

В. П. Фомичев, М. А. Ядренкин

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С. А. Христиановича СО РАН
ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 6300980, Россия*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЕРЕД МОДЕЛЬЮ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА *

Экспериментально исследовано обтекание затупленного тела – модели спускаемого аппарата, в условиях локального магнитогазодинамического взаимодействия при ионизации потока воздуха высоковольтным импульсным разрядом. Показана возможность управления ударно-волновой структурой гиперзвукового потока, заключающегося в увеличении отхода головного скачка уплотнения от модели. Произведена оценка параметра Стюарта с использованием измерения давления в критической точке модели. Показано, что основные стадии изменения структуры потока происходят при величине параметра $S = 0,09-0,3$.

Ключевые слова: гиперзвуковой поток воздуха, управление потоком газа, электрический разряд, магнитогидродинамика.

При входе возвращаемого космического аппарата в верхние слои атмосферы на гиперзвуковой скорости происходит термическая ионизация набегающего потока газа вследствие торможения газа на поверхности тела. Возникновение подобных плазменных эффектов создает благоприятные условия для применения магнитоплазменных способов управления структурой газового потока. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования локального магнитогазодинамического (МГД) взаимодействия перед моделью возвращаемого аппарата, обтекаемого гиперзвуковым потоком воздуха.

Экспериментальные исследования были проведены на МГД-стенде, реализованном на базе ударной трубы [1]. Схема стенда представлена на рис. 1. Условия на входе в сверхзвуковое сопло, расположенное перед

рабочей камерой, определялись параметрами за отраженной ударной волной.

Стенд позволяет моделировать гиперзвуковой воздушный поток с числами Маха $M = 6-10$, параметры которого соответствуют условиям высокоскоростного полета на высотах 20–50 км над уровнем моря. Для создания локальной термической ионизации потока вблизи модели был использован дуговой электрический разряд, что обусловлено недостаточной температурой торможения потока для его естественного нагрева. Длительность импульса разряда составила 120 мкс. Модель была установлена за срезом сверхзвукового сопла в рабочей камере (РК). В головной части модели располагались электроды, между которыми происходил электрический пробой и зажигался дуговой разряд. В критической точке обтекания головной части модели был установ-

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда грант № 17-72-10249.

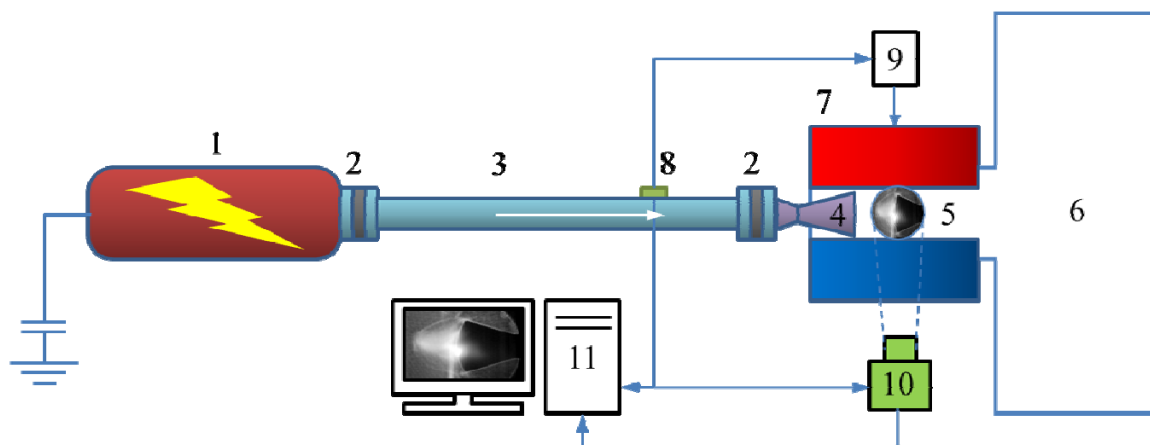


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – камера высокого давления; 2 – диафрагмы; 3 – канал низкого давления; 4 – сверхзвуковое сопло; 5 – рабочая камера; 6 – ресивер; 7 – магнитная система; 8 – датчик давления; 9 – устройство ионизации; 10 – камера; 11 – регистрирующее оборудование

лен высокочастотный пьезоэлектрический датчик для измерения давления торможения (рис. 2). Для осуществления МГД-взаимодействия с ионизированным потоком в рабочей камере с помощью электромагнита создавалось однородное магнитное поле с индукцией до 2,2 Тл.

Оптическая шпирен-визуализация течения была основана на использовании адаптивного визуализирующего транспаранта (фототропного стекла), что позволяло регистрировать как ударно-волновую структуру течения, так и свечение плазмы вблизи модели.

В ходе экспериментальных исследований был реализован следующий режим течения в рабочей камере: число Маха потока $M = 6$, плотность потока $0,02 \text{ кг/м}^3$, статическое давление 10 торр, температура потока 350 К. Эти параметры близки к условиям гиперзвукового полета на высоте 30 км над уровнем моря. В момент реализации квазистационарного течения воздуха за срезом сверхзвукового сопла в течение 120 мкс происходила инициация импульсного высоковольтного разряда. Параллельно с этим процессом осуществлялась синхронизация работы скоростных камер и регистрирующего оборудования.

Результаты экспериментов показали, что при обтекании модели спускаемой капсулы гиперзвуковым потоком воздуха, происходит образование отошедшего головного скачка уплотнения (рис. 3, а). После зажи-

гания разряда без магнитного поля происходит «раздувание» дуги разряда, ее вытягивание вниз по потоку. По мере увеличения магнитного поля до 2,2 Тл под действием объемной электромагнитной силы происходит движение дуги разряда навстречу потоку (рис. 3, б–е). При ионизации потока воздуха в магнитном поле $B > 0,8$ происходит отход головного скачка от поверхности модели (рис. 3, д, е). Измерения давления торможения в критической точке показали,

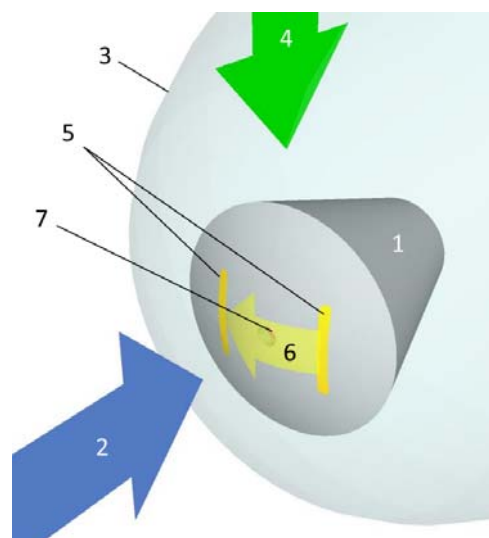


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – модель; 2 – направление потока; 3 – ударная волна; 4 – направление магнитного поля; 5 – электроды; 6 – направление тока; 7 – датчик давления

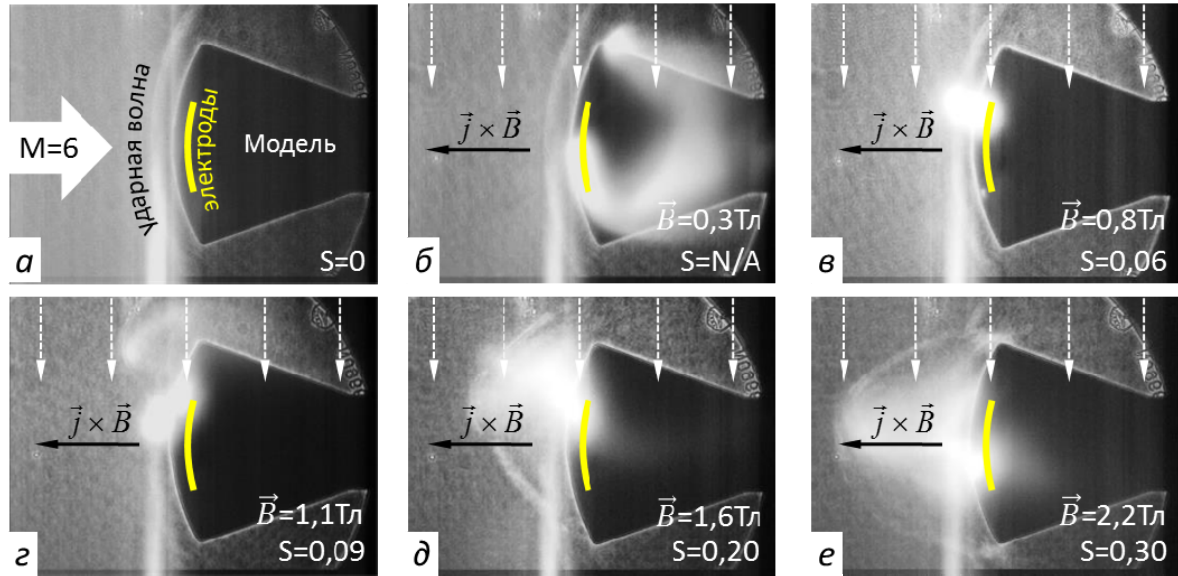


Рис. 3. МГД-взаимодействие при обтекании затупленного тела

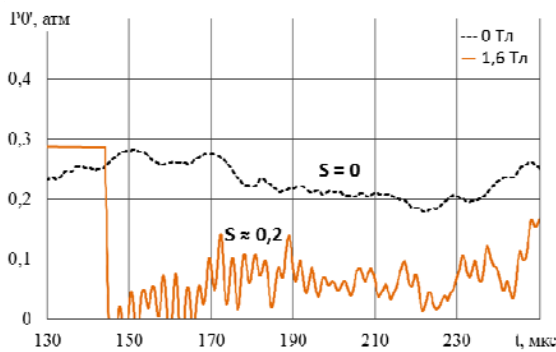


Рис. 4. Давление потока в критической точке без МГД-взаимодействия ($S = 0$) и при МГД-взаимодействии ($S = 0,2$)

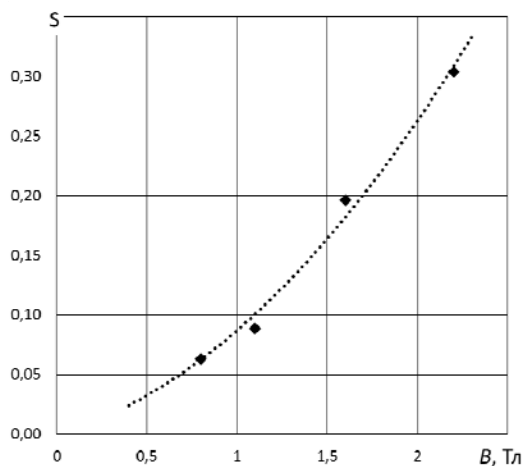


Рис. 5. Изменение S при увеличении индукции магнитного поля в эксперименте

что в результате МГД-взаимодействия наблюдается значительное снижение давления торможения потока. При $B = 0,8$ Тл давление в среднем падает на 20 %, при $B = 1,6$ Тл давление падает в 2 раза (рис. 4), при $B = 0,8$ Тл – более чем в 4 раза.

Полученные данные имеют хорошее совпадение с результатами численного моделирования для случая стационарного обтекания головной части возвращаемого аппарата с установленным источником магнитного поля [2]. Стоит заметить, что горение дуги разряда вблизи критической точки носит нестационарный характер, разряд стремится к сваливанию то в одну, то в другую сторону от линии пробоя. Этот эффект является причиной нестационарной ударно-волновой картины обтекания – пульсаций формы и положения головного скачка в пространстве при малых и умеренных величинах параметра МГД-взаимодействия.

Обычно для оценки эффективности МГД-взаимодействия, отношения электромагнитных сил к силам инерции потока, используют параметр Стюарта – S :

$$S = \frac{\vec{J} \times \vec{B} l}{\rho_{\infty} V_{\infty}^2}.$$

Параметр S может быть выражен также через изменение давления газа ΔP за голов-

ным скачком уплотнения вблизи критической точки модели [2]. В этом смысле работа объемной электромагнитной силы « $\vec{J} \times \vec{B}$ » при сильном взаимодействии расходуется на локальное торможение набегающего потока, что приводит к изменению давления в критической точке:

$$S = \frac{\Delta P}{\rho_{\infty} v_{\infty}^2}.$$

Результаты экспериментов показали, что при слабом МГД-взаимодействии, когда $S \leq 0,06$, разряд не оказывает заметного влияния на ударно-волновую структуру обтекаемого объекта. При изменении значений магнитной индукции от 0,8 до 2,2 Тл происходит изменение параметра взаимодействия S в диапазоне значений 0,06–0,3 (рис. 5).

При умеренных значениях параметра ($S = 0,06–0,09$) происходит локализация разряда в области электродов, а при сильном МГД-взаимодействии ($S = 0,2–0,3$) наблюдается значительный отход головного скачка вверх по потоку. Следует отметить нестационарный режим горения разряда в условиях высокоскоростного обтекания модели в магнитном поле. Эти данные хорошо совпадают с классификацией МГД-взаимодействия по интенсивности, принятой авторами в работе [3].

Таким образом, экспериментально продемонстрирована возможность управления ударно-волновой структурой высокоскоростного потока воздуха перед затупленным телом при ионизации потока высоковольт-

ным импульсным разрядом в широком диапазоне величин индукции внешнего магнитного поля. Разработана методика определения параметра гидромагнитного взаимодействия по показаниям изменения давления в критической точке модели. Показано, что основные стадии изменения структуры потока происходят при величине $S = 0,09–0,3$.

Список литературы

1. Головнов И. А., Поздняков Г. А., Правдин С. С., Подзин В. Е., Пушкарева Т. И., Фомин В. М., Фомичев В. П., Явлев В. И. Экспериментальный комплекс для моделирования и исследования МГД-взаимодействия в гиперзвуковом потоке // Препринт № 7-2003 Ин-т теор. и прикл. механики. Новосибирск, 2003. 26 с.
2. Кортаева Т. А., Фомичев В. П., Шашикин А. П. Использование методов локальной теории для оценки влияния МГД-системы на аэродинамические характеристики и температуру затупленного конуса // Тр. XVIII Междунар. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПС'2013). Алушта, 2013. С. 591–592.
3. Фомичев В. П., Ядренкин М. А. Структура гиперзвукового потока воздуха у плоской поверхности при различной интенсивности магнитогазодинамического взаимодействия // Письма в ЖТФ, 2017, Т. 43, вып. 23.

Материал поступил в редколлегию 08.11.2017

V. P. Fomichev, M. A. Yadrenkin

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
str. Institutskaya, 4/1, Novosibirsk, 6300980, Russian Federation*

EXPERIMENTAL STUDY OF THE MHD INTERACTION AHEAD THE MODEL OF THE REENTRY VEHICLE IN THE HYPERZER FLOW OF AIR

The flow ahead a blunt body under the conditions of local magneto-gasdynamics interaction during the ionization of the air flow by a high-voltage pulse discharge has been studied experimentally. The possibility of controlling the shock-wave structure of a hypersonic flow is shown. The increase of the deflection of the bow shock wave from the model is demonstrated. Stuart's parameter has been estimated using the pressure measurement at the critical point of the model.

Keywords: hypersonic air flow, flow control, electric discharge, magnetohydrodynamics.