

# ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА НОРМАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ\*

А. В. Арутюнов<sup>1</sup>, А. А. Беляев<sup>2</sup>, И. Н. Иновенков<sup>3</sup>, В. С. Арутюнов<sup>4</sup>

**Аннотация:** Скорость ламинарного пламени стехиометрических смесей метан–водород–воздух в диапазоне начальных температур 300–600 К определена путем кинетического моделирования процесса. Показано, что современные кинетические модели адекватно описывают такие пламена. При низких концентрациях водорода  $[H_2] < 50\%$  удовлетворительное описание может быть получено даже в рамках простого глобального механизма. В исследованном диапазоне начальных температур при концентрации водорода в смеси менее 50% его присутствие слабо сказывается на скорости ламинарного пламени. Однако по мере увеличения начальной температуры влияние водорода на скорость пламени проявляется при более низких концентрациях водорода.

**Ключевые слова:** метан; водород; нормальная скорость пламени

DOI: 10.30826/CE19120401

## Литература

1. Арутюнов В. С., Беляев А. А., Трошин К. Я., Арутюнов А. В., Царенко А. А., Никитин А. В. Об использовании метан–водородных смесей в ДВС // НефтеГазХимия, 2019. № 3.
2. Трошин К. Я., Борисов А. А., Рахметов А. Н., Арутюнов В. С., Политенкова Г. Г. Скорость горения метан–водородных смесей при повышенных давлениях и температурах // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 5. С. 76–87.
3. Sholte T. G., Vaags P. B. Burning velocities of mixtures of hydrogen, carbon monoxide and methane with air // Combust. Flame, 1959. Vol. 3. P. 511–524.
4. Milton B. E., Keck J. C. Laminar burning velocities in stoichiometric hydrogen and hydrogen–hydrocarbon gas mixtures // Combust. Flame, 1984. Vol. 58. P. 13–22.
5. Yu G., Law C. K., Wu C. K. Laminar flame speeds of hydrocarbon + air mixtures with hydrogen addition // Combust. Flame, 1986. Vol. 63(3). P. 339–347.
6. Halter F., Chauveau C., Djebaili-Chaumeix N., Gokalp I. Characterization of the effects of pressure and hydrogen concentration on laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures // P. Combust. Inst., 2005. Vol. 30. P. 201–208.
7. Hermanns R. T. E. Laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures / Proefschrift. — Technische Universiteit Eindhoven, 2007. 150 p. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200711972.pdf>.
8. Burluka A. A., Fairweather M., Ormsby M. P., Sheppard C. G. W., Woolley R. The laminar burning properties of premixed methane–hydrogen flames determined using a novel analysis method // 3rd European Combust. Meeting, 2007.
9. Hu E., Huang Z., He J., Jin Ch., Zheng J. Experimental and numerical study of laminar burning characteristics of premixed methane–hydrogen–air flames // Int. J. Hydrogen Energ., 2009. Vol. 34. P. 4876–4888.
10. Dirrenberger P., Le Gall H., Bounaceur R., Herbinet O., Glaude P.-A., Konnov A., Battin-Leclerc F. Measurements of laminar flame velocity for components of natural gas // Energ. Fuel., 2011. Vol. 25(9). P. 3875–3884.
11. Goswami M., Derks S., Coumans K., de Anderade Olivera M. H., Konnov A. A., Bastiaans R. J. M., Luijten C. C. M., de Goeij P. H. Effect of elevated pressures on laminar burning velocity of methane + air mixtures // 23rd ICEDERS. — Irvine, CA, USA, 2011.
12. Moccia V., D'Alessio J. Burning behaviour of high-pressure  $CH_4-H_2$ –air mixtures // Energies, 2013. Vol. 6. P. 97–116.
13. Gockeler K., Albin E., Kruger O., Paschereit C. O. Burning velocities of hydrogen–methane–air mixtures at highly steam-diluted conditions // 4th Conference (International)

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-31-90022\19 «Аспиранты».

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, aarutyunov@gmail.com

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, belyaevIHF@yandex.ru

<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, inov@cs.msu.ru

<sup>4</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, arutyunov@chph.ras.ru

- al) on Jets, Wakes and Separated Flows. — Nagoya, Japan, 2013.
14. Donohoe N., Heufer A., Metcalfe W.K., Curran H.J., Davis M.L., Mathieu O., Plichta D., Morones A., Petersen E.L., Guthe F. Ignition delay times, laminar flame speeds, and mechanism validation for natural gas/hydrogen blends at elevated pressures // *Combust. Flame*, 2014. Vol. 161. P. 1432–1443.
15. Okafor E.C., Hayakawa A., Nagano Yu., Kitagawa T. Effects of hydrogen concentration on premixed laminar flames of hydrogen–methane–air // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2014. Vol. 39. P. 2409–2417.
16. Healy D., Kalitan D.M., Aul C.J., Petersen E.L., Bourque G., Curran H.J. Oxidation of C<sub>1</sub>–C<sub>5</sub> alkane quaternary natural gas mixtures at high pressures // *Environ. Fuel.*, 2010. Vol. 24. No. 3. P. 1521–1528.
17. Combustion Chemistry Center at NUI Galway: Database Mechanism of Natural Gas (including C<sub>5</sub>) Oxidation. [http://c3.nuigalway.ie/media/researchcentres/combustionchemistrycentre/files/mechanismdownloads/nc5\\_49\\_mech.dat](http://c3.nuigalway.ie/media/researchcentres/combustionchemistrycentre/files/mechanismdownloads/nc5_49_mech.dat).
18. Никитин А. В., Трошин К. Я., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Кирюшин А. А., Арутюнов В. С. Газомоторное топливо из попутного нефтяного газа. Селективный окискрекинг тяжелых компонентов ПНГ // *Нефте-ГазоХимия*, 2018. № 3. С. 22–34.
19. Kee R.J., Rupley F.M., Meeks E., Miller J.A. CHEMKIN III. Livermore, CA, USA: Sandia National Laboratories, 1996. Technical Report No. SAND96-8216.
20. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. «Глобальные» кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений. Ч. I. Основной химический процесс тепловыделения // *Хим. физика*, 1998. Т. 17. № 9. С. 112–128.
21. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. «Глобальные» кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений. Ч. II. Образование окиси азота // *Хим. физика*, 1998. Т. 17. № 10. С. 71–79.
22. Козаченко Л. С. Исследование зависимости скорости распространения пламени от физико-химических свойств топлива и аэродинамики течения газа: Дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. — М.: ИХФ АН СССР, 1954.
23. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах / Пер. с англ. — М.: Мир, 1968. 592 с. (Lewis B., von Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases. — New York, NY, USA: Academic Press, 1961. 731 p.)
24. Iijima T., Takeno T. Effects of temperature and pressure on burning velocity // *Combust. Flame*, 1986. Vol. 65. No. 1. P. 35–43.
25. Shebeko Yu. N., Tsarichenko S. G., Korolchenko A. Ya., Trunov A. V., Navzenya V. Yu., Parkov S. N. Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures // *Combust. Flame*, 1995. Vol. 102. No. 4. P. 427–437.
26. Zabetakis M.G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors // Washington, D.C., USA: U.S. Bureau of Mines, 1965. No. 627.
27. Gu X. J., Haq M. Z., Lawes M., Woolley R. Laminar burning velocity and Markstein lengths of methane–air mixtures // *Combust. Flame*, 2000. Vol. 121. No. 1-2. P. 41–58.
28. Heimel S. Effect of initial mixture temperature on burning velocity of hydrogen–air mixtures with preheating and simulated preburning. NACA TN 4156, 1957.

Поступила в редакцию 08.10.19