

УДК 533.6.011.55:537.84

© 2006 г. А. Б. ВАТАЖИН, М. К. ДАНИЛОВ, О. В. ГУСЬКОВ, В. И. КОПЧЕНОВ

МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫМ ОБТЕКАНИЕМ ТЕЛ: ВОЗМОЖНОСТИ И НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Рассмотрены принципиальные вопросы сверх- и гиперзвуковой магнитной газовой динамики (МГД), связанные с определением интегральных характеристик обтекаемых тел и летательных аппаратов, внутри которых находятся системы, создающие постоянное магнитное поле. С помощью численного моделирования и теоретического анализа (на основе осредненной полной системы уравнений Навье–Стокса и уравнений электродинамики) изучены три класса течений: течение в гиперзвуковом многорежимном нерегулируемом воздухозаборнике; внутреннее и внешнее течения в модели гиперзвукового летательного аппарата, содержащего воздухозаборник с МГД-генератором, камеру сгорания и сверхзвуковое сопло; гиперзвуковое обтекание затупленного конуса. Особое внимание уделено наличию дополнительной магнитной силы, действующей на создающую магнитное поле систему и, следовательно, на обтекаемый объект и вызывающей его дополнительное сопротивление (в случае летательного аппарата – снижение его тяги). Указаны привлекательные возможности МГД-управления течением – увеличение степени сжатия потока в воздухозаборнике, сокращение длины воспламенения в камере сгорания, уменьшение теплового потока в головную часть обтекаемого тела – и одновременно рассмотрены отрицательные эффекты, связанные с действием на обтекаемые объекты магнитной силы.

Ключевые слова: гиперзвуковой поток, магнитное поле, воздухозаборник, летательный аппарат, затупленный конус, сопротивление тела, тепловой поток.

В последнее десятилетие в связи с развитием гиперзвуковых технологий вновь возник интерес к использованию магнитогазодинамического (МГД) способа управления внутренними и внешними сверх- и гиперзвуковыми газодинамическими течениями [1–15]. Исследование внутренних течений показало, что с помощью магнитного поля достигается интенсивное торможение сверхзвуковых течений в каналах и, как следствие, значительное повышение статического давления [6–10]. Анализ внешних сверхзвуковых течений продемонстрировал возможность значительного снижения тепловых потоков в головные части обтекаемых тел, внутри которых находятся системы, создающие магнитное поле [13, 15].

Однако эти привлекательные эффекты сопровождаются дополнительными газодинамическими потерями. Проблема нежелательного снижения коэффициента восстановления полного давления во внутренних течениях впервые исследовалась в [7] и далее в [6, 8–10]. Внешним же МГД-течениям (обтекание тел) свойствен еще один нежелательный эффект. Он обусловлен наличием дополнительной силы, действующей на находящуюся в теле магнитную систему. Так как эта система связана с телом, указанная сила (которую в дальнейшем будем называть магнитной) действует на тело (аппарат) и увеличивает его полное сопротивление. Эта сила была рассчитана в [15] для гиперзвукового МГД-обтекания сферы потоком с параметрами, свойственными экспериментальным электроразрядным установкам. Однако обобщение этих результатов на случай движения тел более сложной формы и тем более на случай движения гиперзвукового аппарата проведено не было.

Настоящая статья посвящена систематическому анализу влияния указанной магнитной силы на интегральные характеристики гиперзвуковых аппаратов и их элементов. В

статье обсуждаются две проблемы. Первая связана с определением характеристик модельной интегрированной системы “летательный аппарат – ГПВРД” с многорежимным воздухозаборником, внутри которого установлен МГД-генератор. Важным вопросом является соотношение тяга – полное сопротивление модельного устройства. Вторая проблема – гиперзвуковое обтекание затупленного конуса при наличии дипольного магнитного поля, создаваемого токовой системой, расположенной внутри тела.

Данное исследование направлено на выяснение принципиальных закономерностей МГД-управления сверхзвуковыми течениями, поэтому предполагается, что вопрос о создании необходимой электропроводности газа уже решен. Такая постановка исследования должна ответить на вопрос: какие – положительные и отрицательные – эффекты следует ожидать при МГД-управлении течением в “идеальном” случае, когда преодолены многочисленные технические проблемы.

1. Физико-математическая модель. Магнитогазодинамическое течение описывается полной осредненной системой уравнений Навье–Стокса с включенными в нее МГД силой $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ и плотностью энергии \mathbf{jE} . Здесь \mathbf{j} , \mathbf{E} и \mathbf{B} – векторы плотности электрического тока, электрического и магнитного полей. Эти уравнения дополняются однопараметрической моделью турбулентности и электродинамическими уравнениями.

В большинстве рассматриваемых приложений магнитное число Рейнольдса намного меньше единицы, и распределение магнитного поля \mathbf{B} считается заданным и удовлетворяющим уравнениям $\text{rot}\mathbf{B} = 0$, $\text{div}\mathbf{B} = 0$. Электродинамические уравнения имеют вид

$$\begin{aligned} \text{rot}\mathbf{E} = 0 \quad (\mathbf{E} = -\nabla\varphi), \quad \text{div}\mathbf{j} = 0 \\ \mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \alpha\mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad \alpha = \frac{e}{m_e v'} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Здесь φ – электрический потенциал, σ – электропроводность газа, e и m_e – заряд и масса электрона, v' – частота столкновений электрона с другими частицами. Уравнения (1.1) преобразуются к одному эллиптическому уравнению относительно φ [15].

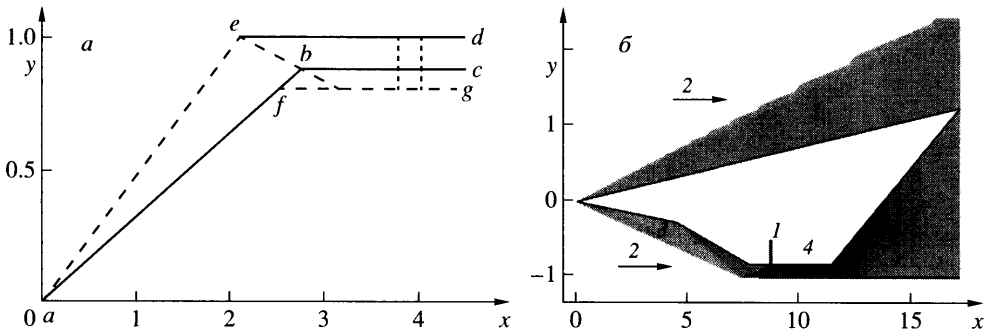
Основные безразмерные МГД-параметры: параметр МГД-взаимодействия $S = \sigma B^2 l / \rho u$, параметр Холла $\beta = eB / m_e v'$ и параметр электрической нагрузки $K = E / uB$. Здесь используются характерные значения величин, l – характерная длина. Параметры β и K характеризуют анизотропию проводимости газа и устройство внешней электрической цепи.

В рассматриваемых приложениях электрическая система, создающая магнитное поле, расположена внутри тела. При наличии МГД-взаимодействия, как указывалось выше, возникает магнитная сила, действующая на эту систему, а следовательно, и на тело. Полная действующая на тело сила сопротивления определяется выражением [15]

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2, \quad \mathbf{F}_1 = \int_{\Sigma} \mathbf{Pn} d\Sigma, \quad \mathbf{F}_2 = - \int_V (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) dV \quad (1.2)$$

Здесь \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 – действующие на тело газодинамическая и магнитная силы, V – часть области течения, в которой $\mathbf{j} \neq 0$, Σ – поверхность тела, \mathbf{P} – тензор гидродинамических напряжений, состоящий из шарового тензора гидродинамического давления и тензора вязких напряжений, \mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности тела. Сила \mathbf{F}_2 также равна интегралу по поверхности тела от величины $\mathbf{P}_B \mathbf{n}$, где \mathbf{P}_B – тензор магнитных напряжений. Эта же сила равна интегралу по объему тела от величины $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$, где ток и магнитное поле вычисляются во внутренних точках тела. Все приведенные выражения эквивалентны, но приведенное в (1.2) наиболее удобно для вычислений.

Для решения рассматриваемых в статье задач (сверхзвуковое течение в плоском канале воздухозаборника и сверхзвуковое обтекание осесимметричных тел) используется



Фиг. 1. Схемы воздухозаборника (а), летательного аппарата с ГПВРД (б): место установки МГД-генератора в воздухозаборнике (1), область внешнего гиперзвукового течения (2), области течения между ударной волной и телом (3), в камере сгорания (4), в сверхзвуковом сопле (5); размеры по осям в метрах

двумерный вариант указанных выше газо- и электродинамических уравнений. Их анализ проводится с помощью следующих численных методов. Полная система уравнений Навье–Стокса с источниковыми МГД-членами решается на основе оригинальной вычислительной программы [16, 17], в которой используются итерации по времени и неявная, повышенного порядка точности, версия схемы Годунова [18]. (Ранее эта программа применялась при исследовании торможения сверхзвуковых потоков в каналах магнитным полем. Дополнительная модификация этого кода для учета возникновения азимутальной скорости при обтекании тел в случае анизотропной проводимости газа проведена в [15].) Результирующая программа обеспечивает второй порядок точности стационарного решения на регулярных и сохранение аппроксимации на произвольных нерегулярных сетках. Использование неявной схемы позволяет провести эффективную адаптацию сетки при расчете пограничных слоев и слоев смешения и обеспечить быструю сходимость к стационарному решению. Включение эллиптического уравнения для электрического потенциала ϕ в единую расчетную схему осуществляется путем искусственного введения в него нестационарного релаксационного члена, преобразующего его в параболическое уравнение. Такой метод искусственной замедленной релаксации изложен в [15].

Ниже представлены результаты численного моделирования сверхзвуковых МГД-течений и анализа интегральных характеристик (с учетом всех, включая магнитную, сил) следующих устройств: гиперзвукового воздухозаборника; модели летательного аппарата с гиперзвуковым прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ГПВРД), в нерегулируемом воздухозаборнике которого установлен МГД-генератор; затупленного конуса.

2. МГД-гиперзвуковой многорежимный нерегулируемый воздухозаборник. Простейшая модель гиперзвукового многорежимного нерегулируемого воздухозаборника a - f - g - d - e показана на фиг. 1, а [14]. Положение обечайки (точка e) согласуется с положением ударной волны, образующейся на клине с углом 15° при числе Маха набегающего потока $M = 10$. Число Рейнольдса, определенное по параметрам набегающего потока и размеру 1 м, равно 10^6 . Расчетным воздухозаборником при $M = 10$ является конфигурация a - b - c - d - e . Высота горла для конфигурации a - f - g - d - e больше, чем для a - b - c - d - e , и поэтому воздухозаборник a - f - g - d - e может быть запущен (в его канале устанавливается сверхзвуковой режим течения) при $M = 3$. При числе Маха полета $M = 10$ в таком воздухозаборнике около точки f возникает конфигурация волн Прандтля–Майера, и давление в канале воздухозаборника уменьшается. Для парирования этого нежелательного эффекта в канале воздухозаборника a - f - g - d - e устанавливается МГД-генератор. (Его положение по-

казано на фиг. 1, а двумя вертикальными штриховыми линиями.) Такой воздухозаборник далее называется “комбинированным воздухозаборником” – сжатие газа в нем осуществляется во внешней ударно-волновой системе и в МГД-генераторе.

Структура векторных полей в комбинированном воздухозаборнике в области МГД-генератора имеет следующий вид

$$\mathbf{V} = (0, 0, V(x)), \quad \mathbf{E} = (E_x, E_y, 0), \quad \left(E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y} \right) \quad (2.1)$$

$$\mathbf{v} = (u, v, 0), \quad \mathbf{j} = (j_x, j_y, 0)$$

При численном моделировании течения предполагалось, что функции $V(x)$ и $\delta\varphi(x)$ (где $\delta\varphi(x)$ – распределение вдоль канала разности потенциалов между его стенками) заданы и подобны друг другу. Эти функции являются постоянными величинами на большей части канала МГД-генератора и быстро уменьшаются до нуля вблизи его входного и выходного сечений.

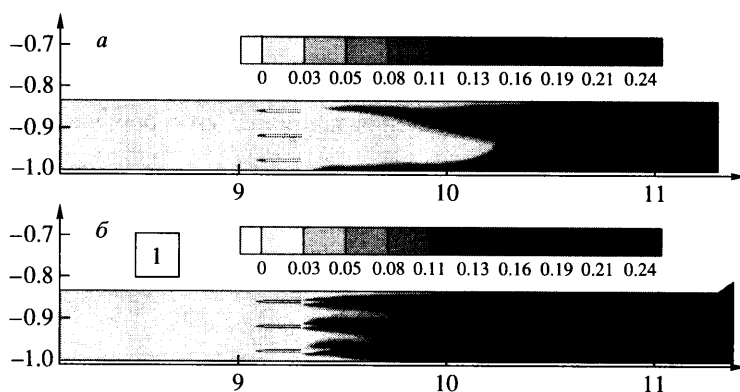
Результаты [14] совместного решения уравнений Навье–Стокса и уравнений (1.1) и (2.1) были получены при изменении S , β и K в диапазонах: $0 \leq S \leq 5$, $0 \leq \beta \leq 5$ и $0 \leq K \leq 1$. Величины σ и α предполагались постоянными.

Степень повышения давления p/p_0 в комбинированном воздухозаборнике достаточно высока и при $\beta = 0$, $K = 0$, $S = 5$ составляет 61 [14]. (Здесь индекс “0” соответствует параметрам набегающего потока.) Коэффициент восстановления полного давления p^*/p_0^* уменьшается с ростом параметра МГД-взаимодействия и при указанных выше условиях равен 0.02. (При тех же условиях, но $\mathbf{V} = 0$, величины p/p_0 и p^*/p_0^* равны 35 и 0.0586.) Магнитное поле оказывает наиболее сильное влияние на течение при $K = 0$: отношение p/p_0 монотонно уменьшается с увеличением K .

Положительный МГД-эффект увеличения давления в воздухозаборнике сопровождается двумя отрицательными факторами. Первый из них – отмеченное выше уменьшение коэффициента восстановления полного давления. Это может отрицательно сказаться на тяговых характеристиках устройства. Второй фактор – возрастание полной силы сопротивления устройства \mathbf{F} (1.2). На основе численного моделирования вязких внешнего и внутреннего течений в комбинированном воздухозаборнике определены суммарная действующая на него сила и составляющие этой силы. При $S = 5$, $K = 0.3$ и $\beta = 0$ магнитная сила, силы давления и вязкое трение составляют 52, 41 и 7% от полного сопротивления соответственно. Вклад магнитной силы оказывается наибольшим. Это подчеркивает необходимость более тщательного анализа интегральных характеристик летательных аппаратов, в которых используется МГД-управление течением. Такой анализ проводится ниже.

3. Модель летательного аппарата с ГПВРД и МГД-управлением течением в воздухозаборнике. Схема двумерного модельного аппарата с многорежимным двухскачковым воздухозаборником представлена на фиг. 1, б. Длина летательного аппарата и высота входного сечения канала воздухозаборника составляют 17 и 1 м соответственно. Высоты каналов воздухозаборника и камеры сгорания постоянны и одинаковы.

Расчетный режим – это полет аппарата на высоте 36 км с числом Маха $M = 12$ под нулевым углом атаки. Старт же аппарата происходит при значительно меньшем числе Маха, поэтому воздухозаборник имеет большую, по сравнению с расчетным режимом, площадь горла (ее относительная величина равна 0.1675). В результате этого в угловой точке контура на входе в воздухозаборник возникает волна разрежения и для компенсации снижения в ней давления ниже по потоку в тракте воздухозаборника устанавливает-



Фиг. 2. Распределение массовой концентрации паров воды в камере сгорания: при отсутствии магнитного поля (*а*), при наличии в воздухозаборнике МГД-генератора (*б*): положение МГД-генератора (*1*); размеры по осям в метрах

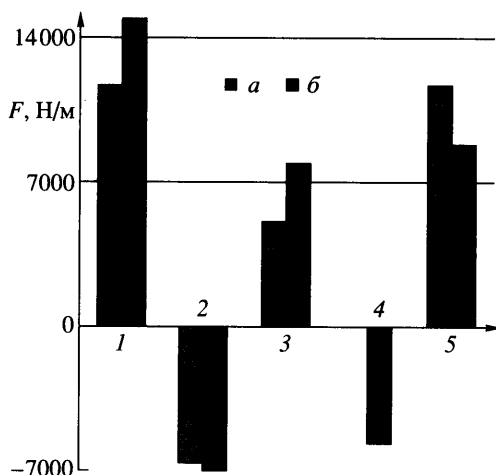
ся МГД-генератор, в котором в результате торможения сверхзвукового потока происходит повышение давления (см. разд. 2).

Рассматривается плоская модель ГПВРД с камерой сгорания постоянного сечения, инжекция водорода в которую осуществляется с помощью трех пилонов. Коэффициент избытка воздуха равен 0.5. Сопло устройства имеет простейшую форму и обеспечивает расширение потока до внешнего давления с учетом дополнительного поджата потока около аппарата.

С помощью численного моделирования определялось поле течения внутри (воздухозаборник, камера сгорания, сопло) и вне летательного аппарата. Расчеты проводились при $M = 12$ и наличии или отсутствии МГД-генератора в тракте воздухозаборника. Для расчета течения в ГПВРД использовалась разработанная в ЦИАМ вычислительная программа, основанная на полной двумерной системе уравнений Навье–Стокса с учетом неравновесной химической кинетики горения водородо-воздушной смеси.

Ниже представлены некоторые полученные данные. Результаты расчета поля давления внутри и вне летательного аппарата представлены на фиг. 1, *б*, где увеличение интенсивности цвета соответствует увеличению давления. Результаты моделирования процессов горения приведены на фиг. 2, где показано пространственное распределение в камере сгорания массовой концентрации паров воды при отсутствии и при наличии МГД-генератора (фиг. 2, *а* и *б* соответственно). Пары воды – основные продукты сгорания водородо-воздушной смеси. При отсутствии горения их концентрация равна нулю, по мере его развития она нарастает по длине камеры сгорания. Без МГД-управления течением (фиг. 2, *а*) имеется значительная задержка воспламенения. Она практически исчезает при включении генератора, что связано с повышением температуры и давления до и после пилонов в камере. За каждым из пилонов, через которые в сверхзвуковой поток горячего воздуха истекает сверхзвуковая струя водорода, осуществляется диффузионное горение: отчетливо видны развивающиеся слои смешения и горения, которые смыкаются на оси пилонов. Далее зоны горения заполняют все сечение камеры сгорания. (Специальные расчеты, проведенные при еще большем перерасширении горла воздухозаборника и соответственно меньшем сжатии потока, когда горение при $\mathbf{V} = 0$ характеризуется очень большой длиной задержки воспламенения, показали, что включение МГД-генератора позволяет зажечь смесь.)

Диаграмма сил, действующих на летательный аппарат и рассчитанных при $S = 3$, $K = 0$, $\beta = 0$ показана на фиг. 3. Сила давления (1) равна сумме интегралов по внутренней

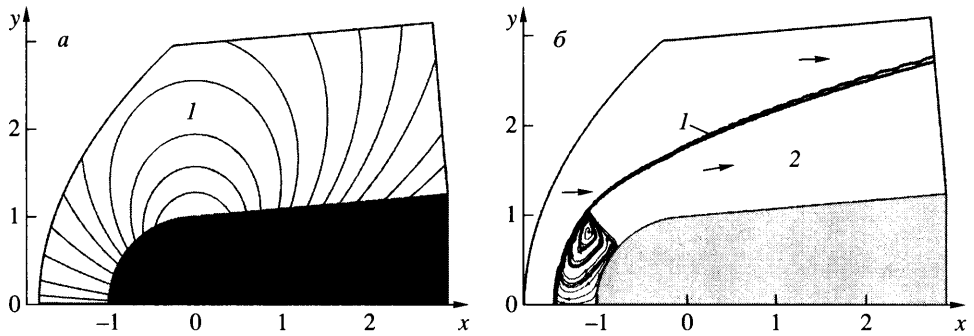


Фиг. 3. Силы, действующие на единицу размаха летательного аппарата без МГД-воздействия (*a*), с МГД-воздействием (*б*): 1 – сила газодинамического давления; 2 – сила трения; 3 – сумма сил 1 и 2; 4 – магнитная сила; 5 – полная сила, действующая на аппарат (эффективная тяга)

и внешней поверхностям летательного аппарата от величины $-p_n$, спроектированной на направление набегающего потока. Сила трения (2) учитывает вклад вязких сил на внутренней и внешней поверхностях и на поверхностях пилонов в сопротивление аппарата. Сила (3) равна сумме сил (1) и (2). Магнитная сила (4), являющаяся силой F_2 (1.2), спроектированной на направление набегающего потока, дает основной вклад в сопротивление аппарата. И, наконец, сила (5), равная сумме всех предыдущих сил и собственных импульсов водородных струй, представляет собой эффективную тягу летательного аппарата.

Наличие МГД-управления приводит к заметному увеличению силы давления (1) при незначительном изменении силы трения (фиг. 3). Это вызвано увеличением уровня давления в тракте ГПВРД вследствие торможения потока в МГД-генераторе, поэтому газодинамическая составляющая (3) суммарной, действующей на аппарат, силы, обеспечивающая его тягу, при наличии магнитного поля возрастает. Однако имеется тормозящая аппарат МГД-сила F_2 , непосредственно действующая на систему, создающую магнитное поле, а следовательно, на аппарат в целом, которая значительно перекрывает выигрыш (за счет МГД-воздействия) в газодинамической силе. Обратим внимание на важное обстоятельство.

Вообще говоря, ожидалось гораздо большее, по сравнению с фиг. 3, увеличение силы (1) при наличии магнитного поля. Это не произошло по следующей причине: при наличии МГД-генератора в тракте воздухозаборника горение в камере происходит при более высокой температуре, в результате чего в реагирующей смеси более интенсивно нарабатываются радикалы, идут процессы диссоциации и возбуждения внутренних степеней свободы элементов. При расширении продуктов сгорания в достаточно коротком сопле физическое и химическое равновесие не успевает установиться, и это сказывается на силе (1). Улучшению ситуации не помогает и увеличение параметра МГД-взаимодействия S : согласно расчетам, рост тяги аппарата не происходит. Объяснение этого результата состоит в замораживании в сопле еще большего количества наработанных в



Фиг. 4. Обтекание затупленного конуса гиперзвуковым потоком ($M = 12$, $Re = 1000$): расчетная область (а): линии магнитного поля (1); линии холловских токов в меридиональной плоскости при $S = 10$, $\beta = 10$, $K = 0$ и варианте 3 задания электропроводности (б): ударная волна (1), сжатый слой газа (2); x , y – координаты, отнесенные к радиусу затупления

камере сгорания при большей температуре неравновесных параметров. Сделанный вывод остается верным и при других значениях параметров K и β .

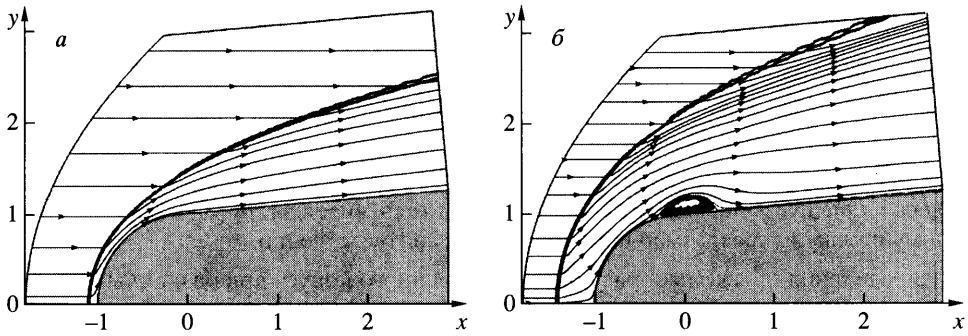
Таким образом, в рассмотренном примере МГД-управление течением позволило существенно сократить длину воспламенения смеси, повысить степень сжатия газа в воздухозаборнике, но не привело к положительному результату по характеристике “эффektivная тяга летательного аппарата”.

4. Гиперзвуковое МГД-обтекание затупленного конуса. Обтекание затупленного конуса со сферической головной частью (фиг. 4, а) рассматривалось при $M = 12$, $Re = 1000$ и отношении температуры поверхности к температуре торможения набегающего потока, равном 0.34. Магнитное поле создается расположенным внутри тела магнитным диполем. Электропроводность газа задается кусочно-постоянной функцией в фиксированной области течения за ударной волной. Рассматриваются три варианта задания безразмерной электропроводности: 1) $\sigma = 1$ во всей области за ударной волной; 2) $\sigma = 1$ в области между ударной волной и сферической головной частью тела и $\sigma = 0.3$ в области между ударной волной и конической частью тела; 3) $\sigma = 1$ и $\sigma = 0$ в областях за ударной волной, примыкающих к сферической и конической частям тела соответственно. Структура векторных МГД-полей для рассматриваемого течения имеет вид

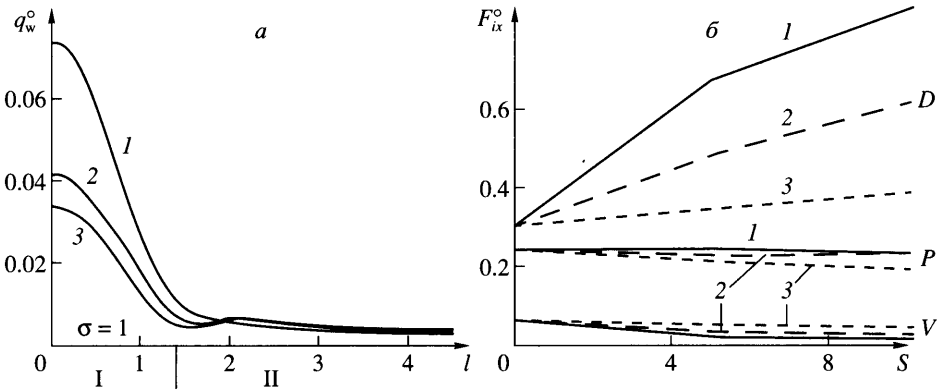
$$\mathbf{v} = (u, v, w), \quad \mathbf{E} = (E_x, E_y, 0), \quad \mathbf{j} = (j_x, j_y, j_\theta), \quad \mathbf{B} = B_*(b_x, b_y, 0) \quad (4.1)$$

где (x, y, θ) – цилиндрические координаты. Нормальная компонента вектора плотности электрического тока на всех границах расчетной области для электрических величин полагается равной нулю. Задаются все параметры набегающего потока. Система уравнений характеризуется двумя безразмерными параметрами: S и β . Если эффект Холла отсутствует, то токи j_x, j_y и азимутальная скорость w равны нулю. Расчеты были проведены на основе полной осредненной системы уравнений Навье–Стокса, соотношений (1.1) и (4.1).

Взаимодействие магнитного поля с проводящим газом вызывает отход головного скачка в сторону набегающего потока. Это приводит к уменьшению градиентов всех газодинамических параметров в ударном слое. В результате трение и тепловой поток на поверхности тела уменьшаются.



Фиг. 5. Линии тока газа при гиперзвуковом обтекании затупленного конуса ($M = 12$, $Re = 1000$): $B = 0$ (а); $B \neq 0$ (б); $S = 10$, $\beta = 0$, $K = 0$, вариант 1 задания электропроводности



Фиг. 6. Распределение плотности теплового потока вдоль образующей затупленного конуса при варианте 1 задания электропроводности (а): $S = 0, 5, 10$ (линии 1–3); l – отнесенная к радиусу затупления длина дуги вдоль образующей; I – сфера, II – конус. Зависимости действующих на затупленный конус сил сопротивления D , давления P , трения V от параметра МГД-взаимодействия S (б): 1–3 – варианты задания электропроводности

Численное моделирование проводилось при $K = 0$ и различных значениях параметров S и β . При наличии анизотропии проводимости появляются токи, протекающие в меридиональной плоскости и показанные на фиг. 4, б (для $S = 10$, $\beta = 10$ и варианта 3 задания электропроводности газа). Результаты расчета полей скорости при $\mathbf{V} = 0$ представлены на фиг. 5, а, а при $\mathbf{V} \neq 0$, параметрах $S = 10$, $\beta = 0$ и варианта 1 задания электропроводности – на фиг. 5, б. На этой фигуре отчетливо видны значительный отход ударной волны от тела и формирование в ударном слое рециркуляционной зоны вследствие МГД-торможения потока. Рециркуляционная зона в случае варианта 3 задания электропроводности не образуется, так как отсутствуют электрические токи и, следовательно, МГД-торможение газа ниже по потоку от сферической части тела.

Были рассчитаны локальные тепловые потоки q_w в затупленный конус, проекция на ось x полной действующей на него силы и составляющие F_{ix} этой силы. В безразмерном виде они представляются в форме

$$F_{ix} = 2\pi r^2 \rho_\infty u_\infty^2 F_{ix}^\circ, \quad q_w = \rho_\infty u_\infty^3 q_w^\circ \quad (4.2)$$

Здесь r – радиус головной сферической части тела, индексы “ ∞ ” и “ \circ ” относятся к свободному потоку и к безразмерным параметрам соответственно.

Распределения q_w° вдоль образующей затупленного конуса при различных значениях параметра S в случае $\beta = 0$ показаны на фиг. 6, а. Существенно, что тепловой поток на фронтальной поверхности тела с увеличением магнитного поля значительно уменьшается. Наличие слабого максимума в распределении теплового потока на поверхности конуса ниже по потоку от его сферической части для варианта 1 обусловлено присоединением потока к поверхности за рециркуляционной зоной (фиг. 5, б).

Составляющие полной силы (1.2), действующей на затупленный конус, представлены на фиг. 6, б. Силы давления и трения уменьшаются при воздействии на поток магнитного поля, но магнитная составляющая сопротивления тела оказывается значительной. Это цена положительного эффекта уменьшения теплового потока в тело. Данные на фиг. 6, б показывают, что наиболее перспективна ситуация, когда электропроводность отлична от нуля только в окрестности сферической части конуса (окрестности затупления). В этом случае снижается тепловой поток, но полная сила сопротивления оказывается не столь значительной вследствие того, что отсутствует вклад в магнитную силу области, расположенной ниже по потоку от сферической части тела.

В заключение заметим, что обусловленные магнитным полем оба эффекта – уменьшение теплового потока в тело и увеличение его сопротивления – одинаково желаемы в проблеме возвращения космических аппаратов в атмосферу планет.

Заключение. На основе выполненных теоретических и численных исследований сверх- и гиперзвуковых МГД-течений проведено сопоставление возможностей улучшения с помощью магнитного поля интегральных характеристик обтекаемых тел и летательных аппаратов (повышение степени сжатия газа во внутренних каналах, снижение теплового потока в лобовую поверхность обтекаемых тел) с “ценой”, которую надо заплатить за эти положительные эффекты. С газодинамической точки зрения, эта цена складывается из дополнительных необратимых потерь во внутренних течениях (уменьшение коэффициента восстановления полного давления) и дополнительной магнитной силы, действующей на расположенную в теле систему, создающую магнитное поле, и следовательно, на само тело.

Указанное сопоставление положительных и отрицательных МГД-эффектов проведено для трех газодинамических объектов: гиперзвукового многорежимного нерегулируемого воздухозаборника, гиперзвукового летательного аппарата с ГПВРД и обтекаемых гиперзвуковым потоком затупленных конусов.

С помощью установленного в канале воздухозаборника МГД-генератора удалось (при изотропной проводимости, параметре МГД-взаимодействия $S = 5$, параметре нагрузки $K = 0$) увеличить степень сжатия потока в воздухозаборнике с 35 до 61. При этом коэффициент восстановления полного давления уменьшился с 0.0586 (при отсутствии поля) до 0.02. Магнитная сила оказалась значительной: она вносит основной (больше 50%) вклад в сопротивление воздухозаборника.

При использовании такого воздухозаборника на летательном аппарате с ГПВРД происходит увеличение уровня давления и температуры в камере сгорания, сокращение в ней длины воспламенения; но очень большая величина магнитного сопротивления не позволяет увеличить эффективную тягу аппарата.

Локальные и интегральные тепловые потоки в затупленный конус (так же как в ранее рассмотренной задаче о гиперзвуковом обтекании сферы) при наложении магнитного поля значительно уменьшаются. Однако за счет появления магнитной силы еще сильнее возрастает полное сопротивление конуса. Это возрастание становится менее заметным в ситуации, когда электропроводность газа отлична от нуля только в области затупления.

Работа проводилась при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 04-01-00775) и гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (НШ-1635.2003.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bityurin V.A., Zeigarnik V.A., Kuranov A.L.* On a perspective of MHD technology in aerospace applications // AIAA Paper. 1996. № 96–2355.
2. *Gurijanov E.P., Harsha Ph.T.* AJAX: New directions in hypersonic technology // AIAA Paper. 1996. № 96–4609.
3. *Фрайштадт В.Л., Куранов А.Л., Шейкин Е.Г.* Применение МГД систем на гиперзвуковых летательных аппаратах // Журн. техн. физики. 1998. Т. 68. № 11. С. 43–47.
4. *Brichkin D.I., Kuranov A.L., Sheikin E.G.* MHD-technology for scramjet control // AIAA Paper. 1998. № 98–1642.
5. *Bityurin V.A., Bocharov A.N., Lineberry J.T.* MHD aerospace applications // Proc. Int. Conf. on MHD Power Generation and High Temperature Technologies. Beijing PRC, 1999. V. 3. P. 793–814.
6. *Ватажин А.Б., Гуськов О.В., Копченов В.И.* Особенности торможения двумерного гиперзвукового потока проводящего газа в каналах в режиме генерирования электроэнергии // Тр. Мат. ин-та им. В.А. Стеклова. 1998. Т. 223. С. 153–162.
7. *Ватажин А.Б., Гуськов О.В., Копченов В.И., Лихтер В.А.* К проблеме торможения проводящего сверхзвукового потока в каналах с магнитным полем // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 5. С. 169–181.
8. *Vatazhin A.B., Gouskov O.V., Kopchenov V.I.* The investigation of supersonic flow deceleration by magnetic field // Proc. Intern. Conf. on MHD Power Generation and High Temperature Technologies. Beijing PRC, 1999. V. 3. P. 875–882.
9. *Vatazhin A.B., Kopchenov V.I.* Problem of hypersonic flow deceleration by magnetic field // Progr. Astronaut. and Aeronaut. 2000. V. 189. P. 891–938.
10. *Vatazhin A., Kopchenov V., Gouskov O.* Numerical investigation of hypersonic inlets control by magnetic field // The 2nd Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics in Aerospace Applications. Moscow: Institute High Temperature of RAS (IVTAN), 2000. P. 56–63.
11. *Губанов Е.В., Лихачев А.П., Медин С.А., Фортвов В.Е.* МГД-эффекты, обусловленные гиперзвуковым движением цилиндрического тела в магнитосфере планеты при перпендикулярной ориентации образующей и магнитного поля // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 5. С. 155–163.
12. *Bruno C., Czysz P.A.* Magneto-hydrodynamic coupled ramjet propulsion system: A perspective // Int. Soc. Air Breathing Eng. 2001. № 2001–1230.
13. *Lineberry J.T., Bityurin V.A., Botcharov A.N., Baranov D.S., Vatazhin A.B., Kopchenov V.I., Gouskov O.V., Alfiorov V.I., Boushmin A.S.* Cylinder with current in hypersonic flow // Proc. 3rd Workshop on Magneto-plasma Aerodynamics in Aerospace Applications. Moscow: Inst. High Temperature of RAS (IVTAN), 2001. P. 15–25.
14. *Ватажин А.Б., Гуськов О.В., Данилов М.К., Копченов В.И.* Исследование возможности магнетогидродинамического управления течением в гиперзвуковых воздухозаборниках // Аэромеханика и газовая динамика. 2002. № 2. С. 3–15.
15. *Биторчин В.А., Ватажин А.Б., Гуськов О.В., Копченов В.И.* Обтекание головной сферической части тела гиперзвуковым потоком при наличии магнитного поля // Изв. РАН. МЖГ. 2004. № 4. С. 169–179.

16. *Gouskov O.V., Korpchenov V.I., Nikiforov D.A.* Flow numerical simulation in the propulsion elements of aviation-space systems within full Navier-Stokes equations // Proc. Int. Conf. Methods of Aerophysical Research. Novosibirsk. 1994. Pt 1. P. 104–109.
17. *Топеха Е.А., Копченков В.И.* Неявная релаксационная конечно-разностная схема для системы уравнений Навье–Стокса // Методы исследования гиперзвуковых летательных аппаратов: Сб. докл. ежегодной научной Школы-семинара ЦАГИ “Механика жидкости и газа”, 1992 г. М.: ЦАГИ, 1994. Ч.3. С. 9.1–9.10.
18. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

Москва
vatazhin@ciam.ru

Поступила в редакцию
28.VII.2005