

На правах рукописи

ЛАПУШКИНА Татьяна Алексеевна



**ВОЗДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО И
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ НА УДАРНО-
ВОЛНОВУЮ КОНФИГУРАЦИЮ В ДИФФУЗОРЕ**

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.

Санкт-Петербург

2005

Работа выполнена в лаборатории физической газодинамики
Физико-технологического института им. А.Ф.Иоффе РАН

Научный руководитель: старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук
Васильев Ринс Васильевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Николай Иванович Ахитов

доктор технических наук,
профессор Владислав Леонидович Горачев

Ведущая организация: Военная инженерно-космическая академия
имени А.Ф.Можаевского

Защита состоится « 7 » Июня 2005г. в 16 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д212.229.07 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский
Государственный Политехнический Университет» по адресу: 195251, Санкт-
Петербург, Политехническая ул. д.29, корп.1, кафедра гидродинамики

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ
ВПО «Санкт-Петербургский Государственный Политехнический
Университет»

Автореферат разослан « 28 » апреля 2005г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Защита Д.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Работы, связанные с проблемой создания гиперзвуковых летательных аппаратов, привели к возникновению новых направлений фундаментальных исследований. Одно из них – магнитогазодинамическое (МГД) воздействие на структуру и параметры сверхзвуковых потоков, содержащих скачки уплотнения. Этому направлению исследований посвящена и данная работа.

Работа кандидатом наук [1] по разработке проекта аэрокосмического аппарата нового поколения, летящего на гиперзвуковых скоростях ($M=4-8$), которая впервые была предложена в Санкт-Петербургском научно-производственном объединении «Ленвиз» и сейчас интенсивно разрабатывается многими научными коллективами. Одной из важнейших проблем сверхзвуковой аэродинамики является регулировка положения скачков уплотнения, возникающих в полете на входе в воздуховодящий. При изменении высоты и скорости полета летательного аппарата, положение скачков меняется, при этом меняется полное давление в воздуховодящем и расход кислорода при сгорании топлива. Система выходит из расчетного режима и возникает необходимость вернуть скачки в исходное положение. Регулировка входных устройств путем изменения геометрических параметров становится затруднительной при гиперзвуковых скоростях, к тому же требует относительно больших затрат времени. Поэтому возникает необходимость разработки новых методов управления течением. Одним из перспективных методов в данном направлении является управление предвременно ионизованным сверхзвуковым потоком при помощи МГД метода.

Цель работы. Основная цель работы исследовать возможность изменения ударно-волновой конфигурации в виде двух присоединенных скачков уплотнения, возникающей на входе в сверхзвуковой диффузор с полным внутренним поджатием потока, при помощи МГД метода. Главная задача эксперимента - выявить основные закономерности влияния внешних магнитного и электрического полей на положение входных присоединенных скачков и найти способ наиболее эффективного приложения внешних воздействий.

Научная новизна работы. До сих пор практически все исследования МГД взаимодействия проводились для расширяющихся МГД каналов, где начальное течение было непрерывным и не содержало диссипативных структур. В данной работе взаимодействие происходит в сверхзвуковом потоке при наличии скачков уплотнения с целью повлиять на их положение с помощью воздействия на поток магнитного и электрического полей. Это существенно дополняет магнитную газодинамику и расширяет сведения о

возможности изменения структуры ударно-волновых конфигураций при помощи внешних воздействий.

Новизна работы так же обусловлена тем, что некоторые гидродинамические аспекты взаимодействия сверхзвукового потока с магнитным и электрическими полями исследуются при использовании в экспериментах в качестве рабочего вещества потока ионизованного инертного газа.

Разработан и создан новый экспериментальный стенд, включающий в себя МГД канал с секционированными электродами и системами генерации магнитного и электрического полей. Он позволяет проводить исследования в широкой области параметров течения и степени внешнего воздействия на поток.

Разработана и создана новая высокоскоростная оптическая щелевая система, позволяющая получать до 150 щелевых-картин быстротекущих процессов в прозрачных средах со скоростью до 2 мкс.

Впервые продемонстрирована возможность управления при помощи поворотно-угловой системы наклона присоединенных сканов уплотнения в сверхзвуковом потоке слабоионизованного газа.

Разработана новая методика измерения температуры и концентрации электронов плазмы инертных газов. Проведены измерения температуры и концентрации электронов при разных значениях протекающего тока.

Достоверность и надежность результатов. Работа наглядно демонстрирует возможность изменения ударно-волновой конфигурации при помощи МГД метода. Достоверность полученных результатов обеспечивается путем использования для исследования современных средств измерения и воспроизводимостью результатов, а так же путем сравнения результатов с расчетными данными других авторов.

Научная и практическая значимость. Получены новые данные о возможности изменения структуры течения и ударно волновых конфигураций при взаимодействии сверхзвукового потока с внешними магнитным и электрическим полями. Так как в работе получены данные об МГД взаимодействии в сверхзвуковом диффузоре соотносятся с основными критериями подобия, такими как число Маха, параметр Стоурта, параметр теплового воздействия, коэффициент загрузки, параметр Холла, полученные данные могут быть использованы для моделирования течения в аналогичных сверхзвуковых каналах с другими рабочими газами, в частности для моделирования течения в воздуховоздушниках, а так же при разработке новых расчетных моделей.

Технические параметры экспериментального стенда и универсальность предложенных методик визуализации структуры течения и определения основных электрофизических параметров плазмы позволяют проводить

аналогичные исследования как научного характера, так и решать конкретные инженерные задачи в области взаимодействия ионизованных сверхзвуковых потоков с внешними полями.

Подожения, выносимые на защиту,

1. Разработка и создание МГД канала с секционированными электродами и системами генерации магнитного и электрического полей с широкой областью параметров течения и степени внешнего воздействия на поток.
2. Разработка и создание оптической системы для осуществления высокоскоростной щелевой съемки щелевых картин быстротекущих процессов в прозрачных средах.
3. Демонстрация на опыте возможности изменения угла наклона присоединенных сканов при помощи внешних магнитного и электрического полей.
4. Обнаружение в торсионном режиме трех типов МГД взаимодействия, которые различаются гидродинамическими структурами, возникающими при различной величине магнитной индукции.
5. Результаты исследования изменения ударно-волновой конфигурации при приложении электрического и магнитного полей к различным участкам диффузора и определение коллоидного участка диффузора, как области, где внешние воздействия на ударно-волновую конфигурацию наиболее эффективны.
6. Методика и результаты измерений концентрации и температуры электронов, эффективной и объемной проводимостей плазмы инертного газа, движущейся в сверхзвуковом диффузоре при наложении внешних полей.
7. Определение положения «узкого места» в пространстве энергетических уровней, обеспечивающего механизм ионизации, для коэионовой плазмы средних температур.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- International Conference on MHD Power Generation and High Temperature Technologies 1999, Beijing, October 12-15, 1999
- The 2nd Workshop On Magneto-Plasma- Aerodynamics In Aerospace Applications, IVTAN, Moscow, April 5-7, 2000.
- The 3rd Workshop On Magneto-Plasma- Aerodynamics In Aerospace Applications, IVTAN, Moscow, April 24-26, 2001.
- 32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 4th Weakly Ionized Gases Workshop, Anaheim, CA, 2001.

- 33rd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 14th International Conference on MHD Power Generation and High Temperature Technologies Maui, Hawaii, USA, 2002.
- 11th AIAA/AAAF International Conference Space Flases and Hypersonic Systems and Technologies, Orleans, France, 2002.
- The 4th Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics for Aerospace Applications. IVTAN, Moscow, 9-11 April, 2002.
- 41st Aerospace Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2003.
- IV International Conference Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, September 15-19, 2003.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 16 научных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, шести Глав, Заключение и Списка цитированной литературы из 95 наименований. Общий объем работы составляет 189 страниц, в том числе 87 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность и выдвигаются основные цели исследования воздействия внешнего магнитного и электрического полей на ударно-волновые конфигурации, приводятся краткое содержание работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **Первой Главе** дается краткий обзор литературы, посвященной исследованиям в области магнитной газодинамики плазмы и проблемы управления сверхзвуковыми потоками. Отмечается, что разработке данной проблемы посвящены в основном теоретические работы, так как экспериментальные исследования достаточно энергоемкие и требуют значительную материальную и техническую экспериментальную базу, а так же хороший исследовательский опыт в изучении подобного рода задач. Здесь же описываются принцип работы магнетогидродинамического генератора [2].

Использование воздуха в качестве рабочего газа затруднительно вследствие его быстрой рекомбинации при расширении и необходимости досоперательной ионизации. Поэтому было предложено для исследований использовать инертные газы, ксенон и криптон, которые имеют вследствие особенностей процессов ионизации и рекомбинации инертных газов [3] относительно медленную скорость рекомбинации, что позволяет сохранять предварительно созданную ионизацию и иметь на выходе из сопла проводимость порядка 300-400 См/м, достаточную для МГД экспериментов. Таким образом, мы моделируем течение в воздушнолаборанке по основным критериям подобия, используя при этом инертные газы. В конце Главы

даются основные критерия подобия взаимодействия потока плазмы с магнитным и электрическим полями, по которым возможно моделирование течения в аналогичных диффузорах при использовании других газов в качестве рабочего вещества. В частности возможно использование результатов работы для моделирования течения в воздушнолаборанке.

В **Главе 2** описывается экспериментальная МГД установка, созданная на основе расчетов течений проводящего газа в сверхзвуковых конических устройствах с использованием простейших физических моделей. Схема установки приведена на рис.1.

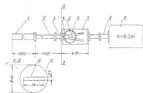


Рис.1. Схема установки:
 1 – камера высокого давления;
 2 – камера низкого давления;
 3 – измерительная секция;
 4 – ускоряющее сопло;
 5 – оптическое стекло;
 6 – модель диффузора;
 7 – вакуумная камера;
 8 – сопло;
 9 – дестабильный банк;
 10 – критическое сечение сопла;
 11 – изолирующее сечение ударной трубы.

Основными блоками установки являются ударная труба (1,2,3), используемая для создания сверхзвукового потока низкотемпературной плазмы и вакуумная рабочая камера (7) с отражающим сверхзвуковым соплом (4) и моделью однооскатного диффузора (6) с набором вмонтированных электродов. Вакуумная камера выполнена из органического стекла и отделяется от измерительной секции (3) дисковой диафрагмой толщиной 0,12мм. В боковые стенки вмонтированы оптическое стекло (5), диаметром 200мм и толщиной 20мм.

Установка снабжена системами генерации магнитного и электрического полей, приводятся подробное описание схем их создания. Поперечное течение импульсное магнитное поле создается разрядом батарей конденсаторов через катушки Геймгольца, расположенные соосно по бокам камеры.

Более подробная схема рабочей камеры приведена на рис.2. Детали сопла и диффузора выполнены из органического стекла, электроды из латуны. Отклонение критического сечения ускоряющего сопла к поперечному сечению трубы равно 0,107, угол раствора 11°. Стенка расширения сверхзвуковой части сопла 6.7. При этом по расчету для идеального

нелетящего газа число Маха на среде сопла $M_0=4.3$. Выходное сечение сопла $37 \times 38 \text{ мм}^2$, длина 81 мм. Модель диффузора отстоит от среда сопла на расстоянии 5 мм. Выходное сечение диффузора $32 \times 38 \text{ мм}^2$. Стенки диффузора по отношению к горизонтальной поверхности наклонены на $5^\circ 30'$. Длина суживающейся части 65 мм.

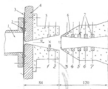


Рис.2. Схема рабочей камеры.

- 1 - ударная трубка;
 - 2 - вакуумные уплотнения;
 - 3 - ленточная диафрагма;
 - 4 - стенки вакуумной камеры;
 - 5 - сопло;
 - 6 - диффузор;
 - 7 - электроды.
- a и b - направления скорости потока и магнитной индукции. Размеры указаны в миллиметрах.

Ударно сжатый в ударной трубке газ, тормозится в торце трубы, термически ионизируется, а затем через входную щель поступает в сопло, а затем в диффузор, где и происходит исследование. Исследуемая ударно-волновая конфигурация - два присоединенных сопла, которые возникают на входе в диффузор. В стенке сопла и диффузора размещены ленточные электроды. При движении ионизованного газа в канале в поперечном магнитном поле возникает электродвижущая сила (ЭДС) $e = v \times b$ (b - расстояние между электродами), разделяющая заряды в противоположных направлениях. При замыкании тока через электроды на поток будет действовать поперечномоторная сила F_{\perp} , изменяющая скорость потока, при этом будет меняться положение присоединенных сопелок.

В главе приводятся оценки основных параметров плазмы за отраженной ударной волной и на среде сверхзвукового сопла. На их основе проводится оптимизация и выбор экспериментальных режимов для изучения воздействия магнитного поля на сверхзвуковой поток слабоионизованной плазмы инертных газов. Выбор основных гидродинамических режимов был сделан, исходя из потребности иметь сравнительно большую длительность квазистационарного истечения и при этом достичь наиболее сильного МГД взаимодействия. Основные параметры течения (рабочей) газа, давление p , температура T и плотность газа d , температура электронов T_e , степень ионизации α и проводимость σ плазмы, скорость потока на среде сопла v_0 , и так же значение максимально возможной электродвижущей силы e_{max} основного экспериментального режима, сведены в следующей Таблице 1.

Р	Камера с вакуумной щелью	Камера вакуумной длина	За отраженной ударной волной				На среде сопла								
			T_e °K	d кг/м ³	α	σ См/м	M_0	$T_{\text{ср}}$ °K	d_0 кг/м ³	v_0 См/сек	$v_{\text{ср}}$ м/сек	$d_{\text{ср}}$ м			
С	M_0	21	Ne	30	8	9400	1.85	0.05	3400	4.3	2950	1.127	640	1550	70

Этот режим характерен осуществлением условия слабой контактной поверхности, что обеспечивает максимальное время истечения порядка 500 нс.

В Главе 3 подробно описываются основные методики исследования течения в сверхзвуковом диффузоре. Предварительное исследование волноватых характеристик показало, что вследствие большой приповерхностной и пристеночной слоев в данной конфигурации диффузора невозможно замыкание магнитондущированного тока. Так, необходимым для МГД экспериментов практически отсутствует. Поэтому исследования проводятся как при наличии внешнего магнитного, так и внешнего электрического полей. Правда такой подход имеет и некоторые преимущества, так как дает более широкие возможности для исследований, в частности исследовать не только тормозящее, но и ускоряющее действие поперечномоторной силы, что невозможно при замыкании только магнитондущированного тока, когда поперечномоторная сила работает только на торможение.

Внешнее электрическое поле создавалось путем разряда специально сделанных длинных дуг и электродную щель, состоящую из межосевого плазменного пропускника и сопротивлений нагрузки. Схема подключения внешнего напряжения и направление действия поперечномоторной силы при описанном замыкании тока, когда анодом является верхний электрод, приведены на рис.3-а. При таком замыкании ток от внешнего напряжения совпадает по направлению с магнитондущированным током, поперечномоторная сила действует на торможение потока. Если ток направлен в противоположную сторону, как показано на следующей рис.3-б, поперечномоторная сила работает на ускорение потока. Аналогичным образом возможно подключение любого количества электродов в разных областях диффузора. Возможно замыкание как поперечного, так и продольного тока. Эквивалентная схема подключения магнитондущированного ЭДС и внешнего напряжения и закон Ома для такой цепи показана на рис.3-с. При МГД взаимодействии сумми ЭДС и внешнего напряжения F падает на внутреннем сопротивлении плазмы $R_{\text{вн}}$ и сопротивлении нагрузки R_n .

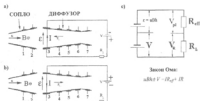


Рис. 3. а) Схема поперевого подключения электродов в торковом режиме; б) Схема поперевого подключения электродов в ускоряющем режиме; в) Эквивалентная схема подключения и закон Ома

В главе подробно описываются методы определения основных электрических и физических параметров плазмы, а так же способы визуализации ударно-волновых структур. На рис.4 представлена схема канала с указанным основным методом исследования.



Рис. 4. Схема канала с указанным основным методом диагностики течения.

Описываются процессы определения вольт-амперных характеристик по измерению разности потенциалов на электродах V_{ep} и на сопротивлении нагрузки R_n , определению пространственного распределения потенциала, для чего в боковые стенки диффузора в районе входной пары электродов были смонтированы точечные электроды, разности потенциалов между которыми так же измерялись. Описывается методика определения эффективной и объемной проводимости, а так же температуры и концентрации электронов.

Схема созданной для визуализации структуры течения шаррен системы показана на рис.5. Данная система позволяет получить до 150 шаррен картин течения в одном эксперименте со скоростью до 2 мкс. Отдельной задачей данной работы было совершенствование шаррен системы со стандартной высокоскоростной камерой ВСК-5. При этом была изменена входная часть камеры для того, чтобы полностью исключить кадр светом от внешнего источника, и в то же время иметь четкое изображение исследуемого объекта в плоскости регистрирующей фотопленки. В качестве просветляющего источника света использовался модифицированный источник Подмошанского с длительностью свечения 500 нс, соответствующей длительности источника рабочего газа. На рис.5-б приведена шаррен-картина течения в отсутствие внешних воздействий. Это исходное положение просветляемых сканов.

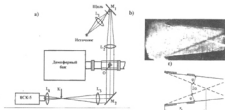


Рис.5. а) Схема шаррен системы с просветляющей системой. Объективы: L_1 ($F=70$ мм, $d=50$ мм); L_2 ($F=120$ мм, $d=80$ мм); L_3 ($F=120$ мм, $d=80$ мм); L_4 ($F=110$ мм, $d=80$ мм), θ - исследуемый объект, K - линза; б) Шаррен-картина течения; в) Схема входной части высокоскоростной камерной в отсутствие внешних воздействий.

На рис.5-с приведена схема расположения сканов и показаны параметры, которые мы использовали для характеристика степени изменения положения сканов. Это расстояние X_0 от входа в диффузор до точки пересечения сканов, угол θ_0 , под которым встречаются сканов и угол наклона сканов к стенке диффузора φ . Исходное положение сканов при $\varphi = 15.5^\circ$, $\theta_0 = 42^\circ$, $X_0 = 42$ мм. Так при торможении потока будет уменьшаться расстояние X_0 , увеличиваться углы α и φ . При ускорении будет обратное изменение этих параметров.

В Главе 4 основное внимание уделим задаче разделения процессов, происходящих в объеме газа и в пристеночных областях и исследованию влияния пристеночных эффектов на течение и диффузию. Приводятся экспериментально измеренные вольтамперные характеристики течения, распределение электрического потенциала внутри плазменного промежутка, данные по величине приэлектродного падения потенциала и эффективной проводимости плазмы.

На рис.6-а представлена вольтамперная характеристика для входной пары электродов, полученная в отсутствие магнитного поля при варьировании внешнего напряжения. Здесь же показана зависимость эффективной проводимости от протекающего тока. Видно, что проводимость растет с ростом тока. Вольтамперная характеристика и эффективная проводимость при наложении магнитного поля величиной 1,3 Т представлена на рис.6-б. Оказалось, что добавление магнитогидродинамической ЭДС не приводит к увеличению тока, эффективная проводимость становится меньше. Это происходит вследствие неидеальности электродов и эффекта Холла, а так же из-за увеличения при МГД толщины пристеночного слоя.

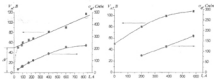


Рис. 6. а) Вольтамперная характеристика и эффективная проводимость в отсутствие магнитного поля; б) Вольтамперная характеристика и эффективная проводимость при МГД взаимодействии, $B=1.3T$.

Примеры распределения потенциала в межэлектродном промежутке для разных токов показаны рис.7. Резкий излом распределения показывает приэлектродное падение потенциала. Величина приэлектродного падения потенциала порядка 50-60 В, что сравнимо с величиной магнитогидродинамической ЭДС, поэтому и невозможно было замыкание только магнитогидродинамического тока. Видно, что при наложении магнитного поля приэлектродные падения потенциала растут.

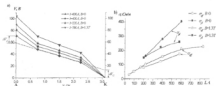


Рис.7. а) Распределение потенциала в межэлектродном промежутке при разных токах и поле; б) Проводимость в ядре потока и эффективная проводимость в зависимости от протекающего тока.

График на рис.7-б показывает сравнение эффективной проводимости плазмы и проводимости в ядре потока без магнитного поля и при МГД взаимодействии. Проводимость в ядре потока выше эффективной и растет с ростом тока. Наложение магнитного поля снижает проводимость.

В эксперименте так же были измерены температура и концентрация электронов. Для этого была проведена серия спектральных измерений при помощи спектрографа Ocean Optics 2000. Температура измерялась по спектру сплошного излучения в ультрафиолетовой области спектра. Вследствие особенностей расположения энергетических уровней инертных газов, интенсивность сплошного свечения в ультрафиолетовой области можно описать экспоненциальной формулой $I_{\lambda} = C \frac{n_e}{\sqrt{T_e}} e^{-\frac{b}{T_e}}$, где n_e и T_e - электронная

концентрация и температура, C - некоторая постоянная, ν - частота излучения, b и k - постоянные Планка и Больцмана соответственно. Если прологарифмировать это выражение, видно, что логарифмы отклонения интенсивностей на двух частотах ν_1 и ν_2 в ультрафиолетовой области будет характеризовать электронную температуру: $T_e = \frac{b}{k \ln \left(\frac{I_{\nu_1}}{I_{\nu_2}} \right)}$. При этом

концентрация электронов будет определяться выражением $n_e = \frac{1}{C} (I_{\nu_1})^{\frac{1}{k}} (T_e)^{\frac{1}{k}} e^{\frac{b\nu_1}{kT_e}}$.

В качестве эталона свечения для определения спектральной чувствительности спектрографа и определения абсолютных значений интенсивности использовалось свечение пробки ударно сжатого в ударной трубе газа при известных и хорошо изученных режимах течения. Измеренные экспериментально и теоретически значения температуры и

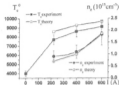


Рис. 5. Температура и концентрация электронов, уточнен для средней температур поперечное сечение в заперечном пространстве уровней, которое согласно теории Биберамана определяет скорость ионизации плазмы на мере увеличения нагрева поперечное сечение сжимается в область более низких энергетических уровней, что приводит к увеличению скорости ионизации. Это позволяет поддерживать процесс ионизации в расширяющемся потоке и обеспечить на входе в диффузор степень ионизации и проводимость плазмы, достаточные для проведения МГД экспериментов.

В Главе 4 для выбранных экспериментальных режимов приводятся визуализированные картины течения, полученные при осуществлении МГД-взаимодействия в различных областях диффузора. Следует отметить, что основными факторами, влияющими на структуру потока при воздействии внешних полей, является работа пondersомоторной силы, которая либо тормозит, либо ускоряет сверхзвуковой поток в зависимости от направления тока, а так же джоулев нагрев газа во внешнем и магнетондукционном электрическом полях, который всегда приводит к торможению сверхзвукового потока. При совместном действии этих силового и теплового факторов будет формироваться картина течения.

В качестве параметра, характеризующего силовое воздействие, нами был выбран параметр Стоунга, это отношение работы пondersомоторной силы на длине зоны взаимодействия L к кинетической энергии потока на входе (ρ - плотность тока, ρ_0 и v_0 - начальные плотность и скорость газа): $S = \frac{IL}{\rho_0 v_0^2}$. За тепловой параметр воздействия было принято отношение выделяющейся за время взаимодействия джоулева тепла к кинетической энергии потока (k - коэффициент нагрузки): $N = \rho_0 \cdot 4\pi R^2 \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{I^2}{\rho_0 v_0^2}$. Эти параметры используются при оценке эффективности внешних воздействий.

концентрации электронов, взятые из [4], показаны на рис. 5. Видно хорошее совпадение теории и эксперимента и рост температуры и концентрации электронов с ростом тока вследствие единственного нагрева электронов.

Анализ спектральных исследований позволил так же

Более эффективным мы считаем такое воздействие, которое при неизменных силовом и тепловом параметре приводит к более сильному изменению поперечного сечения сканов.

В первой серии экспериментов поперечный ток в тормозном режиме замыкался в определенных областях диффузора. Следует отметить, что направление, подаваемое на электроды, было подобрано так, чтобы плотность тока во всей зоне взаимодействия была одинакова. На рис. 9-а представлены ширен картины течения и расфокуска ударно-волновой конфигурации, когда поперечный ток замыкался через все пары электродов, выходящих в диффузор. Длина зоны взаимодействия $L=90$ мм.

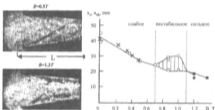


Рис. 8. а) Ширен картины течения при взаимодействии во всем диффузоре ($I=0.8 \cdot 10^4$ А, $J_{ext}=7 \cdot 10^4$ А/м 2); б) Положение поперечных проводящих сканов в скане МГД порозоната. Круги и квадраты - изображения, кресты - расчет [4].

Уже при наложении небольшого магнитного поля $B=0.5T$ по сравнению с картиной в отсутствие полей (рис. 5-б), виден сдвиг сканов, увеличился угол наклона сканов относительно стенок диффузора, точка пересечения сканов сместилась до величины 13мм. Пристеночный слой хорошо различим на ширен-грамме и стал значительно толще по сравнению с картиной в отсутствие воздействий (рис. 5-б). Его толщина вдоль канала увеличивается. Качественно эту картину можно назвать слабым МГД взаимодействием, положение сканов изменилось, но отражение их друг от друга остается регулярным. В результате совместного действия электрического и магнитного полей при $B=1.3T$ картина течения существенно меняется. Вместо пересечения сканов мы видим образование прямого скане МГД торможения, порождающего сверхзвуковое течение в дозвуковом. Это типичный случай сильного МГД взаимодействия. Однако

картина сильно осложнена развитым пристеночным слоем, его толщина выросла по сравнению со слабым МГД взаимодействием.

На рис.9-б представлен график зависимости расстояния до точки пересечения скачков от величины магнитной индукции. Анализируя ударно-волновую конфигурацию в зависимости от степени МГД взаимодействия можно выделить три типа МГД взаимодействия: слабое, когда уменьшается расстояние X_s , но отражение остается регулярным; сильное, когда в ядре потока образуется скачок МГД торможения и обнаружено неустойчивое МГД взаимодействие, когда положение точки пересечения скачков нестабильно, по-видимому вследствие образования локальных дозвуковых зон. Естественно, что для проблемы управления положением присоединенных скачков на сильной, или нестабильный тип МГД взаимодействия не подойдет, поэтому последующие исследования мы проводили для режимов, когда отражение скачков остается регулярным.

Чтобы попытаться разобраться, как эффективнее воздействовать на положение скачков, рассмотрим их изменение при локализации тока в определенных областях диффузора. На рис.10-а показана структура течения, когда поперечный ток в торцовом режиме замыкался по всем диффузору за исключением входной пары электродов. Несмотря на то, что длина зоны взаимодействия в этом случае достаточно велика $L=70$ мм, силовой и тепловой вклад в поток большой, как при наличии только электрического поля, так и при МГД взаимодействии нет заметного смещения скачков, X_s остается равным примерно 41мм, видно лишь их небольшое искривление и рост пристеночного слоя, причем его рост начинается с области начала протекания тока.

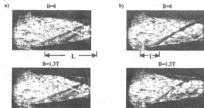


Рис.10. а) Взаимодействие в диффузоре без входной части; $J_{\text{ток}}=7.10^4 \text{ А/м}^2$;
 б) Взаимодействие во входной части диффузора; $J_{\text{ток}}=3.8 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$

В противоположность этому случаю, для случая, когда поперечный ток в торцовом режиме подается лишь на входную пару электродов, несмотря на значительно меньшую зону взаимодействия $L=20$ мм, как видно из рис.10-б, уже при замыкании тока без наличия магнитного поля, вследствие только джоулева нагрева наблюдается какое-то увеличение углов наклона присоединенных скачков, точка пересечения приближается к входу в канал, X_s увеличивается до 37мм. Так же заметно увеличение пристеночного слоя, начиная от самого входа в диффузор. При МГД взаимодействии расстояние X_s еще увеличивается, и хорошо видны широкие пристеночные слои.

В Таблице2 представлено сравнение силовых и тепловых параметров для этих двух замыканий тока.

Таблица 2

Взаимодействие в диффузоре	Si	N	X_s , мм
Без входной части	0.18	0.22	41
Во входной части	0.04	0.06	32

Как видно при замыкании тока без входной части, несмотря на большой силовой и тепловой вклад в поток, МГД взаимодействие слабее влияет на положение присоединенных скачков, чем при подключении тока только во входной части диффузора. Это можно объяснить тем, что зона взаимодействия в первом случае относительно плотно заполнена диссипативными структурами, здесь находится присоединенные скачки, скачки, отраженные от стенок. Тогда как входная часть диффузора в основном занята непрерывным течением. Можно сделать предположение, что для воздействия на потоки со скачками требуются большие энергетические затраты. Таким образом, для того, чтобы локальное воздействие на поток было эффективным, это воздействие следует прикладывать во входной части диффузора. Поэтому естественно продолжить исследования взаимодействия с магнитным и электрическим полем, когда оно локализовано в короткой входной части диффузора и попытаться не только затормозить поток, но и ускорить, то есть уменьшить углы наклона скачков, тем самым продемонстрировать возможность управления их положением.

На рис.11 показаны примеры явлений картин, полученных при одном и том же токе $J=5000 \pm 50 \text{ А}$. Первая картина получена в отсутствие магнитного поля. Видно уменьшение X_s и увеличение углов φ и α вследствие торможения потока за счет джоулева нагрева газа. Далее показана картина течения при МГД взаимодействии в режиме МГД тормоза, где видно еще более сильное торможение и еще большее изменение положения скачков.

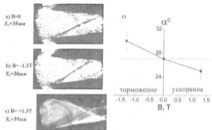


Рис. 11. а), б), в) Шаберн картины течения; г) Изменение угла раскрытия проводящих скатков при изменении направления магнитной индукции.

Последняя картина демонстрирует ударно-волновую структуру, образующуюся при МГД взаимодействии в режиме МГД ускорения. Видно, что по сравнению с картиной в отсутствие внешних полей ускорения не произошло, так как торможение вследствие джоулева нагрева оказалось сильнее, чем ускорение под действием подеромоторной силы. Однако, если сравнить эту картину с картиной течения при наложении только электрического поля, видно, что подеромоторная сила ослабила действие джоулева нагрева.

Представленный график на рис. 11-г демонстрирует это ускорение действие подеромоторной силы. Здесь отмечен угол α в зависимости от магнитной индукции для проводящих трех режимов, причем принято, что если подеромоторная сила направлена на торможение, магнитная индукция отрицательна, если на ускорение - положительна. Горизонтальная линия - угол в отсутствие магнитного поля. Основательно этой величины при торможении угол увеличился, при ускорении уменьшился.

Далее в этой же главе в зависимости от соотношения внешнего поля и магнитондуцированного ЭДС выделены области, где в торможении или ускорении потока основную роль играет действие подеромоторной силы, а так же области, где доминирует торможение потока вследствие джоулева нагрева газа. Границы, отделяющие эти области, получены из дельта-анализа упрощенки обращения воздействий, которой связывает число Маха

потока с аддитивным действием магнитного и электрического полей [5]. Анализ экспериментально полученных зависимостей положения присоединенных скатков в этих областях показал, что при МГД взаимодействии при наложении внешнего электрического поля и в ускоряющих и тормозящем режимах заметное действие оказывает джоулев нагрев газа.

Следующий способ локального воздействия на поток приведен на рис.12. В этом случае продольный ток протекает в пристеночной области на присоединенных скатках между 3-им и 4-ым электродами, как показано на схеме на рис.12-а.

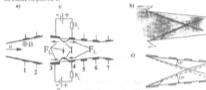


Рис. 12. а) Схема подключения внешнего тока; б) Шаберн-картина течения, $I=400/50$ А, $B=1.3T$; в) Схема расположения присоединенных скатков.

Стрелками показаны направления тока и действия подеромоторной силы. На шаберн картине установившегося течения видно (рис.12-б) асимметричное расположение скатков. На позиционной схеме (рис.12-в) скатками датчики нанесено положение скатков при отсутствии полей, пунктирными линиями - их смещение под действием подеромоторной силы. Подеромоторная сила при таком подключении увеличивает диаметр у нижней стенки и уменьшает у верхней, что приводит к тому, что скатки выносятся от стенки, а наверху прижимаются к стенке. Причем при этом способе воздействия ядро потока практически не возмущается.

Таким образом, для управления присоединенными скатками в слабокомпонентном потоке достаточно наличие поперечного магнитного поля и поперечного тока во входной части диффузора или продольного тока в узкой пристеночной области. В зависимости от направления тока угол наклона скатки будет либо уменьшаться, либо увеличиваться.

В **Заключение** сформулированы основные результаты работы:

1. Создана новая оригинальная установка на основе ударной трубы, состоящая из газодинамического тракта, который включает в себя

сверхзвуковой диффузор с системой генерации магнитного и электрического полей. Установка оснащена современными диагностическими методами для исследования влияния магнитного и электрического полей на поведение присоединенных газодинамических скачков, формирующихся на входе в диффузор при течи газа. Выбранные рабочие режимы позволяют моделировать на инертных газах течение в воздухоборнике.

2. Измерены электрофизические параметры плазмы и выявлено влияние присоединенных слоев на протекание тока. Зафиксировано увеличение температуры и концентрации электронов, а так же проводимости плазмы вследствие обескатионного нагрева электронами и развития неравновесной ионизации.

3. Показано, что газодинамическая картина течения формируется под действием нескольких факторов: силы Лоренца, Джоулева нагрева и влияния присоединенного слоя. При этом возможно управление положением присоединенных скачков при помощи МГД-метода.

4. В торсионном режиме выявлены три типа МГД взаимодействия:

- а) Слабое взаимодействие характеризуется регулярным отскоком присоединенных скачков, при этом их положение меняется в зависимости от степени взаимодействия без образования новых структур.
- б) Переходное неустойчивое взаимодействие, при котором наблюдаются флуктуации в положении скачков.
- в) Сильное взаимодействие характеризуется образованием прямого скачка торсионной в ядре потока.

5. Показано, что для известных положений присоединенных скачков энергетически более выгодно прислаивать внешние воздействия на входной части диффузора.

6. В зависимости от величины внешнего направления выделены области доминирования действия силы Лоренца и Джоулева нагрева как в торсионном, так и в ускорительном режимах. Из совокупности воздействий удалось выделить изменения в ударно-волновой конфигурации, связанные как с тормозящим действием педеромоторной силы, так и с ускорением.

7. Эксперименты с продольным протеканием тока показали возможность изменения ударно волновой конфигурации при локальном МГД взаимодействии, однако заметные изменения в положении присоединенных скачков происходит при более высоких значениях тока (500-600А), чем при поперечном протекании, где влияние взаимодействия ощутимо уже при (200-300А).

Цитированные источники

1. E.P. Garjagan and P.T. Narsha, "AJAX: New Direction in Hypersonic Technology," AIAA Paper No-4495, 7th Aerospace Plasma and Hypersonic Technology Conference, Norfolk, VA, 1994.
2. И. Райтер, Физика газового разряда. Наука, Москва, 1987, 392 с
3. Д.А.Булак, А.Л.Гоним, В.А.Фоминки. Тормоз и расчет магнетогидродинамической течи в каналах. Атомиздат, Москва, 1973, 384.
4. Yu.P.Golovachov, Yu.A.Kurzhik, A.A.Schmidt and D.M.Van Win. "Numerical investigation of MGD interaction in non-equilibrium plasma flow in supersonic inlet." AIAA Paper No 2001-2883, 2001.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах

1. S.V.Bobashev, E.A.Dyukonova, A.V.Erefov, T.A.Lapshikina, V.A.Sakharov, R.V.Vasil'eva and David M.Van Win. MHD design features in supersonic single-shock diffuser. - International Conference on MHD Power Generation and High Temperature Technologies, Beijing, October 12-15, Vol. II, 1999, P.201-202.
2. S.V. Bobashev, E.A. Dyukonova, A.V. Erefov, T.A.Lapshikina, V.G.Masternikov, S.A.Ponirer, V.A.Sakharov, R.V.Vasil'eva and D.Van Win. Influence of MHD interaction on shock-wave structures in supersonic diffuser. - The 2nd Workshop On Magneto-Plasma-Aerodynamics In Aerospace Applications, 2000, IRTAN, Moscow, April 5-7, pp. 64-68
3. S.V. Bobashev, E.A. Dyukonova, A.V.Erefov, T.A.Lapshikina, V.G. Masternikov, S.A.Ponirer, V.A.Sakharov, R.V.Vasil'eva and D. M. Van Win. Shock-rate facility for MGD supersonic flow control. - AIAA Paper 2000-2047, 31st AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2000.
4. С.В.Бобасhev, Е.А.Дюконева, Е.А.Дюконева, А.В.Ерефов, Т.А.Лапушкина, В.Г.Мастерников, С.А.Понирер, В.А.Сахаров, Д.Ван Вин. Влияние МГД взаимодействия на положение скачка улетенного в сверхзвуковом диффузоре с одним изуротоме податком. - ИКТФ, 2001, т. 27, № 2, с.63-68.
5. S.V.Bobashev, A.V.Erefov, T.A.Lapshikina, S.A.Ponirer, V.A.Sakharov, R.V.Vasil'eva and D.Van Win. Strong action of magnetic and electrical fields on inlet shock configuration in diffuser. - The 3rd Workshop On Magneto-Plasma-Aerodynamics In Aerospace Applications, IRTAN, Moscow, April 24-26, 2001, С.38-43.
6. S. V. Bobashev, A. V. Erefov, T. A. Lapshikina, S. A. Ponirer, V. A. Sakharov, R. V. Vasil'eva, and D. M. Van Win. Effect of the Wall Layer on the Electric Current in a Model of MHD Diffuser. AIAA Paper 2001-2878, 31st AIAA Plasmadynamics and Laser Conference and 4th Weekly Inerted Gas Workshop, Anaheim, CA, June 11-14, 2001.
7. Т.А.Лапушкина, С.В.Бобасhev, Е.В.Васильева, А.В.Ерефов, С.А.Понирер, В.А.Сахаров, Д. Ван Вин. Влияние электрического и магнитного полей на конфигурацию ударных слоев в диффузоре. - ИКТФ, 2002, т.72, №4, с.23-31.

8. S.V.Bobashev, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Ponirav, R.V.Vasil'eva, D.M.Van Wic. Non-Stationary Aspects Of Electric And Magnetic Field Action On Shocks In Diffuser. AIAA Paper 2002-2164, 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference and 14th International Conference on MHD Power Generation and High Temperature Technologies Maui, Hawaii, USA, May 20-23, 2002.
9. S.V.Bobashev, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Ponirav, R.V.Vasil'eva, D.M.Van Wic. Effect of MHD-Interaction In Various Parts of Diffuser on Inlet Shocks: Experiment. AIAA Paper 2002-5183, 11th AIAA/AAAF International Conference Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies, Orleans, France, Sep.29-4, 2002.
10. S.V.Bobashev, R.V.Vasil'eva, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Ponirav, D.M. Van Wic. Position Of Attached Shocks In A Supersonic MHD Diffuser Under Different Modes Of Current Localization. The 4th Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics for Aerospace Applications. IPTAN, Moscow, 9-11 April, pp.169-175, 2002.
11. S.V.Bobashev, R.V.Vasil'eva, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Ponirav and D.M. Van Wic. Arrangement of Experiments on MHD Control of Shock-Wave Configurations in Supersonic Diffuser. Proceedings of the Symposium on Thermal-Chemical Processes, St-Petersburg, "Leningrad", July, 2002.
12. S.V.Bobashev, R.V.Vasil'eva, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Ponirav and D.M. Van Wic. Action of Magnetic and Electrical Fields on Flow Pattern in Different Parts of Diffuser. Proceedings of the Symposium on Thermal-Chemical Processes, St-Petersburg, "Leningrad", July, 2002.
13. S.V.Bobashev, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Ponirav, R.V.Vasil'eva, D.M. Van Wic. Experiments On MHD Control Of Attached Shocks In Diffuser. AIAA Paper 2002-0169, 40th Aerospace Meeting, 2002.
14. С.В.Бобашев, Р.В.Васильева, А.В.Ерофеев, Т.А.Лапушкина, С.А.Понирав, Д.М.Ван Вил. Локальное воздействие магнитного и электрического полей на положение прилегающего скачка в сверхзвуковом диффузоре. - ИТФ, 2003, т. 70, № 2, с.43-50.
15. T.A.Lapushkina, S.V.Bobashev, R.V.Vasil'eva, A.V.Erofeev, S.A.Ponirav. Spectral Studies of Inert Gas Plasma Supersonic Flow in the Electromagnetic Field." IV International Conference Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, September 15-19, 2002, pp. 157-164.
16. Т.А.Лапушкина, Р.В.Васильева, А.В.Ерофеев, С.А.Понирав, С.В.Бобашев. Кинетика ионизации при действии сверхзвукового потока азота в магнитном поле. - ИТФФ, 2004, т. 30, № 17, с.33-38.

Получена ИР №020593 от 07.08.97

Подписано в печать 28.08.97. Формат 60x84/16. Печать офсетная.
Уч. печ. л. 25. Тираж 600. Заказ 554.

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором,
в типографии Издательства Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.