ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, 2026. Том 19. №2. С. 77–106

# ГАЗИФИКАЦИЯ БИОУГЛЕЙ ВОДЯНЫМ ПАРОМ И ДИОКСИДОМ УГЛЕРОДА: ОБЗОР

С. М. Фролов[1]

**Аннотация:** Рассмотрены экспериментальные и теоретические исследования низкотемпературной (ниже 1000 °C) и высокотемпературной (выше 1200 °C) аллотермической некаталитической газификации углей, в основном полученных из биомассы — биоуглей — в среде перегретого водяного пара и/или диоксида углерода при атмосферном давлении. Рассмотренные экспериментальные работы по низкотемпературной газификации включают исследования методом термогравиметрического анализа (ТГА) и на лабораторных трубчатых и конических реакторах-газификаторах (РГ) непрерывного и периодического действия с электронагревом и неподвижным цилиндрическим или коническим слоем сырья, а также псевдоожиженным слоем, фонтанирующим слоем и нисходящим потоком сырья. Рассмотренные экспериментальные работы по высокотемпературной газификации включают исследования методом ТГА, в трубчатых РГ непрерывного и периодического действия с подвижным и неподвижным слоем сырья, с электрическим, сверхвысокочастотным (СВЧ) и плазменно-дуговым нагревом и нагревом сфокусированным солнечным излучением, а также с использованием инновационного импульсно-детонационного пароперегревателя. Рассмотренные теоретические работы включают равновесные и неравновесные модели газификации биоуглей, включая объемную модель (ОМ), ОМ $n$-го порядка, модель усадки зерен (МУЗ), модель случайных пор (МСП) и различные модификации МСП, а также трехмерную модель газификации частиц биоугля с пространственным разрешением пор, в которой каждая пора в частице биоугля отслеживается индивидуально. Поскольку биоуголь главным образом состоит из углерода, его низшая теплота сгорания значительно выше (до 32 МДж/кг), чем у исходной биомассы (до 20 МДж/кг). Водяной пар ускоряет эндотермические реакции паровой конверсии биоугля с образованием $H_2$, а также экзотермическую реакцию конверсии водяного газа. Диоксид углерода ускоряет эндотермические реакции углекислотной конверсии биоугля с образованием CO. Генераторный газ (ГГ), получаемый при аллотермической некаталитической паровой и/или углекислотной газификации биоуглей, в основном состоит из смеси $H_2$, CO, $CH_4$ и $CO_2$, причем для низкотемпературной газификации характерны низкий выход ГГ (до 30%–40%) из-за образования смол (до 40%–50%), низкое качество ГГ вследствие большого содержания $CO_2$ (до 25%–50%) и сложное управление качеством ГГ вследствие большой продолжительности процесса газификации и того, что он, как правило, лимитируется скоростью химических превращений; а для высокотемпературной газификации характерны высокий выход качественного ГГ, высокая степень конверсии углерода (СКУ) в ГГ и относительно простое управление составом получаемого ГГ. Сравнение газификации биоуглей в среде $H_2O/CO_2$ и их пиролиза в отсутствие свободного кислорода в одних и тех же экспериментальных условиях показывает, что СКУ и выход ГГ при газификации могут быть значительно выше, чем при пиролизе. Более того, высокотемпературная пароуглекислотная газификация биоугля имеет важное преимущество перед низкотемпературной газификацией, связанное с отсутствием вредных выбросов в окружающую среду.

**Ключевые слова:** биоуголь; пиролиз; низкотемпературная газификация; высокотемпературная газификация; газифицирующий агент; водяной пар; диоксид углерода; эффективность конверсии углерода; генераторный газ

**DOI:** 10.30826/CE26190208 **EDN:** ZEUZYF

## Литература

1. *Glushkov D., Nyashina G., Shvets A., Pereira A., Ramanathan A.* current status of the pyrolysis and gasification mechanism of biomass // Energies, 2021. Vol. 14. P. 7541. doi: 10.3390/en14227541.
2. *Basu P.* Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. — Burlington, MA, USA: Academic Press, 2010. 376 p.
3. *Zhao S., Ding L., Ruan Y., Bai B., Qiu Z., Li Z.* Experimental and kinetic studies on steam gasification of a biomass char // Energies, 2021. Vol. 14. P. 7229. doi: 10.3390/en14217229.
4. *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.

[1]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

5. *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.
6. *Sharma M., Kaushal R.* Advances and challenges in the generation of bio-based fuels using gasifiers: A comprehensive review // Int. J. Ambient Energy, 2020. Vol. 41. No. 14. P. 1645–1663. doi: 10.1080/01430750.2018.1517687.
7. *Ma Zhunzhun, Ma Hongfang, Zhang Haitao, Wu Xian, Qian Weixin, Sun Qiwen, Ying Weiyong.* Direct conversion of syngas to light olefins through Fischer–Tropsch synthesis over Fe–Zr catalysts modified with sodium // ACS Omega, 2021. Vol. 6. No. 7. P. 4968–4976. doi: 10.1021/acsomega.0c06008.
8. *Yu H., Wang C., Lin T.* Direct production of olefins from syngas with ultrahigh carbon efficiency // Nat. Commun., 2022. Vol. 13. P. 5987. doi: 10.1038/s41467-022-33715-w.
9. *Reznichenko A., Harlin A.* Next generation of polyolefin plastics: Improving sustainability with existing and novel feedstock base // SN Applied Sciences, 2022. Vol. 4. P. 108. doi: 10.1007/s42452-022-04991-4.
10. *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.
11. *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.
12. *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.
13. *Ouedraogo A. S., Frazier R. S., Kumar A.* Comparative life cycle assessment of gasification and landfilling for disposal of municipal solid wastes // Energies, 2021. Vol. 14. P. 7032. doi: 10.3390/en14217032.
14. *Sanjaya E., Abbas A.* Plasma gasification as an alternative energy-from-waste (EFW) technology for the circular economy: An environmental review // Resour. Conserv. Recy., 2023. Vol. 189. P. 106730. doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106730.
15. *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.
16. *Wang K., Kong G., Zhang G., Zhang X., Han L., Zhang X.* Steam gasification of torrefied/carbonized wheat straw for $H_2$-enriched syngas production and tar reduction // Int. J. Env. Res. Pub. He., 2022. Vol. 19. P. 10475. doi: 10.3390/ijerph191710475.
17. *Sezer S., Özveren U.* Investigation of syngas exergy value and hydrogen concentration in syngas from biomass gasification in a bubbling fluidized bed gasifier by using machine learning // Int. J. Hydrogen Energ., 2021. Vol. 46. No. 39. P. 20377–20396. doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.03.184
18. *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.
19. *Safavi A., Richter C., Unnthorsson R.* Dioxin formation in biomass gasification: A review // Energies, 2022. Vol. 15. P. 700. doi: 10.3390/en15030700.
20. *Ahmed I., Gupta A. K.* Pyrolysis and gasification of food waste: Syngas characteristics and char gasification kinetics // Appl. Energ., 2010. Vol. 87. P. 101–108.
21. *Alabbadi S. A.* Hydrogen oxygen steam generator integrating with renewable energy resource for electricity generation // Enrgy Proced., 2012. Vol. 29. P. 12–20. doi: 10.1016/j.egypro.2012.09.003.
22. *Abanades S., Rodat S., Boujjat H.* Solar thermochemical green fuels production: A review of biomass pyrogasification, solar reactor concepts and modelling methods // Energies, 2021. Vol. 14. P. 1494. doi: 10.3390/en14051494.
23. *Suárez-Almeida M., Gómez-Barea A., Ghoniem A. F., Pfeifer C.* Solar gasification of biomass in a dual fluidized bed // Chem. Eng. J., 2021. Vol. 406. P. 126665, doi: 10.1016/j.cej.2020.126665.
24. *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. No. C. P. 11484. doi: 10.1016/j.rser.2021.111484.
25. *Chun Y. N., Song H. G.* Microwave-induced carbon–$CO_2$ gasification for energy conversion // Energy, 2020. Vol. 190. P. 116386.
26. *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.
27. *Frolov S. M.* Organic waste gasification: A selective review // Fuels, 2021. Vol. 2. P. 556–650. doi: 10.3390/fuels2040033.
28. *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.
29. *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.
30. *Frolov S. M.* Organic waste gasification by ultra-superheated steam // Energies, 2023. Vol. 16. P. 219. doi: 10.3390/en16010219.
31. *Roncancio R., Gore J. P.* $CO_2$ char gasification: A systematic review from 2014 to 2020 // Energ. Convers. Manage. X, 2021. Vol. 10. P. 100060.

32. *Авдеев К. А., Силантьев А. С., Сметанюк В. А., Пилецкий В. Г., Фролов Ф. С., Фролов С. М.* Условия самозапитки импульсно-детонационных пушек энергетическим газом при газификации бурых углей продуктами детонации // Горение и взрыв, 2024. Т. 17. № 1. С. 95–104. doi: 10.30826/CE24170108.
33. *Antal M. J., Jr.* Effects of residence time, temperature, and pressure on the steam gasification of biomass // Biomass as a nonfossil fuel source / Ed. D. L. Klass. — ACS Symposium ser. — Washington, D.C., USA: American Chemical Society, 1981. P. 313–334.
34. *Ferreira S., Monteiro E., Brito P., Vilarinho C.* A holistic review on biomass gasification modified equilibrium models // Energies, 2019. Vol. 12. P. 160.
35. *Moretti L., Arpino F., Cortellessa G., Di Fraia S., Di Palma M., Vanoli L.* Reliability of equilibrium gasification models for selected biomass types and compositions: An overview // Energies, 2022. Vol. 15. P. 61. doi: 10.3390/en15010061.
36. *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,. P. 739–762.
37. *Singer S. L., Ghoniem A. F.* Comprehensive gasification modeling of char particles with multi-modal pore structures // Combust. Flame, 2013. Vol. 160. No. 1. P. 120–137.
38. *Wittig K., Nikrityuk P. A., Schulze S., Richter A.* Three-dimensional modeling of porosity development during the gasification of a char particle // AIChE J., 2017. Vol. 63. P. 1638–1647.
39. *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 $CO_2$ gasification // J. Energy Inst., 2017. doi: 10.1016/j.joei.2017.11.003.
40. *Chen T., Ku X., Lin J. J. C.* CFD simulation of the steam gasification of millimeter-sized char particle using thermally thick treatment // Combust. Flame, 2020. Vol. 213. P. 63–86.
41. *Liu M., Shen Z., Xu J., Liang Q., Liu H.* Experimental studies on $CO_2$ gasification of petcoke particle swarm at high temperatures // AIChE J., 2018. Vol. 64. P. 4009–4018. doi: 10.1002/aic.16221.
42. *Chaudhari S., Bej S., Bakhshi N., Dalai A.* Steam gasification of biomass-derived char for the production of carbon monoxide-rich synthesis gas // Energ. Fuel., 2001. Vol. 15. P. 736–742.
43. *Chaudhari S. T., Dalai A. K., Bakhshi N. N.* Production of hydrogen and/or syngas ($H_2 + CO$) via steam gasification of biomass-derived chars // Energ. Fuel., 2003. Vol. 17. P. 1062–1067.
44. *Gomez-Barea A., Ollero P., Fernandez-Baco C.* Diffusional effects in $CO_2$ gasification experiments with single biomass char particles. 1. Experimental investigation // Energ. Fuel., 2006. Vol. 20. P. 2202–2210.
45. *Haykiri-Acma H., Yaman S., Kucukbayrak S.* Gasification of biomass chars in steam nitrogen mixture // Energ. Convers. Manage., 2006. Vol. 47. P. 1004–1013.
46. *Mermoud F., Salvador S., VandeSteene L., Golfier F.* Influence of the pyrolysis heating rate on the steam gasification rate of large wood char particles // Fuel, 2006. Vol. 85. P. 1473–1482. doi: 10.1016/j.fuel.2005.12.004.
47. *Fermoso J., Arias B., Pevida C., Plaza M. G., Rubiera F., Pis J. J.* Kinetic models comparison for steam gasification of different nature fuel chars // J. Therm. Anal. Calorim., 2008. Vol. 91. No. 3. P. 779–786.
48. *Inayat A., Murni M. A., Yusup S., Mutalib M. I. A.* Biomass steam gasification with in-situ $CO_2$ capture for enriched hydrogen gas production: A reaction kinetics modelling approach // Energies, 2010. Vol. 3. P. 1472–1484. doi: 10.3390/en3081472.
49. *Kajita M., Kimura T., Norinaga K., Li C.-Z., Hayashi J.-I.* Catalytic and noncatalytic mechanisms in steam gasification of char from the pyrolysis of biomass // Energ. Fuel., 2010. Vol. 24. No. 1. P. 108–116.
50. *Seo D. K., Lee S. K., Kang M. W., Hwang J., Yu T.* Gasification reactivity of biomass chars with $CO_2$ // Biomass Bioenerg., 2010. Vol. 34. P. 1946–1953.
51. *Yan F., Luo S., Hu Z., Xiao B., Cheng G.* Hydrogen-rich gas production by steam gasification of char from biomass fast pyrolysis in a fixed-bed reactor: Influence of temperature and steam on hydrogen yield and syngas composition // Bioresource Technol., 2010. Vol. 101. P. 5633–5637.
52. *Yan F., Zhang L., Hu Z., Cheng G., Jiang C., Zhang Y.* Hydrogen-rich gas production by steam gasification of char derived from cyanobacterial blooms (CDCB) in a fixed-bed reactor: Influence of particle size and residence time on gas yield and syngas composition // Int. J. Hydrogen Energ., 2010. Vol. 35. No. 19. P. 10212–10217.
53. *Gordillo E. D., Belghit A.* A two-phase model of high temperature steam-only gasification of biomass char in bubbling fluidized bed reactors using nuclear heat // Int. J. Hydrogen Energ., 2011. Vol. 66. P. 374–381.
54. *Xu Q., Pang S., Levi T.* Reaction kinetics and producer gas compositions of steam gasification of coal and biomass blend chars, part 1: Experimental investigation // Chem. Eng. Sci., 2011. Vol. 66. No. 10. P. 2141–2148.
55. *Ma Z., Zhang S., Xie S., Yan Y., Ren Z.* Hydrogen production from biochar via steam gasification in a fluidized-bed reactor // Chem. Eng. Technol., 2013. Vol. 36. No. 9. P. 1599–1602.
56. *Sattar A., Leeke G. A., Hornung A., Wood J.* Steam gasification of rapeseed, wood, sewage sludge and miscanthus biochars for the production of a hydrogen-rich syngas // Biomass Bioenerg., 2014. Vol. 69. P. 276–286. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.07.025.
57. *Alvarez J., Lopez G., Amutio M., Bilbao J., Olazar M.* Kinetic study of carbon dioxide gasification of rice husk fast pyrolysis char // Energ. Fuel., 2015. Vol. 29. P. 3198–3207.
58. *Zhai M., Zhang Y., Dong P., Liu P.* Characteristics of rice husk char gasification with steam // Fuel, 2015. Vol. 158. P. 42–49.
59. *Lopez G., Alvarez J., Amutio M., Arregi A., Bilbao J., Olazar M.* Assessment of steam gasification kinetics of the char from lignocellulosic biomass in a conical spouted bed reactor // Energy, 2016. Vol. 107. P. 493–501.

60. *Wu Y., Zhang Q., Yang W., Blasiak W.* Two-dimensional computational fluid dynamics simulation of biomass gasification in a downdraft fixed-bed gasifier with highly preheated air and steam // Energ. Fuel., 2013. Vol. 27. P. 3274–3282. doi: 10.1021/ef4003704.
61. *Fernando N., Narayana M.* A comprehensive two-dimensional computational fluid dynamics model for an updraft biomass gasifier // Renew. Energ., 2016. Vol. 99. P. 698–710. doi: 10.1016/j.renene.2016.07.057.
62. *Gonzalez W. A., Perez J. F.* CFD analysis and characterization of biochar produced via fixed-bed gasification of fallen leaf pellets // Energy, 2019. P. 115904. doi: 10.1016/j.energy.2019.115904.
63. *Qi G., Wang Z., Zhang S., Dong Y., Guan J., Dong P.* Numerical simulation on biomass-pyrolysis and thermal cracking of condensable volatile component // Int. J. Hydrogen Energ., 2020. Vol. 45. No. 22. P. 12283–12297. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.02.199.
64. *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. P. 739–762.
65. *Menéndez J. A., Domínguez A., Fernández Y., Pis J. J.* Evidence of self-gasification during the microwave-induced pyrolysis of coffee hulls // Energ. Fuel., 2007. Vol. 21. P. 373–378.
66. *Kruesi M., Jovanovic Z. R., dos Santos E. C., Yoon H. C., Steinfeld A.* Solar-driven steam-based gasification of sugarcane bagasse in a combined drop-tube and fixed-bed reactor — thermodynamic, kinetic, and experimental analyses // Biomass Bioenerg., 2013. Vol. 52. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.03.003.
67. *Lin L., Strand M.* Investigation of the intrinsic $CO_2$ gasification kinetics of biomass char at medium to high temperatures // Appl. Energ., 2013. Vol. 109. P. 220–228. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.04.027.
68. *Lahijani P., Zainal Z. A., Mohamed A. R., Mohammadi M.* Microwave-enhanced $CO_2$ gasification of oil palm shell char // Bioresource Technol., 2014. Vol. 158. P. 193–200. doi: 10.1016/j.biortech.2014.02.015.
69. *Schulze S., Richter A., Vascellari M., Gupta A., Meyer B., Nikrityuk P. A.* Novel intrinsic-based submodel for char particle gasification in entrained flow gasifiers: Model development, validation and illustration // Appl. Energ., 2016. Vol. 164. P. 805–814.
70. *Tamosiunas A., Chouchene A., Valatkevicius P., Gimzăuskaite D., Aikas M., Uscila R., Jeguirim M.* The potential of thermal plasma gasification of olive pomace charcoal // Energies, 2017. Vol. 10. No. 5. P. 710. doi: 10.3390/en10050710.
71. *Zhai M., Liu J., Wang Z., Guo L., Wang X., Zhang Y.* Gasification characteristics of sawdust char at a high-temperature steam atmosphere // Energy, 2017. Vol. 128. P. 509–518.
72. *Chun Y. N., Song H. G.* Microwave-induced carbon-$CO_2$ gasification for energy conversion // Energy, 2020. Vol. 190. doi: 10.1016/j.energy.2019.116386.
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. *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.
75. *Frolov S. M., Silantiev A. S., Sadykov I. A., Smetanyuk V. A., Frolov F. S., Hasiak Y. K., Dudareva T. V., Bekeshev V. G., Grishin M. V., Golubev E. K., Baimukhambetova D., Popkova V. Ya., Vezentsev A. I., Razdobarin A. E., Yapryntsev M. N., Sokolovskiy P. V.* Composition and textural characteristics of char powders produced by thermomechanical processing of sunflower seed husks // Powders, 2023. Vol. 2. No. 3. P. 624–638.
76. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садыков И. А., Силантьев А. С., Фролов Ф. С., Гапар Р. Г., Попкова В. Я., Хасяк Я. К., Буяновская А. Г., Таказова Р. У., Дударева Т. В., Бекешев В. Г., Воробьёв А. Б., Иноземцев А. В., Иноземцев Я. О.* Газификация нефтешламов и нефтекокса методом детонационной пушки // Горение и взрыв, 2024. Т. 17. № 2. С. 55–79. doi: 10.30826/CE24170207.
77. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садыков И. А., Силантьев А.С., Авдеев К. А., Фролов Ф. С., Воробьев А. Б., Иноземцев А. В., Иноземцев Я. О., Коверзанова Е. В., Гордиенко Ю. А., Блинов Н. Д., Дударева Т. В., Попкова В. Я.* Газификация отходов животноводства ультрапеременой смесью водяного пара и диоксида углерода // Горение и взрыв, 2025. Т. 18. № 2. С. 63–91. doi: 10.30826/CE25180207.


*Поступила в редакцию 11.12.2025*
*После доработки 04.03.2026*
*Принята к публикации 10.03.2026*