

03

## **Исследование ВЧ-разряда, инициированного поперек гиперзвукового потока воздуха и магнитного поля**

© В.П. Фомичев, М.А. Ядренкин

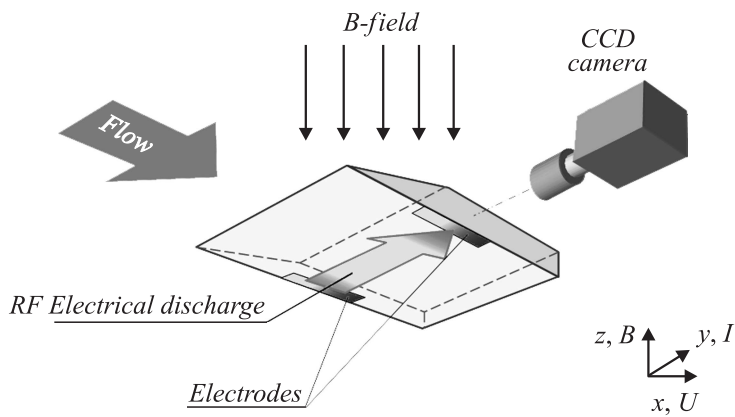
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича  
СО РАН, Новосибирск  
E-mail: fomichev@itam.nsc.ru, yadrenkin@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 26 июня 2012 г.

Проведены экспериментальные исследования процесса горения высокочастотного (ВЧ) разряда, инициированного поперек гиперзвукового воздушного потока и магнитного поля, а также сопутствующих эффектов. Показано существенное влияние высокочастотного разряда в магнитном поле у плоской пластины на условия обтекания модели, в частности на конфигурацию присоединенных скачков уплотнения.

Развитие гиперзвуковых летательных аппаратов инициировало внедрение инновационных магнитогидродинамических (МГД) способов управления воздушным потоком в аэрокосмическую отрасль. В ряде экспериментальных и численных исследований [1–5] была показана эффективность бесконтактных способов управления потоком. Ионизация набегающего потока газа может осуществляться различными способами: термически, электронным пучком, различными электрическими разрядами. Объектом данных исследований является ВЧ-разряд. Его использование для ионизации потока интересно тем, что между МГД-электродами создается локальная область проводимости потока и поддерживается электрический контакт потока с электродами.

Экспериментальное исследование влияния ВЧ-разряда с частотой около 1 МГц на картину обтекания пластины проводилось на МГД-стенде [6] по схеме, представленной на рис. 1. Направление потока, силовых линий магнитного поля и направления электрического разряда взаимно перпендикулярны друг другу. Ширина модели 50 мм, длина 50 мм, размеры каждого электрода  $1.5 \times 15$  мм, расстояние между электродами 47 мм. Генератор ВЧ-тока работал в режиме генератора



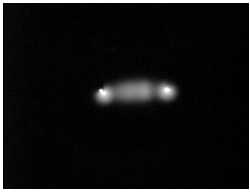
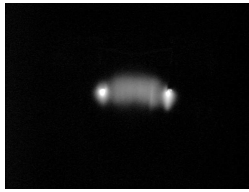
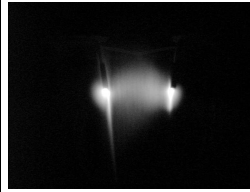
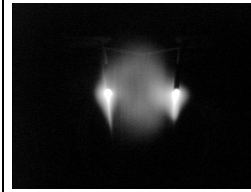
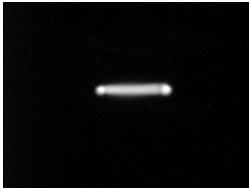
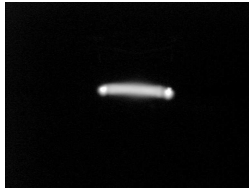
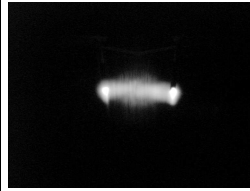
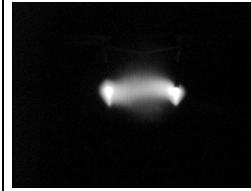
**Рис. 1.** Схема эксперимента.

тока. Ток разряда поддерживался на уровне 8 А при напряжении холостого хода около 8 кВ. Скорость натекающего воздушного потока на модель была около 2000 м/с, число Маха  $M = 6$ , статическое давление около 12 Торг, статическая температура порядка 270 К. Время существования разряда составило 290 мс. Индукция магнитного поля до 2.15 Т.

Исследование ВЧ-разряда в поперечном магнитном поле без потока проводилось между тонкими электродами, расположенными в той же конфигурации, что и на рис. 1, но без плоской модели.

Фотографирование области разряда осуществлялось в направлении потока. Менялось статическое давление газа. На рис. 2 представлены фотографии области разряда, полученные при различных величинах статического давления и индукции магнитного поля. Можно видеть, что увеличение давления приводит к контракции разряда, а увеличение индукции магнитного поля приводит к расширению области разряда в условиях данного эксперимента. Анализ осциллограмм тока и напряжения разряда показал, что в разрядной области поддерживается практически постоянное сопротивление, зависящее от величины магнитного поля.

В ходе экспериментальных исследований влияния ВЧ-разряда на волновую картину обтекания были получены фотографии в потоке

Давление, Торр	Индукция магнитного поля, Т			
	0.00	0.03	0.19	0.34
1				
3				

**Рис. 2.** Влияние магнитного поля на геометрию ВЧ-разряда без потока.

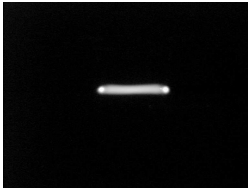
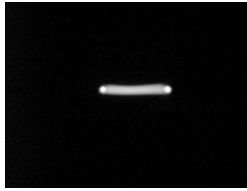
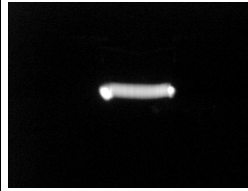
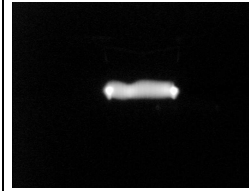
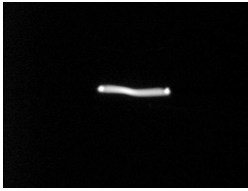
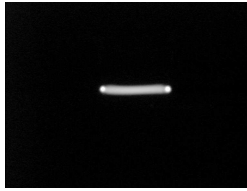
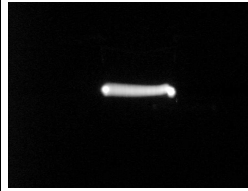
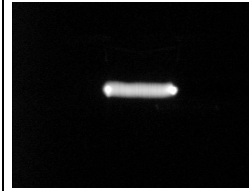
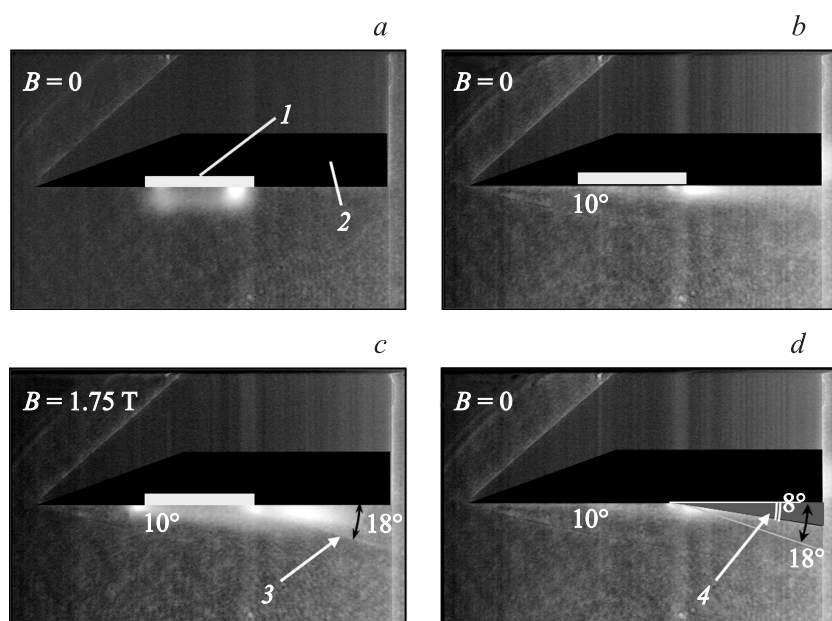
Давление, Торр	Индукция магнитного поля, Т			
	0.00	0.03	0.19	0.34
8				
12				

Рис. 2 (продолжение).



**Рис. 3.** ВЧ-разряд на плоскости: *a* — без потока и магнитного поля, *b* —  $M = 6$  без магнитного поля, *c* —  $M = 6$ ,  $B = 1.75$  Тл, *d* — эквивалентная схема эффекта.

при обтекании пластины под нулевым углом атаки без магнитного поля и с магнитным полем. В покоящемся газе без магнитного поля разряд занимает область между электродами (рис. 3, *a*). В потоке без магнитного поля область разряда „сдувается“ за пределы модели (рис. 3, *b*). Включение магнитного поля приводит к локализации разряда между электродами (рис. 3, *c*). При этом областью разряда генерируется второй косой скачок уплотнения. Угол отклонения второго скачка при индукции магнитного поля 1.75 Т около  $18^\circ$ .

Такая картина соответствует режиму гиперзвукового обтекания плоскости крыла с выпущенным в поток электроном 4 углом  $8^\circ$  (рис. 3, *d*).

Экспериментально показано, что ВЧ-разряд частотой около 1 МГц может быть эффективно использован для ионизации сверхзвукового потока в поперечном магнитном поле и создания неравновесной, по

отношению параметров потока, локализованной области проводимости. Об этом свидетельствует существенное влияние МГД-взаимодействия на волновую картину обтекания модели, что в условиях эксперимента проявилось в генерации косоугольного скачка уплотнения областью разряда. Аналогичный эффект был описан в [7] при ионизации потока импульсным разрядом. Природу полученных эффектов планируется исследовать в последующих экспериментальных работах, посвященных МГД-управлению обтеканием тел сверхзвуковым потоком воздуха.

Работа выполнена при поддержке программы РАН, проект 22-14 и Российского фонда фундаментальных исследований, проект 10-08-00598-а.

## Список литературы

- [1] *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.
- [2] *Fomin V.M., Maslov A.A., Korotaeva T.A., Shashkin A.P., Malmuth N.D.* // 15<sup>th</sup> Int. Conf. on MHD energy conversion and 6<sup>th</sup> Int. Workshop on MPA. Moscow, May 24–27, 2005. Proc. V. 2. P. 583.
- [3] *Bityurin V.A., Bocharov A.N.* // 2<sup>nd</sup> International ARA Days. October 21–23, 2008. Arcachon, France.
- [4] *Bityurin V.A., Bocharov A.N., Baranov D.S., Popov N.A.* // 8<sup>th</sup> International workshop on magneto-plasma aerodynamics. Moscow, 31 March–2 April, 2009. P. 281–290.
- [5] *Fomichev V.P., Yadrenkin M.A., Podzin V.E., Shevchenko A.B.* // 10<sup>th</sup> International workshop on magneto-plasma aerodynamics. March 22–24, 2011. P. 80–82.
- [6] *Головнов И.А., Поздняков Г.А., Правдин С.С., Подзин В.Е., Пушкарева Т.И., Фомин В.М., Фомичев В.П., Яковлев В.И.* // Препринт № 7–2003. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2003. 26 с.
- [7] *Бобашев С.В., Менде Н.П., Сахаров В.А., Ван Ви Д.М.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 15. С. 35–40.