

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПЛАЗМЕННО-СТАБИЛИЗИРОВАННОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ГОРЕНИЯ*

С. Эллиотт, С. Б. Леонов

Институт физики и управления потоками Университета Нотр-Дам, Нотр-Дам, штат Индиана 46556, США

Аннотация: Рассматриваются два типа неустойчивостей сверхзвукового ($M = 2$) горения при плазменной стабилизации, идентифицированных в реагирующем потоке при прямом впрыске газообразного углеводородного топлива: глобальная неустойчивость, развивающаяся вследствие взаимосвязи в системе поток–горение–плазма, и высокочастотная неустойчивость термоакустической природы. Эксперименты проводили на сверхзвуковой установке SBR-50 при следующих параметрах: давление $P_0 = 1\text{--}4$ бар, температура $T_0 = 300\text{--}750$ К, массовый расход топлива $\dot{m} = 1\text{--}8,5$ г/с. Диагностика включала измерение давления, скоростную камеру с опцией спектрального фильтра, теневую визуализацию и спектроскопические наблюдения. Глобальная неустойчивость развивается с характерным временем около 10 мс и связана с взаимодействием зоны отрыва потока, где реализуется горение, с отраженной ударной волной и электрическим разрядом. Показано, что эта неустойчивость может эффективно подавляться с помощью управления мощностью электрического разряда. Термоакустическая неустойчивость развивается с характерным временем < 1 мс. Анализ данных по давлению выявил наличие резонансной акустической волны в зоне горения, возникающей в области между инжекторами топлива и диффузором тестовой секции.

Ключевые слова: сверхзвуковое горение; неустойчивости; плазменная стабилизация; отрыв потока

DOI: 10.30826/CE22150302

EDN: HBILOP

Литература

1. Ben-Yakar A., Hanson R. K. Cavity flame-holders for ignition and flame stabilization in scramjets: An overview // *J. Propul. Power*, 2001. Vol. 17. P. 869–878.
2. Rasmussen C. C., Driscoll J. F., Hsu K.-Y., Donbar J. M., Gruber M. R., Carter C. D. Stability limits of cavity-stabilized flames in supersonic flow // *P. Combust. Inst.*, 2005. Vol. 30. P. 2825–2833.
3. Wang Z., Wang H., Sun M. Review of cavity-stabilized combustion for scramjet applications // *P. I. Mech. Eng. G — J. Aer.*, 2014. Vol. 228. No. 14. P. 2718–2735.
4. Billingsley M., O'Brien W., Schetz J. Plasma torch atomizer-igniter for supersonic combustion of liquid hydrocarbon fuel. AIAA Paper No. 2006-7970, 2006.
5. Jacobsen L., Carter C., Baurle R. A., Jackson T. A., Williams S., Bivolaru D., Kuo S., Barnett J., Tam C.-J. Plasma-assisted ignition in scramjets // *J. Propul. Power*, 2008. Vol. 24. No. 4. P. 641–654.
6. Takita K., Shishido K., Kurumada K. Ignition in a supersonic flow by a plasma jet of mixed feedstock including CH_4 // *P. Combust. Inst.*, 2011. Vol. 33. No. 2. P. 2383–2389.
7. Li F., Yua X.-L., Tong Y.-G., Shen Y., Chen J., Chen L.-H., Chang X.-Y. Plasma-assisted ignition for a kerosene fueled scramjet at Mach 1.8 // *Aerosp. Sci. Technol.*, 2013. Vol. 28. No. 1. P. 72–78.
8. Leonov S. Electrically driven supersonic combustion // *Energies*, 2018. Vol. 11. No. 7. P. 1733.
9. Leonov S. B., Elliott S., Carter C., Haupt A., Lax P., Ombrello T. Modes of plasma-stabilized combustion in cavity-based $M = 2$ configuration // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2021. Vol. 124. P. 110355.
10. Starikovskaya S. M. Plasma assisted ignition and combustion // *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2006. Vol. 39. No. 16. P. R265.
11. Starikovskiy A., Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion // *Prog. Energ. Combust.*, 2013. Vol. 39. No. 1. P. 61–110.
12. Ju Y., Sun W. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // *Prog. Energ. Combust.*, 2015. Vol. 48. P. 21–83.
13. Macheret S. O., Shneider M. N., Miles R. B. Energy efficiency of plasma-assisted combustion in ram/scramjet engines. Paper AIAA No. 2005-5371, 2005.
14. Esakov I. I., Grachev L. P., Khodataev K. V., Vinogradov V. A., Wie D. M. V. Propane–air mixture combustion assisted by MW discharge in a speedy airflow // *IEEE T. Plasma Sci.*, 2006. Vol. 34. No. 6. P. 2497–2506.
15. O'Briant S. A., Gupta S. B., Vasu S. S. Review: Laser ignition for aerospace propulsion // *Propulsion Power Research*, 2016. Vol. 5. No. 1. P. 1–21.
16. Leonov S., Haupt A., Elliott S., Hedlund B. Ethylene ignition and flameholding by electrical discharge in super-

*Статья основана на докладе, представленном на 13-м Международном коллоквиуме по импульсной и непрерывной детонации (ICPCD), прошедшем в Санкт-Петербурге (Россия) в период с 18 по 21 апреля 2022 г.

- sonic combustor // *J. Propul. Power*, 2018. Vol. 34. No. 2. P. 499–509.
17. *Elliott S., Lax P., Leonov S. B.* Acetone PLIF visualization of mixing processes in a plasma stabilized supersonic combustor. AIAA Paper No. 2022-2256, 2022. doi: 10.2514/6.2022-2256.
 18. *Choi J.-Y., Ma F., Yang V.* Combustion oscillations in a scramjet engine combustor with transverse fuel injection // *P. Combust. Inst.*, 2005. Vol. 30. P. 2851–2858.
 19. *Lin K.-C., Jackson K., Behdadnia R., Jackson T. A., Ma F., Yang V.* Acoustic characterization of an ethylene-fueled scramjet combustor with a cavity flameholder // *J. Propul. Power*, 2010. Vol. 26. No. 6. P. 1161–1170.
 20. *Wang H., Wang Z., Sun M.* Experimental study of oscillations in a scramjet combustor with cavity flameholders // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2013. Vol. 45. P. 259–263.
 21. *Haupt A., Hedlund B., Leonov S., Ombrello T., Carter C.* Quasi-DC electrical discharge characterization in a supersonic flow // *Exp. Fluids*, 2017. Vol. 58. No. 4. P. 25.
 22. *Savelkin K. V., Yarantsev D. A., Adamovich I. V., Leonov S. B.* Ignition and flameholding in a supersonic combustor by an electrical discharge combined with a fuel injector // *Combust. Flame*, 2015. Vol. 162. No. 3. P. 825–835.
 23. *Leonov S. B., Hedlund B. E., Haupt A. W.* Morphology of a Q-DC discharge within a fuel injection jet in a supersonic cross-flow. Paper AIAA No. 2018-1060, 2018.
 24. *Leonov S. B., Isaenkov Y. I., Yarantsev D. A., Kochetov I. V., Napartovich A. P., Shneider M. N.* Unstable pulse discharge in mixing layer of gaseous reactants. AIAA Paper No. 2009-0820, 2009.

Поступила в редакцию 29.01.2022