

УДК 533.95

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛН В СРЕДАХ С ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ**

Рящиков Д. С., Завершинский Д. И., Молевич Н. Е.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), г. Самара, Самарский филиал Физического института имени П. Н. Лебедева РАН, г. Самара

В данной работе проводится исследование дисперсии магнитогидродинамических волн и возможности их усиления в солнечной короне с учётом влияния процессов тепловыделения и теплопроводности. Рассматриваемая среда представляет собой тепловыделяющую среду с источником энергии, зависящим от температуры и плотности, и является одним из подтипов широкого класса неравновесных сред, таких, как колебательно возбуждённый газ, неизотермическая плазма, химически активные смеси и так далее.

Распространение магнитогидродинамических волн в проводящей среде описывается системой МГД-уравнений, модифицированной для учёта неадиабатических процессов, протекающих в среде [1]. Обобщённая функция тепловыделения, зависящая от температуры и плотности, играет ключевую роль в описании процессов, происходящих в подобных средах. Ранее было показано [2], что в зависимости от параметров источника тепловыделения, в среде могут реализовываться три типа неустойчивостей: изобарическая, изохорическая и изоэнтропическая (акустическая).

В данной работе была рассмотрена одномерная задача. Процессами вязкости пренебрегалось, электрическая проводимость считалась бесконечно большой, а плазма полностью ионизованной.

Линеаризовывая исходную систему до величин первого порядка малости и представляя возмущения в виде  $A = A_0 + A_1 \exp(-i\omega t + ikz)$ , можно записать дисперсионное соотношение (1) для магнитоакустических и тепловой волн в виде

$$\frac{\omega^2}{k^2} = \frac{k_B T_0}{m} \times \frac{(C_{P0} - i\omega\tau_0 C_{P\infty} + \kappa_{\parallel}\tau_0 k^2 / \rho_0)}{(C_{V0} - i\omega\tau_0 C_{V\infty} + \kappa_{\parallel}\tau_0 k^2 / \rho_0)} \times \frac{(c_{\alpha}^2 \cos^2 \alpha - \omega^2 / k^2)}{(c_{\alpha}^2 - \omega^2 / k^2)}. \quad (1)$$

Здесь  $C_{V0}, C_{P0}, C_{V\infty}, C_{P\infty}$  – низкочастотные и высокочастотные теплоёмкости при постоянном объёме и давлении;  $T_0, \rho_0$  – невозмущённые значения температуры, плотности;  $\tau_0$  – характерное время нагрева среды;  $c_{\alpha}$  – скорость альфвеновских волн;  $\alpha$  – угол между вектором магнитной индукции и направлением распространения волн;  $\kappa_{\parallel}$  – коэффициент теплопроводности вдоль направления распространения волн;  $k_B$  – постоянная Больцмана.

В работе показано, что в приближении малости коэффициента теплопроводности из уравнения (1) можно получить в простом виде дисперсионные соотношения, описывающие магнитоакустические и тепловую моду в отдельности.

Из дисперсионного соотношения (1) получено условие усиления магнитоакустических волн (2)

$$\omega^2 < \frac{v^2 \rho_0}{\kappa_{\parallel} \tau_0} \times \frac{C_{V\infty} C_{P0} - C_{P\infty} C_{V0}}{C_{P\infty} - C_{V\infty}}. \quad (2)$$

где  $v$  – фазовая скорость магнитоакустических волн.

Следует отметить, что условие  $C_{V\infty} C_{P0} - C_{P\infty} C_{V0} > 0$  совпадает с условием изоэнтропической неустойчивости [2], однако диссипативные процессы, связанные с

наличием в системе теплопроводности, ограничивают сверху диапазон частот, для которых усиление возможно.

При различных сценариях нагрева солнечной короны [3] для двух моделей функции охлаждения [3, 4] при характерных параметрах солнечной короны [5] были получены зависимости скорости и декремента быстрой магнитоакустической волны в случае распространения перпендикулярно магнитному полю. Из данных зависимостей следует, что наибольшим инкрементом обладают магнитоакустические волны при меньшей температуре.

Кроме того, были определены сценарии нагрева солнечной короны, при реализации которых в среде возможно усиление магнитоакустических волн, определены температурные диапазоны, в которых происходит усиление, и получены максимальные частоты усиления магнитоакустических волн (рис. 1). Из представленного видно, что усиление магнитоакустических волн было получено только для трёх сценариев нагрева солнечной короны. Также видно, что две использованные модели функции охлаждения дают схожие результаты.

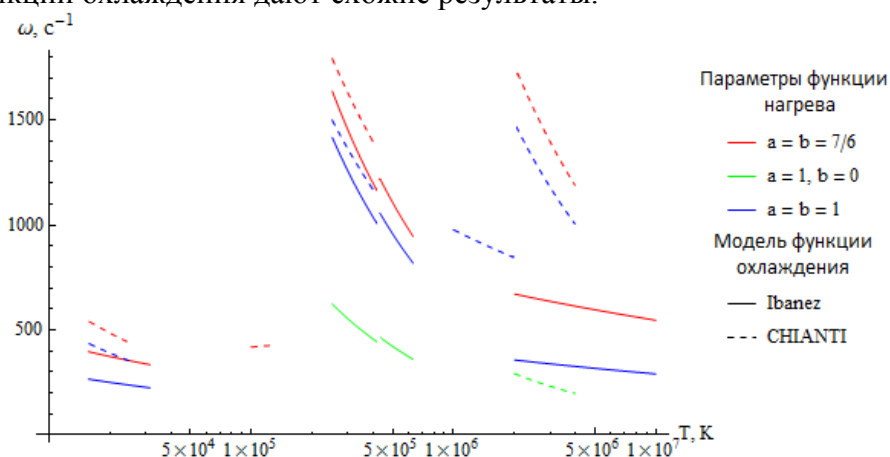


Рис. 1. Зависимость максимальной частоты усиления от температуры.

Функция нагрева солнечной короны имеет вид  $\Gamma(\rho, T) = C\rho^{a-1}T^b$ .

Пунктиром выделены отрицательные значения декремента

Работа частично поддержана Минобрнауки РФ в рамках в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013-2020 гг. и государственного задания (проекты № 102, 608, 1451, ГР 114091840046), грантом РФФИ 14-02-97030 р\_поволжье\_a, Стипендией Президента РФ для молодых учёных и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки.

#### Библиографический список

1. Chin, R. Self-organization of magnetoacoustic waves in a thermally unstable environment [Текст]/R.Chin, E.Verwichte, G.Rowlands, V.M.Nakariakov// Physics of Plasmas – 2010. – V.17. – I.3. – P. 032107.
2. Field, G.B. Thermal instability [Текст]/ G.B. Field // Astrophysical journal – 1965. – V. 142. – P. 531-567.
3. Ibanez, S. Propagation of hydrodynamic waves in optically thin plasmas [Текст]/S. Ibanez, H.Miguel, T.Escalona, B.Orlando//Astrophysical Journal – 1993. – V.415, №.1. – P. 335-341.
4. Landi, E. CHIANTI – An Atomic Database for Emission Lines. XII. Version 7 of the Database [Текст]/E.Landi, G. Del Zanna, P.R.Young, K.P.Dere et al.// The Astrophysical Journal – 2012. – V. 744. – I. 2.
5. Allen Gary, G. Plasma beta above a solar active region: rethinking the paradigm [Текст]/G. Allen Gary//Solar Physics – 2001. – V.203. – P. 71-86.