

на правах рукописи

ЯДРЕНКИН МИХАИЛ АНДРЕЕВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО
МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА УДАРНО-ВОЛНОВУЮ СТРУКТУРУ ПОТОКА ВОЗДУХА
ПРИ ГИПЕРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ**

01.02.05 –Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель (консультант):

доктор физико-математических наук
Фомичев Владислав Павлович

Официальные оппоненты:

Бобашев Сергей Васильевич
доктор физико-математических наук, профессор
гл. н. с. ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

Швецов Геннадий Анатольевич
доктор технических наук, доцент
зав. лаб. ИГиЛ СО РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

Защита состоится « 6 » декабря 2013 г. в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, Новосибирск-90, ул. Институтская, 4/1.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 003.035.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Засыпкин И. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Решение ряда проблем, сопутствующих созданию гиперзвуковых летательных аппаратов, привели к возникновению новых направлений фундаментальных исследований в области магнитоплазменной аэродинамики. Сегодня магнитоплазменная аэродинамика (МПА) — современная отрасль науки и техники, которая изучает явления и процессы взаимодействия между высокоскоростным газовым потоком, электрическим и магнитным полем. Основная цель развития МПА состоит в применении магнитоплазменных способов управления потоком для решения задач аэрокосмических приложений. В соответствии с доминирующим механизмом воздействия можно выделить три основных метода управления потоком в рамках МПА: электромагнитный метод (взаимодействие плазменных структур в газовом потоке с электрическим и магнитным полем), энергетический метод (локальный вклад тепловой энергии в определенную зону течения) и плазмохимический метод (изменение направления и скорости химических реакций при генерации плазмы). Основными направлениями развития МПА являются: управление потоком и обтеканием тел с помощью объемных пондеромоторных сил и плазменно-стимулированное горение в высокоскоростном газовом потоке. В данной работе рассматриваются задачи управления высокоскоростными потоками с помощью МГД-взаимодействия локализованного перед телом или на его поверхности в условиях внешней ионизации газа электрическими разрядами.

Мотивация решения данного спектра задач состоит в том, что традиционные методы изменения аэродинамических характеристик летательных аппаратов и их частей основаны на применении механических элементов, использующих энергию набегающего потока, для перераспределения давления по поверхности. Однако в условиях гиперзвукового полета данные способы малоэффективны. Вместе с тем возникают предпосылки для проявления различных плазменных эффектов. МПА предлагает специфические способы управления обтеканием тел через изменение физико-химических свойств среды, окружающей аппарат. Возможности МПА включают управление структурой течения и пограничным слоем с помощью локального нагрева и объемных электромагнитных сил, а также изменение тепловых нагрузок на поверхность аппарата. Различные аэрокосмические задачи могут быть решены методами МПА: генерация управляющих сил и моментов на аэродинамических поверхностях, управление ударно-волновой структурой течения в тракте высокоскоростных двигателей, снижение тепловых нагрузок на поверхность аппарата и отдельных элементов конструкции, снижение или увеличение волнового сопротивления и сопротивления трения, генера-

ция либо подавление отрывных зон и управление их параметрами, подавление неустойчивых режимов обтекания. Основные механизмы влияния на параметры и структуру потока следующие: изменение термодинамических свойств газа, модификация структуры поля течения, генерация или стабилизация местных отрывных зон, изменение параметров пограничного слоя и другие. Такие эффекты могут быть реализованы при генерации плазмы в электрических разрядах постоянного и переменного тока, электронных пучках, при выдуве высокоэнтальпийных плазменных струй и других подобных явлениях.

Таким образом, магнитоплазменная технология предоставляет широкий арсенал возможных приложений в области прикладной аэродинамики. Очевидно, не все из них получают реальное применение. Однако для дальнейшего существенного улучшения аэродинамических характеристик летательных аппаратов и их систем необходимы и другие, немеханические способы, среди которых магнитоплазменный метод является наиболее перспективным, если не единственным.

Целью работы являлось экспериментальное исследование локального магнитогидродинамического (МГД) воздействия на ударно-волновую структуру течения при обтекании тел гиперзвуковым потоком воздуха при числах Маха $M = 6, 8, 10$ в условиях внешней ионизации газа электрическими разрядами.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

модификация экспериментальной базы и методик обработки экспериментальных данных для исследования МГД-взаимодействия в гиперзвуковом воздушном потоке в условиях внешней ионизации;

исследование процесса горения электрических разрядов в гиперзвуковом потоке воздуха и в магнитном поле;

исследование локализованного МГД-воздействия на ударно-волновую структуру течения, образованную при обтекании модели (клин, пластина) гиперзвуковым потоком воздуха.

Научная новизна работы заключается в следующем:

представлена новая методика оценки величины параметра гидромагнитного взаимодействия и пространственного распределения электрической проводимости воздушного потока с помощью программной обработки растровых изображений разрядного промежутка, позволившая оценить параметр гидромагнитного взаимодействия в эксперименте;

получены новые экспериментальные данные о горении электрических разрядов в высокоскоростном разреженном потоке воздуха в однородном магнитном поле;

получены новые экспериментальные данные о гиперзвуковом обтекании клина при реализации локального МГД-взаимодействия перед моделью при внешней ионизации потока электрическим разрядом;

впервые экспериментально показано, что при ионизации потока высокочастотным разрядом на поверхности пластины происходит генерация косяго скачка уплотнения на области МГД-взаимодействия;

экспериментально показано, что при ионизации потока импульсным разрядом на поверхности пластины МГД-взаимодействие приводит к генерации и трансформации скачка уплотнения.

Практическая ценность результатов работы

Представленная методика оценки величины параметра Стюарта позволяет определить эффективность МГД-взаимодействия в условиях эксперимента.

Экспериментальные данные о горении электрических разрядов в высокоскоростных потоках разреженных газов позволяют применять их для эффективной ионизации гиперзвукового воздушного потока.

Предложенные способы МГД-управления гиперзвуковым потоком воздуха могут быть применены для изменения аэродинамических характеристик летательных аппаратов при полете в верхних слоях атмосферы, а также для регулирования режимов работы прямоточных воздушно-реактивных двигателей и управления ударно-волновой структурой высокоскоростных течений в каналах.

Достоверность результатов работы подтверждается повторяемостью результатов экспериментов и их хорошим согласием с данными численного моделирования, которые были получены научными сотрудниками ОИВТ РАН и ИТПМ СО РАН, и результатами исследований других авторов.

Положения, выносимые на защиту

Методика оценки величины параметра гидромагнитного взаимодействия и пространственного распределения электрической проводимости воздушного потока с помощью программной обработки растровых изображений разрядного промежутка.

Экспериментальное доказательство возможности ионизации гиперзвукового потока воздуха с помощью электрических разрядов при их инициации поперек набегающего потока в однородном магнитном поле.

Экспериментальное доказательство возможности изменения геометрии ударно-волновой структуры потока с помощью МГД-взаимодействия, локализованного перед телом.

Экспериментальное доказательство возможности трансформации и генерации скачков уплотнения с помощью МГД-взаимодействия, локализованного на поверхности тела.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на семинарах ИТПМ СО РАН, МФТИ, а также на 23 международных и всероссийских конференциях: XIV-XVI Международная конференция по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2008, 2010, Казань, 2012), 17th International conference on MHD energy conversion (Kanagawa, 2009), IX-XII Международное совещание по магнитоплазменной аэродинамике (Москва, 2010 - 2013), XI Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона» (Новосибирск, 2010), 19th International Shock Interaction Symposium (Moscow, 2010), I Международная конференция «Физика высокочастотных разрядов» (Казань, 2011), AIAA Hawaii Summer Conference 2011 (Honolulu, 2011), X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Н. Новгород, 2011), 8th Sino-Russia High-speed Flow Conference (Shanghai, 2011), IX Международное совещание по термохимическим процессам и плазменной аэродинамике (С.-Петербург, 2011), XVIII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Алушта, 2013), 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (Мюнхен, 2013).

Публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в периодических изданиях ВАК (7 публикаций): Журнал технической физики, Письма в Журнал технической физики, Вестник Казанского технологического университета, Вестник Нижегородского государственного университета, Наука из первых рук.

Личный вклад автора в работу заключается в его активном участии в постановке, подготовке и проведении экспериментальных исследований, в обработке и последующем анализе экспериментальных данных. Непосредственно автором оптимизированы методики визуализации процессов и обработки полученных изображений, разработана методика оценки величины параметра гидромагнитного взаимодействия и пространственного распределения электрической проводимости воздушного потока с использованием программ обработки растровых изображений, а также получены основные параметрические оценки гидромагнитного взаимодействия. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Структура работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 143 страницы, в том числе 102 иллюстрации, 3 таблицы и список литературы из 125 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена формулировка предмета исследования, описана постановка задачи. Представлены положения, выносимые на защиту, формальные основания представления работы, краткое содержание работы и приведен список сокращений, используемых в тексте.

Глава 1 посвящена обзору библиографической информации, представленной в открытой печати, и анализу степени изученности способов МГД-управления высокоскоростными течениями газа с применением средств внешней ионизации. Отмечено, что работы первой половины XX века были обращены на изучение и формулирование инновационных МГД-способов управления гиперзвуковыми течениями. Были обозначены основные принципы работы возможных бортовых МГД-систем и определены параметры окружающей аппарат среды для обеспечения наиболее эффективно магнитоплазменного взаимодействия. Установлено, что максимальный МГД-эффект вполне достижим в диапазоне высот 30–80 км, в условиях типичных для гиперзвуковых полетов спускаемых космических аппаратов и капсул. Теоретически и численно подтверждено изменение ударно-волновой картины обтекания вокруг затупленного тела с источником магнитного поля внутри, обусловленное МГД-взаимодействием. При этом отмечены рост его лобового сопротивления и уменьшение тепловых потоков в критической точке, а также уменьшение суммарного потока тепла к поверхности. Однако оценки эффективности МГД-эффекта в отношении к величине затрат энергии делали невозможным практическое применение плазмодинамических способов управления течениями на борту летательных аппаратов. В последние 20 лет получила развитие идея создания гиперзвуковых пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, использующих кислород из набегающего потока в качестве окислителя топливной смеси. Условия полета в стратосфере являются благоприятными для возникновения различных плазменных эффектов. Современные исследования показали, что для достижения значительного МГД-эффекта достаточно использовать умеренные магнитные поля ($B \leq 1$ Тл). Таким образом, сегодня стало возможным применение бортовых МГД-систем для решения задач управления аэродинамикой высокоскоростных летательных аппаратов, а также для эффективного снижения тепловых нагрузок на обтекаемую поверхность.

В главе 2 описаны экспериментальная установка и методики исследования локального МГД-взаимодействия в гиперзвуковых потоках газа, применяемые в данной работе. Исследования локального МГД-взаимодействия проводились на МГД-стенде, созданном на базе ударной трубы (УТ) импульсного действия. Данная установка позволяет моделировать гиперзвуко-

Параметры потока воздуха реализуемые на МГД-стенде.

Число Маха	Скорость потока, м/с	Статическое давление, Тор	Плотность, кг/м ³	Температура, К
6	1900	12	20×10^{-3}	270
8	1950	2	6×10^{-3}	150
10	2000	0.5	2.5×10^{-3}	100

вые воздушные потоки с числами Маха 6-10, параметры которых соответствуют условиям полета на высоте 30-50 км над уровнем моря. Характерные значения основных газодинамических параметров моделируемого потока отображены в Таблице. С помощью электромагнита в рабочей камере генерируется однородное магнитное поле с индукцией до 2.2 Тл, направленное поперек потока. Реализованная система синхронизации инициирующих и регистрирующих устройств позволяла добиться временного разрешения 1 мкс, что позволяет рассматривать МГД-взаимодействия в различных фазах проявления эффекта, несмотря на короткое время существования квазистационарного течения (около 200 мкс). Локальная ионизация набегающего потока производилась с помощью электрических разрядов, инициированных между электродами различной конфигурации. Параметры воздушного потока в рабочей камере рассчитывались по одномерной теории, используя известные газодинамические функции на основе прямых измерений скорости ударной волны и начального давления в канале УТ. Визуализация картины течения вблизи модели осуществлялась теневым АВТ-методом, что позволяло фиксировать положение скачков уплотнения, а также регистрировать область свечения разрядного промежутка. Для определения электрических характеристик разрядной области проводились измерения напряжения и полного тока разряда.

Представлена методика оценки величины параметра гидромагнитного взаимодействия (параметр Стюарта) в условиях эксперимента. Параметр Стюарта $S = jBl/\rho v^2$ (j – плотность тока, B – магнитная индукция, l – характерный размер, ρv^2 – скоростной напор набегающего потока) используется для оценки эффективности гидромагнитного взаимодействия. Для определения плотности тока и электрической проводимости потока были использованы измерения полного тока разряда и размеров области проводимости потока. Размеры области эффективной проводимости определялись с помощью специально разработанного метода визуализации потока с использованием

программ обработки растровых изображений. Из предположения, что излучение разряда соответствует модели излучения «серого» тела, удалось оценить интегральное по направлению луча относительное распределение температуры плазмы в нормальной к направлению потока плоскости. По распределению температуры разрядного промежутка можно с достаточной точностью судить о его равновесной проводимости. Возможность определить характерную геометрию границ области потока с эффективной проводимостью дала дискретизация яркостной картины на эквидистанты (постеризация). На рис. 1 представлена типичная теневая картина обтекания модели пластины под нулевым углом атаки в магнитном поле. На поверхности тела был инициирован электрический разряд в направлении, нормальном к плоскости рисунка. Вверху на гистограмме показано распределение интенсивности яркости изображения по 256 градациям серого.

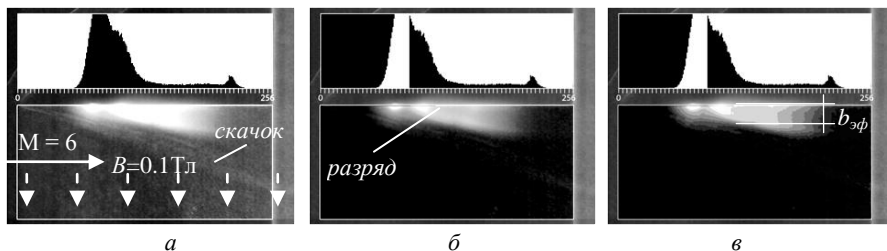


Рис. 1. Распределение интенсивности яркости 8-битного изображения
 а – исходная Шлирен-фотография, б – исключение лазерной составляющей излучения, в – постеризация изображения по 10 градациям серости.

Параметр взаимодействия можно представить в виде

$$S = \frac{Ib}{\rho v^2 b}, \quad (1)$$

где I – полный ток разряда, а b – характерный размер области взаимодействия нормальный к направлению потока. Тогда на основе предложенной методики можно определить S по измерениям величины I и эффективному размеру $b_{эф}$ (рис. 1, в). При этом относительная точность оценки параметра гидромагнитного взаимодействия в условиях экспериментов составила в среднем около 11 %.

Глава 3 посвящена исследованию электрических разрядов в гиперзвуковом потоке в магнитном поле. Рассмотрены особенности горения импульсного высоковольтного разряда и высокочастотного (ВЧ) разряда с частотой 1 МГц между медными электродами в следующих конфигурациях: поперек потока и вдоль магнитного поля, поперек потока и поперек магнит-

ного поля. Величина плотности тока для импульсного и ВЧ-разряда варьировалась в пределах $0.05\text{--}37\text{ A/cm}^2$ и $1\text{--}13.5\text{ A/cm}^2$ соответственно. Показано, что в зависимости от величины тока могут быть реализованы как тлеющий, так и дуговой разряд низкого давления. Отмечено, что с увеличением магнитного поля происходит «расширение» разрядной области, а с ростом давления, наоборот, сжатие. Соответственно с увеличением магнитного поля происходит уменьшение величины плотности тока и проводимости разрядного промежутка. В высокоскоростном потоке воздуха без магнитного поля разряд выносится из области между электродами за пределы модели. В магнитном поле наблюдается стабилизация области разряда между электродами, причем электрические разряды, инициированные вдоль линий индукции магнитного поля, обеспечивают более однородную область ионизации по сравнению с разрядами поперек поля. На рис. 2,а представлена шпирен-фотография разрядной области в гиперзвуковом потоке воздуха $M = 6$ при величине магнитной индукции 2 Тл и фотография разряда, сделанная в направлении магнитного поля (рис. 2,б). Параметры набегающего потока: скорость набегающего потока 2000 м/с, статическое давление 12 Тор, плотность 0.02 кг/м^3 температура потока 270 К. Узкие электроды размерами $2 \times 15\text{ мм}$ ориентированы поперек потока и поперек магнитного поля.

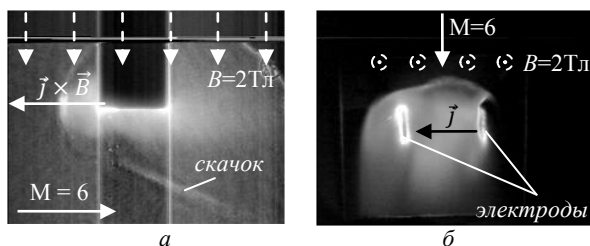


Рис. 2. Горение импульсного разряда в гиперзвуковом воздушном потоке.

В области МГД-взаимодействия образуется скачок уплотнения (рис. 2,а), вызванный локальным торможением набегающего потока в области МГД-взаимодействия в результате возникновения объемной пондеромоторной силы $\vec{j} \times \vec{B}$, направленной против течения, а также выделением тепла. Таким образом, область взаимодействия представляет собой затупленное тело с некоторым коэффициентом проницаемости для набегающего потока. Параметр S , определённый по средней высоте области взаимодействия, имел величину 0.18.

В главе 4 представлены результаты экспериментальных исследований влияния магнитного поля на гиперзвуковое обтекание клина при локальной ионизации газа перед моделью. Размеры электродов по высоте и маршевой координате составили 15 и 10 мм соответственно. Рассматривалось обтека-

ние симметричного клина с углом полураствора при вершине 15° воздушным гиперзвуковым потоком ($M = 6, 8, 10$).

На рис. 3 представлена схема эксперимента. Ионизация потока происходила с использованием импульсного электрического разряда, направленного поперек потока и магнитного поля. Величина тока разряда и индукции магнитного поля выбирались так, чтобы не допустить образования ударной волны, показанной на рис. 2. Исследования показали, что локальное МГД-взаимодействие перед клином приводит к изменению формы и угла наклона присоединенных скачков уплотнения. На рис. 4 представлены фотографии обтекания клина без разряда и магнитного поля (а) и с разрядом в магнитном поле $B = 0.13$ Тл (б). Видно, что изменился угол наклона и форма скачков уплотнения, что связано с изменением числа Маха заторможенного потока в зоне МГД-взаимодействия. Предполагаемый меха-

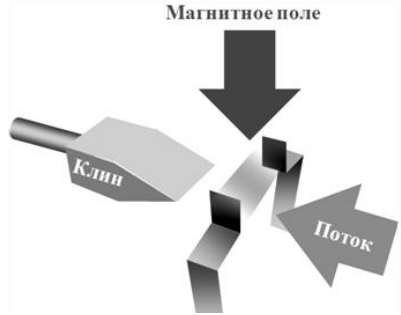


Рис. 3. Схема эксперимента.

низ взаимодействия следующий: в области ионизации набегающего потока под действием магнитного поля возникает объемная пондеромоторная сила $\vec{j} \times \vec{B}$, направленная против потока. В результате происходит локальное торможение потока и уменьшение числа Маха. Известно, что угол наклона скачка уплотнения есть функция числа Маха. Соответственно происходит изменение угла наклона скачка, что было зафиксировано на фотографиях. Параметр Стюарта, определённый по высоте электродов, имел величину $S = 0.07$. Сравнение шлирен-фотографий с результатами численного моделирования [1] показало их удовлетворительное совпадение. Также стоит отметить хорошее соответствие графиков зависимости угла наклона скачка от величины параметра гидромагнитного взаимодействия (рис. 5).

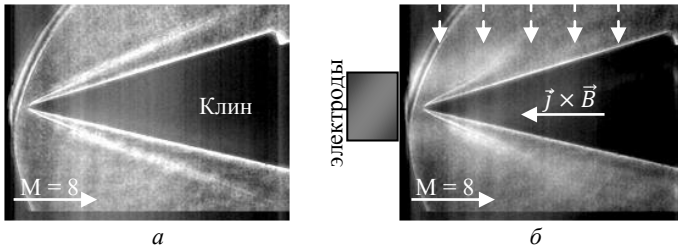


Рис. 4. Воздействие магнитного поля на обтекание клина при ионизации потока импульсным электрическим разрядом перед телом.

низ взаимодействия следующий: в области ионизации набегающего потока под действием магнитного поля возникает объемная пондеромоторная сила $\vec{j} \times \vec{B}$, направленная против потока. В результате происходит локальное торможение потока и уменьшение числа Маха. Известно, что угол наклона скачка уплотнения есть функция числа Маха. Соответственно происходит изменение угла наклона скачка, что было зафиксировано на фотографиях. Параметр Стюарта, определённый по высоте электродов, имел величину $S = 0.07$. Сравнение шлирен-фотографий с результатами численного моделирования [1] показало их удовлетворительное совпадение. Также стоит отметить хорошее соответствие графиков зависимости угла наклона скачка от величины параметра гидромагнитного взаимодействия (рис. 5).

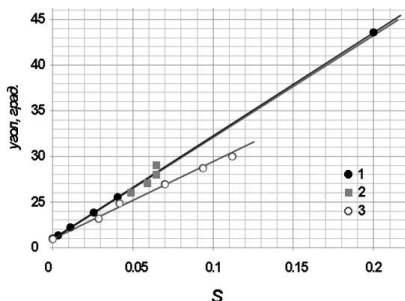


Рис. 5. Зависимость угла наклона скачка уплотнения от параметра S .
 1 – расчет [2], 2 – эксперимент 2008 г.,
 3 – эксперимент 2007 г.

В аналогичной постановке задачи было рассмотрено нестационарное МГД-взаимодействие при длительности импульса тока 12 мкс. Такое короткое воздействие на поток позволило наблюдать за динамикой изменения ударно-волновой структуры течения за время прохода области МГД-возмущения газа над клином и оценить время восстановления невозмущенного течения над моделью. Эксперименты показали, что время восстановления невозмущенного течения сравнимо с временем пролета газа над поверхностью модели (25 мкс). В условиях эксперимента время восстановления скачка уплотнения на передней кромке составило 3 мкс. Это позволяет сравнивать результаты экспериментов, полученные на временном интервале 100 мкс, с результатами численных исследований, полученных при расчёте установившегося течения.

В главе 5 представлены результаты экспериментальных исследований МГД-воздействия на гиперзвуковое обтекание пластины при локальной ионизации потока воздуха на поверхности модели. Для внешней ионизации потока применялись импульсный и ВЧ-разряд. Инициация разряда происходила между узкими медными электродами, смонтированными в поверхность модели;



Рис. 6. Схема эксперимента.

на рис. 6 представлена схема эксперимента. Обтекание пластины происходило в двух режимах: под нулевым углом атаки и углом атаки $\alpha = 15^\circ$. Эксперименты показали, что без магнитного поля разряд «сдувается» с области электродов. В результате МГД-взаимодействия по мере увеличения магнитного поля наблюдается стабилизация горения разряда между электродами ($S = 0.05$ при $\alpha = 0^\circ$ и $S = 0.2$ при $\alpha = 15^\circ$) и трансформация присоединенного скачка уплотнения в отошедший прямой ($S = 0.2$ при $\alpha = 0^\circ$ и $S = 0.3$ при $\alpha = 15^\circ$), что связано с торможением потока под скачком и увели-

чением области взаимодействия модели с набегающим потоком в результате раздувания области разряда (рис. 7). Величина тока разряда в этих экспериментах оставалась практически постоянной и равной 120 А. При умеренных магнитных полях $B \approx 0.8 - 1$ Тл ($S \approx 0.2$) для $\alpha = 0^\circ$ наблюдаются пульсации положения отошедшего скачка уплотнения частотой около 35 кГц. Этот процесс, вероятно, обусловлен шунтированием разряда между электродами после его вытягивания вверх по потоку, что ведет к росту сопротивления и напряжения разрядного промежутка.

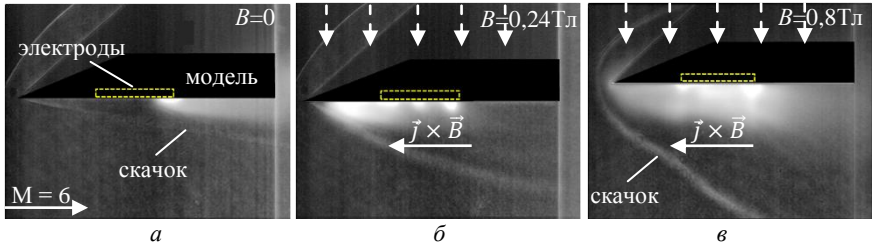


Рис. 7. МГД-воздействие на ударно-волновую структуру течения при гиперзвуковом обтекании пластины, $M = 6$.

Похожие результаты были получены при угле атаки модели 15° , но при больших числах S при тех же величинах тока разряда. На рис. 8 представлены величины параметра гидромагнитного взаимодействия, определённые по (1), в зависимости от величины магнитной индукции. Сравнение экспериментальных данных и результатов численного моделирования показало качественное совпадение в изменении скачка уплотнения при увеличении магнитного поля.

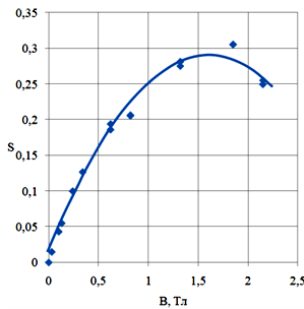


Рис. 8. Зависимость параметра Стюарта от величины магнитной индукции при нулевом угле атаки модели.

В аналогичной постановке задачи для ионизации потока на поверхности модели был использован ВЧ-разряд с частотой 1 МГц и продолжительностью импульса 200 мкс. Такой разряд позволяет поддерживать практически постоянную проводимость разрядного промежутка в течение импульса. В потоке без магнитного поля область разряда сдувается за пределы модели. При включении магнитного поля $B = 0.34$ Тл разряд локализуется между электродами. При сильных магнитных полях ($B \geq 0.8$ Тл) наблюдается генерация нового косого скачка уплотнения на области разряда (рис. 9,а). При этом увеличение магнитного поля приводит к росту угла наклона скачка. Данный эффект по характеру изменения ударно-волновой структуры потока эквивалентен действию отклоненного аэродинамического щитка и может быть интерпретирован как эффект МГД-элерона. Фотографии МГД-эффекта при $B = 0.8$ Тл (рис. 9,а) были сопоставлены с картиной обтекания пластины с отклоненной плоскостью под углом 10° (рис. 9,б). В обоих случаях угол наклона косого скачка уплотнения составил 15° .

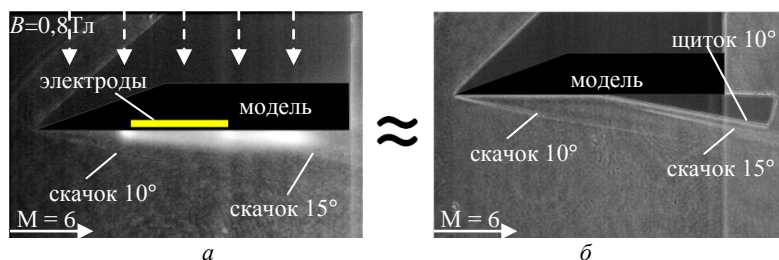


Рис. 9. Эффект МГД-элерона и эквивалентная аэродинамическая схема.

Заключение

1. Проведено исследование состояния изученности способов МГД-управления гиперзвуковым обтеканием тел. Показано, что сегодня задача исследования МГД-технологии управления гиперзвуковым потоком остаётся актуальной. Решение задачи позволит создавать эффективные бортовые МГД-системы для управления аэродинамическими характеристиками ГЛА.
2. Разработана методика оценки границ эффективных значений проводимости по распределению яркости АВТ-фотографии с использованием программ обработки растровых изображений.

3. Рассмотрены особенности поведения различных электрических разрядов и их характеристик в высокоскоростных потоках в магнитном поле. Показано, что гиперзвуковой поток может быть локально ионизован высоковольтным импульсным и высокочастотным электрическими разрядами для осуществления эффективного МГД-взаимодействия.
4. Проведено экспериментальное исследование МГД-управления потоком воздуха при гиперзвуковом обтекании клина при внешней ионизации газа перед моделью. Показано:
 - при ионизации натекающего потока импульсным электрическим разрядом перед моделью МГД-взаимодействие приводит к увеличению угла наклона косоугольного присоединенного скачка уплотнения на клине;
 - время установления потока сравнимо со временем пролета частиц газа над моделью (25 мкс в условиях эксперимента).
5. Проведено экспериментальное исследование МГД-управления потоком воздуха при гиперзвуковом обтекании пластины при внешней ионизации газа на поверхности модели. Показано:
 - при локальной ионизации потока импульсным электрическим разрядом в магнитном поле МГД-взаимодействие на плоскости может трансформировать косоугольный присоединенный скачок уплотнения в отошедший прямой скачок, что значительно увеличивает сечение взаимодействия пластины с потоком и, как следствие, ее аэродинамическое сопротивление;
 - при ионизации потока ВЧ-разрядом МГД-взаимодействие на плоскости приводит к генерации косоугольного скачка уплотнения на плоской пластине, угол наклона которого увеличивается с увеличением магнитной индукции, что может быть использовано для создания управляющих моментов в условиях полета в верхних слоях атмосферы.
6. Проведена оценка эффективности МГД-взаимодействия в зависимости от величины магнитной индукции. Показано, что МГД-эффект достижим при величинах магнитной индукции $B < 1$ Тл.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. N. Malmuth, V.M. Fomin et. al. Studies of heat and force effects on a supersonic flow // Fin. Rep. ИТАМ_ЕВ_2004, 36 p.

2. Коротаева Т.А., Фомичев В.П., Шашкин А.П., Ядренкин М.А. Исследование МГД-взаимодействия в сверхзвуковом потоке воздуха при $M = 8$ // Журнал Технической Физики: Т. 81, вып. 3, С. 10-17.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Bobrovnikova E.Yu., Podzin V.E., Pravdin S.S., Fomichev V.P., Shevchenko A.B., Yadrenkin M.A.. Definition of hypersonic stream parameters in the wind tunnel with adiabatic gas compression in the nozzle settling chamber // Int. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Abstracts. Pt. I. Novosibirsk, 2008. P. 28–29.
2. Fomichev V.P., Korotaeva T.A., Shashkin A.P., Yadrenkin M.A. Investigation of the MHD-interaction in a supersonic flow [электронный ресурс] // 17th Int. Conf. on MHD Energy Conversion: Proc. Kanagawa, 2009. IK1-3, 13 p. [CD-ROM]
3. Fomichev V.P., Podzin V.E., Shevchenko A.B., Yadrenkin M.A. Investigation of the air flow around a wedge at $M = 6$ under the local MHD-influence // Proc. 9th Workshop on Magneto-Plasma Aerodyn. / Ed. V.A. Bityurin. Moscow: JИHT RAS, 2010. P. 83–85.
4. Гончаров А.Е., Ядренкин М.А. К вопросам о моделировании МГД-управления гиперзвуковым потоком // Труды Всероссийской научно-технической конференции "Наука. Промышленность. Оборона", посв. 60-летию НГТУ (21-23 апреля 2010). Новосибирск, 2010. С. 145–148.
5. Fomichev V.P., Goncharov A.E., Korotaeva T.A., Shashkin A.P., Yadrenkin M.A. The Time of Flow Settling at the MHD-effect on a Hypersonic Flow // 19th Int. Shock Interaction Symp.: Proc. Moscow: Joint Inst. of High Temp., 2010, 5 p. [электронный носитель: CD-ROM].
6. Fomichev V.P., Podzin V.E., Shevchenko A.B., Yadrenkin M.A.. About the time of flow settling over the wedge at the MHD-effect on a hypersonic flow // Int. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Abstracts. Pt. II. Novosibirsk, 2010. P. 64–65.
7. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. Dimensionless parameter to define the slope angle of the oblique shock wave under the local MHD-influence // Int. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Abstracts. Pt. II. Novosibirsk, 2010. P. 66–67.
8. Коротаева Т.А., Фомичев В.П., Шашкин А.П., Ядренкин М.А. Исследование МГД-взаимодействия в сверхзвуковом потоке воздуха при $M = 8$ // Журнал технической физики. 2011. Т. 81, вып. 3. С. 10–17.
9. Fomichev V.P., Podzin V.E., Shevchenko A.B., Yadrenkin M.A. The Experimental study of the electrical discharge over the flat plate in a hypersonic air flow at the magnetic field // Proc. the 10th Int. Workshop on Magneto-Plasma Aerodyn. / Ed. V.A. Bityurin. Moscow: JИHT RAS, 2011. P. 80–82.

10. Fomichev V.P., Podzin V.E., Shevchenko A.B., Yadrenkin M.A. Formation of the shock wave on a wedge in the hypersonic air flow at the local MHD-interaction // Proc. 10th Int. Workshop on Magneto-Plasma Aerodyn. / Ed. V.A. Bityurin. Moscow: JИHT RAS, 2011. P. 86–88.
11. Фомичев В.П., Ядренкин М.А.. Исследование ВЧ-разряда в сверхзвуковом потоке и магнитном поле // Международная конференция «Физика высокочастотных разрядов». Международная школа молодых ученых и специалистов «Высокочастотный разряд: теория и техника»: материалы конференции. Казань: Изд-во КГТУ, 2011. С. 298–299.
12. Подзин В.Е., Фомичев В.П., Шевченко А.Б., Ядренкин М.А. Исследование ВЧ-разряда в сверхзвуковом потоке и магнитном поле // Вестник Казанского технологического университета. 2011. №19. С. 303–305.
13. Fomichev V.P., Podzin V.E., Shevchenko A.B., Yadrenkin M.A.. Flow Settling over a Wedge at the MHD-Effect on a Hypersonic Air Flow [электронный ресурс] // AIAA Hawaii Summer Conference 2011. Honolulu, 2011. Proc. AIAA-2011-3744. URL: <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2011-3744> (дата обращения: 18.07.2013).
14. Fomichev V.P., Podzin V.E., Shevchenko A.B., Yadrenkin M.A.. Experimental Study of the MHD-Parachute Phenomena in a Hypersonic Air Flow [электронный ресурс] // AIAA Hawaii Summer Conference 2011. Honolulu, 2011. Proc. AIAA-2011-3462. URL: <http://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2011-3462> (дата обращения: 18.07.2013).
15. Фомичев В.П., Ядренкин М.А. Экспериментальное исследование методов МГД-управления гиперзвуковым обтеканием тел // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. № 4, ч. 3. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011. С. 1217–1218.
16. Фомичев В.П., Ядренкин М.А.. Экспериментальное исследование методов МГД-управления гиперзвуковым обтеканием тел // X Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: Тезисы докладов. Н. Новгород, 2011. С. 188–189.
17. Фомичев В.П., Ядренкин М.А. Магнитогидродинамическое управление гиперзвуковым обтеканием клина и пластины. // Аэродинамика и прочность конструкций летательных аппаратов: Труды Всероссийской юбилейной научно-технической конференции, посвящённой 70-летию со дня основания СибНИА, Новосибирск, 2011. С. 182–186.
18. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. ITAM experimental studies of MHD-control of hypersonic flow around bodies // 8th Sino-Russia High-speed Flow Conference: Proc. Shanghai: China Academy of Aerospace Aerodynamics, 2011. P. 308–314.

19. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. Bow shock pulsations in the flow around a plate at strong MHD interaction // Proc. 11th Int. Workshop on Magneto-Plasma Aerodyn. / Ed. V.A. Bityurin. Moscow: JИHT RAS, 2012. P. 34–35.
20. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. Hypersonic flow control near a plate using a RF-discharge in a magnetic field // Proc. 11th Int. Workshop on Magneto-Plasma Aerodyn. / Ed. V.A. Bityurin. Moscow: JИHT RAS, 2012. P. 42–44.
21. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. Investigation of a hypersonic flat plate at local MHD-interaction // 9th International Workshop Thermochemical Processes in Plasma Aerodynamics: Abstracts. St. Petersburg, 2012. P. 42–44.
22. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. Study of the RF-discharge over a flat plate in a hypersonic flow and magnetic field // Int. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Abstracts. Pt. II. Kazan: KFSU Publ., 2012. P. 86–87.
23. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. The pulse discharge effect on a flow shock wave structure over a plate in a magnetic field // Int. Conf. on the Methods of Aerophys. Research: Abstracts. Pt. II. Kazan: KFSU Publ., 2012. P. 88–89.
24. Ядренкин М.А. Виртуальный парашют: от фантастики к реальности // Наука из первых рук. 2012. №3. С. 34–39.
25. Фомичев В.П., Ядренкин М.А. Экспериментальное исследование эффекта МГД-парашюта в гиперзвуковом воздушном потоке // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, вып. 1. С. 152–155.
26. Фомичев В.П., Ядренкин М.А.. Пульсации положения головного скачка уплотнения в результате сильного МГД-взаимодействия при гиперзвуковом обтекании пластины // Письма в журнал технической физики. 2013. Т. 39, вып. 1. С. 28–32.
27. Фомичев В.П., Ядренкин М.А. Исследование ВЧ-разряда, инициированного поперек гиперзвукового потока воздуха и магнитного поля // Письма в журнал технической физики. 2013. Т. 39, вып. 1. С. 33–38.
28. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. The ionization of a hypersonic flow using the electrical discharge in the magnetic field // 12th Int. Workshop on Magneto-Plasma Aerodyn. Abstracts. / Ed. V.A. Bityurin. Moscow: JИHT RAS, 2013. P. 89.
29. Фомичев В.П., Ядренкин М.А.. О методике определения электрической проводимости газа по данным визуализации МГД-течения // Материалы XVIII Междунар. конф. по вычисл. механике и современным прикладным программным системам: М.: Изд-во МАИ, 2013. С. 710–711.
30. Fomichev V.P., Yadrenkin M.A. MHD-Control of a Shock-Wave Structure at a Hypersonic Flow [электронный ресурс] // 5th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. Munich, 1-5 July 2013. Abstracts. [CD ROM]

Ответственный за выпуск Ядренкин М. А.

Подписано в печать « » _____ 2013
.формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.0,
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ №10

Отпечатано в типографии издательства «Параллель»
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1