

УДК 004.942+621.45.022.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ МОНООКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ГОРЕНИИ ЖИДКОГО ТОПЛИВА, РАСПЫЛЯЕМОГО ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ФОРСУНКОЙ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Н. И. Гураков, И. А. Зубрилин, О. В. Коломзаров, Д. В. Идрисов,  
В. М. Анисимов, А. Д. Попов, В. Ю. Абрашкин, С. С. Матвеев,  
С. Г. Матвеев

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева  
443086 Самара, nikgurakov@gmail.com

Предложен метод расчета характеристик распыла жидкого топлива центробежными форсунками для задания граничных условий впрыска в камеру сгорания. Представлены результаты моделирования эмиссии СО в модельной камере сгорания при двух вариантах задания граничных условий впрыска жидкого топлива: 1) с помощью модели дискретной фазы (DPM), при этом параметры распыла топлива получены моделированием двухфазного течения методом объема жидкости (VOF); 2) для сравнения — с помощью полуэмпирической методики Лефевра расчета центробежных топливных форсунок. Предложенный в статье метод определения граничных условий впрыска позволяет в несколько раз повысить точность прогнозирования эмиссии СО по сравнению с классической полуэмпирической методикой расчета центробежных топливных форсунок.

Ключевые слова: модельная камера сгорания, течение топлива в форсунке, метод объема жидкости, метод Лагранжа, суррогат авиационного керосина, реакторные модели, моделирование эмиссии СО.

DOI 10.15372/FGV20230208

### ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферы Земли является одной из глобальных проблем человечества. С ростом интенсивности пассажирских и транспортных перелетов увеличивается негативное воздействие на окружающую среду продуктов сгорания авиационного топлива. Количество выбросов вредных веществ авиационными газотурбинными двигателями жестко регламентируется различными международными организациями, в том числе Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) [1]. Источником образования вредных веществ является камера сгорания (КС). В ряде работ показано, что на характеристики КС, в том чис-

ле эмиссионные, в значительной степени влияют параметры топливного факела. Так, в работе [2] установлено, что увеличение угла факела распыла может привести к росту эмиссии СО в три раза. В работах [3, 4] показано влияние размера капель, образовавшихся в результате распыла топлива, на образование вредных веществ (NO, СО, сажа), а в работе [5] — влияние на распределение температуры в КС. Поэтому при построении математической модели рабочего процесса в камерах сгорания газотурбинного двигателя необходимо достаточно точно определять граничные условия для процесса впрыска жидкого топлива в первичную зону КС, такие как угол распыла факела, расходная характеристика форсунки, средний диаметр капель, начальная скорость движения капель и др.

Характеристики распыла топлива можно получить экспериментально, но изготовление опытного образца форсуночного устройства и обеспечение необходимых стендовых условий проведения экспериментов связано с

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00876, <https://rscf.ru/en/project/21-19-00876/>).

Доложено на II Международной научной конференции «Физика и химия горения и процессов в экстремальных условиях», 12–16 июля 2022, Самара.

© Гураков Н. И., Зубрилин И. А., Коломзаров О. В., Идрисов Д. В., Анисимов В. М., Попов А. Д., Абрашкин В. Ю., Матвеев С. С., Матвеев С. Г., 2023.

существенными материальными и временными затратами.

Поэтому на этапе предварительного проектирования для определения характеристик распыла жидкого топлива используют полуэмпирические методики. В работах [6–9] предложены различные соотношения для оценки коэффициента расхода форсунки, угла топливного факела, толщины топливной пленки, а также размеров капель, обычно характеризующихся средним по Заутеру диаметром  $D_{32}$ . Однако границы применимости таких полуэмпирических методик, как правило, ограничены теми параметрами режимов работы двигателя, форсуночных устройств и характеристик топлива, для которых они были разработаны. Поэтому полуэмпирические методики не являются универсальными и не охватывают все возможные конструктивные решения центробежных форсунок и не учитывают изменения физических свойств топлив на различных эксплуатационных режимах.

Для определения параметров распыла жидкого топлива центробежными форсунками целесообразно пользоваться методом объема жидкости (VOF). В работе [10] показано, что реализация VOF с использованием адаптивного подсеточного моделирования позволяет с высокой точностью рассчитывать распад жидкости на капли. Методика моделирования распыла на основе VOF была валидирована и доказала свою универсальность при моделировании распыла центробежными топливными форсунками [11–13]. В данной работе предлагается использовать характеристики распыла, полученные методом VOF, как граничные условия для модели дискретной фазы (DPM), которая используется при моделировании процессов в КС для последующего расчета эмиссии CO.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальное исследование параметров течений с горением и экологических характеристик модельной КС проводилось на высокотемпературной установке, подробно описанной в работах [14, 15]. Данная установка (рис. 1) позволяет использовать различные виды топлива (природный газ, керосин и смеси различных углеводородов) с подогревом рабочего тела в диапазоне температуры воздуха  $T_k = 293 \div 723$  К при приведенной скорости потока на входе в камеру сгорания  $\lambda_k = 0.05 \div 0.3$ ,

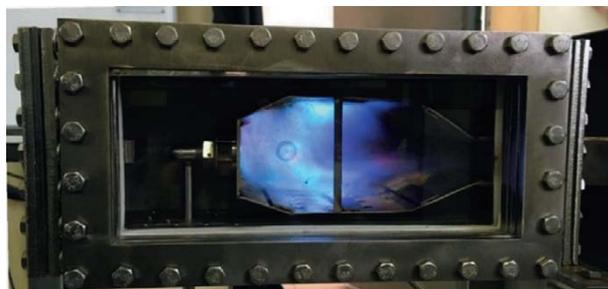


Рис. 1. Модельная камера сгорания во время эксперимента

расход воздуха  $G_b \leq 120$  г/с. Эмиссия CO определялась методом отбора проб охлаждаемым пробоотборником с использованием высокоточного анализатора дымовых газов MGA5plus.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование процессов в КС можно разделить на два этапа. На первом этапе определяются характеристики распыла центробежной форсунки в воздушную область методом Эйлера с использованием модели VOF. Временной шаг задавался исходя из условия, что число Куранта должно быть меньше 1. Полученные характеристики в совокупности с полуэмпирическими зависимостями позволяют определить основные характеристики распыла: угол факела распыла, начальную скорость капель, коэффициент расхода сопла, средний по Заутеру диаметр капель  $D_{32}$ . Второй этап — моделирование впрыска капель методом Лагранжа с помощью модели дискретной фазы DPM, граничными условиями для которой являются характеристики распыла, полученные на первом этапе. Затем моделируется испарение капель с их последующим смешением с воздухом и горением. Для расчета использовались нестационарные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса (URANS) с моделью турбулентности  $k-\omega$  Shear stress transport (SST). Расчет процессов горения осуществлялся с помощью модели Flamelet generated manifold в сочетании с использованием функции плотности вероятности (Probability density function, PDF), реализованных в ANSYS Fluent. В качестве кинетического механизма химических реакций принят механизм JetSurF 2.0 [12]. Для определения эмиссии CO использована модель сети химических реакторов (Reactor network model) по методике, отработанной на газообразном топливе, описанной в [14–18]. Для моделирования

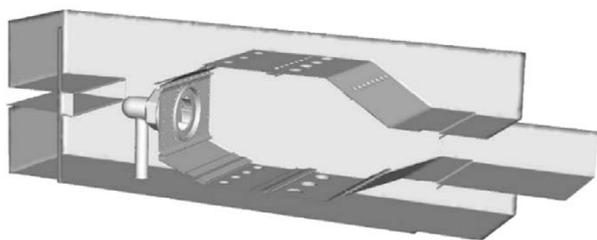


Рис. 2. Геометрическая модель камеры сгорания

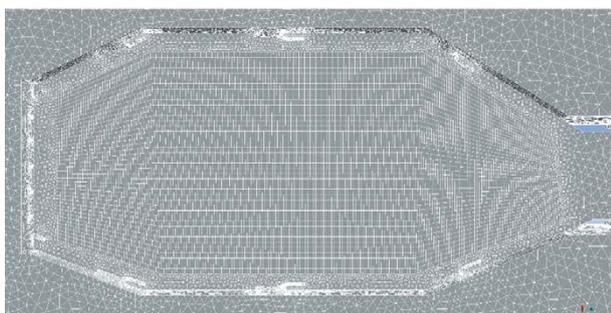


Рис. 3. Сеточная модель камеры сгорания с упорядоченными элементами в зоне горения

испаренного керосина применялся разработанный в Самарском университете четырехкомпонентный суррогат авиационного керосина SU2, соответствие физико-химических свойств реальному керосину рассмотрено в работе [19].

Модель КС, используемая для верификации предложенной методики, основана на реальной модели КС, ранее разработанной в Самарском университете для экспериментальных исследований многочисленных аспектов горения, а также верификации расчетных методик вычислительной гидродинамики (CFD) (рис. 2).

В результате генерации сеточной модели максимальный параметр скошенности\* примерно равен 0.95, что приемлемо для дальнейших расчетов. Размер элементов в зоне горения составляет 0.8 мм. С учетом проведенных исследований сеточной зависимости решения достаточным можно считать количество элементов в модели порядка 6 млн (рис. 3).

Скошенность показывает разницу между построенным конечным элементом (например, тетраэдром) и его аналогом эквивалентного объема, но с ребрами одной длины (т. е. тетраэдр, в основании которого лежат правильные треугольники). На практике в CFD принято, что максимальное значение этого параметра не должно превышать 0.95 для получения корректного решения.

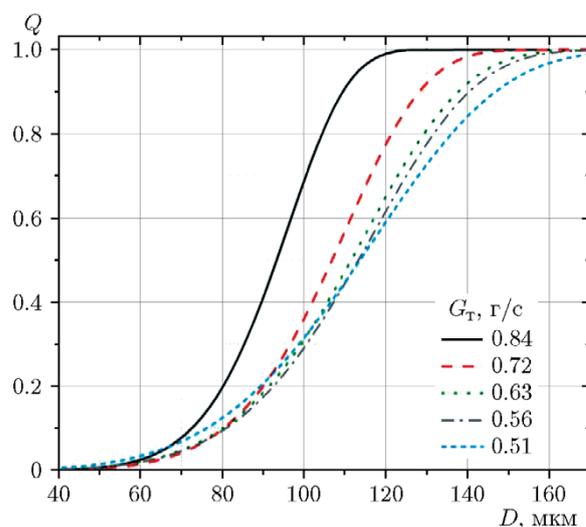


Рис. 4. Распределения Розина — Раммлера при различных расходах топлива форсунки модельной камеры сгорания

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для моделирования впрыска топлива в качестве граничных условий используются данные, полученные численным моделированием двухфазных потоков: угол факела распыла, начальная скорость капель [12, 13], а также данные, полученные по гибридной методике определения характеристик распыла авиационного топлива:  $D_{32}$ ,  $D_{min}$ ,  $D_{max}$ . Для определения максимального и минимального диаметров капель в указанных режимах работы модельной КС построена диаграмма распределения Розина — Раммлера (рис. 4).

Моделирование процессов горения проводилось с граничными условиями впрыска, полученными по предложенной в данной работе методике, а также с рассчитанными по полуэмпирической методике из работы [6]. В результате получены распределения температур и концентраций топлива, необходимые для расчета эмиссионных характеристик КС с помощью модели сети химических реакторов. На рис. 5 показаны поля температур потока в продольном сечении КС.

Из рис. 5 видно, что в модельной КС имеется зона горения, где происходит испарение капель топлива и его перемешивание с воздухом, зона горения ограничена за счет первого ряда отверстий жаровой трубы, второй ряд отверстий служит для охлаждения продуктов сгорания и формирования поля температур на выходе.

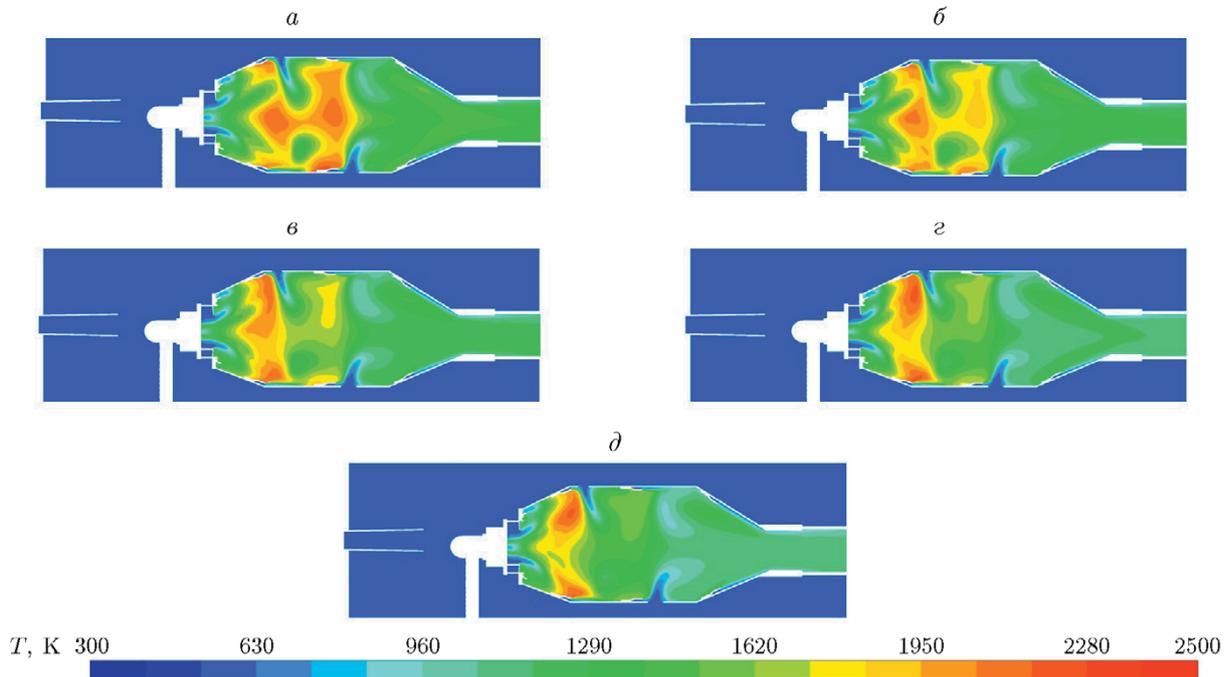


Рис. 5. Поля температуры потока при коэффициенте избытка воздуха в камере сгорания  $\alpha = 3$  (а), 3.5 (б), 4 (в), 4.5 (г), 5 (д)

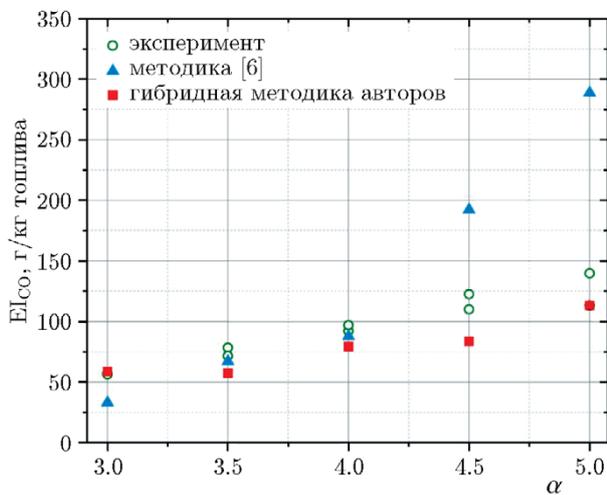


Рис. 6. Зависимость индексов эмиссии CO от коэффициента избытка воздуха в выходном сечении камеры сгорания

На рис. 6 приведены значения индекса эмиссии монооксида углерода  $EI_{CO}$  для всех указанных режимов работы КС, зарегистрированные в экспериментах и рассчитанные с использованием граничных условий впрыска, полученных по предложенной нами методике и по методике из работы [6]. Видно, что расчетные значения качественно согласуются с экс-

периментальными данными. Наибольшие количественные расхождения получены на режимах  $\alpha = 4.5$  и  $\alpha = 5$  с граничными условиями впрыска, рассчитанными по методике [6]. Завышенные значения  $EI_{CO}$  можно объяснить большими по сравнению с предлагаемыми методикой диаметрами капель, которые полностью не испаряются на данных режимах. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от результатов расчета с каплями, заданными по методике авторов, составило 15 %, что является приемлемым результатом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате определения характеристик распыла жидкого топлива центробежными топливными форсунками для использования их в качестве граничных условий впрыска топлива в камеру сгорания получены следующие результаты:

1) сформирована схема работы методики определения параметров первичного распыла топлива центробежными форсунками, необходимых для задания граничных условий впрыска топлива в камеру сгорания, для моделирования процессов горения;

2) среднеквадратичное отклонение значений эмиссии СО в модельной камере сгорания, полученных при использовании параметров впрыска, определенных с помощью разработанного метода расчета, не превышает 15 %, т. е. является удовлетворительным.

Таким образом, можно заключить, что задание параметров впрыска с помощью разработанной методики расчета характеристик распыла центробежных форсунок позволяет в  $1.5 \div 2$  раза повысить точность определения эмиссии СО по сравнению с классической полуэмпирической методикой расчета центробежных топливных форсунок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ICAO Engine Exhaust Emission Data Bank // ICAO Tech. Rep. 9646-AN/943. — Montreal, QC, Canada, 1995.
2. Ekaab N. S. Experimental study of the effect of fuel spray angle on emissions of pollutants from a continuous combustion process // IRAQI Acad. Sci. J. — 2017. — N 41. — P. 319–332.
3. Rink K. K., Lefebvre A. H. The influences of fuel composition and spray characteristics on nitric oxide formation // Combust. Sci. Technol. — 1989. — V. 68, N 1-3. — P. 1–14. — DOI: 10.1080/00102208908924066.
4. Lefebvre A. H., Ballal D. R. Gas Turbine Combustion. Alternative Fuels and Emissions. — New York: CRC Press: Taylor & Francis Group, 2010.
5. Mishra R. K., Kumar S. K., Chandel S. Effect of fuel particle size on the stability of swirl stabilized flame in a gas turbine combustor // Int. J. Turbo Jet-Engines. — 2015. — V. 32, N 2. — P. 129–141. — DOI: 10.1515/tjj-2014-0027.
6. Lefebvre A. H., McDonell V. G. Atomization and Sprays. — New York: Hemisphere, 1989.
7. Couto H. S., Carvalho J. A., Jr, Bastos-Netto D. Theoretical formulation for Sauter mean diameter of pressure-swirl atomizers // J. Propul. Power. — 1987. — V. 13, N 5. — P. 691–696. — DOI: 10.2514/2.5221.
8. Диденко А. А. Исследование качества распыливания топлива и его влияния на характеристики камер сгорания малоразмерных ГТД: дис. ... канд. техн. наук / Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (СГАУ). — Самара, 1996.
9. Wei X., Yong H. Improved semiempirical correlation to predict Sauter mean diameter for pressure-swirl atomizers // J. Propul. Power. — 2014. — V. 30, N 6. — P. 1628–1635. — DOI: 10.2514/1.B35238.
10. Сипатов А. М., Карабасов С. А., Гомзи-ков Л. Ю., Абрамчук Т. В., Семаков Г. Н. Моделирование процесса распыла с использованием адаптивных сеточных моделей // Вычислит. механика сплошных сред. — 2015. — Т. 8, № 1. — С. 93–101. — DOI: 10.7242/1999-6691/2015.8.1.8.
11. Гураков Н. И., Зубрилин И. А., Эрнандес Моралес М., Якушкин Д. В., Диденко А. А., Матвеев С. Г., Комисар Ю. В. Расчет характеристик течения жидкого топлива при его подаче через центробежные форсунок малоразмерных газотурбинных двигателей // Вест. Самарск. ун-та. Аэрокосм. техника, технологии и машиностроение. — 2021. — Т. 20, № 2. — С. 19–35. — DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-19-35.
12. Gurakov N. I., Zubrilin I. A., Abrashkin V. Y., Hernández Morales M., Yakushkin D. V., Yastrebov V. V., Kolomzarov O. V., Idrisov D. V. Validation of the VOF method for liquid spray process simulation from a pressure-swirl atomizer // AIP Conf. Proc. — 2020. — V. 2304, N 1. — 020031. — DOI: 10.1063/5.0033854.
13. Gurakov N. I., Hernández Morales M., Zubrilin I. A., Bolychev S. A., Didenko A. A., Matveev S. G. A study on the geometric characteristic influence on the liquid fuel flow in a three-way pressure-swirl atomizer // J. Phys.: Conf. Ser. — 2021. — V. 1891, N 1. — 012021.
14. Zubrilin I. A., Gurakov N. I., Semenikhin A. S., Kolomzarov O. V., Matveev S. G., Anisimov V. M. Simulation of CO emission in primary and secondary zone of a small gas turbine combustion chamber using CFD and reactors network // Proc. ASME 2019 Gas Turbine India Conf. — 2019. — 83532(V002T04A017). — DOI: 10.1115/GTINDIA2019-2594.
15. Gurakov N. I., Zubrilin I. A., Chechet I. V., Anisimov V. M., Matveev S. S., Idrisov D. V., Anisimov M. Y. Simulation of pollutant emissions in a small-sized combustion chamber with a gas fuel for various regime modes // Proc. ASME 2019 Gas Turbine India Conf. — 2019. — V. 83532(V002T04A023). — DOI: 10.1115/GTINDIA2019-2687.
16. JetSurF (Version 2.0) [Электронный ресурс]: <https://web.stanford.edu/group/haiwanglab/JetSurF/JetSurF2.0/>.
17. Зубрилин И. А., Матвеев С. Г., Marrone A., Pastrone D. G. Моделирование образования вредных веществ в малоразмерном ГТД с помощью сети реакторов // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2018. — Т. 45, № 10. — P. 28–32.
18. Matveev S. S., Idrisov D. V., Gurakov N. I., Gangisetty G., Zubrilin I. A., Matveev S. G., Shchepakina E. A. Simulation of CO and CO<sub>2</sub> emissions in model combustion chamber based on the combination

- LES and reactor network model // E3S Web Conf. — 2019. — V. 80. — 03008. — DOI: 10.1051/e3sconf/20198003008.
19. **Poulton L., Rybdylova O., Zubrilin I. A., Matveev S. G., Gurakov N. I., Al Qubeissi M., Al-Esawi N., Khan T., Gunko V. M., Sazhin S. S.** Modelling of multi-component kerosene and surrogate fuel droplet heating and evaporation characteristics: A comparative analysis // Fuel. — 2020. — V. 269. — 117115. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117115.

*Поступила в редакцию 24.10.2022.*

*Принята к публикации 09.11.2022.*

---