

АНОМАЛЬНЫЙ РАЗОГРЕВ ВЕРХНИХ СЛОЁВ СОЛНЕЧНОЙ ХРОМОСФЕРЫ МЕДЛЕННЫМИ МАГНИТОГАЗОДИНАМИЧЕСКИМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

**Романов К.В.¹, Романов Д.В.¹, Романов В.А.²,
Степанов Е.А.², Лебедев А.А.²**

¹*Красноярский государственный педагогический университет, Красноярск, Россия*

²*Саратовский государственный университет, Саратов, Россия*

ABNORMAL HEATING OF THE UPPER LAYERS SOLAR CHROMOSPHERE BY SLOW MAGNETOHYDRODYNAMIC SHOCK WAVES

**Romanov K.V.¹, Romanov D.V.¹, Romanov V.A.²,
Stepanov E.A.², Lebedev A.A.²**

¹*Krasnoyarsk state pedagogical University, Krasnoyarsk, Russia*

²*Saratov state University, Saratov, Russia*

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-285-288>

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.

1. Введение

Аномальный прогрев нижних слоёв солнечной атмосферы (хромосферы) имеет сложную пространственную структуру распределения температуры по высоте, и условно может быть разделён на три диапазона высот [1, 2]:

- 1) от уровня фотосферы до высот температурного минимума (≈ 500 км);
- 2) от высоты температурного минимума до высот порядка 2200 км (до первого скачка температуры);
- 3) третий диапазон от высот порядка 2200 км и выше, захватывая нижние слои солнечной короны, где реализуется нелинейный рост температуры до $1,6 \cdot 10^6$ К.

В настоящей работе проводится исследование по определению типа МГД-ударных волн, вносящих основной вклад в разогрев нижних слоёв короны Солнца в диапазоне высот выше 2200 км от уровня фотосферы [3].

2. Основное кубическое уравнение расчёта параметров МГД-ударных волн

Задача исследуется в приближении идеальной магнитогазодинамики [4]. Для изучения течения идеально проводящей плазмы за и перед фрон-

том ударной волны вводится плоская система координат (рис. 1). Ось Ox перпендикулярна фронту ударной волны. Течение газа перед и за фронтом реализуется в одной плоскости.

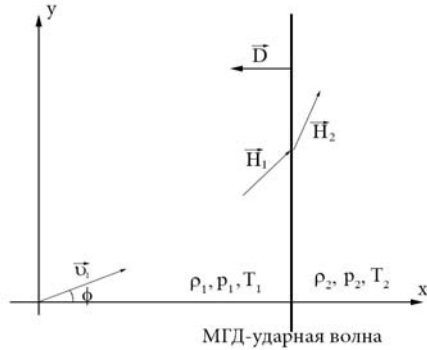


Рис. 1. Плоская декартова система координат для МГД-ударной волны

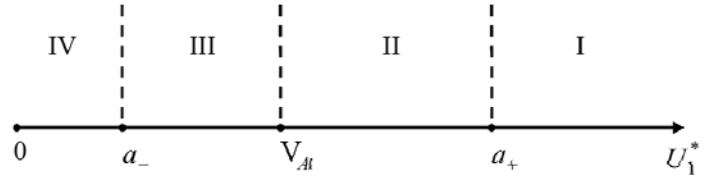


Рис. 2. Диапазоны генерации МГД-ударных волн

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

- H_{x1} – параметр обезразмеривания напряжённости магнитного поля
- $p = H_{x1}^2 / (4\pi)$ – параметр обезразмеривания давления
- ρ_1 – параметр обезразмеривания плотности газа
- $\nu_0 = H_{x1} / \sqrt{4\pi\rho_1} = V_{Al}$ – альфвеновская скорость [4] – параметр обезразмеривания скорости.

Обезразмеренная система уравнений пересчета МГД-параметров на фронте ударной волны методом исключения приводится к основному кубическому уравнению [4]:

$$k^3 + a_1 \cdot k^2 + a_2 \cdot k + a_3 = 0 \quad (1)$$

где

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

Введён вспомогательный параметр

$$u_1^{**} = u_1^* - 1 \quad (3)$$

где u_1^* – обезразмеренная ν_x – компонента скорости газа перед фронтом ударной волны.

$$k = \frac{h_2}{h_1} \quad (4)$$

– отношение касательных компонент магнитного поля за и перед фронтом ударной волны.

При $k = 1$ исчезают скачки МГД-параметров на фронте, и ударные волны переходят в звуковые. Кубическое уравнение (1) переходит в квадратное с корнями:

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

– скорости быстрой (+) и медленной (-) магнитозвуковых волн [4]. В результате во всём скоростном диапазоне МГД-ударных волн есть три особые точки: скорость быстрого (a_+) и медленного (a_-) магнитного звука, и альфвеновская скорость V_{Al} (рис. 2).

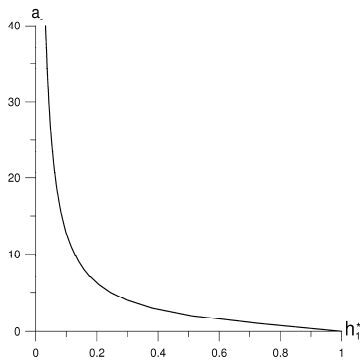


Рис. 3. Скорость медленного магнитного звука a_- в зависимости от напряжённости касательной компоненты магнитного поля h_1 .

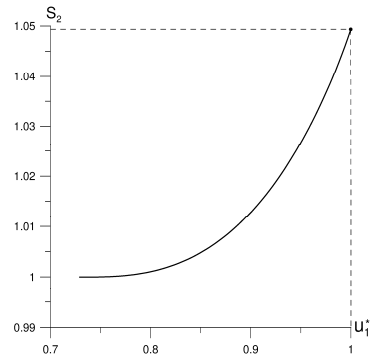


Рис. 4. Энтропия газа за фронтом в зависимости от скорости ударной волны

В отличие от обычных газодинамических ударных волн МГД-ударные волны могут генерироваться в двух диапазонах: зоне I и зоне III. Зона III расположена между альфвеновской скоростью V_{Al} и скоростью медленного магнитного звука a_- (рис. 2). С ростом напряжённости касательной компоненты магнитного поля перед фронтом h_1 скорость медленного магнитного звука a_- стремится к нулю (рис. 3). Фактически медленные МГД-ударные волны не имеют нижней границы по скорости генерации. Во всём скоростном диапазоне зоны III реализуются ударные волны сжатия: при переходе через фронт растёт энтропия газа (рис. 4), давление и температура газа с ростом скорости ударной волны существенно превышают фоновые значения перед фронтом (рис. 5,6).

На рис. 7 приведены ударные поляры для медленных МГД-ударных волн при различных значениях напряжённости касательной компоненты магнитного поля h_1 . Излом магнитного поля на фронте (рис. 1) в медленных МГД-ударных волнах разгоняет газ вдоль фронта сверху вниз. Ударные поляры смещаются вниз с ростом h_1 .

Закключение

Медленные МГД-ударные волны генерируются в диапазоне между скоростью медленного магнитного звука a_- и альфвеновской скоростью V_{Al} .

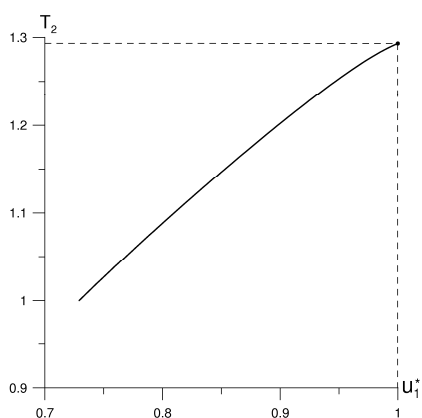


Рис. 5. Температура газа за фронтом в зависимости от скорости ударной волны

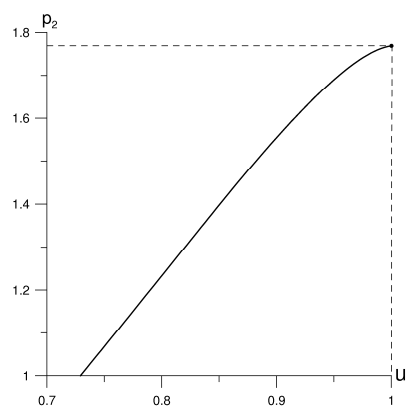


Рис. 6. Давление газа за фронтом в зависимости от скорости ударной волны

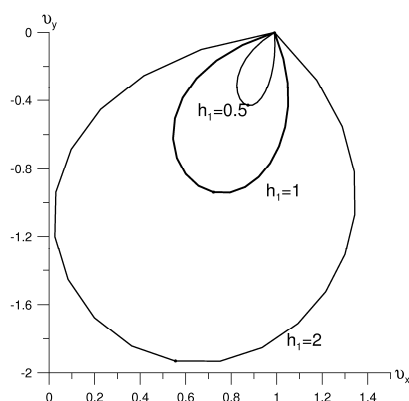


Рис. 7. Ударные поляры для медленных магнитогазодинамических ударных волн при различных значениях напряжённости тангенциальной компоненты поля h_1

Эти волны генерируются раньше обычных газодинамических ударных волн, и диапазон высот «опрокидывания» акустических волн данного типа существенно меньше.

С ростом напряженности касательной компоненты магнитного поля h_1 скорость медленного магнитного звука a_- стремится к нулю ($a_- \rightarrow 0$). 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 обычными 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.