

ЛОКАЛЬНОЕ МГД ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОБТЕКАНИЕ ТЕЛА СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

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

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

I. Введение

В данной работе исследуется возможность управления сверхзвуковым обтеканием тела при воздействии на параметры обтекания в приповерхностной области между отошедшей ударной волной и телом. В качестве воздействий используется электрогазодинамическое (ЭГД) воздействие, а именно вклад энергии в узкую приповерхностную область за счет организации поверхностного газового разряда, а так же магнитогидродинамического (МГД) воздействия при включении внешнего магнитного поля. В предыдущей работе [1] возможности данных воздействий на обтекание головной части тела были экспериментально промоделированы при использовании сверхзвукового потока ионизованного ксенона. Были получены экспериментальные данные, иллюстрирующие увеличение и уменьшение расстояния от ударной волны до тела при различной степени ЭГД и МГД воздействий в приповерхностной области, что происходит вследствие уменьшения или увеличения давления в области разряда между ударной волной и телом за счет нагрева газа или действия силы Лоренца.

В данной работе рассматривается обтекание тела сверхзвуковым потоком воздуха с разной степенью ионизации. Данный аэродинамический эксперимент позволяет исследовать возможность

воздействия на структуру и параметры обтекания головных частей летательных аппаратов при разных высотах и скоростях полета. Для выполнения работы используется экспериментальная установка, созданная на основе ударной трубы и задействованная в предыдущих работах [1, 2]. Полуцилиндрическое тело укрепляется на оси сверхзвукового сопла, подсоединенного к камере низкого давления. Пробка ударно сжатого в ударной трубе газа поступает в сопло, тем самым, создавая сверхзвуковой поток воздуха в области расположения тела. В установке предусмотрена возможность изменения расстояния от тела до входа в сопло, что позволяет организовывать сверхзвуковое обтекание тела воздухом с разной скоростью потока. Медные электроды, смонтированные в верхнюю и нижнюю стенки сопла, используются для предварительной ионизации набегающего потока воздуха, что позволяет организовывать поверхностный разряд у передней кромки тела при меньших разрядных напряжениях.

Рабочий режим ударной трубы выбирался из следующих соображений: достаточная для формирования стационарного обтекания длительность течения воздуха, концентрация частиц в рабочей части $N=10^{23} \div 10^{24} \text{ м}^{-3}$, при расширении в сопле температура газа T_h должна оставаться выше температуры конденсации компонентов воздуха и возможных молекулярных примесей, температура термически нагретого за

отраженной ударной волной в торце ударной трубы воздуха не должна превышать температуры, при которой происходит заметное изменение молекулярного состава воздуха. Эксперимент проводился при следующих условиях работы ударной трубы: число Маха ударной волны в ударной трубе $M_2=6.2$, начальное давление и температура рабочего газа $p_1=30$ Torr, $T_1=300$ К. В районе расположения тела $X_0=20$ см, число Маха потока $M=4.3$, $T=395$ К, $u=1.87 \cdot 10^3$ m/s, $N=5.34 \cdot 10^{23}$ m⁻³, $\rho=0.026$ kg/m³. Удвоенная кинетическая энергия потока в единице объема $\rho u^2=9.06 \cdot 10^4$ J/m³.

Основное ЭГД воздействие на картину обтекания организуется путем создания поверхностного газового разряда у передней части тела при помощи электродов, вмонтированных в стенки тела, как показано на Рис. 1.

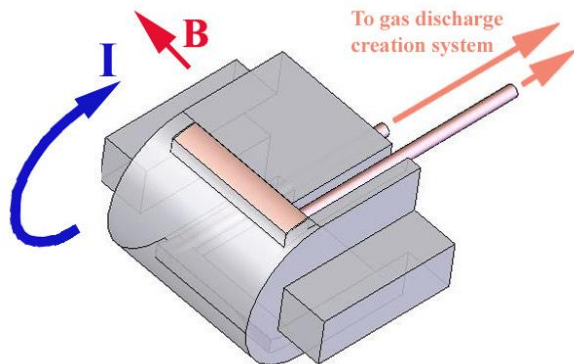


Рис. 1. Модель тела с горизонтальными электродами.

В качестве источника напряжения используется специально созданная LC-цепочка, что позволяет без дополнительных ключей организовывать приповерхностный газовый разряд различной интенсивности. Разряд замыкается при приходе ионизованного потока к телу и охватывает носовую часть тела по полукруговой траектории. Разряд занимает область пространства у тела за

ударной волной размером примерно $L=0.5\text{cm} \times l=3.5\text{cm} \times h=4.5\text{cm}$. Для организации МГД воздействий на картину обтекания дополнительно включается поперечное течению магнитное поле величиной до 1.5 Т, создаваемое при помощи катушек Геймгольца. Для визуализации течения задействована ширен система на основе полупроводникового лазера и цифровой фотокамеры.

Электрогазодинамический (ЭГД) метод воздействия на структуру сверхзвукового течения, осуществляется за счет нагрева газа электрическим полем в газовых разрядах большой интенсивности. В данной работе вклад энергии и нагрев газа производится в узкой приповерхностной области между ударной волной и передней кромкой тела, что приводит к увеличению давления газа в этой области и сдвигу ударной волны. Основная задача данной работы исследовать, как изменяется положение отошедшей ударной волны при сверхзвуковом обтекании тела воздухом при увеличении теплового параметра ЭГД воздействия (теплового параметра), а именно отношения нагрева газа в разряде к удвоенной кинетической энергии потока в единице объема $N = \frac{jE\Delta t}{\rho u^2}$. Изменение

теплового параметра производится путем увеличения интенсивности поверхностного газового разряда у передней кромки модели. В работе так же производится сравнение параметров обтекания при аналогичных ЭГД и МГД воздействиях при обтекании этой же модели сверхзвуковым потоком ксенона.

II. Экспериментальные параметры поверхностного разряда.

Характерные осциллограммы газоразрядного тока в приповерхностной

области и достигаемой при этом проводимости воздушной плазмы приведены на рисунке 2. Длительность разряда порядка 200 мкс, что соответствует длительности воздушного обтекания, фиксация шпирен картины положения ударной волны осуществляется через 100 мкс после начала разряда, что достаточно для установления стационарного обтекания [3]. Импульс свечения лазера шпирен установки соответствует нижней кривой на рис. 2.

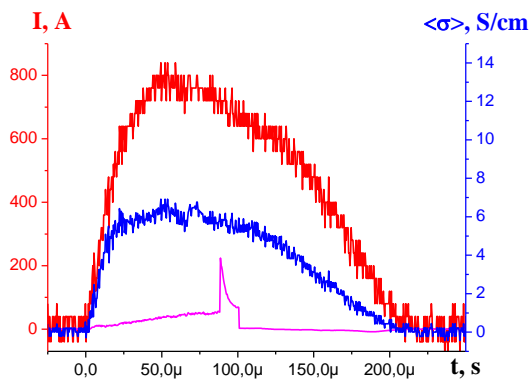


Рис. 2. Осциллограмма тока (верхняя кривая) и эффективная проводимость (средняя кривая) воздушной плазмы поверхностного разряда. Нижняя кривая – импульс диагностического лазера.

Параметры воздействующего на обтекание поверхностного газового разряда определялись экспериментально по вольт-амперной характеристике зависимости газоразрядного тока I от напряжения на разрядном промежутке V_{pl} , которая приведена на рисунке 3. Получаемая при этом средняя эффективная проводимость воздуха определялась по закону Ома для плазмы:

$$j = \langle\sigma\rangle E, \quad (1)$$

где плотность разрядного тока

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{hl}, \quad (2)$$

а напряженность электрического поля

$$E = \frac{V_{pl}}{L}. \quad (3)$$

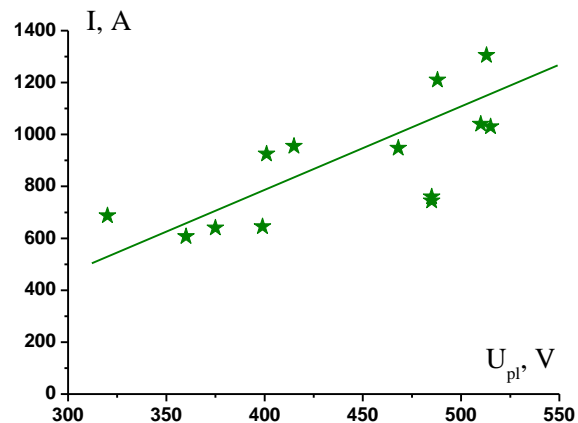


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика приповерхностного газового разряда.

Зависимость средней эффективной проводимости воздуха, получаемой у поверхности модели в разряде приведена на Рис. 4.

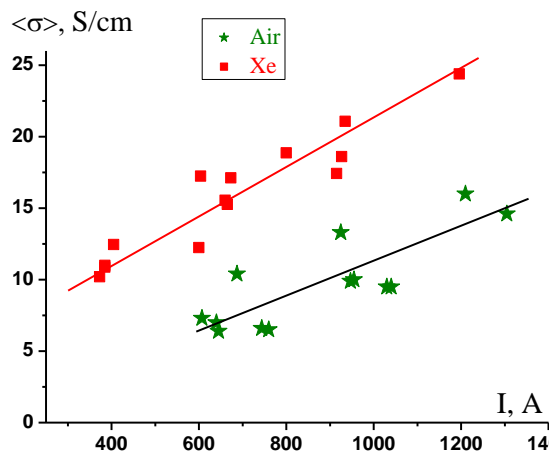


Рис. 4. Проводимость плазмы в зависимости от тока поверхностного разряда.

На этом же графике для сравнения приведена проводимость ксенона при аналогичном разряде. Средняя

концентрация электронов в разряде определялась как

$$\langle n_e \rangle = \frac{\langle j \rangle}{ev_d}, \quad (4)$$

где скорость дрейфа электронов в разряде v_d для воздуха определялась с помощью справочных данных [4] по значениям $\frac{E}{p}$.

Оценка давления газа в зоне обтекания $p=45$ Торг проводилась на основе рассчитанных по идеальной теории ударной трубы [5] относительным значениям температур торможения и плотности за отраженной ударной волной при различных значениях числа Маха падающей ударной волны M_2 , а так же по относительным значениям параметров потока в линейно расширяющемся канале, рассчитанным по изэнтропическим формулам [6]. Данные зависимости для воздуха приведены так же в работе [7]. Изменение концентрации электронов при изменении проводимости воздуха в поверхностном разряде показано на Рис. 5.

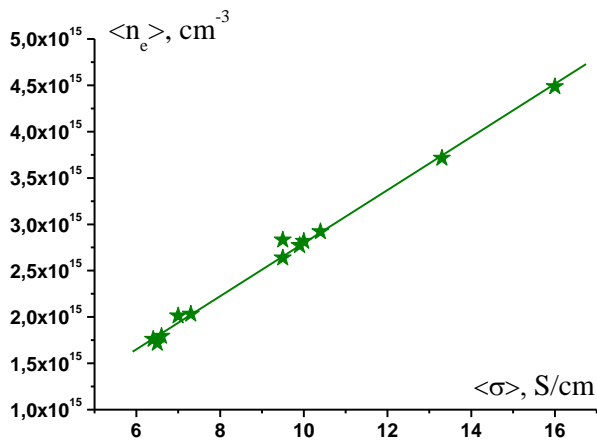


Рис. 5. Плотность электронов в разряде в воздухе в зависимости от эффективной проводимости.

Средние значения проводимости воздуха в разряде при поверхностном ЭГД воздействии порядка $\langle \sigma \rangle = 5 \div 15$ S/cm, при

этом концентрация электронов меняется в пределах $\langle n_e \rangle = 2 \div 4.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Изменение при увеличении интенсивности поверхностного разряда теплового (энергетического) параметра N , определяющего энергетический вклад в приповерхностную область разряда и степень нагрева газа при электрогазодинамическом воздействии на структуру обтекания приведено на Рис. 6.

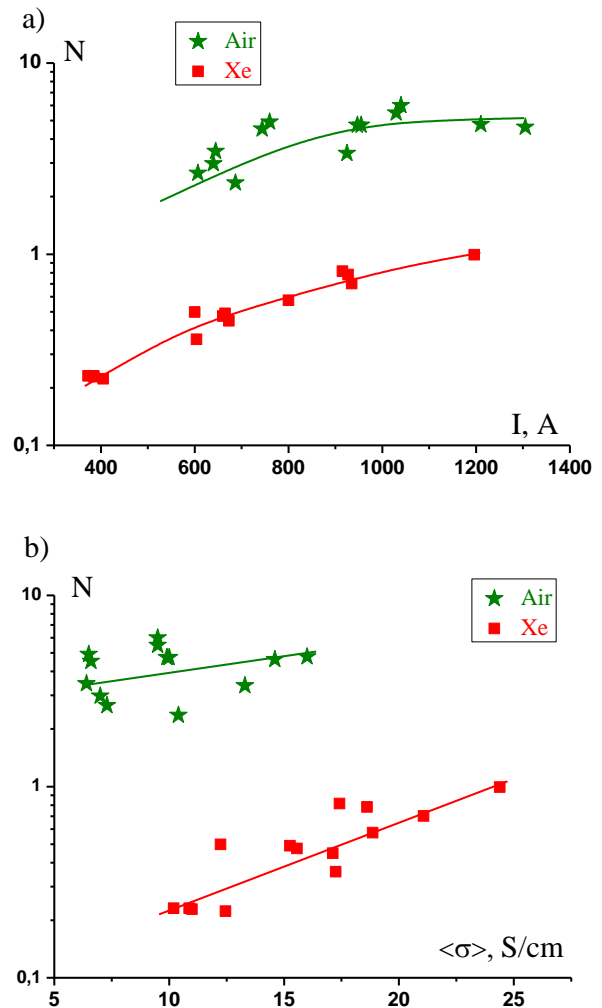


Рис. 6. Тепловой параметр в зависимости от тока и проводимости в разряде.

Рис. 6а дает представление, как меняется параметр в зависимости от газоразрядного тока, а Рис. 6б в зависимости от проводимости плазмы. Для

сравнения здесь же приведены значения параметра N для поверхностного разряда в ксеноне. Видно, что при одинаковых интенсивностях разряда значения теплового параметра в воздухе в 5 раз больше, чем в ксеноне. Это объясняется тем, что для создания интенсивности разряда, сравнимой с интенсивностью в ксеноне, в воздушном разряде необходимо увеличить напряженность электрического поля в разрядном промежутке, что приводит к увеличению теплового параметра. Интересно, что концентрация электронов в воздушном разряде слабо меняется с ростом энергетического параметра, что видно из Рис. 7.

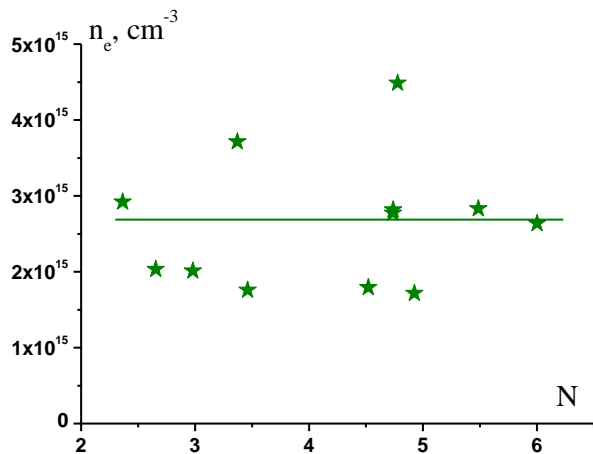


Рис.7. Плотность электронов в приповерхностном разряде в зависимости от ЭГД параметра.

III. Изменение картины обтекания при поверхностных ЭГД и МГД воздействиях.

Примеры сдвига головной ударной волны при воздушном обтекании и наличии электрогазодинамического воздействия в приповерхностной области между ударной волной и передней частью модели приведены на Рис.8. Здесь в нижней части рисунка для сравнения показана картина течения без внешних

воздействий, в верхней части приведено положение волны при наличии поверхностного разряда с разными тепловыми параметрами воздействия. Виден отход ударной волны вследствие энергетического вклада в приповерхностную область, приводящего к увеличению давления перед телом за ударной волной и сдвигу волны.

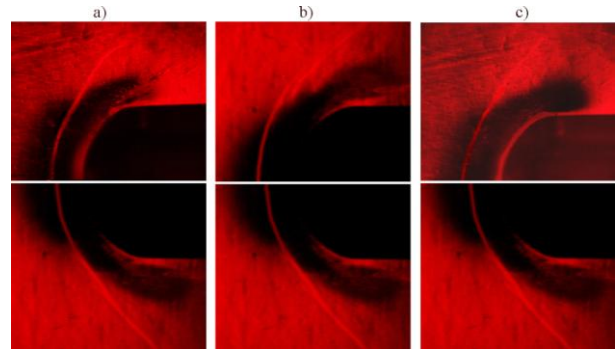


Рис. 8. Шлирен картины обтекания тела воздушным потоком при поверхностном разряде: верхняя картина наблюдается при поверхностном разряде без магнитного поля, нижняя - без каких либо внешних воздействий. а) $j=3.5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, $N=2.7$, б) $j=4.3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, $N=4.9$; в) $j=5.9 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, $N=6.0$

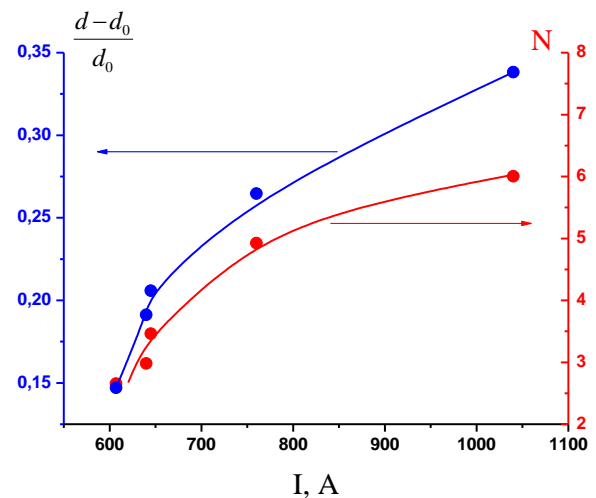


Рис. 9. Сдвиг головной волны в зависимости от тока разряда и теплового параметра.

На рисунке 9 приведен относительный сдвиг волны $\frac{d-d_0}{d_0}$ в зависимости от газоразрядного тока и теплового параметра ЭГД воздействия. Здесь d_0 расстояние от тела до ударной волны без воздействий. Видно, что при увеличении интенсивности разряда и теплового параметра увеличивается относительный сдвиг волны, головная ударная волна отходит от тела.

Полученные результаты ЭГД воздействия при обтекании воздушным потоком целесообразно сравнить с данными, полученными при обтекании этой же модели сверхзвуковым потоком ксенона [1]. Изменение положения ударной волны в данном случае исследовалось не только при осуществлении ЭГД воздействия, но так же при осуществлении магнитогиродинамического (МГД) воздействия в приповерхностной области. Для этого при организации поверхностного разряда дополнительно включалось внешнее магнитное поле. При этом на газ начинает действовать сила Лоренца, которая в зависимости от направления газоразрядного тока направлена либо по направлению от тела (рис.10а), либо к телу (рис.10б). В результате сила Лоренца отжимает или прижимает газ от тела, что приводит к увеличению или уменьшению давления в области между ударной волной и телом и изменению положения ударной волны относительно носовой части тела. В зависимости от параметра Стюарта

$$St = \frac{jBL}{\rho u^2} \quad (\text{отношения работы силы}$$

Лоренца на длине зоны взаимодействия к удвоенной кинетической энергии набегающего потока), который определяет степень воздействия силы Лоренца на картину обтекания тела, а так же в зависимости от направления газоразрядного тока в области между

ударной волной и телом было исследовано изменение картины обтекания тела и возможность не только отодвигать волну от тела, но и приближать ее относительно начального положения, чему препятствует нагрев газа или ЭГД воздействие, присутствующее при МГД воздействии.

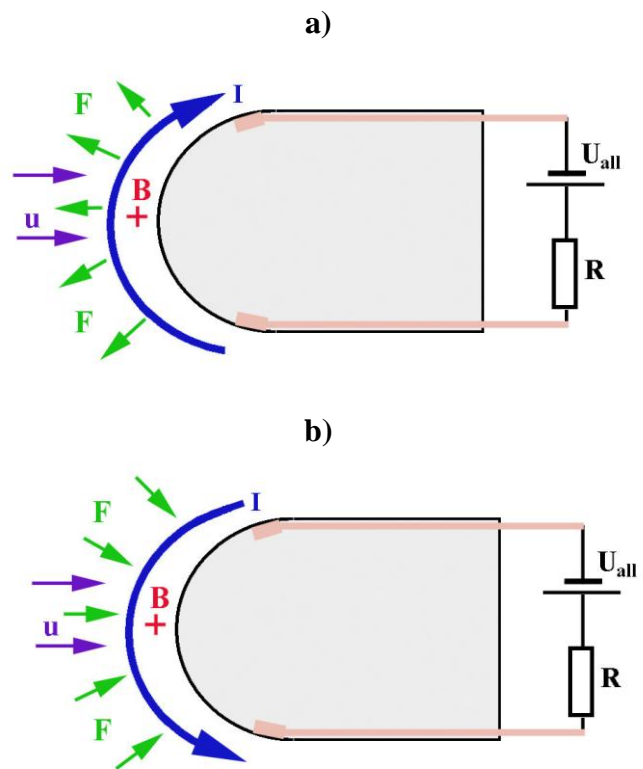


Рис. 10. Иллюстрация действия силы Лоренца (вектор F) при поверхностном газовом разряде.

- Направление тока снизу вверх, сила Лоренца отжимает газ;
- Направление тока сверху вниз, сила Лоренца прижимает газ.

На рисунках 11 и 12 приведены обобщенные данные величины относительного сдвига ударной волны в зависимости от степени ЭГД и МГД воздействия в области между ударной волной и передней кромкой тела. Рисунок 11 дает представление, как ведет себя ударная волна в зависимости от теплового

параметра только при ЭГД воздействии. Как в ксеноне (квадраты), так и в воздухе (звезды) в отсутствие магнитного поля наблюдается увеличение расстояния между ударной волной и телом при увеличении теплового параметра поверхностного разряда в области за ударной волной.

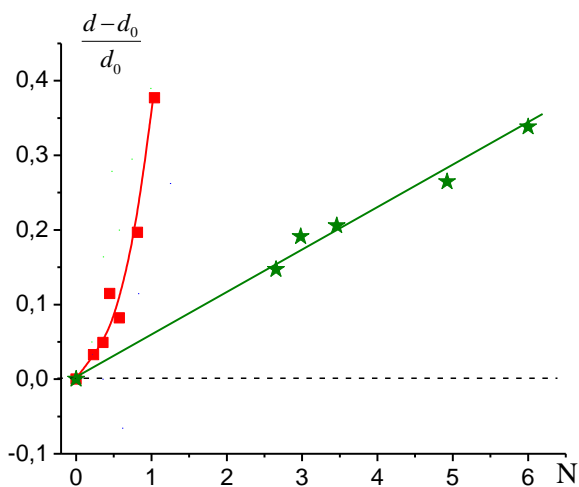


Рис. 11. Сдвиг головной волны при ЭГД воздействии: 1 - Хе, V=0 (квадраты); 2 - воздух, V=0 (звезды).

Как видно в ксеноне отход волны при увеличении энерговклада происходит гораздо быстрее, чем в воздухе. Сравнимый с ксеноном отход волны при обтекании воздушным потоком наблюдается при параметрах N в 5 раз больших, чем в ксеноне. Это значит, что для управления течением ЭГД методом при обтекании воздухом тепловой вклад должен быть в 5 раз больше, чем при обтекании ксеноном.

При МГД воздействии в приповерхностной области на параметры обтекания (Рис. 12) в ксеноне наблюдается как отход волны, так и приближение волны к телу. По мере увеличения параметра Стюарта при действии силы Лоренца в сторону тела (треугольники) наблюдается дополнительное увеличение сдвига волны

в сторону от тела. Он становится больше сдвига при отсутствии магнитного поля за счет дополнительного действия силы Лоренца.

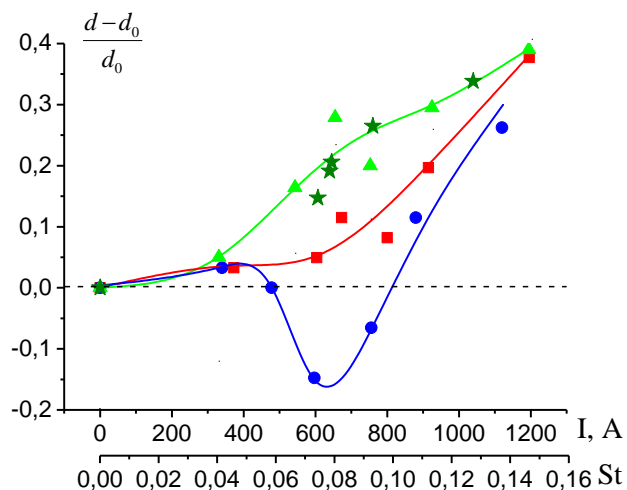


Рис. 12. Сдвиг головной волны при ЭГД и МГД воздействиях: 1 - Хе, V=0 (квадраты); 2 - Хе, V=1.4Т, Сила Лоренца направлена от тела (круги); 3 - Хе, V=1.4Т, Лоренца направлена к телу (треугольники); 4 - воздух, V=0 (звезды).

При действии силы Лоренца в противоположном направлении (круги) волна сначала отходит от тела, затем приближается к телу, затем снова отходит, когда тепловое воздействие разряда начинает превалировать над противоположным действием силы Лоренца. Относительный сдвиг волны, полученный при обтекании модели воздухом, показан на графике оливковыми звездами. Видно, что он близок по величине, полученной в ксеноне при ЭГД воздействии с дополнительным действием силы Лоренца. Это можно объяснить более сильным нагревом газа в воздухе при сравнимой интенсивности разряда.

IV. Заключение

На основании работы можно сделать вывод, что возможно управление

положением головной ударной волны летательного сверхзвукового аппарата путем энергетического вклада и МГД воздействия в приповерхностной области его носовой части, что позволяет не только увеличивать или уменьшать расстояние от тела до ударной волны, но и снижать аэродинамическое сопротивление.

Электрогазодинамическим способом волна сдвигается при организации газового разряда на поверхности передней кромки тела за ударной волной. Это тепловой способ воздействия. Отход волны от тела происходит благодаря сильному нагреву газа в разряде, который повышает давление за ударной волной и способствует сдвигу волны в сторону от тела. Меняя степень нагрева, а значит и параметр электрогазодинамического воздействия N , можно менять положение волны. В воздухе нагрев газа должен быть в 5 раз больше, чем в ксеноне.

При включении внешнего магнитного поля, ортогонального течению и току поверхностного разряда, можно осуществлять магнитогидродинамическое управление положением головной волны за счет действия силы Лоренца. При изменении направления разрядного тока на противоположное, изменяется направление действия силы Лоренца, которая будет либо прижимать, либо отжимать газ от модели, увеличивая или уменьшая давление за волной. Меняя направление газоразрядного тока и параметр МГД воздействия St можно изменять положение ударной волны как в сторону удаления от модели, так и приближать волну к телу. Одинаковый относительный сдвиг волны и в ксеноне, и в воздухе происходит при близких параметрах Стюарта.

Определенные в работе диапазоны значений энергетического параметра и параметра Стюарта, соответствующие областям наиболее эффективного ЭГД или МГД воздействия, позволяют подобрать параметры газового разряда и величину

магнитного поля для наиболее эффективного управления положением ударной волны, как в сторону увеличения расстояния до тела, так и в сторону приближения ее к телу.

Работа поддержана Грантом РФФИ № 11-01-00455а и Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракт № 02.740.11.0201).

Литература

1. A. Erofeev, T. Lapushkina, S. Poniaev and S. Bobashev. Supersonic Body Streamline at Different Configuration Gas Discharge. - *AIAA-2010-1382*, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit and 12th Weakly Ionized Gas Workshop, Orlando, Florida, Jan.4-7, 2010.
2. Т.А.Лapushkina, А.В.Ерофеев, С.А.Поняев, С.В.Бобашев. Supersonic Flow of a Nonequilibrium Gas-discharge Plasma Around a Body. - *Technical Physics*, V.54, No 6, 2009, P. 840-848.
3. S. V. Bobashev, R. V. Vasil'eva, A. V. Erofeev, T. A. Lapushkina, S. A. Ponyaev, D. M. Van Wie. Relaxation of the Shock-wave Configuration in a Diffuser After Termination of the Action of Magnetic and Electric Fields. - *Technical Physics Letters*, V.32, N2, 2006, p. 106-109.
4. Raizer, Yu.P. *Gas discharge physics*. - Springer, 2001, 449 p.
5. Сб. пер. под ред. Х.А.Рахматуллина и С.С.Семенова. *Ударные трубы*. - Иностранная Литература. Москва, 1962. 700с.
6. L. G. Loitsyanskii. *Mechanics of Liquids and Gases*. - Elsevier, Amsterdam, 1966.
7. R.V.Vasil'eva, A.V.Erofeev, B.G.Zhukov, T.A.Lapushkina, С.А.Поняев, С.В.Бобашев. Generation of a Gas-discharge Air Plasma in a Supersonic Magnetohydrodynamic Channel. - *Technical Physics*, V.54, N6, 2009, p. 829-839.