

СТРУКТУРА ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ДВУХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ГАЗООБРАЗНЫЙ ОКИСЛИТЕЛЬ – КАПЛИ ЖИДКОГО ГОРЮЧЕГО*

В. С. Иванов¹, С. М. Фролов², А. Э. Зангиев³

Аннотация: Приведены результаты трехмерного моделирования распространения детонационных волн (ДВ) в двухфазной смеси воздух – капли жидкого изоктана. Методика расчета детонации основана на решении трехмерных уравнений двухфазного сжимаемого турбулентного реагирующего течения с учетом движения, дробления, нагрева и испарения капель и конечных скоростей смешения топливных компонентов и химических превращений. Достоверность методики проверена сравнением расчетных и измеренных скоростей гетерогенной каплевой детонации в вертикальном канале квадратного сечения. Рассмотрено влияние предыстории формирования двухфазной горючей смеси на скорость и структуру ДВ. Получены новые данные о структуре ДВ в двухфазных системах.

Ключевые слова: гетерогенная каплевая детонация; капли *изо*-октана; трехмерное математическое моделирование; структура детонации; скорость детонации

DOI: 10.30826/CE24170305

EDN: ZNTNLJ

Литература

- Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust., 2004. Vol. 30. Iss. 6. P. 545–672.
- Фролов С. М., Аксёнов В. С., Иванов В. С., Шамшин И. О., Набатников С. А. Бросковые испытания беспилотного летательного аппарата с прямоточным воздушно-реактивным импульсно-детонационным двигателем // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 1. С. 63–72. doi: 10.30826/CE19120108.
- Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2013. 422 с.
- Фролов С. М., Иванов В. С., Шамшин И. О., Аксёнов В. С., Вовк М. Ю., Мокрынский И. В., Брусков В. А., Игонкин Д. В., Москвитин С. Н., Илларионов А. А., Марчуков Е. Ю. Форсажная камера с детонационным горением керосина // Горение и взрыв, 2022. Т. 15. № 1. С. 67–71. doi: 10.30826/CE22150108.
- Smirnov N., Nikitin V., Dushin V. R., Filippov Yu. G., Nerchenko V., Khadem J. Combustion onset in non-uniform dispersed mixtures // Acta Astronaut., 2015. Vol. 115. doi: 10.1016/j.actaastro.2015.04.021.
- Федоров А. В., Хмель Т. А. Численное моделирование формирования ячеистой гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде // Физика горения и взрыва, 2005. Т. 41. № 4. с. 84–98. EDN: NXVFDT.
- Dabora E. K., Weinberger L. P. Present status of detonations in two-phase systems // Acta Astronaut., 1974. Vol. 1. No. 3-4. P. 361–372. doi: 10.1016/0094-5765(74)90103-9.
- Митрофанов В. В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. — Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2003. 200 с.
- Kailasanath K. Recent developments in the research on pulse detonation engines // AIAA J., 2003. Vol. 41. No. 2. P. 145–159.
- Tangirala V., Dean A., Perroomian O., Palaniswamy S. Investigations of two-phase detonations for performance estimations of a pulsed detonation engine. AIAA Paper No. 2007-1173, 2007. doi: 10.2514/6.2007-1173.
- Frolov S. M., Posvyanskii V. S. Detonability of liquid-fuel drop suspensions in air // Explosion dynamics and hazards / Eds. S. M. Frolov, F. Zhang, P. Wolanski. — Moscow: TORUS PRESS, 2010. P. 337–364.
- Meng Q., Zhao M., Xu Y., Zhang L., Zhang H. Structure and dynamics of spray detonation in *n*-heptane droplet–vapor–air mixtures, 2022. 43 p. doi: 10.48550/arXiv.2209.11913.
- Jourdain N., Tsuboi N., Hayashi A. K. Investigation of liquid *n*-heptane/air spray detonation with an Eulerian–

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-23-00364).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», ivanov.vls@gmail.com

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»; Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, smfrol@chph.ras.ru

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, sydra777@gmail.com

- Eulerian model // *Combust. Flame*, 2022. Vol. 244. P. 112278. doi: 10.1016/j.combustflame.2022.112278.
14. Иванов В. С., Фролов С. М. Математическое моделирование перехода горения в детонацию в трубе со спиралью Шелкина и фокусирующим устройством // *Горение и взрыв*, 2010. Т. 3. С. 63–70.
 15. Ivanov V. S., Shamshin I. O., Frolov S. M. Computational study of deflagration-to-detonation transition in a semi-confined slit combustor // *Energies*, 2023. Vol. 16. P. 7028.
 16. Фролов С. М., Аксёнов В. С., Шагин И. О. Переход горения в детонацию в стратифицированной системе кислород – пленка жидкого топлива // *Хим. физика*, 2017. Т. 36. № 6. С. 34–44.
 17. Tannehill J. C., Dale A. A., Pletcher R. H. *Computational fluid mechanics and heat transfer*. — Washington, DC, USA: Taylor and Francis, 1997. 792 p.
 18. Versteeg H. K., Malalasekera W. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. — London: Longman Scientific and Technical, 2007. 696 p.
 19. Dukowicz J. K. *Quasi-steady droplet change in the presence of convection*. — Los Alamos, CA, USA: University of California, 1979. 18 p.
 20. Reitz R. D. Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays // *Atomisation Spray Technology*, 1987. Vol. 3. No. 4. P. 309–337.
 21. Pope S. B. PDF methods for turbulent reactive flows // *Prog. Energ. Combust.*, 1985. Vol. 11. No. 2. P. 119–192.
 22. Frolov S. M., Ivanov V. S. Combined flame tracking particle method for numerical simulation of deflagration-to-detonation transition // *Deflagrative and detonative combustion* / Eds. G. Roy, S. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2010. P. 133–156.
 23. Frolov S. M., Ivanov V. S., Basara B., Suffa M. Numerical simulation of flame propagation and localized preflame autoignition in enclosures // *J. Loss Prevent. Proc.*, 2013. Vol. 26. P. 302–309.
 24. Басевич В. Я., Беляев А. А., Медведев С. Н., Посвянский В. С., Фролов С. М. Кинетические детальный и глобальный механизмы для суррогатного топлива // *Горение и взрыв*, 2015. Т. 8. № 1. С. 21–28.
 25. Benmahammed M. A., Veyssiere B., Khasainov B. A., Mara M. Effect of gaseous oxidizer composition on the detonability of isooctane–air sprays // *Combust. Flame*, 2016. Vol. 165. P. 198–207.
 26. Ivanov V. S., Frolov S. M. Three-dimensional mathematical simulation of two-phase detonation in the system of a gaseous oxidizer with fuel droplets // *Russ. J. Phys. Chem. B*, 2024. Vol. 18. No. 5. P. 1341–1349. doi: 10.1134/S1990793124701112.
 27. Фролов С. М., Поленов А. Н., Гельфанд Б. Е., Борисов А. А. Особенности детонации в системах с произвольными потерями // *Хим. физика*, 1986. Т. 5. № 7. С. 978–988.

Поступила в редакцию 31.05.2024