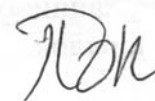


На правах рукописи



ПОНЯЕВ Сергей Александрович

**НЕСТАЦИОНАРНОЕ МАГНИТО- И ЭЛЕКТРО-ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ
ВОЗДЕЙСТВИЕ НА СВЕРХЗВУКОВОЕ ТЕЧЕНИЕ В ДИФФУЗОРЕ**

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук.**

Санкт-Петербург - 2007

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

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук, профессор
Бобашев Сергей Васильевич

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Лукьянов Герман Александрович
Кандидат физико-математических наук
Шейкин Евгений Георгиевич

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

Защита состоится «__» _____ 2007г. в ____ час. ____ 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 гидроаэродинамики

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

Автореферат разослан «__» _____ 2007г.

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

Зайцев Д.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из наиболее важных проблем при разработке гиперзвуковых летательных аппаратов является управление потоком газа. Необходимость управления течением и, что наиболее важно, положением входных скачков в воздухозаборниках обусловлена тем, что воздухозаборник летательного аппарата проектируется для определенного (крейсерского) числа Маха полета, и при отклонении числа Маха полета от этого значения он начинает работать в нерасчетных режимах, что приводит к нежелательным последствиям, а в наиболее неблагоприятных случаях может привести, например, к помпажу двигателя. На современных сверхзвуковых самолетах управление течением в воздухозаборнике осуществляется путем изменения газодинамического тракта механическим способом.

В начале 90-х годов холдинговой компанией «Ленинец» была предложена концепция гиперзвукового ($M > 4$) летательного аппарата «АЯКС» [1]. В этой концепции, наряду с другими предложениями, предполагалось использовать магнитогазодинамическое (МГД) и электрогазодинамическое (ЭГД) воздействия для управления ударно-волновой структурой в воздухозаборнике. В настоящее время многие предложения из этой концепции нашли свое отражение в новом разделе газодинамики – магнито-плазменной аэродинамике. По этой тематике проводится ряд ежегодных конференций (AIAA Conference on Hypersonic Systems and Technologies, AIAA Plasmadynamics and Lasers) и рабочих совещаний (AIAA Weakly Ionized Gases Workshop, Рабочее Совещание по Магнито-Плазменной Аэродинамике, Термохимические Процессы в Плазменной Аэродинамике).

Преимуществом МГД и ЭГД методов управления структурой течения в воздухозаборнике является более высокое быстродействие. Именно поэтому возник интерес к исследованию нестационарных процессов в условиях воздействия на ионизированный сверхзвуковой поток электрических и магнитных полей. Следует отметить, однако, что в настоящее время практически отсутствуют работы, направленные на изучение нестационарных газодинамических процессов, вызванных нестационарностью внешних МГД и ЭГД воздействий, а большинство представляемых на конференциях работ

являются теоретическими и в основном относятся к стационарным течениям. По этой причине данная работа, направленная на изучение нестационарных процессов при МГД и ЭГД воздействиях, является актуальной.

Цель работы. Целью работы являлось изучение особенностей изменения ударно-волновой конфигурации в диффузоре при приложении импульсных МГД и ЭГД воздействий.

В соответствии с целью работы, основное внимание уделялось:

1. Созданию экспериментальной базы для изучения импульсных МГД и ЭГД воздействий на сверхзвуковое течение в диффузоре.
2. Определению стационарных характерных параметров 4-х скачковой ударно-волновой конфигурации при различных интенсивностях внешних воздействий и определению области существования регулярного взаимодействия присоединенных скачков.
3. Исследованию стартовых процессов при входе потока газа в диффузор в отсутствие и при наличии внешних воздействий.
4. Исследованию изменения характерных параметров ударно-волновой конфигурации при различных скоростях возрастания и спада тока.
5. Изучению воздействия на ударно-волновую конфигурацию последовательности импульсов внешних воздействий и возможности организации импульсно-периодического воздействия.

Научная новизна работы. Научная новизна работы заключается в том, что впервые проведены экспериментальные исследования нестационарных процессов при ЭГД и МГД воздействиях, в результате чего получен ряд новых и важных сведений относительно активно развивающейся области газодинамики – магнитоплазменной аэродинамики. Работа проводилась в тесном контакте с сектором численного моделирования ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

В данной работе впервые:

1. Разработан метод импульсного, многократного МГД и ЭГД воздействия на течение в диффузоре. Кратковременность МГД воздействия при квазистационарном магнитном поле обеспечивалась кратковременностью импульса тока, регулируемого внешним напряжением.

2. Прослежены изменения характерных параметров стационарных ударно-волновых конфигураций и потерь полного давления в диффузоре при различных интенсивностях внешних воздействий. Показано, что по мере усиления внешних воздействий параметры ударно-волновой конфигурации приближаются к границе перехода регулярного отражения в Маховское. При увеличенной зоне взаимодействия изучен нестационарный процесс возникновения Маховской конфигурации. Сделано предположение, что ствол Маха тождественен прямому скачку, образуемому в сильных внешних полях, который переводит сверхзвуковое течение в дозвуковое.
3. Выявлены различия в стартовых процессах при входе потока в диффузор при наличии и в отсутствие внешних воздействий. Показано, что при наличии внешних воздействий время формирования стационарной ударно-волновой конфигурации меньше, так как она возникает при торможении вторичной ударной волны, возникшей в сопле.
4. Обнаружено, что в зависимости от скорости изменения тока изменение параметров ударно-волновой конфигурации может происходить или квазистационарно с током, или с запаздыванием относительно него. Определена скорость изменения тока, при которой изменение ударно-волновой конфигурации происходит квазистационарно с ним. Оценено время установления стационарной ударно-волновой конфигурации при мгновенном включении и выключении тока. В специально поставленном эксперименте выявлены особенности релаксации ударно-волновой конфигурации при выключении тока.
5. Прослежено установление стационарной ударно-волновой конфигурации при подаче последовательности токовых импульсов. Показано, что с помощью серии импульсов возможно имитировать импульсно-периодический процесс. Оценен энергетический выигрыш при импульсно-периодическом воздействии.

Достоверность и надежность результатов. Работа наглядно демонстрирует особенности нестационарных процессов изменения ударно-волновой конфигурации при магнито- и электро- динамическом воздействии. Достоверность полученных результатов обеспечивается путем использования для исследования современных средств измерений и воспроизводимостью

результатов, а также подтверждается путем сравнения результатов с расчетными данными других авторов.

Научная и практическая значимость. В результате проведенных исследований получены новые сведения о нестационарных аспектах магнитоплазменной аэродинамики. Результаты опытов по определению времени установления стационарной ударно-волновой конфигурации при включении и выключении внешних воздействий могут быть использованы для апробации и верификации программ численного моделирования и экстраполированы на более крупномасштабные установки, а способ организации импульсно-периодического воздействия может быть использован на других лабораторных установках в различных организациях (ИВТАН, ЦАГИ, ЦИАМ, ЦНИИМАШ).

Результаты исследований используются в научных исследованиях в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и в учебных программах в рамках СПбГПУ (кафедра «Гиперзвуковые технологии»).

Положения выносимые на защиту:

1. Особенности организации импульсного МГД и ЭГД воздействия на течение в диффузоре.
2. Результаты по определению характеристик стационарных ударно-волновых конфигураций и изменению потерь полного давления при различных интенсивностях стационарных внешних воздействий. Демонстрация перехода регулярного отражения в Маховское.
3. Обнаружение различий стартовых процессов при входе потока в диффузор при наличии и в отсутствие внешних воздействий.
4. Обнаружение эффекта запаздывания изменения параметров ударно-волновой конфигурации относительно изменения тока. Определение времени установления стационарной ударно-волновой конфигурации при различных скоростях изменения тока
5. Организация импульсно-периодического воздействия и оценка энергетического выигрыша по сравнению со стационарным воздействием.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: Фундаментальные Проблемы Высокоскоростных

Течений, Жуковский, 2004; Symposium on Thermal-Chemical Processes, St-Petersburg, 2004; 43st Aerospace Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2005; 15th International Conference on MHD Energy Conversion and 6th International Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics for Aerospace Applications, Moscow, 2005; 44st Aerospace Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2006; 14th AIAA/ANI International Conference Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies, Canberra, Australia, 2006; 10th International Workshop on Shock Tube Technology, Brisbane, Australia, 2006; V International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology, Minsk, Belarus, 2006.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 научных работах, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из Введения, пяти Глав, Заключение и Списка цитированной литературы из 88 наименований. Общий объем работы составляет 152 страницы, в том числе 70 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность работы и излагаются основные цели исследования нестационарного воздействия внешних магнитного и электрического полей на ударно-волновые конфигурации, показана новизна, практическая значимость. Приводятся краткое содержание работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **Первой Главе** дается краткий обзор литературы, посвященной исследованиям в области магнито- и электро-газодинамического способов управления как внутренними, так и внешними сверхзвуковыми течениями. Отмечается, что, в основном, разработке данной проблемы посвящены теоретические работы, причем объектом исследования являются, как правило, стационарные воздействия. На данный момент нам неизвестны экспериментальные работы по изучению нестационарных процессов при МГД и ЭГД воздействии.

Во **Второй главе** приводится описание экспериментальной установки и методов исследования. Экспериментальная установка включала в себя газодинамический тракт и системы генерации электрического и магнитного

полей. На рис.1 показана схема газодинамического тракта. В качестве рабочего газа использовался Ксенон. Расчетные параметры течения на входе в диффузор составляли: число Маха потока $M = 4,3$; плотность $\rho = 0,127 \text{ кг/м}^3$, скорость потока $u = 1,55 \cdot 10^3 \text{ м/с}$; проводимость $\sigma = 600 \text{ См/м}$, параметр Холла $\beta \approx 3$ при $B = 1,3 \text{ Т}$, длительность течения - 600 мкс. Магнитное поле было квазистационарно во время течения, а длительность электрического поля, создаваемого «длинной линией», могла варьироваться от длительности течения до величины, на порядок меньшей.



Рис. 1. Газодинамический тракт и схема обтекания датчика давления. Цифры – номера электродов.

Показано, что под действием только магнито-индуцированной ЭДС ток не протекает вследствие большого приэлектродного падения потенциала, поэтому в качестве ключа, запускающего внешние воздействия, было использовано напряжение «длинной линии», превышающее по величине приэлектродное падение потенциала. Таким образом, импульсность МГД воздействия при квазистационарном магнитном поле достигалась за счет импульсного электрического поля. Была создана электрическая схема, которая позволила подавать как одиночные импульсы электрического поля, так и последовательности импульсов с произвольной скважностью в любое время от момента входа газа в диффузор. Во второй главе также проанализированы особенности совместной работы длинной линии и МГД канала.

Описан ширен метод регистрации ударно-волновых разрывов и метод определения полного давления. Существенным в ширен методе является использование высокоскоростной кинокамеры и модифицированного источника Подмошенского, как источника света. Все это позволяло получать

130 теневых картин с экспозицией 1,3 мкс в течении одного эксперимента. Полное давление p_{10} определялось в точке $x_p = 14$ см от начала диффузора (см. рис.1). Оно определялось по двум измеренным в эксперименте величинам – давлению торможения p_{20} , измеряемому с помощью пьезодатчика, внесенного в поток, и числу Маха M потока в месте расположения пьезодатчика. Число Маха потока определялось по углу наклона малых возмущений на пластине с рисками, помещаемой на месте пьезодатчика.

В **Третьей главе** приведены результаты экспериментов по изучению характеристик ударно-волновой конфигурации (УВК) и потерь полного давления при стационарных внешних воздействиях и исследуются стартовые процессы при входе газа в диффузор.

Дается описание основного предмета исследования - 4х скачковой конфигурации, возникающей в результате отражения друг от друга присоединенных скачков, образующихся при входе сверхзвукового потока в диффузор. На рис.2. показаны основные параметры УВК и расчетная картина протекания тока в канале [2]. По среднему углу встречи присоединенных скачков $\langle \alpha \rangle$ с помощью специальной процедуры оценивалось значение числа Маха набегающего потока.



Полученные результаты по изменению: 1) характерных параметров УВК – углов α^* и $\langle \alpha \rangle$, 2) относительного расстояния x_c : $\Delta x_c = (x_c - x_{c0})/x_{c0}$, 3) относительных потерь полного давления $\Delta p_{10} = (p_{10} - p_{10}^0)/p_{10}^0$ и 4) числа Маха

набегающего потока в зависимости от тока (I) при $B=1,3$ Т, показаны на рис.3. x_{c0} и p_{10}^0 – положение точки взаимодействия скачков и полного давления при отсутствии внешних воздействий. Зона взаимодействия определялась током, протекающим через 3ю пару электродов, расположенных на входе в диффузор.

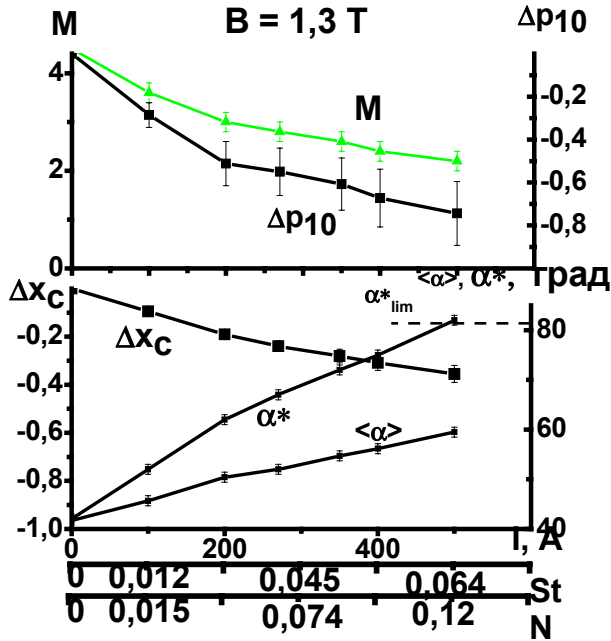


Рис.3. Изменение числа Маха потока M , углов α^* и $\langle \alpha \rangle$, относительных величин Δx_c , Δp_{10} в зависимости от тока (I). На второй и третьей шкалах абсцисс нанесены значения силового (St) и энергетического (N) параметров. α^*_{lim} – предельный угол, при котором еще возможно регулярное отражение присоединенных скачков, оцененный при максимальном токе, т.е. при $M=2,2$.

На второй и третьей осях абсцисс отложены безразмерные силовой

$$(St = \frac{I BL_{int}}{S \rho u^2}) \text{ и энергетический}$$

$$(N = \frac{I V_{AC} L_{int}}{S h u \rho u^2}) \text{ параметры, где}$$

I – ток, V_{AC} – напряжение на электродах МГД канала, S – площадь электрода и межэлектродного промежутка, h –

высота канала, и L_{int} – длина зоны взаимодействия. Представленные на рис.3 зависимости $M(I)$ и $\Delta p_{10}(I)$ показывают, насколько затормозился поток и увеличились

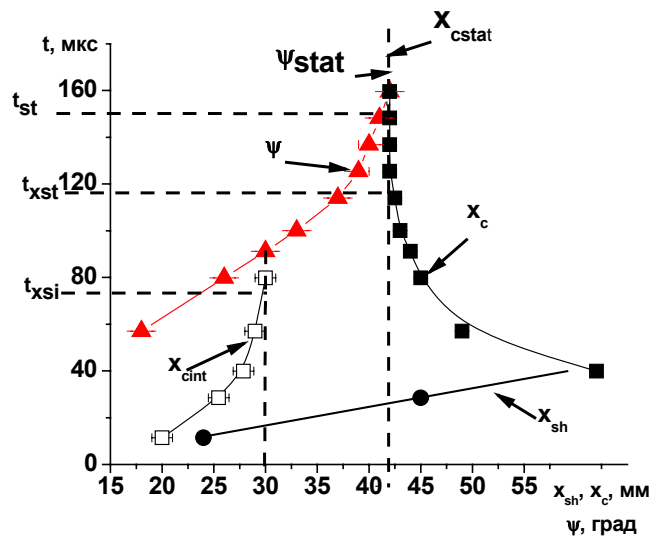


Рис. 4. x - t диаграмма положения ствола Маха (x_{sh}), точки пересечения скачков (x_c), угла отражения между скачками (ψ) в отсутствие внешних воздействий и точки пересечения скачков (x_{cint}) при наличии воздействий. Пунктирные линии – стационарные значения x_c , x_{cint} и ψ .

потери полного давления под действием силового и энергетического факторов. Используя результаты одномерного анализа [3], который в нашем случае применим для непрерывного течения в ядре потока, показано, что действия этих факторов на изменение числа Маха потока и на потери полного давления сравнимы.

Анализ теневых картин показал, что в отсутствие внешних воздействий УВК представляет собой регулярное взаимодействие прямолинейных присоединенных скачков. При приложении внешних воздействий, вследствие уменьшения числа Маха потока, происходит увеличение среднего угла встречи присоединенных скачков $\langle\alpha\rangle$, поэтому точка взаимодействия x_c приближается ко входу в диффузор. Наблюдаемая на рис.3 разница между α^* и $\langle\alpha\rangle$ свидетельствует о том, что присоединенные скачки искривляются. Это происходит вследствие того, что, как видно из рис.2г, поток вблизи области пересечения скачков проходит большее расстояние в зоне взаимодействия, и, следовательно, сильнее тормозится, что приводит к увеличению угла наклона скачка к потоку в данном месте.

Было найдено, что по мере усиления воздействий α^* приближается к α^*_{lim} , (рис.3), который определен по теории для прямолинейных скачков [4]. При этом взаимодействие скачков остается регулярным, и, несмотря на сильную асимметрию распределения тока (рис.2г), УВК остается практически симметричной относительно оси канала.

Продемонстрирован переход регулярного отражения в Маховское в том случае, когда воздействие прикладывалось ко всему объему диффузора. Обнаружено, что Маховская конфигурация формируется путем трансформации со временем 4х скачковой конфигурации. Сравнение с результатом численного моделирования [5] позволяет сделать вывод, что ствол Маха тождественен скачку торможения в сильных полях, который переводит сверхзвуковое течение в дозвуковое.

Определено время установления стационарной УВК при входе газа в диффузор, т.е., при так называемом стартовом процессе. Результаты представлены на рис.4. Обнаружено, что УВК в диффузоре формируется на

основе вторичной ударной волны, образовавшейся в сопле, которая на входе в диффузор представляет собой Маховскую конфигурацию. В отсутствие внешних воздействий, как видно из рис.4, ствол Маха со временем покидает зону наблюдения, присоединенные скачки начинают взаимодействовать в одной точке и точка взаимодействия приближается ко входу в канал. Через $t_{xst} \approx 115$ мкс достигается стационарное положение x_c , а входная УВК полностью устанавливается через 150 мкс, когда угол отражения выходит на стационарное значение. Выявлено, что при наличии внешних воздействий формирование УВК происходит совершенно по-другому – Маховская конфигурация замедляет свое движение, и в результате ее трансформации образуется 4х скачковая конфигурация, которая занимает стационарное положение через $t_{xsi} \approx 75$ мкс, то есть гораздо быстрее, чем в отсутствие внешних воздействий.

В Четвертой главе рассматриваются процессы установления стационарной ударно-волновой конфигурации при различных скоростях изменения тока.

Основным методом исследования было сопоставление изменения тока и параметров УВК во времени. Типичный пример такого сопоставления показан на рис.5; видны области быстрого возрастания тока, квазистационарного тока и спада тока. Видно, что в области возрастания тока изменение параметров УВК идет с запаздыванием относительно тока, а при спаде тока эти изменения идут практически одновременно. Более детально изменение параметров при возрастании тока показано на рис.6. Оба рисунка отчетливо демонстрируют

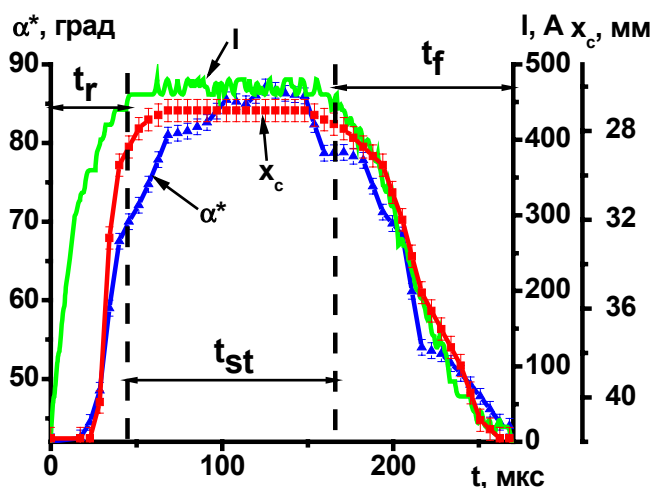


Рис.5. Зависимость от времени тока I , положения точки пересечения присоединенных скачков - x_c , угла между касательными в точке пересечения скачков - α^* . t_r – время нарастания токового импульса, t_{st} – время квазистационарного протекания тока, t_f – время спада токового импульса.

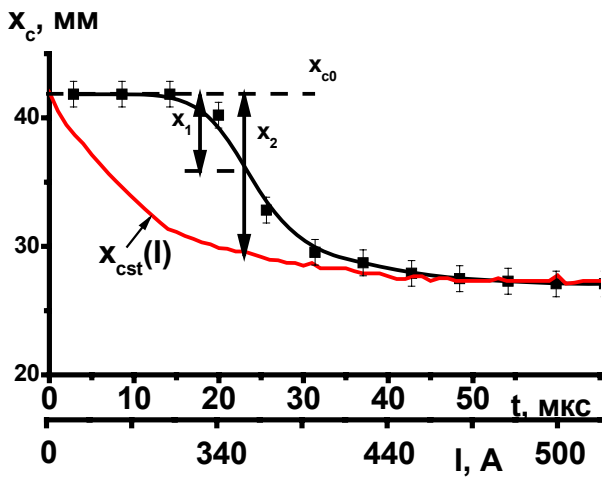


Рис.6. Изменение со временем положения точки пересечения присоединенных скачков x_c . Также показано изменение стационарного значения x_{cst} соответствующего току по второй оси абсцисс. На нижней шкале абсцисс показаны значения тока в моменты времени, отложенные по верхней шкале. x_1 – расстояние между x_{c0} и x_c , x_2 – расстояние между x_{c0} и x_{cst} .

задержку начала изменения параметров УВК относительно начала протекания тока. Мы полагаем, это связано с тем, что возмущениям, возникшим в области взаимодействия, требуется время, чтобы распространиться на область расположения УВК.

Основная трудность при анализе экспериментальных результатов связана с тем, что даже при мгновенном включении тока требуется время на установление УВК, в то время как в наших экспериментах ток имел конечное время нарастания, и на вышеуказанный процесс накладывался процесс подстраивания параметров УВК под изменение тока. Для того, чтобы разделить эти процессы, была разработана методика, которая на основе данных, полученных при различных конечных скоростях возрастания или спада тока, позволяет определить характерные скорости: скорости изменения параметров УВК при мгновенном включении и выключении тока и скорость изменения тока, при которой изменение параметров УВК идет квазистационарно с током.

Для этого была введена новая безразмерная переменная $\bar{X} = \frac{x_{c0} - x_{cm}}{x_{c0} - x_{cst}} = \frac{x_1}{x_2}$, которая

характеризует, насколько мгновенное значение x_c отличается от стационарного значения x_{cst} для тока в этот момент времени. Зависимость этой переменной от безразмерного времени (в качестве масштаба времени взято пролетное время, определенное по длине зоны взаимодействия) для трех различных токовых импульсов, характеризующихся различным максимальным током и различной скоростью нарастания тока, показана на рис.7. В области наиболее быстрого изменения \bar{X} , от уровня 0,2 до уровня 0,8, определяется средняя скорость

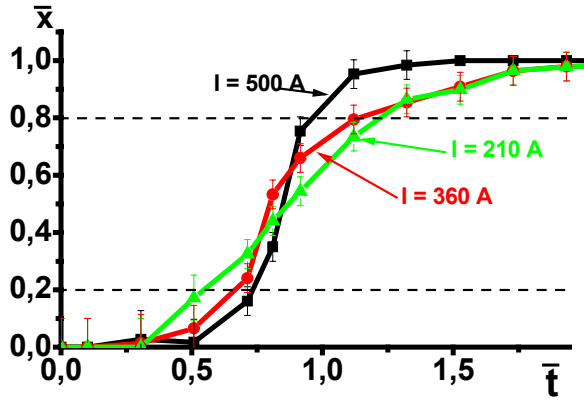


Рис.7. Зависимость \bar{X} от безразмерного времени для трех импульсов тока.

рис.8 по оси абсцисс), при которой изменение параметров УВК идет квазистационарно с током. В нашем случае $\bar{X}'_0 = 2,3 \pm 0,4$, то есть размерное время установления УВК при мгновенном включении тока составляет 12 мкс.

Скорость изменения x_c при мгновенном выключении тока была приблизительно определена в экспериментах по приложению коротких импульсов, когда УВК за время импульса не успевало достичь стационарного положения. Эта скорость оказалась в два раза меньше, чем скорость при мгновенном включении тока.

Для изучения релаксации УВК при выключении тока был проведен специальный эксперимент. Для того, чтобы время распространения возмущений из зоны взаимодействия в область расположения УВК было больше, зона взаимодействия была увеличена за счет подключения 2ой пары электродов, расположенной в конце сопла. Шлирен картины, показывающие изменение УВК при спаде и после прекращения тока приведены на рис.9. Изменение во времени характеристик УВК (среднего угла $\langle \alpha \rangle$ и угла отражения ψ) показано на рис.10. Наиболее интересной особенностью является

изменения \bar{X} . По средним скоростям, построенным в зависимости от обратной скорости возрастания тока (рис.8), определяются характерные скорости: скорость изменения \bar{X} при мгновенном включении тока $\bar{X}'_0 = \frac{\Delta \bar{X}}{\Delta t}$ при $\frac{\Delta t}{\Delta I} = 0$ (показана по оси ординат на рис.8) и скорость изменения тока $(\Delta t / \Delta I)_{st}$ (показана на

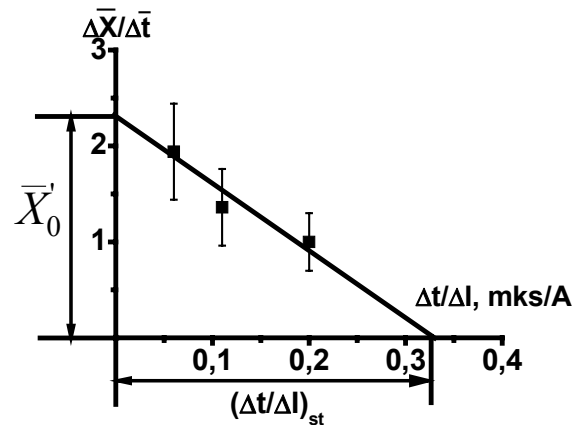


Рис.8. а) Скорость изменения \bar{X} в зависимости от обратной скорости изменения тока.

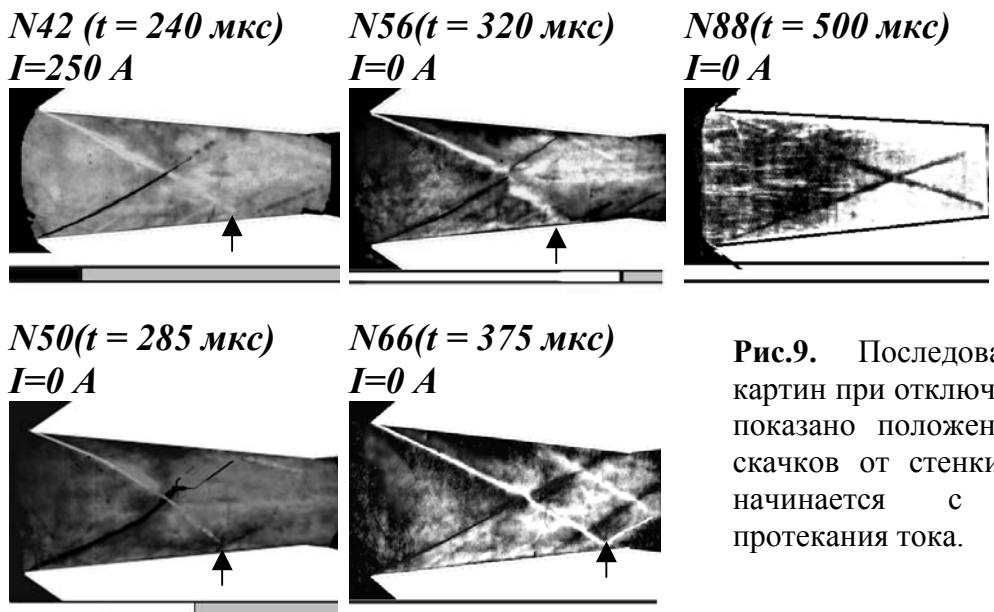


Рис.9. Последовательность шлирен-картин при отключении тока. Стрелками показано положение точки отражения скачков от стенки. Нумерация кадров начинается с момента начала протекания тока.

то, что угол отражения после отключения тока сначала увеличивается, при этом место падения отраженных скачков на стенку не меняется (стрелки на рис.9). Через 90 мкс после начала спада тока начинается процесс приближения к стационарным значениям в отсутствие внешних воздействий, который занимает более 100 мкс, что составляет около 2,5 пролетных времен (время оценено по длине зоны взаимодействия).

Пятая глава посвящена описанию импульсно-периодического воздействия, экспериментальной проверке влияния импульсов друг на друга и осуществлению подачи последовательности импульсов, которая имитирует импульсно-периодический процесс. Идея

импульсно-периодического процесса заключается в том, что подается серия из токовых импульсов длительностью t_p с интервалом Δt между импульсами (рис.11а). Эти параметры должны подбираться, исходя из скоростей изменения параметров УВК при мгновенном включении и выключении тока. Тогда при выполнении необходимых условий изменение x_c будет происходить, как

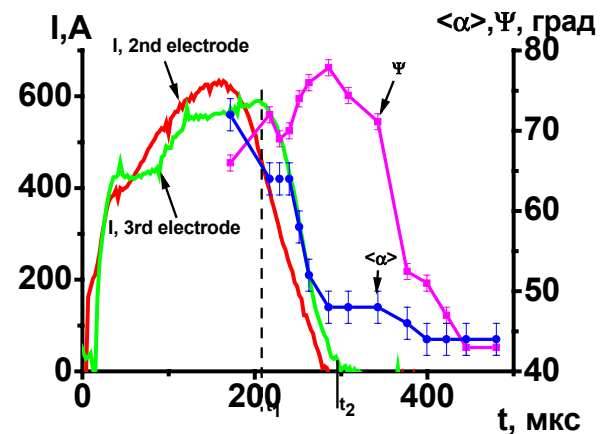


Рис.10 Изменение характерных параметров УВК (среднего угла $\langle \alpha \rangle$ и угла отражения ψ) при выключении тока.

показано на рис.11б. Видно, что стационарное положение $\langle \Delta x_c \rangle_{st}$ близко x_c при максимальном токе и значительно больше x_c при среднем токе. Таким образом, явно виден энергетический выигрыш.

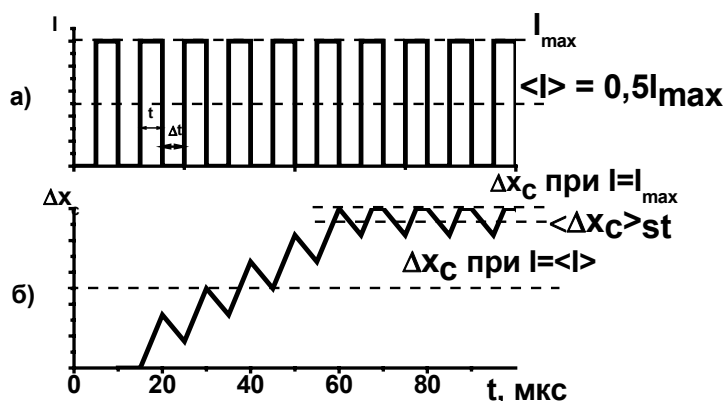


Рис.11. Схема импульсно-периодического воздействия.

В работе экспериментальным путем была подобрана форма импульсов тока и интервал между ними, оптимальные для импульсно-периодического воздействия. Имитация была произведена при подаче трех импульсов тока. Форма импульсов тока приведена на рис.12а, вызванное ими изменение x_c - на рис.12б. Видно, что установление стационарной картины происходит в течение первых полутора импульсов, и затем УВК не меняется во времени. При этом характеристики УВК соответствуют стационарным характеристикам при максимальном токе и заметно отличаются от стационарных характеристик УВК при среднем токе. Выигрыш в токе составлял 15%. Если считать сопротивление плазменного промежутка при импульсно-периодическом и стационарным воздействиям одинаковым, то энергетический выигрыш составлял около 25%.

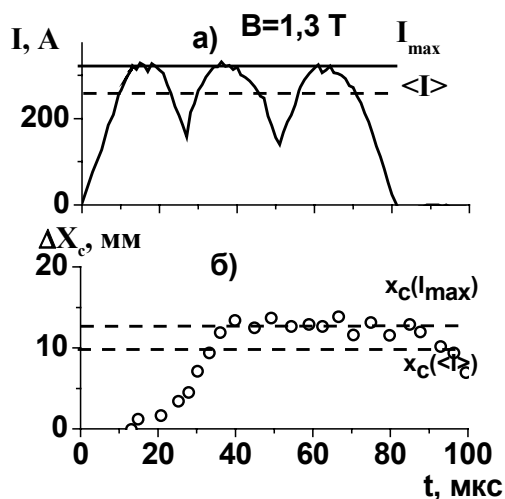


Рис.12 Импульсно-периодическое взаимодействие.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Разработан метод импульсного, многократного МГД и ЭГД воздействия на течение в диффузоре.

2. Прослежены закономерности изменения параметров стационарной УВК с регулярным отражением присоединенных скачков и изменения потерь полного давления в диффузоре при усилении внешних стационарных воздействий.
3. Продемонстрирован переход регулярного отражения в Маховское и выявлены особенности формирования Маховской конфигурации.
4. Обнаружено, что при наличии внешних воздействий время стартового процесса формирования УВК при входе газа в диффузор меньше, чем в отсутствие внешних воздействий. Показано, что это связано с тем, что в случае наличия внешних воздействий УВК формируется в результате трансформации затормозившейся в зоне взаимодействия λ -конфигурации, возникшей при входе вторичной ударной волны в диффузор.
5. Обнаружен эффект запаздывания в изменении параметров УВК относительно изменения тока.
6. Определены скорости изменения параметров УВК при различных скоростях изменения тока.
7. Разработана методика определения скорости изменения параметров УВК при мгновенном включении и выключении тока и скорости изменения тока, при которой изменение УВК происходит квазистационарно с током.
8. Осуществлена подача последовательности токовых импульсов с такими параметрами, что после установления стационарная УВК не реагирует на изменение тока. Показано, что в этом случае параметры УВК близки к параметрам УВК для максимального тока и заметно отличаются от параметров УВК для среднего тока, т.е. при импульсно-периодическом воздействии существует энергетический выигрыш.

Цитированная литература

1. Gurijanov E.P. and Harsha P.T. AJAX: New Direction in Hypersonic Technology // AIAA Paper 96-4609. - 1996.
2. Golovachev Yu.P., Kurakin Yu.A., Schmidt A.A. and Van Wie D.M. Numerical investigation of MGD interaction in non-equilibrium plasma flow in supersonic inlet // AIAA Paper 2001-2883. - 2001.
3. Вулис Л.А., Генкин А.Л., Фоменко В.А. Теория и расчет магнитогидродинамических течений в каналах / М: Атомиздат, 1971. – 384 с.
4. Handbook of Shock Waves, Ed. G. Ben-Dor/ Academic Press. – 2000.
5. S. V. Bobashev, Y.P. Golovachov, D. M. Van Wie //Journal of Propulsion and Power. – 2003. - vol.19. - no.4. –p.538-546.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

- 1) Васильева Р.В., Ерофеев А.В., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Бобашев С.В., Ван Ви Д. Характеристики магнитогазодинамического диффузора при различной коммутации тока // Журнал Технической Физики. - 2005. – Т.27. - № 9 – с. 27-33.
- 2) Erofeev A.V., Lapushkina T.A., Poniaev S.A., Vasil'eva R.V., Van Wie D. M. Effect of Magnetohydrodynamic Interaction in Various Parts of Diffuser on Inlet Shocks: Experiment // Journal of Propulsion and Power. – 2005. - №5. – p. 831-837.
- 3) Ерофеев А.В., Васильева Р.В., Лапушкина Т.А., Поняев С.А. Образование скачков уплотнения в потоке неравновесной плазмы при взаимодействии с магнитным полем // Журнал Технической Физики – 2005. – Т.75. - № 4 - с. 53-60.
- 4) Бобашев С.В., Васильева Р.В., Ерофеев А.В., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Ван Ви Д.М. Особенности релаксации ударно-волновой конфигурации в диффузоре после прекращения воздействия магнитного и электрического полей // Письма в Журнал Технической Физики. – 2006. – Т.32. - №3. - с. 25-33.
- 5) Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A., Poniaev S.A., Vasil'eva R.V., Van Wie D.M. On Reflection Characteristic of the Attached Shocks at Flow Decelerating in Magnetic and Electrical Fields // AIAA Paper 2006-1003. – 2006.
- 6) Erofeev A.V., Vasil'eva R.V., Lapushkina T.A., Poniaev S.A., Bobashev S.V. and Van Wie D.M. Influence of Different Types of External Fields Action on the flow in the supersonic diffuser // Proc. Symp. on Thermal-Chemical Processes. - St-Petersburg. - 2004.
- 7) Васильева Р.В., Ерофеев А.В., Лапушкина Т.А., Поняев С.А., Бобашев С.В., Ван Ви Д.М. Результаты модельных экспериментов по управлению скачками в диффузоре с помощью магнитного и электрического полей // Труды межд. конф. Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений. – Жуковский. - 2004. - С.237-238.
- 8) Vasil'eva R.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A., Poniaev S.A., Bobashev S.V., Van Wie D.M. Transition from the regular to Mach reflection of the attached shocks in a supersonic flow affected by magnetic and electric fields // Proc. 15th International Conference on MHD Energy Conversion and 6th International Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics for Aerospace Applications. - 2005. – p.712-714.
- 9) Erofeev A.V., Vasil'eva R.V., Lapushkina T.A., Poniaev S.A., Bobashev S.V., Van Wie D.M. Pulse-periodical action of magnetic and electric fields on the flow in a supersonic diffuser // Proc. 15th Int. Conf. on MHD Energy Conversion and 6th Int. Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics for Aerospace Applications. - 2005. - P.609-614.
- 10) Vasil'eva R.V., Erofeev A.V., Kurakin Yu.A., Lapushkina T.A., Poniaev S.A., Shmidt A.A., Bobashev S.V., Golovachev Yu.P., Van Wie D.M. Total pressure loss at interaction of supersonic flow with magnetic and electrical fields // Proc. of 15th International Conference on MHD Energy Conversion and 6th International Workshop on Magneto-Plasma-Aerodynamics for Aerospace Applications. - 2005. – p. 584-590.
- 11) Bobashev S., Erofeev A., Lapushkina T., Mende N., Poniaev S., Sakharov V., and Vasilieva R., and Van Wie D. Recent Results on MHD Flow Control at Ioffe Institute // AIAA Paper-2006-8012. - 2006.
- 12) Bobashev S., Erofeev A., Lapushkina T., Poniaev S., Vasilieva R. and Van Wie D.M., MHD FLOW CONTROL EXPERIMENTS USING AN IMPULSE FACILITY // Proc. 10th Int. workshop on shock tube technology. - Brisbane, Australia. – 2006. – p.7-8.

Автор выражает глубокую благодарность своему первому
научному руководителю, ветерану ФТИ РАН,
с.н.с., к.ф.-м.н., Р.В. Васильевой за плодотворное
сотрудничество, внимательное отношение и поддержку.

