

## КОНСТРУИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ НАГРЕВА СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЧИСЛЕННОГО МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГРАВИТАЦИОННО-СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ

Д.С. Рящиков<sup>1,2</sup>, Е.В. Скопцова<sup>2</sup>, Д.И. Завершинский<sup>1,2</sup>, А.С. Букатина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Самара, Россия,  
ryashchikovd@gmail.com

<sup>2</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

## CONSTRUCTION OF THE SOLAR CORONAL HEATING FUNCTION FOR NUMERICAL MHD MODELING IN A GRAVITATIONALLY STRATIFIED ATMOSPHERE

D.S. Riashchikov<sup>1,2</sup>, E.V. Scopsova<sup>2</sup>, D.I. Zavershinski<sup>1,2</sup>, A.S. Bukatina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Samara, Russia,  
ryashchikovd@gmail.com

<sup>2</sup>Samara National Research University, Samara, Russia

**Аннотация.** В работе предложен алгоритм конструирования зависимости функции нагрева от температуры и плотности среды в гравитационно-стратифицированной солнечной атмосфере, обеспечивающей баланс между нагревом и радиационным охлаждением среды. Приведен пример применения алгоритма для заданного высотного профиля температуры в солнечной короне.

**Ключевые слова:** корональный нагрев, тепловой дисбаланс, солнечная атмосфера.

**Abstract.** The algorithm for constructing the dependence of the heating function on the temperature and density of the medium in a gravitationally stratified solar atmosphere that provides a balance between heating and radiative cooling of the medium is proposed. An example of application of the algorithm for a given altitudinal temperature profile is provided.

**Keywords:** coronal heating, thermal misbalance, solar atmosphere.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема нагрева солнечной короны уже на протяжении нескольких десятилетий остается одной из фундаментальных проблем солнечной физики. В литературе описаны два набора гипотез, объясняющие нагрев короны до наблюдаемых температур. Согласно одному из подходов пересоединение магнитных силовых линий приводит к образованию токовых слоев, в которых эффективно работает омический нагрев. Согласно другому подходу МГД волны переносят энергию из нижележащих слоев в корону, в которой диссипируют с выделением энергии.

Наличие различных гипотез коронального нагрева и отсутствие знаний о его локализации, зависимости от времени (постоянный или импульсный нагрев) и параметров плазмы (плотности, температуры, магнитного поля) усложняет аналитическое и численное моделирование магнитогидродинамических процессов в солнечной короне. Так, в некоторых работах либо полностью пренебрегается тепловыми эффектами (нагревом, радиационным охлаждением, теплопроводностью) при моделировании солнечной атмосферы [Kraśkiewicz et al., 2023], либо задаются только радиационные потери и теплопроводность [González-Avilés et al., 2021]. Нагревом, который обеспечивает баланс между притоком энергии и теплопотерями, пренебрегается. В других моделях учитывается либо импульсный нагрев [Falewicz et al., 2015], и тогда встает вопрос о локализации источников тепла, характера зависимости энерговыделения от времени и продолжительности импульса, либо задается нагрев, который обеспечивает постоянный баланс между притоком тепла и теплопотерями [Petralia et al., 2014].

Зачастую это однородный нагрев, который не зависит ни от времени, ни от параметров плазмы.

В то же время явление теплового дисбаланса между нагревом и радиационным охлаждением плазмы важно для описания некоторых физических процессов в солнечной короне. Например, тепловой дисбаланс может объяснить наблюдаемые скорости распространения и времена затухания медленных МГД волн в корональных петлях [Arregui et al., 2023; Zavershinski et al., 2023]. В этих и многих других работах предполагается, что нагрев является функцией температуры и плотности. Однако эти работы рассматривают лишь однородную среду и не учитывают изменение плотности и температуры с высотой. В то же время для моделирования солнечной атмосферы в целом или отдельных структур как, например, корональных петель, помимо теплового дисбаланса необходимо учесть ещё и гравитационную стратификацию среды. В пренебрежении влияния теплопроводности (что можно сделать при температурных профилях, близких к линейным) это означает, что на различных высотах в стационарном состоянии должен обеспечиваться баланс между нагревом и охлаждением, и таким образом, высотные профили температуры и плотности оказываются связанными с видом функциональной зависимости нагрева и охлаждения от температуры и плотности [Riashchikov et al., 2023].

В данной работе описывается подход к конструированию такой функциональной зависимости коронального нагрева от температуры и плотности плазмы, которая бы обеспечивала баланс между нагревом и охлаждением плазмы на разных высотах в гравитационно-стратифицированной атмосфере при заданной зависимости температуры от высоты.

## ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА КОНСТРУИРОВАНИЯ ФУНКЦИИ НАГРЕВА

В данной работе будем считать, что стационарное состояние среды должно удовлетворять следующей системе уравнений:

$$\frac{dP}{dz} + \rho g = 0, \quad (1)$$

$$W(\rho, T) = L(\rho, T) - Q(\rho, T) = 0. \quad (2)$$

Здесь  $L$ ,  $Q$  — мощность охлаждения и нагрева среды, соответственно;  $W$  — функция тепловых потерь. В системе (1) — (2) пренебрегается теплопроводностью и влиянием магнитного поля на стационарное состояние, что открывает простор для дальнейшего обобщения предлагаемого подхода.

Предположим, что функцию нагрева  $Q(\rho, T)$  в некотором диапазоне температур и плотностей по аналогии с [Kolotkov et al., 2020] можно аппроксимировать степенной зависимостью вида:

$$Q(\rho, T) = Q^* \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^a \left(\frac{T}{T_0}\right)^b. \quad (3)$$

В этом выражении  $\rho_0, T_0$  — некоторые постоянные, а параметры  $Q^*, a, b$  будем считать в общем случае переменными величинами, значения которых могут изменяться при различных значениях плотности и температуры, но которые явным образом не зависят от времени и координаты.

Задачей данной работы является конструирование функции нагрева (3) с кусочно-заданными значениями параметров  $Q^*, a, b$ , которая бы удовлетворяла решению системы (1)–(2). Конструирование такой функции удобно проводить после логарифмирования выражения (3). Пусть  $\tilde{Q} = \ln(Q/Q_0)$ ,  $\tilde{\rho} = \ln(\rho/\rho_0)$ ,  $\tilde{T} = \ln(T/T_0)$ , где  $Q_0$  — некоторая постоянная. Тогда  $\tilde{Q}(\tilde{\rho}, \tilde{T}) = a\tilde{\rho} + b\tilde{T} + c$ ,  $c = \ln(Q^*/Q_0)$ . (4)

Таким образом, задача подбора параметров  $Q^*, a, b$  в выражении (3) равносильна задаче подбора параметров  $a, b, c$  в выражении (4), однако последний вариант имеет преимущества при программной реализации алгоритма в виду линейности функции  $\tilde{Q}(\tilde{\rho}, \tilde{T})$  и упрощения работы со значениями плотности, которые имеют большой разброс в гравитационно стратифицированной атмосфере.

Также покажем, какие дополнительные условия на параметры  $a, b, c$  накладывает условие теплового баланса (2) на различных высотах. Предположим, что в некотором диапазоне температур и плотностей параметры  $a, b, c$  являются неизменными. Тогда справедливо:

$$\begin{cases} \tilde{Q}(\tilde{\rho}(z), \tilde{T}(z)) = \tilde{L} = a\tilde{\rho} + b\tilde{T} + c, \\ \tilde{Q}(\tilde{\rho}(z+dz), \tilde{T}(z+dz)) = \tilde{L} + d\tilde{L} = \\ a(\tilde{\rho} + d\tilde{\rho}) + b(\tilde{T} + d\tilde{T}) + c, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\tilde{L} = \ln(L/Q_0)$ .

Из системы (5) можно получить выражения для коэффициентов  $a, b$  как функции свободного параметра  $c$ :

$$\begin{aligned} a(z) &= \frac{\tilde{T}(z) \frac{d\tilde{L}}{dz} - \tilde{L}(z) \frac{d\tilde{T}}{dz} + c \frac{d\tilde{T}}{dz}}{\tilde{T}(z) \frac{d\tilde{\rho}}{dz} - \tilde{\rho}(z) \frac{d\tilde{T}}{dz}}, \\ b(z) &= \frac{\tilde{\rho}(z) \frac{d\tilde{L}}{dz} - \tilde{L}(z) \frac{d\tilde{\rho}}{dz} + c \frac{d\tilde{\rho}}{dz}}{\tilde{\rho}(z) \frac{d\tilde{T}}{dz} - \tilde{T}(z) \frac{d\tilde{\rho}}{dz}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Далее приведём предлагаемый алгоритм конструирования функции нагрева, используя в качестве примера высотный профиль температуры для спокойной атмосферы, приведенный на рис. 6 в [Pascoe et al., 2019], оставляя лишь диапазон температур, соответствующий корональным условиям.

1. Зададим константы для обезразмеривания  $Q_0 = 10^{10}$  эрг/(г · с),  $T_0 = 10^6$  К,  $\rho_0 = 10^{-15}$  г/см<sup>3</sup>.

2. Пользуясь заданной (например, в [Pascoe et al., 2019]) зависимостью  $\tilde{T}(z)$ , найдем с помощью (1) функцию  $\tilde{\rho}(z)$ . В данной работе использовалось уравнение состояния идеального газа с молярной массой  $\mu = 0,61$  г/моль.

3. Варьируя параметр  $c$ , рассчитаем с помощью (6) возможные зависимости  $a(z)$ ,  $b(z)$ . Выбор конкретного значения  $c$  может обуславливаться соображениями устойчивости атмосферы (например, тепловые неустойчивости изохорического типа отсутствуют при  $(\partial W/\partial T) > 0$ ), обеспечения однозначных значений степеней  $a, b$ , определенных значений времен теплового дисбаланса и т.д. В данной работе в качестве примера использовалось значение  $c = 2$ . Пример расчета зависимостей  $a(z)$  и  $b(z)$  приведен на рис. 1(а).

4. Разобьем весь диапазон рассматриваемых значений  $\tilde{\rho}, \tilde{T}$  на «ячейки» с шагом  $\Delta\tilde{\rho}, \Delta\tilde{T}$ , в которых будем считать параметры  $a, b$  постоянными. Значения  $a, b$  в ячейках, через которые проходит параметрически заданная кривая  $(\tilde{\rho}(z), \tilde{T}(z))$ , задаются с помощью п. 3. Значения параметров  $a, b$  в остальных ячейках можно задавать в зависимости от задачи конкретного исследования. В данной работе для примера и обеспечения гладкости функции нагрева «пустые» ячейки, граничащие с двумя «заполненными», получили из последних среднее значение параметров  $a, b$ . Процесс повторялся итерационно.

5. Зная  $a, b, c$  в каждой ячейке, с помощью (4) можно рассчитать в центре каждой из них значение функции нагрева  $\tilde{Q}$ . Мощность нагрева  $\tilde{Q}$  при произвольных значениях плотности и температуры можно получить с помощью интерполяции.

На рис. 1(б) приведен пример функции тепловых потерь  $W(\rho, T)$ , которая равна разности радиационных потерь, рассчитанных с помощью атомной базы данных CHIANTI, и функции нагрева, полученной с помощью приведенного алгоритма. Кривой на графике обозначены нули функции теплотерь, т.е. параметры, реализующиеся в невозмущенной атмосфере.

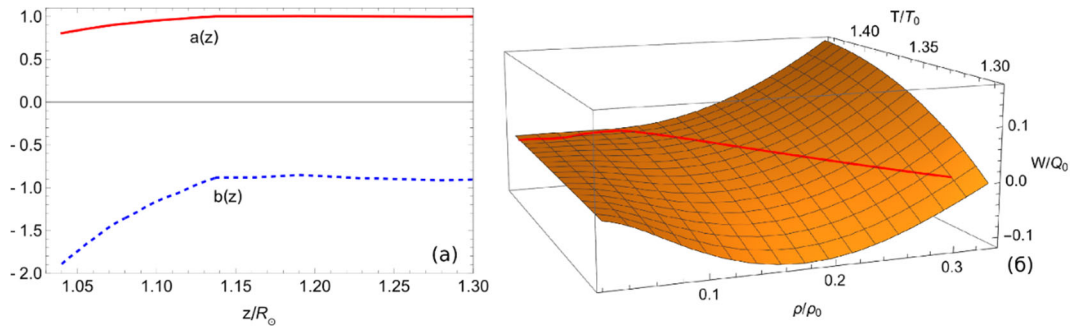


Рис. 1. (а) Зависимость параметров  $a$  и  $b$  от высоты; (б) Пример расчета функции тепловых потерь

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведен алгоритм конструирования функции нагрева от температуры и плотности в гравитационно стратифицированной солнечной атмосфере, обеспечивающей баланс между нагревом и радиационным охлаждением среды. Результаты могут найти применение для моделирования распространения МГД возмущений в спокойных областях солнечной короны, так и корональных петлях при совместном учете гравитационных эффектов и теплового дисбаланса.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Arregui I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M. Bayesian evidence for two slow-wave damping models in hot coronal loops // *A&A*. 2023. V. 677. P. A23.  
 Del Zanna G., Dere K.P., Young P.R., Landi E. CHIANTI – an atomic database for emission lines. XVI. Version 10, further extensions // *ApJ*. 2021. V. 909, N 1. P. 38.

Falewicz R., Rudawy P., Murawski K., Srivastava A.K. 2D MHD and 1D HD Models of a Solar Flare – a Comprehensive Comparison of the Results // *ApJ*. 2015. V. 813, N 1. P. 70.  
 González-Avilés J.J., Murawski K., Srivastava A.K. et al. Numerical simulations of macrospicule jets under energy imbalance conditions in the solar atmosphere // *MNRAS*. 2021. V. 505, N 1. P. 50 – 64.  
 Kolotkov D.Y., Duckenfield T.J., Nakariakov V.M. Seismological constraints on the solar coronal heating function // *A&A*. 2020. V. 644. P. A33.  
 Kraškievicz J., Murawski K., Musielak Z.E. Numerical simulations of two-fluid magnetoacoustic waves in the solar atmosphere // *MNRAS*. 2023. V. 518, N 4. P. 4991 – 5000.  
 Pascoe D.J., Smyrli A., Van Doorselaere T. Coronal density and temperature profiles calculated by forward modeling EUV emission observed by SDO/AIA // *ApJ*. 2019. V. 884, N 1. P. 43.  
 Petralia A., Reale F., Orlando S., Klimchuk, J.A. MHD modelling of coronal loops: injection of high-speed chromospheric flows // *A&A*. 2014. V. 567. P. A70.  
 Riashchikov D.S., Molevich N.E., Zavershinskii D.I. Impact of thermal misbalance on acoustic-gravity waves in the solar atmosphere // *MNRAS*. 2023. V. 522, N 1. P. 572 – 581.  
 Zavershinskii D.I., Molevich N.E., Riashchikov D.S., Belov S.A. Exact solution to the problem of slow oscillations in coronal loops and its diagnostic applications // *Frontiers in Astron. & Space Sci*. 2023. V. 10. P. 1167781.