

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

На правах рукописи



ПОПОВ Павел Аркадьевич

**МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКОЕ
УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНОМ НА
ПОВЕРХНОСТИ ТЕЛА В
СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН
и Санкт-Петербургском государственном политехническом университете

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

Официальные оппоненты: *Шарков Александр Васильевич*
доктор технических наук, профессор
(ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, заведующий кафедрой)

Куранов Александр Леонидович
доктор технических наук, профессор
(ОАО «Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем», г. Санкт-Петербург, генеральный директор)

Ведущая организация: *ФГУП Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова, г. Санкт-Петербург*

Защита состоится 24 мая в 18 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 при ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургском государственном политехническом университете, расположенном по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, ауд. 225

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,

кандидат технических наук, доцент



Талалов В.А.

Общая характеристика работы

Актуальность работы Известно, что движение тела со сверхзвуковыми скоростями сопровождается сильным аэродинамическим нагревом его поверхности. Обязательным конструктивным элементом любого высокоскоростного летательного аппарата является тепловая защита, предотвращающая его разрушение вследствие перегрева. В традиционных способах тепловой защиты, применяются абляционные материалы, которые постепенно сгорают и уносятся набегающим потоком газа, отводя тепло от поверхности летательного аппарата. Наряду с совершенствованием существующих способов, ведется поиск новых подходов к решению данной задачи. Учитывая, что нагретый газ вблизи поверхности сверхзвукового летательного аппарата частично ионизован, рассматриваются методы магнитной газодинамики как инструмент управления структурой обтекания и, соответственно, тепловыми потоками.

Экспериментальные исследования, посвящённые магнитогазодинамическому (МГД) управлению сверхзвуковыми течениями, как правило, проводятся на установках импульсного действия, таких как ударные трубы. Наряду с известными преимуществами и удобством применения ударных труб, исследование МГД управления на установках такого типа сопряжено с некоторыми сложностями. Одной из них является создание сверхзвукового потока газа с высокой электрической проводимостью, достаточной для реализации эффективного МГД воздействия. Наличие сильного импульсного магнитного поля с индукцией, достигающей одного тесла, представляет определённую сложность для техники измерений. В частности, традиционные средства измерения тепловых потоков оказываются неприменимыми. Этим объясняется малое количество экспериментальных работ, посвящённых изучению теплообмена при МГД управлении сверхзвуковыми течениями на установках импульсного действия.

В настоящей работе исследовалось МГД устройство, позволяющее воздействовать на структуру сверхзвукового обтекания и управлять теплообменом на поверхности модели в широком диапазоне электрической проводимости набегающего потока газа. Измерение теплового потока, действующего на поверхность модели, осуществлялось с помощью градиентных датчиков теплового потока на анизотропных термоэлементах. В настоящее время эти дат-

чики являются единственным средством измерения, надежно работающим в условиях сильных магнитных полей, что позволило провести тепловые измерения при всех режимах работы МГД устройства.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование возможностей магнитогазодинамического управления теплообменом на поверхности модели в сверхзвуковом потоке газа.

Задачи диссертационной работы:

1. Разработка способа магнитогазодинамического воздействия на сверхзвуковой поток в широком диапазоне электрической проводимости газа. Создание экспериментальной модели, внутри которой должны быть расположены все элементы, необходимые для реализации МГД воздействия;
2. Проведение экспериментов, посвящённых исследованию МГД воздействия на структуру сверхзвукового обтекания и возможности управления тепловым потоком на поверхность модели с помощью разработанного устройства;
3. Создание методики обработки сигнала градиентного датчика теплового потока на анизотропных термоэлементах, позволяющей рассчитывать величину импульсного теплового потока в диапазоне времен, характерном для газодинамических экспериментов на ударных трубах;
4. Анализ экспериментальных результатов и определение оптимальных параметров МГД воздействия, позволяющих эффективно управлять тепловым потоком на поверхность тела в сверхзвуковом потоке.

Научная новизна

1. Предложен новый способ МГД воздействия на структуру сверхзвукового обтекания тела, эффективность которого не зависит от электрической проводимости набегающего потока газа. Разработана конструкция устройства, реализующая предложенный способ МГД воздействия и позволяющая управлять тепловыми потоками, действующими на поверхность тела;
2. Изучены особенности динамики газового разряда при различных условиях обтекания модели и параметрах МГД воздействия;
3. Исследованы особенности работы градиентного датчика теплового пото-

ка на анизотропных термоэлементах в условиях импульсных тепловых воздействий. Предложен алгоритм расчёта величины импульсного теплового потока по сигналу датчика в диапазоне времен, характерном для экспериментов на ударных трубах.

Практическая значимость

1. Определены режимы работы МГД устройства, наиболее эффективные с точки зрения максимального воздействия на сверхзвуковой поток газа. Признано целесообразным использование устройства с магнитным сердечником и подключение кольцевого электрода к отрицательному полюсу источника тока;
2. Предложенный способ МГД воздействия может быть использован при моделировании аэродинамического нагрева поверхности тела, что позволяет расширить возможности газодинамической установки. В описываемых экспериментах, была достигнута плотность импульсных тепловых потоков составляющая $\sim 10 \text{ МВт/м}^2$.
3. Предложенный алгоритм обработки сигнала ГДТП показал свою применимость для расчёта теплового потока в газодинамических экспериментах на ударных трубах в диапазоне времен от 1 мкс до 1 мс;

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод магнитогазодинамического воздействия на структуру сверхзвукового обтекания, позволяющий управлять тепловым потоком на поверхность тела в широком диапазоне электрической проводимости набегающего потока газа;
2. МГД устройство, с помощью которого достигнуто изменение до 200 % величины теплового потока на поверхность модели при изменении индукции магнитного поля на 15 %;
3. Алгоритм обработки сигнала градиентного датчика теплового потока, являющийся удобным инструментом исследования импульсных тепловых потоков в газодинамических экспериментах.

Апробация работы Основные результаты работы были представлены на 8 международных конференциях:

46th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 7 - 10 January, 2008, Reno, Nevada, USA; XIV Международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2008). 30 июня - 6 июля, 2008, Новосибирск, Россия; XVII Всероссийская конференция «Теоретические основы и конструирование чис-

ленных алгоритмов и решение задач математической физики с приложением к многопроцессорным системам». 15 - 21 сентября, 2008, Абрау-Дюрсо, Новороссийск, Россия; 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 5 - 8 January, 2009, Orlando, Florida, USA; 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 4 - 7 January, 2010, Orlando, Florida, USA; VIII Международная конференция «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики». 20 - 26 сентября, 2010, Алушта, Украина; IX Международная конференция «Импульсные процессы в механике сплошных сред». 15 - 19 августа, 2011, Николаев, Украина; 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 9 - 12 January, 2012, Nashville, Tennessee, USA.

Публикации Основные материалы диссертации опубликованы в 5 статьях в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК: Журнал технической физики, Письма в Журнал технической физики.

Личный вклад автора Автор участвовал в постановке задач исследований, планировании и выполнении экспериментов. Им разработан алгоритм и созданы программы обработки данных измерений, проведена обработка результатов экспериментов. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Структура и объём диссертации Диссертация состоит из введения, обзора литературы, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объём диссертации составляет 159 страниц, включая 75 рисунков и 6 таблиц, библиография включает 115 наименований цитируемой литературы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и отмечена научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В обзоре литературы приведен краткий анализ теоретических и экспериментальных исследований в области магнитогазодинамических (МГД) способов воздействия на структуру сверхзвукового обтекания тела и тепловые потоки на его поверхность. Из рассмотренной литературы следует, что воздействие магнитного поля на ионизованный газ вблизи поверхности тела

приводит к перестроению картины обтекания и существенному изменению величины теплового потока. Необходимо отметить, что в основном разработке данной проблемы посвящены теоретические и расчётные работы. Проведение экспериментальных исследований МГД воздействия на сверхзвуковые течения связано с рядом сложностей, среди которых отмечается малая проводимость газа и необходимость создания сильных магнитных полей. Отмечается также отсутствие надежных средств измерения теплового потока, устойчивых к сильным магнитным полям. Указанные трудности объясняют сравнительно малое количество экспериментальных работ, посвящённых изучению теплообмена при МГД воздействии на импульсных газодинамических установках.

Вторая часть обзора литературы посвящена анализу современных датчиков теплового потока, применяющихся в газодинамическом эксперименте. Из рассмотренной литературы следует, что традиционные датчики оказываются неприменимыми в условиях сильных магнитных полей. Проанализированы возможности новых типов датчиков на основе поперечного эффекта Зеебека, в особенности градиентного датчика теплового потока (ГДТП) на анизотропных термоэлементах. Из обзора литературы следует, что в настоящее время ГДТП является единственным измерительным прибором, надёжно работающим в условиях сильных магнитных полей порядка одного Тесла ¹.

В первой главе приведено описание экспериментальной установки, исследуемых моделей, а также применяемых методов оптической и тепловой диагностики.

Описываемые исследования были выполнены на импульсных газодинамических установках, созданных на базе Большой Ударной Трубы ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Эксперименты проводились в сверхзвуковом потоке азота с числом Маха $M = 4$. Длительность стационарного течения газа составляла 1.5 мс.

В качестве формы исследуемых моделей был выбран конус, сопряжённый с цилиндром. Корпус моделей был изготовлен из капролона, угол раствора конуса составлял 60° , диаметр цилиндра 34 мм, а его длина 38 мм. Эксперименты проводились на трёх моделях, две из которых были оборудованы

¹ В настоящей работе применялись ГДТП разработанные Н.П.Дивиным, В.Ю.Митяковым, С.З.Сапожниковым и А.В.Митяковым в СПбГПУ. Датчики защищены патентом ЕР1223411 от 17.07.2002 (см. С.З.Сапожников, В.Ю.Митяков, А.В.Митяков. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2007).

МГД устройством. Третья модель не имела МГД устройства и использовалась только для измерения теплого потока при невозмущённом сверхзвуковом обтекании. Для этого на её конической и цилиндрической поверхности были установлены шесть ГДТП размером 2.2×2.2 мм.

МГД устройство, установленное на первой (рис. 1) и второй модели (рис. 2), состоит из элементов, необходимых для инициирования электрического разряда и создания магнитного поля. Разрядный промежуток находится на конической поверхности между кольцевым и центральным электродом. Магнитное поле генерируется катушкой, установленной внутри цилиндрической части модели.

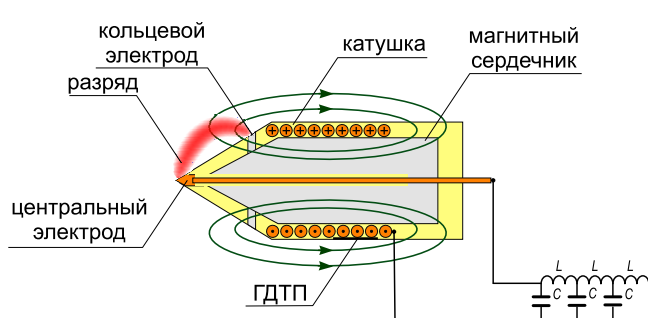


Рис. 1. Модель с сердечником и единой цепью разряда и катушки.

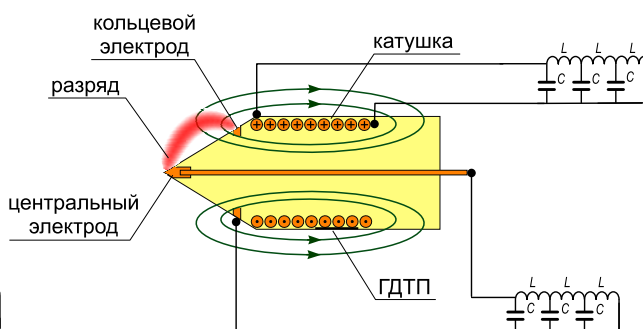


Рис. 2. Модель без сердечника и раздельными цепями разряда и катушки.

В первой модели электрические цепи разряда и катушки были соединены последовательно и образовывали единую схему питания. Внутри модели был установлен металлический сердечник, выполнявший функции усилителя магнитного поля и магнитопровода. Вторая модель, в которой отсутствовал сердечник, имела раздельную схему питания, что позволяло независимо изменять ток в цепи разряда и катушки.

Перед началом эксперимента внешний источник питания заряжался до напряжения ≈ 500 В. Пробой разрядного промежутка и запуск МГД устройства осуществлялся подачей в цепь разряда инициирующего высоковольтного импульса длительностью ~ 1 мкс. В экспериментах на обеих моделях форма импульса тока, его максимальное значение и время существования разряда (рис. 3) были примерно одинаковы. При одинаковой силе тока в цепи катушки, распределение индукции магнитного поля вблизи поверхности моделей

существенно различалось из-за наличия сердечника внутри одной из них.

Область максимального МГД воздействия сосредоточена вблизи конической поверхности модели. На протекающий через разрядный промежуток ток воздействует магнитное поле катушки, что вызывает вращение канала разряда вокруг оси модели под действием пондеромоторной силы. В предложенном МГД устройстве воздействие на набегающий поток газа осуществляется за счёт двух факторов: пондеромоторной силы, вращающей разряд, и джоулева тепловыделения. Оба фактора вызывают изменение локальных газодинамических параметров, что приводит к изменению структуры обтекания модели и, как следствие, величины теплового потока на её поверхность. Проведённые эксперименты показали устойчивую работу МГД устройства в широком диапазоне электрической проводимости набегающего потока газа.

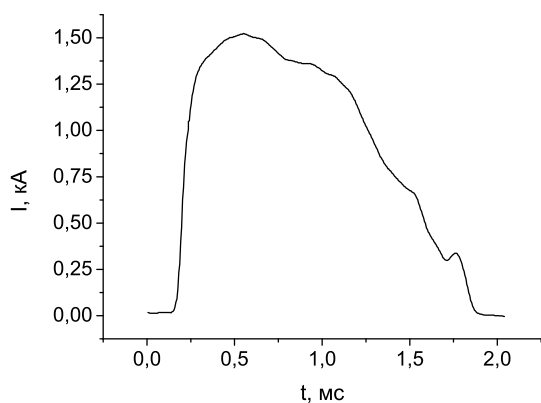


Рис. 3. Импульс тока в цепи разряда и катушки на модели с сердечником.

Измерение теплового потока осуществлялось с помощью ГДТП размером 6×4 мм, закреплённого на цилиндрической поверхности модели.

Во второй главе описывается алгоритм обработки сигнала ГДТП, позволяющий рассчитать величину импульсного теплового потока, действующего на его рабочую поверхность в диапазоне времен, характерном для экспериментов на ударных трубах.

Необходимость исследований, описываемых в данной главе, продиктована отсутствием в настоящее время, простых способов расчёта теплового потока по сигналу датчиков на анизотропных термоэлементах при импульсных тепловых воздействиях длительностью от 1 мкс до 1 — 3 мс.

На основе численного моделирования импульсного нагрева анизотроп-

ных термоэлементов ГДТП исследовано влияние анизотропии теплопроводности на распределение температуры. Установлено, что отклонение температуры вблизи торцов термоэлемента не превышает 15 % от её значения в среднем сечении. Показано, что при отношении длины к ширине анизотропного термоэлемента > 10 в основном объёме можно пренебречь краевыми эффектами и рассматривать одномерную тепловую задачу.

Проведен анализ основных термоэлектрических процессов в анизотропных термоэлементах при импульсном нагреве. Показано, что при отношении длины к ширине > 10 в основном объёме термоэлемента можно пренебречь вкладом продольной термоэдс и учитывать только поперечную термоэдс. Данное упрощение позволило провести анализ термоэлектрических процессов в одномерной постановке. Получено соотношение, связывающее электрический сигнал датчика с распределением температуры в анизотропном термоэлементе и учитывающее основные характерные особенности термоэлектрических процессов при импульсном нагреве. [1].

На основе полученных результатов, предложен алгоритм и создана программа, позволяющие рассчитать величину теплового потока по сигналу ГДТП, в диапазоне времен, характерном для импульсных газодинамических экспериментов ($\sim 1 \text{ мкс} \div 1 \text{ мс}$). Тестирование алгоритма выполнено при обработке результатов серии газодинамических экспериментов на импульсной аэродинамической трубе ИТ-302 (ИТПМ СО РАН, Новосибирск) [2]. В выходном сечении сопла была установлена пластина под нулевым углом атаки. Установленные на ней датчики ГДТП и АЛТР одновременно регистрировали действующий на них тепловой поток. В условиях данного эксперимента, датчик АЛТР непосредственно измерял проходящий через него тепловой поток. На рис. 4 показан тепловой поток, измеренный датчиком АЛТР и рассчитанный по сигналу ГДТП с помощью предлагаемого алгоритма для одного из экспериментов.

На представленном рисунке видно, что формы кривых совпадают, наблюдается хорошая корреляция низкочастотной составляющей теплового потока $\sim 1 \text{ кГц}$. Отличие результатов измерения теплового потока с помощью АЛТР и расчёта по сигналу ГДТП в этом диапазоне частот не превышает $\sim 10 \%$. Отличие высокочастотной составляющей может быть вызвано локальными неоднородностями сверхзвукового потока газа вблизи каждого из датчиков.

В третьей главе представлены результаты экспериментов, посвящённых изучению особенностей измерения с помощью ГДТП импульсных тепловых потоков малой плотности.

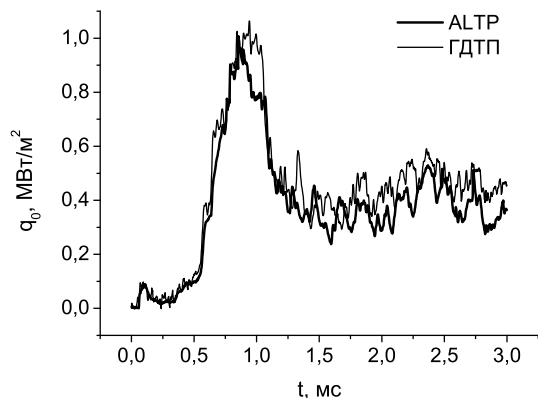


Рис. 4. Тепловой поток, измеренный датчиком ALTP и рассчитанный по сигналу ГДТП.

воздух, числа Маха варьировались в диапазоне $M = 1.3 \div 1.6$. В экспериментах применялся ГДТП, имевший геометрические размеры в плане 6×4 мм.

Проведённые исследования показали, что измерение таких тепловых нагрузок сопряжено с определёнными сложностями, вызванными, в частности, низким уровнем сигнала датчика и достаточно сильной его зашумленностью. На рис. 5 показан сигнал ГДТП при отражении ударной волны. Высокочастотная составляющая амплитудой до ≈ 0.2 мВ соответствует шумам усилителя осциллографа, а пульсации более низкой частоты ~ 0.5 МГц и амплитудой до ≈ 1 мВ вызваны, по-видимому, радиопомехами. Видно, что амплитуда шумов достигает 30 % от максимального значения сигнала ГДТП.

Непосредственное применение алгоритма обработки сигнала ГДТП, описанного в главе 2, в данном случае приводит к значительным осцилляциям величины теплового потока, не соответствующим газодинамическим про-

В качестве способа кратковременного теплового воздействия длительностью ~ 1 мкс было выбрано нормальное отражение ударной волны от рабочей поверхности датчика. Более длительное воздействие ~ 400 мкс осуществлялось нагретым газом за ударной волной, прошедшей вдоль поверхности датчика. Плотность тепловых потоков на рабочую поверхность датчика составляла $\approx 10 \div 20$ кВт/м².

В качестве рабочего газа применялся

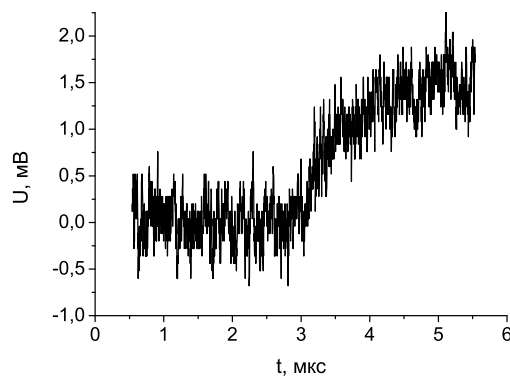


Рис. 5. Сигнал ГДТП при отражении от его рабочей поверхности ударной волны с числом Маха $M = 1.56$.

цессам. Указанное обстоятельство естественным образом требует введения в алгоритм расчёта дополнительной процедуры сглаживания. Особенность используемой процедуры заключается в определении аппроксимирующей зависимости изменения температуры поверхности датчика, а не измеренного сигнала. Параметры аппроксимации подбираются на основании минимизации отклонений расчётной зависимости сигнала от измеренной в эксперименте.

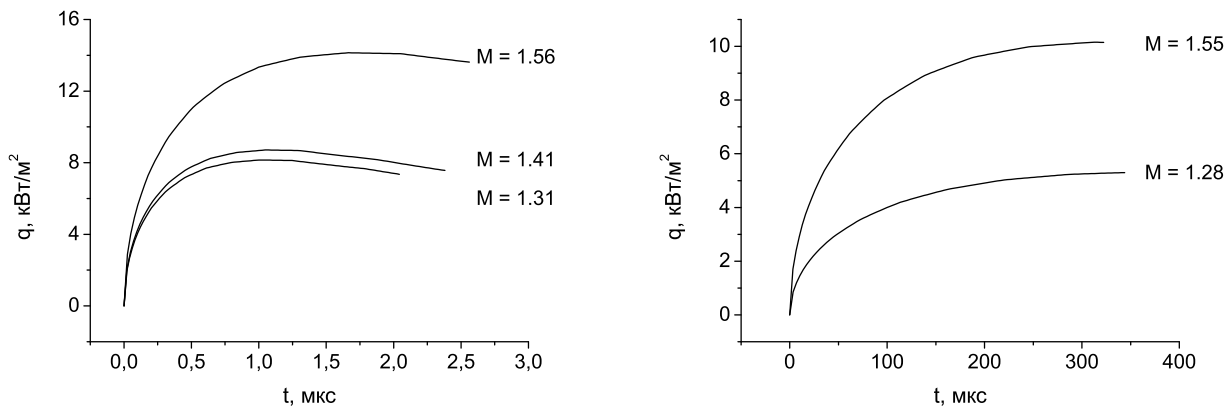


Рис. 6. Тепловые потоки, рассчитанные по сигналу ГДТП при нормальном отражении ударной волны (левый рисунок) и её прохождении вдоль теплового датчика (правый рисунок).

На рис. 6 показаны тепловые потоки, рассчитанные по сигналу ГДТП при нормальном отражении ударной волны и её прохождении вдоль датчика. Видно, что с увеличением интенсивности ударной волны величина теплового потока монотонно растёт. Все представленные на графике кривые имеют максимум, который сдвигается в сторону больших времен по мере увеличения интенсивности ударной волны. На основе анализа полученных результатов можно утверждать, что в рассматриваемых газодинамических процессах минимальная регистрируемая величина теплового потока составляет 1 кВт/м^2 . При этом достигается временное разрешение порядка 10^{-6} с .

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований магнитогазодинамического управления тепловым потоком на поверхность тела при сверхзвуковом обтекании.

Полученные результаты включают:

- характеристики сверхзвукового обтекания моделей при наличии и отсутствии магнитного поля;

- структуру разряда и его распределение по конической поверхности модели и основные закономерности вращения токового канала;
- результаты измерения теплового потока, действующего на цилиндрическую поверхность моделей.

Оптическая диагностика сверхзвукового обтекания моделей проводилась как при МГД воздействии, так и без него. В данных экспериментах цепи разряда и катушки на модели без сердечника были соединены последовательно, что соответствовало электрической схеме модели с сердечником. Сила тока в цепи разряда и катушки обеих моделей была одинакова и достигала 1.5 кА.

На рис. 7 показаны фотографии сверхзвукового обтекания модели без МГД устройства (фото 1), модели с МГД устройством и магнитным сердечником (фото 2) и модели с МГД устройством без магнитного сердечника (фото 3). Теневая фотосъемка сверхзвукового течения осуществлялась с выдержкой 50 нс. Экспозиция светлой области вблизи конической поверхности на фотографии (2) и (3) происходила за счёт свечения разряда в течение всего времени его существования (≈ 2 мс).

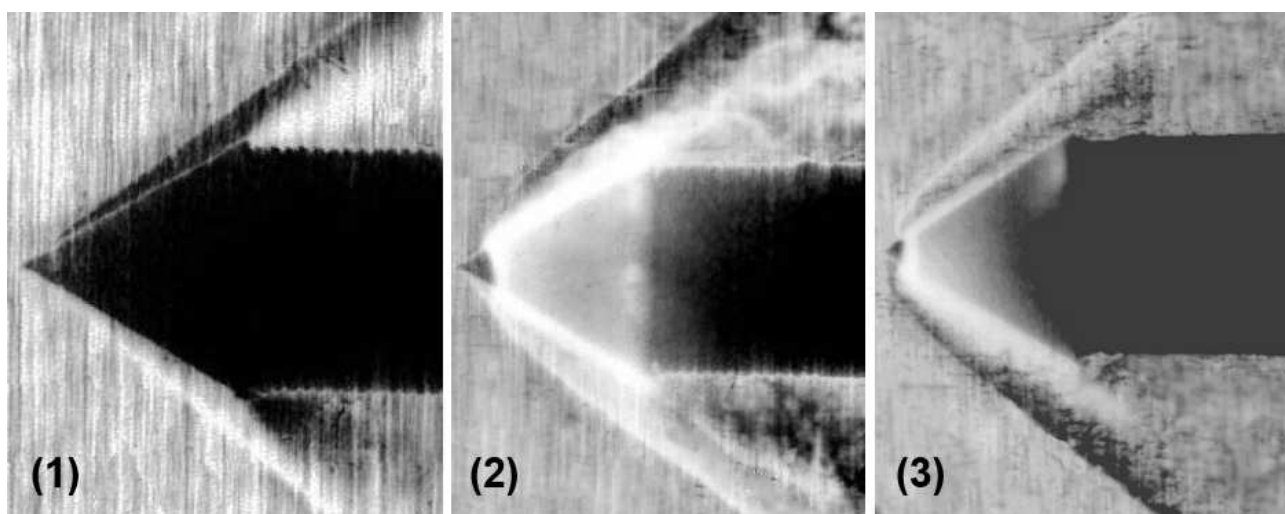


Рис. 7. Фотографии сверхзвукового обтекания моделей: (1) - без МГД воздействия, при МГД воздействии с помощью модели с сердечником (2) и без него (3).

Из представленных фотографий видно, что МГД устройство на обеих моделях существенно изменяет структуру сверхзвукового обтекания. Головная ударная волна меняет свое положение и деформируется. Заметны различия в структуре обтекания и формы разряда вблизи модели с сердечником (2) и без него (3). В первом случае турбулентные возмущения вблизи цилиндрической поверхности выражены значительно сильнее, засветка области разряда вбли-

зи конической поверхности, практически равномерная, а её интенсивность заметно выше. Поскольку сила тока в цепи разряда и катушки на обеих моделях совпадала, то указанные особенности вызваны различным распределением индукции магнитного поля.

Применение высокоскоростной фотосъёмки позволило определить структуру разряда, его распределение по конической поверхности и изучить особенности вращения.

Установлено, что на модели без сердечника (3) разряд не имеет ярко выраженных границ и распределен по значительной части конической поверхности. В силу малой яркости разряда не удалось точно определить частоту вращения и его форму, т.к. период обращения оказался сопоставим с длительностью эксперимента (~ 1 мс).

На модели с магнитным сердечником разряд представляет собой локализованный токовый канал, имеющий спиралевидную форму, а его вращение носит периодический характер. Обнаружено, что частота вращения разряда существенно зависит от полярности подключения кольцевого электрода. При прочих равных условиях в случае отрицательной полярности частота вращения примерно в два раза выше чем при положительной. В данных экспериментах она равнялась 30 кГц и 15 кГц соответственно. Также обнаружено, что при положительной полярности кольцевого электрода вращение разряда происходит по направлению действия пондеромоторной силы, а в случае отрицательной полярности разряд вращается против действия силы. Проведённые дополнительные исследования данного эффекта показали, что в этом случае вращение разряда определяется особенностями движения катодных пятен в магнитном поле, а не действием пондеромоторной силы.

Измерение теплового потока на поверхность моделей, как уже отмечалось, проводилось с помощью градиентного датчика теплового потока, поскольку в настоящее время это единственный измерительный прибор, надёжно работающий в условиях сильных магнитных полей.

Первая серия тепловых измерений была выполнена на модели без МГД устройства, оборудованной шестью ГДТП [3]. Измерения проводились при невозмущённом обтекании модели потоком азота с числом Маха $M = 4$. В результате проведённых экспериментов было получено распределение теплового потока, действующего на коническую и цилиндрическую поверхности модели при различных параметрах сверхзвукового течения. Результаты из-

мерений сравнились с данными численных расчётов, проведенных в секторе численного моделирования ФТИ им. А.Ф.Иоффе [4].

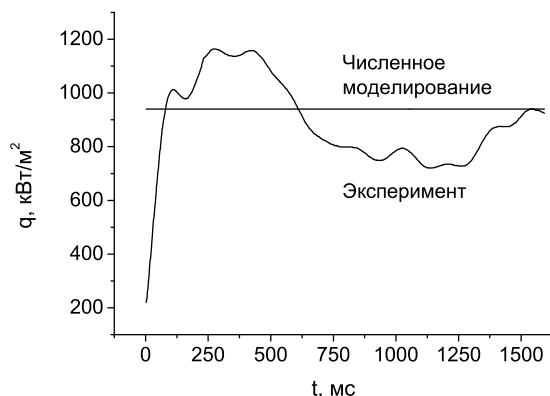


Рис. 8. Тепловой поток, действующий на цилиндрическую поверхность модели, рассчитанный по сигналу ГДТП и по данным численного моделирования.

вышает 15 %.

Тепловые измерения на модели с МГД устройством без магнитного сердечника проводились как при последовательном соединении цепи разряда и катушки и подключении к одному источнику питания, так и при независимом подключении к двум источникам питания. В данных экспериментах варьировался ток в цепи разряда и в цепи катушки, а также анализировалось влияние полярности подключения кольцевого электрода.

Характерной особенностью экспериментов на данной модели являлось отсутствие повторяемости результатов тепловых измерений. В частности, форма кривой теплового потока изменялась от опыта к опыту, что объясняется малой частотой вращения разряда и произвольным местом его инициирования относительно ГДТП. На рис. 9 показаны тепловые потоки на цилиндрическую поверхность модели, полученные в двух экспериментах при одинаковых условиях.

На рис. 8 показан тепловой поток, действующий на коническую поверхность модели измеренный с помощью ГДТП и полученный при численном моделировании соответствующего эксперимента. В результате усреднения экспериментальных данных по всему времени существования стационарного течения, плотность теплового потока составила 900 кВт/м^2 , по данным численного моделирования 940 кВт/м^2 . Относительная погрешность полученных данных не превышает 15 %.

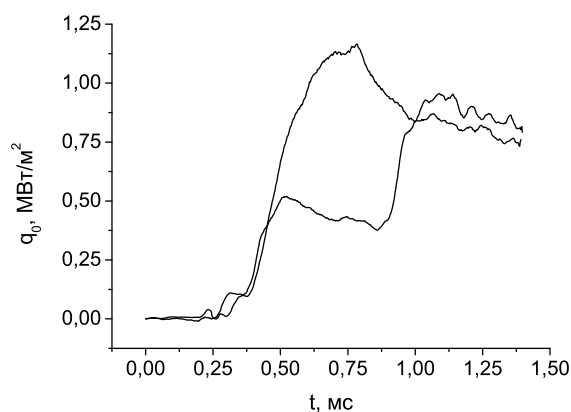


Рис. 9. Тепловые потоки на модели без сердечника при раздельном питании цепей разряда и магнитной катушки.

В проведённых экспериментах не было обнаружено существенного влияния величины тока в цепи разряда и в цепи катушки на тепловой поток, не обнаружено также заметного влияния и полярности кольцевого электрода.

Результаты измерений теплового потока на модели с МГД устройством и магнитным сердечником существенно отличаются от результатов измерений на модели без сердечника [5]. Обнаружено сильное влияние силы тока в цепи катушки и полярности подключения кольцевого электрода на величину теплового потока, действующего на цилиндрическую поверхность модели. На рис. 10 показаны тепловые потоки при различной полярности кольцевого электрода и двух значениях силы тока.

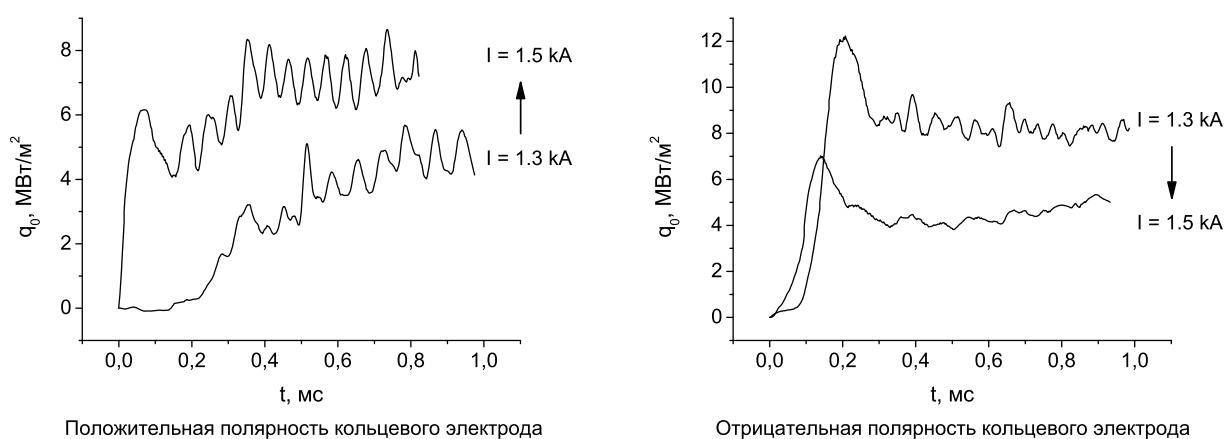


Рис. 10. Тепловой поток на цилиндрическую поверхность модели при различной полярности кольцевого электрода и силе тока в цепи катушки.

На левом рисунке, соответствующем положительной полярности кольцевого электрода, видно, что увеличение силы тока в цепи катушки на $\sim 15\%$ сопровождается ростом среднего значения теплового потока до $\sim 200\%$. Амплитуда периодических пульсаций при изменении тока практически не изменяется, но наблюдается увеличение частоты пульсаций, что также вызвано большей частотой вращения разряда. Необходимо отметить, что частота пульсаций на данных рисунках соответствует частоте вращения газового разряда, измеренной оптическим методом.

На правом рисунке, соответствующем отрицательной полярности кольцевого электрода, видно, что увеличение силы тока в цепи катушки на $\sim 15\%$ приводит к уменьшению средней величины теплового потока до $\sim 200\%$. Одновременно с этим снижается амплитуда пульсаций теплового потока, со-

ответствующих прохождению разряда вблизи ГДТП. Таким образом, МГД воздействие на набегающий поток газа становится более равномерным. Данный эффект, по-видимому, связан с особенностями взаимодействия двух физических явлений: процессов, определяющих динамику катодного пятна на кольцевом электроде в магнитном поле, и действия пондеромоторной силы на газовый разряд.

Представленные результаты экспериментов демонстрируют возможность управления теплообменом на поверхности модели с помощью разработанного МГД устройства. Указанные выше обстоятельства позволяют рассматривать модель с магнитным сердечником при отрицательной полярности кольцевого электрода как наиболее перспективную с точки зрения МГД управления тепловым потоком.

В Заключение сформулированы основные результаты работы.

1. Предложен новый способ магнитогазодинамического воздействия на сверхзвуковой поток газа, эффективность которого не зависит от электрической проводимости среды. Созданы две экспериментальные модели, внутри которых установлены все элементы, необходимые для реализации МГД воздействия.
2. С помощью оптической диагностики установлено, что обе модели заметно изменяют структуру сверхзвукового обтекания. Головная ударная волна меняет своё положение, а её фронт заметно искривляется по сравнению с невозмущённым обтеканием. Изучена структура и особенности вращения разряда вблизи конической поверхности моделей. Установлено, что на модели с магнитным сердечником разряд локализован и имеет чёткие границы, а его вращение носит периодический характер. Частота вращения составляет $\sim 15 \div 30$ кГц в зависимости от полярности подключения кольцевого электрода. На модели без сердечника разряд распределен по значительной части конической поверхности, а период вращения сопоставим с временем эксперимента.
3. На основе результатов численного моделирования тепловых процессов в анизотропных термоэлементах ГДТП создан алгоритм расчёта величины теплового потока по сигналу датчика. Тестирование алгоритма показало, что относительная погрешность расчёта теплового потока в диапазоне времен, характерном для экспериментов на ударных трубах (~ 1 мс), не превышает ~ 10 %.

4. Проведено измерение с помощью ГДТП теплового потока на поверхность модели при МГД воздействии и без него. Величина теплового потока на коническую поверхность модели при невозмущённом обтекании, рассчитанная по сигналу ГДТП и по данным численного моделирования, совпадает с точностью до 15 %. На модели с МГД устройством и магнитным сердечником обнаружена сильная зависимость величины теплового потока от полярности подключения кольцевого электрода. Установлено, что в случае отрицательной полярности кольцевого электрода увеличение тока в цепи разряда на 15 % сопровождается практически двукратным уменьшением теплового потока на цилиндрическую поверхность модели.

Публикации по теме диссертации

1. П.А.Попов, Б.И.Резников, В.А.Сахаров, А.С.Штейнберг. Измерение теплового потока анизотропным термоэлементом в импульсных процессах // Письма в Журнал технической физики. 2011. Т. 37, № 1. С. 26–31.
2. С.В.Бобашев, Н.П.Менде, П.А.Попов и др. Использование анизотропных датчиков теплового потока в аэродинамическом эксперименте // Письма в Журнал технической физики. 2009. Т. 35, № 5. С. 36–42.
3. Б.И.Резников, Н.П.Менде, П.А.Попов и др. Определение теплового потока по измерениям температуры поверхности в импульсных газодинамических процессах // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 34, № 15. С. 49–54.
4. С.В.Бобашев, Н.П.Менде, П.А.Попов и др. Применение градиентного датчика теплового потока в исследованиях импульсных процессов на ударной трубе // Журнал технической физики. 2008. Т. 78, № 12. С. 103–104.
5. С.В.Бобашев, Н.П.Менде, П.А.Попов, В.А.Сахаров. Экспериментальное исследование магнитогидродинамического воздействия на тепловой поток к поверхности модели // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, № 12. С. 51–56.