

03

## Экспериментальное исследование эффекта МГД-парашюта в гиперзвуковом воздушном потоке

© В.П. Фомичев, М.А. Ядренкин

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия  
e-mail: fomichev@itam.nsc.ru, yadrenkin@itam.nsc.ru

(Поступило в Редакцию 21 марта 2012 г.)

Работа содержит новые результаты экспериментальной реализации схемы МГД-парашюта при обтекании плоской пластины потоком воздуха с  $M = 6$ . Показано, что МГД-взаимодействие на плоскости может трансформировать присоединенный косой скачок уплотнения в прямой отошедший, что значительно увеличивает размер области взаимодействия тела с набегающим потоком. Данный эффект может быть использован при оптимизации процесса торможения возвращаемого летательного аппарата в верхних слоях атмосферы.

### Введение

В настоящее время технологии магнитоплазменной аэродинамики исследуются в связи с возможным использованием в различных аэрокосмических приложениях. Большой интерес вызывают задачи оптимизации процессов управления аэродинамическими характеристиками возвращаемых космических аппаратов. Известно, что большие скорости полета при входе в плотные слои атмосферы связаны с высокими температурами торможения набегающего потока и, как следствие, с возникновением термической ионизации воздуха у поверхности аппарата. В таких условиях использование МГД-способов управления обтеканием тел представляется весьма перспективным. В работах [1–4] описано численное моделирование так называемого эффекта МГД-парашюта, который может быть использован для осуществления торможения спускаемых космических аппаратов в верхних слоях атмосферы, а также выступать в качестве метода снижения тепловой нагрузки на поверхность аппарата [5]. Авторами рассматривается идея ускоренного МГД-торможения тела в верхних слоях атмосферы, где из-за низкой плотности воздуха традиционные газодинамические методы торможения не эффективны [5,6]. Главная идея использования МГД-парашюта состоит в том, чтобы снизить скорость спускаемого аппарата на участке траектории спуска в верхних слоях атмосферы, где увеличение тепловых потоков на поверхности тела за счет МГД-взаимодействия не является критичным, до величин, обеспечивающих достаточно низкий уровень тепловых нагрузок при торможении в более плотных слоях атмосферы. При этом МГД-парашют подразумевает отсутствие каких-либо механических элементов конструкции, выступающих в набегающий поток.

На рис. 1, *a* представлена схема концепции [1], которая по сути представляет собой использование поверхностного МГД-генератора в режиме короткого замыкания. МГД-взаимодействие реализуется на поверхности плоского тела между двумя электродами, где магнитное поле

создается соленоидом, расположенным под обтекаемой поверхностью. Причем направление линий магнитной индукции в области электродов, направление вектора индуцированного электрического поля и направление скорости потока образуют ортогональную систему координат.

Результаты численного исследования показали, что МГД-взаимодействие трансформирует присоединенный

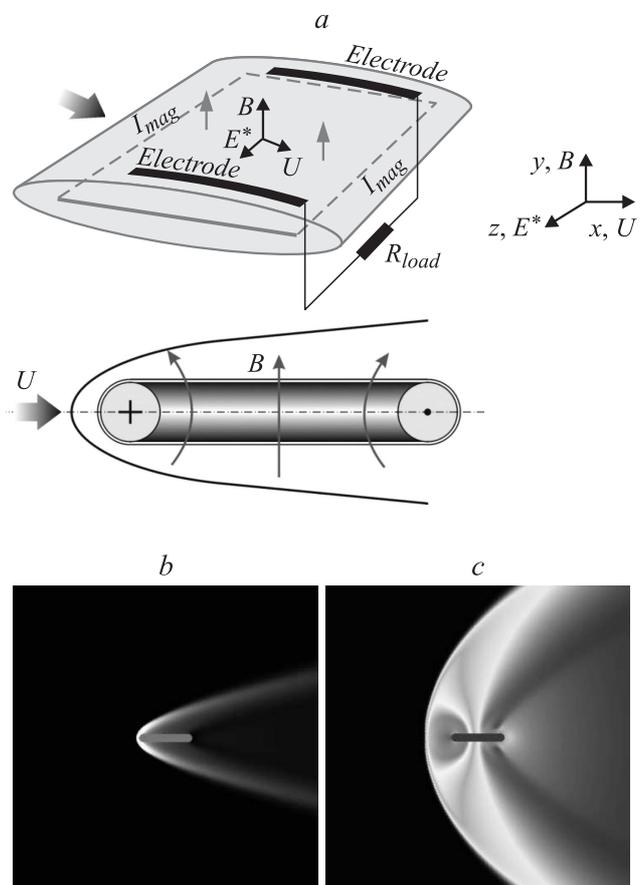


Рис. 1. Постановка и результаты численных исследований [3].

косой скачок уплотнения, генерируемый передней кромкой тела, в отошедший прямой, как показано на рис. 1, *c*. Здесь рис. 1, *b* соответствует гиперзвуковому обтеканию тонкого тела при  $B = 0$  Т, а рис. 1, *c* — обтеканию тела при  $B = 2$  Т. При этом область МГД-взаимодействия значительно увеличивает эффективные размеры тела и обеспечивает значительное увеличение полного гидродинамического сопротивления, что ярко характеризует потенциал возможностей МГД-управления потоком газа.

В настоящей работе описано экспериментальное исследование предложенного МГД-эффекта в схожей постановке задачи. Однако в отличие от условий численного эксперимента ионизация потока осуществлялась электрическим разрядом, инициированным между электродами. Главная цель настоящей работы — изучить влияние МГД-эффекта на волновую структуру потока при гиперзвуковом обтекании тела потоком воздуха низкого давления.

## Экспериментальная установка и методики

Экспериментальное исследование влияния МГД-эффекта на косой скачок уплотнения при обтекании пластины гиперзвуковым потоком в магнитном поле проводилось на МГД-стенде. Данная установка спроектирована на базе ударной трубы, которая позволяет моделировать гиперзвуковые течения при числе Маха набегающего потока  $M = 6, 8, 10$  с параметрами, близкими к натурным, при полетах на высоте 30–50 км над уровнем моря. Параметры газа перед гиперзвуковым соплом поддерживаются ударно-волновым сжатием потока за отраженной ударной волной. Диаметр выходного сечения сопла 105 мм. Время квазистационарного течения газа за соплом в зависимости от режима работы ударной трубы составляет 1–2 мс, продолжительность МГД-взаимодействия около 100 мкс. Характеристики работы и особенности конструкции МГД-стенда подробно описаны в [7].

На рис. 2 представлена принципиальная схема эксперимента. В соответствии с [1] электроды размещены заподлицо с обтекаемой плоскостью, выполненной из диэлектрического материала. Направления скорости потока, электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны друг другу.

Проводимость газа создавалась электрическим разрядом, инициированным между электродами в течение 120 мкс. Мгновенная мощность разряда, оцененная по величине тока и напряжения, составляла 18.5 кВт. Параметры потока были следующие: число Маха  $M = 5.8$ , статическое давление потока 13 Торг, статическая температура 220 К, скорость потока около 2000 м/с. Внешнее магнитное поле с величиной индукции до 1 Т создавалось электромагнитом. Неоднородность магнитного поля в области взаимодействия не превышала 5%.

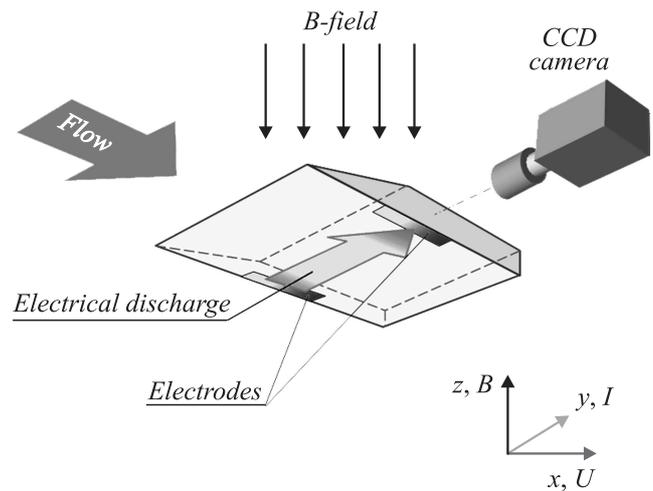
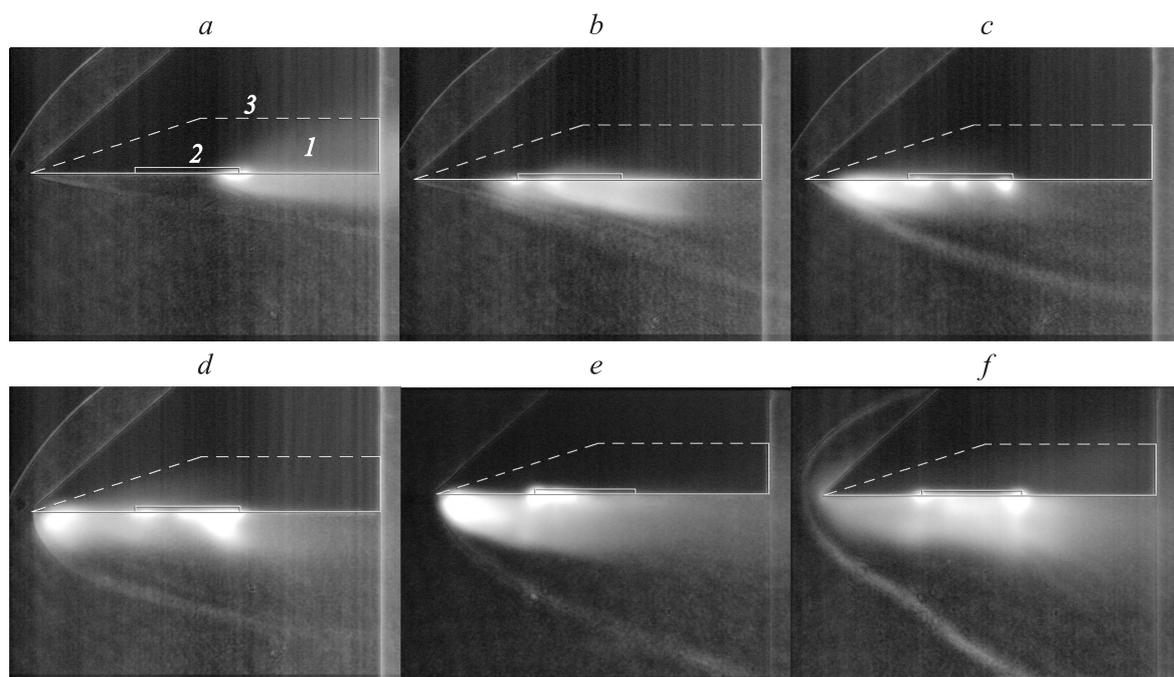


Рис. 2. Схема эксперимента.

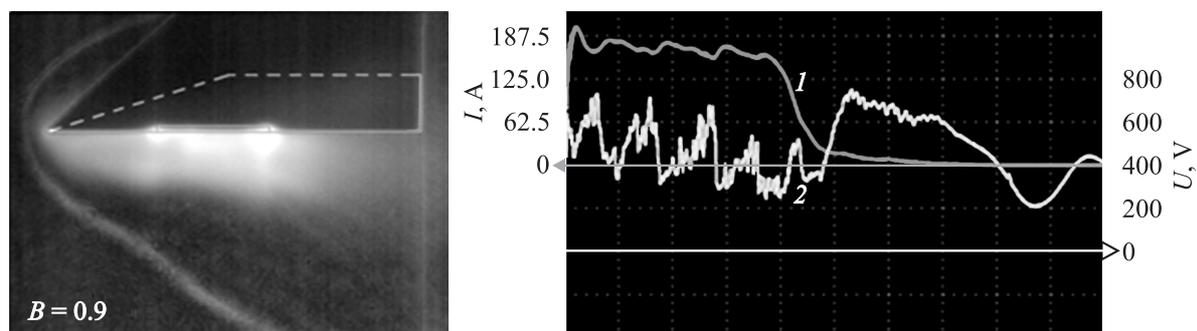
Волновая структура потока фиксировалась скоростными ПЗС-камерами. Фотографирование течения осуществлялось шпирен-методом с выдержкой  $1.2 \mu\text{s}$  на 60-й  $\mu\text{s}$  от момента инициации электрического разряда. В качестве источника света использовался лазер, работающий в непрерывном режиме. В роли оптического ножа выступает адаптивный визуализирующий транспарант (фототропное стекло) [8], что позволило фиксировать одновременно положение скачков при низких давлениях газа и положение области разряда. Параметры потока определялись по скорости проходящей ударной волны в канале низкого давления ударной трубы, исходя из одномерной теории. Электрические характеристики разряда регистрировались с помощью трансформаторов тока.

## Результаты и обсуждение

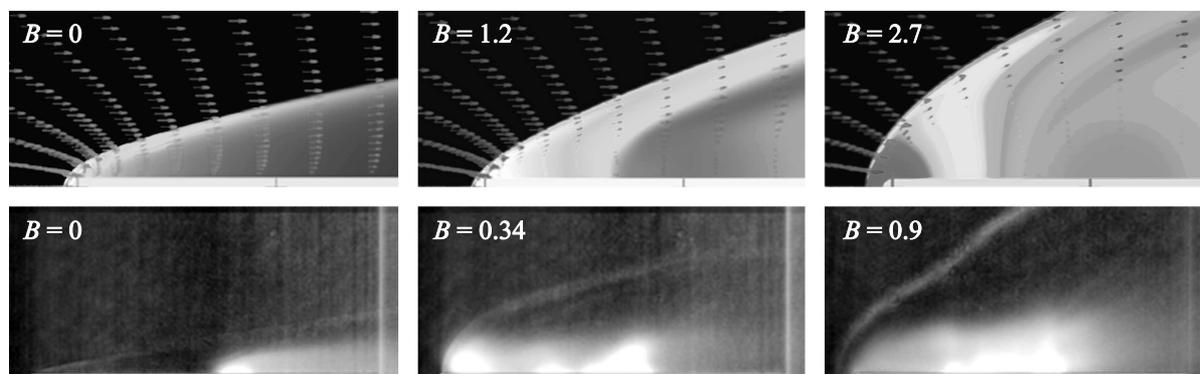
В результате экспериментальных исследований были получены характерные картины ударно-волновой структуры потока при МГД-взаимодействии. На рис. 3 представлены типичные фотографии потока без магнитного поля (*a*) и с магнитным полем до 1 Т (*b-f*), где 1 — модель, 2 — электроды, 3 — ограничители в форме пластин, препятствующие распространению разряда вне исследуемого объема. Схематично представлены контуры электродов, расположенных согласно схеме на рис. 2. Можно видеть, что область разряда сносится потоком за пределы модели в отсутствие магнитного поля. На передней кромке модели отчетливо виден присоединенный скачок уплотнения, угол которого составляет  $10^\circ$  к направлению набегающего потока, что соответствует обтеканию пластины потоком воздуха с числом Маха  $M = 5.8$ . Включение магнитного поля влечет за собой устойчивое горение разряда в области электродов при  $B = 0.21$  Т (рис. 3, *b*). По мере увеличения магнитного поля до  $B = 0.7$  Т область горения разряда перемещается к передней кромке модели. Дальнейший рост вели-



**Рис. 3.** Шлирен-фотографии потока над плоскостью при различных величинах магнитного поля: *a* — без магнитного поля, *b* —  $B = 0.21$  Т, *c* —  $B = 0.29$  Т, *d* —  $B = 0.34$  Т, *e* —  $B = 0.7$  Т, *f* —  $B = 0.9$  Т.



**Рис. 4.** Режим продольных пульсаций отошедшего скачка уплотнения.



**Рис. 5.** Сравнение результатов, полученных численно (сверху) и экспериментально (снизу).

чины магнитной индукции приводит к движению разряда вверх по потоку за пределы модели, что трансформирует косой скачок уплотнения в отошедший прямой скачок, как показано на рис. 3, *e, f*. При  $B = 0.9$  Т область разряда выходит за пределы модели по обе ее стороны, отодвигая скачок от передней кромки и значительно расширяя область взаимодействия пластины с потоком.

Стоит отдельно отметить режим продольных пульсаций положения прямого скачка уплотнения, реализующийся при величине магнитной индукции  $B = 0.9$  Т. Наряду с данными, полученными при скоростном фотографировании потока, это явление отражается в показаниях тока ( $I$ ) и напряжения ( $U$ ) электрического разряда, представленных на рис. 4 справа. При „вытягивании“ разрядного промежутка вперед происходит рост напряжения на электродах и, как следствие, шунтирование разряда. Затем наблюдается повторное движение разряда к носику модели, что носит периодический характер.

Экспериментальные данные были сопоставлены с результатами численных исследований [1], представленных в виде диаграмм распределения скорости и давления набегающего потока как функций магнитной индукции (рис. 5).

Постановки численных и экспериментальных исследований (рис. 1 и 3) отличаются величинами параметров набегающего потока и способом создания неравновесной проводимости газа. Однако сравнение волновых картин показывает, что МГД-взаимодействия на плоскости реально могут изменить волновую структуру потока при обтекании тонкого тела и увеличить эффективное сечение взаимодействия тела с набегающим потоком. Данный результат качественно демонстрирует эффект МГД-парашюта, полученный в [1].

## Заключение

Таким образом, получено экспериментальное подтверждение возможности использования схемы МГД-парашюта на практике. Показано, что МГД-взаимодействие на плоскости может трансформировать присоединенный косой скачок уплотнения в прямой отошедший, что значительно увеличивает размер области взаимодействия тела с набегающим потоком. Данный эффект имеет хорошие перспективы быть использованным для оптимизации процесса торможения возвращаемых летательных аппаратов в верхних слоях атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 10-08-00598-а.

## Список литературы

- [1] *Bityurin V.A., Bocharov A.N.* In: 2<sup>nd</sup> International ARA Days. October 21–23. 2008. Arcachon. France.
- [2] *Bityurin V.A., Bocharov A.N., Baranov D.S., Popov N.A.* // The 8<sup>th</sup> International Workshop on Magneto-plasma Aerodynamics. Moscow. 31 March–02 April. 2009. P. 281–290.
- [3] *Bityurin V.A., Bocharov A.N.* // Proc. of the 17<sup>th</sup> International Conf. on MHD Energy Conversion. Shonan Village Center. Kanagawa. Japan. 14–17 September. 2009. P. IK1-1.
- [4] *Битюрин В.А., Бочаров А.Н., Попов Н.А.* // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1 (дополнительный). С. 122–131.
- [5] *Bityurin V.A., Bocharov A.N.* // 15<sup>th</sup> Int. Conf. On MHD Energy Conversion. Moscow. May 24–27. 2005. Vol. 2. P. 429–433.
- [6] *Bityurin V.A., Bocharov A.N., Lineberry J.* // 15<sup>th</sup> Int. Conf. On MHD Energy Conversion. Moscow. May 24–27. 2005. Vol. 2. P. 399–416.
- [7] *Fomin V.M., Fomichev V.P., Golovnov I.A., Korotaeva T.A., Pozdnyakov G.A., Pravdin S.S., Shashkin A.P., Yakovlev V.I.* // AIAA. 2004–1193. 2004.
- [8] *Pavlov A.A., Pavlov A.I., Golubev M.P.* // XIV Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research ICMAR-2008. June 30–July 6. Novosibirsk. Russia. 2008. Section I, Paper 29. P. 8 (on CCD) // Abstracts. Part 1. Section I. P. 92–93.