

НАХОЖДЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ АВТОВОЛНОВОГО ИМПУЛЬСА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЛАСТИ ФОТОДИССОЦИАЦИИ ORION BAR

И.А. Помельников¹, Д.С. Рящиков^{1, 2}, Н.Е. Молевич^{1, 2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

² Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

Обоснование. Существует класс сред, возникающих на поверхности молекулярных облаков вблизи молодых звезд. Эти среды носят название областей фотодиссоциации (ОФД). Между звездой и ОФД располагается ионизационный фронт, состоящий из ионизированного ультрафиолетовым излучением водорода. За ионизационным фронтом располагается зона атомарного водорода, формирующегося от излучения в пределах 6–13,6 эВ [1]. В таких зонах при неравновесном нагреве и охлаждении формируются неустойчивости разных видов. Один из типов неустойчивостей — изоэнтропическая неустойчивость, при которой возникает автоволновой импульс [2, 3]. Параметры импульса (скорость распространения, амплитуда, форма) не зависят от вида начального возмущения, а зависят лишь от свойств самой среды. Одной из областей, в которой наблюдается изоэнтропическая неустойчивость, приводящая к росту акустических возмущений и формированию импульсов, является ОФД Orion Bar, располагающаяся в туманности Ориона [4].

Цель — оценка параметров автоволновых импульсов, формирующихся в изоэнтропически неустойчивых атомарных областях Orion Bar.

Методы. При помощи системы основных уравнений газодинамики было получено дисперсионное соотношение (1) для газодинамических мод в среде с тепловыделением, зависящим от температуры и плотности среды [2]:

$$\frac{w^2}{k^2} = \frac{k_B T_0}{m} \frac{\gamma_0 \left(1 - j \frac{\gamma_\infty}{\gamma_0} \omega \tau_\nu \right)}{1 - j \omega \tau_\nu}. \quad (1)$$

В данной работе соотношение (1) использовалось для определения области параметров среды, при которых может реализовываться изоэнтропическая неустойчивость. Эти параметры можно найти приближенно в явной форме с помощью решения нелинейного акустического уравнения [2], использование которого ограничено условием слабой дисперсии и малой относительной амплитудой возмущений. Метод, разработанный в работе [3], лишен этих недостатков, однако аналитически позволяет определить их параметры только в неявной форме.

Результаты. Применение дисперсионного соотношения позволило определить условия, при которых возникает изоэнтропическая неустойчивость. Тип неустойчивости определяется соотношением γ_0 / γ_∞ , где γ_∞ — высокочастотный показатель адиабаты, который по значению совпадает с общепринятым показателем адиабаты среды; γ_0 — низкочастотный показатель адиабаты, значение которого определяется параметрами обобщенной функции тепловых потерь. Для реализации изоэнтропической неустойчивости необходимо выполнение соотношения: $\gamma_0 / \gamma_\infty > 1$ [5].

С помощью решений нелинейного акустического уравнения [2] и более точного метода, основанного на использовании адиабат [3], были произведены оценки амплитуды плотности автоволнового импульса (см. рисунок, а) и величины скорости распространения волны (б) в зависимости от температуры. При расчетах использовалась модель нагрева и охлаждения среды из работы [6], применяемая для ОФД Orion Bar. На графиках указаны только зоны, в которых соблюдается условие изоэнтропической неустойчивости.

Выводы. По итогам данной работы было получено дисперсионное соотношение для газодинамических мод в среде с тепловыделением, зависящим от температуры и плотности среды; определены типы тепловых неустойчивостей в ОФД Orion Bar и диапазон параметров среды, при которых они могут реализовываться.

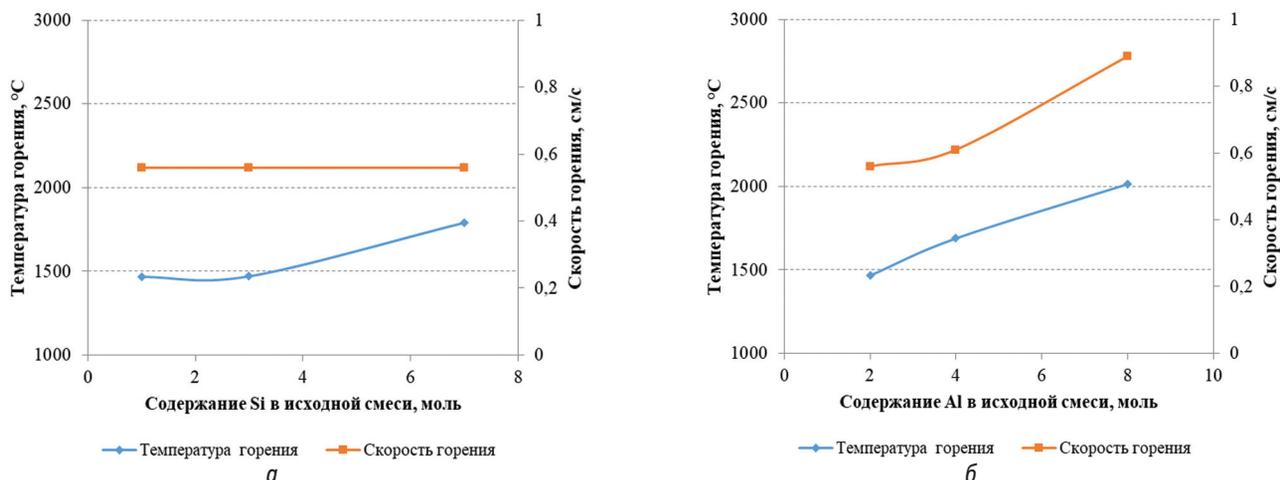


Рис. Зависимость амплитуды плотности ударноволнового импульса от температуры при решении нелинейного уравнения (красная) и при помощи адиабат (синяя) (а); зависимость скорости распространения ударноволнового импульса от температуры при решении нелинейного уравнения (красная) и при помощи метода адиабат (синяя) (б). На обоих графиках черная линия — отношение γ_0/γ_∞

При помощи решения нелинейного уравнения [2] и метода адиабат [3] были получены амплитуда автоволнового импульса и скорость его распространения в неравновесной среде (ОФД Orion Bar).

Ключевые слова: изоэнтропическая неустойчивость; межзвездная среда; ударные волны; области фотодиссоциации; космические туманности; неравновесные среды.

Список литературы

- Hollenbach D.J., Tielens A.G.G.M. Photodissociation regions in the interstellar medium of galaxies // *Rev Mod Phys.* 1999. Vol. 71, No. 1. P. 460–473. DOI: 10.1103/RevModPhys.71.173
- Molevich N.E., Zavershinsky D.I., Galimov R.N., Makaryan V.G. Traveling self-sustained structures in interstellar clouds with the isentropic instability // *Astrophys Space Sci.* 2011. Vol. 334, No. 1. P. 35–44. DOI: 10.1007/s10509-011-0683-0
- Molevich N.E., Riashchikov D.S. Shock wave structures in an isentropically unstable heat-releasing gas // *Phys Fluids.* 2021. Vol. 33, No. 7. ID 124008. DOI: 10.1063/5.0053394
- Goicoechea J.R., Pety J., Cuadrado S., et al. Compression and ablation of the photo-irradiated molecular cloud the Orion Bar // *Nature.* 2016. Vol. 537, No. 7619. P. 207–209. DOI: 10.1038/nature18957
- Рящиков Д.С. Особенности распространения газодинамических и магнитогазодинамических волн в средах с изоэнтропической тепловой неустойчивостью: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Казань, 2020. 157 с.
- Krasnobaev K.V., Tagirova R.R. Isentropic thermal instability in atomic surface layers of photodissociation regions // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2017. Vol. 469, No. 2. P. 1403–1413. DOI: 10.1093/mnras/stx884

Сведения об авторах:

Иван Александрович Помельников — студент, группа 6306-030301D, институт информатики и кибернетики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: vanidzepamelnikov@gmail.com

Дмитрий Сергеевич Рящиков — старший преподаватель, кафедра физики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Старший научный сотрудник, Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия. E-mail: ryashchikovd@gmail.com

Нонна Евгеньевна Молевич — научный руководитель, доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физики; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Главный научный сотрудник, Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия. E-mail: nonna.molevich@mail.ru