

# РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМОВ ГОМОГЕННОГО ГОРЕНИЯ СМЕСИ МЕТАН/ВОЗДУХ В МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ\*

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

**Аннотация:** На основе метода моделирования крупных вихрей (large-eddy simulation, LES) рассмотрен один из возможных вариантов простого в реализации и экономичного метода расчета трехмерных нестационарных турбулентных течений при наличии гомогенного горения метановоздушной смеси в малоэмиссионной исследовательской камере сгорания. Характерные размеры элементов камеры сгорания, режимы течения, уровень турбулентности и способ стабилизации фронта пламени близки к параметрам и условиям работы в полноразмерных промышленных малоэмиссионных камерах сгорания (МЭКС). Для описания турбулентного течения используется метод LES с подсеточной моделью WALE (Wall-Adapting Local Eddy-viscosity). В качестве модели турбулентного горения применялись дифференциальное уравнение для полноты сгорания (прогрессивной переменной)  $C$  и модель Зимонта в LES варианте. Методика позволяет рассчитывать нестационарные режимы течений с горением перемешанной смеси как без проскока, так и с проскоком при различных вариантах режимных параметров в камере сгорания. Эти режимы моделировались с помощью вариации граничных условий на входе в камеру сгорания. Анализируется возможная причина возникновения режима с большими по амплитуде колебаниями фронта пламени, связанная с переносом вихрей от входа в камеру до зоны горения. Результаты расчетов, полученные при моделировании горения в канале с обратным уступом, сравнивались с экспериментальными данными других авторов.

**Ключевые слова:** режим неустойчивого горения; турбулентное горение; камеры сгорания; метод LES

## Литература

1. *Fureby C.* Large eddy simulation modelling of combustion for propulsion applications // *Philos. T. R. Soc. A*, 2009. Vol. 367. P. 2957–2969. doi: 10.1098/rsta.2008.0271.
2. *Poinsot T., Veynante D.* Theoretical and numerical combustion. — Philadelphia, PA, USA: Edwards, 2011. 587 p.
3. *Gruber A., Chen J. H., Valiev D., Law C. K.* Direct numerical simulation of premixed flame boundary layer flashback in turbulent channel flow // *J. Fluid Mech.*, 2012. Vol. 709. P. 516–542. doi: 10.1017/jfm.2012.345.
4. *Lieuwen T. C.* Unsteady combustor physics. — New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. 475 p. doi: 10.1017/CBO9781139059961.
5. *Thibaut D., Candel S.* Numerical study of unsteady turbulent premixed combustion: Application to flashback simulation // *Combust. Flame*, 1998. Vol. 113. No. 1–2. P. 53–65. doi: 10.1016/S0010-2180(97)00196-X.
6. *Park N. S., Ko S. C.* Large eddy simulation of turbulent premixed combustion flows over backward facing step // *J. Mech. Sci. Technol.*, 2011. Vol. 25. No. 3. P. 713–719. doi: 10.1007/s12206-011-0106-8.
7. *Lewis B., von Elbe G.* Stability and structure of burner flames // *J. Chem. Phys.*, 1943. Vol. 11. No. 2. P. 75–97. doi: 10.1063/1.1723808.
8. *Kalantari A., McDonell V.* Boundary layer flashback of non-swirling premixed flames: Mechanisms, fundamental research, and recent advances // *Prog. Energ. Combust.*, 2017. Vol. 61. P. 249–292. doi: 10.1016/j.peccs.2017.03.001.
9. *Plee S. L., Mellor A. M.* Review of flashback reported in prevaporizing/premixing combustors // *Combust. Flame*, 1978. Vol. 32. P. 193–203. doi: 10.1016/0010-2180(78)90093-7.
10. *Benim A. C., Syed K. J.* Flashback mechanisms in lean premixed gas turbine combustion. — Academic Press, 2015. 119 p. <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780128007556>.
11. *Dupoirieux F., Vincent-Randonnier A., Bertier N., Banh A.* Numerical simulation of a premixed CH<sub>4</sub>–air burner for comparison of Reynolds-averaged Navier–Stokes and Large-Eddy Simulation 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. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27567407>.

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-01-01003).

<sup>1</sup>Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова, kyakubovsky@yandex.ru

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

<sup>3</sup>Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова, lebedev@ciam.ru

12. Keller J. O., Vaneveld L., Korschelt D., Hubbard G. L., Ghoniem A. F., Daily J. W., Oppenheim A. K. Mechanism of instabilities in turbulent combustion leading to flashback // AIAA J., 1982. Vol. 20. No. 2. P. 254–262. doi: 10.2514/3.51073.
13. 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. 9–17.
14. 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.
15. 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.
16. ANSYS Inc., ANSYS Fluent Theory Guide. Release 14.5, 2012. <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.

Поступила в редакцию 16.01.18

# NUMERICAL SIMULATION OF UNSTABLE REGIMES OF METHANE–AIR MIXTURE PREMIXED COMBUSTION IN LOW-EMISSION COMBUSTION CHAMBER

K. Ya. Yakubovsky, P. D. Toktaliev, and A. B. Lebedev

Central Institute of Aviation Motors, 2 Aviamotornaya Str., Moscow 111116, Russian Federation

**Abstract:** One of the possible cases of simple for realization and computationally inexpensive methodology for simulating the three-dimensional unsteady turbulent flow with premixed combustion of methane–air mixture in the model low-emission combustion chamber based on Large Eddy Simulation (LES) is proposed. Typical geometrical sizes of combustion chamber elements, operational regime parameters, turbulence level, and flame-front stabilization method are close to those of full-sized industry combustion chambers. For the description of turbulent flow, LES with WALE (Wall-Adapting Local Eddy-simulation) subgrid-scale model was used. As for the turbulent combustion model, a differential equation for combustion efficiency  $C$  and Zimont model in LES modification were applied. The methodology allows one to simulate unsteady flow regimes with premixed combustion with and without flashback phenomena for different operational regime parameters of the combustion chamber. Operational regimes are modeled by the variation of boundary conditions at the inlet section of combustion chamber. The possible reason for the regime with a high amplitude of flame–front fluctuations, related with vortex transport from the inlet section of combustion chamber to hot zone, is analyzed. Calculation results obtained for the rearward facing step burner and experimental data of other authors are compared.

**Keywords:** unstable regime; turbulent combustion; combustion chambers; LES

## Acknowledgments

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 15-01-01003).

## References

1. Fureby, C. 2009. Large eddy simulation modelling of combustion for propulsion applications. *Philos. T. R. Soc. A* 367:2957–2969. doi: 10.1098/rsta.2008.0271.
2. Poinso, T., and D. Veynante. 2011. *Theoretical and numerical combustion*. Philadelphia, PA: Edwards. 603 p.
3. Gruber, A., J. H. Chen, D. Valiev, and C. K. Law. 2012. Direct numerical simulation of premixed flame boundary layer flashback in turbulent channel flow. *J. Fluid Mech.* 709:516–542. doi: 10.1017/jfm.2012.345.
4. Lieuwen, T. C. 2012. *Unsteady combustor physics*. New York, NY: Cambridge University Press. 475 p. doi: 10.1017/CBO9781139059961.
5. Thibaut, D., and S. Candel. 1998. Numerical study of unsteady turbulent premixed combustion: Application to flashback simulation. *Combust. Flame* 113(1-2):53–65. doi: 10.1016/S0010-2180(97)00196-X.
6. Park, N. S., and S. C. Ko. 2011. Large eddy simulation of turbulent premixed combustion flows over backward facing step. *J. Mech. Sci. Technol.* 25(3):713–719. doi: 10.1007/s12206-011-0106-8.
7. Lewis, B., and G. von Elbe. 1943. Stability and structure of burner flames. *J. Chem. Phys.* 11(2):75–97. doi: 10.1063/1.1723808.
8. Kalantari, A., and V. McDonell. 2017. Boundary layer flashback of non-swirling premixed flames: Mechanisms, fundamental research, and recent advances. *Prog. Energ. Combust.* 61:249–292. doi: 10.1016/j.peecs.2017.03.001.
9. Plee, S. L., and A. M. Mellor. 1978. Review of flashback reported in prevaporizing/premixing combustors. *Combust. Flame* 32:193–203. doi: 10.1016/0010-2180(78)90093-7.
10. Benim, A. C., and K. J. Syed. 2015. *Flashback mechanisms in lean premixed gas turbine combustion*. Academic Press. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780128007556> (accessed January 24, 2018).
11. Dupoirieux, F., A. Vincent-Randonnier, N. Bertier, and A. Banh. 2016. Numerical simulation of a premixed CH<sub>4</sub>–air burner for comparison of Reynolds-averaged Navier–Stokes and Large-Eddy Simulation methodologies. *Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Vol. 2. Combustion and detonation*. Eds. A. M. Starik and S. M. Frolov. Moscow: TORUS PRESS. 147–163. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27567407> (accessed January 12, 2018).
12. Keller, J. O., L. Vaneveld, D. Korschelt, G. L. Hubbard, A. F. Ghoniem, J. W. Daily, and A. K. Oppenheim. 1982. Mechanism of instabilities in turbulent combustion leading to flashback. *AIAA J.* 20(2):254–262. doi: 10.2514/3.51073.
13. Lebedev, A. B., P. D. Toktaliev, and K. Ya. Yakubovsky. 2018. Raschetnoe issledovanie turbulentnogo go-

- mogennogo gorenija smesi metan/vozdukh metodami RANS i LES v maloemissionnoj kamere sgoraniya [Numerical study of turbulent homogeneous combustion of methane/air mixture in low-emission combustor by RANS and LES methods]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 10(4):9–17.
14. Nicoud, F., and F. Ducros. 1999. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. *Flow Turbul. Combust.* 62(3):183–200. doi: 10.1023/A:1009995426001.
15. Zimont, V. L. 2000. Gas premixed combustion at high turbulence. Turbulent flame closure combustion model. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 21(1-3):179–186. doi: 10.1016/S0894-1777(99)00069-2.
16. ANSYS Inc. 2012. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 14.5. Available at: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent> (accessed January 24, 2018).

Received January 16, 2018

## Contributors

**Yakubovsky Konstantin Ya.** (b. 1977) — senior research scientist, Central Institute of Aviation Motors, 2 Aviamotornaya Str., Moscow 111116 Russian Federation; K\_yakubovsky@rambler.ru

**Toktaliev Pavel D.** (b. 1985) — junior research scientist, Central Institute of Aviation Motors, 2 Aviamotornaya Str., Moscow 111116 Russian Federation; toktalievp@ciam.ru

**Lebedev Aleksander B.** (b. 1945) — Candidate of Science in physics and mathematics, leading research scientist, associate professor, Central Institute of Aviation Motors, 2 Aviamotornaya Str., Moscow 111116 Russian Federation; lebedev@ciam.ru