

03

## Изменение давления у поверхности обтекаемого сверхзвуковым потоком тела магнитогидродинамическим методом

© Т.А. Лапушкина, А.В. Ерофеев, С.А. Поняев

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

(Поступило в Редакцию 28 ноября 2013 г.)

Работа направлена на исследование возможности изменения давления вблизи поверхности обтекаемого сверхзвуковым потоком тела как модели крыла или носовой части летательного аппарата при помощи организации поверхностного газового разряда в поперечном потоку магнитном поле. Основное воздействие на параметры течения и давление, в частности, оказывает поперечная сила Лоренца, действующая на газ в направлении, ортогональном направлению организованного разрядного тока и способствующая отводу или поджиму газа у поверхности тела, а следовательно, и изменению давления. Приведены экспериментальные данные по визуализации течения и измерению давления у поверхности тела при различных конфигурациях тока и интенсивностях газового разряда и магнитного поля и показано, что возможна организация таких конфигураций тока и магнитного поля вблизи поверхности исследуемого тела, которая будет увеличивать или уменьшать давление у носовой, верхней и нижней поверхностей заданного объекта, тем самым меняя аэродинамическое сопротивление и подъемную силу. Такое магнитогидродинамическое управление аэродинамическими характеристиками летательного объекта можно использовать как при взлете и посадке, так и во время стационарного полета, а также при входе в плотные слои атмосферы, что значительно снизит тепловые нагрузки на поверхность обтекаемого тела.

### Введение

Работа является продолжением ряда работ авторов [1–4] по исследованию влияния электрического и магнитного полей на параметры сверхзвукового течения, в частности на обтекание тел и ударно-волновые конфигурации, с целью управления этими параметрами. В отличие от большинства работ, использующих магнитогидродинамический (МГД) метод для воздействия на процесс сверхзвукового обтекания [5–9], где замыкается магнитоиндуцированный ток, в наших работах искусственно организуются различные токовые конфигурации, позволяющие создавать локальные зоны МГД-воздействия в нужном направлении.

Основное преимущество МГД-воздействия по сравнению с механическими способами управления течением — это быстрдействие, что весьма актуально при разработке летательных аппаратов нового поколения, летающих с гиперзвуковыми скоростями при числах Маха больше 3. Кроме того, при специальной организации газового разряда МГД-воздействие, в отличие от механического, не зависит ни от скорости потока, ни от угла атаки набегающего потока, и может иметь более широкий диапазон применения при управлении полетом.

Основная цель настоящей работы — показать возможность изменения давления вблизи поверхности обтекаемого сверхзвуковым потоком тела, в частности крыла или носовой части самолета, при создании поверхностного газового разряда и магнитного поля. Актуальность данного исследования для прикладной аэродинамики заключается в следующем: если мы можем МГД-методом изменять давление у поверхности, например, крыла или

носовой части летательного аппарата, то мы можем в процессе полета в зависимости от его стадий быстро менять аэродинамические характеристики аппарата, такие как аэродинамическое сопротивление и подъемная сила, которые являются функциями давления.

### 1. Постановка эксперимента

Исследования проводятся в сверхзвуковом симметричном сопле с углом наклона стенок относительно оси  $11^\circ$ , которое соединено с торцом камеры низкого давления ударной трубы [2]. На оси сопла на расстоянии 20 см от входа помещено исследуемое тело в виде удлиненного плоского полуцилиндра с радиусом закругленной части 2 см, представленное на рис. 1. Тело обтекается слабо ионизованным потоком ксено-

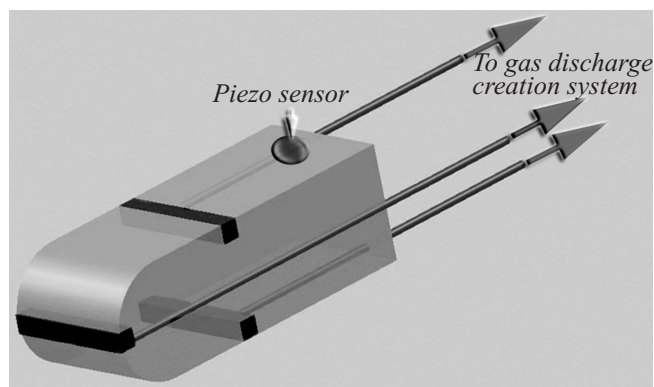


Рис. 1. Модель исследуемого тела.

на с неравновесной ионизацией и числом Маха 4.3. В тело вмонтированы три электрода: один центральный и два боковых. Это позволяет создавать различные газоразрядные конфигурации у поверхности тела путем приложения напряжения от специальных LC-цепочек, формирующих прямоугольный импульс тока заданной длительности, которая меняется путем изменения количества звеньев цепи. Ток замыкается в момент прихода ионизованного потока в область между электродами, поток является ключом включения тока. Совместно с разрядом в поперечном течении и газоразрядному току направлению может быть включено магнитное поле, создаваемое с помощью катушек Геймгольца, расположенных по бокам рабочей камеры. Диаметр и расстояние между катушками было подобрано так, чтобы создавать однородное магнитное поле во всей области исследуемого течения. Максимально возможная величина магнитной индукции 1.3 Т, длительность стационарной стадии магнитного поля, когда магнитную индукцию можно считать постоянной, соответствует длительности обтекания тела ионизованным потоком, что составляет величину порядка  $600 \mu\text{s}$  и определяет время исследования в одном эксперименте.

На рис. 2 представлен один из вариантов замыкания газоразрядного тока у поверхности тела в области за головной ударной волной. Ток течет от центрального электрода к боковым. Ионный ток  $\mathbf{J}$  создается у верхней и у нижней кромок тела в направлении, совпадающем с направлением течения газа, что дополнительно способствует увеличению скорости движения заряженных ионов. Разряд одновременно ионизует газ и ускоряет заряженные ионы, что в поперечном магнитном поле с вектором магнитной индукции  $\mathbf{B}$  приводит к возникновению силы Лоренца, действующей на заряженные частицы в направлении, перпендикулярном движению частиц. Вследствие быстрого обмена энергией при столкновении ионов с нейтральными атомами газа возникает пондеромоторная сила  $\mathbf{F}_p = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ , действующая в том же направлении непосредственно на газ, а следовательно, на параметры обтекания, способствуя оттоку газа от тела

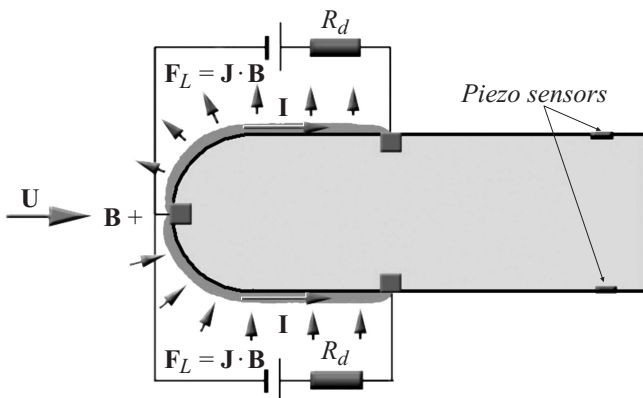


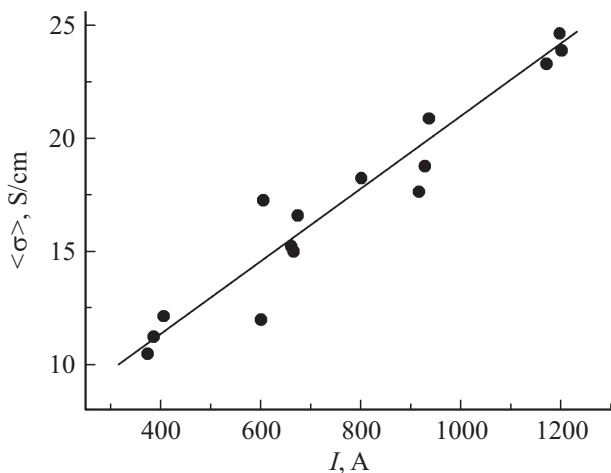
Рис. 2. Вариант организации поверхностного тока и направление действующей в этом случае пондеромоторной силы.

и уменьшению давления в верхней половине течения и прижиму газа и увеличению давления в нижней, при этом должны измениться картина обтекания и конфигурация головной ударной волны. Меняя направление тока разряда, можно менять направление действия пондеромоторной силы. Если представить, что на рис. 2 мы видим поперечное сечение крыла летательного аппарата, то изменение давления у передней кромки означает изменение аэродинамического сопротивления, а изменение давления у верхней и нижней горизонтальных поверхностей крыла изменяет подъемную силу. При варианте организации тока, показанного на рис. 2, будет уменьшаться аэродинамическое сопротивление у верхней части передней кромки (у нижней части передней кромки сопротивление будет увеличиваться), а созданная за счет формы крыла подъемная сила будет увеличиваться. Смена полярности подаваемого на электроды напряжения и направления газоразрядного тока на противоположное приведет к обратному действию пондеромоторной силы: увеличит аэродинамическое сопротивление у верхней части передней кромки (уменьшит у нижней) и уменьшит подъемную силу.

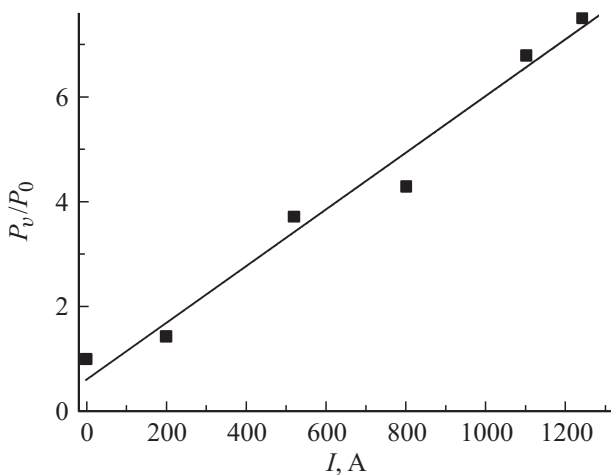
Диагностика исследования проводится путем съема вольт-амперных характеристик газового разряда для определения проводимости плазмы и параметра МГД-воздействия (параметра Стюарта), определяющего долю работы силы Лоренца при воздействии на обтекание по отношению к удвоенной кинетической энергии потока  $St = \frac{JBL}{\rho u^2}$ , где  $J$  — плотность тока в разряде,  $B$  — магнитная индукция,  $L$  — ширина зоны воздействия,  $\rho$  и  $u$  — плотность и скорость набегающего потока. Также проводится измерение давления вблизи поверхности тела при воздействии и без, для чего в верхнюю и нижнюю горизонтальные поверхности тела, как показано на рис. 1 и 2, вмонтированы два пьезодатчика, которые вынесены за область разряда во избежание наводок. Визуализация и качественный анализ всего процесса изменения обтекания тела при воздействии электрического и магнитного полей производятся при помощи скоростной шпирен-системы [10], где в качестве фиксатора изображения используется высокоскоростная intensified CCD camera PCO hsfс pro, позволяющая получать до 6 шпирен-картин за время течения с разной скважностью и экспозицией. Источником просвечивающего излучения является непрерывный полупроводниковый лазер.

## 2. Экспериментальные результаты

Проводимость газа, измеренная в газоразрядном промежутке при организации поверхностного разряда в области между телом и ударной волной, представлена на рис. 3 в зависимости от величины газоразрядного тока. Виден значительный рост проводимости с ростом тока. Полученные при этом значения давления в отсутствие магнитного поля приведены на рис. 4. Было обнаружено значительное увеличение давления у поверхности тела с



**Рис. 3.** Зависимость проводимости плазмы в области разряда от величины разрядного тока.



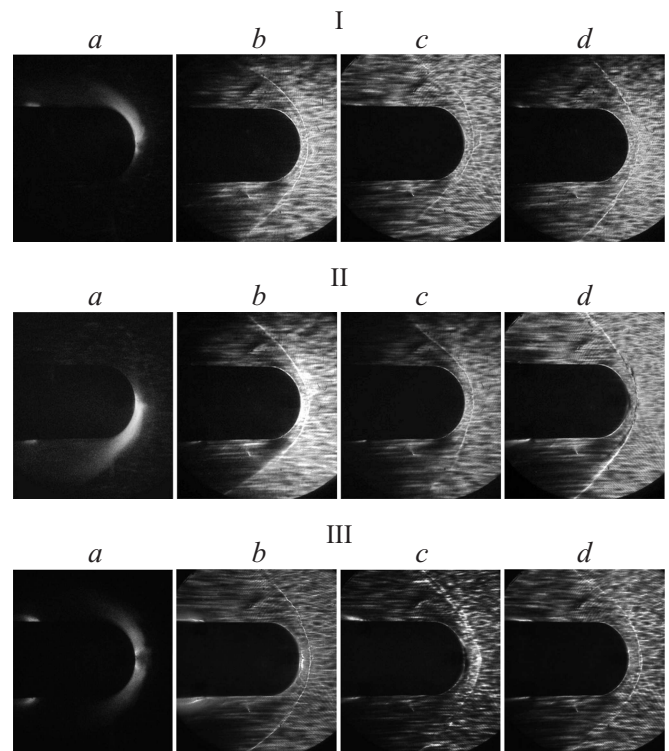
**Рис. 4.** Зависимость относительной величины давления газа в области разряда от величины разрядного тока.  $P_0$  — давление без разряда.

ростом тока. Давление измерялось при полном разряде, когда давление на верхнем и нижнем датчиках было примерно одинаково. На рис. 5-I представлены картины собственного свечения газа (рис. 5-I, *a*) в разряде и шлирен-картины обтекания тела при организации поверхностного разряда в верхней половине тела при токе 800 А в отсутствие магнитного поля (рис. 5-I, *b, c, d*). Электрод, находящийся на нижней кромке модели, не задействован. Время привязано к началу замыкания тока. Видно, что свечение диффузно охватывает верхнюю часть тела. Рис. 5-I, *b* показывает исходное положение ударной волны в нулевой момент времени в отсутствие тока. На шлирен-картине в момент времени  $200 \mu\text{s}$  от начала замыкания тока (рис. 5-I, *c*) ударная волна имеет несимметричную форму, в верхней части ударная волна отходит от тела вследствие увеличения давления в разряде. К моменту времени  $400 \mu\text{s}$  (рис. 5-I, *d*) давление у верхней и у нижней кромок выравнивается,

что приводит к выравниванию ударной волны. Аналогичная картина только у нижней кромки возникает, когда задействован для организации разряда только нижний электрод (рис. 5-II). Ток охватывает нижнюю кромку тела, что видно по собственному свечению газа в разряде (рис. 5-II, *a*), что приводит к увеличению давления у нижней части тела и несимметричной картине обтекания через  $200 \mu\text{s}$  от начала замыкания тока (рис. 5-II, *c*), которая выравнивается к моменту времени  $400 \mu\text{s}$  (рис. 5-II, *d*).

На рис. 5-III приведены картины обтекания при полном разряде у обеих кромок тела, соответствующие замыканию тока, приведенному на рис. 2. Видно, что по сравнению с моментом времени при нулевом токе (рис. 5-III, *b*) при наличии газового разряда волна значительно отходит от тела (рис. 5-III, *d*). Следует отметить, что в течение  $200 \mu\text{s}$  положение волны неустойчиво (рис. 5-III, *c*), происходит процесс установления нового положения волны (рис. 5-III, *d*). По окончании тока за время порядка  $100 \mu\text{s}$  волна возвращается в исходное положение.

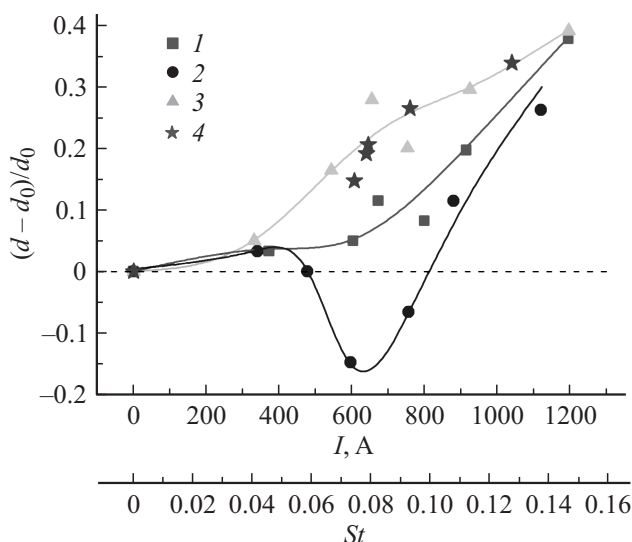
При включении магнитного поля увеличению давления в области разряда будет способствовать как джоулев нагрев газа в электрическом поле, так и действие понде-



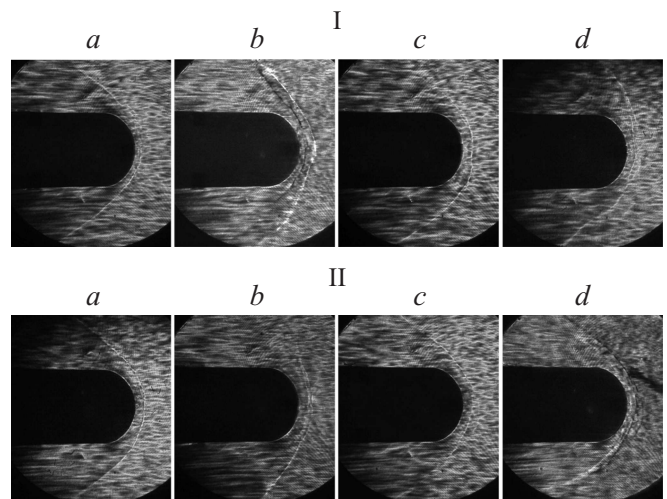
**Рис. 5.** Визуализация картины течения: I. Газоразрядный ток организован у верхней кромки модели. II. Газоразрядный ток организован у нижней кромки модели. III. Газоразрядный ток организован у верхней и нижней кромок модели. *a* — картина собственного свечения газа в разряде, *b* — шлирен-картина течения в момент включения тока, *c* — шлирен-картина течения через  $200 \mu\text{s}$  после начала тока, *d* — шлирен-картина течения через  $400 \mu\text{s}$  после начала тока.

ромоторной силы в направлении к телу. Степень нагрева газа зависит от параметра электрогазодинамического воздействия  $N = JE\Delta t/\rho u^2$  и напрямую связана с энерговкладом в поток от организованного газоразрядного тока, где  $J$  и  $E$  — плотность тока и напряженность электрического поля в разряде,  $\Delta t$  — время воздействия,  $\rho$  и  $u$  — плотность и скорость набегающего потока. Уменьшение же давления будет зависеть от баланса между нагревом и МГД-воздействием в направлении от тела. Для создания преимущественных условий для МГД-воздействия следует уменьшать нагрев за счет увеличения проводимости газа в газоразрядной области и максимально увеличивать магнитное поле. К сожалению, максимально возможная величина магнитной индукции экспериментальной установки, используемой для исследования, 1,3 Т, что значительно сужает возможности экспериментальной демонстрации МГД-воздействия, особенно в задаче уменьшения давления у поверхности обтекаемого тела.

На рис. 6 приведено относительное изменение положения головной волны  $(d-d_0)/d_0$  в зависимости от величины и направления разрядного тока, полученное при организации газоразрядного тока, охватывающего переднюю кромку тела по полукруговой траектории при использовании двухэлектродной схемы, когда центральный электрод на передней кромке тела отсутствует. Данные приведены по предыдущим результатам экспериментов на ксеноне и воздухе [3,4]. Видно, что как при токе от верхнего электрода к нижнему, когда пондеромоторная сила направлена к телу, так и при обратном токе, когда она направлена от тела, существует



**Рис. 6.** Относительное изменение положения головной волны при двухэлектродной схеме замыкания тока в зависимости от разрядного тока и параметра Стюарта при разных направлениях МГД-воздействия. 1 — в отсутствие магнитного поля, 2 — при действии пондеромоторной силы в направлении от тела, 3 — при действии пондеромоторной силы в направлении к телу, 4 — данные, полученные в воздушном потоке.



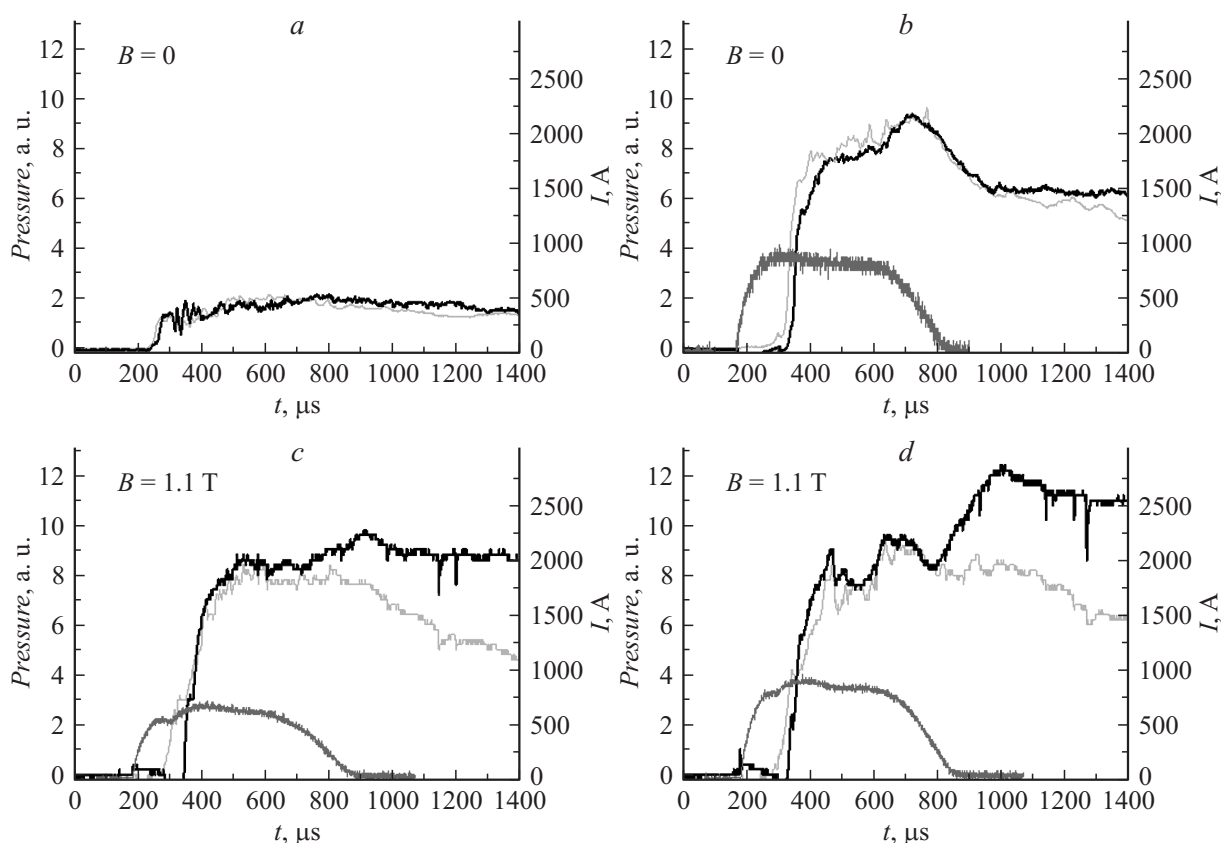
**Рис. 7.** Шлирен-картины течения при МГД-воздействии. I. Замыкание тока по трехэлектродной схеме. *a, b* — ток от центрального электрода к боковым; *c, d* — ток от боковых электродов к центральному. II. Замыкание тока по двухэлектродной схеме. *a, b* — ток от верхнего электрода к нижнему; *c, d* — ток от нижнего электрода к верхнему.

тенденция к увеличению расстояния от ударной волны до тела. Это происходит потому, что МГД-воздействие осуществляется на фоне в основном преобладающего действия электрического поля, которое нагревает газ в разряде и способствует увеличению давления в области разряда между ударной волной и телом и отходу волны от тела. Приближение ударной волны за счет МГД-снижения давления в области разряда наблюдается в узком диапазоне токов, где МГД-воздействие преобладает над тепловым (участок I на рис. 6). В экспериментах с использованием трехэлектродной схемы организации поверхностного разряда исследования проводились в этом диапазоне токов.

Шлирен-картины, полученные при организации тока у верхней и у нижней частей тела по трехэлектродной схеме, приведены на рис. 7-I. Направление ионного тока на рис. 7-I, *a, b* выбрано по направлению движения обтекающего потока, как на рис. 2, на рис. 7-I, *c, d* ток замыкался в противоположном направлении. В обоих случаях возникает асимметричная форма головной ударной волны. На рис. 7-I, *a, b* у верхней кромки она ближе к телу за счет уменьшения давления в области между ударной волной и телом под действием пондеромоторной силы, направленной от тела, внизу волна отошла от тела, так как пондеромоторная сила в нижней половине действует по направлению к телу и поджимает газ, увеличивая тем самым давление в этой области, что отодвигает волну. На рис. 7-I, *c, d* хорошо видно обратное МГД-воздействие на картину обтекания при смене полярности газоразрядного тока.

Данные, полученные в этом эксперименте, демонстрируют правильную тенденцию воздействия пондеромо-





**Рис. 8.** Осциллограммы давления: жирная кривая — с пьезодатчика, вмонтированного в нижнюю поверхности тела, тонкая кривая — с пьезодатчика на верхней поверхности тела.

торной силы на изменение давления вблизи поверхности тела, но можно заметить, что в трехэлектродной схеме МГД-воздействием снизить давление в области разряда настолько, чтобы приблизить головную ударную волну к телу по сравнению с положением волны без воздействия, не удалось. Это удалось сделать при двухэлектродной организации разряда, исключив из схемы центральный электрод. На рис. 7-II, *a, b, c, d* приведены шлирен-картины для этого случая. Рис. 7-II, *a, b* демонстрирует картину обтекания, когда действие пондеромоторной силы направлено к телу (ток от верхнего электрода к нижнему). Здесь МГД-увеличение давления в области между ударной волной и телом приводит к отходу ударной волны. На рис. 7-II, *c, d* действие пондеромоторной силы в противоположном направлении и здесь виден прижим волны к телу по сравнению с положением волны в отсутствие тока за счет МГД-уменьшения давления. Это хорошо видно при наложении течения при двух моментах времени. Темная ударная волна — это положение в нулевой момент времени, светлая полоса на картине — положение волны через  $200 \mu\text{s}$  после начала МГД-взаимодействия.

Действие пондеромоторной силы на изменение давления вблизи поверхности обтекаемого тела подтверждают и экспериментальные данные, полученные с поверхностных пьезодатчиков. Осциллограммы давления у нижней

и у верхней кромок тела в условных единицах в отсутствие тока и магнитного поля приведены на рис. 8, *a*. Давления практически совпадают по величине. Подключение газового разряда по схеме рис. 2 с током 800 А приводит к значительному увеличению обоих давлений (рис. 8, *b*). При включение поперечного магнитного поля величиной 1.1 и 1.3 Т (рис. 8, *c, d*) видно, что давление на нижнем пьезодатчике выросло сильнее, чем на верхнем, что демонстрирует способность пондеромоторной силы увеличивать давление. Давление же на верхнем пьезодатчике практически не изменилось по сравнению с давлением в отсутствие магнитного поля, уменьшения давления не произошло, вероятно, вследствие сильного нагрева газа в разряде, что демонстрировали и соответствующие шлирен-картины на рис. 7 для трехэлектродной схемы. На рис. 8, *b, c, d* приведены также осциллограммы соответствующих газоразрядных токов (нижняя кривая).

Анализируя экспериментальные данные и исходя из грубой оценки подъемной силы крыла как разности избыточных давлений у нижней  $P_{\text{bottom}}$  и у верхней  $P_{\text{top}}$  поверхностей, отнесенной к площади крыла  $S$  (при МГД-воздействии — это площадь разряда):

$$Y = (P_{\text{bottom}} - P_{\text{top}})S,$$

можно сделать вывод, что МГД-воздействием при соответствующих величинах проводимости газа и магнитного поля мы можем увеличить давление у нижней кромки крыла минимум на 20%, а у верхней кромки уменьшить его на 10%, тем самым увеличив подъемную силу крыла на 30%, что является существенной добавкой к подъемной силе, возникающей за счет формы крыла. Это означает, что возможно быстрое изменение аэродинамического сопротивления и подъемной силы путем организации локальных газовых разрядов и поперечного магнитного поля вблизи поверхности обтекаемого тела, т. е. возможен МГД-метод управления аэродинамическими характеристиками летательных аппаратов.

### 3. Модель управляющей МГД-системы на крыле

На рис. 9 приведен один из возможных вариантов организации на крыле системы МГД управления подъемной силой и аэродинамическим сопротивлением. При помощи электродов, расположенных вдоль крыла в верхней и нижней его частях, организуется поверхностный разряд  $I$  в поперечном крылу направлении, которое в полете совпадает с направлением течения газа. Магнитное поле  $B$  создается набором последовательно расположенных катушек, охватывающих крыло или вынесенных на поверхность. При включении тока и магнитного поля пондеромоторная сила  $F_p$  будет увеличивать подъемную силу. При изменении направления тока или магнитного поля на противоположное крыло будет прижиматься вниз. Эти действия можно использовать во время взлета или посадки, что поможет снизить энергозатраты, а значит, уменьшить запасы топлива на борту и вес аппарата. Более того, очень важно, что эта МГД-добавка к подъемной силе не зависит ни от скорости полета, ни от угла атаки набегающего потока, что может существенно облегчить управление

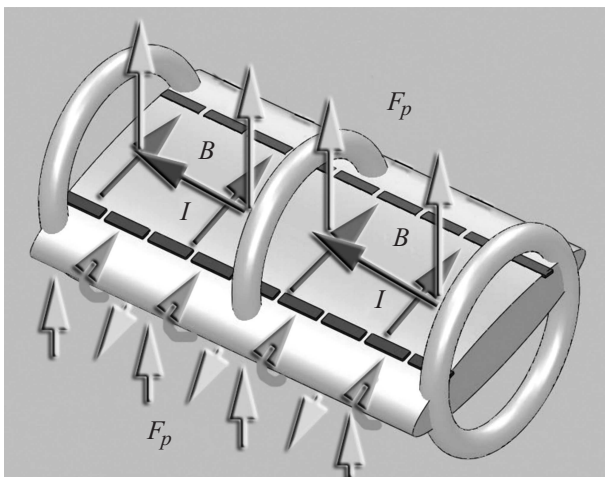


Рис. 9. Модель управляющей МГД-системы на крыле.

летающим аппаратом, например, во время внештатной ситуации превышения допустимого угла атаки, когда механические способы управления уже не работают, и позволит избежать катастрофы.

В процессе стационарного полета систему можно использовать для снижения аэродинамического сопротивления крыла. Для этого передние электроды системы, расположенные на верхней и нижней частях крыла, переключаются таким образом, чтобы создать поверхностный разряд у передней кромки крыла в направлении снизу вверх. В этом случае при включении магнитного поля газ будет отжиматься от передней части крыла пондеромоторной силой  $F_p$ , которая будет направлена от тела, что приведет к снижению сопротивления. Изменением полярности тока можно будет увеличивать аэродинамическое сопротивление летательного аппарата, например, при входе на большой скорости в плотные слои атмосферы для снижения чрезмерного нагрева поверхности аппарата.

Конечно, требуется отдельное исследование по оптимизации системы по аэродинамическим характеристикам, месторасположению, весу, энергетическим затратам, необходимости экранирования кабины от возможных наводок на систему управления и навигации самолета со стороны магнитного поля. Тем не менее идея при помощи МГД-воздействия осуществлять дополнительное увеличение или снижение подъемной силы, а также изменять аэродинамическое сопротивление крыла и носовой части является актуальной в свете создания сверхзвуковых самолетов нового поколения и необходимости быстрого действия управляющих систем.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 11-01-00455а.

### Список литературы

- [1] Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A. et al. // J. Propulsion and Power. 2005. 0748–4658. Vol. 21, N 5. P. 831–837.
- [2] Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В., Поняев С.А., Бобашев С.В. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 6. С. 78–86.
- [3] Erofeev A., Lapushkina T., Poniaev S., Bobashev S. // AIAA-2010-1382. 2010.
- [4] Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В., Поняев С.А. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 5. С. 28–34.
- [5] Kranc S., Yuen M.C., Cambel A.B. // NASA Contractor Report 1393, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., August, 1969.
- [6] Herdrich Georg, Auweter-Kurtz Monika, Fertig Markuss et al. // Vacuum. 2006. Vol. 80, N 11–12. P. 1167–1173.
- [7] Битюрин В.А., Бочаров А.Н., Попов Н.А. // ТВТ. 2010. Т. 48, № 1 (дополнительный). С. 122–131.
- [8] Su Changbing, Li Yinghong, Cheng Bangqin et al. // Chinese Journal of Aeronautics, 2010. Vol. 23. N 1. P. 22–32.
- [9] Фомичев В.П., Ядренкин М.А. // ЖТФ. Т. 83. Вып. 1. С. 152–155.
- [10] Васильев Л.А. Теневые методы. М., 1968.