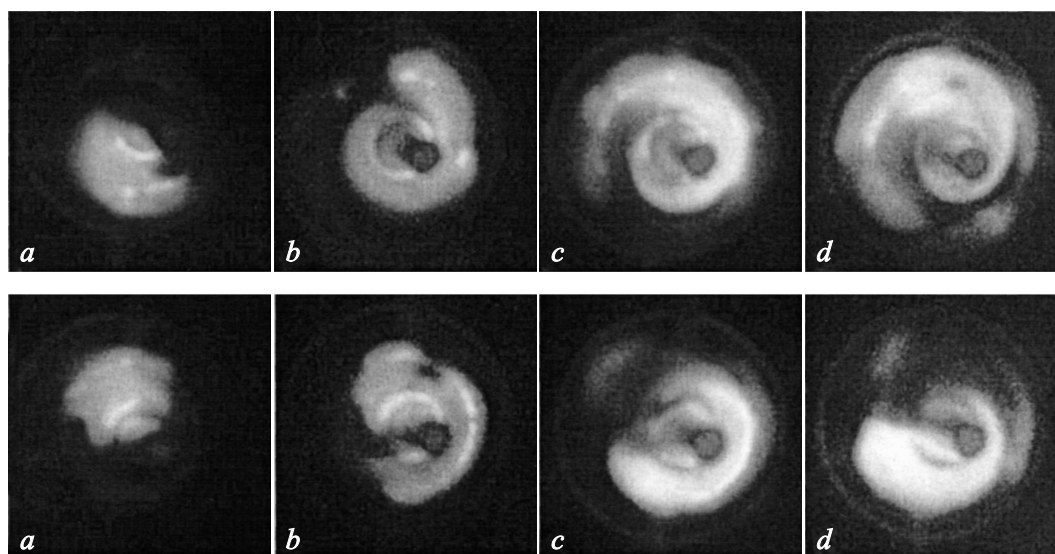


Рис. 8. Форма разряда в различные моменты времени (*a* — 0.1, *b* — 0.2, *c* — 0.6, *d* — 0.8 ms) при движении по кольцевому электроду анодного (верхний ряд) и катодного (нижний ряд) пятна.

(нижние изображения) вращение разряда происходит против часовой стрелки, т.е. в сторону, противоположную направлению пондеромоторной силы. Напомним, что при изменении полярности кольцевого электрода направление пондеромоторной силы остается прежним, поскольку одновременно изменяется направление тока разряда и магнитного поля.

Проведенные дополнительные эксперименты позволяют говорить о том, что динамика газового разряда в соленоидальном магнитном поле в значительной степени определяется движением катодного пятна вдоль поверхности кольцевого электрода.

Заключение

В опытах по сверхзвуковому обтеканию моделей со встроенным электромагнитным устройством исследовалось влияние МГД-эффектов на газодинамическую структуру течения и тепловую нагрузку к поверхности модели. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. На исследуемой модели динамика газового разряда вблизи конической части модели определяется главным образом эффектами вблизи кольцевого электрода, поскольку в этой области течения величина магнитной индукции максимальна.

2. Величина магнитного поля существенно влияет на динамику газового разряда. Скорость вращения разряда вокруг модели увеличивается при увеличении индукции магнитного поля.

3. Обнаружено, что эффективность МГД-воздействия на газодинамическую структуру вблизи модели зависит от полярности подключения кольцевого электрода к внешнему источнику напряжения. В случае, когда кольцевой электрод является катодом, воздействие газового разряда на течение значительно сильнее.

4. В случае, когда кольцевой электрод является катодом, кроме действия пондеромоторной силы и омического нагрева динамика разряда определяется также движением катодного пятна в тангенциальном магнитном поле. При этом катодное пятно перемещается по поверхности электрода в направлении, противоположном направлению действия пондеромоторной силы.

5. Вариант подключения, при котором кольцевой электрод является катодом, представляется перспективным с позиций эффективности МГД-воздействия на тепловой поток к обтекаемой поверхности. Экспериментально обнаружено, что при увеличении тока разряда и индукции магнитного поля происходит уменьшение тепловой нагрузки на модель.

Работа выполнена при поддержке EOARD (проект МНТЦ № 3475), программы президиума РАН № П-049 и Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ (Гос. контракт № 02.740.11.0201).

Список литературы

- [1] *Glass C.* // Non-Continuum Hypersonic Shock Interactions on a Simulated Airbreathing Engine Cowl. 2003. AIAA-2003-3772. 9 p.
- [2] *Shang J.S.* // Prog. in Aerospace Sci. 2001. Vol. 37. P. 1–20.
- [3] *Poggie J., Gaitonde D.V.* // Physics of Fluids. 2002. Vol. 14. N 5. P. 1720–1731.
- [4] *Bityurin V.A., Velikodny V.Yu., Klimov A.I., Leonov S.V., Potebnya V.G.* // Proc. 30th AIAA Plasmadynamics and Laser Conference. Norfolk VA, 1999. AIAA 99-3533.
- [5] *Golovachov Y., Kurakin Y., and Schmidt A., Van Wie D.* // Proc. 41st Aerospace Sci. Meeting and Exhibit. Reno. Nevada, 2003. AIAA-2003-171.
- [6] *Сахаров В.А., Менде Н.П., Бобашев С.В., Ван Вие Д.М.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 14. С. 40–45.
- [7] *Масленников В.Г., Сахаров В.А.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 11. С. 88–95.
- [8] Patent number EP 1223411. Universal sensor for measuring shear stress, mass flow or velocity of a fluid or gas, for determining a number of drops, or detecting drip or leakage / N.P. Divin, A.V. Mitiakov, V.Y. Mitiakov, S.Z. Sapozhnikov. 17-07. 2002.
- [9] *Резников Б.И., Менде Н.П., Попов П.А., Сахаров В.А., Штейнберг А.С.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 15. С. 49–54.
- [10] *Кесаев И.Г.* Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968. 244 с.
- [11] *Раховский В.И.* Физические основы коммутации электрического тока в вакууме. М.: Наука, 1970. 536 с.
- [12] *Месяц Г.А.* Эктоны. Екатеринбург: УИФ Наука, 1993. Ч. 1. 184 с.
- [13] *Лафферти Дж.* Вакуумные дуги. М.: Мир, 1982. 432 с.