

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ЦИАМ С БОЛЬШОЙ ЗОНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ЗА КОНИЧЕСКИМ СТАБИЛИЗАТОРОМ ПЛАМЕНИ*

М. В. Дробыш¹, А. Н. Дубовицкий², А. Б. Лебедев³, Е. Д. Свердлов⁴, К. Я. Якубовский⁵

Аннотация: Проведено расчетное исследование гидродинамики течения без горения в отсеке полно-размерной малоэмиссионной камеры сгорания (МЭКС) разработанной в ЦИАМ оригинальной схемы с одной большой зоной рециркуляции с целью выбора наименее затратного метода расчета турбулентного потока, выяснения характерных для МЭКС особенностей течения (положение мест максимальных пульсаций давления и скорости относительно зон, где при горении происходит основное тепловыделение, влияние смежных с основной расчетной зоной областей и граничных условий (ГУ), структура течения в конце зоны обратных токов (ЗОТ)). Расчеты турбулентного течения проведены методами адаптивных масштабов (SAS, scale adaptive simulation) и моделирования крупных вихрей (LES, large-eddy simulation) в двух конфигурациях — с входным ресивером и без него, для двух расчетных сеток разной степени детализации. Результаты расчетов по длине зоны рециркуляции, уровню и спектральному составу пульсаций давления сравниваются для различных расчетных областей и сеток между собой и с данными ранее проведенных экспериментов. Проведен анализ возможных причин отличия от экспериментальных результатов, а также даны рекомендации по ограничению степени детализации расчетной области и сетки для рассмотренного типа камеры сгорания (КС). Применение метода SAS целесообразно для реальных КС при их проектировочных и доводочных расчетах.

Ключевые слова: малоэмиссионная камера сгорания; турбулентное течение; методы LES и SAS; расчетная область и сетка

DOI: 10.30826/CE21140407

Литература

1. Darbyshire O. R., Wilson C. W., Evans A., Beck S. B. M. CFD based analysis of burner fuel air mixing over a range of air inlet and fuel pre-heat temperatures for a Siemens V94.3A gas turbine burner // ASME Turbo Expo Proceedings. — Barcelona, Spain, 2006. Vol. 1. P. 709–714. Paper No. GT2006-90944. doi: 10.1115/GT2006-90944.
2. Kundu A., Klingmann J., Whiddon R., Subash A. A., Collin R. Operability and performance of central (pilot) stage of an industrial prototype burner // ASME Power Conference Proceedings. — San Diego, CA, USA, 2015. Paper No. POWER2015-49449, V001T03A010. 13 p. doi: 10.1115/POWER2015-49449.
3. Akhtar S., Piffaretti S., Shamim T. Numerical investigation of flame structure and blowout limit for lean premixed turbulent methane–air flames under high pressure conditions // Appl. Energ., 2018. Vol. 228. P. 21–32.
4. Farisco F., Notsch P., Prieler R., Greiffenhagen F., Woisetschlaeger J., Heitmeir F., Hochenauer C. Numerical investigation of a swirl stabilized methane fired burner and validation with experimental data // ASME Turbo Expo Proceedings. — Phoenix, AZ, USA, 2019. Vol. 4A. Paper No. GT2019-90452, V04AT04A028. 14 p. doi: 10.1115/GT2019-90452.
5. Kundu A., Klingmann J., Subash A. A., Collin R. Pilot-pilot interaction effects on a prototype DLE gas turbine burner combustion // ASME Turbo Expo Proceedings. — Seoul, South Korea, 2016. Vol. 4B. Paper No. GT2016-57338, V04BT04A012. 15 p. doi: 10.1115/GT2016-57338.
6. Abou-Taouk A., Andersson N., Eriksson L.-E., Lörstad D. CFD analysis of a SGT-800 burner in a combustion rig // ASME Turbo Expo Proceedings. — Seoul, South Korea, 2016. Vol. 4B. Paper No. GT2016-57423, V04BT04A014. 10 p. doi: 10.1115/GT2016-57423.
7. Lörstad D., Ljung A., Abou-Taouk A. Investigation of Siemens SGT-800 industrial gas turbine combustor us-

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-01045.

¹ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова», mvdrobys@ciam.ru

² ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова», andubovitsky@ciam.ru

³ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова», ablebedev@ciam.ru

⁴ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова», edsverdlov@rtc.ciam.ru

⁵ ФАУ «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова», kyakubovsky@yandex.ru

- ing different combustion and turbulence models // ASME Turbo Expo Proceedings. — Seoul, South Korea, 2016. Vol. 4B. Paper No. GT2016-57694, V04BT04A037. 11 p. doi: 10.1115/GT2016-57694.
8. *Kundu A., Klingmann J., Subash A.A., Collin R.* Experimental and numerical investigation of a prototype low NOx gas turbine burner // ASME Power Conference Proceedings. — Charlotte, NC, USA, 2016. Paper No. POWER2016-59592, V001T03A013. 14 p. doi: 10.1115/POWER2016-59592.
 9. *Gicquel L. Y. M., Staffelbach G., Poinso T.* Large eddy simulations of gaseous flames in gas turbine combustion chambers // Prog. Energ. Combust., 2012. Vol. 38. No. 6. P. 782–817.
 10. *Sadasivuni S. K., Bulat G., Sanderson V., Swaminathan N.* Application of scalar dissipation rate model to Siemens DLE combustors // AMSE Turbo Expo Proceedings. — Copenhagen, Denmark, 2012. Vol. 2. P. 361–370. Paper No. GT2012-68483.
 11. *Abou-Taouk A., Sadasivuni S., Lörstad D., Eriksson L.-E.* Evaluation of global mechanisms for les analysis of SGT-100 DLE combustion system // ASME Turbo Expo Proceedings. — San Antonio, TX, USA, 2013. Vol. 1B. Paper No. GT2013-95454, V01BT04A036. 13 p. doi: 10.1115/GT2013-95454
 12. *Goldin G., Montanari F., Patil S.* A comparison of RANS and LES of an industrial lean premixed burner // ASME Turbo Expo Proceedings. — Düsseldorf, Germany, 2014. Vol. 4A. Paper No. GT2014-25352, V04AT04A021. 10 p. doi: 10.1115/GT2014-25352.
 13. *Mallouppas G., Goldin G., Zhang Y., Thakre P., Krishnamoorthy N., Rawat R., Gosman D., Rogerson J., Bulat G.* Investigation of an industrial gas turbine combustor and pollutant formation using LES // ASME Turbo Expo Proceedings. — Charlotte, NC, USA, 2017. Vol. 4B. Paper no. GT2017-64744, V04BT04A039. 10 p. doi: 10.1115/GT2017-64744.
 14. *Jaravel T., Riber E., Cuenot B., Bulat G.* Large eddy simulation of an industrial gas turbine combustor using reduced chemistry with accurate pollutant prediction // P. Combust. Inst., 2017. Vol. 36. No. 3. P. 3817–3825. doi: 10.1016/j.proci.2016.07.027.
 15. *Fedina E., Fureby C., Bulat G., Meier W.* Assessment of finite rate chemistry large eddy simulation combustion models // Flow Turbul. Combust., 2017. Vol. 99. No. 2. P. 385–409. doi: 10.1007/s10494-017-9823-0.
 16. *Jella S., Gauthier P., Bourque G., Bergthorson J., Ghenadie B., Rogerson J., Sadasivuni S.* Large eddy simulations of a pressurized, partially-premixed swirling flame with finite-rate chemistry // J. Eng. Gas Turb. Power, 2018. Vol. 140. No. 11. P. 111505. Paper No. GTP-17-1387. doi: 10.1115/1.4040007.
 17. *Mallouppas G., Goldin G., Zhang Y., Thakre P., Rogerson J.* Investigation of flamelet generated manifold reaction source term closure models applied to an industrial gas turbine // ASME Turbo Expo Proceedings. — Phoenix, AZ, USA, 2019. Vol. 4A. Paper No. GT2019-90219, V04AT04A010. 10 p. doi: 10.1115/GT2019-90219.
 18. Gas turbine emissions contents / Eds. T. Lieuwen, V. Yang. — Cambridge aerospace ser. — Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 368 p.
 19. *Rashwan S. S., Nemitallah M. A., Habib M. A.* Review on premixed combustion technology: Stability, emission control, applications and numerical case study // Energ. Fuel., 2016. Vol. 30. No. 12. P. 9981–10014. doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b02386.
 20. Lean combustion. Technology and control / Eds. D. Dunn-Rankin, P. Therkelsen. — 2nd ed. — Elsevier, Academic Press, 2016. 267 p.
 21. *Poinso T.* Prediction and control of combustion instabilities in real engines // P. Combust. Inst., 2017. Vol. 36. No. 1. P. 1–28. doi: 10.1016/j.proci.2016.05.007.
 22. Modeling and simulation of turbulent combustion / Eds. S. De, A. K. Agarwal, S. Chaudhuri, S. Sen. — Energy, environment, and sustainability ser. — 1st ed. — Springer Nature Singapore, 2018. 679 p.
 23. *Vedeshkin G. K., Sverdlov E. D., Goltsev V. F., Doubovitsky A. N., Usenko D.* Low emission combustor developed for industrial gas turbine with NOx/CO level < 5 ppm // Gas Turbine Congress (International) Proceedings. — Tokyo, Japan, 2007. Paper No. IGTC2007-ID-160.
 24. *Дубовицкий А. Н., Лебедев А. Б., Сverdlov E. Д.* Экспериментальное исследование низкочастотных режимов неустойчивого горения бедных метановоздушных смесей в малоэмиссионных камерах сгорания без закрутки течения // Горение и взрыв, 2018. Т. 11. № 3. С. 51–59.
 25. *Menter F. R., Kuntz M., Langtry R.* Ten years of experience with the SST turbulence model // Turbulence, heat and mass transfer. 4. / Eds. K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers. — Begell House Inc., 2003. P. 625–632.
 26. *Menter F. R., Egorov Y.* A scale-adaptive simulation model using two-equation models. AIAA Paper No. 2005-1095, 2005. doi: 10.2514/6.2005-1095.
 27. *Poinso T., Veynante D.* Theoretical and numerical combustion. — Toulouse: CNRS, 2011. 604 p.
 28. *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.
 29. *Дробыш М. В., Дубовицкий А. Н., Лебедев А. Б., Сverdlov E. Д., Якубовский К. Я.* Экспериментальное и расчетное исследование эмиссии загрязняющих веществ в промышленной малоэмиссионной камере сгорания, работающей на бедной смеси метана и воздуха // XII Всеросс. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. — Уфа, 2019.
 30. *Дробыш М. В., Дубовицкий А. Н., Лебедев А. Б., Якубовский К. Я.* Модель горения и эмиссии для моделирования процессов в камерах сгорания, работающих на неидеально подготовленной смеси метана с воздухом применительно к методам RANS и LES // Сб. «VI Минский междунар. colloquium по физике ударных волн, горению и детонации». — Минск, Беларусь, 2019.

31. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 14.5. — ANSYS Inc., 2012. <http://www.ansys.com/Products/Fluids/>

ANSYS-Fluent.

Поступила в редакцию 15.11.2021