

03;04

Внутренний МГД-генератор на борту спускаемого аппарата

© В.А. Битюрин, А.Н. Бочаров

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
E-mail: bocharov@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 22 ноября 2010 г.

Рассматривается идея извлечения электрической энергии в магнитогидродинамическом генераторе, находящемся на борту спускаемого аппарата. Для условий одной из точек траектории спускаемого аппарата Stardust численно продемонстрирована возможность получения 3MW электрической мощности, что составляет около 5% потока полной энтальпии.

Идея извлечения энергии из высокоскоростного потока вокруг летательного аппарата была сформулирована в ОИВТ РАН в начале 1990-х гг. Мотивацией рассмотрения такой задачи является практический интерес к способам быстрой генерации электроэнергии мегаваттного уровня на борту аппарата. Первые приближенные оценки [1] показали принципиальную возможность извлечения электрической мощности на уровне 1 MW на спускаемом участке траектории летательного аппарата. Позднее в совместных экспериментах ОИВТ РАН и ЦАГИ был продемонстрирован вариант поверхностного МГД-генератора [2,3]. Для условий экспериментальной установки (воздух с присадкой, число Маха в тестовой секции — 12, импульсное магнитное поле 2 Т) в таком генераторе была зарегистрирована электрическая мощность 60 W/30 cm². В этих исследованиях был также предположен дополнительный потенциал для организации МГД-взаимодействия в гиперзвуковом МГД-генераторе. В условиях реального полета можно ожидать весьма низкой степени ионизации над достаточно протяженным телом [4]. Высокая степень ионизации возможна в окрестности носовой части, где высоки и температура газа, и плотность. В ударном слое, например, над протяженной плоской пластиной течение является практически замороженным. При этом степень ионизации вблизи поверхности может быть на два порядка ниже той, что имеет место

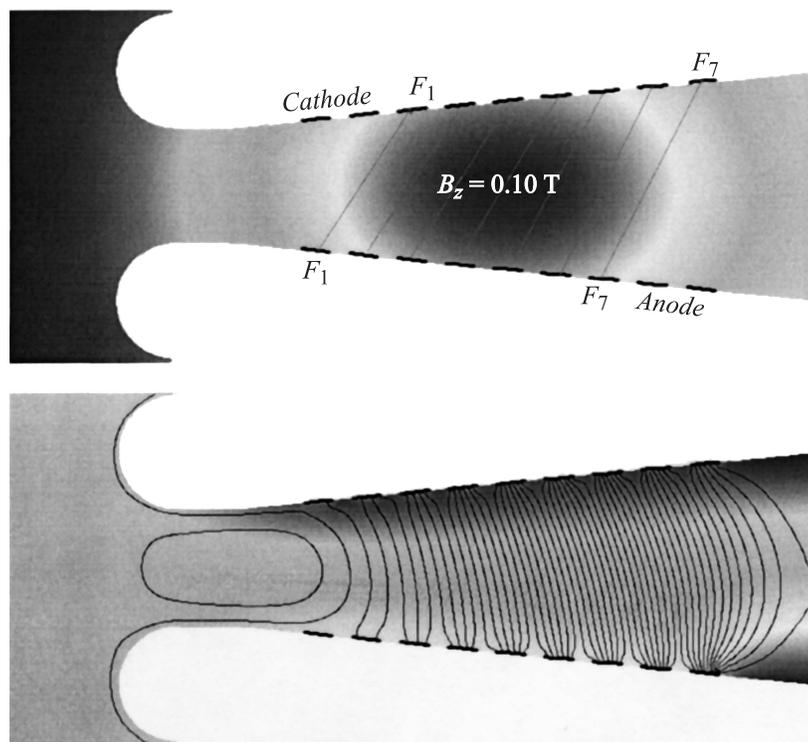


Рис. 1. Схема гиперзвукового МГД-генератора и распределение магнитного поля (вверху); распределение электрического потенциала и линии тока (внизу). Напряжение — 16 V, ток нагрузки — 184 kA/m, мощность — 2.9 MW/m.

в ударном слое в носовой части. Таким образом, интенсивность взаимодействия ограничена недостаточно высокой электропроводностью в зоне потенциального интереса. Поэтому возникла идея повысить уровень электропроводности в рабочей зоне, организовав своеобразный воздухозаборник.

Оценка потенциала МГД-генерации энергии выполнена для простой модели генератора, в котором рассматривается течение между двумя толстыми пластинами с цилиндрическим затуплением в носовой части

(рис. 1). Пластины предполагаются достаточно протяженными как вдоль потока, так и в направлении магнитного поля, перпендикулярного плоскости течения. Для устранения возможного запираания потока рассматривается расходящийся канал. Таким образом, рассматривается классический линейный МГД-генератор, с той лишь разницей, что ионизация в МГД-канале обеспечивается „естественной“ ионизацией воздуха за фронтом сильной ударной волны (точнее говорить о системе скачков).

Рассмотрим МГД-течение в канале при следующих параметрах набегающего потока, соответствующих одной из точек траектории аппарата Stardust на высоте 60 км:

$$\rho = 2.34 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3, \quad p = 16.6 \text{ Pa}, \quad V = 11137 \text{ m/s},$$

$$T = 238.5 \text{ K}, \quad M = 36, \quad T_{wall} = 2500 \text{ K}.$$

Здесь ρ — плотность, p — давление, V — скорость, T — температура, M — число Маха.

Для качественных оценок МГД-взаимодействия будем считать, что плазма находится в состоянии локального термодинамического равновесия. Модель термодинамически равновесного воздуха взята из работы [5]. Электрическая схема канала представлена на рис. 1. Электроды F_i ($i = 1, \dots, 7$) представляют собой так называемые рамки. На двух электродах каждой рамки, верхнем и нижнем, задается условие равенства потенциалов и равенства полного тока (отсутствие внешней цепи). Крайние электроды (левые — на верхней стенке и правые — на нижней) включены в цепь нагрузки с балластным сопротивлением, значение которого находится из условия максимума извлекаемой мощности. Предполагается, что магнитное поле создается двумя прямоугольными витками с током. Плоскости витков параллельны плоскости рассмотрения ($z = 0$), и их координаты определяются как $z = \pm 0.5 \text{ m}$. Распределение магнитного поля в плоскости $z = 0$ показано на рис. 1.

На этом же рисунке представлены распределения электрического потенциала и тока для режима максимальной мощности. Как видно из рисунка, такой режим характеризуется током нагрузки 184 кА и напряжением в цепи нагрузки 16 В. Извлекаемая электрическая мощность составляет примерно 3 MW, т.е. 5% от потока полной энтальпии. Изменение структуры потока в результате взаимодействия

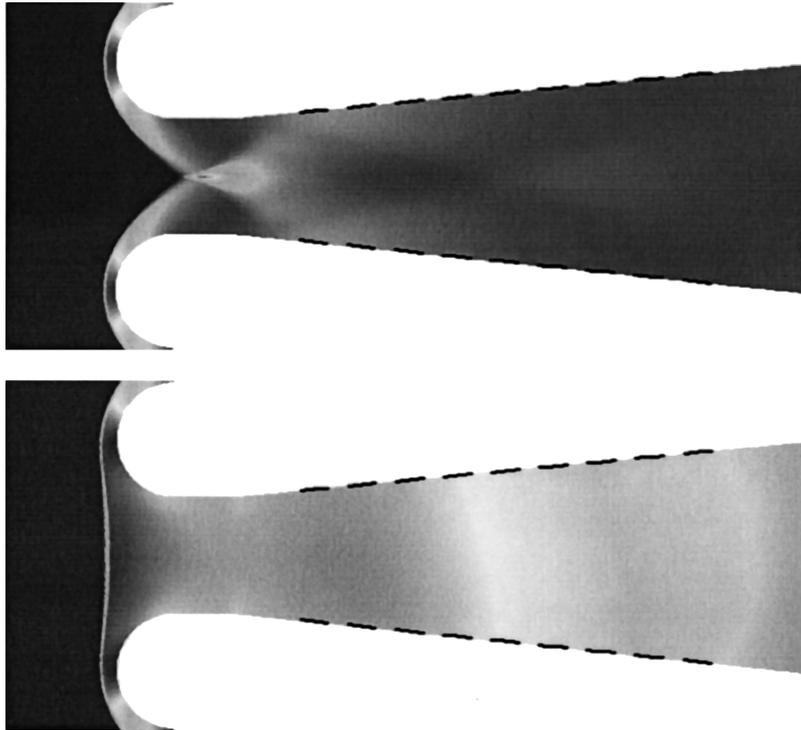


Рис. 2. Распределение давления в канале МГД-генератора при $B = 0$ (вверху) и при $B=0.1$ Т (внизу).

демонстрирует рис. 2, где показаны распределения статического давления без магнитного поля и с магнитным полем. Напомним, что речь идет об оценке энергетического потенциала МГД-устройства с достаточно коротким временем работы, ограниченным высокой температурой в канале и высокими тепловыми потоками в стенки канала. Еще предстоит и оценить время жизни МГД-генератора, и найти оптимальные режимы течения и многое другое. Рассмотренный пример МГД-генерации энергии показывает, что по крайней мере этим можно заниматься.

Список литературы

- [1] *Битюрин В.А., Иванов В.А., Бочаров А.Н.* МГД управление космическим аппаратом в верхней атмосфере / Тех. отчет 94/3. М.: ИВТАН–АНРА, 1994. 37 с.
- [2] *Bityurin V., Bocharov A., Baranov D., Bychkov S.* // 38th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference In conjunction with the 16th International Conference on MHD Energy Conversion. Miami FL, 2007. June 25–28. AIAA Paper 2007-3882.
- [3] *Битюрин В.А., Бочаров А.Н.* // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1 (прил.). С. 44.
- [4] *Битюрин В.А., Бочаров А.Н., Попов Н.А.* // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1 (прил.). С. 113.
- [5] *Крайко А.Н., Макаров В.Е.* // ТВТ. 1996. Т. 34. № 2. С. 208.