

МОДЕЛИРОВАНИЕ БУНЗЕНОВСКОГО ПЛАМЕНИ МЕТАНА В СЛАБОМ ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

А. А. Пономарев¹, Р. И. Мулладжанов², В. М. Дулин³

Аннотация: Представлены данные трехмерного (3D) прямого численного моделирования ламинарного пламени метановоздушной смеси в форме конуса (коэффициент избытка горючего $\Phi = 1,03$) в слабом поперечном электрическом поле. Исследовано изменение формы пламени, концентрации заряженных частиц, температуры газа, напряженности электрического поля и объемной силы, действующей на заряженные частицы, после включения внешнего электрического поля. Рассмотрено разделение зарядов в области фронта пламени. Установлено, что в области, близкой ко фронту пламени, концентрируется положительный заряд. Наибольшая величина заряда наблюдается в окрестности вершины конуса пламени и у основания конуса пламени. Соответственно, в данных областях объемная сила оказывает наибольшее действие. При этом электрическое поле внутри конуса пламени полностью экранируется. Также установлено, что ионный ветер оказывает наибольшее влияние в области над конусом пламени.

Ключевые слова: OpenFoam; метан; ламинарное конусное пламя; электрическое поле; ионный ветер; концентрация заряженных частиц

DOI: 10.30826/CE25180201

EDN: BGFQRV

Литература

1. Афанасьев В. В. Активное управление устойчивостью горения электрическими разрядами // Физика горения и взрыва, 1999. Т. 35. № 3. С. 43–52.
2. Афанасьев В. В. Диагностика и управление устойчивостью горения электрическими полями и разрядами: Дис. . . . докт. техн. наук.— Казань: Казан. гос. техн. ун-т им. А. Н. Туполева, 2004. 305 с.
3. Zyryanov I. A., Pozolotin A. P., Budin A. G. Electrostatic field influence on wood combustion in high-enthalpy flow // J. Phys. Conf. Ser., 2018. Vol. 1058. No. 1. P. 012028.
4. Kono M., Carleton F. B., Jones A. R., Weinberg F. J. The effect of nonsteady electric fields on sooting flames // Combust. Flame, 1989. Vol. 78. No. 3–4. P. 357–364.
5. Jagers H. C., Von Engel A. The effect of electric fields on the burning velocity of various flames // Combust. Flame, 1971. Vol. 16. No. 3. P. 275–285.
6. Criner K., Cessou A., Louiche J., Vervisch P. Stabilization of turbulent lifted jet flames assisted by pulsed high voltage discharge // Combust. Flame, 2006. Vol. 144. No. 1–2. P. 422–425.
7. Glor M. Ignition hazard due to static electricity in particulate processes // Powder Technol., 2003. Vol. 135. P. 223–233.
8. Henz B. J., Hawa T., Zachariah M. R. On the role of built-in electric fields on the ignition of oxide coated nanoaluminum: Ion mobility versus Fickian diffusion // J. App. Phys., 2010. Vol. 107. No. 2. P. 024901.
9. Zhao S., Liu B., Zhao Bo, et al. Numerical simulation of ethanol air diffusion flame quenching under transverse AC electric field // Fire, 2022. Vol. 5. No. 6. P. 196.
10. Толстогозов Р. В., Савицкий А. Г., Дулин В. М. Измерение распределения температуры в ламинарном пламени методом лазерно-индуцированной флуоресценции гидроксильного радикала // Прикладная механика и техническая физика, 2024. Т. 65. № 1. С. 198–206. doi: 10.15372/PMTF202315355. EDN: DQRIQP.
11. Лобасов А. С., Абдуракипов С. С., Чикишев Л. М., Дулин В. М., Маркович Д. М. Исследование формы пламени в нестационарном потоке закрученной турбулентной струи методом НСНО PLIF // Физика горения и взрыва, 2018. Т. 54. № 6. С. 17–24. doi: 10.15372/FGV20180602. EDN: YOGCYP.
12. Dulin V., Sharaborin D., Tolstoguzov R., et al. Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ (1-0) band // P. Combust. Inst., 2021. Vol. 38. No. 1. P. 1877–1883.
13. Payne K. G., Weinberg F. J. A preliminary investigation of field-induced ion movement in flame gases and its applications // P. Roy. Soc. Lond. A Mat., 1959. Vol. 250. No. 1262. P. 316–336.

¹Новосибирский государственный университет; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, aap@itp.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, rustammul@gmail.com

³Новосибирский государственный университет; Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, vmd@itp.nsc.ru

14. Han J., Belhi M., Bisetti F., Sarathy M. S. Numerical modelling of ion transport in flames // *Combust. Theor. Model.*, 2015. Vol. 19. No. 6. P. 744–772.
15. Belhi M., Domingo P., Vervisch P. Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flame stability // *Combust. Flame*, 2010. Vol. 157. No. 12. P. 2286–2297.
16. Speelman N., Kiefer M., Markus D., et al. Validation of a novel numerical model for the electric currents in burner-stabilized methane–air flames // *P. Combust. Inst.*, 2015. Vol. 35. No. 1. P. 847–854.
17. Belhi M., Lee B. J., Cha M. S., Im H. G. Three-dimensional simulation of ionic wind in a laminar premixed Bunsen flame subjected to a transverse DC electric field // *Combust. Flame*, 2019. Vol. 202. P. 90–106.
18. Lobasov A. S., Alekseenko S. V., Markovich D. M., Du-
lin V. M. Mass and momentum transport in the near field of swirling turbulent jets. Effect of swirl rate // *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2020. Vol. 83. P. 108539.
19. Jasak H. OpenFOAM: Open source CFD in research and industry // *Int. J. Naval Architecture Ocean Engineering*, 2009. Vol. 1. No. 2. P. 89–94.
20. OpenFOAM. <https://www.openfoam.com/>.
21. Смирнов Б. М. Диффузия и подвижность ионов в газе // *Успехи физических наук*, 1967. Т. 92. № 1. С. 75–103.
22. Luskin M., Rannacher R., Wendland W. On the smoothing property of the Crank–Nicolson scheme // *Applicable Analysis*, 1982. Vol. 14. No. 2. P. 117–135.
23. Colella P. A direct Eulerian MUSCL scheme for gas dynamics // *SIAM J. Sci. Stat. Comp.*, 1985. Vol. 6. No. 1. P. 104–117.
24. Толстогузов Р. В., Лавронов К. Д., Шараборин Д. К., Дулин В. М. Экспериментальное исследование влияния слабого поперечного постоянного электрического поля на распределение температуры в пламени горелки бунзена // *Физика горения и взрыва*, 2025 (в печати). doi: 10.15372/FGV2024.9469.
25. Пономарев А. А., Шараборин Д. К., Хребтов М. Ю., Мулладжанов Р. И., Дулин В. М. Численное исследование горения взвеси этанола в воздухе // *Физика горения и взрыва*, 2023. Т. 59. № 2. С. 7–15. doi: 10.15372/FGV20230202. EDN: LPWVJN.
26. Boudier G., Gicquel L. Y. M., Poinso T. J. Effects of mesh resolution on large eddy simulation of reacting flows in complex geometry combustors // *Combust. Flame*, 2008. Vol. 155. No. 1–2. P. 196–214.
27. Laizet S., Nedić J., Vassilicos C. Influence of the spatial resolution on fine-scale features in DNS of turbulence generated by a single square grid // *Int. J. Comput. Fluid D.*, 2015. Vol. 29. No. 3–5. P. 286–302.
28. Lu T., Law C. K. A criterion based on computational singular perturbation for the identification of quasi steady state species: A reduced mechanism for methane oxidation with NO chemistry // *Combust. Flame*, 2008. Vol. 154. No. 4. P. 761–774.
29. Frenklach M., Wang H., Goldenberg M., Smith G. P., Golden D. M., Bowman C. T., Hanson R. K., Gardiner W. C., Lissianski V. GRI-Mech — an optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion. GRI Topical Report 95/0058.
30. Bowman C. T., Hanson R. K., Gardiner W. C., Lissianski V., Frenklach M., Goldenberg M., Smith G. P. GRIMech 2.11 — an optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion and NO formation and reburning. GRI Topical Report 97/0020.
31. Prager J., Riedel U., Warnatz J. Modeling ion chemistry and charged species diffusion in lean methane–oxygen flames // *P. Combust. Inst.*, 2007. Vol. 31. No. 1. P. 1129–1137.
32. Ren Y., Cui W., Pitsch H., Li S. Experimental and numerical studies on electric field distribution of a premixed stagnation flame under DC power supply // *Combust. Flame*, 2020. Vol. 215. P. 103–112.

Поступила в редакцию 23.12.2024

После доработки 28.01.2025

Принята к публикации 04.02.2025