

ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРИЯ ПРОПАНОВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ*

В. С. Иванов¹, С. М. Фролов², И. В. Семенов³, И. Д. Родионов⁴, А. Н. Виноградов⁵, М. А. Гоморев⁶

Аннотация: С помощью пространственно- и времяразрешенной сканирующей гиперспектральной съемки проведены исследования собственного излучения пламени горелки Маккенны, работающей на предварительно подготовленной пропановоздушной смеси с коэффициентом избытка горючего $\Phi = 0,8, 1,0, 1,6, 2,5$ и ∞ , в ближнем инфракрасном (ИК) (950–1700 нм) и видимом (400–700 нм) спектральных диапазонах. Спектральные изображения пламени получены на высоте 15 и 150 мм от внешней поверхности горелки. В ближнем ИК диапазоне излучение в основном зарегистрировано на длинах волн 1300–1600 нм, хотя обогащение смеси горючим приводило к увеличению интенсивности излучения в интервале 1100–1200 нм. Горение смесей, обогащенных горючим, приводило к образованию сажи и дымовых частиц, которые создавали фоновое излучение Планка (абсолютно черного тела) с максимумом интенсивности в окрестности 1200 нм. Значимая интенсивность излучения в видимом диапазоне наблюдалась лишь при $\Phi > 1$, а форма спектра соответствовала излучению Планка. Пространственное разрешение гиперспектральной камеры (ГСК) позволило провести измерения спектров излучения в центральной и периферийной частях пламени. Оказалось, что при $\Phi > 1$ спектры в этих частях пламени отличались и в ближнем ИК, и в видимом диапазонах: в ближнем ИК диапазоне в центральной части пламени регистрировались непрореагировавшие углеводороды, а в периферийной части эти углеводороды реагировали с окружающим воздухом; в видимом диапазоне спектр в центральной части пламени имел форму, соответствующую излучению Планка, а в периферийной части регистрировались локальные максимумы, соответствующие излучению воды. Наличие непрореагировавших углеводородов и сажевых частиц в центральной части пропановоздушного пламени горелки Маккенны и их догорание в окружающем воздухе в периферийной части пламени подтверждено трехмерными газодинамическими расчетами с использованием детального кинетического механизма (ДКМ).

Ключевые слова: гиперспектрометр; пламя; естественное свечение; пропановоздушная смесь; полнота сгорания; ближний ИК спектр; видимый спектр

DOI: 10.30826/CE25180404

EDN: XKQAJI

Литература

1. Ignatiev M., Flamant G., Smurov I. Yu., Senchenko V., Dozhdikov V. Two-dimensional resolution pyrometer for real-time monitoring of temperature image in laser materials processing // *Applied Surface Science*, 1997. Vol. 109. P. 498–508.
2. Rhoby M., Blunck D., K. Gross. Mid-IR hyperspectral imaging of laminar flames for 2-D scalar values // *Opt. Express*, 2014. Vol. 22. Iss. 18. P. 21600–21617. doi: 10.1364/OE.22.021600.
3. Cheng Q., Karimkashi S., Ahmad Z., et al. Hyperspectral image reconstruction from colored natural flame luminosity imaging in a tri-fuel optical engine // *Sci. Rep.*, 2023. Vol. 13. P. 2445. doi: 10.1038/s41598-023-29673-y.
4. Posom J., Maraphum K. Fast prediction of the combustion properties of biomass pellets using hyperspectral imaging // *Biomass Bioenerg.*, 2024. Vol. 183. P. 107134. doi: 10.1016/j.biombioe.2024.107134.
5. Gehmlich R., Dumitrescu C., Wang Y., Mueller C. Leaner lifted-flame combustion enabled by the use of an oxygenated fuel in an optical CI engine // *SAE Int. J. Engines*, 2016. Vol. 9. No. 3. P. 1526–1543.
6. Shamshin I. O., Ivanov V. S., Aksenov V. S., Gusev P. A., Frolov S. M. Deflagration-to-detonation transition in a semi-confined slit combustor filled with nitrogen diluted ethylene-oxygen mixture // *Energies*, 2023. Vol. 16. P. 1098.
7. Labaugh C. D., Pratt A. C., Lucht R. P. Simultaneous 5 kHz OH-PLIF/PIV for the study of turbulent combustion at engine conditions // *Appl. Phys. B*, 2015. Vol. 118. P. 109–130.
8. Jiang, N., Hsu P. S., Grib S. W., Roy S. Simultaneous high-speed imaging of temperature, heat-release rate, and

*Работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований РФ «Химическая физика окисления, горения и взрыва», регистрационный номер 1024040200065-4, и имела бюджетное финансирование.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, smfrol@chph.ras.ru

³НИЦ «Курчатовский институт» — НИИСИ, ilyasemv@yandex.u

⁴НТЦ «Реагент», ir@reagent-rdc.ru

⁵НТЦ «Реагент», al.n.vinogradov@gmail.com

⁶НТЦ «Реагент», gomorevma@gmail.com

- multi-species concentrations in turbulent jet flames // *Opt. Express*, 2019. Vol. 27. P. 17017–17026.
9. Wang Z., Lundgren M., Vaglieco B. M., et al. Simultaneous 36 kHz PLIF/chemiluminescence imaging of fuel, CH₂O and combustion in a PPC engine // *P. Combust. Inst.*, 2019. Vol. 37. No. 4. P. 4751–4758.
 10. Michelsen H. A., Schulz C., Smallwood G. J., Will S. Laser-induced incandescence: Particulate diagnostics for combustion, atmospheric, and industrial applications // *Prog. Energ. Combust.*, 2016. Vol. 51. P. 2–48.
 11. Zhao F.-Q., Hiroyasu H. The applications of laser Rayleigh scattering to combustion diagnostics // *Prog. Energ. Combust.*, 1993. Vol. 19. No. 6. P. 447–485.
 12. Miles, R. B., Lempert W., Forkey J. Laser Rayleigh scattering // *Meas. Sci. Technol.*, 2001. Vol. 12. P. R33–R51.
 13. Huang H. W., Zhang Y. Digital colour image processing based measurement of premixed CH₄ + air and C₂H₄ + air flame chemiluminescence // *Fuel*, 2011. Vol. 90. No. 1. P. 48–53.
 14. Bedard M. J., Fuller T. L., Sardeshmukh S., Anderson W. E. Chemiluminescence as a diagnostic in studying combustion instability in a practical combustor // *Combust. Flame*, 2020. Vol. 213. P. 211–225.
 15. Gupta S. B., Bihari B. P., Biruduganti M. S., Sekar R. R., Zigan J. On use of CO₂* chemiluminescence for combustion metrics in natural gas fired reciprocating engines // *P. Combust. Inst.*, 2011. Vol. 33. No. 2. P. 3131–3139.
 16. Иноземцев А. А., Саженков А. Н., Цатиашвили В. В., Абрамчук Т. В., Шипикусев В. А., Андреева Т. П., Гумеров А. Р., Ильин А. Н., Губайдуллин И. Т. Разработка и применение бесконтактной технологии исследования процессов горения в камере сгорания газотурбинного двигателя // *Теплофизика и аэромеханика*, 2015. Т. 22. № 3. С. 373–384.
 17. Шарборин Д. К., Маркович Д. М., Дулин В. М. Панорамная спектроскопия спонтанного комбинационного рассеяния для диагностики струйных реагирующих потоков с использованием перестраиваемого фильтра Лию–Эмана // *Письма в Ж. технической физики*, 2018. Т. 44. № 2. С. 32–40.
 18. Лабусов В. А., Зарубин И. А., Пелипасов О. В., Саушкин М. С., Сипатов А. М., Саженков А. Н., Цатиашвили В. В. Идентификация молекулярных полос в спектрах излучения плазмы внутри малоэмиссионной камеры сгорания // *Автометрия*, 2020. Т. 56. № 4. С. 12–20.
 19. Лобасов А. С., Толстогозуов Р. В., Шарборин Д. К., Чикишев Л. М., Дулин В. М. Об эффективности использования различных линий возбуждения перехода (1–0) флуоресценции ОН для панорамной термометрии // *Теплофизика и аэромеханика*, 2021. Т. 28. № 5. С. 793–797.
 20. Верецагин К. А., Кобцев В. Д., Кострица С. А., Козлов Д. Н., Смирнов В. В., Фабелинский В. И. Термометрия пространственно-неоднородного метановоздушного пламени с использованием двухцветной планарной лазерно-индуцированной флуоресценции спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света // *Квантовая электроника*, 2024. Т. 54. № 3. С. 188–195.
 21. Ortenberg F. Ozone: Space vision (space monitoring of Earth atmospheric ozone) / Ed. M. Guelman. — Graphic Touch Ltd., 2002. 100 p.
 22. Nowak J., Magryta P., Stacewicz T., Kumala W., Malinowski S. Fast optoelectronic sensor of water concentration // *Opt. Appl.*, 2016. Vol. 46. P. 607–618. doi: 10.5277/oa160408.
 23. Planck M. The theory of heat radiation. — 2nd ed. — P. Blakiston's Son & Co., 1914. 225 p.
 24. Konieczka K., Schoetzau A., Koch S., Hauenstein D., Flammer J. Cornea thermography: Optimal evaluation of the outcome and the resulting reproducibility // *Translational Vision Science Technology*, 2018. Vol. 7. No. 3. P. 14. doi: 10.1167/tvst.7.3.14.
 25. Different forms of Planck's law, 2020. <https://www.tec-science.com/thermodynamics/temperature/different-forms-of-plancks-law/>.
 26. Фролов С. М., Басевич В. Я., Беляев А. А., Посвянский В. С., Радвогин Ю. Б. Моделирование стабилизации пламени в турбулентном потоке // *Хим. физика*, 1999, Т. 18. № 3. С. 86–99.
 27. AVL FIRE®. Computational fluid dynamics for conventional and alternative powertrain development. <https://www.avl.com/fire>.
 28. Hanjalic K., Popovac M., Hadziabdic M. A robust near wall elliptic relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD // *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 2004. No. 25. P. 897901.
 29. 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. 87–96.
 30. Basevich V. Ya., Belyaev A. A., Frolov F. S., Frolov S. M., Medvedev S. N. Detailed chemistry of heavy alkane hydrocarbon fuel oxidation: Application to combustion and detonation of gaseous and liquid fuels // *Transient combustion and detonation phenomena: Fundamentals and applications* / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2014. P. 14–25.
 31. 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.
 32. Frolov S. M., Sergeev S. S., Basevich V. Y., Frolov F. S., Basara B., Priesching P. Simulation of multistage autoignition in diesel engine based on the detailed reaction mechanism of fuel oxidation // *Advances in engine and powertrain research and technology. Mechanisms and machine science* / Ed. T. Parikyan. — Cham: Springer, 2022. Vol. 114. P. 149–165. doi: 10.1007/978-3-030-91869-9_6.

Поступила в редакцию 30.07.2025

После доработки 16.09.2025

Принята к публикации 29.09.2025