

ОПЫТ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАНАЛЕ С УСТУПОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ ANSYS FLUENT НА БАЗЕ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ*

Вэньчао Лю¹

Аннотация: Рассмотрен режим стабилизации горения предварительно перемешанной смеси метана с воздухом в дозвуковом течении в канале с обратным уступом, который был исследован экспериментально в ONERA (Magre *et al.*, 1988). Численное моделирование данного течения на базе нестационарных уравнений Рейнольдса выполнено с использованием коммерческого пакета вычислительной аэродинамики ANSYS FLUENT. Показано, что с использованием FLUENT возможно достичь качества решения, сопоставимого с наилучшими из результатов, полученных в ЦАГИ при помощи собственной программы zFlare. Приведен пример, когда при использовании в расчете моделей взаимодействия турбулентности с горением переход к более детальной кинетической схеме привел к ухудшению качества моделирования течения по сравнению с упрощенными кинетическими схемами, и дано объяснение такого результата.

Ключевые слова: дозвуковое предварительно перемешанное горение; нестационарные уравнения Рейнольдса; взаимодействие турбулентности с горением; кинетическая схема; численное моделирование; экспериментальная валидация

DOI: 10.30826/CE23160203

EDN: VJPBRV

Автор выражает благодарность В. А. Сабельникову, В. В. Власенко и коллективу Лаборатории физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением (JetSim) ЦАГИ за обсуждение полученных результатов и полезные рекомендации.

Литература

1. Фролов С. М. 2016. Влияние турбулентности на среднюю скорость химических превращений: обзор // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 1. С. 43–58.
2. Турбулентные течения реагирующих газов / Под ред. П. Либби, Ф. Вильямса. Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. 328 с. (Turbulent reacting flows. Topics in applied physics / Eds. P. M. Libby, F. A. Williams. — Springer, 1980. Vol. 44. 243 p.)
3. Bilger R. W. Conditional moment closure for turbulent reacting flow // Phys. Fluids A — Fluid, 1993. Vol. 5. No. 2. P. 436–444. doi: 10.1063/1.858867.
4. Bray K. N. C., Champion M., Libby P. A., Swaminathan N. Finite rate chemistry and presumed PDF models for premixed turbulent combustion // Combust. Flame, 2006. Vol. 146. No. 4. P. 665–673. doi: 10.1016/j.combustflame.2006.07.001.
5. Pope S. B. PDF methods for turbulent reactive flows // Prog. Energ. Combust., 1985. Vol. 11. No. 2. P. 119–192. doi: 10.1016/0360-1285(85)90002-4.
6. Peters N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion // Prog. Energ. Combust., 1984. Vol. 10. No. 3. P. 319–339. doi: 10.1016/0360-1285(84)90114-X.
7. Pope S. B., Cheng W. K. The stochastic flamelet model of turbulent premixed combustion // Symposium (International) on Combustion, 1989. Vol. 22. No. 1. P. 781–789. doi: 10.1016/S0082-0784(89)80087-6.
8. Zimont V. L. Gas premixed combustion at high turbulence. Turbulent flame closure combustion model // Exp. Therm. Fluid Sci., 2000. Vol. 21. No. 1-3. P. 179–186. doi: 10.1016/S0894-1777(99)00069-2.
9. Lipatnikov A. N., Chomiak J. Turbulent flame speed and thickness: Phenomenology, evaluation, and application in multi-dimensional simulations // Prog. Energ. Combust., 2002. Vol. 28. No. 1. P. 1–74. doi: 10.1016/S0360-1285(01)00007-7.
10. Августиневич В. Г., Куценко Ю. Г. Создание и применение методологии комплексного расчета малоэмиссионной камеры сгорания // Известия высших

*Работа выполнена при финансовой поддержке Китайского стипендиального совета (договор № 201606120286).

¹Московский физико-технический институт (МФТИ), v.lyu@phystech.edu

- учебных заведений. Авиационная техника, 2011. № 2. С. 37–42. EDN: MMZGNE.
11. *Magnussen B. F.* The eddy dissipation concept: A bridge between science and technology // ECCOMAS Thematic Conference on Computational Combustion, 2005. Vol. 21. 24 p. https://folk.ntnu.no/ivarse/edc/BFM_ECOMAS2005-Lisboa.pdf.
 12. *Chomiak J., Karlsson A.* Flame liftoff in diesel sprays // Symposium (International) on Combustion, 1996. Vol. 26. No. 2. P. 2557–2564. doi: 10.1016/S0082-0784(96)80088-9.
 13. Reduced kinetic mechanisms for applications in combustion systems / Eds. N. Peters, B. Rogg. — Lecture notes in physics monographs ser. — Springer, 2008. Vol. 15. 360 p.
 14. *Fiorina B., Vié A., Franzelli B., et al.* Modeling challenges in computing aeronautical combustion chambers // Aerospace Lab, 2016. Vol. 11. 19 p. doi: 10.12762/2016.AL11-05.
 15. *Lytras I., Koutmos P., Dogkas E.* Сокращенная кинетическая модель для моделирования сложных турбулентных пламен метана // Физика горения и взрыва, 2019. Т. 55. № 2. С. 11–28. doi: 10.15372/FGV20190202.
 16. ANSYS CFD. <https://www.ansys.com/products/fluids/#tab1-2>.
 17. *Cambier L., Heib S., Plot S.* The ONERA elsA CFD software: Input from research and feedback from industry // Mech. Ind., 2013. Vol. 14. No. 3. P. 159–174. doi: meca/2013056.
 18. *Reffloch A., Courbet B., Murrone A., et al.* CEDRE Software // Aerospace Lab, 2011. Vol. 2. P. 1–10. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01182463/file/ISP1125.1316004171.pdf>.
 19. *Kroll N., Eisfeld B., Bleecke H. M.* FLOWer // Note. Num. Fl., 1999. Vol. 71. P. 58–68.
 20. *Schwaborn D., Gerhold T., Heinrich R.* The DLR TAU-code: Recent applications in research and industry // ECOMMAS CFD, 2006. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:59162917-d24d-4f11-955f-feaeaa21e2c1>.
 21. *Eliasson P.* EDGE, a Navier–Stokes solver for unstructured grids. FOI-Swedish Defence Research Agency, Division of Aeronautics, 2001. Scientific Report FOI-R-0298-SE. https://www.researchgate.net/publication/242533247_EDGE_a_Navier-Stokes_Solver_for_Unstructured_Grids.
 22. Практические аспекты решения задач внешней аэродинамики двигателей летательных аппаратов в рамках осредненных по времени уравнений Навье–Стокса // Труды ЦАГИ, 2007. Вып. 2671.
 23. Практические аспекты решения задач внешней и внутренней аэродинамики с применением технологии ZEUS в рамках пакета EWT-ЦАГИ // Труды ЦАГИ, 2015, Вып. 2735.
 24. *Correa S.* Non-equilibrium step-stabilized combustion of hydrogen in supersonic air // 24th Joint Propulsion Conference, 1988. P. 3223. doi: 10.2514/6.1988-3223.
 25. *Ueda T., Mizomoto M.* Effect of slot gas injection to the flow field and coherent structure characteristics of a back-step flow // Int. J. Heat Mass Tran., 2001. Vol. 44. No. 14. P. 2711–2726. doi: 10.1016/S0017-9310(00)00301-X.
 26. *Magre P., Moreau P., Collin G., Borghi R., Péalat M.* Further studies by CARS of premixed turbulent combustion in a high velocity flow // Combust. Flame, 1988. Vol. 71. No. 2. P. 147–168. doi: 10.1016/0010-2180(88)90004-1.
 27. *Petrova N.* 2015. Turbulence–chemistry interaction models for numerical simulation of aeronautical propulsion systems. Ecole Polytechnique X. Ph.D.Thesis. 316 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01113856/>.
 28. *Ширяева А. А.* Моделирование высокоскоростных течений со смешанными режимами турбулентного горения на основе трехмерных уравнений Рейнольдса: Дис. . . канд. физ.-мат. наук. — ЦАГИ, 2018. 217 с. https://www.frccsc.ru/sites/default/files/docs/ds/002-073-03/004-shiryeva/004-shiryeva_main.pdf?946.
 29. *Власенко В. В., Ноздрачев А. Ю., Сабельников В. А., Ширяева А. А.* Анализ механизмов стабилизации турбулентного горения по данным расчетов с применением модели реактора частичного перемешивания // Горение и взрыв, 2019. Т. 12. № 1. С. 43–57.
 30. *Бахнэ С., Власенко В. В., Волощенко О. В. и др.* Опыт тестирования и применения программы zFlare для численного моделирования течений с горением в каналах // Труды ЦАГИ, 2022. Вып. 2810.
 31. *Лебедев А. Б., Токталиев П. Д., Якубовский К. Я.* Расчетное исследование турбулентного гомогенного горения смеси метан/воздух методами RANS и LES в малоэмиссионной камере сгорания // Горение и взрыв, 2017. Т. 10. № 4. С. 8–16.
 32. *Якубовский К. Я., Токталиев П. Д., Лебедев А. Б.* Расчетное исследование неустойчивых режимов гомогенного горения смеси метан/воздух в малоэмиссионной камере сгорания // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 1. С. 34–45.
 33. Лаборатория физического и численного моделирования течений с турбулентностью и горением (JetSim) ЦАГИ. <http://tsagi.ru/institute/lab220/>.
 34. *Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М.* «Глобальные» кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений. Ч. 1. Основной химический процесс тепловыделения // Хим. физика, 1998. Т. 17. № 9. С. 117–129.
 35. *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.
 36. *Sabelnikov V., Fureby C.* Extended LES-PaSR model for simulation of turbulent combustion // Progress in propulsion physics / Eds. L. DeLuca, C. Bonnal, O. Haidn, S. Frolov. — EUCASS advances in aerospace sciences book ser. — TORUS PRESS – EDP Sciences, 2013. Vol. 4. P. 539–568. doi: 10.1051/eucass/201304539.
 37. *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 // Неравновесные процессы: плазма, горение, атмосфера / Под ред. С.М. Фролова, А.И. Ланшина. — М.: ТОРУС-ПРЕСС, 2022. С. 94–99. doi: 10.30826/NEPCAP10A-29.
38. *Franzelli B., Riber E., Gicquel L. Y., Poinsot 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.
39. *Smooke M. D.* Reduced kinetic mechanisms and asymptotic approximations for methane–air flames: A topical volume. — Springer, 1991. 246 p.
40. *Vagelopoulos C. M., Egolfopoulos F. N.* Direct experimental determination of laminar flame speeds // *Symposium (International) on Combustion*, 1998. Vol. 27. No. 1. P. 513–519. doi: 10.1016/S0082-0784(98)80441-4.
41. *Бабулин А. А., Босняков С. М., Власенко В. В., Енгулатова М. Ф., Матяш С. В., Михайлов С. В.* Опыт валидации и настройки моделей турбулентности применительно к задаче об отрыве пограничного слоя на клине конечной ширины // *Ж. вычислительной математики и математической физики*, 2016. Т. 56. № 6. С. 1034–1048. doi: 10.7868/S0044466916060053.
42. *Щетинков Е. С.* Физика горения газов. — М.: Наука, 1965. 740 с.

Поступила в редакцию 09.03.2023