

САЖЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ПИРОЛИЗЕ ЭТИЛЕНА С ДОБАВКАМИ МЕТАНОЛА И БУТАНОЛА*

А. В. Еремин¹, М. Р. Коршунова², Е. Ю. Михеева³

Аннотация: Экспериментально исследован процесс сажеобразования при пиролизе этилена с добавками спиртов: метанола и бутанола за ударными волнами в диапазоне температур 2009–2524 К и давлений 2,56–3,58 бар. Методом лазерной экстинкции на длине волны 633 нм измерены временные профили оптической плотности среды, отражающие выход сажи. Размеры образующихся углеродных наночастиц измерены методом лазерно-индуцированной инкандесценции (ЛИИ). На основании проведенных измерений определены температурные зависимости выхода сажи, размеров частиц и времен индукции появления конденсированной фазы. Показано, что добавки метанола и бутанола ускоряют и увеличивают выход сажи. Наблюдаемый эффект промотирования сажеобразования проявляется сильнее при добавке бутанола, чем метанола. Обсуждаются кинетические причины влияния метанола и бутанола на пиролиз этилена.

Ключевые слова: сажеобразование; углеродные наночастицы; ударная труба; пиролиз этилена; метанол; бутанол

DOI: 10.30826/CE22150103

Литература

1. Yao M., Wang H., Zheng Z., Yue Y. Experimental study of *n*-butanol additive and multi-injection on HD diesel engine performance and emissions // *Fuel*, 2010. Vol. 89. P. 2191–2201. doi: 10.1016/j.fuel.2010.04.008.
2. Ni T., Gupta S. B., Santoro R. J. Suppression of soot formation in ethene laminar diffusion flames by chemical additives // *Symposium (International) on Combustion*, 1994. Vol. 25. P. 585–592. doi: 10.1016/S0082-0784(06)80689-2.
3. Xu H., Yao C., Xu G., Wang Z., Jin H. Experimental and modelling studies of the effects of methanol and ethanol addition on the laminar premixed low-pressure *n*-heptane/toluene flames // *Combust. Flame*, 2013. Vol. 160. P. 1333–1344. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.02.018.
4. Zhou M., Yan F., Zhong X., Xu L., Wang Y. Sooting characteristics of partially-premixed flames of ethanol and ethylene mixtures: Unravelling the opposing effects of ethanol addition on soot formation in non-premixed and premixed flames // *Fuel*, 2021. Vol. 291. P. 120089. doi: 10.1016/j.fuel.2020.120089.
5. Yang S. S., Gülder Ö. L. Ethanol supplement increases soot yields in nitrogen-diluted laminar ethylene diffusion flames at pressures from 3 to 5 bar // *Combust. Flame*, 2021. Vol. 227. P. 1–10. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.12.039.
6. Eremín A. V., Gurentsov E. V., Kolotushkin R. N., Mikheyeva E. Yu. Dependence of soot primary particle size on the height above a burner in target ethylene/air premixed flame // *Combust. Sci. Technol.*, 2021. Published online 04 Mar 2021. doi: 10.1080/00102202.2021.1894138.
7. Frenklach M., Clary D., Gardiner W. C., Stein S. E. Effect of fuel structure on pathways to soot // *Symposium (International) on Combustion*, 1986. Vol. 21. P. 1067–1076. doi: 10.1016/S0082-0784(88)80337-0.
8. Bauerle St., Karasevich Y., Slavov St., Tanke D., Tappe M., Thienel Th., Wagner H. Gg. Soot formation at elevated pressures and carbon concentrations in hydrocarbon pyrolysis // *Symposium (International) on Combustion*, 1994. Vol. 25. P. 627–634. doi: 10.1016/S0082-0784(06)80694-6.
9. De Iuliis S., Chaumeix N., Idir M., Paillard C.-E. Scattering/extinction measurements of soot formation in a shock tube // *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2008. Vol. 32. P. 1354–1362. doi: 10.1016/j.expthermflusc.2007.11.008.
10. Агафонов Г. Л., Билера И. В., Власов П. А., Жильцова И. В., Колбановский Ю. А., Смирнов В. Н., Тереза А. М. Единая кинетическая модель сажеобразования при пиролизе и окислении алифатических и ароматических углеводородов в ударных волнах // *Кинетика и катализ*, 2016. Т. 57. № 5. С. 571–587. doi: 10.7868/S0453881116050014.
11. Frenklach M., Yuan T. Effect of alcohol addition on shock-initiated formation of soot from benzene // *16th Symposium (International) on Shock Tubes and Waves Proceedings*, 1987. P. 487–493.
12. Alexiou A., Williams A. Soot formation in shock-tube pyrolysis of toluene, toluene–methanol, toluene–ethanol,

*Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ-ННИО_а № 20-58-12003.

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, eremin@ijht.ru

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, maaya_korshunova_95@mail.ru

³Объединенный институт высоких температур Российской академии наук; ekaterina.mikheyeva@gmail.com

- and toluene–oxygen mixtures // *Combust. Flame*, 1996. Vol. 104. P. 51–65. doi: 10.1016/0010-2180(95)00004-6.
13. *Agafonov G. L., Naydenova I., Vlasov P. A., Warnatz J.* Detailed kinetic modeling of soot formation in shock tube pyrolysis and oxidation of toluene and *n*-heptane // *P. Combust. Inst.*, 2007. Vol. 31. P. 575–583. doi: 10.1016/j.proci.2006.07.191.
 14. *Eremin A., Gurentsov E., Mikheyeva E.* Experimental study of temperature influence on carbon particle formation in shock wave pyrolysis of benzene and benzene–ethanol mixtures // *Combust. Flame*, 2015. Vol. 162. P. 207–215. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.09.015.
 15. *Eremin A., Mikheyeva E., Selyakov I.* Influence of methane addition on soot formation in pyrolysis of acetylene // *Combust. Flame*, 2018. Vol. 193. P. 83–91. doi: 10.1016/j.combustflame.2018.03.007.
 16. *Yan F., Xu Lei., Wang Y., Park S., Sarathy S. M., Suk H. C.* 2019. On the opposing effects of methanol and ethanol addition on PAH and soot formation in ethylene counter-flow diffusion flames // *Combust. Flame*, 2019. Vol. 202. P. 228–242. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.01.020.
 17. *Sarathy S., Vranckx S., Yasunaga K., Mehl M., Oßwald P., Metcalfe W., Westbrook C., Pitz W., Kohse-Höinghaus K., Fernandes R., Curran H.* A comprehensive chemical kinetic combustion model for the four butanol isomers // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. P. 2028–2055. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.12.017.
 18. *Li Y., Zhao J., Calvin Laurent T. D., Wu G.* Development of a skeletal combustion mechanism for natural gas engine using *n*-butanol–diesel blend as pilot fuel // *Fuel*, 2021. Vol. 305. P. 121567. doi: 10.1016/j.fuel.2021.121567.

Поступила в редакцию 16.12.2021