

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ ЭТИЛЕНОВОДОРОДНОГО ГОРЮЧЕГО*

И. О. Шамшин¹, М. В. Казаченко², С. М. Фролов³, В. Я. Басевич⁴

Аннотация: Предложенный ранее экспериментальный способ оценки детонационной способности (ДС) топливно-воздушных смесей (ТВС), основанный на измерении расстояния и времени перехода горения в детонацию (ПГД) в эталонной импульсно-детонационной трубе (ЭДТ), использован для исследования ПГД в ТВС на основе этиленоводородного горючего с объемной долей водорода от 0 до 1 в одинаковых термодинамических и газодинамических условиях. На основе известных данных по горению и самовоспламенению такого горючего ожидалось, что с ростом объемной доли водорода расстояние и время ПГД должны монотонно уменьшаться, а соответствующие зависимости должны быть близки к линейным. Вопреки ожиданиям, полученные зависимости оказались нелинейными. Анализ результатов позволяет утверждать, что наблюдаемые зависимости — это проявление физико-химических свойств исследуемых ТВС. Изменение конструкции секции ускорения пламени в детонационной трубе в целом не влияет на характер полученных зависимостей: они остаются нелинейными.

Ключевые слова: этиленоводородное горючее; топливно-воздушная смесь; детонационная способность; эталонная импульсно-детонационная труба; переход горения в детонацию

DOI: 10.30826/CE21140203

Литература

1. 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.
2. 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.
3. Соколик А. С., Щёлкин К. И. Распространение пламени в смесях метана с кислородом в закрытых трубах // Ж. физ. химии, 1933. Т. 4. № 1. С. 109–128.
4. Соколик А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. 422 с.
5. Lee J. H. S. The detonation phenomenon. — New York, NY, USA: The Cambridge University Press, 2008. 400 p.
6. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е. О предельном диаметре распространения газовой детонации в трубах // Докл. АН СССР, 1990. Т. 312. № 5. С. 1177–1180.
7. 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.
8. 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. Vol. 30. P. 721–739. doi: 10.1007/s00193-020-00966-9.
9. Egolfopoulos F. N., Zhu D. L., Law C. K. Experimental and numerical determination of laminar flame speeds: Mixtures of C₂-hydrocarbons with oxygen and nitrogen // Proc. Symposium (International) on Combustion, 1990. Vol. 23. P. 471–478.
10. Hassan M. I., Aung K. T., Kwon O. C., Faeth G. M. Properties of laminar premixed hydrocarbon/air flames at various pressures // J. Propul. Power, 1998. Vol. 14. P. 479–488.
11. Hirasawa T., Sung C. J., Joshi A., Yang Z., Wang H., Law C. K. Determination of laminar flame speeds using digital particle image velocimetry: Binary fuel blends of ethylene, n-butane, and toluene // P. Combust. Inst., 2002. Vol. 29. P. 1427–1433.
12. Jomaas G., Zheng X. L., Zhu D. L., Law C. K. Experimental determination of counterflow ignition temperatures and laminar flame speeds of C₂–C₃ hydrocarbons at atmospheric and elevated pressures // P. Combust. Inst., 2005. Vol. 30. P. 193–200.

*Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2016-0011 (номер государственной регистрации АААА-А17-117040610346-5), и субсидии, выделенной ИСМАН для выполнения государственного задания (тема 45.2).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, igor_shamshin@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, maksx71997@gmail.com

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А. Г. Мержанова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, basevichv@yandex.ru

13. Kumar K., Mittal G., Sung C. J., Law C. K. An experimental investigation of ethylene/O₂/diluent mixtures: Laminar flame speeds with preheat and ignition delays at high pressures // *Combust. Flame*, 2008. Vol. 153. P. 343–354.
14. Liu W., Kelley A. P., Law C. K. Flame propagation and counterflow nonpremixed ignition of mixtures of methane and ethylene // *Combust. Flame*, 2010. Vol. 157. P. 1027–1036.
15. Ranzi E., Frassoldati A., Grana R., Cuoci A., Faravelli T., Kelley A. P., Law C. K. Hierarchical and comparative kinetic modeling of laminar flame speeds of hydrocarbon and oxygenated fuels // *Prog. Energ. Combust.*, 2012. Vol. 38. P. 468–501. doi: 10.1016/j.pecs.2012.03.004.
16. Dowdy D. R., Smith D. B., Taylor S. C., Williams A. The use of expanding spherical flames to determine burning velocities and stretch effects in hydrogen/air mixtures // 23th Symposium (International) on Combustion Proceedings. — Pittsburgh, PA, USA: The Combustion Institute, 1991. Vol. 23. No. 1. P. 325–332. doi: 10.1016/S0082-0784(06)80275-4.
17. Kwon O. C., Tseng L.-K., Faeth G. M. Laminar burning velocities and transition to unstable flames in H₂/O₂/N₂ and C₃H₈/O₂/N₂ mixtures // *Combust. Flame*, 1992. Vol. 90. No. 3–4. P. 230–246 doi: 10.1016/0010-2180(92)90085-4.
18. Tse S. D., Zhu D. L., Law C. K. Morphology and burning rates of expanding spherical flames in H₂/O₂/inert mixtures up to 60 atmospheres // *P. Combust. Inst.*, 2000. Vol. 28. No. 2. P. 1793–1800. doi: 10.1016/S0082-0784(00)80581-0.
19. Wu F., Kelley A. P., Zhu D. L., Law C. K. Further study on effects of hydrogen addition on laminar flame speeds of fuel–air mixtures // 7th U.S. National Combustion Meeting Proceedings. — Atlanta, GA, USA, 2011. P. 1336–1353.
20. Liu B., He G.-Q., Qin F. Simulation of supersonic ethylene–hydrogen and air auto-ignition flame using skeletal mechanism // *Acta Astronaut.*, 2018. Vol. 152. P. 521–533. doi: 10.1016/j.actaastro.2018.08.046.
21. Schwer D. A., Kailasanath K. Towards an assessment of rotating detonation engines with fuel blends. AIAA Paper No. 2017-4942. doi: 10.2514/6.2017-4942.
22. 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. No. 6. P. 545–672. doi: 10.1016/j.pecs.2004.05.001.
23. George A. St., Driscoll R., Anand V., Munday D., Gutmark E. J. Fuel blending as a means to achieve initiation in a rotating detonation engine. AIAA Paper No. 2015-0633. doi: 10.2514/6.2015-0633.
24. Sato T., Raman V. Detonation structure in ethylene/air based non-premixed rotating detonation engine. AIAA Paper No. 2019-2023. doi: 10.2514/6.2019-2023.
25. Knisely A. M., Hoke J., Schumaker S. A. Experimental analysis of ethylene/hydrogen fuel blend detonations. AIAA Paper No. 2020-1170. doi: 10.2514/6.2020-1170.
26. Meyer J. W., Urtiew P. A., Oppenheim A. K. On the inadequacy of gasdynamic processes for triggering the transition to detonation // *Combust. Flame*, 1970. Vol. 14. P. 13–20.
27. Шелкин К. И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. — М.: Воениздат, 1949.

Поступила в редакцию 14.05.2021