

# ДЕТОНАЦИЯ В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ «ГАЗООБРАЗНЫЙ ОКИСЛИТЕЛЬ – ЖИДКАЯ ПЛЕНКА ГОРЮЧЕГО»: ТРЕХМЕРНЫЙ РАСЧЕТ\*

В. С. Иванов<sup>1</sup>, С. М. Фролов<sup>2</sup>, И. В. Семенов<sup>3</sup>

**Аннотация:** Представлены результаты многомерных численных расчетов прямого инициирования детонации и перехода горения в детонацию (ПГД) в горизонтальных плоских каналах разной высоты, заполненных газообразным кислородом при нормальных условиях, с нанесенными на нижнюю стенку пленками *n*-гептана и *n*-декана. Показана определяющая роль летучести паров горючего в механизме распространения пленочной детонации. Ведущий механизм распространения детонации в системе с пленкой *n*-гептана — самовоспламенение паров горючего в газовой фазе, а в системе с пленкой *n*-декана — механическое разрушение пленки и испарение образующихся микрокапель с последующим самовоспламенением паров горючего в газовой фазе. Показано, что при ПГД в каналах разной высоты с пленкой *n*-гептана предпламенные вторичные взрывы, приводящие к ПГД, происходят в ударно сжатой смеси кислорода с предиспаренным горючим вблизи лидирующей ударной волны (УВ), но на большом удалении от пленки: в областях с повышенной температурой и повышенным временем пребывания газа. Скорость УВ к моменту ПГД составляет 800–900 м/с, а образующаяся детонационная волна (ДВ) распространяется со скоростью 1300 м/с и выше. При низких энергиях зажигания могут существовать два предельных значения высоты канала — минимальное и максимальное, при которых еще возможен ПГД. Минимальная высота канала определяется потерями количества движения и энергии на стенках, а максимальная — наличием дополнительного механизма выравнивания давления в пламени.

**Ключевые слова:** пленочная детонация; прямое инициирование; переход горения в детонацию; трехмерное математическое моделирование; микрокапли; *n*-гептан; *n*-декан

DOI: 10.30826/CE24170407

EDN: FRQEKY

## Литература

1. Lewis B., Von Elbe G. Combustion flames and explosion of gases. — 2nd ed. — London, U.K.: Academic Press Inc., 1961. 570 p. doi: 10.1016/C2013-0-12402-6.
2. Loison R. Propagation d'une deflagration dans un tube recouvert d'une pellicule d'huile // Comptes Rendus, 1952. Vol. 234. No. 5. P. 512–513.
3. Гордеев В. Е., Комов В. Ф., Трошин Я. К. О детонационном горении гетерогенных систем // Докл. Акад. наук СССР, 1965. Т. 160. № 4. С. 853–856.
4. Комов В. Ф., Трошин Я. К. О структуре и механизме детонации гетерогенных систем // Докл. Акад. наук СССР, 1965. Т. 162. № 1. С. 133–135.
5. Комов В. Ф., Трошин Я. К. О свойствах детонации в некоторых гетерогенных системах // Докл. Акад. наук СССР, 1967. Т. 175. № 1. С. 109–112.
6. Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К. К механизму распространения гетерогенной детонации // Докл. Акад. наук СССР, 1968. Т. 182. № 5. С. 1122–1125.
7. Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К. Взаимодействие ударной волны с пленкой вязкой жидкости // Докл. Акад. наук СССР, 1968. Т. 183. № 3. С. 628–631.
8. Borisov A. A., Kogarko S. M., Lyubimov A. V. Ignition of fuel films behind shock waves in air and oxygen // Combust. Flame, 1968. Vol. 12. No. 5. P. 465–468. doi: 10.1016/0010-2180(68)90059-X.
9. Ragland K. W., Nicholls J. A. Two-phase detonation of a liquid layer // AIAA J., 1969. Vol. 7. No. 5. P. 859–863. doi: 10.2514/3.5236.
10. Bowen J. R., Ragland K. W., Steffes F. J., Loflin T. G. Heterogeneous detonation supported by fuel fogs or films // Symposium (International) on Combustion, 1971. Vol. 13. No. 1. P. 1131–1139. doi: 10.1016/S0082-0784(71)80110-8.
11. Sichel M., Rao C. S., Nicholls J. A. A simple theory for the propagation of film detonations // Symposium (International) on Combustion, 1971. Vol. 13. No. 1. P. 1141–1149. doi: 10.1016/S0082-0784(71)80111-X.

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

<sup>1</sup>Федеральный 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

<sup>2</sup>Федеральный 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», smfrol@chph.ras.ru

<sup>3</sup>Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», iyasemv@yandex.ru

12. *Ragland K. W., Garcia C. F.* Ignition delay measurements in two-phase detonations // *Combust. Flame*, 1972. Vol. 18. No. 1. P. 53–58. doi: 10.1016/0010-2180(72)90032-6.
13. *Rao C. S. R., Sichel M., Nicholls J. A.* A two-dimensional theory for two phase detonation of liquid films // *Combust. Sci. Technol.*, 1972. Vol. 4. No. 1. P. 209–220. doi: 10.1080/00102207108952487.
14. *Fujitsuna Y., Tsugé S.* 1973. On detonation waves supported by diffusion flames: I. The equivalent Chapman–Jouguet condition // *Symposium (International) on Combustion*, 1973. Vol. 14. No. 1. P. 1265–275. doi: 10.1016/S0082-0784(73)80113-4.
15. *Митрофанов В. В., Пинаев А. В.* Спиновая детонация в гетерогенной системе типа газ–пленка // *Докл. Акад. наук СССР*, 1975. Т. 225. № 3. С. 613–616.
16. *Лесняк С. А., Назаров М. А., Сербинов А. И., Трошин Я. К.* О задержке воспламенения во фронте гетерогенной (газ–пленка) детонации // *Физика горения и взрыва*, 1975. № 6. С. 897–903.
17. *Воробьев М. В., Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К.* Неустойчивость границы раздела газ–жидкость за фронтом ударной волны, скользящей вдоль поверхности пленки жидкости // *Докл. Акад. наук СССР*, 1976. Т. 227. № 4. С. 900–903.
18. *Воробьев М. В., Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К.* Разрушение пленки вязкой жидкости потоком ударно сжатого газа // *Докл. Акад. наук СССР*, 1976. Т. 300. № 2. С. 344–346.
19. *Воробьев М. В., Лесняк С. А., Назаров М. А., Трошин Я. К.* Воспламенение гетерогенных (газ–пленка) систем ударными волнами // *Докл. Акад. наук СССР*, 1976. Т. 231. № 1. С. 119–122.
20. *Пинаев А. В.* Структура детонационных волн и зона реакции в гетерогенной системе газ–пленка // *Физика горения и взрыва*, 1977. Т. 13. № 3. С. 408–415. EDN: YPNIII.
21. *Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Шерпанев С. М., Тимофеев Е. И.* О механизме смесеобразования за ударной волной, скользящей по поверхности жидкости // *Физика горения и взрыва*, 1981. № 5. С. 86–93.
22. *Пинаев А. В., Субботин В. А.* О структуре зоны реакции при детонации систем типа газ–пленка // *Физика горения и взрыва*, 1982. Т. 18. № 5. С. 103–111. EDN: YPNIXL.
23. *Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Тимофеев Е. И.* Взаимодействие пленки жидкости с высокоскоростным газовым потоком за ударной волной // *Физика горения и взрыва*, 1984. № 5. С. 107–114.
24. *Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Борисов А. А.* Простая модель детонации в системе газ–пленка с учетом механического уноса горючего // *Физика горения и взрыва*, 1985. № 1. С. 110–117.
25. *Гельфанд Б. Е., Фролов С. М., Поленов А. Н., Цыганов С. А.* Воспламенение пленок горючего за ударными волнами // *Хим. физика*, 1987. Т. 6. № 5. С. 702–706.
26. *Borisov A. A., Mailkov A. E., Kosenkov V. V., Aksenov V. S.* Propagation of gaseous detonations over liquid layers // *Dynamics of detonations and explosions: Detonations / Eds. J.-C. Leyer, A. A. Borisov, A. L. Kuhl, W. A. Sirignano. — Progress in astronautics and aeronautics ser. — Washington, D.C., USA: AIAA, 1991. Vol. 133. P. 268–278.*
27. *Лямин Г. А., Пинаев А. В.* Гетерогенная детонация (газ–пленка) в пористой среде. Область существования и пределы // *Физика горения и взрыва*, 1992. № 5. С. 102–108.
28. *Kobiera A., Wolanski P.* Ignition of liquid and dust fuel layers by gaseous detonation // *Shock Waves*, 2003. Vol. 12. P. 413–419. doi: 10.1007/s00193-002-0174-x.
29. *Rodriguez V., Jourdan G., Marty A., Allou A., Parisse J.-D.* Planar shock wave sliding over a water layer // *Exp. Fluids*, 2016. Vol. 57. P. 125. doi: 10.1007/s00348-016-2217-6.
30. *Rodriguez V., Jourdan G., Marty A., Allou A., Parisse J.-D.* Liquid-surface entrainment induced by shocked air stream // *Shock Waves*, 2019. Vol. 29. P. 361–364. doi: 10.1007/s00193-018-0807-3.
31. *Фролов С. М., Аксёнов В. С., Шамшин И. О.* Переход горения в детонацию в системе газ–пленка жидкого горючего // *Докл. Акад. наук*, 2017. Т. 474. № 4. С. 448–453.
32. *Фролов С. М., Аксёнов В. С., Шамшин И. О.* Переход горения в детонацию в стратифицированной системе кислород–пленка жидкого топлива // *Хим. физика*, 2017. Т. 36. № 6. С. 34–44.
33. *Шамшин И. О., Аксёнов В. С., Фролов С. М.* Переход горения в детонацию в гетерогенной системе «кислород–пленка жидкого *n*-декана» // *Горение и взрыв*, 2017. Т. 10. № 4. С. 36–44.
34. *Фролов С. М., Шамшин И. О., Аксенов В. С., Садыков И. А., Гусев П. А., Зеленский В. А., Евстратов Е. В., Альмов М. И.* Ракетный двигатель с непрерывной пленочной детонацией жидкого горючего // *Докл. Акад. наук*, 2018. Т. 4. № 48. С. 1–5.
35. *Frolov S. M., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Gusev P. A., Zelenskii V. A., Evstratov E. V., Alymov M. I.* Rocket engine with continuously rotating liquid-film detonation // *Combust. Sci. Technol.*, 2020. Vol. 192. No. 1. P. 144–165. doi: 10.1080/00102202.2018.1557643.
36. *Frolov S. M., Shamshin I. O., Aksenov V. S.* Deflagration-to-detonation transition in stratified oxygen–liquid fuel film systems // *Combust. Sci. Technol.*, 2021. doi: 10.1080/00102202.2021.1929196.
37. *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.
38. *Иванов В. С., Фролов С. М., Зангиев А. Э.* Структура детонационной волны в двухфазной системе газообразный окислитель–капли жидкого горючего // *Горение и взрыв*, 2024. Т. 17. № 3. С. 49–61. doi: 10.30826/CE24170305.
39. *Иванов В. С., Фролов С. М.* Трехмерное математическое моделирование детонации в капельной газозвеси нормального гексадекана в воздухе // *Го-*

- рение и взрыв, 2024. Т. 17. № 3. С. 62–73. doi: 10.30826/CE24170306.
40. *Gamezo V. N., Bachman C. L., Oran E. S.* Flame acceleration and DDT in large-scale obstructed channels filled with methane–air mixtures // *P. Combust. Inst.*, 2020. Vol. 38. Iss. 3. P. 3521–3528. doi: 10.1016/j.proci.2020.09.018.
  41. *Jia X., Zhao N., Liu S., Chen X., Zhu W., Zheng H.* Numerical investigation of detonation initiation for low-volatility liquid fuel/air mixtures // *Aerosp. Sci. Technol.*, 2021. Vol. 113. P. 106690. doi: 10.1016/j.ast.2021.106690.
  42. *Фролов С. М.* Ускорение перехода горения в детонацию: от К. И. Щелкина до наших дней // *Физика горения и взрыва*, 2012. Т. 48. № 3. P. 13–24.
  43. *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.
  44. *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.
  45. *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.
  46. *Frolov S. M.* Detonations of liquid sprays and drop suspensions: Theory. — Von Karman Institute for Fluid Mechanics lecture ser. “Liquid fragmentation in high-speed flow”, 2009.
  47. *Нигматулин Р. И.* Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. Ч. 2. 360 с.
  48. *Nigmatulin R. I., Nigmatulin B. I., Khodzhaev Ya. D., Kroshilin V. E.* Entrainment and deposition rates in a dispersed-film flow // *Int. J. Multiphas. Flow*, 1996. Vol. 22. No. 1. P. 19–30.
  49. *Bhattacharya S., Lutfurakhmanov A., Hoey J., Swenson O., Mahmud Z., Akhatov I.* Aerosol flow through a converging-diverging micro-nozzle // *Nonlinear Engineering*, 2013. Vol. 2. doi: 10.1515/nleng-2013-0020.
  50. *Saffman P. G.* The lift on a small sphere in a slow shear flow // *J. Fluid Mech.*, 1965. Vol. 22. P. 385–400.

Поступила в редакцию 12.07.2024