

СЖИГАНИЕ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ В ФАКЕЛЕ ГИДРАТА МЕТАНА*

К. В. Виногородский¹, В. В. Дорохов², Д. С. Романов³, П. А. Стрижак⁴

Аннотация: Использование ископаемых энергоресурсов в энергетическом секторе сопровождается рядом проблем, таких как истощаемость запасов ресурсов, а также высокий уровень антропогенных выбросов. Один из вариантов решения данных проблем — вовлечение в энергетический сектор возобновляемых энергоресурсов, например опилок и рапсового масла. Однако прямое сжигание таких топлив имеет ряд сложностей и ограничений. Для интенсификации зажигания и улучшения экологических характеристик горения опилок и рапсового масла предлагается использовать газовые гидраты. В процессе диссоциации гидрат диссоциирует на горючий компонент (метан) и водяной пар. Данная парогазовая смесь подается в камеру сгорания совместно с основным топливом растительного происхождения. Экспериментально установлено, что осуществление совместного сжигания позволяет добиться стабильного горения топливно-воздушной смеси и снизить уровень антропогенных выбросов, поступающих в атмосферу при выработке тепловой энергии.

Ключевые слова: газовый гидрат; биомасса; антропогенные выбросы; совместное сжигание

DOI: 10.30826/CE25180203

EDN: GTWHJB

Литература

1. Jiang Q., Khattak S. I., Rahman Z. U. Measuring the simultaneous effects of electricity consumption and production on carbon dioxide emissions (CO₂e) in China: New evidence from an EKC-based assessment // *Energy*, 2021. Vol. 229. P. 120616. doi: 10.1016/j.energy.2021.120616.
2. Greiner P. T., York R., McGee J. A. When are fossil fuels displaced? An exploratory inquiry into the role of nuclear electricity production in the displacement of fossil fuels // *Heliyon*, 2022. Vol. 8. P. e08795. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e08795.
3. Shafiee S., Topal E. When will fossil fuel reserves be diminished? // *Energ. Policy*, 2009. Vol. 37. P. 181–189. doi: 10.1016/j.enpol.2008.08.016.
4. Al-qazzaz A., Eidgah E. E. F., Alfatlawi A. W., Masroori A., Abed A. M., Ajam H., Kianifar A. An approach of analyzing gas and biomass combustion: Positioned of flame stability and pollutant reduction // *Results Engineering*, 2024. Vol. 23. P. 102823. doi: 10.1016/j.rineng.2024.102823.
5. Wang Q., Zhao W., Liu H., Jia C., Xu H. Reactivity and kinetic analysis of biomass during combustion // *Energy Proced.*, 2012. Vol. 17. P. 869–875. doi: 10.1016/j.egypro.2012.02.181.
6. Arromdee P., Ninduangdee P. Combustion characteristics of pelletized-biomass fuels: A thermogravimetric analysis and combustion study in a fluidized-bed combustor // *Energy Ecology Environment*, 2023. Vol. 8. P. 69–88. doi: 10.1007/S40974-022-00263-4/tables/5.
7. Carvalho L., Wopienka E., Pointner C., Lundgren J., Verma V. K., Haslinger W., Schmidl C. Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels // *Appl. Energy*, 2013. Vol. 104. P. 286–296. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.10.058.
8. Ni Z., Bi H., Jiang C., Sun H., Zhou W., Qiu Z., He L., Lin Q. Influence of biomass on coal slime combustion characteristics based on TG-FTIR, principal component analysis, and artificial neural network // *Sci. Total Environ.*, 2022. Vol. 843. P. 156983. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156983.
9. Zhang Y., Li Z., Tamilselvan P., Jiang C., He Z., Zhong W., Qian Y., Wang Q., Lu X. Experimental study of combustion and emission characteristics of gasoline compression ignition (GCI) engines fueled by gasoline-hydrogenated catalytic biodiesel blends // *Energy*, 2019. Vol. 187. P. 115931. doi: 10.1016/j.energy.2019.115931.
10. Wzorek M., Junga R., Yilmaz E., Niemiec P. Combustion behavior and mechanical properties of pellets derived from blends of animal manure and lignocellulosic biomass // *J. Environ. Manage.*, 2021. Vol. 290. P. 112487. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112487.
11. Roy R., Hewetson B., Schooff B., Bandi S., LaTour P., Iverson B. D., Fry A. Steam explosion treated biomass as

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, kvv9@tpu.ru

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, vvd11@tpu.ru

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, dsr7@tpu.ru

⁴Национальный исследовательский Томский политехнический университет; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, pavelspa@tpu.ru

- a renewable fuel source: A review from collection to combustion // *Fuel*, 2024. Vol. 378. P. 132883. doi: 10.1016/j.fuel.2024.132883.
12. He K., Shen Z., Yang Y., Zhang B., Sun J., Xu H., Sai Hang Ho S., Qu L., Cao J. Insight into emission reduction effect of coal and biomass mixed briquette fuel // *J. Clean. Prod.*, 2024. Vol. 471. P. 143419. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143419.
 13. Zhang Y., Taboada-Serrano P. Interfacial effects on the nucleation probability of gas hydrates in porous media // *J. Ind. Eng. Chem.*, 2023. Vol. 129. No. 7. doi: 10.1016/j.jiec.2023.09.015.
 14. Tu Y., Liu H., Su K., Chen S., Liu Z., Zheng C., Li W. Numerical study of H₂O addition effects on pulverized coal oxy-mild combustion // *Fuel Process. Technol.*, 2015. Vol. 138. P. 252–262. doi: 10.1016/j.fuproc.2015.05.031.
 15. Yue S., Wang C., Huang Y., Xu Z., Xing J., Anthony E. J. The role of H₂O in structural nitrogen migration during coal devolatilization under oxy-steam combustion conditions // *Fuel Process. Technol.*, 2022. Vol. 225. P. 107040. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107040.
 16. Deng L., Zhao Y., Sun S., Feng D., Zhang W. Review on thermal conversion characteristics of coal in O₂/H₂O atmosphere // *Fuel Process. Technol.*, 2022. Vol. 232. P. 107266. doi: 10.1016/j.fuproc.2022.107266.
 17. Nagibin P. S., Vinogradskiy K., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Using methane hydrate to intensify the combustion of low-rank coal fuels // *Energy*, 2024. Vol. 304. P. 133432. doi: 10.1016/j.energy.2024.132044.
 18. Elorfi A., Sarh B. Excess air ratio effects on flow and combustion characteristics of pulverized biomass (olive cake) // *Case Studies Thermal Engineering*, 2019. Vol. 13. P. 100367. doi: 10.1016/j.csite.2018.100367.
 19. Xu H., Smoot L. D., Hill S. C. Computational model for NO_x reduction by advanced reburning // *Energ. Fuel.*, 1999. Vol. 13. P. 411–420. doi: 10.1021/ef980090h.
 20. Park D. C., Day S. J., Nelson P. F. Nitrogen release during reaction of coal char with O₂, CO₂, and H₂O // *P. Combust. Inst.*, 2005. Vol. 30. P. 2169–2175. doi: 10.1016/j.proci.2004.08.051.
 21. Lin J. Y., Zhang S., Zhang L., Min Z., Tay H., Li C. Z. HCN and NH₃ formation during coal/char gasification in the presence of NO // *Environ. Sci. Technol.*, 2010. Vol. 44. P. 3719–3723. doi: 10.1021/ES1001538.
 22. Jiao T., Fan H., Liu S., Yang S., Du W., Shi P., Yang C., Wang Y., Shangguan J. A review on nitrogen transformation and conversion during coal pyrolysis and combustion based on quantum chemical calculation and experimental study // *Chinese J. Chem. Eng.*, 2021. Vol. 35. P. 107–123. doi: 10.1016/j.cjche.2021.05.010.
 23. Zhang Z., Chen D., Li Z., Cai N., Imada J. Development of sulfur release and reaction model for computational fluid dynamics modeling in sub-bituminous coal combustion // *Energ. Fuel.*, 2017. Vol. 31. P. 1383–1398. doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b02867.
 24. Pashchenko D. Experimental study of methane reforming with products of complete methane combustion in a reformer filled with a nickel-based catalyst // *Energ. Convers. Manage.*, 2019. Vol. 183. P. 159–166. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.102.
 25. Gaidukova O. S., Dorokhov V. V., Misyura S. Y., Morozov V. S., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Dissociation of methane and carbon dioxide hydrates: Synergistic effects // *Fuel*, 2024. Vol. 359. P. 130399. doi: 10.1016/j.fuel.2023.130399.
 26. Skreiberg Ø., Kilpinen P., Glarborg P. Ammonia chemistry below 1400 K under fuel-rich conditions in a flow reactor // *Combust. Flame*, 2004. Vol. 136. P. 501–518. doi: 10.1016/j.combustflame.2003.12.008.
 27. Hu G., Dam-Johansen K., Wedel S., Hansen J. P. Decomposition and oxidation of pyrite // *Prog. Energ. Combust.*, 2006. Vol. 32. P. 295–314.
 28. Zhou H., Li Y., Li N., Qiu R., Cen K. Conversions of fuel — N to NO and N₂O during devolatilization and char combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions // *J. Energy Inst.*, 2019. Vol. 92. P. 351–363. doi: 10.1016/j.joei.2018.01.001.
 29. Tomanović I., Belošević S., Crnomarković N., Milićević A., Tucaković D. Numerical modeling of in-furnace sulfur removal by sorbent injection during pulverized lignite combustion // *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2019. Vol. 128. P. 98–114. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.129.
 30. Dorokhov V. V., Kuznetsov G. V., Nyashina G. S., Strizhak P. A. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal–water slurries containing petrochemicals // *Environ. Pollut.*, 2021. Vol. 285. doi:10.1016/j.envpol.2021.117390.

Поступила в редакцию 27.11.2024

После доработки 30.01.2025

Принята к публикации 04.02.2025