

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СТРУЙ ВОДОРОДА В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ТЕЧЕНИИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ МЕТОДОМ IDDES*

С. Бахнэ¹, В. В. Власенко²

Аннотация: Описаны результаты третьего этапа численного моделирования эксперимента ONERA LAPCAT II по высокоскоростному горению водорода в модельном канале. На данном этапе расчеты проводились с учетом шероховатости стенок канала и наличия стекол на боковых стенках. Также был добавлен генератор синтетической турбулентности на входе в канал, а начальное поле было получено в предварительном RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) расчете с использованием нелинейной модели SST-NL (nonlinear shear stress transport), что привело к возникновению вторичных токов в углах канала. Представлены результаты расчетов на базе подхода SST-IDDES (SST-based improved delayed detached eddy simulation). Показано, что учет стекол влияет на структуру отрывных областей, но слабо влияет на средние параметры течения и распределение давления вдоль канала. Существенное влияние на все параметры оказывает нелинейная модель и генерация синтетической турбулентности.

Ключевые слова: сверхзвуковое горение; шероховатость; теплообмен; численное моделирование; вторичные токи

DOI: 10.30826/CE24170403

EDN: QHNNXD

Литература

1. *Oefelein J. C.* Large eddy simulation of turbulent combustion processes in propulsion and power systems // *Prog. Aerosp. Sci.*, 2006. Vol. 42. No. 1. P. 2–37. doi: 10.1016/j.paerosci.2006.02.001.
2. *Spalart P. R.* Detached-eddy simulation // *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2009. Vol. 41. P. 181–202. doi: 10.1146/annurev.fluid.010908.165130.
3. *Menter F., Hüppe A., Matyushenko A., Kolmogorov D.* An overview of hybrid RANS–LES models developed for industrial CFD // *Appl. Sci.* — Basel, 2021. Vol. 11. No. 6. P. 2459. doi: 10.3390/app11062459.
4. *Власенко В. В., Лю В., Молев С. С., Сабельников В. А.* 2020. Влияние условий теплообмена и химической кинетики на структуру течения в модельной камере сгорания ONERA LAPCAT II // *Горение и взрыв*, 2020. Т. 13. № 2. С. 36–47. doi: 10.30826/CE20130205.
5. *Сабельников В. А., Трошин А. И., Бахнэ С., Молев С. С., Власенко В. В.* Поиск определяющих физических факторов в валидационных расчетах экспериментальной модели ONERA LAPCAT II с учетом шероховатости стенок канала // *Горение и взрыв*, 2021. Т. 14. № 4. С. 55–67. doi: 10.30826/CE21140406.
6. *Bakhne S., Troshin A., Sabelnikov V., Vlasenko V.* Improved delayed detached eddy simulation of combustion of hydrogen jets in a high-speed confined hot air cross flow // *Energies*, 2023. Vol. 16. P. 1736. doi: 10.3390/en16041736.
7. *Liu W.* Analysis of factors determining numerical solution in the calculation of flow with combustion using the ONERA experimental model // *Thermophys. Aeromech.*, 2023. Vol. 30. P. 507–523. doi: 10.1134/S0869864323030101.
8. *Bakhne S., Vlasenko V., Troshin A., Sabelnikov V., Savelyev A.* Improved delayed detached eddy simulation of combustion of hydrogen jets in a high-speed confined hot air cross flow II: New results // *Energies*, 2023. Vol. 16. No. 21. P. 7262. doi: 10.3390/en16217262.
9. *Vincent-Randonnier A., Moule Y., Ferrier M.* Combustion of hydrogen in hot air flows within LAPCAT-II dual mode ramjet combustor at Onera-LAERTE facility — experimental and numerical investigation. AIAA Paper No. 2014-2932, 2014. doi: 10.2514/6.2014-2932.
10. *Balland S., Vincent-Randonnier A.* Numerical study of hydrogen/air combustion with CEDRE code on LAERTE dual mode ramjet combustion experiment. AIAA Paper No. 2015-3629, 2015. doi: 10.2514/6.2015-3629.
11. *Vincent-Randonnier A., Sabelnikov V., Ristori A., Zettervall N., Fureby C.* An experimental and computational study of hydrogen–air combustion in the LAPCAT II supersonic combustor // *P. Combust. Inst.*, 2019. Vol. 37. No. 3. P. 3703–3711. doi: 10.1016/j.proci.2018.05.127.

*Описанные в статье численные исследования поддержаны Министерством образования и науки Российской Федерации (договор № 14.G39.31.0001 от 13 февраля 2017 г.). Авторы также выражают свою искреннюю благодарность В. А. Сабельникову за многократные обсуждения, предложенные идеи и бесценные замечания. 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.

¹Центральный аэродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), bakhne@phystech.edu

²Центральный аэродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), vlasenko.vv@yandex.ru

12. Pelletier G., Ferrier M., Vincent-Randonnier A., Sabelnikov V., Mura A. 2021. Wall roughness effects on combustion development in confined supersonic flow // *J. Propul. Power*, 2021. Vol. 37. No. 1. P. 151–166. doi: 10.2514/1.B37842.
13. Volino R. J., Devenport W. J., Piomelli U. Questions on the effects of roughness and its analysis in non-equilibrium flows // *J. Turbul.*, 2022. Vol. 23. P. 454–466. doi: 10.1080/14685248.2022.2097688.
14. Bruce P. J. K., Burton D. M. F., Titchener N. A., Babinsky H. Corner effect and separation in transonic channel flows // *J. Fluid Mech.*, 1997. Vol. 679. P. 247–262. doi: 10.1017/jfm.2011.135.
15. Bruce P. J. K., Babinsky H., Tartinville B., Hirsch C. Corner effect and asymmetry in transonic channel flows // *AIAA J.*, 2011. Vol. 49. No. 11. P. 2382–2392. doi: 10.2514/1.J050497.
16. Sabnis K. Supersonic corner flows in rectangular ducts. — Cambridge: University of Cambridge, 2020. Ph.D. Thesis. doi: 10.17863/CAM.59806.
17. Boychev K. Shock wave – boundary-layer interactions in high-speed intakes. — Glasgow: University of Glasgow, 2021. Ph.D. Thesis. <https://theses.gla.ac.uk/82577/>.
18. Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations // *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 2000. Vol. 21. P. 252–263. doi: 10.1016/S0142-727X(00)00007-2.
19. Mani M., Babcock D., Winkler C., Spalart P. R. Predictions of a supersonic turbulent flow in a square duct // *AIAA Paper No. 2013-0860*, 2013. doi: 10.2514/6.2013-860.
20. Трошин А. И., Молев С. С., Власенко В. В., Михайлов С. В., Бахнэ С., Матяш С. В. Моделирование турбулентных течений на основе подхода IDDES с помощью программы zFlare // *Вычислительная механика сплошных сред*, 2023. Т. 16. № 2. С. 203–218. doi: 10.7242/1999-6691/2023.16.2.18.
21. Bosnyakov S., Kursakov I., Lysenkov A., Matyash S., Mikhailov S., Vlasenko V., Quest J. Computational tools for supporting the testing of civil aircraft configurations in wind tunnels // *Prog. Aerosp. Sci.*, 2008. Vol. 44. P. 67–120. doi: 10.1016/j.paerosci.2007.10.003.
22. 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. https://cfd.spbstu.ru/agarbaruk/doc/2003_Menter,%20Kuntz,%20Langtry_Ten%20years%20of%20industrial%20experience%20with%20the%20SST%20turbulence%20model.pdf.
23. Suga K., Craft T. J., Iacovides H. An analytical wall-function for turbulent flows and heat transfer over rough walls // *Int. J. Heat Fluid Fl.*, 2006. Vol. 27. P. 852–866. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.03.011.
24. Aupoix B. 2015. Roughness corrections for the $k-\omega$ SST model: Status and proposals // *J. Fluid. Eng.* — T. ASME, 2015. Vol. 137. No. 2. P. 021202. 10 p. doi: 10.1115/1.4028122.
25. Zhang R., Zhang M., Shu C. W. On the order of accuracy and numerical performance of two classes of finite volume WENO schemes // *Commun. Comput. Phys.*, 2011. Vol. 9. No. 3. P. 807–827. doi: 10.4208/cicp.291109.080410s.
26. Suresh A., Huynh H. Accurate monotonicity-preserving schemes with Runge–Kutta time stepping // *J. Comput. Phys.*, 1997. Vol. 136. No. 1. P. 83–99. doi: 10.1006/jcph.1997.5745.
27. Gritskevich M. S., Garbaruk A. V., Schütze J., Menter F. R. Development of DDES and IDDES formulations for the $k-\omega$ shear stress transport model // *Flow Turbul. Combust.*, 2011. Vol. 88. Iss. 3. P. 431–449. doi: 10.1007/s10494-011-9378-4.
28. Guseva E. K., Garbaruk A. V., Strelets M. K. An automatic hybrid numerical scheme for global RANS–LES approaches // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017. Vol. 929. No. 1. doi: 10.1088/1742-6596/929/1/012099.
29. Bakhne S., Sabelnikov V. A method for choosing the spatial and temporal approximations for the LES approach // *Fluids*, 2022. Vol. 7. No. 12. P. 376. doi: 10.3390/fluids7120376.
30. Bakhne S., Troshin A. I. Comparison of upwind and symmetric WENO schemes in large eddy simulation of basic turbulent flows // *Comp. Math. Math. Phys.*, 2023. Vol. 63. No. 6. P. 1122–1136. doi: 10.31857/S0044466923060030.
31. Jachimowski C. J. An analysis of combustion studies in shock expansion tunnels and reflected shock tunnels. — Hampton: NASA, 1992. Technical Paper 3224.
32. Matyushenko A. A., Garbaruk A. V. Non-linear correction for the $k-\omega$ SST turbulence model // *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017. Vol. 929. doi: 10.1088/1742-6596/929/1/012102.
33. Pelletier G., Ferrier M., Vincent-Randonnier A., Mura A. Delayed detached eddy simulations of rough-wall turbulent reactive flows in a supersonic combustor. *AIAA Paper No. 2020-2409*, 2020. doi: 10.2514/6.2020-2409.
34. Мухеев М. А. Расчетные формулы конвективного теплообмена // *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*, 1966. № 5. С. 96–105.
35. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. K., Travin A. K. Synthetic turbulence generators for RANS–LES interfaces in zonal simulations of aerodynamic and aeroacoustic problems // *Flow Turbul. Combust.*, 2014. Vol. 93. P. 63–92. doi: 10.1007/s10494-014-9534-8.

Поступила в редакцию 15.07.2024