

03

Об особенностях электромагнитной тепловой защиты 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.

В продолжение работ [1–3] обсуждается вопрос о снижении тепловых потоков на поверхности летательного аппарата с помощью магнитного поля. Рассматривается классическая организация электромагнитной тепловой защиты (магнитный диполь, ориентированный навстречу потоку) на примере входа в атмосферу Земли возвращаемой капсулы аппарата Stardust. Показано, что при достаточно больших магнитных полях распределение теплового потока по поверхности аппарата слабо зависит от амплитуды поля. В то же время отход ударной волны от поверхности растет пропорционально росту амплитуды магнитного поля.

В [1] рассмотрена задача об электромагнитном снижении тепловых потоков в условиях, типичных для аппаратов небольших размеров, возвращаемых с околоземных орбит. Характерными особенностями магнитогидродинамического (МГД) течения в таких условиях (число Маха набегающего потока $M = 24$;) являются высокая степень неравновесности, достаточно низкая степень ионизации воздуха в ударном слое и, как следствие, существенное влияние эффекта Холла. При характерном масштабе магнитной системы и радиуса кривизны поверхности 0.1 м было достигнуто снижение тепловых потоков в 2–3 раза в окрестности критической точки. В развитие идеи МГД парашюта [2–5] рассмотрена задача об эффективности МГД-торможения в верхних слоях атмосферы Земли (число Маха набегающего потока $M = 40$). Показано, что для характерного масштаба магнитной системы 2 м гидродинамическое сопротивление тела может быть увеличено почти на порядок. Это предоставляет возможность заметного снижения скорости тела до входа в плотные слои атмосферы. В данной работе рассматривается классическая организация электромагнитной тепловой защиты (магнитный диполь, ориентированный навстречу потоку) на примере входа в

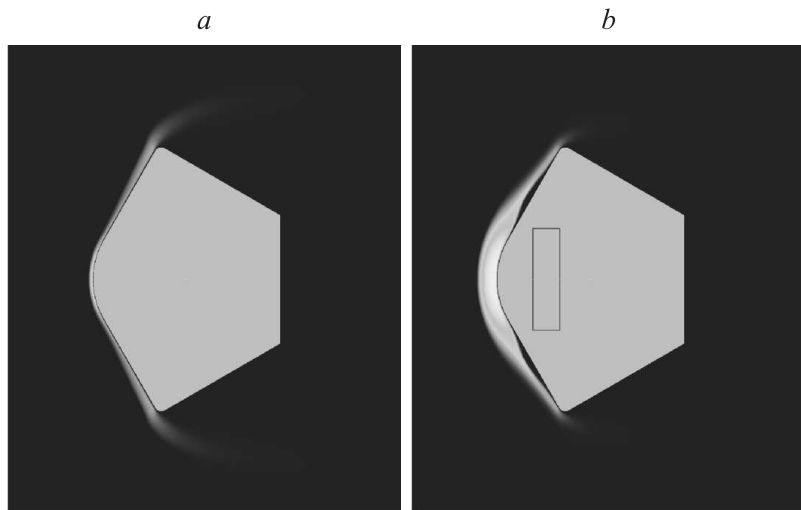


Рис. 1. Распределение концентрации электронов в окрестности аппарата Stardust для $B^* = 0$ (a) и $B^* = 0.2$ Т (b).

атмосферу Земли возвращаемой капсулы аппарата Stardust. В последнее время интерес к идее электромагнитной защиты вызван, несомненно, подготовкой рядом европейских организаций полетного эксперимента по проверке идеи снижения тепловых потоков на поверхности спускаемого аппарата с помощью магнитного поля [6,7].

В постановке [1–3] рассмотрим обекание возвращаемой капсулы аппарата Stardust (рис. 1). Радиус сферической части капсулы — 0.23 м, угол полураствора конической части тормозного щита относительно продольной оси — 60° , угол между конусами — 90° , радиус с закругления между конусами — 0.02 м, высота задней поверхности аппарата — 0.19 м, диаметр поперечного сечения (мидель) — примерно 0.8 м, угол атаки — 0° . Рассматривались следующие условия в набегающем потоке [8]:

$$\rho_0 = 1.06 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3, \quad p_0 = 6.9 \text{ Pa},$$

$$V_0 = 12004 \text{ m/s}, \quad T_0 = 229 \text{ K}, \quad M = 39.65.$$

Здесь ρ — плотность, p — давление, V — скорость, T — температура, M — число Маха. При расчете химического состава использовалась

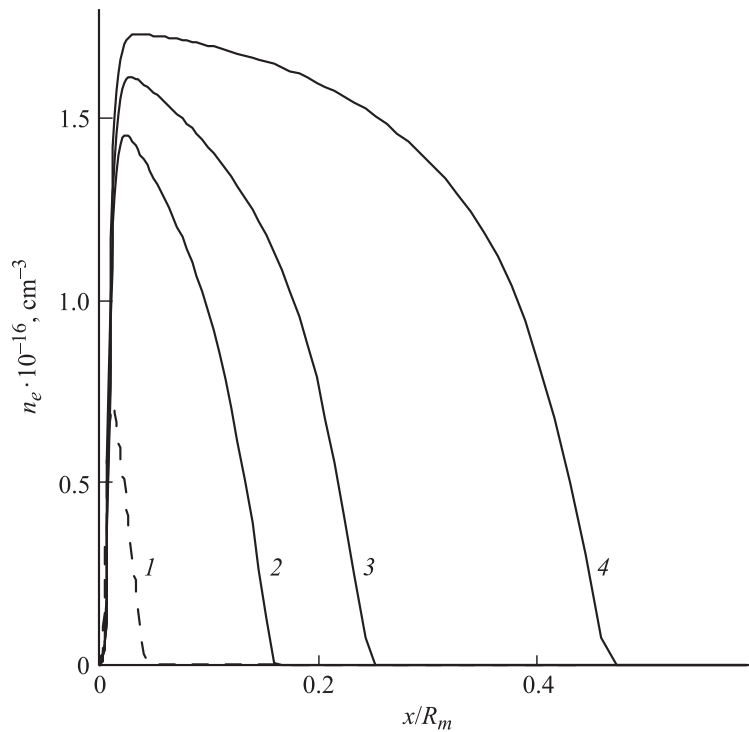


Рис. 2. Распределение концентрации электронов вдоль линии торможения в зависимости от амплитуды магнитного поля: 1 — $B^* = 0$, 2 — $B^* = 0.2$ Т, 3 — $B^* = 0.3$ Т, 4 — $B^* = 0.6$ Т. $R_m = 39.2$ см — радиус максимального поперечного сечения.

кинетическая схема, включающая 98 реакций для 11 компонентов воздуха. Задача рассматривается в приближении изотермической суперкаталитической поверхности: $T_w = 1800$ К, и на стенке задаются концентрации компонентов, соответствующие невозмущенному течению. Размеры и положение магнитной катушки можно видеть на рис. 1, *b* (внутренний диаметр — 0.28 м, толщина обмотки — 0.01 м). В качестве характерного значения магнитного поля B^* принимается значение магнитной индукции в критической точке тела.

Представление о влиянии магнитного поля на поток можно получить из рис. 1. Отметим значительное увеличение отхода ударной

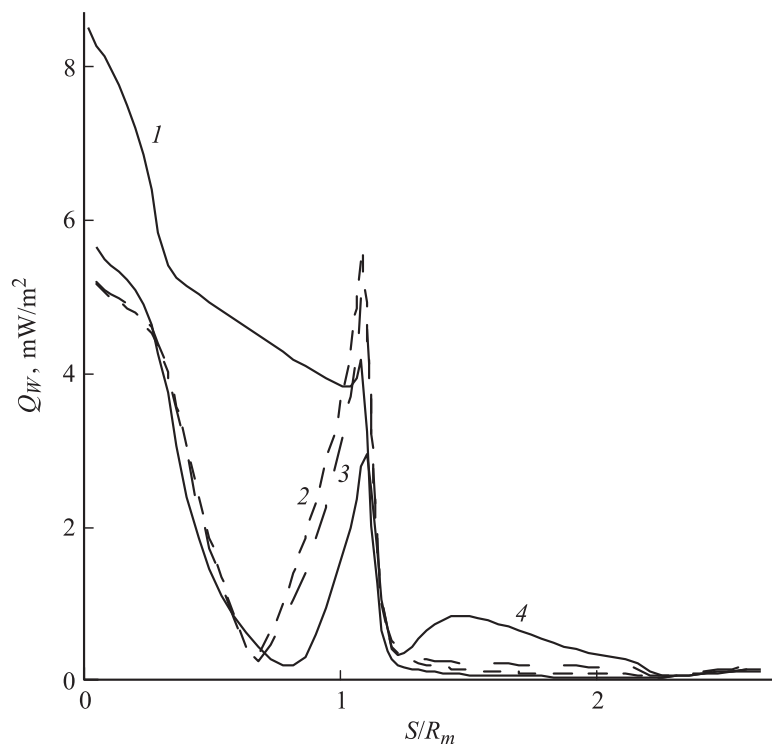


Рис. 3. Распределение плотности теплового потока по поверхности аппарата в зависимости от амплитуды магнитного поля. Обозначения те же, что на рис. 2.

волны от поверхности тела при весьма умеренных значениях магнитной индукции. Масштаб увеличения толщины ударного слоя с ростом магнитного поля можно оценить из рис. 2. Отметим также заметное увеличение электронной плотности в ударном слое с увеличением его толщины. Распределение плотности теплового потока в стенку в зависимости от амплитуды магнитного поля показано на рис. 3. Плотность теплового потока падает в окрестности критической точки в полтора раза. На конической части тормозного щита наблюдается значительное снижение теплового потока. При этом интегральный поток в стенку падает почти в 1.6 раза при $b^* = 0.2\text{Т}$ и в два раза при $B^* = 0.6\text{Т}$. В то же время хорошо видно, что при $B^* > 0.2\text{Т}$

распределение теплового потока слабо меняется с ростом магнитного поля.

При значениях магнитной индукции $B^* > 0.15$ Т наблюдается практически полное торможение потока в ударном слое на масштабах магнитной системы. Это приводит к появлению возвратного течения вверх по потоку от магнитной системы. В свою очередь, возникновение возвратного течения приводит к значительному снижению теплового потока в стенку в зоне вихря. Увеличение магнитной индукции не приводит, однако, к существенным изменениям в распределении теплового потока, что видно из сравнения кривых 2–4 на рис. 3. В отличие от результатов [1], где наблюдалась корреляция между отходом ударной волны и снижением теплового потока, в рассматриваемом случае распределение плотности теплового потока, начиная с некоторого значения магнитной индукции, слабо зависит от магнитного поля. В то же время толщина ударного слоя примерно пропорционально растет с ростом поля. Очевидно, что влияние магнитного поля на тепловые потоки заметно, пока МГД-взаимодействие затрагивает зону высоких градиентов температуры и концентраций. Такая ситуация наблюдалась в [1] и наблюдается в данной работе при невысоких полях $B^* < 0.1$ Т, пока масштаб зоны неравновесного течения сопоставим с толщиной ударного слоя. С ростом магнитного поля и увеличением толщины ударного слоя значительная часть слоя находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию. При этом сильные градиенты температуры и концентраций остаются лишь в пристеночном слое.

Список литературы

- [1] Битюрин В.А., Бочаров А.Н. // МЖГ. 2006. № 5. С. 188.
- [2] Битюрин В.А., Бочаров А.Н., Попов Н.А. // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1 (приложение). С. 113.
- [3] Бочаров А.Н. // ТВТ. 2010. Т. 48. № 4. С. 483.
- [4] Bityurin V.A., Bocharov A.N. // 15th Int. Conf. On MHD Energy Conversion. Moscow, May 24–27, 2005. V. 2. P. 429.
- [5] Bityurin V.A., Bocharov A.N., Lineberry J. // 15th Int. Conf. On MHD Energy Conversion. Moscow, May 24–27, 2005. V. 2. P. 399.
- [6] Gülhan A., Esser B., Koch U. et al. // J. Spacecraft and Rockets. 2009. V. 46. N 2. P. 274.
- [7] Lichford R.J., Madden T.J. // J. Aerospace America. December 2009. P. 12.
- [8] Goose R., Candler G. // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA Paper 2005–0389. Reno, Nevada. 10–13 Jan., 2005.