

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ДИСБАЛАНСА НА СВОЙСТВА АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ГРАВИТАЦИОННО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АТМОСФЕРЕ

Д.С. Рящикова^{1,2}, Д.И. Завершинский^{1,2}, Н.Е. Молевич^{1,2}

¹Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия
ryashchikovd@gmail.com

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

EFFECT OF THERMAL MISBALANCE ON PROPERTIES OF ACOUSTIC WAVES IN A GRAVITATIONALLY STRATIFIED ATMOSPHERE

D.S. Riashchikov^{1,2}, D.I. Zavershinskii^{1,2}, N.E. Molevich^{1,2}

¹Samara Branch of P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Samara, Russia
ryashchikovd@gmail.com

²Samara National Research University, Samara, Russia

Аннотация. Рассматривается влияние теплового дисбаланса на свойства акустических волн в гравитационно стратифицированной атмосфере. Показано изменение равновесного профиля температуры, давления и плотности за счет процессов тепловыделения. Отмечено также уменьшение акустической частоты отсечки и дополнительное затухание акустических волн по сравнению со средой без теплового дисбаланса в изотермической атмосфере.

Ключевые слова: тепловой дисбаланс, акустико-гравитационные волны, солнечная атмосфера

Abstract. The effect of thermal misbalance on the properties of acoustic waves in a gravitationally stratified atmosphere is considered. The change in the equilibrium profile of temperature, pressure and density due to the heating and cooling processes is shown. A decrease in the acoustic cutoff frequency and additional attenuation of acoustic waves in an isothermal atmosphere compared to a medium without thermal misbalance is also noted.

Keywords: thermal misbalance, acoustic-gravity waves, solar atmosphere

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная атмосфера служит естественной лабораторией, которая позволяет получать новые знания о физике плазмы и влиянии различных процессов на динамику среды, в том числе процессов нагрева и охлаждения среды, баланс которых обеспечивает само существование солнечной атмосферы. Точно известно, что радиационное охлаждение солнечной короны является функцией температуры и плотности плазмы. При этом механизм нагрева до сих пор остается неизвестным, однако ряд исследователей полагает его зависящим также от термодинамических параметров среды. Следствием этой зависимости является то, что волны сжатия, такие, например, как магнитоакустические или акустические, могут нарушить баланс между этими процессами [Молевич, Ораевский, 1988]. Как следствие, в среде может реализоваться обратная связь между волнами и средой. Данный эффект известен в области физики Солнца как эффект теплового дисбаланса.

Теория теплового дисбаланса была построена в пионерской работе [Field, 1965]. Процессы нагрева и охлаждения часто описывают с помощью введения в уравнение переноса тепла обобщенного источника тепловыделения $W(\rho, T) = L(\rho, T) - Q(\rho, T)$, который является функцией температуры и плотности (L, H — мощности охлаждения и нагрева соответственно). В случае термодинамического равновесия со стационарными значениями температуры T_0 и плотности ρ_0 процесс охлаждения полностью балансируется процессом нагрева, т. е. $W(\rho_0, T_0) = 0$. В случае, когда нарушается баланс нагрева и охлаждения, температура и плотность среды претерпевают возмущения и реализуется обратная связь между возмущением и

средой. Если данная обратная связь положительная, то говорят, что в среде реализуются так называемые тепловые неустойчивости. В случае отрицательной обратной связи акустические возмущения начинают затухать. Кроме того, тепловой дисбаланс приводит к дисперсии скорости звука в среде, что связано с наличием характерного времени, обусловленного нагревом и охлаждением [Zavershinskii et al., 2019; Belov et al., 2021].

Наиболее часто волны в солнечной атмосфере наблюдаются в неоднородных структурах, таких как корональные петли, корональные перья, корональные дыры, протуберанцы и т.д. Существование таких структур в солнечной атмосфере обуславливается балансом не только термодинамических процессов, но и балансом механических воздействий, в частности, гравитационных сил и сил магнитного происхождения.

Неоднородности среды, возникающие под влиянием гравитации, магнитного поля, а также резкие градиенты температуры могут приводить к преломлению или отражению волн [Zhugzhda, Dzhililov, 1984]. Поведение волн в неоднородной среде существенно зависит от их частоты. Волны с относительно высокой частотой могут распространяться в такой среде. Волны же относительно низкой частоты не могут переносить энергию в стратифицированной среде и могут быть заперты в так называемом акустическом резонаторе. Минимальная частота акустических волн в неоднородной среде называется частотой отсечки. Причем наиболее часто фиксируемые в солнечной атмосфере акустические волны с периодом 3–5 мин [De Moortel, Nakariakov, 2012] имеют частоту, сравнимую с акустической

частотой отсечки, связанной с гравитационной стратификацией в фотосфере и хромосфере Солнца [Votha, 2011]. Свойства акустических (магнитоакустических) волн в тепловыделяющей среде с учетом гравитации на данный момент не изучены. Однако есть основания полагать, что тепловой дисбаланс может приводить, с одной стороны, к возникновению градиентов температуры, что связано с необходимостью одновременного выполнения условия равенства мощности нагрева и охлаждения и условия механического равновесия в среде с гравитацией в стационарном состоянии. С другой стороны, он может в некоторой степени изменить значение акустической частоты отсечки, что связано с дисперсией акустических волн в тепловыделяющей среде.

Стационарные состояния

Рассмотрим свойства тепловыделяющего газа, находящегося в гравитационном поле. Его поведение будет описываться следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \rho \frac{d\vec{V}}{dt} &= -\nabla P + \rho \vec{g}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) &= 0, \\ C_v \frac{dT}{dt} - \frac{RT}{\mu \rho} \frac{d\rho}{dt} &= -W(\rho, T), \\ P &= \frac{RT}{\mu} \rho, \end{aligned} \quad (1)$$

$$W(\rho, T) = L(\rho, T) - Q(\rho, T)$$

Уравнения (1) представляют собой систему уравнений газодинамики, дополненную функцией тепловых потерь $W(\rho, T)$. Ускорение свободного падения \vec{g} в данной работе будем считать постоянным. Отметим, что система уравнений (1) может быть использована и для описания распространения плоских медленных магнитоакустических волн в среде с сильным магнитным полем (для плазмы $\beta \rightarrow 0$) [Zavershinski et al., 2019].

Из системы (1) следует, что стационарное состояние тепловыделяющего газа в гравитационном поле будет удовлетворять равенствам

$$\frac{d\rho}{dz} + \rho g = 0, \quad W(\rho, T) = 0. \quad (2)$$

Рассмотрим частный случай обобщенной функции тепловых потерь, когда равновесные давление, плотность и связанная с ними температура удовлетворяют выражению

$$P_0(z) = C \rho_0(z)^{\gamma_0}, \quad (3)$$

где константа C определяется из условий $P=P_*$, $\rho=\rho_*$ на некоторой высоте $z=0$, γ_0 — постоянная величина в некоторой рассматриваемой области. Отметим, что параметр γ_0 имеет смысл эффективного низкочастотного показателя адиабаты [Zavershinski et al., 2019] и связан с производными обобщенной функции тепловых потерь по температуре и плотности около равновесного состояния

$$\gamma_0 = 1 - \frac{\rho_0}{T_0} \frac{(\partial W / \partial \rho)_{\rho=\rho_0, T=T_0}}{(\partial W / \partial T)_{\rho=\rho_0, T=T_0}}. \quad (4)$$

Тогда стационарные состояния будут описываться выражениями (5) в случае $\gamma_0=1$ и (6) в случае $\gamma_0 \neq 1$ соответственно:

$$\rho_0(z) = \rho_* e^{-z/H}, \quad P_0(z) = P_* e^{-z/H}, \quad T_0 = T_* = \text{const}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} T_0(z) &= T_* f(z), \quad \rho_0(z) = \rho_* f(z)^{1/(\gamma_0-1)}, \\ P_0(z) &= P_* f(z)^{\gamma_0/(\gamma_0-1)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $H = k_B T_*/(mg)$ — характерная высота, связанная с гравитацией; $f(z) = 1 - z(\gamma_0 - 1) / (H\gamma_0)$.

Влияние теплового дисбаланса на свойства акустических волн в среде с гравитационной стратификацией

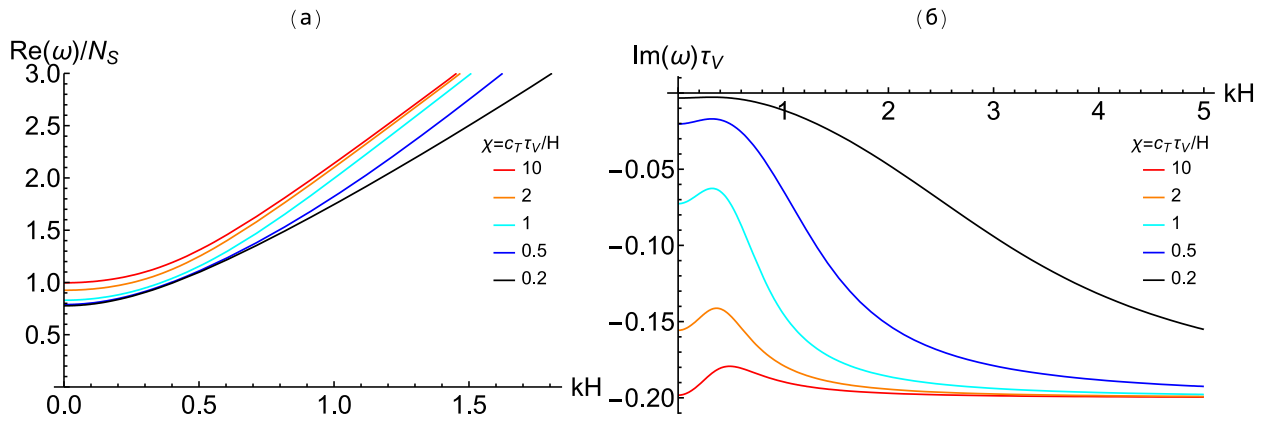
Рассмотрим распространение акустических волн в тепловыделяющей среде в изотермической атмосфере, т. е. при $\gamma_0=1$. Для этого линеаризуем систему (1) около стационарного состояния (5) с помощью замены вида $\xi = \xi_0(z)(1 + \xi_1(z, x, t))$. Для получения дисперсионного соотношения будем полагать, что

$\xi_1(z, x, t) = \xi_{a1} e^{\frac{z}{2H}} e^{ik_x x + ik_z z - i\omega t}$. Здесь уже учтено, что в среде без тепловыделения относительная амплитуда волн увеличивается в e раз на высоте $2H$ [Priest, 2014]. Тогда дисперсионное соотношение примет вид

$$\begin{aligned} \omega^2 - c_T^2 k^2 - N_{S0}^2 &= \\ &= i\omega \tau_V \left(\omega^2 - k^2 c_S^2 - N_S^2 + \frac{N^2}{\omega^2} c_S^2 k^2 \sin^2 \theta \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где $N_S = c_S / (2H)$ — акустическая частота отсечки в среде без тепловыделения, $N_{S0} = c_T / (2H)$, $N = g \sqrt{\gamma - 1} / c_S$ — частота Брента—Вайсяля, $c_T = g \sqrt{k_B T_0 / m}$ — изотермическая скорость звука в среде, $c_S = c_T \sqrt{\gamma}$ — скорость звука в среде, $\tau_V = CV / (\partial W / \partial T)_{\rho=\rho_0, T=T_0}$ — характерное время, связанное с процессами тепловыделения (в (7) предполагается, что оно не зависит от высоты), и θ — угол распространения волн по отношению к вертикали.

Анализ дисперсионного соотношения (7) показывает, что поведение акустических волн зависит от параметра $\chi = c_T \tau_V / H$, который имеет смысл отношения характерной длины, связанной с процессами тепловыделения, к характерной высоте, связанной с гравитацией (рисунок). Видно, что процессы тепловыделения могут привести к уменьшению акустической частоты отсечки в $\sqrt{\gamma}$ раз при $\chi \ll 1$. Другой эффект состоит в том, что относительная амплитуда акустических волн в тепловыделяющей изотермической атмосфере растет медленнее с высотой, чем $e^{z/2H}$, а в случае достаточно мощных процессов тепловыделения можно говорить о затухании акустических волн с высотой.



Зависимости действительной части частоты (а) и декремента затухания (б) акустических волн при различной мощности процессов нагрева и охлаждения (мощность увеличивается с уменьшением χ) при $\theta=45^\circ$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что тепловой дисбаланс может привести к изменению высотного профиля равновесных температуры, давления и плотности. В изотермической атмосфере процессы тепловыделения приводят к уменьшению скорости роста относительной амплитуды акустических волн с высотой, либо даже способны привести к их затуханию. Кроме того, уменьшается акустическая частота отсечки (в $\sqrt{\gamma}$ раз при достаточно мощных процессах тепловыделения).

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2020-0014, 0023-2019-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Молевич Н.Е., Ораевский А.Н. Вторая вязкость в термодинамически неравновесных средах. *ЖЭТФ*. 1988. Т. 94, № 3. С. 128–132.
- Belov S.A., Molevich N.E., Zavershinskii D.I. Dispersion of slow magnetoacoustic waves in the active region fan loops introduced by thermal misbalance. *Solar Phys.* 2021. Vol. 296, no. 8, 122.
- Botha G.J.J., Arber T.D., Nakariakov V.M., Zhugzhda Y.D. Chromospheric resonances above sunspot umbrae. *Astrophys. J.* 2011. Vol. 728, no. 2. P. 84.
- De Moortel I., Nakariakov V.M. Magnetohydrodynamic waves and coronal seismology: an overview of recent results. *Philos. Trans. Royal Soc. Lon. A: Math., Phys. and Engin. Sci.* 2012. Vol. 370, no. 1970. P. 3193–3216.
- Field G.B. Thermal instability. *Astrophys. J.* 1965. Vol. 142. P. 531–567.
- Priest E. Magnetohydrodynamics of the Sun. Cambridge University Press, 2004. P. 157–167.
- 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. Vol. 26, no. 8. P. 82113.
- Zhugzhda Y.D., Dzhililov N.S. Magneto-acoustic-gravity waves on the Sun. II – Transformation and Propagation. *Astron. Astrophys.* 1984. Vol. 132. P. 52–57.