

УДК 621.43.056

А.А. КОНОПЛЕНКО<sup>1</sup>, В.Е. КОСТЮК<sup>1</sup>, В.Н. ГУСЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина  
<sup>2</sup>ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОГИДРОДИНАМИКИ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ГАЗОТУРБИНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ (ОБЗОР)

*Выполнен анализ точности численных оценок выбросов оксидов азота газотурбинными двигателями, достигнутой различными авторами в исследованиях методами вычислительной аэрогидродинамики, выполненных в период 2004 – 2009 гг. Установлено, что целевые показатели точности, сформулированные Н. Mongia в 2001 г., не достигнуты ни в одном из выполненных расчетов. Выявлена зависимость точности численных оценок выбросов оксидов азота от физико-математической постановки решавшихся задач, в частности, от мелкости разрешения расчетных сеток и кинетических моделей окисления топлива.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, камера сгорания, оксиды азота, численное моделирование, точность численных оценок

### Введение

При работе газотурбинного двигателя (ГТД) в результате окисления азота, содержащегося в атмосферном воздухе, образуются оксиды азота  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ ) – наиболее токсичные и экологически вредные соединения. Прогнозирование уровней выбросов  $\text{NO}_x$  на стадии проектирования позволяет существенно сократить время на изготовление и доводку принципиально новых малотоксичных конструкций камер сгорания (КС) ГТД.

В.Р. Кузнецов [1] показал, что кроме химической кинетики окисления азота, выбросы  $\text{NO}_x$  определяются процессом смешения и его влиянием на условия протекания химических реакций. Поэтому для надежного прогнозирования выбросов  $\text{NO}_x$  кроме знания кинетических механизмов их образования, необходимо подробное знание структуры химически реагирующего течения в КС.

В последнее время, в связи с развитием методов вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД), появилась возможность численного решения подобных задач [2] – [11]. Повышение точности таких расчетов – актуальная научная задача, имеющая большое практическое значение.

На практике точность численных расчетов ограничивается располагаемыми вычислительными ресурсами, обеспечивающими разрешение расчетной сетки, совершенством используемых математических моделей (прежде всего – турбулентности, кинетики горения и образования  $\text{NO}_x$ ) и вычислительных алгоритмов [12].

Систематические исследования влияния перечисленных выше методических аспектов на точность численных оценок выбросов  $\text{NO}_x$  реальными ГТД не выполнялись, а опубликованные данные разрознены.

Цель настоящей работы состоит в определении точности численных оценок выбросов  $\text{NO}_x$  ГТД, достигнутой различными авторами, и ее связи с физико-математической постановкой решавшихся задач.

### 1. Результаты исследования

В 2001 г. Н. Mongia обосновал целевой показатель относительной погрешности численных оценок уровней выбросов  $\text{NO}_x$  малотоксичными КС ГТД, равный 5 %, для методологии их проектирования, основанной на современных программах и моделях ВАГД, чтобы установить, насколько можно полагаться на этот подход [13]. Ниже дано сравнение показателей точности численных оценок уровней выбросов  $\text{NO}_x$  реальных ГТД, достигнутых различными авторами, с целевым показателем Н. Mongia.

В табл. 1 сведены максимальные различия между численными и измеренными оценками уровней выбросов  $\text{NO}_x$ , полученные различными авторами, вместе с основными характеристиками тех из использованных ими численных моделей, которые показали наивысшую точность.

Относительное различие между численной и измеренной оценками уровня выбросов  $\text{NO}_x$  определялось по следующей формуле:

$\delta_{[NO]} = ([NO]_ч - [NO]) / [NO] \cdot 100 \%$ , (1)  
 где  $[NO]_ч$  и  $[NO]$  – численная и измеренная оценки концентрации монооксида азота на выходе КС соответственно.

Краткая характеристика объектов численного моделирования, место и время его выполнения и использованный компьютерный код приведены в табл. 2.

Таблица 1  
 Максимальные различия между численными и измеренными оценками уровней выбросов NO<sub>x</sub>

№ объекта	Источник	$\delta_{[NO]}$ , %	Сетка		Модель						
			Количество ячеек, млн.	Топология	Турбулентность	Горение	Излучение	Кинетический механизм			
								Топливо	NO	O	OH
1	[2]	9,8		г		PDFF	DO		Зельдович		
2	[3]	6,4		г	SST	PDFF		C7H16 detaled	Зельдович		
3	[4]	28,4	0,027	2D	skε	FRED	DO	«2sCM2a»	Зельдович	PE	PE
4	[5]	38,8	3,3		rкε	PDFE	P-1		Зельдович	PE	PE
5	[6]	24,5	0,33	гт	skε	EDC		5 реакций, 7 веществ	Зельдович	I	I
6	[7]	23,9	1,3	т	RNG	Андреини			Андреини		
7	[8]	37,5	1,7	т	skε	KPP			Андреини		
8	[9]	31	0,286	г	skε	PDFF		GRI-MECH 1.22			
9	[10]	21,4	2	г	rкε	PDFE		Hydrogen37			
10	[11]	$\frac{59,7}{44,8}$	0,7		skε	PDFF			Зельдович, Фенимор		
Цель	[13]	±5									

Сокращения: *г* – гексаэдры; *т* – тетраэдры; *гт* – гексаэдры и тетраэдры; *2D* – двухмерная сетка; *SST* –  $k-\omega$  SST; *skε* – Standard *k-ε*; *rкε* – Realizable *k-ε*; *RNG* – RNG *k-ε*; *PDFF* – модель не перемешанной смеси с ламинарными флеймлетами; *FRED* – модель Магнуссена – Хертагера (конечноскоростная химия + модель разрушения вихря); *PDFE* – модель не перемешанной смеси с равновесной химией; *EDC* – модель концепции разрушения вихря Магнуссена; *KPP* – модель Kolmogorov-Petrovskii-Piskunov; *PE* – модель частичного равновесия; *I* – конечноскоростная химия.

Таблица 2  
 Характеристика объектов численного моделирования, места, времени и кода моделирования

№ объекта	Двигатель	Тип КС	Страна	Год	Код
1	ГТУ-16П	Трубчато-кольцевая	Россия	2004	CFX-TASCflow
2	ПС-90А	Трубчато-кольцевая	Россия	2006	CFX-TASCflow
3	ARI100	Трубчатая	Италия	2007	FLUENT
4	MS7001E	Трубчатая противоточная	Китай	2007	FLUENT
5	MS5001	Трубчатая противоточная	Италия	2006	FLUENT
6	GE10-1	Выносная трубчатая противоточная	Италия	2006	STAR-CD
7	GE10-2	Выносная трубчатая противоточная	Италия	2005	STAR-CD
8	LM-1600	Кольцевая		2005	FLUENT
9	ГТУ 10 МВт	Трубчатая	Италия	2009	
10	MGT	Кольцевая	США	2009	FLUENT CFX

Анализ данных, приведенных в табл. 1 и 2, показал следующее.

1. Максимальные относительные различия между численными и измеренными оценками уровня выбросов  $\text{NO}_x$ , достигнутые различными авторами, находятся в пределах  $\delta_{[\text{NO}]} = 6,4...59,7\%$  отн.

2. Ни одна из рассмотренных численных моделей не удовлетворяет целевому показателю точности Н. Mongia по относительному различию между численными и измеренными оценками  $[\text{NO}]$  (5 %). Наилучший результат достигнут в исследовании объекта № 2 (6,4 %).

3. Прослеживается связь между годом исследования и размером сетки: в ранних исследованиях – это сетки с количеством ячеек несколько сотен тысяч, в последних исследованиях – это сетки с количеством ячеек порядка 2 – 3 млн.

Прослеживается связь между размером расчетной сетки и точностью численных оценок выбросов  $\text{NO}_x$ .

4. Все исследования выполнены в постановке RANS. Подавляющее большинство объектов (8 из 10) моделировалось с использованием дифференциальных моделей турбулентности семейства k-ε.

5. Связь между годом исследования и используемой моделью турбулентного горения не прослеживается. Прослеживается зависимость точности численных оценок выбросов  $\text{NO}_x$  от кинетических моделей окисления топлива.

6. В подавляющем большинстве исследований рассчитывались выбросы оксидов азота, образующихся по термическому механизму.

7. В единственной численной модели – объекта № 2, моделировалось жидкое топливо. В остальных 9 численных моделях – газообразное.

### Заключение

На основании выполненного выше анализа можно сделать следующие выводы.

1. Целевой показатель точности, сформулированный Н. Mongia в 2001 г., сохраняет свою актуальность до настоящего времени: за истекшее десятилетие его не удалось достичь ни в одном численном расчете КС.

2. Из всех аспектов физико-математической постановки задач прослеживается зависимость точности численных оценок выбросов  $\text{NO}_x$  от разрешения расчетных сеток и кинетических моделей окисления топлива.

3. Хотя причинно-следственная связь точности прогнозирования выбросов  $\text{NO}_x$  и правильного учета концентрации  $[\text{O}]$ ,  $[\text{OH}]$  очевидна [14], количественную связь установить не удалось вследствие недостатка данных.

### Литература

1. Кузнецов В.Р. Образование окислов азота в камерах сгорания ГТД / В.Р. Кузнецов // Тр. ЦИАМ. – М.: ЦИАМ, 1983. – № 1086. – С. 8-18.

2. Куценко Ю.Г. Применение методов вычислительной газовой динамики для анализа процесса образования оксида азота и оптимизации конструкции камеры сгорания газотурбинного двигателя [Электронный ресурс] / Ю.Г. Куценко, Н.А. Андрюков // Первый межведом. науч.-техн. семинар по проблемам низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок «Опыт разработки, проблемы создания и перспективы развития низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ» 14 - 16 декабря 2004 г., Москва, 2004. – Режим доступа к материалам: <http://www.ciam.ru/conf/lemission/doc/18.pdf>.

3. Kutsenko Yu.G. Development and application of CFD-based analysis methodology to evaluate efficiency of low  $\text{NO}_x$  combustion technologies / Yu.G. Kutsenko, S.F. Onegin // Proceedings of ASME Turbo Expo 2006. – Barcelona, Spain. May 8-11, 2006 (GT2006-90530). – 13 p.

4. Micro Gas Turbine Combustor Emissions Evaluation Using the Chemical Reactor Modelling Approach / C. Russo, G. Mori, V.V. Anisimov, J. Parente // Proceedings of ASME Turbo Expo 2007. – Montreal, Canada. May 14-17, 2007 (GT2007-27687). – 12 p.

5. The Effects of Fuel Dilution with Steam on Gas Turbine Combustor Performance / Y. Lei, Y. Cui, G. Xu, Ch. Nie, W. Huang // Proceedings of ASME Turbo Expo 2007. – Montreal, Canada. May 14-17, 2007 (GT2007-27681). – 6 p.

6. CFD Simulations for the Development of Gas Turbine Low-Nox Hydrogen Combustor / J. Riccardi, P. Gheri, G. Giorgiani, M. Schiavetti, G. Gigliucci // Proceedings of WHEC 16, 2006. – 9 p.

7. Fuel Flexibility Test Campaign On a GE10 Gas Turbine: Experimental And Numerical Results / A. Andreini, B. Facchini, L. Mangani, S. Cocchi, R. Modi // Proceedings of ASME Turbo Expo 2006. – Barcelona, Spain. May 8-11, 2006 (GT2006-90510). – 12 p.

8.  $\text{NO}_x$  Emissions Reduction in an Innovative Industrial Gas Turbine Combustor (GE10 Machine): A Numerical Study Of the Benefits Of a New Pilot-System On Flame Structure And Emissions / A. Andreini, B. Facchini, L. Mangani, A. Asti, G. Ceccherini, R. Modi // Proceedings of ASME Turbo Expo 2005. – Reno-Tahoe, Nevada, USA. June 6-9, 2005 (GT2005-68364). – 13 p.

9. Goldin G.M. CFD Predictions and Field Measurements of  $\text{NO}_x$  Emissions From LM1600 Gas Turbine During Part Load Operation / G.R. Price, K.K. Botros, G.M. Goldin // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2002. – Vol. 124, no. 2 (April). – P. 276-283.

10. Riccio G. Numerical investigations of gas turbine combustion chamber Hydrogen fired / G. Riccio, A. Marini, F. Martelli // ISABE-2009. – 12 p.

11. CFD simulation of a microturbine annular combustion chamber fuelled with methane and biomass pyrolysis syngas – Preliminary results / Francesco Fantozzi, Michele Bianchi, Michele Pinelli, Paolo Laranci, Andrea De Pascale, Margherita Cadorin // Proceedings of GT2009 ASME Turbo Expo 2009. – Orlando, Florida, USA. June 8-12, 2009 (GT2009-60030).

12. Оран Э. Численное моделирование реаги-

рующих потоков / Э. Оран, Дж. Борис. – М.: Мир, 1990. – 663 с.

13. Mongia H.C. A Synopsis of Gas Turbine Combustor Design Methodology Evolution of Last 25 Years / H.C. Mongia // XV ISABE. – Bangalore, India. – 2001 (September 3-7; ISABE-2001-1086). – 19 p.

14. Варнатц Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл; пер. с англ. Г.Л. Агафонова; под ред. П.А. Власова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.

Поступила в редакцию 30.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАСОБАМИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ АЕРОГІДРОДИНАМІКИ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТА ГАЗОТУРБІННИМИ ДВИГУНАМИ (ОГЛЯД)

*А.О. Конопленко, В.Є. Костюк, В.М. Гусєв*

Виконано аналіз точності числових оцінок викидів оксидів азоту газотурбінними двигунами, досягнутої різними авторами в дослідженнях засобами обчислювальної аерогідродинаміки, виконаних у період 2004 – 2009 рр. Встановлено, що цільові показники точності, сформульовані Н. Mongia у 2001 р., не досягнуті в жодному з виконаних розрахунків. Виявлена залежність точності числових оцінок викидів оксидів азоту від фізико-математичної постановки розв'язуваних задач, зокрема, від розділення розрахункових сіток і кінетичних моделей окислення палива.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, камера згоряння, оксиди азоту, числове моделювання, точність числових оцінок.

### ACCURACY ANALYSIS OF GAS TURBINE ENGINE NITROGEN OXIDES EMISSION PREDICTION BY CFD METHODS (REVIEW)

*A.A. Konoplenko, V.Ye. Kostyuk, V.N. Gusev*

The accuracy analysis of gas turbine engine nitrogen oxides emission numerical evaluations attained by different authors with the help of CFD methods in researches realized at 2004 – 2009 is performed. It was ascertained that goal accuracy indices formulated by H. Mongia at 2001 were not attained in any performed calculation. The nitrogen oxides emission numerical evaluations accuracy dependence on solved problems physico-mathematical definition, particularly on computational grids resolution and fuel oxidation kinetic models, is ascertained.

**Key words:** gas turbine engine, combustor, nitrogen oxides, numerical simulation, numerical evaluations accuracy.

**Конопленко Анатолий Александрович** – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей и энергетических установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

**Костюк Владимир Евгеньевич** – канд. техн. наук, с.н.с., ведущий научный сотрудник кафедры конструкции авиационных двигателей и энергетических установок Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

**Гусєв Владимир Николаевич** – начальник отдела камер сгорания Государственного предприятия «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» имени академика А.Г. Ивченко, Украина, 03503@ivchenko-progress.com.