

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ СЛАБОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ИНДУЦИРОВАННОГО НА ГРАНИЦЕ ГОРЯЧЕЙ КОРОНАЛЬНОЙ ПЕТЛИ В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Д.И. Завершинский<sup>1,2</sup>, А.С. Фролова<sup>1</sup>, Д.В. Агапова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия, zavershinskiy.di@ssau.ru

<sup>2</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

## STUDYING EVOLUTION OF A WEAK PERTURBATION INDUCED AT THE BOUNDARY OF A HOT CORONAL LOOP IN A STRONG MAGNETIC FIELD

D.I. Zavershinskii<sup>1,2</sup>, A.S. Frolova<sup>1</sup>, D.V. Agapova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Samara, Russia, zavershinskiy.di@ssau.ru

<sup>2</sup>Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

**Аннотация.** В ходе проведенных исследований было получено решение граничной задачи для линейного дифференциального уравнения, описывающее динамику возмущения скорости в медленных магнитоакустических (МА) и энтропийных волнах в корональных петлях в рамках приближения бесконечно сильного поля с учетом диссипации и дисперсии за счет теплопроводности. Показано, что эволюция возмущения сжатия в условиях солнечной короны может в значительной мере определяться не только вкладом медленных МА волн, но и энтропийных волн.

**Ключевые слова:** МГД-волны, солнечная корона, корональная петля.

**Abstract.** In the course of our study, we obtained a solution to the boundary value problem for a linear evolutionary equation describing the dynamics of the velocity perturbation in slow MA and entropy waves in coronal loops in the framework of the infinitely strong magnetic field approximation, taking into account dissipation and dispersion due to thermal conduction. It is shown that the evolution of the compression perturbation in the solar corona can be largely determined not only by the contribution of slow MA waves but also of entropy waves.

**Keywords:** MHD waves, solar corona, coronal loop.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее распространённых типов магнитных структур в солнечной короне являются корональные петли. Фактически, данные структуры являются хорошим волноводом естественного происхождения для различных магнитогазодинамических (МГД) волн. Достаточно часто в таких структурах детектируются быстро затухающие возмущения сжатия [de Moortel, 2009], видимые как возмущение интенсивности, перемещающиеся вдоль петли. В некоторых случаях подобные возмущения можно проассоциировать с медленным магнитоакустическими (МА) волнами и использовать для задач МГД-сейсмологии [Taroyan, Erdélyi, 2009].

Для практических задач МГД-сейсмологии могут применяться различные математические модели, в зависимости от параметров, изучаемой плазмы и требуемой точности. Одним из наиболее распространённых подходов является приближение тонких потоковых трубок [Zhugzhda, 1996; Zhugzhda, Goossens 2001]. Важным преимуществом данного приближения, является тот факт, что оно позволяет в простой форме описывать влияние геометрической дисперсии. Тем не менее, в случае сильных магнитных полей, влияние геометрической дисперсии становится пренебрежимо мало по сравнению с эффектами дисперсии, связанными с теплопроводностью и неадиабатическими процессами нагрева, и для описания свойств медленных МА волн, оказывается достаточно использовать уравнения Навье-Стокса [Wang et al., 2018, Zavershinskii et al., 2019].

Когда исследуемые возмущения являются слабыми, по отношению к стационарным значениям

параметров плазмы, то решение исходной системы обычно не требуется. В этом случае для описания динамики возмущения достаточным является анализ посредством линейного эволюционного уравнения, которое может быть получено в первом приближении теории возмущений. Для задач МГД-сейсмологии достаточно часто используется не само эволюционное уравнение, а соответствующее ему дисперсионное уравнение. (см., например, [Wang et al., 2015]). Кроме того, наблюдаемые возмущения интенсивности, во многих работах, ассоциируют с динамикой только медленной МА волны, и применяют частное решение дисперсионного уравнения только для данной моды, для диагностики параметров плазмы, таких, например, как температура, коэффициент теплопроводности и т.д. Однако, возмущение, которое индуцируется в среде в строгом смысле является суперпозицией двух медленных магнитоакустических волн, и одной энтропийной волны, которые одновременно с медленными волнами возбуждаются в системе. В связи с этим прямая связь между наблюдаемым возмущением и медленной волной, бегущей на фоне стационарного профиля, не всегда в полной мере обоснована. Для корректного описания, в общем случае, требуется точное решение эволюционного уравнения, способное описать совместный вклад собственных мод в наблюдаемое возмущение.

Ранее, нами были получены решения задачи об эволюции начального возмущения в случае определяющего вклада теплового дисбаланса [Zavershinskii et al., 2021] и в случае определяющего вклада от процесса теплопроводности [Zavershinskii et al., 2023].

Однако, интерес представляет также и задача об индицировании возмущения на границе. Так, например, магнитоакустические моды могут быть индуцированы фотосферными р-модами, распространяющимися вверх в корону [Jess et al., 2011, Krishna Prasad et al., 2015]. Кроме того, возмущение сжатия может быть индуцировано как следствие впрыскивания горячей плазмы в основании петли [Selwa et al., 2015] или могут быть вызваны и вспышечными событиями [Taroyan et al., 2005]. В ходе проведенных исследований авторами было получено решение граничной задачи для эволюционного уравнения (1), описывающего динамику возмущения продольной компоненты скорости в случае определяющего вклада от процесса теплопроводности, которое в безразмерных переменных может быть записано как:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^3} - \gamma \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t} \partial \tilde{z}^2} &= \frac{1}{\tilde{\tau}_{cond}} \left( \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^2 \partial \tilde{z}^2} - \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{z}^4} \right), \\ \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^3} - \gamma \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t} \partial \tilde{z}^2} &= \tilde{d} \left( \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^2 \partial \tilde{z}^2} - \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{z}^4} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \tilde{u} &= \frac{v_z}{c_{si}}, \tilde{z} = \frac{z}{l}, \tilde{t} = \frac{t}{t_l}, t_l = \frac{l}{c_{si}}, c_{si} = \sqrt{\frac{k_B T_0}{m}}, \tilde{\tau}_{cond} = \\ &= \frac{\tau_{cond}}{t_l}, \tau_{cond} = \frac{l^2 C_V \rho_0}{\kappa}, \gamma = \frac{C_P}{C_V}, \tilde{u} = \frac{v_z}{c_{si}}, \tilde{z} = \frac{z}{l}, \tilde{t} = \\ &= \frac{t}{t_l}, t_l = \frac{l}{c_{si}}, c_{si} = \sqrt{\frac{k_B T_0}{m}}, \tilde{\tau}_{cond} = \frac{\tau_{cond}}{t_l}, \tau_{cond} = \\ &= \frac{l^2 C_V \rho_0}{\kappa}, \gamma = \frac{C_P}{C_V}, \\ \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^3} - \gamma \frac{\partial^3 \tilde{u}}{\partial \tilde{t} \partial \tilde{z}^2} &= \tilde{d} \left( \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{t}^2 \partial \tilde{z}^2} - \frac{\partial^4 \tilde{u}}{\partial \tilde{z}^4} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

где  $C_V, C_P$  — удельная теплоемкость при постоянном объеме и давлении,  $\rho_0, T_0$  — плотность и температура плазмы,  $l$  — длина корональной петли,  $\kappa$  — коэффициент теплопроводности плазмы,  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $m$  — средняя масса одной частицы. Далее будем полагать все величины безразмерными и опустим знак волны над переменными.

Для демонстрации важности рассмотрения полного решения для описания динамики волн, покажем результаты расчёта (см. рис. 1) на основе полученного решения уравнения (1) при значении параметра  $\tilde{\tau}_{cond} = 20$ , что соответствует плотным горячим петлям (см. таблицу 1 в [9]) и полагая, что на границе возбуждается вторая гармоника  $u(t, 0) = A_0 \sin(2\pi t)$ .

Легко заметить, что при существенном влиянии теплопроводности, что зачастую имеет место в солнечной короне, полное решение может являться результатом сопоставимого вклада от магнитоакустических и энтропийных волн. Динамика существенно

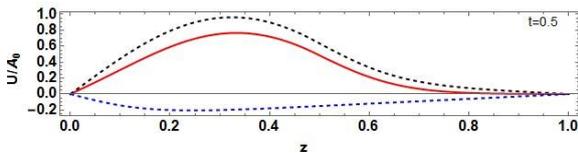


Рис. 1. Пример расчета динамики возмущения, заданного на границе. Красная сплошная линия соответствует полному решению, черная штриховая линия — двум медленным волнам, синяя штриховая линия — энтропийной моде

зависит, от соотношения характерного периода возбуждаемой волны и характерного масштаба, связанного с теплопроводностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе получено решение граничной задачи для линейного дифференциального уравнения, описывающее динамику возмущения скорости в медленных МА и энтропийных волнах в корональных петлях в рамках приближения бесконечно сильного поля с учетом диссипации и дисперсии за счет теплопроводности. Показано, что эволюция возмущения сжатия в условиях солнечной короны может в значительной мере определяться не только вкладом медленных МА волн, но и энтропийных волн.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-10008 (<https://rscf.ru/project/23-22-10008/>) и Правительства Самарской области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- de Moortel I. Longitudinal Waves in Coronal Loops // Space Science Reviews. 2009. V. 149. N 1–4. P. 65–81.
- Jess D.B., De Moortel I., Mathioudakis M., Christian D.J., Reardon K.P., Keenan F.P. The Source of 3 Minute Magnetoacoustic Oscillations in Coronal Fans // Astrophysical Journal, 2012. V. 757. N 2. P. 160.
- Krishna Prasad S., Jess D.B., Khomenko E. On the Source of Propagating Slow Magnetoacoustic Waves in Sunspots // Astrophysical Journal Letters. 2015. V. 812. N 1. P. L15.
- Selwa M., Murawski K., Solanki S.K. Excitation and damping of slow magnetosonic standing waves in a solar coronal loop // Astron. Astrophys. 2005. V. 436. P. 701.
- Taroyan Y., Erdélyi R. Heating Diagnostics with MHD Waves // Space Science Reviews. 2009. V. 149. N 1–4. P. 229–254.
- Taroyan Y., Erdélyi R. i, Doyle J.G., Bradshaw S.J. Footpoint excitation of standing acoustic waves in coronal loops // Astronomy and Astrophysics. 2005. V. 438. N 2. P. 713–720.
- Wang T., Ofman L., Sun X., Provornikova E., Davila J.M., Evidence of thermal conduction suppression in a solar flaring loop by coronal seismology of slow-mode waves // Astrophysical Journal Letters. 2015. V. 811. N 1. P. L13.
- Wang T., Ofman L., Sun X., Solanki S.K., Davila J.M. Effect of Transport Coefficients on Excitation of Flare-induced Standing Slow-mode Waves in Coronal Loops // Astrophysical Journal. 2018. V. 860. N 2. P. 107.
- Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Molevich N.E., Ryashchikov D.S. Formation of quasi-periodic slow magnetoacoustic wave trains by the heating/cooling misbalance // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. N 8. P. 82113.
- Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Riashchikov D.S., Molevich N.E. Mixed Properties of Slow Magnetoacoustic and Entropy Waves in a Plasma with Heating/Cooling Misbalance // Sol. Phys. 2021. V. 296. N 6. P. 96.
- Zavershinskii D.I., Molevich N.E., Riashchikov V., Belov S.A. Exact solution to the problem of slow oscillations in coronal loops and its diagnostic applications // Front. Astron. Sp. Sci. 2023. V. 10. P. 1167781.
- Zhugzhda Y.D. Force-free thin flux tubes: Basic equations and stability // Physics of plasmas. 1996. N 1 (3). P. 10–21.
- Zhugzhda Y.D. Goossens M. Hidden problems of thin-flux-tube approximation // Astronomy & Astrophysics. 2001. N 1. (377). P. 330–342.