

ДЕТОНАЦИЯ БОГАТЫХ СМЕСЕЙ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ С КИСЛОРОДОМ*

А. А. Штерцер¹, И. С. Батраев², Д. К. Рыбин³, В. Ю. Ульяницкий⁴

Аннотация: Рассматривается технология получения водорода и, одновременно, наноразмерного детонационного углерода (НДУ), основанная на детонационном разложении газообразных углеводородов. На импульсном газодетонационном аппарате (ИГДА) проведены исследования процесса детонации метана (СН₄), смеси метана с ацетиленом (0,85СН₄ + 0,15С₂Н₂), ацетилена (С₂Н₂), этилена (С₂Н₄), этана (С₂Н₆), пропилена (С₃Н₆), пропана (С₃Н₈) и бутана (С₄Н₁₀) в присутствии минимально возможных добавок кислорода вплоть до верхнего предела детонации, определяемого спиновым режимом. Детонационное разложение производилось при начальном атмосферном давлении топливно-кислородных смесей. Для перечисленных углеводородов получены данные по производительности ИГДА по водороду и НДУ.

Ключевые слова: газообразные промышленные углеводороды; импульсный газодетонационный аппарат; детонационное разложение; водород; наноразмерный детонационный углерод

DOI: 10.30826/CE24170205

EDN: XEDVSC

Литература

1. Гамбург Д. Ю., Семенов В. П., Дубовкин Н. Ф., Смирнова Л. Н. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение / Под ред. Д. Ю. Гамбурга, Н. Ф. Дубовкина. — М.: Химия, 1989. 672 с.
2. Statista (a global data and business intelligence platform): Hydrogen production worldwide in 2018 and 2030. <https://www.statista.com/statistics/1121207/global-hydrogen-production/>.
3. IEA (International Energy Agency). Hydrogen. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>.
4. Szali N. Emerging technologies by hydrogen: A review // Int. J. Hydrogen Energ., 2020. Vol. 45. P. 18753–18771. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.021.
5. Bal B., Cetin B., Bayram F. C., Billur E. Effect of hydrogen on fracture locus of Fe–16Mn–0.6C–2.1Al TWIP steel // Int. J. Hydrogen Energ., 2020. Vol. 45. P. 34227–34240. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.09.083.
6. Yang F., Wang T., Deng X., Dang J., Huang Z., Hu S., Li Y., Ouyang M. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process // Int. J. Hydrogen Energ., 2021. Vol. 46. P. 31467–31488. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.07.005.
7. Kistiakovskiy G. B., Halsey G. D., Malin M. E., Knight H. T. Detonation process of making carbon black. U.S. Patent No. 2690960, 1954.
8. Кнорре В. Г., Снегирева Т. Д., Текунова Т. В., Чулков А. В. Исследование термического разложения ацетилена и свойств образующейся сажи в условиях бомбы постоянного объема // Физика горения и взрыва, 1972. № 4. С. 532–535.
9. Кнорре В. Г., Копылов М. С., Теснер П. А. Образование сажи при детонации ацетилена // Физика горения и взрыва, 1974. № 5. С. 767–771.
10. Кнорре В. Г., Низовцев В. Е., Прядкина Е. А., Сидоров В. Н. Способ получения технического углерода. Патент РФ № 2325413, 2008.
11. Иванов Б. А. Физика взрыва ацетилена. — М.: Химия, 1969. 180 с.
12. Манжелей В. И. О детонации ацетилена вблизи предела // Физика горения и взрыва, 1975. Т. 11. № 1. С. 146–149.
13. Sorensen C., Nepal A., Singh G. P. Process for high-yield production of graphene via detonation of carbon-containing material. U.S. Patent No. 9440857, 2016.
14. Батраев И. С., Васильев А. А., Пинаев А. В., Ульяницкий В. Ю., Штерцер А. А., Лихолобов В. А., Шайтанов А. Г., Суровикин Ю. В., Рыбин Д. К. Способ получения наноуглерода. Патент РФ 2641829, 2018. EDN: XVLICF.
15. Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Батраев И. С., Рыбин Д. К. Получение наноразмерного детонационного углерода на импульсном газодетонационном

*Исследования выполнялись в рамках проекта РНФ № 21-19-00390 (Разработка методов термического разложения газообразных углеводородов для реализации углерод-нейтральных энерготехнологических циклов). Работа представлена на 14-м Международном коллоквиуме по импульсной и непрерывной детонации, Санкт-Петербург, 22–26 апреля 2024 г.

¹Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук; Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, asterzer@mail.ru

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук; Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, ibatraev@gmail.com

³Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, rybindenis1990@gmail.com

⁴Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, ulianv@mail.ru

- аппарате // Письма в журнал технической физики, 2018. Т. 44. №9. С. 65–72. doi: 10.21883/PJTF.2018.09.46067.17165. EDN: YUVBHD.
16. *Shtertser A. A., Rybin D. K., Ulianitsky V. Yu., Park W., Datekyu M., Wada T., Kato H.* Characterization of nanoscale detonation carbon produced in a pulse gas-detonation device // *Diam. Relat. Mater.*, 2020. Vol. 101. P. 107553. doi: 10.1016/j.diamond.2019.107553.
 17. *Shtertser A. A., Ulianitsky V. Yu., Rybin D. K., Batraev I. S., Prokhorov E. S., Vlaskin M. S.* Production of hydrogen and carbon black by detonation of fuel-rich acetylene–oxygen mixtures // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2022. Vol. 47. No. 30. P. 14039–14043. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.164.
 18. *Shtertser A. A., Ulianitsky V. Yu., Rybin D. K., Batraev I. S., Dudina D. V.* Detonation decomposition of hydrocarbons to produce hydrogen // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2024. Vol. 55. P. 118–123. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.11.125.
 19. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садыков И. А., Силантьев А. С., Аксёнов В. С., Шамшин И. О., Авдеев К. А., Фролов Ф. С.* Автотермическая конверсия природного газа и аллотермическая газификация жидких и твердых органических отходов ультраперегретым водяным паром // *Горение и взрыв*, 2022. Т. 15. № 2. С. 75–87. doi: 10.30826/CE22150207.
 20. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садыков И. А., Силантьев А. С., Шамшин И. О., Аксёнов В. С., Авдеев К. А., Фролов Ф. С.* Влияние объема реактора на автотермическую конверсию природного газа и аллотермическую газификацию органических отходов ультраперегретым паром // *Горение и взрыв*, 2022. Т. 15. № 3. С. 71–87. doi: 10.30826/CE22150308.
 21. *Ульяницкий В. Ю.* CCDS2000 — оборудование нового поколения для детонационного напыления // *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2013. Т. 10. С. 36–41.
 22. *Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Рыбин Д. К., Батраев И. С.* Детонационное разложение ацетилена при атмосферном давлении в присутствии малых добавок кислорода // *Физика горения и взрыва*, 2022. Т. 58. № 6. С. 89–99. doi: 10.15372/FGV20220608. EDN: QGMFEG.
 23. Калькуляторы термодинамических процессов и простых газодинамических течений. <http://ancient.hydro.nsc.ru/chem/>.
 24. *Прууэл Э. Р., Васильев А. А.* Уравнение состояния продуктов газовой детонации. Учет формирования конденсированной фазы углерода // *Физика горения и взрыва*, 2021. Т. 57. № 5. С. 74–85. doi: 10.15372/FGV20210507. EDN: PEDWVQ.
 25. *Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П., Челышев В. П., Шехтер Б. И.* Физика взрыва / Под ред. К. Л. Станюковича. — 2-е изд. — М.: Наука, 1975. 704 с.
 26. *Батраев И. С., Васильев А. А., Ульяницкий В. Ю., Штерцер А. А., Рыбин Д. К.* Исследование газовой детонации переобогащенных смесей углеводородов с кислородом // *Физика горения и взрыва*, 2018. Т. 54. № 2. С. 89–97. doi: 10.15372/FGV20180210. EDN: YWJNHE.
 27. Chapman–Jouguet detonation problem. <https://cearun.grc.nasa.gov>.
 28. *Duff R. E., Knight H. T., Wright H. R.* Some detonation properties of acetylene gas // *J. Chem. Phys.*, 1954. Vol. 22. No. 9. P. 1618–1619. doi: 10.1063/1.1740482.

Поступила в редакцию 13.02.2024