

# ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПЕРЕМЕШАННОГО ПЛАМЕНИ МЕТАНОВОЙ ГОРЕЛКИ СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПИЛОТНЫМ ФАКЕЛОМ\*

Р. А. Балабанов<sup>1</sup>, В. В. Власенко<sup>2</sup>

**Аннотация:** Представлены результаты численного моделирования экспериментов Meares и Masri (2014) и Barlow *et al.* (2015) со смещением и горением метана в дозвуковой струе, стабилизированном пилотным факелом. Рассматриваемая задача представляет интерес ввиду сильного разброса коэффициента избытка горючего — в начале струи смесь богатая, а ниже по потоку постепенно приближается к стехиометрической. Расчеты данной задачи производились с моделью EPaSR (Extended Partially Stirred Reactor (PaSR)) для учета влияния турбулентности на средние скорости реакций. Исследуется возможность моделирования пилотного факела с перфорированной стенкой в осесимметричной постановке с заменой отверстий на кольцевые щели с сохранением соотношения площадей. Показана проблема определения характерного химического масштаба времени в случае больших градиентов коэффициента избытка горючего. Приводится сравнение полученных в RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) постановке осредненных профилей температуры и скорости не только с экспериментом, но и с DNS (Direct Numerical Simulation) расчетом Zirwes *et al.* (2020).

**Ключевые слова:** струйные течения; гомогенное горение; взаимодействие турбулентности и горения

**DOI:** 10.30826/CE25180304

**EDN:** ZVDHBT

## Литература

1. Meares S., Masri A. R. A modified piloted burner for stabilizing turbulent flames of inhomogeneous mixtures // *Combust. Flame*, 2014. Vol. 161. No. 2. P. 484–495. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.09.016.
2. Barlow R. S., Meares S., Magnotti G., Cutcher H., Masri A. R. Local extinction and near-field structure in piloted turbulent CH<sub>4</sub>/air jet flames with inhomogeneous inlets // *Combust. Flame*, 2015. Vol. 162. No. 10. P. 3516–3540. doi: 10.1016/j.combustflame.2015.06.009.
3. Zirwes T., Zhang F., Habisreuther P., Hansinger M., Bockhorn H., Pfitzner M., Trimis D. Quasi-DNS dataset of a piloted flame with inhomogeneous inlet conditions // *Flow Turbul. Combust.*, 2020. Vol. 104. P. 997–1027. doi: 10.1007/s10494-019-00081-5.
4. Mansour M. S. Stability characteristics of lifted turbulent partially premixed jet flames // *Combust. Flame*, 2003. Vol. 133. No. 3. P. 263–274. doi: 10.1016/S0010-2180(02)00566-7.
5. Guiberti T. F., Cutcher H., Roberts W. L., Masri A. R. Influence of pilot flame parameters on the stability of turbulent jet flames // *Energ. Fuel.*, 2017. Vol. 31. No. 3. P. 2128–2137. doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b02052.
6. Masri A. R. 2015. Partial premixing and stratification in turbulent flames // *P. Combust. Inst.*, 2015. Vol. 35. No. 2. P. 1115–1136. doi: 10.1016/j.proci.2014.08.032.
7. Zhou B., Brackmann C., Li Q., Wang Z., Petersson P., Li Z., Aldén M., Bai X. Distributed reactions in highly turbulent premixed methane/air flames: Part I. Flame structure characterization // *Combust. Flame*, 2015. Vol. 162. No. 7. P. 2937–2953. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.12.021.
8. Yu S., Bai X. S., Zhou B., Wang Z., Li Z. S., Aldén M. Numerical studies of the pilot flame effect on a piloted jet flame // *Combust. Sci. Technol.*, 2022. Vol. 194. No. 2. P. 351–364. doi: 10.1080/00102202.2019.1679550
9. Sabelnikov V., Fureby C. LES combustion modeling for high Re flames using a multi-phase analogy // *Combust. Flame*, 2013. Vol. 160. No. 1. P. 83–96. doi: 10.1016/j.combustflame.2012.09.008.
10. Chomiak J., Karlsson A. Flame liftoff in diesel sprays // 26th Symposium (International) on Combustion. — Elsevier, 1996. Vol. 26. No. 2. P. 2557–2564. doi: 10.1016/S0082-0784(96)80088-9.
11. Tanahashi M., Nada Y., Ito Y., Miauchi T. Local flame structure in the well-stirred reactor regime // *P. Combust. Inst.*, 2002. Vol. 29. No. 2. P. 2041–2049. doi: 10.1016/S1540-7489(02)80249-8.
12. Menter F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA J.*, 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1598–1605. doi: 10.2514/3.12149.

\*Исследования, представленные в разд. 3 и 4, были поддержаны грантом Минобрнауки РФ (Договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017).

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), balabanov.ra@phystech.edu

<sup>2</sup>Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ), vlasenko.vv@yandex.ru

13. *Franzelli B., Riber E., Gicquel L. Y., Poinso T.* Large eddy simulation of combustion instabilities in a lean partially premixed swirled flame // *Combust. Flame*, 2012. Vol. 159. No. 2. P. 621–637. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.08.004.
14. *Лю В.* Опыт численного моделирования турбулентного горения метановоздушной смеси в канале с уступом с использованием пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT на базе различных моделей химической кинетики // *Горение и взрыв*, 2023. Т. 16. № 2. С. 24–41. doi: 10.30826/CE23160203.
15. *Petrova N., Sabelnikov V., Bertier N.* Numerical simulation of a backward-facing step combustor using Reynolds-Averaged Navier–Stokes / Extended Partially Stirred Reactor model // *Progress in propulsion physics* / Eds. C. Bonnal, M. Colabro, S. M. Frolov, L. Galfetti, F. Maggi. — EUCASS advances in aerospace sciences book ser. — Moscow: TORUS PRESS, 2018. Vol. 11. P. 625–656.
16. *Vagelopoulos C. M., Egolfopoulos F. N.* Direct experimental determination of laminar flame speeds // 27th Symposium (International) on Combustion, 1998. Vol. 27. No. 1. P. 513–519. doi: 10.1016/S0082-0784(98)80441-4.
17. *Абрамович Г. Н.* Теория турбулентных струй. — Физматлит, 1960. 715 с.
18. *Yamashita H., Shimada M., Takeno T.* A numerical study on flame stability at the transition point of jet diffusion flames // 26th Symposium (International) on Combustion. — Elsevier, 1996. Vol. 26. No. 1. P. 27–34.
19. *Zhang M., Li H., Iavarone S., Parente A., Chen Z. X.* Evaluation of chemistry and mixing time scales on the prediction of partially stirred reactor closures: Application to a Cabra jet flame. SSRN, 2024. doi: 10.2139/ssrn.4811601.

Поступила в редакцию 26.12.2024

После доработки 10.02.2025

Принята к публикации 24.02.2025