

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ДИМЕТИЛЭФИРА НА КИНЕТИКУ САЖЕОБРАЗОВАНИЯ В МОДЕЛЬНОМ ПЛОСКОМ ЛАМИНАРНОМ ПЛАМЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПЕРЕМЕШАННЫХ ЭТИЛЕНА И ВОЗДУХА*

Е. В. Гуренцов¹, А. В. Дракон², А. В. Еремин³, Р. Н. Колотушкин⁴, Е. С. Ходыко⁵

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования сажеобразования при добавках диметилэфира (от 0% до 100%) к этиленовоздушному пламени предварительно перемешанных газов. Объемная фракция конденсированной фазы определялась при помощи метода лазерной экстинкции на длине волны 520 нм. Профили температуры в пламени измерялись с помощью термопар. Показано, что добавки диметилэфира в пламя этилена приводят к изменению профиля температуры в пламени и к существенному снижению объемной фракции конденсированной фазы. При замещении от 30% до 60% этилена диметилэфиром наблюдалось снижение объемной фракции сажи до 0,01 ppm, что на порядок меньше этого значения в чисто этиленовом пламени. Проведено кинетическое моделирование роста объемной фракции сажевых частиц во всех исследованных пламенах при помощи кинетических механизмов CRECK и открытого программного пакета OpenSMOKE++. Получено хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными для этиленовоздушных пламен и пламен с добавками 15%–60% диметилэфира. Для пламен 75%, 90% диметилэфира + этилен и 100% диметилэфира с воздухом экспериментальные значения объемной фракции конденсированной фазы лежали ниже предела чувствительности измерений, а расчетные значения указывали на снижение объемной фракции более чем на два порядка относительно чисто этиленового пламени.

Ключевые слова: пламя предварительно перемешанных газов этилен–диметилэфир–воздух; объемная фракция; сажа; кинетическое моделирование

DOI: 10.30826/CE21140403

Литература

1. Inal F., Senkan S. M. Effects of oxygenate additives on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and soot formation // *Combust. Sci. Technol.*, 2002. Vol. 174. No. 9. P. 1–19. doi: 10.1080/00102200290021353.
2. Sorenson S. C. Dimethyl ether in diesel engines: Progress and perspectives // *Transactions ASME*, 2001. Vol. 123. P. 652–658. doi: 10.1115/1.1370373.
3. Wu J., Song K. H., Litzinger T., Lee S.-Y., Santoro R., Linevsky M. Reduction of PAH and soot in premixed ethylene–air flames by addition of dimethyl ether // *Combust. Sci. Technol.*, 2006. Vol. 178. P. 837–863. doi: 10.1080/00102200500269942.
4. McEnally C. S., Pfefferle L. D. The effects of dimethyl ether and ethanol on benzene and soot formation in ethylene nonpremixed flames // *P. Combust. Inst.*, 2007. Vol. 31. No. 1. P. 603–610. doi: 10.1016/j.proci.2006.07.005.
5. Liu F., He X., Ma X., Zhang Q., Thomson M. J., Guo H., Smallwood G. J., Shuai S., Wang J. An experimental and numerical study of the effects of dimethyl ether addition to fuel on polycyclic aromatic hydrocarbon and soot formation in laminar coflow ethylene/air diffusion flames // *Combust. Flame*, 2011. Vol. 158. No. 3. P. 547–563. doi: 10.1016/j.proci.2006.07.005.
6. Sirignano M., Salamanca M., D'Anna A. The role of dimethyl ether as substituent to ethylene on particulate formation in premixed and counter-flow diffusion flames // *Fuel*, 2014. Vol. 126. P. 256–262. doi: 10.1016/j.fuel.2014.02.039.
7. Choi J. H., Choi B. C., Lee S. M., Chung S. H., Jung K. S., Jeong W. L., Choi S. K., Park S. K. Effects of DME mixing on number density and size properties of soot particles in counterflow non-premixed ethylene flames // *J. Mech. Sci. Technol.*, 2015. Vol. 29. No. 5. P. 2259–2267. doi: 10.1007/s12206-015-0447-9.
8. Kang Y., Sun Y., Lu X., Gou X., Sun S., Yan J., Song Y., Zhang P., Wang Q., Ji X. Soot formation characteristics of ethylene premixed burner-stabilized stagnation flame

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

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, gurentsov@ihed.ras.ru

²Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, drakon.a.v@gmail.com

³Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, eremin@jihet.ru

⁴Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, kolotushkin.roman@gmail.com

⁵Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, egor.hodyko@yandex.ru

- with dimethyl ether addition // *Energy*, 2018. Vol. 150. P. 709–721. doi: 10.1016/j.energy.2018.03.025.
9. Zhang Y., Li Y., Liu P., Zhan R., Huang Z., Lin H. Investigation on the chemical effects of dimethyl ether and ethanol additions on PAH formation in laminar premixed ethylene flames // *Fuel*, 2019. Vol. 256. P. 115809. doi: 10.1016/j.fuel.2019.115809.
 10. Li Z., Liu P., Zhang P., Wang Y., He H., Chung S. H., Roberts W. L. Role of dimethyl ether in incipient soot formation in premixed ethylene flames // *Combust. Flame*, 2020. Vol. 216. P. 271–279. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.03.004.
 11. Ahmed H. A., Ashraf M. A., Steinmetz S. A., Dunn M. J., Masri A. R. The role of DME addition on the evolution of soot and soot precursors in laminar ethylene jet flames // *Proc. Combust. Inst.*, 2021. Vol. 38. No. 4. P. 5319–5329. doi: 10.1016/j.proci.2020.06.055.
 12. ISF-2019. University of Adelaide. <https://www.adelaide.edu.au/cet/isfworkshop/data-sets/laminar-flames#isf-4-premixed-flames-3-mckenna-burner-stabilised-flames-11-target-flames>.
 13. McEnally C. S., Köylü Ü. Ö., Pfefflerle L. D., Rosner D. E. Soot volume fraction and temperature measurements in laminar nonpremixed flames using thermocouples // *Combust. Flame*, 1997. Vol. 109. P. 701–720. doi: 10.1016/S0010-2180(97)00054-0.
 14. Eremin A. V., Gurentsov E. V., Kolotushkin R. N. The change of soot refractive index function along the height of premixed ethylene/air flame and its correlation with soot structure // *Appl. Phys. B*, 2020. Vol. 126. P. 125. doi: 10.1007/s00340-020-07426-3.
 15. Cuoci A., Frassoldati A., Faravelli T., Ranzi E. OpenSMOKE++: An object-oriented framework for the numerical modeling of reactive systems with detailed kinetic mechanisms // *Comput. Phys. Commun.*, 2015. Vol. 192. P. 237–264. doi: 10.1016/J.CPC.2015.02.014.
 16. Smooke M., Puri I., Seshadri K. A comparison between numerical calculations and experimental measurements of the structure of a counterflow diffusion flame burning diluted methane in diluted air // *P. Combust. Inst.*, 1986. Vol. 21. P. 1783–1792. doi: 10.1016/S0082-0784(88)80412-0.
 17. Abid A. D., Camacho J., Sheen D. A., Wang H. Quantitative measurement of soot particle size distribution in premixed flames — the burner-stabilized stagnation flame approach // *Combust. Flame*, 2009. Vol. 156. P. 1862–1870. doi: 10.1016/j.combustflame.2009.05.010.
 18. Burke U., Somers K. P., O'Toole P., Zinner C. M., Marquet N., Bourque G., Petersen E. L., Metcalfe W. K., Serinyel Z., Curran H. J. An ignition delay and kinetic modeling study of methane, dimethyl ether, and their mixtures at high pressures // *Combust. Flame*, 2015. Vol. 162. No. 2. P. 315–330. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.08.014.
 19. Pejpichestakul W., Ranzi E., Pelucchi M., Frassoldati A., Cuoci A., Parente A., Faravelli T. Examination of a soot model in premixed laminar flames at fuel-rich conditions // *P. Combust. Inst.*, 2019. Vol. 37. No. 1. P. 1013–1021. doi: 10.1016/j.proci.2018.06.104.
 20. Ranzi E., Frassoldati A., Grana R., Cuoci A., Faravelli T., Kelley A. P., Law C. K. Hierarchical and comparative kinetic modeling of laminar flame speeds of hydrocarbon and oxygenated fuels // *Prog. Energy Combust.*, 2012. Vol. 38. P. 468–501. doi: 10.1016/j.peccs.2012.03.004.
 21. Saggese C., Frassoldati A., Cuoci A., Faravelli T., Ranzi E. A wide range kinetic modeling study of pyrolysis and oxidation of benzene // *Combust. Flame*, 2013. Vol. 160. P. 1168–1190. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.02.013.
 22. Saggese C., Sanchez N. E., Frassoldati A., Cuoci A., Faravelli T., Alzueta M. U., Ranzi E. Kinetic modeling study of polycyclic aromatic hydrocarbons and soot formation in acetylene pyrolysis // *Energ. Fuel.*, 2014. Vol. 28. P. 1489–1501. doi: 10.1021/ef402048q.
 23. Kee R. J., Rupley F. M., Miller J. A. CHEMKIN-II: A FORTRAN Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-Phase Chemical Kinetics. — Albuquerque, NM, USA, 1989. Sandia Report No. 89-8009B.
 24. Burcat A., Ruscic B. Third millennium ideal gas and condensed phase thermochemical database for combustion with updates from active thermochemical tables. — Argonne, IL, USA: Argonne National Laboratory, 2005. doi: 10.2172/925269.
 25. Saggese C., Ferrario S., Camacho J., Cuoci A., Frassoldati A., Ranzi E., Wang H., Faravelli T. Kinetic modeling of particle size distribution of soot in a premixed burner-stabilized stagnation ethylene flame // *Combust. Flame*, 2015. Vol. 162. P. 3356–3369. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.06.002.

Поступила в редакцию 15.11.2021