

## ВЛИЯНИЕ РАСХОДА УЛЬТРАПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ПАРОВУЮ ГАЗИФИКАЦИЮ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

А. С. Силантьев<sup>1</sup>, И. А. Садыков<sup>2</sup>, В. А. Сметанюк<sup>3</sup>, Ф. С. Фролов<sup>4</sup>, С. М. Фролов<sup>5</sup>, Я. К. Хасяк<sup>6</sup>, А. Б. Воробьев<sup>7</sup>, А. В. Иноземцев<sup>8</sup>, Я. О. Иноземцев<sup>8</sup>

**Аннотация:** Продолжена работа по развитию технологии импульсно-детонационной пушки (ИДП) для конверсии органических отходов в синтез-газ в двухкомпонентной среде ультраперегретого водяного пара (УПП) и диоксида углерода, полученной в результате импульсной детонации смеси природный газ – кислород с рабочей частотой 1 Гц. Проведены экспериментальные исследования на конвертере отходов с проточным реактором объемом 40 дм<sup>3</sup> и двумя ИДП суммарным объемом 2,4 или 3,2 дм<sup>3</sup>, что приблизительно в 6 и в 4,5 раз меньше, чем в предыдущих исследованиях. Цель исследований состояла в поиске таких конструктивных и режимных параметров конвертера жидких органических отходов, при которых продукты газификации содержали бы минимальное количество CO<sub>2</sub> при работе конвертера с частотой 1 Гц. В качестве отходов использовалось отработанное машинное масло. Показано, что по сравнению с экспериментами, проведенными ранее при более высокой средней температуре стенки реактора-газификатора и при использовании ИДП значительно большего объема, содержание H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> в синтез-газе практически не изменилось, однако экономичность процесса газификации существенно повысилась: с помощью 1 г природного газа удалось газифицировать до 4 г сырья. Показано, что определяющую роль в процессе газификации жидкого сырья играет время, в течение которого сырье пребывает в ИДП, а не в самом реакторе-газификаторе. Определены минимальное отношение между расходами УПП и жидкого органического сырья, минимальное отношение между расходами горючего газа и жидкого органического сырья и степень использования УПП в процессе газификации жидкого сырья.

**Ключевые слова:** импульсно-детонационная пушка; органические отходы; газификация; отработанное машинное масло; синтез-газ

DOI: 10.30826/CE23160105

EDN: XMZHZU

### Литература

1. Zhan L., Jiang L., Zhang Y., Gao B., Xu Z. Reduction, detoxification and recycling of solid waste by hydrothermal technology: A review // *Chem. Eng. J.*, 2020. Vol. 390. P. 124651.
2. Boukis N., Stoll I. K. Gasification of biomass in supercritical water, challenges for the process design — lessons learned from the operation experience of the first dedicated pilot plant // *Processes*, 2021. Vol. 9. P. 455. doi: 10.3390/pr9030455.
3. Hameed Z., Aslam M., Khan M., Maqsood K., Atabani A. E., Ghauri M., Shahzad Khurram M., Rehan M., Nizami A.-S. Gasification of municipal solid waste blends with biomass for energy production and resources recovery: Current status, hybrid technologies and innovative prospects // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2021. Vol. 136. P. 110375. doi: 10.1016/j.rser.2020.110375.
4. Di Carlo A., Savuto E., Foscolo P. U., Papa A. A., Tacconi A., Del Zotto L., Aydin B., Bocci E. Preliminary results of biomass gasification obtained at pilot scale with an innovative 100 kWth dual bubbling fluidized bed gasifier // *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 4369. doi: 10.3390/en15124369.
5. Roncancio R., Gore J. P. CO<sub>2</sub> char gasification: A systematic review from 2014 to 2020 // *Energ. Convers. Manage.*, 2021. Vol. 10. P. 100060.
6. Siwal S. S., Zhang Q., Sun C., Thakur S., Gupta V. K., Thakur V. K. Energy production from steam gasification processes and parameters that contemplate in biomass gasifier — a review // *Bioresource Technol.*, 2020. Vol. 297. P. 122481.

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, silantevu@mail.ru

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

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smetanuk@chph.ras.ru

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

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

<sup>6</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, hasiak1996@gmail.com

<sup>7</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ynm07@mail.ru

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

7. Yang Y., Liew R. K., Tamothran A. M., Foong S. Y., Yek P. N. Y., Chia P. W., Van Tran T., Peng W., Lam S. S. Gasification of refuse-derived fuel from municipal solid waste for energy production: A review // *Environ. Chem. Lett.*, 2021. Vol. 19. P. 2127–2140.
8. Inayat A., Khan Z., Aslam M., Shahbaz M., Ahmad M. M., Abdul Mutalib M. I., Yusup S. Integrated adsorption steam gasification for enhanced hydrogen production from palm waste at bench scale plant // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2021. Vol. 46. No. 59. P. 30581–30591. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.008.
9. Wijayasekera S. C., Hewage K., Siddiqui O., Hettiaratchi P., Sadiq R. Waste-to-hydrogen technologies: A critical review of techno-economic and socio-environmental sustainability // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2022. Vol. 49. Iss. 9. P. 5842–5870. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.226.
10. Nanda S., Berruti F. Thermochemical conversion of plastic waste to fuels: A review // *Environ. Chem. Lett.*, 2021. Vol. 19. No. 1. P. 123–148. doi: 10.1007/s10311-020-01094-7.
11. Yu H., Wang C., Lin T., et al. Direct production of olefins from syngas with ultrahigh carbon efficiency // *Nat. Commun.*, 2022. Vol. 13. P. 5987. doi: 10.1038/s41467-022-33715-w.
12. Oliveira M., Ramos A., Ismail T. M., Monteiro E., Rouboa A. A review on plasma gasification of solid residues: Recent advances and developments // *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 1475. doi: 10.3390/en15041475.
13. Chun Y. N., Song H. G. Microwave-induced carbon–CO<sub>2</sub> gasification for energy conversion // *Energy*, 2020. Vol. 190. P. 116386.
14. Yi F., Manosh C. P., Sunita V., Xian L., Young-Kwon P., Siming Y. Concentrated solar thermochemical gasification of biomass: Principles, applications, and development // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2021. Vol. 150(C). P. 11484. doi: 10.1016/j.rser.2021.111484.
15. Hrbek J. Past, present and future of thermal gasification of biomass and waste // *Acta Innovations*, 2020. Vol. 35. P. 5–20. doi: 10.32933/ActaInnovations.35.1.
16. Larsson A., Kuba M., Berdugo Vilchesa T., Seemann M., Hofbauer H., Thunman H. Steam gasification of biomass — typical gas quality and operational strategies derived from industrial-scale plants // *Fuel Process. Technol.*, 2021. Vol. 212. P. 106609.
17. Shahbeig H., Shafizadeh A., Rosen M. A., Sels B. F. Exergy sustainability analysis of biomass gasification: A critical review // *Biofuel Research J.*, 2022. Vol. 33. P. 1592–1607. doi: 10.18331/BRJ2022.9.1.5.
18. Filippova S. P., Keiko A. V. Coal gasification: At the crossroads. Economic outlook // *Therm. Eng.*, 2021. Vol. 68. No. 5. P. 347–360. doi: 10.1134/S0040601521050049.
19. Wang K., Kong G., Zhang G., Zhang X., Han L., Zhang X. Steam gasification of torrefied/carbonized wheat straw for H<sub>2</sub>-enriched syngas production and tar reduction // *Int. J. Env. Res. Pub. He.*, 2022. Vol. 19. P. 10475. doi: 10.3390/ijerph191710475.
20. Maric J., Berdugo Vilches T., Pissot S., Cañete Vela I., Gyllenhammar M., Seemann M. Emissions of dioxins and furans during steam gasification of automotive shredder residue; experiences from the Chalmers 2–4-MW indirect gasifier // *Waste Manage.*, 2020. Vol. 102. P. 114–121. doi: 10.1016/j.wasman.2019.10.037.
21. Frolov S. M. Organic waste gasification: A selective review // *Fuels*, 2021. Vol. 2. P. 556–651. doi: 10.3390/fuels2040033.
22. Фролов С. М. Газификация органических отходов ультраперегретым водяным паром и диоксидом углерода // *Горение и взрыв*, 2021. Т. 14. № 3. С. 74–97. doi: 10.30826/CE21140308.
23. Bany Ata A., Seufert P. M., Heinze C., Alobaid F., Eppele B. Optimization of integrated gasification combined-cycle power plant for polygeneration of power and chemicals // *Energies*, 2021. Vol. 14. P. 7285. doi: 10.3390/en14217285.
24. Pio D. T., Gomes H. G. M. F., Tarelho L. A. C., Vilas-Boas A. C. M., Matos M. A. A., Lemos F. M. S. Superheated steam injection as primary measure to improve producer gas quality from biomass air gasification in an autothermal pilot-scale gasifier // *Renew. Energ.*, 2022. Vol. 181(C). P. 1223–1236. doi: 10.1016/j.renene.2021.09.083.
25. Tsekos C., del Grosso M., de Jong W. Gasification of woody biomass in a novel indirectly heated bubbling fluidized bed steam reformer // *Fuel Process. Technol.*, 2021. Vol. 224. P. 107003. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107003.
26. Hess J. R., Ray A. E., Rials T. G. Advancements in biomass feedstock preprocessing: Conversion ready feedstocks // *Frontiers Energy Research*, 2020. Vol. 7. P. 140.
27. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Avdeev K. A., Nabatnikov S. A. Method for obtaining highly overheated steam and detonation steam generator device (options). Patent of Russian Federation No. 2686138, April 24, 2019. Priority February 26, 2018.
28. Frolov S. M. Organic waste gasification by ultra-superheated steam // *Energies*, 2023. Vol. 16. P. 219. doi: 10.3390/en16010219.
29. Shahabuddin M., Alam M. T., Krishna B. B., Bhaskar T., Perkins G. A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes // *Bioresource Technol.*, 2020. Vol. 312. P. 123596. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123596.
30. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Sadykov I. A., Silantiev A. S., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Avdeev K. A., Frolov F. S. Natural gas conversion and liquid/solid organic waste gasification by ultra-superheated steam // *Energies*, 2022. Vol. 15. P. 3616. doi: 10.3390/en15103616.
31. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Sadykov I. A., Silantiev A. S., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Avdeev K. A., Frolov F. S. Natural gas conversion and organic waste gasification by detonation-born ultra-superheated steam: Effect of reactor volume // *Fuels*, 2022. Vol. 3. No. 3. P. 375–391. doi: 10.3390/fuels3030024.
32. 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. EDN: KVGBHS.
33. 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. EDN: JMZBKВ.
34. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Shamshin I. O., Sadykov I. A., Koval' A. S., Frolov F. S. Production of highly superheated steam by cyclic detonations of propane and methane–steam mixtures with oxygen for waste gasification // Appl. Therm. Eng., 2021. Vol. 183. No. 1. P. 116195. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116195.
35. Frolov S. M., Frolov F. S., Petrienko V. G., Petrienko O. V., Avdeev K. A. Method and apparatus for thermal recycling of waste by highly superheated water vapour. Patent of Russian Federation No. 2777110, August 1, 2022. Priority May 18, 2021.

Поступила в редакцию 02.02.2023