

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ СМЕСИ МЕТАН/ВОЗДУХ МЕТОДАМИ RANS И LES В МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ\*

А. Б. Лебедев<sup>1</sup>, П. Д. Токталиев<sup>2</sup>, К. Я. Якубовский<sup>3</sup>

**Аннотация:** Построен достаточно простой и экономичный метод расчета турбулентного гомогенного горения смеси метана с воздухом, позволяющий с хорошей точностью описывать изменения средней и пульсационной компонент скорости и температуры в модельной камере сгорания. При построении метода анализировались результаты расчетов как методом RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) (с тремя моделями турбулентности), так и полупрямыми методами LES (large eddy simulation, метод моделирования крупных вихрей) и DES (detached-eddy simulation, метод отсоединенных вихрей). Турбулентное горение моделировалось с использованием двух моделей горения для полноты сгорания  $C$ . Охлаждение стенок камеры сгорания моделировалось с помощью модели конвективного теплообмена. Задача решалась с использованием программного комплекса Ansys Fluent 14.5 для сжимаемого совершенного газа на двух расчетных сетках — 3,7 млн и 15,7 млн расчетных ячеек кубической формы. Результаты расчетного исследования турбулентного гомогенного горения в канале с внезапным расширением, моделирующим малоэмиссионную камеру сгорания (МЭКС), показали, что наилучшее совпадение с экспериментальными данными дает метод LES WALE (wall-adapting local eddy-viscosity) с моделью горения для  $C$  в LES варианте и в неадиабатической постановке.

**Ключевые слова:** методы расчета; турбулентное горение; камеры сгорания

### Литература

1. Combustion instabilities in gas turbine engines: Operational experience, fundamental mechanisms and modeling / Eds. T. Liewwen, V. Yang. — Progress in astronautics and aeronautics ser. — AIAA, 2006. Vol. 210. 657 p.
2. Poinso T., Veynante D. Theoretical and numerical combustion. — Toulouse: CNRS, 2011. 604 p.
3. Liewwen T. Unsteady combustor physics. — New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. 475 p.
4. Секундов А. Н. Некоторые проблемы моделирования турбулентных течений. — Germany: LAP Lambert Academic Publ., 2014. 144 с.
5. Лебедев А. Б., Секундов А. Н., Якубовский К. Я. Исследование взаимодействия турбулентности и фронта пламени при горении смеси метана и воздуха с использованием метода LES // Сб. докл. XI Всеросс. съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике. — Казань, 2015. С. 2255–2257.
6. Секундов А. Н., Чепрасов С. А., Якубовский К. Я. Сопоставление результатов моделирования полей CO на фронте пламени методами RANS и LES // ТВТ, 2015. Т. 53. № 5. С. 747–751.
7. Pudovikov D. E., Toktaliev P. D., Yakubovsky K. Ya. Detached eddy simulation of flow in a model low-emission combustion chamber // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 2. Combustion and detonation / Eds. A. M. Starik, S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 225–235.
8. Лебедев А. Б., Секундов А. Н., Якубовский К. Я. Возможный механизм автоколебаний в камере, работающей на заранее перемешанной смеси метана и воздуха // Изв. РАН. МЖГ, 2017. № 3. С. 57–62.
9. Sabel'nikov V., Brossard C., Orain M., Grisch F., Barat M., Ristori A., Gicquel P. Visualization study of thermoacoustic instability in a back-facing step stabilized lean-premixed flame in high turbulence flow // 10th Conference (International) on Fluid Control, Measurements, and Visualization. — Moscow, 2009.
10. Dupoirieux F., Vincent A., Bertier N., Banh A. Numerical simulation of a premixed CH<sub>4</sub>–air burner for comparison of RANS and LES methodologies // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 2. Combustion and detonation / Eds. A. M. Starik, S. M. Frolov. — Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 147–163.
11. Nicoud F., Ducros F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor // Flow Turbul. Combust., 1999. Vol. 62. No. 3. P. 183–200. doi: 10.1023/A:1009995426001.
12. Yakhot V., Orszag S. A., Thangam S., Gatski T. B., Speziale C. G. Development of turbulence models for

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-01-01003) и гранта Президента РФ на поддержку молодых российских ученых и ведущих научных школ (НШ-7018.2016.8).

<sup>1</sup>ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова», lebedev@ciam.ru

<sup>2</sup>ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова», toktaliev@ciam.ru

<sup>3</sup>ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова», kyakubovsky@yandex.ru

- shear flows by a double expansion technique // *Phys. Fluids A — Fluid*, 1992. Vol. 4. No. 7. P. 1510–1520. doi: 10.1063/1.858424.
13. *Menter F. R.* Performance of popular turbulence models for attached and separated adverse pressure gradient flows // *AIAA J.*, 1992. Vol. 30. No. 8. P. 2066–2072. doi: 10.2514/3.11180.
  14. *Launder B. E., Reece G. J., Rodi W.* Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure // *J. Fluid Mech.*, 1975. Vol. 68. Pt. 3. P. 537–566. doi: 10.1017/S0022112075001814.
  15. ANSYS Inc. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 14.5, 2012. <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent> (accessed November 9, 2017).
  16. CHEMKIN. 2015. <http://www.reactiondesign.com> (accessed November 9, 2017).
  17. *Frenklach M., Wang H., Goldenberg M.* GRI-Mech — an optimized detailed chemical reaction mechanism for methane combustion. [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech) (accessed November 9, 2017).
  18. *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.

*Поступила в редакцию 26.10.17*