

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДА ОТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ МЕХАНИЗМАМ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА И ВОДОРОДА НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАЩИХ ИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

В. С. Арутюнов¹, А. В. Арутюнов², А. А. Беляев³, Л. Н. Стрекова⁴, К. Я. Трошин⁴

Аннотация: Рассмотрены особенности воспламенения метана, водорода и содержащих их газовых смесей в области температур $800 < T < 1000$ К, связанные со сменой механизмов их окисления и изменением роли процессов с участием пероксида водорода H_2O_2 и гидропероксидных радикалов HO_2 . Показана возможность резкого изменения кинетических параметров процесса воспламенения в этом диапазоне и проявления таких необычных эффектов, как ингибирование воспламенения метана добавками водорода и промотирование воспламенения водорода добавками оксида углерода. Возможность резкого изменения основных параметров, характеризующих воспламенение содержащих метан и водород газовых смесей, требует учета при анализе безопасности их использования и определения детонационных характеристик газомоторных топлив.

Ключевые слова: метан; водород; газомоторное топливо; время задержки воспламенения; пероксид водорода

DOI: 10.30826/CE23160401

EDN: ZFHRTR

Литература

1. Арутюнов В. С., Лисичкин Г. В. Энергетические ресурсы XXI столетия: проблемы и прогнозы. Могут ли возобновляемые источники энергии заменить ископаемое топливо? // Успехи химии, 2017. Т. 86. № 8. С. 777–804.
2. Арутюнов В. Нефть XXI. Мифы и реальность альтернативной энергетики. — М.: Эксмо, 2016. 208 с.
3. Arutyunov V. S. On the sources of hydrogen for the global replacement of hydrocarbons // Academia Letters, 2021. Article 3692. doi:10.20935/AL3692.
4. Арутюнов В. С. Водородная энергетика: значение, источники, проблемы, перспективы (обзор) // Нефтехимия, 2022. Т. 62. № 4. С. 459–470.
5. Makaryan I. A., Sedov I. V., Salgansky E. A., Arutyunov A. V., Arutyunov V. S. A comprehensive review on the prospects of using hydrogen–methane blends: Challenges and opportunities // Energies, 2022. Vol. 15. № 6. P. 1–27. doi: 10.3390/en15062265.
6. Westbrook C. K., Sjöberg M., Cernansky N. P. Quantification of fuel chemistry effects on burning modes in turbulent premixed flames // Combust. Flame, 2018. Vol. 195. P. 50–62. doi: 10.1016/j.combustflame.2018.03.038.
7. 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.
8. Lamoureux N., Paillard C.-E., Vaslier V. Low hydrocarbon mixtures ignition delay times investigation behind reflected // Shock Waves, 2002. Т. 11. С. 309–322. doi: 10.1007/s001930100108.
9. Healy D., Curran H. J., Dooley S., Simmie J., Kalitan D., Petersen E., Borque G. Methane/propane mixture oxidation at high pressures and at high, intermediate and low temperatures // Combust. Flame, 2008. Vol. 155. P. 451–461. doi: 10.1016/j.combustflame.2008.06.008.
10. Трошин К. Я., Никитин А. В., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Курюшин 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. doi: 10.15372/FGV20190502.
11. Arutyunov V., Belyaev A., Arutyunov A., Troshin K., Nikitin A. Autoignition of methane–hydrogen mixtures below 1000 K // Processes, 2022. Vol. 10. P. 2177. doi: 10.3390/pr10112177.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова; Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, arutyunov@chph.ras.ru

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, aarutyunovv@gmail.com

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, belyaevIHF@yandex.ru

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

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, troshin@chph.ras.ru

12. Трошин К.Я., Беляев А.А., Арутюнов А.В., Арутюнов В.С. Воспламенение смесей CH_4 и CO // Физика горения и взрыва, 2024 (в печати). doi: 10.15372/FGV2023.9320.
13. Арутюнов А.В., Ахуньянов А.Р., Шубин Г.А., Беляев А.А., Власов П.А., Смирнов В.Н., Трошин К.Я., Арутюнов В.С. Влияние состава синтез-газа на его воспламенение в области температур $T \leq 1000$ К // Горение и взрыв, 2023. Т. 16. № 2. С. 3–14. doi: 10.30826/CE23160201. EDN: ZJWVQJ.
14. Арутюнов В.С., Арутюнов А.В., Беляев А.А., Трошин К.Я. Контролируемое воспламенение низкоуглеродных газомоторных топлив на основе природного газа и водорода: кинетика процесса // Успехи химии, 2023. Т. 92. № 7. С. RCR5084. doi: 10.59761/RCR5084.
15. NUI Galway. Mechanism Downloads. <https://www.universityofgalway.ie/combustionchemistrycentre/mechanismdownloads/>.
16. Arutyunov V. Direct methane to methanol: Foundations and prospects of the process. — Amsterdam, The Netherlands: Elsevier B.V., 2014. 309 p.
17. Арутюнов В.С., Басевич В.Я., Веденев В.И., Романович Л.Б. Кинетическое моделирование прямого газофазного окисления метана в метанол при высоком давлении // Кинетика и катализ, 1996. Т. 37. № 1. С. 20–27.
18. 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. doi: 10.30826/CE18110102.
19. Hydrogen Storage Tech Team Roadmap. 2017. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/08/f36/hstt_roadmap_July2017.pdf.
20. Кустов Л.М., Каленчук А.Н., Богдан В.И. Системы аккумуляции, хранения и выделения водорода // Успехи химии, 2020. Т. 89. № 9. С. 897–916. doi: 10.1070/RCR4940. EDN: LWEP RS.
21. Mahajan D., Tan K., Venkatesh T., Kileti P., Clayton C.R. Hydrogen blending in gas pipeline networks — a review // Energies, 2022. Vol. 15. P. 3582–3614. doi: 10.3390/en15103582.
22. Hermanns R.T.E. Laminar burning velocities of methane–hydrogen–air mixtures. — Technische Universiteit Eindhoven, 2007. 150 p. <http://alexandria.tue.nl/extra2/200711972.pdf>.
23. Hu E., Huang Z., He J., Jin Ch., Zheng J. Experimental and numerical study on laminar burning characteristics of premixed methane–hydrogen–air flames // Int. J. Hydrogen Energ., 2009. Vol. 34. P. 4876–4888. doi: 10/1016/j.ijhydene.2009.03.058.
24. 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. P. 3875–3884. doi: 10.1021/ef200707h.
25. Moccia V., D'Alessio J. Burning behaviour of high-pressure CH_4 – H_2 –air mixtures // Energies, 2013. Vol. 6. P. 97–116. doi: 10.3390/en6010097.
26. Трошин К.Я., Борисов А.А., Рахметов А.Н., Арутюнов В.С., Политенкова Г.Г. Скорость горения метанводородных смесей при повышенных давлениях и температурах // Хим. физика, 2013. Т. 32. № 5. С. 76–87.
27. 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. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.12.005.
28. Okafor E.C., Hayakawa, 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. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.11.128.
29. Семёнов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. — М.: Изд-во АН СССР, 1958. 686 с.
30. Sarathy S.M., Westbrook C.K., Mehl M., Pitz W.J., Togbe C., Dagaut P., Wang H., Oehlschlaeger M.A., Niemann U., Seshadri K., Veloo P.S., Ji C., Egolfopoulos F.N., Lu T. Comprehensive chemical kinetic modeling of the oxidation of 2-methylalkanes from C_7 to C_{20} // Combust. Flame, 2011. Vol. 158. P. 2338–2357. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.05.007.
31. Арутюнов В.С., Арутюнов А.В. О характеристиках детонационной стойкости газомоторных топлив // Газовая промышленность, 2023. № 12(858). С. 102–109.

Поступила в редакцию 20.11.2023