

УДК 621.45.01

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В МАЛОРАЗМЕРНОМ ГТД С ПОМОЩЬЮ СЕТИ РЕАКТОРОВ

И. А. Зубрилин<sup>1</sup>, С. Г. Матвеев<sup>1</sup>, Annamaria Marrone<sup>2</sup>,  
Dario Giuseppe Pastrone<sup>2</sup>

*В работе приведены результаты моделирования образования  $NO_x$  и  $CO$  в малоразмерном газотурбинном двигателе. Сравнение результатов CFD расчетов с экспериментальными данными показали, что для моделирования образования  $NO_x$  и  $CO$  может быть использован расчет в трехмерной стационарной постановке в сочетании с разбивкой на сеть реакторов. При использовании механизма химических реакций JetSurf 2.0 удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных достигается с количеством элементарных реакторов, превышающим несколько сотен.*

**Ключевые слова:** сеть реакторов, ГТД, эмиссия вредных веществ, CFD.

*Введение.* Увеличение мощности вычислительной техники, а также прогресс в разработке математических моделей горения в последние десятилетия позволили сформулировать подходы к моделированию выбросов вредных веществ, таких как  $CO$  и  $NO_x$ , в камерах сгорания ГТД, что существенно снижает затраты на экспериментальные исследования. Однако на данный момент эти подходы всё ещё требуют дальнейшего уточнения.

Целью данной работы является оценка влияния параметров моделей на результаты расчета индексов эмиссии  $NO_x$  и  $CO$  при сжигании керосина Jet-A в малоразмерном турбореактивном двигателе. Моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS FLUENT с последующим сравнением с экспериментальными данными. Представлены результаты расчётов в рамках вычислительной газодинамики (CFD), как для

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет, 423084 Россия, Самара, Московское шоссе, 34; e-mail: zubrilin416@mail.ru.

<sup>2</sup> Department of mechanical and aerospace engineering, Politecnico of Turin, Italia.

стационарного подхода Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), так и для нестационарного Large Eddy Simulation (LES).

*Камера сгорания и экспериментальные данные.* Камера сгорания исследуемого двигателя кольцевая, с противоточной организацией рабочего процесса, и содержит 6 форсунок подачи топлива. В экспериментальных исследованиях при частоте вращения двигателя от 40000 до 80000 об/мин были измерены концентрация загрязняющих веществ на выходе из двигателя. Более подробно это описано в работе [1].

*Условия моделирования.* Из-за осевой симметрии камеры сгорания при моделировании исследовалась только одна шестая часть всей камеры с периодическими граничными условиями. Для моделирования керосина Jet-A использовался его суррогат, состоящий из 9.1% гексана, 18.2% бензола и 72.7% декана (массовые доли) [2]. Химическая кинетика в камере сгорания описывалась кинетическим механизмом химических реакций JetSurf 2.0, включающим 348 компонентов и 2163 реакций [3].

Т а б л и ц а 1

План моделирования (подход RANS)

№	Размер сетки		[O]/[OH] подход		PDF подход		Размер капель	
	1.2 млн	3.3 млн	Частично равновесный	Нестац.	Темп.	Доля смеси	[1]	[6]
1	X		X		X		X	
2		X	X		X		X	
3		X		X	X		X	
4		X		X		X	X	
5		X		X		X		X
6		X		X	X			X

*Результаты моделирования: исследуемые варианты.* Турбулентный перенос моделировался в стационарной постановке в рамках модели переноса рейнольдсовых напряжений. Процесс горения описывался моделью Flamelet-Generated Manifold (FGM) в сочетании с подходом функции плотности вероятности (PDF) для стохастического описания модели турбулентно-химического взаимодействия [4]. Образование  $\text{NO}_x$  описывалось расширенным механизмом Зельдовича [5]. Исследовалось влияние на результаты расчета эмиссии вредных веществ таких параметров как: количество ячеек сетки (1.2 или 3.3 млн), подход к расчету концентраций O и OH в механизме Зельдовича (частично равновесный или нестационарный), подход PDF (для температуры или для

доли смеси) и размеры капель топлива. Для последнего параметра рассматриваются два разных значения для каждого режима: представленные в работах [1] (большого диаметра) или [6] (меньшего диаметра). План моделирования показан в табл. 1.

*Результаты моделирования: эмиссия  $NO_x$ .* На рис. 1 представлены результаты расчета индекса эмиссии  $EI_{NO_x}$ , который показывает массу вредных веществ в продуктах сгорания в граммах, отнесенную к килограмму сгоревшего топлива ( $g/kg$ ) для различных вариантов из табл. 1. Варианты № 1 и 2, показали значения  $EI_{NO_x}$ , которые существенно отличаются от экспериментальных данных, поэтому на графиках не представлены. Результаты варианта 4 были уточнены в варианте 5 при использовании распределения размеров капель топлива из работы [6]. Для дальнейшего моделирования  $CO$  использовались результаты расчета варианта № 5.

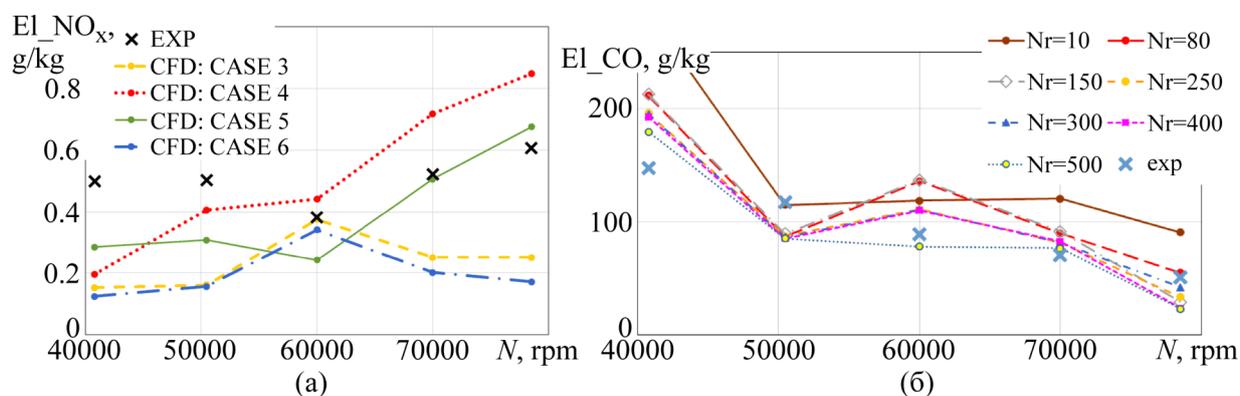


Рис. 1: Индексы эмиссии  $NO_x$  (а) и  $CO$  (б): CFD и эксперимент.

*Результаты моделирования: эмиссия  $CO$ .* Для прогнозирования концентраций  $CO$  использовался подход расчета сети реакторов [7]. Рабочий объем камеры сгорания разбивается на сеть реакторов идеального смешения, количество которых  $Nr$  может варьироваться в широком диапазоне и определяется пользователем. В качестве первого этапа анализа исследовалось влияние увеличения количества реакторов от 10 до 500 (рис. 1). При увеличении числа реакторов рассчитанные значения  $EI_{CO}$  приближаются к экспериментальным. Наряду с этим увеличивается время моделирования каждого варианта и количество требуемой оперативной памяти. Поэтому в данном случае принято, что наиболее рациональное количество реакторов – 300 штук.

*Результаты моделирования: подход LES.* В данной работе рассмотрен подход LES как один из наиболее детальных и перспективных подходов моделирования турбулентности (не считая прямого численного моделирования) [8]. На рис. 2 показано сравнение

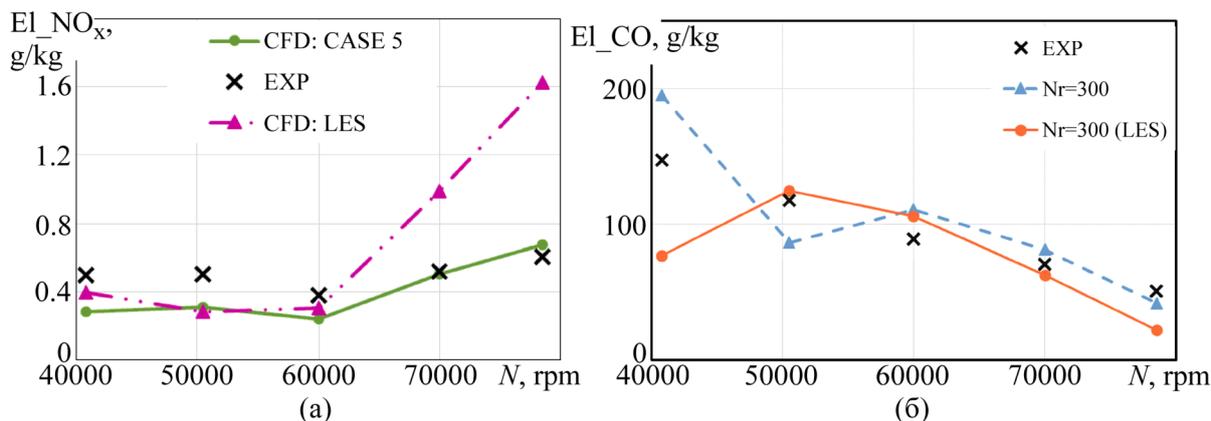


Рис. 2: Индексы эмиссии  $\text{NO}_x$  (а) и  $\text{CO}$  (б): результаты LES.

результатов RANS, LES и экспериментальных данных. Для расчета содержания  $\text{NO}_x$  использовались настройки варианта 5, а для расчета содержания  $\text{CO}$ -реакторная модель с 300 элементарными реакторами. Из результатов расчета видно, что LES показывает лучшее схождение с экспериментальными данными по  $\text{NO}_x$  для режимов 40000–60000 об/мин и завышает их при более высоких режимах. В свою очередь, для  $\text{CO}$  совпадение с экспериментальными данными лучше для всех режимов, кроме 40000 об/мин, где LES существенно занижает значение  $\text{CO}$ .

*Заключение.* В результате проведенной работы получено, что для расчета индексов эмиссии  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  может быть использован стационарный подход к моделированию турбулентности в сочетании с расчетом сети реакторов. Для расчета  $\text{NO}_x$  необходимо обеспечить размер элементов расчетной сетки в зоне горения, сопоставимый с толщиной фронта пламени (в данной задаче размер ребра элемента в зоне горения составлял 0.5–1 мм). Для детального описания образования вредных веществ количество реакторов должно находиться в диапазоне 300–500 штук. Необходимо использовать функцию плотности вероятности, построенную для восстановленной доли топлива в смеси, нестационарный подход для расчета O и OH в механизме Зельдовича. Существенную роль при расчете вредных веществ играют начальные условия распыла жидкого топлива, поэтому необходимо иметь достоверные данные о начальной скорости и диаметре капель.

Предполагается, что полученные результаты также могут быть улучшены, например, использованием другого суррогата топлива и расчета  $\text{NO}_x$  сетью элементарных реакторов. В свою очередь, это требует доработки существующих кинетических механизмов химических реакций или создание новых.

Данная работа была поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках реализации Программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” (RFMEFI58716X00033).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] M. Gallici, *Ms thesis* (Politecnico di Torino, Torino, 2011).
- [2] M. I. Strelkova, *Combust. Sci. and Tech.* **180**, 1788 (2008).
- [3] <https://web.stanford.edu/group/haiwanglab/JetSurF/JetSurF2.0/>
- [4] J. A. van Oijen, *Combust. Sci. and Tech.* **161**, 113 (2000).
- [5] A. H. Lefebvre, *Gas Turbine Combustion : Alternative fuels and emissions* (CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010).
- [6] M. Badami, *Energ. Convers. Manage.* **82**, 219 (2014).
- [7] G. Sarikaya et al., in *Proceeding of The World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer*, Prague, Czech Republic, 2016 (MHMT'16, Prague 2016).
- [8] T. Poinsot and D. Veynante, *Theoretical and Numerical Combustion* (USA, RT. Edward Inc., 2005).

*По материалам международной конференции “Физика и химия горения” (International Conference Combustion Physics and Chemistry), Самара, 2018.*

Поступила в редакцию 19 сентября 2018 г.