

САЖЕОБРАЗОВАНИЕ В СФЕРИЧЕСКОМ ДИФФУЗИОННОМ ПЛАМЕНИ*

С. М. Фролов¹, В. С. Иванов², Ф. С. Фролов³, П. А. Власов⁴

Аннотация: В период с 2019 по 2022 гг. на Международной космической станции (МКС) проводился совместный российско-американский космический эксперимент (КЭ) Flame Design (Адамант). Цель совместного КЭ — изучение механизмов управления сажеобразованием в сферическом диффузионном пламени (СДП), формируемом вокруг пористой сферы (ПС), и радиационного погасания СДП в условиях микрогравитации. Объектами исследования были «нормальные» и «обратные» СДП газообразного этилена в атмосфере кислорода с добавками азота при комнатной температуре и давлениях от 0,5 до 2 атм. «Нормальное» пламя — это пламя, образованное в атмосфере окислителя при подаче горючего через ПС. «Обратное» пламя — это пламя, образованное в атмосфере горючего при подаче окислителя через ПС. В статье представлены результаты расчетов сажеобразования в нормальных и обратных пламенах. Расчеты основаны на одномерной нестационарной модели диффузионного горения газов с детальной кинетикой окисления этилена, дополненной макрокинетическим механизмом сажеобразования. Показано, что сажеобразование в нормальных и обратных пламенах сосредоточено в области, где местное атомарное отношение C/O и местная температура удовлетворяют условиям $0,32 < C/O < 0,44$ и $T > 1300–1500$ К.

Ключевые слова: космический эксперимент; микрогравитация; сферическое диффузионное пламя; этилен; численное моделирование; сажеобразование; радиационное погасание пламени

DOI: 10.30826/CE22150404

EDN: DNBDYA

Литература

1. Haynes B. S., Wagner H. Gg. Soot formation // Prog. Energ. Combust., 1981. Vol. 7. P. 229–273.
2. Kennedy I. M. Models of soot formation and oxidation // Prog. Energ. Combust., 1997. Vol. 23. P. 95–132.
3. Richter H., Howard J. B. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot — a review of chemical reaction pathways // Prog. Energ. Combust., 2000. Vol. 26. P. 565–608. doi: 10.1016/S0360-1285(00)00009-5.
4. Karatas A. E., Gülder Ö. L. Soot formation in high pressure laminar diffusion flames // Prog. Energ. Combust., 2012. Vol. 38. P. 818–845. doi: 10.1016/j.peccs.2012.04.003.
5. Wang Y., Chung S. H. Soot formation in laminar counterflow flames // Prog. Energ. Combust., 2019. Vol. 74. P. 152–238. doi: 10.1016/j.peccs.2019.05.003.
6. Lapuerta M., Rodríguez-Fernández J., Sánchez-Valdepeñas J. Soot reactivity analysis and implications on diesel filter regeneration // Prog. Energ. Combust., 2020. Vol. 78. P. 100833. doi: 10.1016/j.peccs.2020.100833.
7. Martin J. W., Salamanca M., Kraft M. Soot inception: Carbonaceous nanoparticle formation in flames // Prog. Energ. Combust., 2022. Vol. 88. P. 100956. doi: 10.1016/j.peccs.2021.100956.
8. Santoro R. J., Yeh T. T., Horvath J. J., Semerjian H. G. The transport and growth of soot particles in laminar diffusion flames // Combust. Sci. Technol., 1987. Vol. 53. No. 2-3. P. 89–115. doi: 10.1080/00102208708947022.
9. Glassman I. Soot formation in combustion processes // P. Combust. Inst., 1989. Vol. 22. No. 1. P. 295–311. doi: 10.1016/S0082-0784(89)80036-0.
10. Glassman I., Nishida O., Sidebotham G. Critical temperatures of soot formation // Soot formation in combustion / Ed. H. Bockhorn. — Springer ser in chemical physics. — Springer, 1994. Vol. 59. P. 316–324. doi: 10.1007/978-3-642-85167-4_18.
11. Sunderland P. B., Faeth G. M. Soot formation in hydrocarbon/air laminar jet diffusion flames // Combust. Flame, 1996. Vol. 105. No. 1-2. P. 132–146. doi: 10.1016/0010-2180(95)00182-4.
12. Glassman I. Sooting laminar diffusion flames: Effect of dilution, additives, pressure, and microgravity // 27th Symposium (International) on Combustion Proceedings,

* Научно-исследовательская работа выполнена в рамках космического эксперимента Flame Design (Адамант) и частично за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме 0082-2019-0006 (номер государственной регистрации АААА-А21-121011990037-8). Авторы благодарны своим коллегам из Федерального исследовательского центра химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН (В. Я. Басевичу, А. А. Беляеву, В. С. Посвянскому и М. Ю. Синеву), а также Р. Аксельбауму из Вашингтонского университета в Сент-Луисе, П. Сандерленду из Мэрилендского университета и Д. Урбану из Исследовательского центра Гленна НАСА за плодотворное сотрудничество.

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

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, iz@chph.ras.ru

1998. Vol. 27. No. 1. P. 1589–1596. doi: 10.1016/s0082-0784(98)80568-7.
13. *Atreya A., Agrawal S., Sacksteder K., Baum H.* Observations of methane and ethylene diffusion flames stabilized around a blowing porous sphere under microgravity conditions. AIAA Paper No. 94-0572, 1994.
14. *Tse S. D., Zhu D., Sung C.-J., Ju Y., Law C. K.* Microgravity burner-generated spherical diffusion flames: Experiment and computation // *Combust. Flame*, 2001. Vol. 125. No. 4. P. 1265–1278.
15. *Sunderland P. B., Axelbaum R. L., Urban D. L., Chao B. H., Liu S.* Effects of structure and hydrodynamics on the sooting behavior of spherical microgravity diffusion flames // *Combust. Flame*, 2003. Vol. 132. P. 25–33.
16. *Santa K. J., Chao B. H., Sunderland P. B., Urban D. L., Stocker D. P., Axelbaum R. L.* Radiative extinction of gaseous spherical diffusion flames in microgravity // *Combust. Flame*, 2007. Vol. 151. No. 4. P. 665–675.
17. *Chernovsky M. K., Atreya A., Im H. G.* Effect of CO₂ diluent on fuel versus oxidizer side of spherical diffusion flames in microgravity // *P. Combust. Inst.*, 2007. Vol. 31. No. 1. P. 1005–1013.
18. *Christiansen E. W., Tse S. D., Law C. K.* A computational study of oscillatory extinction of spherical diffusion flames // *Combust. Flame*, 2003. Vol. 134. P. 327–337.
19. *Liu S., Chao B. H., Axelbaum R. L.* A theoretical study on soot inception in spherical burner-stabilized diffusion flames // *Combust. Flame*, 2005. Vol. 140. P. 1–23.
20. *Lecoustre V. R., Sunderland P. B., Chao B. H., Axelbaum R. L.* Numerical investigation of spherical diffusion flames at their sooting limits // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. P. 194–199.
21. *Irace P. H., Lee H. J., Waddell K., Tan L., Stocker D. P., Sunderland P. B., Axelbaum R. L.* Observations of long duration microgravity spherical diffusion flames aboard the International Space Station // *Combust. Flame*, 2021. Vol. 229. P. 111373.
22. *Фролов С. М., Медведев С. Н., Фролов Ф. С.* Сферическое диффузионное пламя этилена в космическом эксперименте «Адамант» // *Горение и взрыв*, 2021. Т. 14. № 1. С. 9–21. doi: 10.30826/СЕ21140102.
23. *Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Фролов С. М.* Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: переход от C₁–C₁₀ к C₁₁–C₁₆ // *Хим. физика*, 2013. Т. 32. № 4. С. 87. doi: 10.7868/S0207401X13040031. EDN: PXPZTR.
24. *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.
25. *Агафонов Г. Л., Билера И. В., Власов П. А., Колбановский Ю. А., Смирнов В. Н., Тереза А. М.* Образование сажи при пиролизе и окислении ацетилен и этилена в ударных волнах // *Кинетика и катализ*, 2015. Т. 56. № 1. С. 15.
26. Space Flames. www.flickr.com/photos/space-flames.
27. www.facebook.com/space.flames.
28. *Minutolo P., Gambi G., D'Alessio A.* Properties of carbonaceous nanoparticles in flat premixed C₂H₄/air flames with C/O ranging from 0.4 to soot appearance limit // *Symposium (International) on Combustion Proceedings*, 1998. Vol. 27. No. 1. P. 1461–1469. doi: 10.1016/s0082-0784(98)80553-5.

Поступила в редакцию 25.10.2022