УДК 533.9.01, 533.951 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-11

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОВОГО ДИСБАЛАНСА НА ДИНАМИКУ МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МАГНИТНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПЛАЗМЕ

Д.В. Агапова[1, 2], Д.И. Завершинский[1, 2], Н.Е. Молевич[1, 2], С.А. Белов[1]

[1] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия, agapovadaria2019@gmail.com
[2] Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

EFFECT OF THERMAL CONDUCTIVITY AND THERMAL MISBALANCE ON THE DYNAMICS OF SLOW MAGNETOACOUSTIC WAVES IN A MAGNETICALLY STRUCTURED PLASMA

D.V. Agapova[1, 2], D.I. Zavershinskii[1, 2], N.E. Molevich[1, 2], S.A. Belov[1]

[1] Samara National Research University, Samara, Russia, agapovadaria2019@gmail.com
[2] Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

Аннотация. В данной работе получено дисперсионное соотношение для магнитоакустических волн, распространяющихся в термически активной плазме с учетом теплопроводности, нагрева и радиационного охлаждения. Совместное влияние геометрической дисперсии, нагрева и охлаждения приводит к модификации трубочной скорости медленных магнитоакустических волн, которая отличается от скорости в идеальной плазме. Коротковолновым предельным значением фазовой скорости медленных волн является изотермическая звуковая скорость, которая объясняется наличием теплопроводности.

Ключевые слова: магнитоакустические волны, нагрев, теплопроводность, радиационное охлаждение.

Abstract. In this paper, the dispersion relation of magnetoacoustic waves propagating in a thermally active plasma is derived, taking account of thermal conduction, heating, and radiative cooling. The combined effects of geometric dispersion, heating, and cooling lead to a modification of the tube velocity of slow magnetoacoustic waves, which is different from the velocity in an ideal plasma. The short-wave limiting value of the phase velocity of slow waves is the isothermal sound velocity, which is due to the presence of thermal conduction.

Keywords: magnetoacoustic waves, heating, thermal conductivity, radiative cooling.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение физических процессов, происходящих в солнечной атмосфере, является ключевой областью солнечной физики. Одним из важнейших аспектов этого исследования является анализ магнитоакустических (МА) волн, которые можно использовать для диагностики параметров исследуемой плазмы. На данный момент существует много наблюдений затухающих медленных МА волн. Обычно затухание МА волн связывали с механизмом теплопроводности. Однако исследования показали, что неадиабатические процессы, такие как нагрев и охлаждение, могут существенно влиять на затухание волн. Радиационное охлаждение зависит от плотности и температуры, в то время как нагрев солнечной короны до сих пор является предметом дискуссий. Часто нагрев моделируется как функция плазменных параметров. Зависимость мощности нагрева и охлаждения от термодинамических параметров плазмы может приводить к нарушениям баланса между этими процессами. В результате возникает тепловой дисбаланс, определяющий доминирование нагрева или охлаждения.

В последнее время исследование воздействия теплового дисбаланса в солнечной атмосфере привлекает значительное внимание в научном сообществе, наиболее свежий обзор этих исследований можно найти в работах [Kolotkov et al., 2021; Zavershinskii et al., 2019; Kolotkov et al., 2019]. В работах показано, что тепловой дисбаланс может существенно влиять на дисперсионные свойства медленных волн в солнечной короне, что приводит к зависимости фазовой скорости и скорости усиления/затухания от периода волны, и может вызвать усиление или затухание. Было также обнаружено, что процессы нагрева/охлаждения оказывают влияние на сдвиг по фазе между возмущениями различных параметров плазмы, таких как плотность, температура и другие [Prasad et al., 2021; Molevich et al., 2022]. В зависимости от механизма нагрева/охлаждения эффективность обратной связи между плазмой и собственными модами может значительно различаться, что приводит к разнообразию эволюционных сценариев для определенных начальных возмущений (подробнее см. [Zavershinskii et al., 2019]).

Во многих предыдущих исследованиях [Zavershinskii et al., 2019; Kolotkov et al., 2019] магнитогидродинамических (МГД) волн анализ совместного влияния теплопроводности, нагрева и охлаждения проводился с использованием приближения тонкой потоковой трубки, которая ограничена пределом длинных волн [Zhugzhda, 1996]. Эти исследования в основном проводились без учета внешней среды и, следовательно, без описания быстрых волн, которые чувствительны к ее параметрам. Без ограничений на длину волны в геометрии магнитного слоя свойства МГД волн были проанализированы в [Van der Linden, 1991]. Однако авторы сосредоточились на неустойчивости энтропийной/тепловой моды.

В данном исследовании будет проведено изучение свойств МА волн в магнитоструктурированной термически активной плазме без ограничений на

толщину волновода и величину магнитного поля. При этом учитываются как теплопроводность, так и дополнительные эффекты, такие как дисбаланс нагрева и охлаждения, в двумерной декартовой геометрии.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МГД ВОЛН

Для наших исследований мы используем систему уравнений магнитогидродинамики (МГД). При этом уравнение переноса тепла взято в форме, которое учитывает влияние процессов нагрева, радиационного охлаждения и теплопроводности:

$$\frac{\rho^\gamma}{\gamma-1}\frac{D}{Dt}\left(\frac{P}{\rho^\gamma}\right) = -\rho Q(\rho,T,|B|), \frac{\rho^\gamma}{\gamma-1}\frac{D}{Dt}\left(\frac{P}{\rho^\gamma}\right) = = \nabla\cdot(\varkappa\nabla T) - \rho Q(\rho,T) \quad (1)$$

Здесь ρ, T и P соответственно представляют плотность, температуру и давление в плазме. Кроме того, $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v\cdot\nabla$ обозначает конвективную производную. Теплопроводность выражается в виде тензора, как $\varkappa = \varkappa_\parallel e_B e_B + \varkappa_\perp(I - e_B e_B)$, $\varkappa = \varkappa_\parallel e_B e_B + \varkappa_\perp(I - e_B e_B)$, где I обозначает единичный тензор, $e_B = B\ /\ B$— единичный вектор вдоль магнитного поля. Величины $\varkappa_\parallel$ и $\varkappa_\perp$ указывают на коэффициенты теплопроводности, параллельные и перпендикулярные силовым линиям магнитного поля, соответственно. В уравнении (1) введена функция тепловых потерь$Q(\rho,T,|B|) = L(\rho,T) - H(\rho,T,|B|)$ $Q(\rho,T) = L(\rho,T) - H(\rho,T)$, представляющая собой разницу между функциями охлаждения $L(\rho,T)$ и нагрева$H(\rho,T,|B|)$ $H(\rho,T)$. Стационарное состояние среды подразумевает, что неадиабатические процессы уравновешивают друг друга $L(\rho_0,T_0) = H(\rho_0,T_0)$.

Одна из основных геометрических моделей, которая используется для анализа волн в магнитоструктурированной плазме - магнитный слой. В слоях сложность в виде введения функций Бесселя или Ханкеля отсутствует, в отличии от модели потоковой трубки, поэтому такая геометрия часто используется для аналитического и прямого численного моделирования. В настоящих исследованиях рассматривается геометрия магнитного слоя с толщиной $2x_0$ с магнитным полем, направленным вдоль оси z, в декартовых координатах (см. рис. 1 в [Agapova, 2022]).

Дисперсионное соотношение для магнитоакустических волн

Для анализа свойств магнитоакустических волн (МА) был использован стандартный метод теории возмущений. Приближенное решение системы уравнений искалось как сумма равновесного значения и малого возмущения параметра среды. Для описания дисперсии волн в линеаризованную систему уравнений были подставлены решения в виде суммы плоских монохроматических волн $\propto e^{i(\omega t + k_z z)}$. В результате чего, после ряда математических преобразований, были получены дисперсионное соотношения для осесимметричных и изгибных магнитоакустических волн:

$$\left(c_{A_i}^2 k_z^2 - \omega^2\right)k_{x_e} = -\left(\frac{\rho_{0_e}}{\rho_{0_i}}\right)\left(c_{A_e}^2 k_z^2 - \omega^2\right)k_{x_i}\left(\frac{coth\left(k_{x_i}x_0\right)}{tanh\left(k_{x_i}x_0\right)}\right), \quad (2)$$

где

$$k_{x_{i,e}}^2 = \frac{\left(A_Q^2 m_Q^2 + i\omega\tau_V A^2 m^2\right) + \varkappa_\parallel \frac{k_z^2 m_I^2 A_I^2}{Q_{0T}\rho_0}}{\left(A_Q^2 + i\omega\tau_V A^2\right) + \varkappa_\parallel \frac{k_z^2 A_I^2}{Q_{0T}\rho_0}};$$

$$A_I^2 = (c_A^2 + c_I^2)(k_z^2 c_{TI}^2 - \omega^2),\ m_I^2 = \frac{(k_z^2 c_A^2 - \omega^2)(k_z^2 c_I^2 - \omega^2)}{(c_A^2 + c_I^2)(k_z^2 c_{TI}^2 - \omega^2)};$$

$$A_Q^2 = \left(c_A^2 + c_{SQ}^2\right)\left(k_z^2 c_{TQ}^2 - \omega^2\right),\ m_Q^2 = \frac{(k_z^2 c_A^2 - \omega^2)(k_z^2 c_{SQ}^2 - \omega^2)}{\left(c_A^2 + c_{SQ}^2\right)\left(k_z^2 c_{TQ}^2 - \omega^2\right)};$$

$$A^2 = (c_A^2 + c_S^2)(k_z^2 c_T^2 - \omega^2),\ m^2 = \frac{(k_z^2 c_A^2 - \omega^2)(k_z^2 c_S^2 - \omega^2)}{(c_A^2 + c_S^2)(k_z^2 c_T^2 - \omega^2)}.$$

В дисперсионном соотношении используются характерные скорости для МА волн: скорость звука – $c_s = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}}$, альфвеновская скорость, которая выражается формулой $c_A = \sqrt{\frac{B_0^2}{4\pi\rho_0}}$, и модифицированная скорость звука $c_{SQ} = \sqrt{\frac{\left(Q_{0T} - \frac{\rho_0}{T_0}Q_{0\rho}\right)k_B T_0}{Q_{0T}}m}$, которая является низкочастотным предельным значением для термически активной однородной плазмы. Низкочастотный предел фазовой скорости медленных МА волн выражается трубочной скоростью $c_T = \sqrt{\frac{c_A^2 c_S^2}{(c_A^2 + c_S^2)}}$ в случае без учета теплового дисбаланса в слое конечного поперечного размера x_0 и модифицированной трубочной скоростью $c_{TQ} = \sqrt{\frac{c_A^2 c_{SQ}^2}{\left(c_A^2 + c_{SQ}^2\right)}}$ с учетом роли теплового дисбаланса. Наличие теплопроводности в исследуемой задачи, определяет высокочастотный предел медленных МА волн, который выражается изотермической скоростью звука $c_I = \sqrt{\frac{P_0}{\rho_0}}$. В коротковолновом пределе также появляется изотермическая трубочная скорость $c_{TI} = \sqrt{\frac{c_A^2 c_I^2}{(c_A^2 + c_I^2)}}$. Индексы "$i$","$e$" обозначают параметры внутри и снаружи слоя соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе было получено дисперсионные соотношения для магнитоакустических волн при учете неадиабатических процессов, таких как нагрев, охлаждение и теплопроводность. Учет теплопроводности для описания волн в термически активном магнитном слое существенно влияет на фазовую скорость медленных волн в высокочастотном пределе. Следовательно, пренебрежение

тепловым дисбалансом или теплопроводностью может привести к существенным расхождениям между сейсмологическими и спектрометрическими оценками параметров плазмы. Однако, эти расхождения могут служить ценным источником информации для дальнейшего анализа и уточнения параметров плазмы.

Работа частично поддержана в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FSSS-2023-0009, FFMR-2024-0017).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Kolotkov D.Y., Zavershinskii D.I., Nakariakov V.M. The solar corona as an active medium for magnetoacoustic waves // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2021. V. 63, N 12. P. 124008.

Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov et al. Formation of quasi-periodic slow magnetoacoustic wave trains by the heating/cooling misbalance // Physics of Plasmas. 2019. V. 26, N 8. P. 082113.

Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Zavershinskii D.I. Damping of slow magnetoacoustic oscillations by the misbalance between heating and cooling processes in the solar corona // Astronomy & Astrophysics. 2019. V. 628. P. A133.

Prasad A., Srivastava A.K., Wang T. J. Role of Compressive Viscosity and Thermal Conductivity on the Damping of Slow Waves in Coronal Loops with and Without Heating–Cooling Imbalance // Solar Physics. 2021. V. 296. P. 1–34.

Molevich N.E., Riashchikov D.S., Zavershinskii D.I. et al. Phase Shift between Temperature, Pressure, and Density Perturbations in a Heat-Releasing Medium // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2022. V. 49, N 9. P. 282–287.

Zhugzhda Y.D. Force-free thin flux tubes: Basic equations and stability // Physics of Plasmas. 1996. V. 3, N 1. P. 10–21.

Van der Linden R.A.M., Goossens M. Thermal instability in slab geometry in the presence of anisotropical thermal conduction // Solar Physics. 1991. V. 131. P.79–105.

Agapova D.V., Belov, S.A., Molevich, N.E. et al. Dynamics of fast and slow magnetoacoustic waves in plasma slabs with thermal misbalance // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2022. V. 514, N 4. P. 5941–5951.