

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СИНТЕЗ-ГАЗА НА ЕГО ВОСПЛАМЕНЕНИЕ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР $T \leq 1000$ К\*

А. В. Арутюнов<sup>1</sup>, А. Р. Ахуньянов<sup>2</sup>, Г. А. Шубин<sup>3</sup>, А. А. Беляев<sup>4</sup>, П. А. Власов<sup>5</sup>,  
В. Н. Смирнов<sup>6</sup>, К. Я. Трошин<sup>7</sup>, В. С. Арутюнов<sup>8</sup>

**Аннотация:** Анализ зависимости задержки самовоспламенения синтез-газа от его состава в области температур  $T \leq 1000$  К на основании имеющихся экспериментальных результатов и кинетического моделирования показал, что воспламенение синтез-газа вплоть до концентрации в нем  $[CO] \approx 80\%$  определяется преимущественно процессом воспламенения водорода. В диапазоне от 800 до 1000 К происходит переход от низкотемпературного к высокотемпературному механизму воспламенения, определяющийся соответствующим переходом в механизме окисления водорода. В низкотемпературной части этого диапазона повышение концентрации CO оказывает промотирующий эффект, а в высокотемпературной — ингибирующий. В низкотемпературной части исследуемого диапазона повышение давления до 10 атм существенно увеличивает задержку воспламенения, но при дальнейшем повышении давления наблюдается ее плавное снижение. В высокотемпературной части этого диапазона повышение давления монотонно снижает задержку воспламенения. Неизбежное присутствие в синтез-газе практически любого состава водорода и непрореагировавших углеводородов делает время задержки его воспламенения не очень чувствительным к присутствию паров воды, углекислого газа, азота и других химически неактивных разбавителей. Их роль при этих относительно низких температурах сводится к повышению теплоемкости смеси и их эффективности в реакциях рекомбинации и диссоциации.

**Ключевые слова:** синтез-газ; водород; монооксид углерода; задержка воспламенения; ударные волны; кинетическое моделирование

DOI: 10.30826/CE23160201

EDN: ZJWVQJ

### Литература

1. *Arutyunov V. S.* On the sources of hydrogen for the global replacement of hydrocarbons // *Academia Letters*, 2021. Article 3692. doi: 10.20935/AL3692.
2. *Арутюнов В. С.* Водородная энергетика: Значение, источники, проблемы, перспективы (обзор) // *Нефтехимия*, 2022. Т. 62. № 4. С. 459–470.
3. *Walton S. M., He X., Zigler B. T., Wooldridge M. S.* An experimental investigation of the ignition properties of hydrogen and carbon monoxide mixtures for syngas turbine applications // *P. Combust. Inst.*, 2007. Vol. 31. P. 3147–3154. doi: 10.1016/j.proci.2006.08.059.
4. *Lee H. C., Jiang L. Y., Mohamad A. A.* A review on the laminar flame speed and ignition delay time of syngas mixtures // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2014. Vol. 39. P. 1105–1121. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.068.
5. *Арутюнов В. С., Голубева И. А., Елисеев О. Л., Жагфаров Ф. Г.* Технология переработки углеводородных газов. — М.: Юрайт, 2020. 723 с.
6. *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.
7. *Kalitan D. M.* A study of syngas oxidation at high pressures and low temperatures // *Electronic theses and dissertations*, 2004–2019. — University of Central Florida, 2007. No. 3219. 235 p. <https://stars.library.ucf.edu/etd/3219>.
8. *Kalitan D. M., Mertens J. D., Crofton M. W., Petersen E. L.* Ignition and oxidation of lean CO/H<sub>2</sub> fuel blends in air // *J. Propul. Power*, 2007. Vol. 23. No. 6. P. 1291–1303. doi: 10.2514/1.28123.
9. *Dryer F. L., Chaos M.* Ignition of syngas/air and hydrogen/air mixtures at low temperatures and high pressures:

\* Исследование выполнено в ФИЦ ХФ РАН при финансовой поддержке РФФИ (грант 22-73-00171).

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, aarutyunow@gmail.com

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, jkratos69@yandex.ru

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, shubin.ga@phystech.edu

<sup>4</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, belyaevIHF@yandex.ru

<sup>5</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, shocktube@yandex.ru

<sup>6</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vns1951@yandex.ru

<sup>7</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, troshin@chph.ras.ru

<sup>8</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, arutyunov@chph.ras.ru

- Experimental data interpretation and kinetic modeling implications // *Combust. Flame*, 2007. Vol. 152. P. 293–299. doi: 10.1016/j.combustflame.2007.08.005.
10. Mittal G., Sung C.-J., Yetter R. A. Autoignition of H<sub>2</sub>/CO at elevated pressures in a rapid compression machine // *Int. J. Chem. Kinet.*, 2006. Vol. 38. P. 516–529. doi: 10.1002/kin.20180.
  11. Cavaliere D. E., De Ioannon M., Sabia P., Allegorico M., Marchione T., Sirignano M., D'Anna A. A. Comprehensive kinetic modeling of ignition of syngas/air mixtures at low temperatures and high pressures // *Combust. Sci. Technol.*, 2010. Vol. 182(7). P. 692–701. doi: 10.1080/00102200903466525.
  12. Reyes M., Tinaut F. V., Giménez B., Cataño A. Combustion and flame front morphology characterization of H<sub>2</sub>–CO syngas blends in constant volume combustion bombs // *Energ. Fuel.*, 2021. Vol. 35(4). P. 3497–3511. doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c03598.
  13. Трошин К. Я., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Царенко А. А., Никитин А. В., Арутюнов В. С. Влияние давления на самовоспламенение метановодородных смесей с воздухом // *Горение и взрыв*, 2020. Т. 13. № 1. С. 18–32. doi: 10.30826/CE20130102.
  14. Трошин К. Я., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Никитин А. В., Арутюнов В. С. Определение задержки самовоспламенения метаноэтиленовоздушных смесей // *Горение и взрыв*, 2020. Т. 13. № 4. С. 3–8. doi: 10.30826/CE20130401.
  15. Трошин К. Я., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Шубин Г. А., Никитин А. В., Арутюнов В. С. Влияние давления на задержку самовоспламенения метаноэтиленовоздушных смесей // *Горение и взрыв*, 2021. Т. 14. № 1. С. 3–8. doi: 10.30826/CE21140101.
  16. Arutyunov V., Belyaev A., Arutyunov A., Troshin K., Nikitin A. Autoignition of methane–hydrogen mixtures below 1000 K // *Processes*, 2022. Vol. 10. 2177. doi: 10.3390/pr10112177.
  17. Власов П. А., Смирнов В. Н., Рябиков О. Б., Богатова А. С., Ахуньянов А. Р. Самовоспламенение смесей H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/CO в отраженных ударных волнах // *Горение и взрыв*, 2019. Т. 12. № 3. С. 4–13.
  18. Власов П. А., Смирнов В. Н., Рябиков О. Б., Ахуньянов А. Р. Исследование особенностей воспламенения синтез-газа в отраженных ударных волнах // *Горение и взрыв*, 2020. Т. 13. № 1. С. 4–18.
  19. Смирнов В. Н., Шубин Г. А., Арутюнов А. В., Власов П. А., Захаров А. А., Арутюнов В. С. Низкотемпературное воспламенение концентрированных смесей синтез-газа за отраженными ударными волнами // *Хим. физика*, 2022. Т. 41. № 11. С. 52–62.
  20. ANSYS Academic Research CFD. CHEMKIN-Pro 15112. — San Diego, CA, USA: Reaction Design, 2011. CK-TUT-10112-1112-UG-1.
  21. NUIGMech1.1. National University of Ireland Galway, 2020. <https://www.universityofgalway.ie/combustionchemistrycentre/mechanismdownloads/>.
  22. Walker D. W., Diehl L. H., Strauss W. A., Edse R. Investigation of the ignition properties of flowing combustible gas mixtures. — Ohio State University, 1969. Technical Report AFAPL-TR-69-82.
  23. Neer M. E. Autoignition of flowing hydrogen–air mixtures // *AIAA J.*, 1975. Vol. 13. No. 7. P. 924–928.
  24. Арутюнов В. С., Беляев А. А., Арутюнов А. В., Трошин К. Я., Царенко А. А., Никитин А. В. Об использовании метан-водородных смесей в двигателях внутреннего сгорания // *НефтеГазоХимия*, 2019. № 3-4. С. 5–17. doi: 10.24411/2310-8266-2019-10401.
  25. Peschke W. T., Spadaccini L. J. Determination of autoignition and flame speed characteristics of coal gases having medium heating values. EPRI AP-4291 Research Project 2357-1, November 1985. Final Report.
  26. He D., Yan W. Influences of different diluents on ignition delay of syngas at gas turbine conditions: A numerical study // *Chinese J. Chem. Eng.*, 2017. Vol. 25. P. 79–88. doi: 10.1016/j.cjche.2016.06.003.
  27. Ахуньянов А. Р., Арутюнов А. В., Власов П. А., Смирнов В. Н., Арутюнов В. С. Влияние добавок CO<sub>2</sub> на некаталитическую конверсию природного газа в синтез-газ и водород // *Кинетика и катализ*, 2023. Т. 64. № 2. С. 153–172.
  28. Wang S., Wang Z., Elbaz A. M., He Y., Chen C., Zhu Y., Roberts W. L. Effects of CO<sub>2</sub> dilution and CH<sub>4</sub> addition on laminar burning velocities of syngas at elevated pressures: An experimental and modeling study // *Energ. Fuel.*, 2021. Vol. 35(22). P. 18733–18745. doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c02901.

Поступила в редакцию 15.03.2023