ГЕНЕРАЦИЯ МГД-УДАРНЫХ ВОЛН В НИЖНИХ СЛОЯХ КОРОНЫ СОЛНЦА

Романов К.В.¹, Романов Д.В.¹, Романов В.А.²

¹Красноярский государственный педагогический университет, Красноярск, Россия

²Саратовский государственный университет, Саратов, Россия

GENERATION OF MHD SHOCK WAVES IN THE LOWER LAYERS OF THE SUN'S CROWN

Romanov K.V.¹, Romanov D.V.¹, Romanov V.A.²,

¹Krasnoyarsk state pedagogical University, Krasnoyarsk, Russia

²*Saratov state University, Saratov, Russia*

The paper studies the features of generation of fast and slow Alfvén waves in the lower layers of the solar corona. A solution was obtained for a shock discontinuity for both types of shock waves, and it was shown that the main role in the formation of anomalous heating belongs to weak MHD shock waves that do not have a lower velocity boundary for overturning the initial acoustic disturbances.

DOI: 10.31725/0552-5829-2020-265-268

1. Введение

Феномен аномального прогрева солнечной атмосферы на различных стадиях цикла активности детально не изучен вплоть до настоящего времени [1]. На рис. 1 представлены данные полуэмпирической модели по распределению температуры от фотосферного уровня до верхних слоёв хромосферы из работы [2]. Данное распределение разбивается по диапазону высот на две части: первый диапазон – от уровня фотосферы до высот порядка 2200 км; второй диапазон – от уровня 2200 км и выше в нижние слои короны Солнца.

Рис. 1. Распределение температуры от фотосферного уровня до верхних слоёв хромосферы Солнца [2].

В верхних слоях хромосферы из-за роста температуры нелинейно растет проводимость плазмы. В этих условиях возможен разогрев нижней короны Солнца магнитогазодинамическими ударными волнами [3]. В настоящей работе проводится исследование по определению типа МГД-ударных волн, вносящих основной вклад в разогрев нижних слоев короны Солнца в диапазоне высот выше 2200 км.

2. Расчёт МГД-параметров медленных и быстрых ударных волн

Задача исследуется в приближении идеальной магнитогазодинамики [4]. Для изучения течения идеально проводящей плазмы за и перед фронтом ударной волны вводится плоская система координат (рис. 2). Ось Ox перпендикулярна фронту ударной волны.

Рис. 2. Плоская декартова система координат для МГД-ударной волны

Рис. 3. Диапазоны генерации МГД-ударных волн

Для обезразмеривания соотношений на разрыве выбираются МГД-параметры газа перед фронтом ударной волны (параметры фона):

- H_{x1} – параметр обезразмеривания напряжённости магнитного поля,
- $p = H_{x1}^2 / (4\pi)$ – параметр обезразмеривания давления,
- ρ_1 – параметр обезразмеривания плотности газа,
- $u_0 = H_{x1} / \sqrt{4\pi\rho_1} = V_A$ – параметр обезразмеривания скорости (альфвеновская скорость [5]).

Система пересчёта МГД-параметров на фронте ударной волны в обезразмеренном виде [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m^{*2} = u_1^{*2} \\ m^{*2} = \frac{h_2 - h_1}{h_2 \cdot \eta - h_1} \\ m^{*2} = \frac{z}{1 - \eta} \\ \eta \cdot \left[z \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} - (h_2 - h_1) \cdot \frac{\gamma \cdot h_1 + h_2}{\gamma - 1} + \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot p_1^* \right] - \\ - z - \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot p_1^* + h_1 \cdot (h_2 - h_1) = 0 \\ u_1^* - u_1 = \frac{h_1 - h_2}{m^*} \end{array} \right. \quad (1)$$

где $\eta = \frac{V_2}{V_1}$, $z = p_2^* - p_1^* + \frac{h_2^2 - h_1^2}{2}$

– скачок полного давления при переходе через фронт ударной волны.

Введём вспомогательный параметр – отношение касательных компонент магнитного поля за и перед фронтом ударной волны:

$$k = \frac{h_2}{h_1}. \quad (2)$$

Методом исключения система (1) приводится к основному кубическому уравнению [4]:

$$k^3 + a_1 \cdot k^2 + a_2 \cdot k + a_3 = 0. \quad (3)$$

Коэффициенты кубического уравнения рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 + u_1^{**} \cdot (2 - \gamma) \\ a_2 &= \frac{u_1^{**} \cdot [u_1^{**} \cdot (\gamma - 1) + \gamma \cdot h_1^2 + 2 \cdot \gamma \cdot p_1^* - 2]}{h_1^2} \\ a_3 &= -\frac{\gamma + 1}{h_1^2} \cdot u_1^{**2} \end{aligned}$$

где

$$u_1^{**} = u_1^* - 1 \quad (4)$$

Ударные волны переходят в звуковые при $k = 1$: исчезает скачок МГД-параметров на фронте. Кубическое уравнение переходит в квадратное с корнями [4]:

$$a_{\pm} = \frac{\sqrt{\gamma \cdot p_1^* + h_1^2 + 1 + 2\sqrt{\gamma \cdot p_1^*}} \pm \sqrt{\gamma \cdot p_1^* + h_1^2 + 1 - 2\sqrt{\gamma \cdot p_1^*}}}{2}$$

– скорости быстрой (+) и медленной магнитозвуковых волн [4].

В результате во всём диапазоне изменения скорости ударной волны есть только три особые точки: скорость быстрого (+) и медленного (-) магнитного звука, и альфвеновская скорость (рис. 3).

Прогрев газа за фронтом ударной волны удобно проиллюстрировать на модельной задаче, для которой выбираются следующие безразмерные МГД-параметры перед фронтом:

$$\rho_1^* = 1, \quad p_1^* = 1, \quad \gamma = 5/3, \quad h_1 = 1, \quad v_1^* = 1 \quad (5)$$

На рис. 4а представлены распределения температуры газа за фронтом в зависимости от скорости ударной волны в I зоне генерации быстрых МГД-ударных волн. Это МГД-аналог обычных газодинамических ударных волн. Но в отличие от газодинамики магнитогазодинамические ударные волны могут генерироваться ещё в одном диапазоне – зоне III – зоне генерации медленных МГД-ударных волн. На рис. 4б представлены распреде-

ления температуры газа за фронтом в зависимости от скорости ударной волны в зоне III.

Рис. 4. Температура газа за фронтом в зависимости от скорости ударной волны для зоны I (а) и зоны III (б)

Заключение

Медленные магнитозвуковые ударные волны генерируются в зоне III: между скоростью медленного магнитного звука и альфвеновской скоростью. Замечательная особенность этих ударных волн состоит в том, что они дозвуковые: весь диапазон скоростей (a_-, V_{Al}) лежит левее C_s . Медленные МГД-ударные волны генерируются раньше обычных газодинамических ударных волн. Как следствие, диапазон высот “опрокидывания” акустических волн данного типа существенно меньше, чем диапазон высот “опрокидывания” обычных газодинамических акустических волн (рис. 1).

Диапазон генерации медленных МГД-ударных волн имеет ещё одну отличительную особенность: с ростом напряженности касательной компоненты магнитного поля h_1 скорость медленного магнитного звука a_- стремится к нулю ($a_- \rightarrow 0$). Фактически зона скоростей не имеет нижней границы: медленные МГД-ударные волны генерируются при сколь угодно малых скоростях. Механизм разогрева солнечной атмосферы медленными МГД-ударными волнами имеет неоспоримое преимущество перед разогревом обычными газодинамическими и быстрыми МГД-ударными волнами.

Литература

1. Зирин Г. Солнечная атмосфера. – М.: Мир. 1969. – 504 с.
2. Vernazza J.E., Avertt E.H., Loeser R. Structure of the Solar chromosphere. I. Basic computation and summary of the results // *Astrophys. J.* 1973. V. 184. P. 605-631.
3. Прист Э.Р. Солнечная магнитогидродинамика. – М.: Мир. 1985. – 592 с.
4. Куликовский А.Г., Любимов Г.А. Магнитная гидродинамика. – М.: Физматгиз. 1962. – 248 с.