

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В НЕРЕГУЛЯРНОМ ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ*

И. А. Яковлев¹, С. Д. Замбалов², Н. С. Пичугин³

Аннотация: Проведено нестационарное численное моделирование формирования и развития пульсационной неустойчивости при горении стехиометрической метановоздушной смеси в зернистом слое на поровом масштабе. Показано, что рассматриваемому процессу присуща значительная пространственная вариация определяющих параметров от канала к каналу как результат локально-неоднородных условий течения и теплообмена вследствие неравномерности укладки частиц слоя. Фронт горения имеет очаговую, фрагментированную структуру с точками якорения на поверхности частиц. Механизм возникновения и развития пульсационной неустойчивости связан с периодически повторяющимся процессом угасания и поджига в поровом канале с градиентом температуры. При уменьшении скорости подачи смеси ниже некоторого критического значения некоторые фрагменты фронта теряют устойчивость, причем чем ниже скорость, тем большая часть фронта становится подверженной пульсациям вплоть до момента, когда неустойчивость начинает охватывать всю расчетную область. Наличие таких перемежающихся режимов определяется локально-неоднородными условиями течения и теплообмена вследствие неравномерности укладки частиц слоя. В процессе развития неустойчивости наблюдается взаимное гидродинамическое влияние очагов неустойчивости в смежных поровых каналах, что может приводить к неупорядоченной частотной характеристике пульсаций.

Ключевые слова: фильтрационное горение; неустойчивость фронта пламени; пористая среда; волна горения; колебания; пульсации; FREI; численное моделирование; рекуперация тепла

DOI: 10.30826/CE20130405

Литература

1. Шаповалова О. В., Рахметов А. Н., Шмелев В. М., Захаров А. А., Арутюнов В. С. Окислительная конверсия углеводородных газов в синтез-газ на основе горелочных устройств с объемными проницаемыми матрицами // Горение и взрыв, 2014. № 7. С. 53–58.
2. Василик Н. Я., Шмелев В. М. Инфракрасное горелочное устройство с высокой удельной мощностью // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 1. С. 37–42. doi: 10.30826/CE19120105.
3. Maznoff A., Pichugin N., Yakovlev I., Fursenko R., Petrov D., Shi S. Fuel interchangeability for lean premixed combustion in cylindrical radiant burner operated in the internal combustion mode // Appl. Therm. Eng., 2020 (in press). P. 115997. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115997.
4. Weinberg F. J., Rowe D. M., Ronney P. D. On thermoelectric power conversion from heat recirculating combustion systems // P. Combust. Inst., 2002. Vol. 29. No. 1. P. 941–947. doi: 10.1016/S1540-7489(02)80119-5.
5. Wood S., Harris A. T. Porous burners for lean-burn applications // Prog. Energ. Combust., 2008. Vol. 34. No. 5. P. 667–684. doi: 10.1016/j.peccs.2008.04.003.
6. Vogel B. J., Ellzey J. L. Subadiabatic and superadiabatic performance of a two-section porous burner // Combust. Sci. Technol., 2005. Vol. 177. No. 7. P. 1323–1338. doi: 10.1080/00102200590950494.
7. Lee D. K., Noh D.-S. Experimental and theoretical study of excess enthalpy flames stabilized in a radial multi-channel as a model cylindrical porous medium burner // Combust. Flame, 2016. Vol. 170. P. 79–90. doi: 10.1016/j.combustflame.2016.05.010.
8. Babkin V. S. Filtrational combustion of gases. Present state of affairs and prospects // Pure Appl. Chem., 1993. Vol. 65. No. 2. P. 335–344. doi: 10.1351/pac199365020335.
9. Chen L., Xia Y.-F., Li B.-W., Shi J.-R. Flame front inclination instability in the porous media combustion with inhomogeneous preheating temperature distribution // Appl. Therm. Eng., 2018. Vol. 128. P. 1520–1530. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.09.085.
10. Saveliev A. V., Kennedy L. A., Fridman A. A., Puri I. K. Structures of multiple combustion waves formed under

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук и докторов наук и ведущих научных школ Российской Федерации № 075-15-2020-456.

¹Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, yakovlev-i-a@yandex.ru

²Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, zambalovsd@gmail.com

³Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, pichugin.n.s@inbox.ru

- filtration of lean hydrogen–air mixtures in a packed bed // Symposium (International) on Combustion, 1996. Vol. 26. No. 2. P. 3369–3375. doi: 10.1016/S0082-0784(96)80185-8.
11. Доброго К. В., Жданок С. А. Физика фильтрационного горения газов. — Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАНБ, 2002. 203 с.
 12. Maruta K., Kataoka T., Kim N. I., Minaev S., Fursenko R. Characteristics of combustion in a narrow channel with a temperature gradient // P. Combust. Inst., 2005. Vol. 30. No. 2. P. 2429–2436. doi: 10.1016/j.proci.2004.08.245.
 13. Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research // Prog. Energ. Combust., 2011. Vol. 37. No. 6. P. 669–715. doi: 10.1016/j.pecs.2011.03.001.
 14. Di Stazio A., Chauveau C., Dayma G., Dagaut P. Oscillating flames in micro-combustion // Combust. Flame, 2016. Vol. 167. P. 392–394. doi: 10.1016/j.combustflame.2016.01.013.
 15. Bucci M. A., Di Stazio A., Chauveau C., Dayma G., Legros G., Dagaut P., Chibbaro S. Numerical and experimental analysis of combustion in microchannels with controlled temperature // Chem. Eng. Sci. X, 2019. Vol. 4. P. 100034. doi: 10.1016/j.cesx.2019.100034.
 16. Cai T., Tang A., Zhao D., Zhou C., Huang Q. Flame dynamics and stability of premixed methane/air in micro-planar quartz combustors // Energy, 2020. Vol. 193. P. 116767. doi: 10.1016/j.energy.2019.116767.
 17. Miroshnichenko T., Gubernov V., Minaev S., Maruta K. Diffusive-thermal instabilities of high Lewis number flames in micro flow reactor // 25th Colloquium (International) on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems Proceedings. — Leeds, U.K., 2015. P. 047.
 18. Zheng C., Cheng L., Saveliev A., Luo Z., Cen K. Gas and solid phase temperature measurements of porous media combustion // P. Combust. Inst., 2011. Vol. 33. No. 2. P. 3301–3308. doi: 10.1016/j.proci.2010.05.037
 19. Dunnmon J., Sobhani S., Wu M., Fahrigr R., Ihme M. An investigation of internal flame structure in porous media combustion via X-ray computed tomography // P. Combust. Inst., 2017. Vol. 36. No. 3. P. 4399–4408. doi: 10.1016/j.proci.2016.06.188.
 20. Fateev G. A., Rabinovich O. S., Silenkov M. A. Oscillatory combustion of a gas mixture blown through a porous medium or a narrow tube // Symposium (International) on Combustion, 1998. Vol. 27. No. 2. P. 3147–3153. doi: 10.1016/S0082-0784(98)80177-X.
 21. Dobrego K. V., Zhdanok S. A., Khanevich E. I. Analytical and experimental investigation of the transition from low-velocity to high-velocity regime of filtration combustion // Exp. Therm. Fluid Sci., 2000. Vol. 21. No. 1. P. 9–16. doi: 10.1016/S0894-1777(99)00048-5.
 22. Sirotkin F., Fursenko R., Kumar S., Minaev S. Flame anchoring regime of filtrational gas combustion: Theory and experiment // P. Combust. Inst., 2017. Vol. 36. No. 3. P. 4383–4389. doi: 10.1016/j.proci.2016.06.006.
 23. Ferguson J. C., Sobhani S., Ihme M. Pore-resolved simulations of porous media combustion with conjugate heat transfer // P. Combust. Inst., 2020 (in press). doi: 10.1016/j.proci.2020.06.064.
 24. Yakovlev I., Zambalov S. Three-dimensional pore-scale numerical simulation of methane–air combustion in inert porous media under the conditions of upstream and downstream combustion wave propagation through the media // Combust. Flame, 2019. Vol. 209. P. 74–98. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.07.018.
 25. Kazakov A., Frenklach M. Reduced reaction sets based on GRI-Mech 1.2. <http://combustion.berkeley.edu/drm/>.
 26. Kang X., Gollan R. J., Jacobs P. A., Veeraragavan A. On the influence of modelling choices on combustion in narrow channels // Comput. Fluids, 2017. Vol. 144. P. 117–136. doi: 10.1016/j.compfluid.2016.11.017.
 27. Mansouri Z. Combustion in wavy micro-channels for thermo-photovoltaic applications — Part I: Effects of wavy wall geometry, wall temperature profile and reaction mechanism // Energ. Convers. Manage., 2019. Vol. 198. P. 111155. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.105.
 28. Shi J., Xiao H., Li J., Li N., Xia Y., Xu Y. Two-dimensional pore-level simulation of low-velocity filtration combustion in a packed bed with staggered arrangements of discrete cylinders // Combust. Sci. Technol., 2017. Vol. 189. No. 7. P. 1260–1276. doi: 10.1080/00102202.2017.1282472.
 29. Палесский Ф. С., Минаев С. С., Фурсенко Р. В., Бавев В. В., Кирдяшкин А. И., Орловский В. М. Моделирование горения предварительно перемешанных смесей газов в расширяющемся канале с учетом радиационных теплотерь // Физика горения и взрыва, 2012. Т. 48. № 1. P. 21–27.

Поступила в редакцию 14.11.2020