

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ВБЛИЗИ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ПРЕДЕЛА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ВНИЗ*

И. С. Яковенко¹, А. Д. Киверин², К. С. Мельникова³, В. В. Стаханов⁴

Аннотация: Проведен численный анализ эволюции очагов горения в газовых смесях водорода с воздухом, близких по составу к нижнему концентрационному пределу распространения пламени вниз. Показано, что естественная конвекция является ведущим механизмом переноса очагов горения в обедненных смесях. Воздействие силы плавучести и конвективных течений, генерируемых при подъеме горячих продуктов горения, определяют развитие и структуру очага горения, распространяющегося вверх в восходящем потоке. При этом зона горения локализована на верхней поверхности очага горения, однако, при увеличении концентрации водорода в смеси выше определенного значения наблюдается формирование активной зоны горения на нижней поверхности очага. Эта смена режима горения и является характерной особенностью процесса вблизи нижнего концентрационного предела распространения пламени вниз.

Ключевые слова: концентрационные пределы горения; горение водорода; естественная конвекция; численное моделирование

DOI: 10.30826/CE25180403

EDN: VNSBXS

Литература

1. Кутузова К. С., Стаханов В. В., Безгодов Е. В., Томилов Ю. А., Попов И. А., Пасюков С. Д., Тараканов А. А. Численное моделирование утечки водорода в вентилируемом помещении // Атомная энергия, 2023. Т. 134. № 5–6. С. 270–273. EDN: KWKMLR.
2. Yakovenko I. S., Ivanov M. F., Kiverin A. D., Melnikova K. S. Large-scale flame structures in ultra-lean hydrogen–air mixtures // Int. J. Hydrogen Energy, 2018. Vol. 43. No. 3. P. 1894–1901. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.138.
3. Володин В. В., Голуб В. В., Киверин А. Д., Мельникова К. С., Микушкин А. Ю., Яковенко И. С. Динамика очагов горения в ультрабедных водородно-воздушных смесях в крупных масштабах в условиях земной гравитации // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 2. С. 53–59. doi: 10.30826/CE19120207.
4. Яковлев С. А., Безгодов Е. В., Стаханов В. В., Тараканов А. А., Попов И. А., Пасюков С. Д., Никифоров М. В., Савельев А. Н., Давлетчин Ю. Ф. Экспериментальные исследования процессов горения стратифицированных и равномерно перемешанных водородно-воздушных смесей в замкнутом канале // Атомная энергия, 2023. Т. 134. № 5–6. С. 278–282. EDN: DVPEKH.
5. Lovachev L. A., Babkin V. S., Bunev V. A., Vyun A. V., Krivulin V. N., Baratov A. N. Flammability limits: An invited review // Combust. Flame, 1973. Vol. 20. No. 2. P. 259–289. doi: 10.1016/S0010-2180(73)80180-4.
6. Бабкин В. С., Вьун А. В. Влияние паров воды на нормальную скорость пламени метано-воздушной смеси при высоких давлениях // Физика горения и взрыва, 1971. Т. 7. № 3. С. 392–395.
7. Furno A. L., Cook E. B., Kuchta J. M., Burgess D. S. Some observations on near-limit flames // P. Combust. Inst., 1971. Vol. 13. No. 1. P. 593–599. doi: 10.1016/S0082-0784(71)80061-9.
8. Kuo K. Principles of combustion. — Hoboken, NJ, USA: Wiley-Inter-science, 2005. 760 p.
9. McGrattan K., McDermott R., Hostikka S., Weinschenk C. G., Forney G. P. Fire dynamics simulator technical reference guide. Vol. 1: Mathematical model. — Gaithersburg: Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2013. 124 p.
10. Keromnes A., Metcalfe W. K., Heufer K. A., Donohoe N., Das A. K., Sung C.-J., Herzler J., Naumann C., Griebel P., Mathieu O., Krejci M. C., Petersen E. L., Pitz W. J., Curran H. J. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures // Combust. Flame, 2013. Vol. 160. No. 6. P. 995–1011. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.01.001.

* Работа выполнена с использованием вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН).

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, yakovenko.ivan@bk.ru

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, alexeykiverin@ihed.ras.ru

³Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, mkss-ks@yandex.ru

⁴ФГУП Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е. И. Забахина, stakhanovvv@vniitf.ru

11. *Yakovenko I., Kiverin A.* Numerical modeling of hydrogen combustion: Approaches and benchmarks // *Fire*, 2023. Vol. 6. No. 6. P. 239. doi: 10.3390/fire6060239.
12. *Yakovenko I., Melnikova K., Kiverin A.* Ultra-lean hydrogen–air flames initiated by a hot surface // *Acta Astronaut.*, 2024. Vol. 225. P. 218. doi: 10.1016/j.actaastro.2024.09.013.
13. *Yakovenko I., Kiverin A., Melnikova K.* 2021. Ultra-lean gaseous flames in terrestrial gravity conditions // *Fluids*, 2021. Vol. 6. P. 21. doi: 10.3390/fluids6010021.
14. *Махвиладзе Г. М., Николова И. П.* Численное моделирование развития очага горения в закрытом сосуде в условиях естественной конвекции // *Физика горения и взрыва*, 1982. Т. 18. № 5. С. 39–46.
15. *Махвиладзе Г. М., Мелихов О. И., Якуш С. Е.* Подъем турбулентного осесимметричного термика в неоднородной сжимаемой атмосфере // *Прикладная механика и техническая физика*, 1989. Т. 30. № 1. С. 62–68.
16. *Махвиладзе Г. М., Якуш С. Е.* О влиянии дисперсной примеси на подъем запыленного теплового термика // *Прикладная механика и техническая физика*, 1990. Т. 31. № 5. С. 69–77.
17. *Anikin N. B., Tyaktev A. A., Kirillov I. A., Simonenko V. A.* Experimental study of early-stage dynamics of the ascending and descending laminar hydrogen–air flames in vertical closed rectangular tube // 28th Colloquium (International) on Dynamics of Explosions and Reactive Systems Proceedings. — Napoli, 2022. Paper 183.
18. *Raman K. S.* Laminar burning velocities of lean hydrogen–air mixtures. — Pasadena, CA, USA: Explosion Dynamics Lab., 1998. Report No. FM97-15.
19. *Kiverin A. D., Yakovenko I. S., Melnikova K. S.* On the structure and stability of ultra-lean flames // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2019. Vol. 1147. P. 012048. doi: 10.1088/1742-6596/1147/1/012048.

Поступила в редакцию 23.12.2024

После доработки 23.05.2025

Принята к публикации 02.06.2025