

ДИНАМИКА ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ В УЛЬТРАБЕДНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ В КРУПНЫХ МАСШТАБАХ В УСЛОВИЯХ ЗЕМНОЙ ГРАВИТАЦИИ

В. В. Володин¹, В. В. Голуб², А. Д. Киверин³, К. С. Мельникова⁴, А. Ю. Микушкин⁵, И. С. Яковенко⁶

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования развития очагов горения ультрабедной водородно-воздушной смеси в большом объеме в условиях земной гравитации. Описаны характерные стадии эволюции очага при его конвективном движении и предложены физические механизмы, определяющие особенности развития ультрабедного горения при наличии естественной конвекции. Результаты эксперимента сопоставлены с полученными ранее расчетными данными, что позволило продемонстрировать корректность результатов математического моделирования и выявленных ранее на его основе физических механизмов. Показано, что ключевую роль в процессе распространения горения в ультрабедной смеси играет конвективный подъем в поле тяжести Земли, при этом скорость подъема очага значительно превышает нормальную скорость горения ультрабедной смеси. Рассмотренные процессы могут стать причиной развития аварийных ситуаций и должны быть учтены при разработке надежных систем пожаро- и взрывобезопасности.

Ключевые слова: водородная безопасность; ультрабедное горение; шарики пламени; крупномасштабное горение

DOI: 10.30826/CE19120207

Литература

1. International Atomic Energy Agency. Mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011. Technical Report IAEA-TECDOC-1661.
2. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. — М.: Наука, 1980. 478 с.
3. Buckmaster J., Joulin G., Ronney P. The structure and stability of nonadiabatic flame balls // *Combust. Flame*, 1990. Vol. 79. No. 3-4. P. 381–392. doi: 10.1016/0010-2180(90)90147-J.
4. Buckmaster J. D., Joulin G. Influence of boundary-induced losses on the structure and dynamics of flame-balls // *Combust. Sci. Technol.*, 1993. Vol. 89. No. 1-4. P. 57–69. doi: 10.1080/00102209308924102.
5. Buckmaster J., Weeratunga S. The stability and structure of flame-bubbles // *Combust. Sci. Technol.*, 1983. Vol. 35. No. 5-6. P. 287–296. doi: 10.1080/00102208308923718
6. Ronney P. D. Near-limit flame structures at low Lewis number // *Combust. Flame*, 1990. Vol. 82. No. 1. P. 1–14. doi: 10.1016/0010-2180(90)90074-2.
7. Buckmaster J., Mikolaitis D. A flammability-limit model for upward propagation through lean methane/air mixtures in a standard flammability tube // *Combust. Flame*, 1982. Vol. 45. P. 109–119.
8. Ronney P. D. Understanding combustion processes through microgravity research // *27th Symposium (International) on Combustion*, 1998. Vol. 27. No. 2. P. 2485–2506. doi: 10.1016/S0082-0784(98)80101-X.
9. Levy A. An optical study of flammability limits // *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A*, 1965. Vol. 283. No. 1392. P. 134–145. doi: 10.1098/rspa.1965.0011.
10. Jarosinski J., Strehlow R. A., Azarbarzin A. The mechanisms of lean limit extinguishment of an upward and downward propagating flame in a standard flammability tube // *19th Symposium (International) on Combustion*, 1982. Vol. 19. No. 1. P. 1549–1557. doi: 10.1016/S0082-0784(82)80332-9.
11. Бабкин В. С., Замащиков В. В., Бадалян А. М. и др. Влияние диаметра трубы на пределы распространения гомогенных газовых пламен // *Физика горения и взрыва*, 1982. Т. 18. № 2. С. 44–52.
12. Davies R. M., Taylor G. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, vlad@ihed.ras.ru

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, victor.vgolub@gmail.com

³Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, alexeykiverin@gmail.com

⁴Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, mkss-ks@yandex.ru

⁵Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, notna17@yandex.ru

⁶Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, yakovenko.ivan@bk.ru

- tubes // Proc. R. Soc. Lond. Ser. A, 1950. Vol. 200. No. 1062. P. 375–390. doi: 10.1098/rspa.1950.0023.
13. *Bychkov V. V., Liberman M. A.* Dynamics and stability of premixed flames // Phys. Rep., 2000. Vol. 325. No. 4-5. P. 115–237. doi: 10.1016/S0370-1573(99)00081-2.
 14. *Shoshin Y., Tecce L., Jarosinski J.* Experimental and computational study of lean limit methane–air flame propagating upward in a 24 mm diameter tube // Combust. Sci. Technol., 2008. Vol. 180. No. 10-11. P. 1812–1828. doi: 10.1080/00102200802260573.
 15. *Leblanc L., Manoubi M., Dennis K., et al.* Dynamics of unconfined spherical flames: Influence of buoyancy // Phys. Fluids, 2013. Vol. 25(091106). doi: 10.1063/1.4820018.
 16. *Sun Z.-Y., Li G.-X., Li H.-M., et al.* Buoyant unstable behavior of initially spherical lean hydrogen–air premixed flames // Energies, 2014. Vol. 7. No. 8. P. 4938–4956. doi: 10.3390/en7084938.
 17. *Shoshin Y. L., deGoey L. P. H.* Experimental study of lean flammability limits of methane/hydrogen/air mixtures in tubes of different diameters // Exp. Therm. Fluid Sci., 2010. Vol. 34. No. 3. P. 373–380. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2009.10.027.
 18. *Shoshin Y. L., van Oijen J. A., Sepman A. V., et al.* Experimental and computational study of the transition to the flame ball regime at normal gravity // P. Combust. Inst., 2011. Vol. 33. No. 1. P. 1211–1218. doi: 10.1016/j.proci.2010.06.030.
 19. *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 Energ., 2018. Vol. 43. No. 3. P. 1894–1901. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.138.
 20. *Bonometti T., Magnaudet J.* Transition from spherical cap to toroidal bubbles // Phys. Fluids, 2006. Vol. 18(052102). doi: 10.1063/1.2196451.
 21. *Sharaf D. M., Premalata A. R., Tripathi M. K., et al.* Shapes and paths of an air bubble rising in quiescent liquids // Phys. Fluids, 2017. Vol. 29(122104). doi: 10.1063/1.5006726.

Поступила в редакцию 18.01.19