

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРЕХМЕРНОСТИ НА СТАБИЛИЗАЦИЮ ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ДОЗВУКОВОМ ТЕЧЕНИИ С ПЕРЕМЕШАНЫМ ГОРЕНИЕМ*

Р. А. Балабанов¹

Аннотация: Представлены результаты трехмерных расчетов эксперимента P. Magre *et al.* (ONERA) с горением предварительно перемешанной метановоздушной смеси в модельном канале с уступом. Расчеты производились с моделью EPaSR (Extended Partially Stirred Reactor (PASR)) для учета влияния турбулентности на среднюю скорость реакций горения. Обсуждаются проблемы, связанные с переходом к небуссиновским моделям класса DRSM (Differential Reynolds Stress Models). Предложено решение проблемы отсутствия производства кинетической энергии турбулентности на фронте пламени, возникающей в расчетах с DRSM моделями. Показано существенное влияние небуссиновской модели на структуру течения в поперечных сечениях. Показано влияние поперечной неравномерности поля скорости на образование области проскока пламени вверх по потоку. В результате применения двухканальной модели взаимодействия турбулентности и горения EPaSR-PrOm показано, что наличие теплоотвода на боковых стенках существенно влияет на поле турбулентных чисел Прандтля, уменьшая их значения по сравнению с двумерным расчетом.

Ключевые слова: DRSM; проскок пламени; взаимодействие турбулентности и горения

DOI: 10.30826/CE24170402

EDN: NSMKDK

Литература

1. Magre P., Moreau P., Collin G., Borghi R., Péalat M. 1987. Further studies by CARS of premixed turbulent combustion in a high velocity flow // *Combust. Flame*, 1987. Vol. 71. No. 2. P. 147–168. doi: 10.1016/0010-2180(88)90004-1.
2. Балабанов Р. А., Власенко В. В., Ноздрачев А. Ю. Описание предварительно перемешанного турбулентного горения в канале со ступенькой при помощи моделей класса PaSR // *Физика горения и взрыва*, 2024. Т. 60. № 4. С. 44–45. doi: 10.15372/FGV2024.9453.
3. Lewis B., von Elbe G. *Combustion, flames and explosions of gases*. — 3rd ed. — Orlando, FL, USA: Academic Press, 1987. 740 p.
4. Matyushenko A. A., Garbaruk A. V. Non-linear correction for the $k-\omega$ SST turbulence model // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017. Vol. 929. P. 012102. doi: 10.1088/1742-6596/929/1/012102.
5. Cecora R.-D., Radespiel R., Eisfeld B., Probst A. Differential Reynolds stress modeling for aeronautics // *AIAA J.*, 2015. Vol. 53. No. 3. P. 739–755. doi: 10.2514/1.J053250.
6. Pettersson Reif, B., Andersson H. Prediction of turbulence-generated secondary mean flow in a square duct // *Flow Turbul. Combust.*, 2002. Vol. 68. P. 41–61. doi: 10.1023/A:1015611721026.
7. Oh M. T. Assessment of Reynolds stress turbulence closures for separated flow over backward-facing step // *Transactions Korean Society Mechanical Engineers*, 1995. Vol. 19. No. 11. P. 3014–3021. doi: 10.22634/KSME.1995.19.11.3014.
8. Gibson M. M., Launder B. E. 1978. Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer // *J. Fluid Mech.*, 1978. Vol. 86. No. 3. P. 491–511. doi: 10.1017/S0022112078001251.
9. Petrova N. Turbulence chemistry interaction models for numerical simulation of aeronautical propulsion systems: PhD Diss. — Palaiseau: Ecole polytechnique, 2015. 316 p.
10. Ширяева А. А. 2018. Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса. Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. — Жуковский, 2018. 217 с.
11. Fureby C. Comparison of flamelet and finite rate chemistry LES for premixed turbulent combustion. *AIAA Paper No. 2007-1413*, 2007.
12. Балабанов Р. А., Власенко В. В., Ширяева А. А. Опыт валидации моделей турбулентного горения класса PaSR и планы развития этих моделей применительно к камерам сгорания газотурбинных установок // *Горение и взрыв*, 2022. Т. 15. № 4. С. 48–57.

*Статья основана на докладе, представленном на 11-м Международном симпозиуме по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям (NEPCAP), прошедшем в Сочи (Россия) в период с 7 по 11 октября 2024 г. Исследования, представленные в разд. 3 и 4, были поддержаны грантом Минобрнауки РФ (Договор № 14.G39.31.0001 от 13.02.2017).

¹Московский физико-технический институт; Центральный аэродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), balabanov.ra@phystech.edu

13. *Ferrarotti M., Li Z., Parente A.* On the role of mixing models in the simulation of MILD combustion using finite-rate chemistry combustion models // *P. Combust. Inst.*, 2019. Vol. 37. No. 4. P. 531–4538. doi: 10.1016/j.proci.2018.07.043.
14. *Menter F. R.* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // *AIAA J.*, 1994. Vol. 32. No. 8. P. 1598–1605.
15. *Menter F. R., Kuntz M., Langtry R.* Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // *Turbulence Heat Mass Transfer*, 2003. Vol. 4. No. 1. P. 625–632.
16. *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.
17. *Басевич В., Беляев А., Фролов С.* «Глобальные» кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений // *Химическая физика*, 1998. Т. 17. № 9. С. 117–129.
18. *Libby P. A., Bray K. N. C.* Countergradient diffusion in premixed turbulent flames // *AIAA J.*, 1981. Vol. 19. No. 2. P. 205–213.
19. *Zhang S., Rutland C. J.* Premixed flame effects on turbulence and pressure-related terms // *Combust. Flame*, 1995. Vol. 102. No. 4. P. 447–461. doi: 10.1016/0010-2180(95)00036-6.
20. *Sabelnikov V. A., Lipatnikov A. N., Nishiki S., et al.* Dissipation and dilatation rates in premixed turbulent flames // *Phys. Fluids*, 2021. Vol. 33. No. 3. doi: 10.1063/5.0039101.
21. *Lindstedt R. P., Vaos E. M.* 1999. Modeling of premixed turbulent flames with second moment methods // *Combust. Flame*, 1999. Vol. 116. No. 4. P. 461–485. doi: 10.1016/S0010-2180(98)00058-3.
22. *Lebedev A. B., Yakubovskii K. Y., Toktaliev P. D.* Numerical modeling of steady and unsteady combustion regimes of methane–air mixture in research combustion chamber with step // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2018. Vol. 1261. No. 1. P. 012020. doi: 10.1088/1742-6596/1261/1/012020.

Поступила в редакцию 24.07.2024