

Современная наука и инновации.
2023. № 4 (44). С. 180-185.
Modern Science and Innovations.
2023; 4(44):180-185.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ /
TECHNICAL SCIENCE

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И УПРАВЛЕНИЕ / INFORMATICS, COMPUTER
ENGINEERING AND MANAGEMENT

Научная статья / Original article

УДК 533.6.011.72

<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.21>

Сергей Бадмаевич Дертеев
[Sergey B. Derteev]¹,

Галина Алексеевна Манкаева
[Galina A. Mankaeva]^{2*},

Наталья Александровна Куркудинова
[Natalia A. Kurkudinova]³,

Александр Вячеславович Нагадинов
[Alexander V. Nagadinov]⁴,

Бадма Борисович Михальев
[Badma B. Mikhalyaev]⁵

**Моделирование затухания нелинейных
стоячих волн в высокотемпературной
плазме**

**The modeling of a damping of the nonlinear
standing waves in a high-temperature plasma**

^{1, 2, 3, 4, 5}Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, г. Элиста, Россия /
Kalmyk State University named after B. B. Gorodovikov, Elista, Russia

*Автор, ответственный за переписку: Галина Алексеевна Манкаева, mankaeva.galina@yandex.ru
Corresponding author: Galina A. Mankaeva, mankaeva.galina@yandex.ru

Аннотация. В нелинейном гидродинамическом приближении исследованы продольные колебания в горячих послевспышечных корональных петлях. Для объяснения его быстрого затухания используется механизм теплопроводности, важный при высоких температурах. В случае большой амплитуды численное моделирование показывает, что нелинейность препятствует затуханию.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, физика плазмы, теплопроводность, гидродинамика, астрофизика

Для цитирования: Дертеев С. Б., Манкаева Г. А., Куркудинова Н. А., Нагадинов А. В., Михальев Б. Б. Моделирование затухания нелинейных стоячих волн в высокотемпературной плазме // Современная наука и инновации. 2023. № 4 (44). С. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.21>

Финансирование: исследование выполнено по госзаданию Минобрнауки РФ (№ 075-03-2023-121/3 «Разработка новых наблюдательных и теоретических подходов в прогнозе космической погоды по данным наземных наблюдений»).

Abstract. Longitudinal oscillations in hot post-flare coronal loops are studied in the nonlinear hydrodynamic approximation. To explain its rapid damping, the mechanism of thermal conductivity, important at high temperatures, is used. In the case of large amplitude, numerical simulations show that nonlinearity inhibits damping.

Keywords: computer modeling, plasma physics, thermal conductivity, hydrodynamic, astrophysics

For citation: Derteev SB, Mankaeva GA, Kurkudinova NA, Nagadinov AV, Mikhalyaev BB. The modeling of a damping of the nonlinear standing waves in a high-temperature plasma. Modern Science and Innovations. 2023;4(44):167-174. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.4.21>

Funding: the study was carried out according to the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (No. 075-03-2023-121/3 "Development of new observational and theoretical approaches in space weather forecasting based on ground-based observations").

Введение. Поперечные и продольные волны в корональных петлях наблюдаются повсеместно в различных диапазонах электромагнитного излучения [1]. Продольные волны

наблюдаются как движущиеся неоднородности и интерпретируются как области сжатия плазмы. При их теоретическом исследовании используется представление медленных магнитозвуковых или акустических волн. Волны сжатия имеются в различных корональных структурах, корональных дырах и петлях, в настоящей работе берутся послевспышечные горячие корональные петли [2-3], где используется аппарат стоячих продольных волн [2, 4]. Наблюдения горячих петель дают довольно большой перечень событий с указанием многих физических параметров петель и их колебаний, например, Wang et al. 2007 [3]. Полученные данные позволяют оценивать параметры горячей корональной плазмы, а также изучать роль физических эффектов в наблюдаемых явлениях.

Нами составлена сводная таблица параметров нескольких событий из этой работы, приводимая ниже. События сильно разнятся по величине скорости плазмы. Например, в петле 5 она составляет 2.4% значения звуковой скорости, а в петле 7 – уже 17%. Понятно, что во втором случае скорость плазмы нельзя считать малой, и при описании колебаний необходим нелинейный подход. Общим свойством всех событий является быстрое затухание колебаний. Ранее при оценке параметров колебаний в работе [5] мы использовали линейное приближение, основной задачей настоящей работы является изучение стоячих продольных волн в горячих корональных петлях с помощью нелинейного подхода. Имеет смысл проверить результаты нелинейного подхода на примерах малой и большой амплитуды, чтобы оценить ошибку расчетов линейного приближения.

Таблица 1 – Параметры волн сжатия в горячих корональных петлях
Table 1 – Parameters of compression waves in hot coronal loops

Номер петли	Длина петли (тыс. км)	Темпера- тура (МК)	Электронная плотность (10^9 см^{-3})	Скорость плазмы (км с $^{-1}$)	Период (мин)	Время затухания (мин)
1	134	6.6±0.1	5.2±0.1	21	12.9±0.2	18.1±3.1
2	275	6.5±0.3	4.3±0.5	36	18.3±0.7	19.9±4.2
3	92	7.0±0.3	14.1±0.8	14	8.1±0.1	19.8±5.0
4	74	6.4±0.9	10.4±2.0	17	8.5±0.2	7.4±1.7
5	98	6.3±0.9	11.1±2.3	8	9.3±0.3	19.1±9.2
6	82	6.3±0.5	7.8±0.9	30	8.1±0.3	7.2±1.8
7	135	5.9±0.3	5.6±0.5	61	13.3±0.7	8.1±2.3

Источник: по данным работы Wang et al. 2007 [3]

Source: based on data Wang et al. 2007 [3]

Материалы и методы исследований. Для описания волн используются уравнения одномерной газодинамики с учетом эффекта теплопроводности, играющего важную роль в поведении волн при высоких температурах:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v_x}{\partial x} &= 0, \\
 \frac{\partial p}{\partial t} + v_x \frac{\partial p}{\partial x} + \gamma p \frac{\partial v_x}{\partial x} &= (\gamma - 1) \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \\
 p &= \rho \frac{RT}{M},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $\gamma = 5/3$ – показатель адиабаты, $M = 0.62 \text{ г моль}^{-1}$ – молярная масса. Для коэффициента теплопроводности берется классическое спитцеровское выражение

$$\kappa(T) = 2.28 \times 10^{-6} T^{5/2} \text{ эрг см}^{-1} \text{ с}^{-1} \text{ К}^{-1}.
 \tag{2}$$

Аналогично работам [2, 4] численно решается задача о продольных колебаниях корональной петли на фундаментальной моде, $0 < x < L$, L есть длина петли. Используются следующие начальные

$$\rho(x, 0) = \rho_0 (1 - \varepsilon \sin(\pi$$

$$p(x, 0) = p_0(1 - \varepsilon \gamma \sin(\pi x/L)),$$

$$v_x(x, 0) = -\varepsilon C_s \sin(\pi x/L)$$

и граничные условия

$$\begin{aligned} \rho(0, t) &= \rho(L, t) = \rho_0, \\ p(0, t) &= p(L, t) = p_0, \\ v_x(0, t) &= v_x(L, t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Величины ρ_0 и p_0 есть равновесные значения плотности и давления. $C_s = \sqrt{\gamma RT_0/M}$ – звуковая скорость. Безразмерный параметр ε определяет отношение амплитуды скорости плазмы к звуковой скорости. Уравнения решаются при помощи программного пакета PLUTO. Напомним, что для построения линейного случая рассматриваются малые возмущения [6].

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты расчетов представлены графиками колебаний для каждого исследуемого события. Нелинейные колебания представлены на рисунках красными линиями, для сравнения черными линиями показаны линейные колебания. Амплитуда нелинейных колебаний со временем падает медленнее, чем в случае линейных колебаний, то есть нелинейные колебания затухают медленнее. При этом форма сигнала отличается от гармонического, то есть происходит усложнение спектра колебаний.

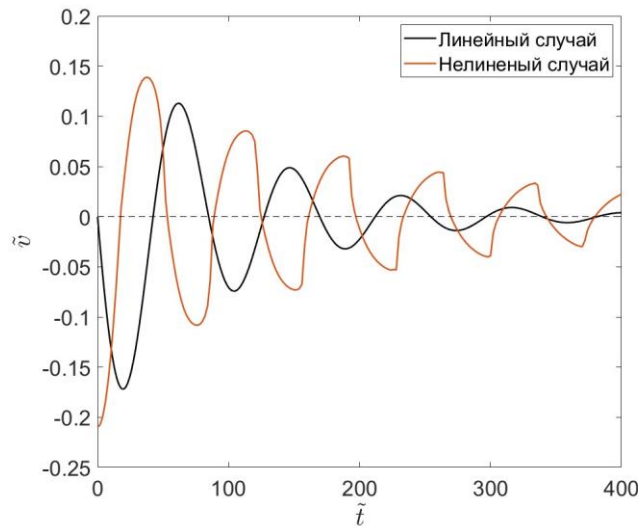


Рисунок 1 – Колебание петли № 1/
Figure 1 – Oscillation of loop No. 1

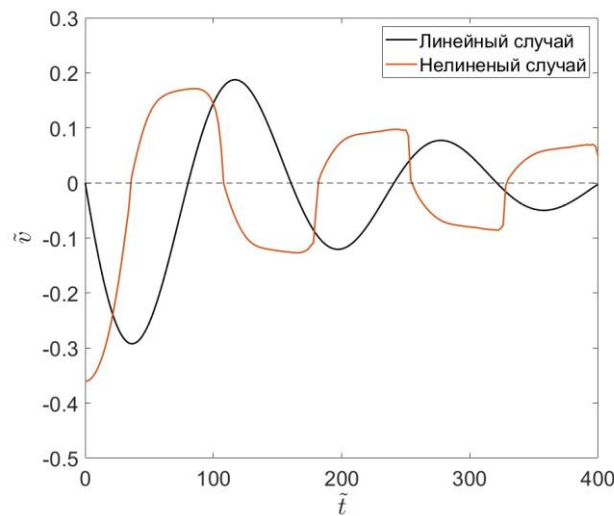


Рисунок 2 – Колебание петли № 2
Figure 2 – Oscillation of loop No. 2

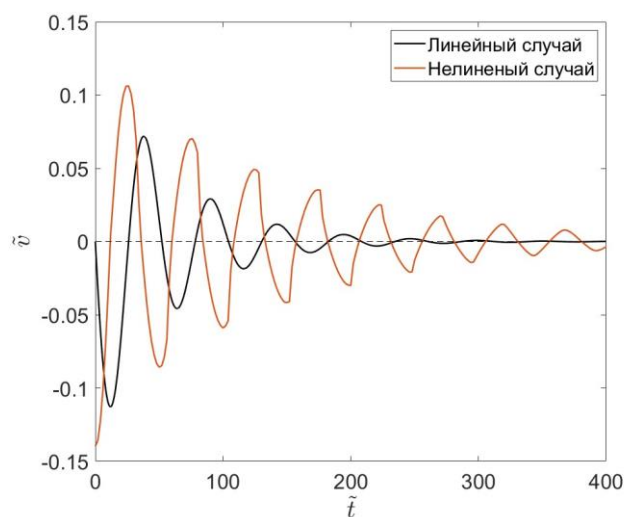


Рисунок 3 – Колебание петли № 3
Figure 3 – Oscillation of loop No. 3

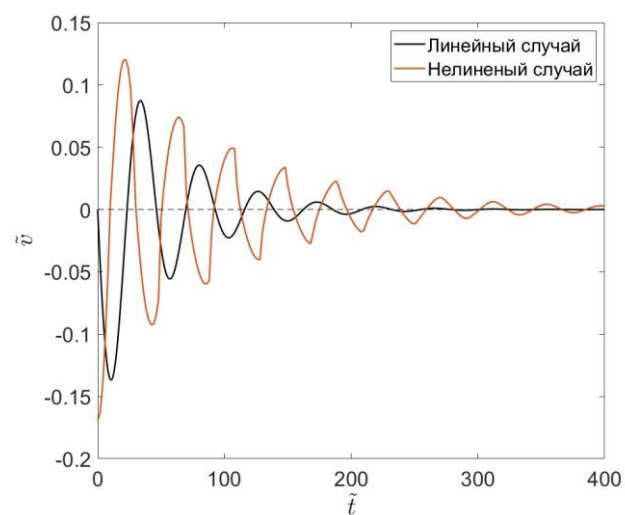


Рисунок 4 – Колебание петли № 4.
Figure 4 – Oscillation of loop No. 4.

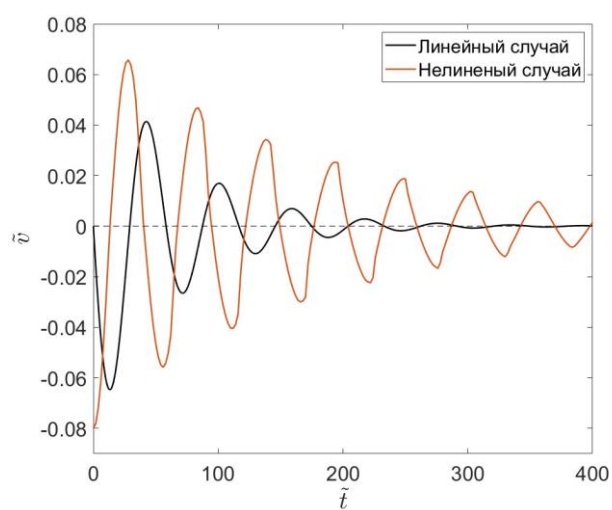


Рисунок 5 – Колебание петли № 5.
Figure 5 – Oscillation of loop No. 5.

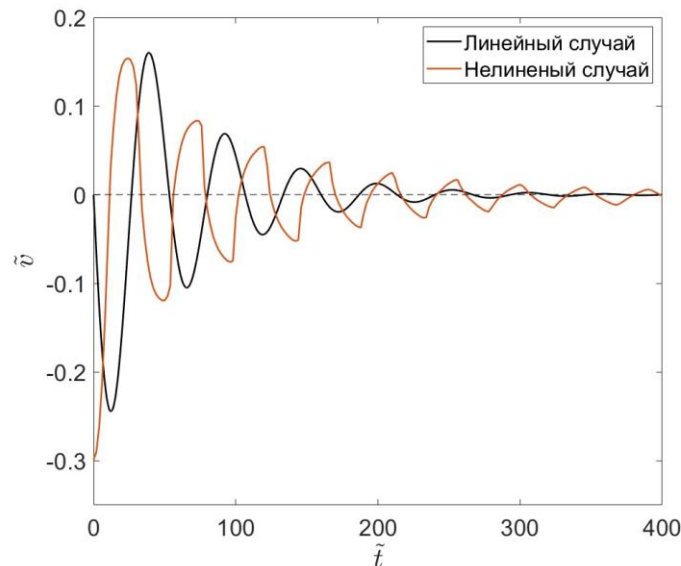


Рисунок 6 – Колебание петли № 6.
Figure 6 – Oscillation of loop No. 6.

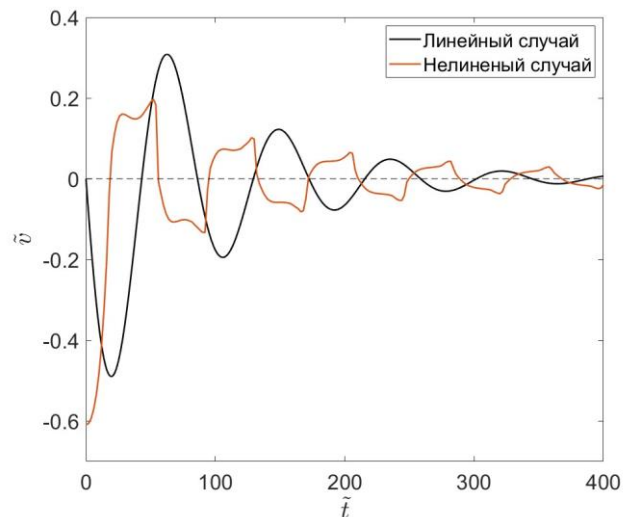


Рисунок 7 – Колебание петли № 7.
Figure 7 – Oscillation of loop No. 7.

Заключение. Проведенное исследование показывает, что по всех рассматриваемых событиях сказывается нелинейный характер наблюдаемых колебаний, поэтому для анализа каждого события и оценки параметров корональной плазмы требуются более сложные инструменты, нежели линейное дисперсионное соотношение. В частности, требуется проведение Фурье- и вейвлет-анализа для полного описания спектра колебаний, более точного определения периода и времени затухания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nakariakov V.M., Kolotkov D.Y. Magnetohydrodynamic Waves in the Solar Corona // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2020. Vol. 58. P. 441.
2. Ofman L., Wang T. Hot Coronal Loop Oscillations Observed by SUMER: Slow Magnetosonic Wave Damping by Thermal Conduction // Astrophysical Journal. 2002. Vol. 580. P. L85.
3. Wang T., Innes D.E., Qiu J. Determination of the Coronal Magnetic Field from Hot-Loop Oscillations Observed by SUMER and SXT // Astrophysical Journal. 2007. Vol. 656. P. 598.
4. De Moortel I., Hood A.W. The damping of slow MHD waves in solar coronal magnetic fields // Astronomy and Astrophysics. 2003. Vol. 408. P. 755.
5. Mikhalyaev B., Derteev S., Shvidov N., Sapraliev M., Bembitov Dz. Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma II. Damping and Instability // Solar Physics. 2023. Vol. 298. P. 102.

6. Дертеев С. Б., Манкаева Г. А., Сапралиев М. Е., Балтыков А. К., Бембитов Д. Б. Моделирование затухания медленных магнитозвуковых волн в высокотемпературной плазме // Современная наука и инновации. 2022. № 4. С. 116-121.

REFERENCES

1. Nakariakov VM, Kolotkov DY. Magnetohydrodynamic Waves in the Solar Corona. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. 2020;58:441.
2. Ofman L, Wang T. Hot Coronal Loop Oscillations Observed by SUMER: Slow Magnetosonic Wave Damping by Thermal Conduction. Astrophysical Journal. 2002;580:L85.
3. Wang T., Innes D.E., Qiu J. Determination of the Coronal Magnetic Field from Hot-Loop Oscillations Observed by SUMER and SXT. Astrophysical Journal. 2007;656:598.
4. De Moortel I, Hood AW. The damping of slow MHD waves in solar coronal magnetic fields. Astronomy and Astrophysics. 2003;408:755.
5. Mikhalyaev B, Derteev S, Shvidov N, Sapraliev M, Bembitov Dz. Acoustic Waves in a High-Temperature Plasma II. Damping and Instability. Solar Physics. 2023;298:102.
6. Derteev SB, Mankaeva GA, Sapraliev ME, Baltykov AK, Bembitov DB. Modelirovanie zatukhaniya medlennykh magnitozvukovykh voln v vysokotemperaturnoi plazme. Sovremennaya nauka i innovatsii. 2022;(4):116-121. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Бадмаевич Дертеев – научный сотрудник, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79613963655, derteevsergei@mail.ru

Галина Алексеевна Манкаева – научный сотрудник, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79061764200, mankaeva.galina@yandex.ru

Наталья Александровна Куркудинова – младший научный сотрудник, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79093987960, kurkudinovana@mail.ru

Александр Вячеславович Нагадинов – инженер-исследователь, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, +79615432512, nagadinovsasha@mail.ru

Бадма Борисович Михалеев – ведущий научный сотрудник, Калмыцкий государственный университет имени Б. Б. Городовикова, ул. Пушкина, 11, г. Элиста, Россия, bbmikh@mail.ru, +79897361327

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey B. Derteev – Researcher, B. B. Gorodovikov Kalmyk State University, 11, Pushkin Street, Elista, Russia, +79613963655, derteevsergei@mail.ru

Galina A. Mankaeva – Researcher, Kalmyk State University named after B. B. Gorodovikov, 11, Pushkin Street, Elista, Russia, +79061764200, mankaeva.galina@yandex.ru

Natalia A. Kurkudinova – Junior Researcher, B. B. Gorodovikov Kalmyk State University, 11, Pushkin Street, Elista, Russia, +79093987960, kurkudinovana@mail.ru

Alexander V. Nagadinov – Research Engineer, B. B. Gorodovikov Kalmyk State University, 11, Pushkin Street, Elista, Russia, +79615432512, nagadinovsasha@mail.ru

Badma B. Mikhalyaev – Leading Researcher, B. B. Gorodovikov Kalmyk State University, 11, Pushkin St., Elista, Russia, bbmikh@mail.ru

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию: 12.10.2023;
одобрена после рецензирования: 07.11.2023;
принята к публикации: 06.12.2023.*

*The article was submitted: 12.10.2023;
approved after reviewing: 07.11.2023;
accepted for publication: 06.12.2023.*