

# ГАЗИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ УЛЬТРАПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ И ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА

С. М. Фролов<sup>1</sup>

**Аннотация:** Представлен обзор литературы по аллотермической газификации органических отходов в среде перегретых водяного пара и диоксида углерода при атмосферном давлении. Рассмотрены две группы технологий: низкотемпературных (500–1000 °С) и высокотемпературных (выше 1200 °С). Показано, что существующие технологии низкотемпературной газификации характеризуются относительно низким качеством синтез-газа, низкой эффективностью, сложностью управления составом газа и низким выходом синтез-газа. Основные усилия по улучшению таких технологий направлены на предварительную обработку сырья и дополнительную обработку полученного синтез-газа, а также на повышение реакционной способности сырья с помощью катализаторов. В отличие от низкотемпературной газификации высокотемпературная плазменная газификация обеспечивает высококачественный синтез-газ, высокую эффективность процесса, простое управление составом газа и высокий выход синтез-газа. Однако дуговые и микроволновые плазменные технологии требуют огромных затрат электроэнергии, а также специальных конструкционных материалов и огнеупорных футеровок для стенок реакторов-газификаторов. Кроме того, газификация сырья в плазменных реакторах в основном происходит при температурах 1200–2000 °С, так что газоплазменный переход оказывается невостребованной, но энергоемкой промежуточной стадией. В качестве более эффективной альтернативы предлагается и демонстрируется экологически чистая технология детонационных пушек для газификации органических отходов.

**Ключевые слова:** органические отходы; аллотермическая газификация; водяной пар; диоксид углерода; детонационная пушка; ультраперегретый пар

**DOI:** 10.30826/CE21140308

## Литература

1. *Higman C., Van der Burgt M.* Gasification. — 1st ed. — Gulf Professional Publishing, 2003. 391 p.
2. *Rezaiyan J., Cheremisinoff N.* Gasification technologies: A primer for engineers and scientists. — 1st ed. — Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005. 360 p.
3. *Basu P.* Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. — 1st ed. — Burlington, MA, USA: Academic Press, 2010. 376 p.
4. *Bain R. L., Broer K.* Gasification // Thermochemical processing of biomass: Conversion into fuels, chemicals and power / Ed. R. C. Brown. — 1st ed. — John Wiley & Sons, 2011. P. 47–77.
5. *Chen W.-H., Peng J., Bi X. T.* A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2015. Vol. 44. P. 847–866.
6. *Quaak P., Knoef H., Stassen H.* Energy from biomass: A review of combustion and gasification technologies // *World Bank Technical Papers*. — Washington, D.C., USA: World Bank. Paper 422. doi: 10.1596/0-8213-4335-1.
7. *Santolero J. J., Reynolds J., Theodore L.* Introduction to hazardous waste incineration. — 2nd ed. — New York, NY, USA: Wiley, 2000. 656 p.
8. *Ahrenfeldt J., Thomsen T. P., Henriksen U., Clausen L. R.* Biomass gasification cogeneration — a review of state-of-the-art technology and near future perspectives // *Appl. Therm. Eng.*, 2013. Vol. 50. P. 1407–1417.
9. *Ismail T. M., El-Salam M. A.* Parametric studies on biomass gasification process on updraft gasifier high temperature air gasification // *Appl. Therm. Eng.*, 2017. Vol. 112. P. 1460–1473.
10. *Karl J., Proll T.* Steam gasification of biomass in dual fluidized bed gasifiers: A review // *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2018. Vol. 98. P. 64–78.
11. *Abanades S., Rodat S., Boujjat H.* Solar thermochemical green fuels production: A review of biomass pyro-gasification, solar reactor concepts and modelling methods // *Energies*, 2021. Vol. 14, P. 1494.
12. *Bartocci P., Zampilli M., Bidini G., Fantozzi F.* Hydrogen-rich gas production through steam gasification of charcoal pellet // *Appl. Therm. Eng.*, 2018. Vol. 132. P. 817–823.
13. *Wu H., Liu Q., Bai Z., Xie G., Zheng J., Su B.* Thermodynamics analysis of a novel steam/air biomass gasification combined cooling, heating and power system with solar energy // *Appl. Therm. Eng.*, 2020. Vol. 164. P. 114494.
14. *Jayaraman K., Goekalp I., Jeyakumar S.* Estimation of synergetic effects of CO<sub>2</sub> in high ash coal-char steam gasi-

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова, smfrol@chph.ras.ru

- fication // Appl. Therm. Eng., 2017. Vol 110. P. 991–998.
15. Zheng X., Ying Z., Wang B., Chen C. Hydrogen and syngas production from municipal solid waste (MSW) gasification via reusing CO<sub>2</sub> // Appl. Therm. Eng., 2018. Vol. 144. P. 242–247.
  16. Darivakis G. S., Howard J. B., Peters W. A. Release rates of condensables and total volatiles from rapid devolatilization of polyethylene and polystyrene // Combust. Sci. Technol., 1990. Vol. 74. P. 267–281.
  17. Ki-Bum P., Yong-Seong J., Begum G., JooSik K. Characteristics of a new type continuous two-stage pyrolysis of waste polyethylene // Energy, 2019. Vol. 166. P. 343–351.
  18. Chen Z., Zhang X., Gao L., Li S. Thermal analysis of supercritical water gasification of coal for power generation with partial heat recovery // Appl. Therm. Eng., 2017. Vol. 111. P. 1287–1295.
  19. Jared P., Ciferno J., Marano J. Benchmarking biomass gasification technologies for fuels, chemicals and hydrogen production. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, 2002. 65 p.
  20. Rauch R., Hrbek J., Hofbauer H. Biomass gasification for synthesis gas production and applications of syngas // WIRES Energy Environ., 2014. Vol. 3. P. 343–362.
  21. Ma W., Wenga T., Frandsen F. J., Yan B., Chen G. The fate of chlorine during MSW incineration: Vaporization, transformation, deposition, corrosion and remedies // Prog. Energ. Combust., 2020. Vol. 76. P. 100789.
  22. Holladay J. D., Hu J., King D. L., Wang Y. An overview of hydrogen production technologies // Catal. Today, 2009. Vol. 139. P. 244–260.
  23. Ruj B., Ghosh S. Technological aspects for thermal plasma treatment of municipal solid waste — a review // Fuel Process. Technol., 2014. Vol. 126. P. 298–308.
  24. Mazzoni L., Janajreh I., Elagroudy S., Ghenai C. Modeling of plasma and entrained flow co-gasification of MSW and petroleum sludge // Energy, 2020. Vol. 196. P. 117001.
  25. Lahijani P., Zainal Z. A., Mohamed A. R., Mohammadi M. Microwave-enhanced CO<sub>2</sub> gasification of oil palm shell char // Bioresource Technol., 2014. Vol. 158. P. 193–200.
  26. He L., Ma Y., Yue C., et al. Transformation mechanisms of organic S/N/O compounds during microwave pyrolysis of oil shale: A comparative research with conventional pyrolysis // Fuel Process. Technol., 2021. Vol. 212. P. 106605.
  27. Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review // Waste Manage., 2012. Vol. 32. P. 625–639.
  28. Westinghouse W. P. C. Plasma gasification is the next generation of energy from waste technology // USEA Annual Meeting. — Washington, D.C., USA, 2013. P. 1–16.
  29. Wnukowski M. Decomposition of tars in microwave plasma — preliminary results // Ecol. Eng., 2014. Vol. 15. P. 23–28.
  30. Cothran C. Identifying likely late-stage UK WTE projects // Syngas Technologies Conference. — Colorado Springs, CO, USA: Global Syngas Technologies Council, 2015. 13 p.
  31. Messenger B. Air products to ditch plasma gasification waste to energy plants in Teesside. — Waste Management World, 2016.
  32. Simkins G., Walsh L. Reasons for TV1 failure revealed. — Twickenham, 2016. ENDS Report.
  33. Бебелин И. Н., Волков А. Г., Грязнов А. Н., Малышенко С. П. Разработка и исследование экспериментального водородо-кислородного парогенератора мощностью 10 МВт(т) // Теплоэнергетика, 1997. № 8. С. 48–52.
  34. Сариев В. Н., Веретенников В. А., Трояченко В. В. Система комплексной безотходной переработки твердых бытовых и промышленных отходов. Патент РФ 2 648 737 от 28.03.2018. Приоритет от 12.08.2016.
  35. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Набатников С. А. Способ получения сильно перегретого пара и устройство детонационного парогенератора (варианты). Патент РФ № 2686138 от 24.04.2019. Приоритет от 26.02.2018
  36. Saxena S. C., Jotshi C. K. Management and combustion of hazardous wastes // Prog. Energ. Combust., 1996. Vol. 22. No. 5. P. 401–425.
  37. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Набатников С. А. Способ газификации угля в сильно перегретом водяном паре и устройство для его осуществления. Патент РФ на изобретение № 2683751 от 01.04.2019. Приоритет от 24.05.2018. (Международная заявка WO2019/226074 A1 от 28.11.2019.)
  38. Фролов С. М., Набатников С. А., Диесперов К. В., Ачильдиев Е. Р. Способ обеззараживания летучей золы, образующейся при сжигании отходов, и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2739241 от 22.12.2020 г. Приоритет от 11.06.2020.
  39. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: Challenges, current status, and future perspective // Prog. Energ. Combust., 2004. Vol. 30. No. 6. P. 545–672.
  40. Быковский, Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная спиновая детонация. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики им. М. А. Лаврентьева, 2013. 422 с.
  41. Rauch R., Hrbek J., Hofbauer H. Biomass gasification for synthesis gas production and applications of the syngas // WIRES Energy Environ., 2013. doi: 10.1002/wene.97.
  42. Mahinpey N., Gomez A. Review of gasification fundamentals and new findings: Reactors, feedstock, and kinetic studies // Chem. Eng. Sci., 2016. Vol. 148. P. 14–31.
  43. Awasthi A. K., et al. Plastic solid waste utilization technologies: A review // IOP Conf. Ser. — Mat. Sci., 2017. Vol. 263. P. 022024.
  44. Zhang Y., Xu P., Liang S., Liu B., Shuai Y., Li B. Exergy analysis of hydrogen production from steam gasification of biomass: A review // Int. J. Hydrogen Energ., 2019. Vol. 44. No. 28. P. 14290–14302.
  45. Inayat A., Raza M., Khan Z., Ghenai C., Aslam M., Ayoub M. S. M. Flowsheet modeling and simulation of biomass steam gasification for hydrogen production // Chem. Eng. Technol., 2020. Vol. 43. No. 4. P. 649–660.

46. *Indrawan N., Kumar A., Moliere M., Sallam K.A., Huhnke R.L.* Distributed power generation via gasification of biomass and municipal solid waste: A review // *J. Energy Inst.*, 2020. Vol. 93. P. 2293–2313.
47. *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.
48. *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.
49. *Galvagno S., Casu S., Casciaro G., Martino M., Russo A., Portofino S.* Steam gasification of Refuse-Derived Fuel (RDF): Influence of process temperature on yield and product composition // *Energ. Fuel*, 2006. Vol. 20. P. 2284–2288.
50. *Galvagno S., Casciaro G., Casu S., Martino M., Mingazzini C., Russo A., Portofino S.* Steam gasification of tire waste, poplar, and refuse-derived fuel: A comparative analysis // *Waste Manage.*, 2009. Vol. 29. P. 678–689.
51. *Umeki K., Yamamoto K., Namioka T., Yoshikawa K.* High temperature steam-only gasification of woody biomass // *Appl. Energ.*, 2010. Vol. 87. P. 791–798.
52. *Pieratti E., Baratieri M., Ceschini S., Tognana L., Baggio P.* Syngas suitability for solid oxide fuel cells applications produced via biomass steam gasification process: Experimental and modeling analysis // *J. Power Sources*, 2011. Vol. 196. No. 23. P. 10038–10049.
53. *Soni C.G., Dalai A.K., Pugsley T., Fonstad T.* Steam gasification of meat and bone meal in a two-stage fixed-bed reactor system // *Asia-Pac. J. Chem. Eng.*, 2011. Vol. 6. P. 71–77.
54. *Portofino S., Donatelli A., Iovane P., et al.* Steam gasification of waste tyre: Influence of process temperature on yield and product composition // *Waste Manage.*, 2013. Vol. 33. No. 3. P. 672–678.
55. *Wilk V., Hofbauer H.* Conversion of mixed plastic wastes in a dual fluidized bed steam gasifier // *Fuel*, 2013. Vol. 107. P. 787–799.
56. *Pilon G., Lavoie J.-M.* Pyrolysis of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) at low temperatures within N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> environments: Product yield study. // *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 2013. Vol. 1. P. 198–204.
57. *Guizani C., Escudero Sanz F.J., Salvador S.* Effects of CO<sub>2</sub> on biomass fast pyrolysis: Reaction rate, gas yields and char reactive properties // *Fuel*, 2014. Vol. 116. P. 310–320.
58. *Sadhvani N., Adhikari S., Eden M. R.* Biomass gasification using carbon dioxide: Effect of temperature, CO<sub>2</sub>/C ratio, and the study of reactions influencing the process // *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2016. Vol. 55. P. 2883–2891.
59. *Eshun J., Wang L., Ansah E., Shahbazi A., Schimmel K., Kabadi V., Aravamudhan S.* Characterization of the physicochemical and structural evolution of biomass particles during combined pyrolysis and CO<sub>2</sub> gasification // *J. Energy Inst.*, 2019. Vol. 92. Iss. 1. P. 82–93. doi: 10.1016/j.joei.2017.11.003.
60. *Minkova V., Marinov S. P., Zanzi R., et al.* Thermochemical treatment of biomass in a flow of steam or in a mixture of steam and carbon dioxide // *Fuel Process. Technol.*, 2000. Vol. 61. No. 1. P. 45–52.
61. *Kraft S., Kirnbauer F., Hofbauer H.* CFPD simulations of an industrial-sized dual fluidized bed steam gasification system of biomass with 8 MW fuel input // *Powder Technol.*, 2017. Vol. 190. P. 408–420.
62. *Eri Q., Peng J., Zhao X.* CFD simulation of biomass steam gasification in a fluidized bed based on a multi-composition multi-step kinetic model // *Appl. Therm. Eng.*, 2018. Vol. 129. P. 1358–1368.
63. *Yan L., Cao Y., Zhou H., He B.* Investigation on biomass steam gasification in a dual fluidized bed reactor with the granular kinetic theory // *Bioresource Technol.*, 2018. Vol. 269. P. 384–392.
64. *Qi T., Lei T., Yan B., Chen G., et al.* Biomass steam gasification in bubbling fluidized bed for higher-H<sub>2</sub> syngas: CFD simulation with coarse grain model // *Int. J. Hydrogen Energ.*, 2019. Vol. 44. P. 6448–6460.
65. *Yang S., Fan F., Wei Y., et al.* Three-dimensional MP-PIC simulation of the steam gasification of biomass in a spouted bed gasifier // *Energ. Convers. Manage.*, 2020. Vol. 210. P. 112689.
66. *Фролов С. М.* Влияние турбулентности на среднюю скорость химических превращений: обзор // *Горение и взрыв*, 2016. Т. 9. № 1. С. 43–58
67. *Billaud J., Valin S., Peyrot M., Salvador S.* Influence of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> addition on biomass gasification in entrained flow reactor conditions: Experiments and modelling // *Fuel*, 2016. Vol. 166. P. 166–178.
68. *Shie J. L., Tsou F. J., Lin K. L., Chang C. Y.* Bioenergy and products from thermal pyrolysis of rice straw using plasma torch // *Bioresource Technol.*, 2010. Vol. 101. P. 761–768.
69. *Hlina M., Hrabovsky M., Kavka T., Konrad M.* Production of high quality syngas from argon/water plasma gasification of biomass and waste // *Waste Manage.*, 2014. Vol. 34. P. 63–66.
70. *Agon N., Hrabovsky M., Chumak O., et al.* Plasma gasification or refuse derived fuel in a single-stage system using different gasifying agents // *Waste Manage.*, 2016. Vol. 47. P. 246–255.
71. *Hrabovsky M., Hlina M., Kopecky V., Maslani A., Zivny O., Krenek P., Hurba O.* Steam plasma treatment of organic substances for hydrogen and syngas production // *Plasma Chem. Plasma P.*, 2017. Vol. 37. No. 3. P. 739–762.
72. *Wang M., Mao M., Zhang M., et al.* Highly efficient treatment of textile dyeing sludge by CO<sub>2</sub> thermal plasma gasification // *Waste Manage.*, 2019. Vol. 90. P. 29–36.
73. *Vecten S., Wilkinson M., Bimbo N., Dawson R., Herbert B. M. J.* Hydrogen-rich syngas production from biomass in a steam microwave-induced plasma gasification reactor // *Bioresource Technol.*, 2021. Vol. 337. P. 125324. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125324.
74. *Piatkowski N., Wieckert C., Steinfeld A.* Experimental investigation of a packed-bed solar reactor for the steam gasification of carbonaceous feedstocks // *Fuel Process. Technol.*, 2009. Vol. 90. P. 360–366.

75. Фролов С. М., Фролов Ф. С., Сметанюк В. А. Способ детонационной штамповки и устройство для его реализации. Патент WO 2016/060582 A1, B21D 26/08 (2006.01) от 21.04.2016. Приоритет от 16.10.2014.
76. Фролов С. М., Фролов Ф. С. Устройство для сжигания топлива в непрерывной детонационной волне. Патент WO 2014/129920 A1, F23R 7/00 от 28.08.2014. Приоритет от 19.02.2013.
77. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Шамшин И. О., Коваль А. С., Фролов Ф. С., Набатников С. А. Циклическая детонация тройной газовой смеси «пропан – кислород – водяной пар» для получения сильно перегретого водяного пара // Докл. Акад. наук, 2020. Т. 490. С. 57–61. doi: 10.31857/S268695352001015X.
78. Фролов С. М., Аксенов В. С., Авдеев К. А., Борисов А. А., Иванов В. С., Коваль А. С., Медведев С. Н., Сметанюк В. А., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Тепловые испытания импульсно-детонационной газовой горелки без принудительного охлаждения // Горение и взрыв, 2013. Вып. 6. С. 98–103.
79. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Шамшин И. О., Коваль А. С., Фролов Ф. С., Набатников С. А. Получение сильно перегретого водяного пара с помощью циклической детонации тройной газовой смеси «пропан – кислород – водяной пар» // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 4. С. 95–103. doi: 10.30826/CE19120410.
80. 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.
81. Фролов С. М., Аксенов В. С., Дубровский А. В., Зангиев А. Э., Иванов В. С., Медведев С. Н., Шамшин И. О. Хемионизационная и акустическая диагностика рабочего процесса в непрерывно-детонационных и импульсно-детонационных камерах сгорания // Докл. Акад. наук, 2015. Т. 465. № 1. С. 62–67.
82. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Сергеев С. С. Реактор для газификации отходов сильно перегретым водяным паром // Докл. Акад. наук, 2020. Т. 495. С. 71–76. doi: 10.31857/S2686953520060151.
83. Morin C., Chauveau C., Gökalp I. Droplet vaporisation characteristics of vegetable oil derived biofuels at high temperatures // Exp. Therm. Fluid Sci., 2000. Vol. 21. No. 1-3. P. 41–50. doi: 10.1016/s0894-1777(99)00052-7.
84. Басевич В. Я., Медведев С. Н., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Басара Б., Пришинг П. Макрокинетическая модель для расчета эмиссии сажи в дизеле // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 3. С. 36–46.

Поступила в редакцию 15.08.2021