

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ВОЗДУШНЫХ СМЕСЯХ ПРОПАНОВОДОРОДНОГО 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 стехиометрических ТВС на основе пропановодородного и метановодородного горючих с объемной долей водорода от 0 до 1 в одинаковых термодинамических и газодинамических условиях. На основе известных данных по горению и самовоспламенению таких горючих 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, а в некоторых случаях — немонотонными: на них наблюдаются локальные максимумы. 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, хотя немонотонность может вырождаться. Подобно другим критическим явлениям в химической кинетике немонотонность может проявляться лишь вблизи критических условий, а при удалении от критических условий она сглаживается или подавляется другими доминирующими эффектами.

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

DOI: 10.30826/CE21140202

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. Соколик А. С., Шёлкин К. И. Распространение пламени в смесях метана с кислородом в закрытых трубах // Ж. физ. химии, 1933. Т. 4. № 1. С. 109–128.
3. Соколик А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. 422 с.
4. Lee J. H. S. The detonation phenomenon. — New York, NY, USA: The Cambridge University Press, 2008. 400 p.
5. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е. О предельном диаметре распространения газовой детонации в трубах // Докл. Акад. наук СССР, 1990. Т. 312. № 5. С. 1177–1180.
6. 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.
7. 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.
8. Metghalchi M., Keck J. C. Laminar burning velocity of propane–air mixtures at high temperature and pressure // Combust. Flame, 1980. Vol. 38. P. 143–154. doi: 10.1016/0010-2180(80)90046-2.
9. Bosschaart K. J., de Goey L. P. H., Burgers J. M. The laminar burning velocity of flames propagating in mixtures of hydrocarbons and air measured with the heat flux method // Combust. Flame, 2004. Vol. 136. No. 3. P. 261–269.
10. Marley S. K., Roberts W. L. Measurements of laminar burning velocity and Markstein number using high-speed chemiluminescence imaging // Combust. Flame, 2005.

*Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2019-0006 (номер государственной регистрации АААА-А21-121011990037-8), и субсидии, выделенной ИСМАН для выполнения государственного задания (тема 45.2). Авторы признательны И. В. Билере за помощь с хроматографическим анализом состава природного газа.

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

- Vol. 141. No. 4. P. 473–477. doi: 10.1016/j.combustflame.2005.02.011.
11. Huzayyin A. S., Moneib H. A., Shehatta M. S., Attia A. M. A. Laminar burning velocity and explosion index of LPG–air and propane–air mixtures // *Fuel*, 2008. Vol. 87. P. 39–57. doi: 10.1016/j.fuel.2007.04.001.
12. Akram M., Ratna Kishore V., Kumar S. Laminar burning velocity of propane/CO₂/N₂–air mixtures at elevated temperatures // *Energ. Fuel.*, 2012. Vol. 26. P. 5509–5518. doi: 10.1021/ef301000k.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Penyazkov O. G., Ragotner K. A., Dean A. J., Varatharajan B. Autoignition of propane–air mixtures behind reflected shock waves // *P. Combust. Inst.*, 2005. Vol. 30. P. 1941–1947. doi: 10.1016/j.proci.2004.08.122.
17. Gallagher S. M., Curran H. J., Metcalfe W. K., Healy D., Simmie J. M., Bourque G. A rapid compression machine study of the oxidation of propane in the negative temperature coefficient regime // *Combust. Flame*, 2008. Vol. 153. P. 316–333. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.09.004.
18. Cheng R. K., Oppenheim A. K. Autoignition in methane–hydrogen mixtures // *Combust. Flame*, 1984. Vol. 58. P. 125–139. doi: 10.1016/0010-2180(84)90088-9.
19. Kéromnès A., Metcalfe W. K., Heufer K. A., Donohoe N., Das A. K., Sung C.-J., Herzler J., Naumann C., Griebel P., Mathieu O., Krejci M. C., Petersen E. L., Pitz W. J., Curran H. J. An experimental and detailed chemical kinetic modeling study of hydrogen and syngas mixture oxidation at elevated pressures // *Combust. Flame*, 2013. Vol. 160. No. 6. P. 995–1011. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.01.001.
20. Milton B. E., Keck J. C. Laminar burning velocities in stoichiometric hydrogen and hydrogen–hydrocarbon gas mixtures // *Combust. Flame*, 1984. Vol. 58. No. 1. P. 13–22. doi: 10.1016/0010-2180(84)90074-9.
21. Yu G., Law C. K., Wu C. K. Laminar flame speeds of hydrocarbon–air mixtures with hydrogen addition // *Combust. Flame*, 1986. Vol. 63. No. 3. P. 339–347.
22. Law C. K., Kwon O. C. Effects of hydrocarbon substitution on atmospheric hydrogen–air flame propagation // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2004. Vol. 29. No. 8. P. 867–79. doi: 10.1016/j.ijhydene.2003.09.012.
23. Tang C., Huang Z., Jin C., He J., Wang J., Wang X., Miao H. Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane–hydrogen–air premixed flames // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2008. Vol. 33. P. 4906–4914. doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.06.063.
24. Zhen H. S., Cheung C. S., Leung C. W., Choy Y. S. Effects of hydrogen concentration on the emission and heat transfer of a premixed LPG–hydrogen flame // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2012. Vol. 37. No. 7. P. 6097–6105.
25. Titova N. S., Kuleshov P. S., Favorskii O. N., Starik A. M. The features of ignition and combustion of composite propane–hydrogen fuel: Modeling study // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2014. Vol. 39. No. 12. P. 6764–6773. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.01.211.
26. Man X., Tang C., Wei L., Pan L., Huang Z. Measurements and kinetic study on ignition delay times of propane/hydrogen in argon diluted oxygen // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2013. Vol. 38. P. 2523–2530. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.020.
27. Sevrouk K. L., Krivosheyev P. N., Penyazkov O. G., Torohov S. A., Titova N. S., Starik A. M. Numerical and experimental analysis of propane–hydrogen mixture ignition in air // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2016. Vol. 774. P. 012083. doi: 10.1088/1742-6596/774/1/012083.
28. 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.
29. Басевич В. Я., Медведев С. Н., Фролов Ф. С., Фролов С. М. Промотирование высокотемпературного самовоспламенения воздушных смесей водорода и метана нормальными алканами // *Хим. физика*, 2015. Т. 34. № 3. С. 57–61.
30. 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.
31. Семенов Н. Н. Цепные реакции. — Л.: Госхимтехиздат, 1934.
32. Lee J. H. S., Knystautas R., Freiman A. High speed turbulent deflagrations and transition to detonation in H₂–air mixtures // *Combust. Flame*, 1984. Vol. 56. P. 227–239.
33. Щелкин К. И. Быстрое горение и спиновая детонация газов / Под ред. Н. Н. Семенова. — М.: Воениздат, 1949. 196 с.
34. Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Фролов С. М. Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C₁–C₁₀ к C₁₁–C₁₆ // *Хим. физика*, 2013. Т. 32. № 4. С. 87–96. doi: 10.7868/S0207401X13040031.

Поступила в редакцию 14.05.2021