

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ МЕТАНОВОДОРОДНЫХ СМЕСЕЙ С ВОЗДУХОМ*

К. Я. Трошин¹, А. А. Беляев², А. В. Арутюнов³, А. А. Царенко⁴, А. В. Никитин⁵,
В. С. Арутюнов⁶

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования методом статического перепускного реактора и кинетическое моделирование задержки самовоспламенения стехиометрических смесей метан–водород–воздух различного состава в диапазонах $T_0 = 700–1000$ К и $P_0 = 1–15$ атм, соответствующих возможности возникновения нежелательного самовоспламенения в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием. Установлено, что невысокие, менее 50%, добавки водорода к метану не оказывают существенного влияния на воспламенение таких смесей, т. е. на их стойкость к возникновению детонационных режимов горения. Показано сильное различие в поведении смесей с высоким и низким содержанием водорода, являющееся следствием существенных различий в низкотемпературных ($T < 900$ К) механизмах воспламенения и окисления метана и водорода. В области $T_0 = 800–1000$ К для смесей с содержанием водорода менее 50% увеличение давления монотонно снижает задержку воспламенения. Для смесей с высоким содержанием водорода эта зависимость становится немонотонной с максимумом при $P_0 \approx 3$ атм: увеличение давления до 3 атм приводит к увеличению задержки самовоспламенения, а при дальнейшем повышении давления задержка самовоспламенения начинает монотонно снижаться.

Keywords: метан; водород; задержка самовоспламенения; двигатель внутреннего сгорания

DOI: 10.30826/CE20130102

Литература

1. Кириллов В. А., Кузин Н. А., Киреевков В. В., Амосов Ю. И., Бурцев В. А., Емельянов В. К., Собянин В. А., Пармон В. Н. Применение синтез-газа в качестве добавки к основному топливу в транспортных средствах: состояние и перспективы // ТОХТ, 2011. Т. 45. № 2. С. 139–154.
2. Кириллов В. А., Шигаров А. Б., Кузин Н. А., Киреевков В. В., Амосов Ю. И., Самойлов А. В., Бурцев В. А. Термохимическое преобразование топлив в водородсодержащий газ за счет рекуперированного тепла двигателей внутреннего сгорания // ТОХТ, 2013. Т. 47. № 5. С. 503–517.
3. Spadaccini L. J., Colket M. B. III. Ignition delay characteristics of methane fuels // Prog. Energ. Combust., 1994. Vol. 20. P. 431–460.
4. Levinsky H. B., Gersen S., Rothink M. H., van Dijk G. H. J. Progress towards a method for ranking gases for knock resistance using ignition delay times // European Combustion Meeting Proceedings. — Vienna, Austria: Vienna University of Technology, 2009. <https://www.tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMA20100503520/Progress-towards-a-method-for-ranking-gases-for/>.
5. Burcat A., Scheller K., Lifshitz A. Shock-tube investigation of comparative ignition delay times for $C_1–C_5$ alkanes // Combust. Flame, 1971. Vol. 16. P. 29–33.
6. Lamoureux N., Paillard C.-E. Natural gas ignition delay times behind reflected shock waves: Application to modeling and safety // Shock Waves, 2003. Vol. 13. P. 57–68.
7. Медведев С. П., Гельфанд Б. Е., Хомик С. В., Агафонов Г. Л. Компрессионное воспламенение водородсодержащих смесей в ударных трубах // Инженерно-физический ж., 2010. Т. 83. № 6. С. 1104–1110.

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук. Темы № 47.16 ФИЦ ХФ РАН (номер госрегистрации АААА-А20-120020590084-9) и 0089-2019-0018 ИПХФ РАН (номер госрегистрации АААА-А19-119022690098-3).

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, troshin@chph.ras.ru

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

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, arutyunovv@gmail.com

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, aleksey.spitsin@phystech.edu

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Институт проблем химической физики Российской академии наук; ni_kit_lin@rambler.ru

⁶Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Институт проблем химической физики Российской академии наук; факультет фундаментальной физико-химической инженерии МГУ им. М. В. Ломоносова; arutyunov@chph.ras.ru

8. Westbrook C. K., Sjöberg M., Cernansky N. P. A new chemical kinetic method of determining RON and MON values for single component and multicomponent mixtures of engine fuels // *Combust. Flame*, 2018. Vol. 195. P. 50–62.
9. Gersen S., Darmeveil H., Levinsky H. The effects of CO addition on the autoignition of H₂, CH₄ and CH₄/H₂ fuels at high pressure in an RCM // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. P. 3472–3475.
10. Goldsborough S. S., Hochgreb S., Vanhove G., Wooldridge M. S., Curran H., Chih-Jen Sung. Advances in rapid compression machine studies of low- and intermediate-temperature autoignition phenomena // *Prog. Energ. Combust.*, 2017. Vol. 63. P. 1–78.
11. Трошин К. Я., Никитин А. В., Борисов А. А., Арутюнов В. С. Экспериментальное исследование воспламенения бинарных смесей метана с добавками алканов C₃–C₅ в воздухе // *Горение и взрыв*, 2015. Т. 8. № 1. С. 42–49.
12. Трошин К. Я., Никитин А. В., Борисов А. А., Арутюнов В. С. Определение задержек самовоспламенения метановоздушных смесей с добавками алканов C₂–C₅ // *Горение и взрыв*, 2016. Т. 9. № 2. С. 23–30.
13. Трошин К. Я., Никитин А. В., Борисов А. А., Арутюнов В. С. Низкотемпературное воспламенение в воздухе бинарных смесей метана с алканами C₃–C₅ // *Физика горения и взрыва*, 2016. Т. 52. № 4. С. 15–23.
14. Трошин К. Я., Никитин А. В., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Кирюшин А. А., Арутюнов В. С. Экспериментальное определение задержки самовоспламенения смесей метана с легкими алканами // *Физика горения и взрыва*, 2019. Т. 55. № 5. С. 17–24.
15. Борисов А. А., Трошин К. Я., Скачков Г. И., Колбановский Ю. А., Билера И. В. Влияние добавок водорода на самовоспламенение богатых кислородных метан-пропановых смесей // *Хим. физика*, 2014. Т. 33. № 12. С. 45–48.
16. Арутюнов В. С., Беляев А. А., Трошин К. Я., Арутюнов А. В., Царенко А. А., Никитин А. В. Об использовании метан-водородных смесей в двигателях внутреннего сгорания // *НефтеГазХимия*, 2019. № 3-4. С. 5–17. doi: 10.24411/2310-8266-2019-10401.
17. 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.
18. Healy D., Kalitan D. M., Aul C. J., Petersen E. L., Bourque G., Curran H. J. Oxidation of C₁–C₅ alkane quinary natural gas mixtures at high pressures // *Energ. Fuel.*, 2010. Vol. 24. No. 3. P. 1521–1528.
19. Combustion Chemistry Center at NUI Galway: Database Mechanism of Natural Gas (including C₅) Oxidation. http://c3.nuigalway.ie/media/researchcentres/combustionchemistrycentre/files/mechanismdownloads/nc5_49_mech.dat.
20. Беляев А. А., Никитин А. В., Токталиев П. Д., Власов П. А., Дмитрук А. С., Арутюнов А. В., Арутюнов В. С. Анализ литературных моделей окисления метана в области умеренных температур // *Горение и взрыв*, 2018. Т. 11. № 1. С. 19–26.
21. Arutyunov V., Troshin K., Nikitin A., Belyaev A., Arutyunov A., Kiryushin A., Strekova L. Selective oxycracking of associated petroleum gas into energy fuel in the light of new data on self-ignition delays of methane–alkane compositions // *Chem. Eng. J.*, 2020. Vol. 381. P. 122706. doi: 10.1016/j.cej.2019.122706.
22. Zhang Y., Jiang X., Wei L., Zhang J., Tang C., Huang Z. Experimental and modeling study on auto-ignition characteristics of methane/hydrogen blends under engine relevant pressure // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2012. Vol. 37. P. 19168–19176.
23. Zhang Y., Huang Z., Wei L., Zhang J., Law C. K. Experimental and modeling study on ignition delays of lean mixtures of methane, hydrogen, oxygen, and argon at elevated pressures // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. P. 918–931.
24. Frolov S. M., Medvedev S. N., Basevich V. Ya., Frolov F. S. Self-ignition of hydrocarbon–hydrogen–air mixtures // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2013. Vol. 38. P. 4177–4184.
25. Арутюнов В. С., Рудаков В. М., Савченко В. И., Шверденкин Е. В., Шверденкина О. Г., Желтяков А. Ю. Кинетика парциального окисления алканов при высоких давлениях. Окисление метана в реакторах с поверхностью из нержавеющей стали и кварца // *Теоретические основы химической технологии*, 2002. Т. 36. № 5. С. 518–523.
26. Arutyunov V. Direct methane to methanol: Foundations and prospects of the process. — Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., 2014. 320 p.
27. Sarathy S. M., Westbrook C. K., Pitz W. J., Mehl M., Togbe C., Dagaut P., Wang H., Oehlschlaeger M., Niemann U., Seshadri K., Veloo P. S., Ji C., Egolfopoulos F., Lu T. Comprehensive chemical kinetic modeling of the oxidation of C₈ and larger *n*-alkanes and 2-methylalkanes. Lawrence Livermore National Laboratory, 2011. LLNL-JRNL-474853. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc834172/m1/1/>.

Поступила в редакцию 24.10.2019