

БЫСТРЫЙ ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В СПИРАЛЕВИДНЫХ ТРУБАХ*

И. О. Шамшин¹, В. С. Аксёнов², М. В. Казаченко³, П. А. Гусев⁴, С. М. Фролов⁵

Аннотация: При проектировании силовых установок нового типа, работающих на детонационном горении топлив, используется концепция «быстрого» перехода горения в детонацию (ПГД): пламя, возникшее от слабого источника зажигания, ускоряется настолько быстро, что ударная волна высокой интенсивности образуется на минимальном расстоянии от источника зажигания, а сама интенсивность ударной волны оказывается достаточной для ее быстрого перевода в детонацию с помощью того или иного дополнительного воздействия. Концепция быстрого ПГД подразумевает принятие специальных мер по организации горения смеси в трубе: необходимо предусмотреть эффективные средства ускорения пламени и ударной волны, образованной пламенем. На новой эталонной импульсно-детонационной трубе (ЭДТ), используемой в работе, благодаря использованию трубы с диаметром, близким к предельному диаметру распространения детонации для воздушных смесей штатных углеводородных горючих, спирали Щёлкина, обеспечивающей быстрое ускорение пламени, и участка спиралевидной трубы с десятью витками, обеспечивающего газодинамическую фокусировку ударной волны, порожденной пламенем, удавалось надежно регистрировать ПГД в воздушных смесях газообразных горючих с существенно различающейся детонационной способностью (ДС) (водород, метан, пропан, этилен и бинарные смеси водород + метан, водород + пропан и водород + этилен) на кратчайших расстояниях и за кратчайшее время.

Ключевые слова: эталонная импульсно-детонационная труба; быстрый переход горения в детонацию; детонационная способность; водород; метан; пропан; этилен; бинарные водородсодержащие горючие

DOI: 10.30826/CE23160304

EDN: VNRLHO

Литература

1. Bone W. A., Fraser R. P. A photographic investigation of flame movements in carbonic oxide – oxygen explosions // Philos. T. Roy. Soc. A, 1929. Vol. 228. P. 197–234. <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsta.1929.0005>.
2. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов. — М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1944. 36 с.
3. Oppenheim A. K. Introduction to gasdynamics of explosions. — Wien – New York: Springer, 1972. 220 p.
4. Шелкин К. И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. — М.: Военное издательство Министерства вооруженных сил СССР, 1949. 196 с.
5. Lindstedt R. P., Michels H. J. Deflagration to detonation transitions and strong deflagrations in alkane and alkene air mixtures // Combust. Flame, 1989. Vol. 76. No. 2. P. 169–181. doi:10.1016/0010-2180(89)90065-5.
6. Sorin R., Zitoun R., Desbordes D. Optimization of the deflagration to detonation transition: Reduction of length and time of transition // Shock Waves, 2006. Vol. 15. No. 2. P. 137–145. doi: 10.1007/s00193-006-0007-4.
7. Theodorczyk A., Lee J. H. S., Knystautas R. Propagation mechanism of quasi-detonations // 22nd Symposium (International) on Combustion Proceedings. — Pittsburgh, PA USA: The Combustion Institute, 1988. P. 1723–1731.
8. Lee J. H. S. The detonation phenomenon. — New York, NY, USA: The Cambridge University Press, 2008. 400 p.
9. Feng X., Huang X. Influence of variable blocking ratio on DDT process // Energies, 2022. Vol. 15. P. 7706. doi: 10.3390/en15207706.
10. Frolov S. M. Initiation of strong reactive shocks and detonation by traveling ignition pulses // J. Loss Prevent.

*Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госконтракт № 13.1902.21.0014-продолжение, соглашение № 075-15-2020-806).

¹Федеральный научный центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН), igor_shamshin@mail.ru

²Федеральный научный центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН); Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», vaksenov@mail.ru

³Федеральный научный центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН), maks71997@gmail.com

⁴Федеральный научный центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН), gusevPA@yandex.ru

⁵Федеральный научный центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН); Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

- Проц., 2006. Vol. 19. Iss. 2-3. P. 238–244.
11. Фролов С. М. Быстрый переход горения в детонацию // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
 12. Фролов С. М., Семенов И. В., Комиссаров П. В., Уткин П. С., Марков В. В. Сокращение длины и времени перехода горения в детонацию в трубе с профилированными регулярными препятствиями // Докл. Акад. наук, 2007. Т. 415. № 4. С. 509–513.
 13. Li J.-M., Teo C. J., Lim K. S., Wen C.-S., Khoo B. C. Deflagration to detonation transition by hybrid obstacles in pulse detonation engines. AIAA Paper No. 2013-3657, 2013. doi: 10.2514/6.2013-3657.
 14. Coates A. M., Mathias D. L., Cantwell B. J. Numerical investigation of the effect of obstacle shape on deflagration to detonation transition in a hydrogen–air mixture // Combust. Flame, 2019. Vol. 209. P. 278–290. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.07.044.
 15. Xiao H., Oran E. S. Flame acceleration and deflagration-to-detonation transition in hydrogen–air mixture in a channel with an array of obstacles of different shapes // Combust. Flame, 2020. Vol. 220. P. 378–393. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.07.013.
 16. Liu Z., Li X., Li M., Xiao H. Flame acceleration and DDT in a channel with fence-type obstacles: Effect of obstacle shape and arrangement // P. Combust. Inst., 2023. Vol. 39. Iss. 3. P. 2787–2796. doi: 10.1016/j.proci.2022.08.046.
 17. Smirnov N. N., Nikitin V. F., Boichenko A. P., Tyurnikov M. V., Baskakov V. V. Deflagration to detonation transition in gases and its application to pulsed detonation devices // Gaseous and heterogeneous detonations: Science to applications / Eds. G. Roy, S. Frolov, K. Kailasanath, N. Smirnov. — Moscow: ENAS Publ., 1999. P. 65–94.
 18. Li T., Wang X., Xu B., Kong F. An efficient approach to achieve flame acceleration and transition to detonation // Phys. Fluids, 2021. Vol. 33. No. 5. P. 056103. doi: 10.1063/5.0048100.
 19. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Аксёнов В. С., Коваль А. С. Переход горения в детонацию в перекрестных высокоскоростных струях топливных компонентов // Докл. Акад. наук, 2017. Т. 47. № 1. С. 59–62.
 20. Wang Y., Fan W., Li S., Zhang Q., Li H. Numerical simulations of flame propagation and DDT in obstructed detonation tubes filled with fluidic obstacles. AIAA Paper No. 2017-2382, 2017.
 21. Peng H., Huang Y., Deiterding R., You Y., Luan Z. Effects of transverse jet parameters on flame propagation and detonation transition in hydrogen–oxygen–argon mixture // Combust. Sci. Technol., 2019. Vol. 193. No. 9. P. 1516–1537. doi: 10.1080/00102202.2019.1700236.
 22. Starikovskaia S. Plasma assisted ignition and combustion // J. Phys. D Appl. Phys., 2006. Vol. 39. P. R265–R299.
 23. Жуков В. П., Стариковский А. Ю. Влияние наносекундного газового разряда на переход горения в детонацию // Физика горения и взрыва, 2006. Т. 42. № 2. С. 80–90. EDN: NXZUOJ.
 24. Gray J. A. T., Lacoste D. A. Enhancement of the transition to detonation of a turbulent hydrogen–air flame by nanosecond repetitively pulsed plasma discharges // Combust. Flame, 2019. Vol. 199. P. 258–266. doi: 10.1016/j.combustflame.2018.10.023.
 25. Ciccarelli G., de Witt B. Detonation initiation by shock reflection from an orifice plate // Shock Waves, 2006. Vol. 15. No. 3-4. P. 259–265. doi: 10.1007/s00193-006-0026-1.
 26. Фролов С. М., Аксенов В. С. Инициирование газовой детонации в трубе с профилированным препятствием // Докл. Акад. наук, 2009. Т. 427. № 3. С. 344–347.
 27. Habicht F. E., Yücel F. C., Gray J. A., Paschereit C. O. Detonation initiation by shock focusing at elevated pressure conditions in a pulse detonation combustor // Int. J. Spray Combust., 2020. Vol. 12. P. 175682772092171. doi: 10.1177/1756827720921718.
 28. Фролов С. М., Шамшин И. О., Медведев С. Н., Дубровский А. В. Инициирование детонации в трубе с профилированным центральным телом // Докл. Акад. наук, 2011. Т. 438. № 5. С. 640–643.
 29. Фролов С. М., Аксенов В. С., Шамшин И. О. Инициирование газовой детонации в трубах с крутыми U-образными поворотами // Докл. Акад. наук, 2007. Т. 417. № 6. С. 1–5.
 30. Frolov S. M., Aksenov V. S., Shamshin I. O. Shock wave and detonation propagation through U-bend tubes // P. Combust. Inst., 2007. Vol. 31. P. 2421–2428.
 31. Фролов С. М., Аксенов В. С., Шамшин И. О. Распространение ударных волн и детонации в каналах с U-образными поворотами предельной кривизны // Хим. физика, 2008. Т. 27. № 10. С. 5–21.
 32. Min-cheol Gwak, Jack J. Yoh, Gwak M., Yoh J.-J. Effect of multi-bend geometry on deflagration to detonation transition of a hydrocarbon–air mixture in tubes // Int. J. Hydrogen Energ., 2013. Vol. 38. No. 26. P. 11446–11457. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.06.108.
 33. Zheng H., Zhu W., Jia X., Zhao N. Eulerian–Lagrangian modeling of deflagration to detonation transition in *n*-decane/oxygen/nitrogen mixtures // Phys. Fluids, 2022. Vol. 34. P. 126110. doi: 10.1063/5.0125327.
 34. Pan Z., Zhang Z., Yang H., Gui M., Zhang P., Zhu Y. Experimental and numerical investigation on flame propagation and transition to detonation in curved channel // Aerosp. Sci. Technol., 2021. Vol. 118. P. 107036. doi: 10.1016/j.ast.2021.107036.
 35. Gai J., Qiu H., Xiong C., Huang Z. Experimental investigation on the propagation process of combustion wave in the annular channel filled with acetylene–air/oxygen mixture // Flow Turbul. Combust., 2022. Vol. 108. P. 797–817. doi: 10.1007/s10494-021-00301-x.
 36. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. Optimization study of spray detonation initiation by electric discharge // Shock Waves, 2005. Vol. 14. No. 3. P. 175–186.
 37. Фролов С. М., Аксенов В. С., Басевич В. Я. Инициирование гетерогенной детонации в трубах с витками и спиралью Щёлкина // Теплофизика высоких температур, 2006. Т. 44. № 2. С. 285–292.

38. Фролов С. М., Аксенов В. С. Переход горения в детонацию в керосино-воздушной смеси // Докл. Акад. наук, 2007. Т. 416. № 3. С. 356–359.
39. Frolov S. M., Semenov I. V., Ahmedyanov I. F., Markov V. V. Shock-to-detonation transition in tube coils // 26th Symposium (International) on Shock Waves / Eds. K. Hannemann, F. Seiler. — Berlin–Heidelberg: Springer, 2009. Vol. 1. P. 365–370.
40. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. Detonation initiation by controlled triggering of electric discharges // J. Propul. Power, 2003. Vol. 19. No. 4. P. 573–580.
41. Фролов С. М., Басевич В. Я., Аксенов В. С., Полихов С. А. Иницирование газовой детонации бегущим импульсом принудительного зажигания // Докл. Акад. наук, 2004. Т. 394. № 2. С. 222–224.
42. Фролов С. М., Басевич В. Я., Аксенов В. С., Полихов С. А. Иницирование газовой детонации бегущим импульсом зажигания // Хим. физика, 2004. Т. 23. № 4. С. 61–67.
43. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. Spray detonation initiation by controlled triggering of electric discharges // J. Propul. Power, 2005. Vol. 21. No. 1. P. 54–64.
44. Ciccarelli G., Johansen C., Hickey M. Flame acceleration enhancement by distributed ignition points // J. Propul. Power, 2005. Vol. 21. No. 6. P. 1029–1034. doi: 10.2514/1.14425.
45. Фролов С. М., Аксенов В. С., Басевич В. Я. Иницирование детонации при взаимодействии ударной волны с зоной форкамерно-факельного зажигания // Докл. Акад. наук, 2006. Т. 410. № 1. С. 70–74.
46. Frolov S. M., Aksenov V. S., Basevich V. Y. Shock-to-detonation transition due to shock interaction with prechamber-jet cloud // 26th Symposium (International) on Shock Waves / Eds. K. Hannemann, F. Seiler. — Berlin–Heidelberg: Springer, 2009, Vol. 1. P. 359–364.
47. Фролов С. М., Звезгинцев В. И., Аксёнов В. С., Билера И. В., Казаченко М. В., Шамшин И. О., Гусев П. А., Белоцерковская М. С., Коверзанова Е. В. Детонационная способность воздушных смесей продуктов пиролиза полипропилена // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 4. С. 44–60. doi: 10.30826/CE18110406.
48. Фролов С. М., Шамшин И. О., Аксёнов В. С., Казаченко М. В., Гусев П. А. Ранжирование газовых топливно-воздушных смесей по их детонационной способности с помощью эталонной импульсно-детонационной трубы // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 3. С. 78–90. doi: 10.30826/CE19120309.
49. Фролов С. М., Звезгинцев В. И., Шамшин И. О., Казаченко М. В., Аксёнов В. С., Билера И. В., Семенов И. В. Детонационная способность воздушных смесей продуктов пиролиза полиэтилена // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 2. С. 48–61. doi: 10.30826/CE20130206.
50. Frolov S. M., Zvegintsev V. I., Aksenov V. S., Bilera I. V., Kazachenko M. V., Shamshin I. O., Gusev P. A., Belotserkovskaya M. S. Detonability of fuel–air mixtures // Shock Waves, 2020. doi: 10.1007/s00193-020-00966-9.
51. Frolov S. M., Shamshin I. O., Kazachenko M. V., Aksenov V. S., Bilera I. V., Ivanov V. S., Zvegintsev V. I. Polyethylene pyrolysis products: Their detonability in air and applicability to solid-fuel detonation ramjets // Energies, 2021. Vol. 14. P. 820. doi: 10.3390/en14040820.
52. Шамшин И. О., Казаченко М. В., Фролов С. М., Басевич В. Я. Переход горения в детонацию в воздушных смесях метановодородного горючего // Горение и взрыв, 2020. Т. 13. № 3. С. 60–75. doi: 10.30826/CE20130306.
53. Shamshin I. O., Kazachenko M. V., Frolov S. M., Basevich V. Ya. Deflagration-to-detonation transition in stoichiometric mixtures of the binary methane–hydrogen fuel with air // Int. J. Hydrogen Energ., 2021. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.209.
54. Шамшин И. О., Казаченко М. В., Фролов С. М., Басевич В. Я. Переход горения в детонацию в воздушных смесях пропановодородного горючего // Горение и взрыв, 2021. Т. 14. № 2. С. 8–25. doi: 10.30826/CE21140202.
55. Shamshin I. O., Kazachenko M. V., Frolov S. M., Basevich V. Y. Deflagration-to-detonation transition in stoichiometric propane–hydrogen–air mixtures // Fuels, 2022. Vol. 3. P. 667–681. doi: 10.3390/fuels3040040.
56. Шамшин И. О., Казаченко М. В., Фролов С. М., Басевич В. Я. Переход горения в детонацию в воздушных смесях этиленоводородного горючего // Горение и взрыв, 2021. Т. 14. № 2. С. 26–39. doi: 10.30826/CE21140203.
57. Shamshin I. O., Kazachenko M. V., Frolov S. M., Basevich V. Ya. Transition of deflagration to detonation in ethylene–hydrogen–air mixtures // Int. J. Hydrogen Energ., 2022. Vol. 17. Iss. 37. P. 16676–16685. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.158.
58. Frolov S. M., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Ivanov V. S., Vlasov P. A. Ion sensors for pulsed and continuous detonation combustors // Chemosensors, 2023. Vol. 11. No. 33. 20 p. doi: 10.3390/chemosensors11010033.
59. Борисов А. А., Лобань С. А. Пределы детонации углеводородно-воздушных смесей в трубах // Физика горения и взрыва, 1977. № 5. С. 729–733.
60. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Лобань С. А., Маилков А. Е., Хомик С. В. Исследование пределов детонации топливно-воздушных смесей в гладких и шероховатых трубах // Хим. физика, 1982. № 6. С. 848–853.
61. Неттлетон М. Детонация в газах / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. 280 с. (Nettleton M. A. Gaseous detonations: Their nature, effects and control. — London — New York: Chapman and Hall, 1987. 255 p.)

Поступила в редакцию 19.02.2023