

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИПЕРЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ПЛАСТИНЫ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ МГД-ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

В.П. Фомичев, М.А. Ядрёнкин

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, yadrenkin@itam.nsc.ru

Магнитоплазменные методы воздействия на воздушный поток при обтекании тел в условиях аэрокосмических полётов позволяют существенно изменять волновую структуру потока. В работе [1] показано, что в результате сильного магнитогидродинамического (МГД) взаимодействия, локализованного на пластине в гиперзвуковом потоке при $M = 6$, происходит трансформация косоугольного присоединенного скачка уплотнения в отошедший прямой скачок по мере увеличения индукции магнитного поля. Ионизация потока осуществлялась импульсным электрическим разрядом. В данной работе рассмотрено МГД-взаимодействие в гиперзвуковом воздушном потоке на плоскости в магнитном поле при ионизации течения импульсным или высокочастотным (ВЧ) разрядом.

В работе [2] рассмотрена концепция МГД-парашюта. По мнению авторов идеи, такой метод может быть использован для осуществления эффективного торможения спускаемых космических аппаратов, а так же для снижения тепловой нагрузки на их поверхность.

Численными методами был промоделирован процесс ускоренного МГД - торможения тела при низких плотности и давлении набегающего потока воздуха ($\rho_0 = 1.7 \times 10^{-4}$ кг/м³, $P_0 = 33$ Па), то есть в тех условиях,

когда традиционные газодинамические методы торможения не эффективны. Главная идея состоит в том, чтобы снизить скорость аппарата на участке траектории спуска в верхних слоях атмосферы, где увеличение тепловых потоков на поверхности тела за счет МГД взаимодействия не является критичным. После этого вход спускаемого аппарата в плотные слои атмосферы может уже происходить при скоростях, обеспечивающих приемлемо низкий уровень тепловых нагрузок. Примечательно, что такой МГД-парашют подразумевает полное отсутствие каких-либо механических элементов конструкции, выступающих в набегающий поток. За счет организации взаимодействия в большом объеме, например, над и под крылом, можно теоретически использовать магнитные системы, создающие весьма умеренные магнитные поля. На рис. 1,а представлена принципиальная схема постановки задачи из [2]. МГД-торможение происходило столь интенсивно, что перед моделью формировался прямой отошедший скачок уплотнения.

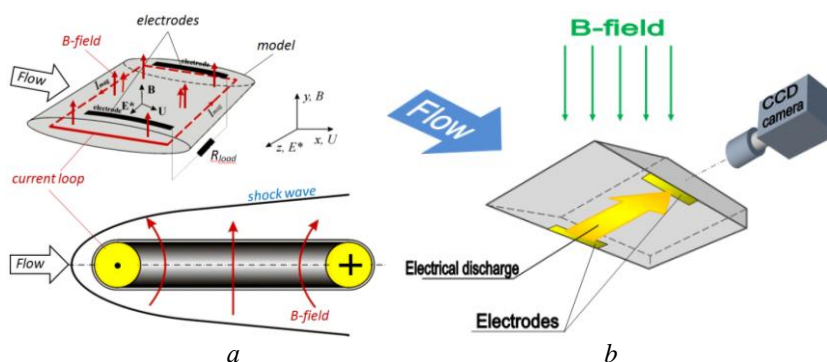


Рис. 1. а – схема МГД-парашюта из [2], б – схема экспериментальных исследований из [1].

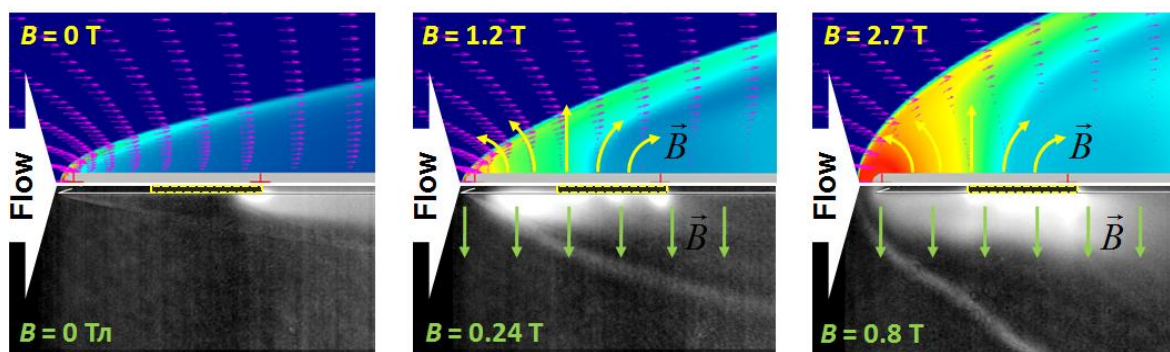


Рис. 2. Сопоставление результатов численного моделирования (сверху) и экспериментальных исследований (снизу).

Данная схема МГД-торможения потока [2] была промоделирована экспериментально на базе ИТПМ СО РАН. Однако в отличие от условий численного моделирования, в которых происходила термическая ионизация за головным скачком уплотнения, в экспериментах ионизация потока осуществлялась импульсным электрическим разрядом в течении 120 мкс. На рис. 1, *b* представлена схема эксперимента. Направление потока, силовых линий магнитного поля и электрического поля разряда взаимно перпендикулярны друг другу. Площадь плоскости модели $50 \times 50 \text{ мм}^2$, площадь каждого электрода $1.5 \times 15 \text{ мм}^2$, расстояние между электродами 47 мм. Экспериментальные исследования проводились на МГД-стенде выполненного на базе ударной трубы [3]. Данная установка позволяет моделировать гиперзвуковой воздушный поток, который по ряду параметров соответствует параметрам воздуха при полетах на высоте 30 – 50 км над уровнем моря с числами Маха 6 – 12. Магнитная система, внутри которой расположена рабочая камера, позволяет генерировать магнитные поля с индукцией до 2.5 Тл. В экспериментах, результаты которых были представлены в данной работе, параметры потока были следующими: скорость газа – 2000 м/с, число Маха $M = 6$, статическое давление – 12 Торр, плотность – $0,02 \text{ кг/м}^3$, статическая температура – 270 К. Величина индукции внешнего

магнитного поля до 2.2 Тл. Фотографирование картины течения около модели осуществлялось Шлирен-методом с использованием скоростных ПЗС-камер, время экспозиции составило 1.2 мкс.

Использование различных способов ионизации в расчетах и экспериментах, однако, не помешало получить качественное совпадение картин течения (рис. 2) [4], что свидетельствует о сравнимой эффективности МГД-взаимодействия. При средних величинах магнитного поля наблюдается увеличение угла наклона скачка уплотнения, а при больших величинах магнитной индукции формируется отошедший от передней кромки модели скачок уплотнения.

В условиях эксперимента при величине магнитной индукции более 0.6 Тл характерным являлось появление пульсаций положения головного скачка уплотнения относительно передней кромки модели в направлении потока, что сопровождается появлением пульсаций напряжения электрического разряда. Этот процесс был дополнительно исследован с помощью скоростной фотосъемки при магнитной индукции 0.8 Тл в течение 60 мкс (в течение двух пульсационных периодов). На Рис. 3, *a* представлена фотография течения в момент, когда головной скачок «отошел» от носика модели вверх по потоку, а также характерный вид осциллограмм тока и напряжения электрического разряда (Рис. 3, *c*).

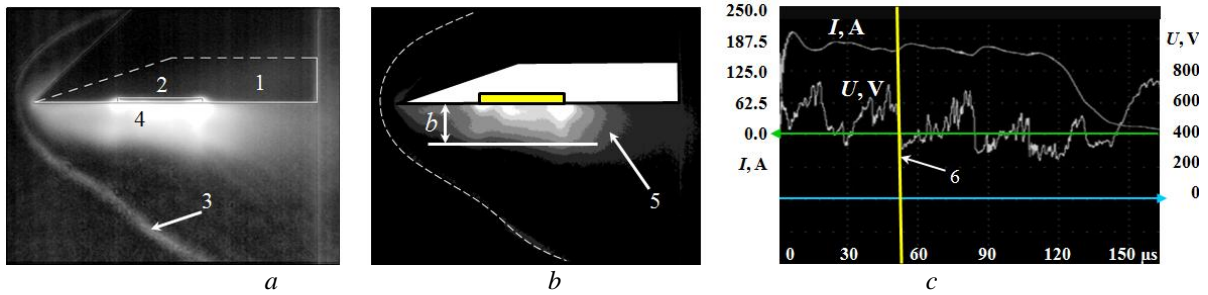


Рис. 3. Режим пульсаций положения косоного скачка.
 1 – иодель, 2 – электроды, 3 – скачок, 4 – разряд, 5 – эквиденсита.

Можно видеть, что в момент фотографирования потока наблюдается резкий спад напряжения на электродах. Мы полагаем, что при движении разрядной области вверх по потоку, происходило увеличение напряжения на электродах и, как результат этого, возникало шунтирование разряда в области между электродами. Последующее движение разрядной области вверх по потоку приводило к следующему изменению положения головного скачка. Этот процесс носил периодический характер с частотой до 30 – 35 кГц в условиях эксперимента.

Путем пастеризации изображения (Рис. 3,б), разбиения области светимости разряда на эквиденситы, удалось оценить геометрию области проводимости, что позволило получить величину параметра гидромагнитного взаимодействия (число Стюарта) для различных величин магнитной индукции. Здесь параметр взаимодействия приведен в адаптированной под экспериментальные измерения форме:

$$S = \frac{I B}{b \rho_{\infty} v_{\infty}^2}.$$

I – сила тока на электродах, B – индукция магнитного поля, b – поперечный размер области проводимости, $\rho_{\infty} v_{\infty}^2$ – скоростной напор. На Рис. 4 показана зависимость МГД-параметра от магнитной индукции. Как видно из графика, эффективность взаимодействия падает при $B > 1.5$ Тл.

В аналогичных условиях были проведены эксперименты с использованием высокочастотного (ВЧ) разряда в качестве ионизатора (Рис. 1,б). Использование ВЧ-разряда с частотой около 1 МГц для ионизации потока интересно тем, что между МГД-электродами создается локальная область проводимости потока с практически постоянным сопротивлением и поддерживается электрический контакт потока с электродами. ВЧ-генератор работал в режиме генератора тока. Ток разряда поддерживался на уровне 4 А при напряжении холостого хода около 8 кВ. Время существования разряда 290 мкс. В ходе эксперимента были получены фотографии разряда в потоке без магнитного поля и с магнитным полем при обтекании пластины под нулевым углом атаки. В покоящемся газе без

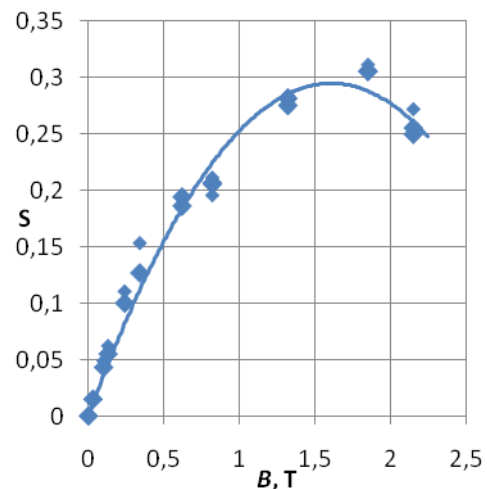


Рис. 4. Зависимость МГД параметра от индукции магнитного поля.

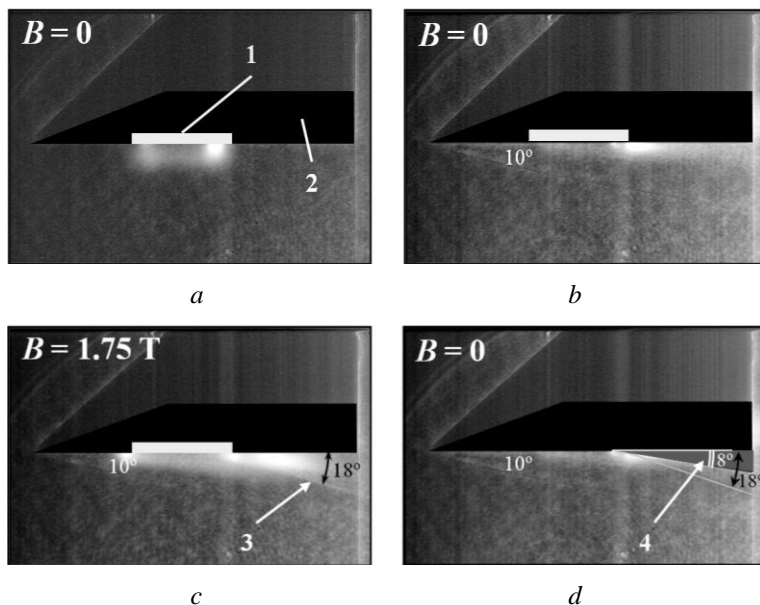


Рис. 5. ВЧ-разряд на плоскости

a – без потока и магнитного поля, *b* – $M = 6$ без магнитного поля,

c – $M = 6$, $B = 1.75$ Тл, *d* – эквивалентная схема эффекта.

магнитного поля разряд занимает область между электродами (Рис. 5,*a*). В потоке без магнитного поля область разряда «сдувается» за пределы модели (*b*). Включение магнитного поля приводит к локализации разряда в области между электродами (*c*). При этом на области разряда формировался второй косой скачок уплотнения. Угол отклонения второго скачка при индукции магнитного поля 1.75 Тл около 18 градусов. Такая картина обтекания соответствует режиму гиперзвукового обтекания плоскости с выпущенным в поток щитком под углом 8 градусов (рис. 5,*d*). Такое изменение режима обтекания плоскости при сильном гидромагнитном взаимодействии на плоскости можно интерпретировать как эффект «МГД - щитка».

Таким образом, экспериментально показано, что импульсный и ВЧ разряд могут быть эффективно использованы для ионизации сверхзвукового потока в поперечном магнитном поле и в создании неравновесной, по отношению параметров потока, локализованной области проводимости. Об этом свидетельствует существенное влияние

магнитогидродинамического взаимодействия на волновую картину обтекания модели. 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

ЛИТЕРАТУРА

1. V.P. Fomichev, V.E. Podzin, A.B. Shevchenko, M.A. Yadrenkin. The Experimental study of the electrical discharge over the flat plate in a hypersonic air flow at the magnetic field//Moscow, ИИТ RAS, 2011, The 10th international workshop on magneto-plasma aerodynamics, Abstracts, Moscow, March 22-24, 2011. PP. 80-82
2. V.A. Bityurin, A.N. Bocharov. MHD Parachute in ReEntry Flight. Induced Electric Field Effects in Hypersonic MHD Flow. In: 2nd International ARA Days, October 21-23, 2008, Arcachon, France.
3. V.M. Fomin, V.P. Fomichev, I.A. Golovnov, T.A. Korotaeva, G.A. Pozdnyakov, S.S. Pravdin, A.P. Shashkin, V.I. Yakovlev Study of MHD-interaction in hypersonic streams // AIAA 2004-1193, 2004
4. V.P. Fomichev, V.E. Podzin, A.B. Shevchenko, M.A. Yadrenkin. Experimental Study of the MHD-Parachute Phenomena in a Hypersonic Air Flow//AIAA Hawaii Summer Conference 2011, Honolulu, June 27-30, 2011, AIAA-2011-3462

Hypersonic Flow Control Near a Flat Plate at Local MHD - Interaction

V.P. Fomichev, M.A. Yadrenkin

yadrenkin@itam.nsc.ru

Magnetoplasmadynamic techniques of the action on the air flow around bodies at hypersonic flight conditions permit to change a shock wave structure of the flow. In ref. [1] has been shown that the localized strong MHD - interaction on the flat plate in a hypersonic air flow leads to the alteration of the attached oblique shock wave. Flow ionization has been realized by pulsed electrical discharge. At present work MHD – interaction over the flat plate has been considered. The flow ionization has been generated by electrical pulse or radiofrequency (RF) discharge.

In ref. [2] authors consider a concept of the MHD-parachute. The main goal is to reduce the velocity of the reentry vehicle into the upper atmosphere (where the increasing of the heat flux because of MHD-interaction is not critical) down to the values that could assure a low heat load into the dense atmosphere. It had shown that a strong MHD interaction leads to the formation of the detached bow shock and significantly increase the drag of the model. This concept has been studied experimentally on the MHD-test rig based on a shock tube [3] where gas that was heated behind the reflected shock wave is accelerated in a supersonic nozzle. Test schematic is shown in [4]. The width and the length of the model are of 50 mm, the square of each electrode is of $1.5 \times 15 \text{ mm}^2$, the distance between the electrodes is of 47 mm. The electrodes are placed flush with the streamlined plane. The flow direction, the magnetic induction and discharge direction are normal to each other. MHD-interaction is provided by external pulse discharge within $120 \mu\text{s}$. Flow parameters: Mach number is $M = 5.8$,

the flow rate is of about 2000 m/s, the static flow pressure is of 12 Torr, the static temperature is of 270 K. The magnetic field has been generated by an electromagnet up to 2.2 T. The wave structure of the flow has been visualized by Schlieren-technique with exposure time of $1.2 \mu\text{s}$. However the flow ionization had been achieved using electrical discharge, but it did not effect on a good agreement between test results and numerical data [3]. First, the shock wave slope angle are increased with the magnetic field, second, oblique shock transforms to detached normal shock at strong MHD-interaction. The pulsations of the discharge voltage occur at $B > 0.6 \text{ T}$, that is directly related to the bow shock pulsations. This process has been additionally investigated using high-speed camera during the first $60 \mu\text{s}$ (two periods of voltage pulsations) at $B = 0.9 \text{ T}$. We suspect that the voltage drop occurs due to bypass of the current loop at its upstream movement as a result of increasing of the discharge length and the resistance as well. Than the discharge initiates between the electrodes again and repeats the period. Obviously the discharge motion leads to the bow shock motion. This process has a periodical nature with the frequency is up to 30 – 35 kHz at test conditions. The discharge area moves upstream with the velocity of 700-1000 m/s. MHD-interaction parameter was estimated by current and size of luminous area. The magnitude of the parameter at the pulsation mode is about 0.23 that relates to the strong MHD-effect on the flow.

Experiment study of the MHD-effect with RF-discharge was carried out at the same conditions. Using of the RF-discharge is rather interesting because the

local conductivity area is created with practically constant resistance and electrical contact between the electrodes. The RF-oscillator and pulse discharge works in the current supply mode. The discharge frequency is of 1 MHz and the duration is of 290 μ s. The current and open-circuit voltage are of 8 A and 8 kV respectively.

It is shown experimentally that the 1 MHz RF-discharge could be efficiently used for the flow ionization in the transverse B-field and for the generation of the nonequilibrium conductivity. The significant influence on the flow pattern near the plate has shown a good perspective of using the MHD-effect to the flow control around the high speed vehicles and systems. The pictures of the discharge into the flow and the B-field have been shown that the RF-discharge localized between the electrodes without the flow and other influence. The flow blows the discharge of the plate but the magnetic field restores the discharge into the electrodes area. In this case the discharge region generates a new oblique shock wave. The shock slope angle is of 18 degrees at $B = 1.75$ T, that corresponds to the hypersonic flow near the plate with extended flap at 8 degree. Such alteration under MHD-interaction can be interpreted as "MHD-flap".

It has been shown experimentally that the pulse electrical discharge and the RF discharge can be efficiently used for the flow ionization in the transverse magnetic field and to create a local conductivity area near the model surface. That confirmed by the significant MHD - influence on the shock wave structure of the flow. Nature of

the effects has planned to investigate in future experimental work devoted to the MHD flow control in a supersonic flow.

The research work has been carried out in the framework of RAS Program, project # 22-14 and the Russian Foundation for Basic Research, project # 10-08-00598-a.

REFERENCES

1. V.P. Fomichev, V.E. Podzin, A.B. Shevchenko, M.A. Yadrenkin. The Experimental study of the electrical discharge over the flat plate in a hypersonic air flow at the magnetic field//Moscow, JIHT RAS, 2011, The 10th international workshop on magneto-plasma aerodynamics, Abstracts, Moscow, March 22-24, 2011. PP. 80-82
2. V.A. Bityurin, A.N. Bocharov. MHD Parachute in ReEntry Flight. Induced Electric Field Effects in Hypersonic MHD Flow. In: 2nd International ARA Days, October 21-23, 2008, Arcachon, France.
3. V.M. Fomin, V.P. Fomichev, I.A. Golovnov, T.A. Korotaeva, G.A. Pozdnyakov, S.S. Pravdin, A.P. Shashkin, V.I. Yakovlev Study of MHD-interaction in hypersonic streams // AIAA 2004-1193, 2004
4. V.P. Fomichev, V.E. Podzin, A.B. Shevchenko, M.A. Yadrenkin. Experimental Study of the MHD-Parachute Phenomena in a Hypersonic Air Flow//AIAA Hawaii Summer Conference 2011, Honolulu, June 27-30, 2011, AIAA-2011-3462