

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ БИОГАЗА В РЕАКТОРЕ АДИАБАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ*

И. В. Билера¹

Аннотация: В условиях адиабатического сжатия (АС) исследовали парциальное окисление двух модельных смесей биогаза (об./об.): $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{N}_2 = 60/40/0$ и $60/20/20$. В качестве окислителя использовали кислород, коэффициент избытка окислителя для обеих смесей $\alpha = 0,4$. Определены основные (H_2 , CO и H_2O) и второстепенные продукты реакции, в том числе этилен и олефины $\text{C}_3\text{--C}_5$, ацетилен и его гомологи, диены $\text{C}_3\text{--C}_5$, бензол и толуол. Диапазоны степеней превращения смесей по сумме всех продуктов 0,8%–65% для смеси 1 и 1,7%–72% для смеси 2. Установлено, что при воспламенении в узком диапазоне степеней сжатия происходит резкое увеличение степени превращения O_2 и CH_4 . Для CO_2 в зависимости от температуры найдены три режима: увеличение его содержания в смеси продуктов по сравнению с исходной смесью в условиях парциального окисления без воспламенения; увеличение содержания при воспламенении; уменьшение содержания при воспламенении.

Ключевые слова: биогаз; метан; CO_2 ; воспламенение; окисление; адиабатическое сжатие; синтез-газ; водород

DOI: 10.30826/CE25180104

EDN: YEVZDX

Литература

1. Hosseini S. E., Wahid M. A. Development of biogas combustion in combined heat and power generation // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2014. Vol. 40. P. 868–875. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.204.
2. Gao Y., Jiang J., Meng Y., Yan F., Aihemaiti A. A review of recent developments in hydrogen production via biogas dry reforming // *Energ. Convers. Manage.*, 2018. Vol. 171. P. 133–155. doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.083.
3. Zhao X., Joseph B., Kuhn J., Ozcan S. Biogas reforming to syngas: A review // *iScience*, 2020. Vol. 5. No. 22. Art. 101082. doi: 10.1016/j.isci.2020.101082.
4. Kumar R., Kumar A., Pal A. Overview of hydrogen production from biogas reforming: Technological advancement // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2022. Vol. 47. No. 9. P. 34831–34855. doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.059.
5. Jung S., Lee J., Moon D. H., Kim K.-H., Kwon E. E. Upgrading biogas into syngas through dry reforming // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2021. Vol. 143. Art. 110949. doi: 10.1016/j.rser.2021.110949.
6. Борисов А. А., Политенкова Г. Г., Трошин К. Я., Шамшин И. О. Парциальное окисление биогаза в некаталитических режимах горения // *Горение и взрыв*, 2009. Т. 2. С. 3–6.
7. Yang Y. C., Lim M. S., Chun Y. N. The syngas production by partial oxidation using a homogeneous charge compression ignition engine // *Fuel Process. Technol.*, 2009. Vol. 90. P. 553–557. doi: 10.1016/j.fuproc.2009.01.002.
8. Шмелев В. М., Николаев В. Н. Некаталитическая конверсия смесей биогаза с воздухом в химическом реакторе сверхадиабатического сжатия // *Газохимия*, 2010. № 4–5(14–15). С. 54–60.
9. Shapovalova O. V., Chun Y. N., Lim M. S., Shmelev V. M., Arutyunov V. S. Syngas and hydrogen production from biogas in volumetric (3D) matrix reformers // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2012. Vol. 37. No. 82. P. 14040–14046. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.002.
10. Николаев В. М., Шмелев В. М. О воспламенении смесей биогаза с воздухом при сжатии // *Горение и взрыв*, 2012. Т. 5. С. 66–70.
11. Колбановский Ю. А., Буравцев Н. Н., Билера И. В., Росихин И. В., Борисов Ю. А. Конверсия биогаза в синтез-газ в реакторе с высокой теплонапряженностью // *Нефтегазохимия*, 2015. № 1. С. 28–32.
12. Zeng H., Wang Y., Shi Y., Ni M., Cai N. Syngas production from CO_2/CH_4 rich combustion in a porous media burner: Experimental characterization and elementary reaction model // *Fuel*, 2017. Vol. 199. P. 413–419. doi: 10.1016/j.fuel.2017.03.003.
13. Nikitin A., Ozersky A., Savchenko V., Sedov I., Shmelev V., Arutyunov V. Matrix conversion of natural gas to syngas: The main parameters of the process and possible applications // *Chem. Eng. J.*, 2019. Vol. 377. Art. 120883. doi: 10.1016/j.cej.2019.01.162.
14. Gossner H., Drost S., Porras S., Schiefl R., Mass U., Deutschmann O. The internal combustion engine as a CO_2 reformer // *Combust. Flame*, 2019. Vol. 207. P. 186–195. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.05.031.
15. Guerrero F., Espinoza L., Ripoll N., Lisbona P., Arauzo I., Toledo M. Syngas production from the reforming

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ИНХС РАН.

¹Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук, bilera@ips.ac.ru

- of typical biogas compositions in an inert porous media reactor // *Front. Chem.*, 2020. Vol. 8. Art. 45. doi: 10.3389/fchem.2020.00145.
16. *Chen D., Gan Li-H.* Non-catalytic direct conversion of CH₄ and CO₂ into high-quality syngas // *Chem. Eng. J.*, 2022. Vol. 439. Art. 135732. doi: 10.1016/j.cej.2022.135732.
17. *Drost S., Xie W., Schiefl R., Maas U.* CO₂/CH₄ Conversion to synthesis gas (CO/H₂) in an internal combustion engine // *P. Combust. Inst.*, 2023. Vol. 39. No. 4. P. 4519–4527. doi: 10.1016/j.proci.2022.07.033.
18. *Mishra P., Gossler H., Deutschmann O.* Optimization of operating conditions of an internal combustion engine used as chemical reactor for methane reforming using ozone as an additive // *Applications Energy Combustion Science*, 2023. Vol. 13. Art. 100109. doi: 10.1016/j.jaecs.2022.100109.
19. *Banke K., Kaiser S. A.* Syngas production from biogas in a polygeneration process: Simultaneous partial oxidation and dry reforming in a piston engine // *P. Combust. Inst.*, 2023. Vol. 39. No. 4. P. 5011–5020. doi: 10.1016/j.proci.2022.08.132.
20. *Колбановский Ю. А., Щипачев В. С., Черняк Н. Я. и др.* Импульсное сжатие газов в химии и технологии. — М.: Наука, 1982. 240 с.
21. *Bilera I. V.* The formation of small amounts of cyclopropane during pulsed pyrolysis of C₄–C₅ acyclic alkanes in the adiabatic compression reactor // *Reactions*, 2023. Vol. 4. No. 3. P. 381–397. doi: 10.3390/reactions4030023.
22. *Rudolph C., Atakan B.* Dry methane reforming in a piston engine for chemical energy storage and carbon dioxide utilization: Kinetic modeling and thermodynamic evaluation // *Energy Technol.* — Ger., 2023. Vol. 11. No. 10. Art. 2201252. doi: 10.1002/ente.202201252.
23. *Билера И. В.* Окислительный пиролиз этана в условиях адиабатического сжатия // *Горение и взрыв*, 2023. Т. 16. № 3. С. 21–29. doi: 10.30826/CE23160303.
24. *Bilera I. V., Bogdanov V. A., Borisov A. A., Kolbanovskii Yu. A., Politenkova G. G., Troshin K. Ya., Frolov S. M.* Physicochemical peculiarities of partial oxidation of methane in the self-ignition regime // *Nonequilibrium processes. Plasma, combustion and atmospheric phenomena* / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, A. M. Starik. — Moscow: TORUS PRESS, 2007. P. 37–38.
25. *Арутюнов В. С.* Окислительная конверсия природного газа. — М.: КРАСАНД, 2011. 640 с.
26. *Григорьев А. С., Колбановский Ю. А., Щипачев В. С.* Окисление метана при адиабатическом сжатии его смеси с кислородом // *Нефтехимия*, 1977. Т. 17. № 1. С. 98–100.
27. *Kaczmarek D., Atakan B., Kasper T.* Plug-flow reactor study of the partial oxidation of methane and natural gas at ultra-rich conditions // *Combust. Sci. Technol.*, 2019. Vol. 191. No. 9. P. 1571–1584. doi: 10.1080/00102202.2019.1577829.
28. *Билера И. В.* Гомогенный пиролиз *n*-бутана в условиях адиабатического сжатия // *Горение и взрыв*, 2014. Т. 7. С. 35–41.
29. *Билера И. В.* Сопиролиз диметилового эфира и этана в условиях адиабатического сжатия // *Горение и взрыв*, 2020. Т. 13. № 4. С. 20–28. doi: 10.30826/CE20130403.

Поступила в редакцию 23.12.2024

После доработки 20.01.2025

Принята к публикации 22.01.2025