

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ\*

Я. В. Тропин<sup>1</sup>, А. А. Мануйлов<sup>2</sup>, С. А. Рашковский<sup>3</sup>

**Аннотация:** Одна из основных проблем моделирования горения в камере сгорания (КС) — учет взаимосвязи турбулентных и химических процессов. Физико-химические процессы, протекающие в КС газотурбинного двигателя (ГТД), очень сложны, их детальный расчет требует применения комплексных математических моделей, которые содержат большое число параметров. При анализе экспериментальных данных в полях температуры на выходе из жаровой трубы КС ГТД обнаружена интересная особенность, которая заключается в отсутствии ожидаемых периодических индивидуальных температурных максимумов и попарном их объединении. Для моделирования процесса формирования полей температуры в работе проведен численный расчет реагирующего течения в КС с помощью коммерческого пакета STAR-CCM+. При моделировании турбулентности и горения использовали  $k-\varepsilon$  модель и модель steady laminar flamelet (SLF) соответственно. Распыл топливной форсунки моделировался с помощью линейной модели пленочной атомизации (LISA).

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель; камера сгорания; жаровая труба; поля температуры; горение;  $k-\varepsilon$  model; SLF; LISA

DOI: 10.30826/CE25180305

EDN: DREGIM

## Литература

1. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. 566 с. (*Lefebvre A. H.* Gas turbine combustion. — West Lafayette, IN, USA: Purdue University, 1983. 531 p.)
2. *Вьюнов С. А., Гусев Ю. И.* Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей. — М.: Машиностроение, 1989. 368 с.
3. *Тропин Я. В., Рашковский С. А.* Особенности температурных полей в камере сгорания газотурбинного двигателя // Горение и взрыв, 2024. Т. 17. № 2. С. 25–34. doi: 10.30826/CE24170204.
4. *Крылов Б. А., Онищик И. И., Юн А. А.* Моделирование процессов тепло- и массообмена в модельных камерах сгорания // Вестник Московского авиационного института, 2009. Т. 16. № 1. С. 3.
5. *Uryga-Bugajska I., Borman D., Pourkashanian M., et al.* Theoretical investigation of the performance of alternative aviation fuels in an aero-engine combustion chamber // P. I. Mech. Eng. G — J. Aer., 2011. Vol. 225. No. 8. P. 874–885.
6. *Вафин И. И., Мингазов Б. Г.* Моделирование процесса смешения в камерах сгорания ГТД // Сб. докл. VII Междунар. научн.-технич. конф. «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики», 2013. С. 395–398.
7. *Livebardon T., Moreau S., Poinot T., Bouty É.* Numerical investigation of combustion noise generation in a full annular combustion chamber // 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2015. P. 2971.
8. *Сунатов А. М., Шилов К. А., Нугуманов А. Д., Абрамчук Т. В.* Численная доводка полей температуры газов на выходе из камеры сгорания газотурбинной установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, 2016. № 46. С. 40–55. doi: 10.15593/2224-9982/2016.46.02.
9. *Mark C. P., Selwyn A.* Design and analysis of annular combustion chamber of a low bypass turbofan engine in a jet trainer aircraft // Propulsion Power Research, 2016. Vol. 5. No. 2. P. 97–107.
10. *Азульник А. Б., Онищик И. И., Ярмаш А. Д.* Процесс смешения и неравномерность поля температур газа на выходе из камеры сгорания ГТД // Насосы. Турбины. Системы, 2017. № 2(23). С. 30–38.
11. *Tao W., Wang J., Mao R., Wang X., Zhang C., Lin Y.* Generation and migration of hot streaks within an LPP combustor // Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. — Phoenix, AZ, USA: American

\* Работа выполнена по теме государственного задания (номер госрегистрации № 124012500440-9).

<sup>1</sup> ОКБ им. А. Люльки — филиал ПАО «ОДК-УМПО»; Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, tropin.ya@yandex.ru

<sup>2</sup> ОКБ им. А. Люльки — филиал ПАО «ОДК-УМПО», manuyloff@rambler.ru

<sup>3</sup> Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, rash@ipmnet.ru

- Society of Mechanical Engineers, 2019. Vol. 4A. Paper No. GT2019-90601. 9 p. doi: 10.1115/GT2019-90601.
12. Bertini D., Mazzei L., Andreini A., Facchini B. Multiphysics numerical investigation of an aeronautical lean burn combustor // Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. — Phoenix, AZ, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2019. Vol. 5B. Paper No. GT2019-91437. 15 p. doi: 10.1115/GT2019-91437.
  13. Reddy S. S., Reddy M. K. Design of annular combustion chamber for a micro turbopfan engine // Int. J. Mechanical Production Engineering Research Development, 2019. Vol. 9. Iss. 6. P. 747–754.
  14. Евсеев С. А., Козел Д. В., Кравченко И. Ф. Повышение точности расчета поля температур газа на выходе из камеры сгорания ГТД методом трехмерного компьютерного моделирования // Авиационно-космическая техника и технология, 2020, № 5. С. 74–82. doi: 10.32620/akt.2020.5.10.
  15. Moreno-Pacheco L. A., Sánchez-López F., Barbosa-Saldaña J. G., et al. Design and numerical analysis of an annular combustion chamber // Fluids, 2024. Vol. 9. No. 7. P. 161.
  16. Крылов Б. А., Мануйлов А. А., Федоров С. А. Основные принципы выбора моделей турбулентности, используемых при расчете полей скоростей и температурного состояния системы охлаждения стенок жаровой трубы основной камеры сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института, 2010. Т. 17. № 5. С. 15.
  17. ОСТ 1.01134-86. Камеры сгорания основных газотурбинных двигателей. Методы определения поля температуры газа на выходе из основной КС при автономных испытаниях. — М., 1986. 16 с.
  18. Марчуков Е. Ю., Онищик И. И., Рutowский Б. Б. и др. Испытания и обеспечение надежности авиационных двигателей и энергетических установок. — М.: Изд-во МАИ, 2004. 334 с.
  19. STAR-CCM+ v16.06 © 2020 Siemens PLM Software.
  20. Han Z., Parish S., Farrell P. V., Reitz R. D. Modeling atomization processes of pressure-swirl hollow-cone fuel sprays // Atomization Spray., 1997. Vol. 7. No. 6. P. 663–684.
  21. Schmidt D. P., Nouar I., Senecal P., et al. Pressure-swirl atomization in the near field // SAE Transactions, 1999. SAE Technical Paper 108(3).
  22. Senecal P. K., Richards K., Pomraning E., et al. A new parallel cut-cell Cartesian CFD code for rapid grid generation applied to in-cylinder diesel engine simulations. SAE Technical Paper No. 2007-01-0159, 2007.
  23. Строчак Е. А., Боровик И. Н. Численное моделирование процесса распыливания керосина центробежной форсункой // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2016. № 3. С. 37–54. doi: 10.18698/0236-3941-2016-3-37-54.
  24. Shih T. H., Liou W. W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A new  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows // Comput. Fluids, 1995. Vol. 24. No. 3. P. 227–238.
  25. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD. — 3rd ed. — La Cañada, CA, USA: DCW Industries, 1998. 536 p.
  26. Peters N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion // Prog. Energ. Combust., 1984. Vol. 10. No. 3. P. 319–339.
  27. Honnet S., Seshadri K., Niemann U., Peters N. A surrogate fuel for kerosene // P. Combust. Inst., 2009. Vol. 32. P. 485–492.
  28. Иноземцев А. А., Нухамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. — М.: Машиностроение, 2008. Т. 2. 366 с.
  29. Леонтьев М. К. Атлас деталей и узлов двухконтурного турбореактивного двигателя АЛ-31Ф. — М.: МАИ, 2008. 20 с.
  30. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд. — М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Поступила в редакцию 03.02.2025

После доработки 14.04.2025

Принята к публикации 21.04.2025