

УДК 621.43.056

С.И. СЕРБИН, А.Б. МОСТИПАНЕНКО

<sup>1</sup>Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА  
В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ТИПА «ВОДОЛЕЙ»**

Рассмотрены вопросы моделирования загрязняющих веществ в камере сгорания стационарной ГТУ, работающей на газообразном топливе. Проанализированы механизмы образования оксидов азота с учетом впрыска экологического и энергетического водяного пара.

**камера сгорания, моделирование, газотурбинный двигатель, оксиды азота, горение, моделирование**

**Введение**

Проблема снижения выбросов оксидов азота в камерах сгорания газотурбинных установок (ГТУ) становится все более актуальной в связи с ужесточением экологических законодательств многих стран.

В настоящее время в Украине нормы выбросов оксидов азота для стационарных газотурбинных двигателей (ГТД) устанавливаются по ГОСТ 29328-92 и составляют  $50 \text{ мг/м}^3$  для установок, работающих на газообразном топливе, и  $100 \text{ мг/м}^3$  – на жидком [1]. Соответствие этим нормам обеспечивает конкурентоспособность отечественных ГТД как на внутреннем, так и на международном рынке.

**Формулирование проблемы.** Оксиды азота состоят из ряда химических соединений, таких как  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ . Их концентрации в выхлопных газах ГТД приводятся к обобщенной концентрации  $\text{NO}_x$ , которая и нормируется ГОСТом.

Прогнозирование уровней выбросов оксидов азота на стадии проектирования позволяет существенно сократить время на изготовление и доводку принципиально новых малотоксичных конструкций камер сгорания ГТД.

Уровень развития современного программного обеспечения позволяет формулировать подобные задачи даже в инженерной постановке, но для их

количественного решения необходимо более глубокое изучение механизмов образования соединений азота и их влияния на общий уровень эмиссии вредных веществ с целью идентификации математических моделей расчета пространственных потоков с химическими реакциями. В настоящее время подобные модели разрабатываются рядом исследователей [2 – 5], однако их внедрение в практику проектирования камер сгорания ГТУ сдерживается целым рядом факторов. Среди них выделим неоднозначность самих моделей образования токсичных веществ, зависимость их от конкретных особенностей организации процессов горения, сложность учета промежуточных реакций химического взаимодействия топлива с окислителем, неустойчивость численных методов решения уравнений.

**Целью работы** является идентификация моделей образования оксидов азота в камере сгорания энергетической газотурбинной установки с впрыском водяного пара и их апробация в условиях трехмерной задачи расчета пространственного потока с химическими реакциями.

**1. Математическая модель образования оксидов азота в камере сгорания**

При математическом моделировании процессов в камерах сгорания ГТУ необходимо решать сле-

дующие основные дифференциальные уравнения: сохранения количества движения, переноса характеристик турбулентности и химических компонентов реагирующей смеси, а также сохранения энергии.

Для нахождения концентрации оксидов азота дополнительно необходимо решать уравнение массового переноса, учитывающее конвекцию, диффузию, а также образование и разложение NO и родственных соединений. Для термических и быстрых оксидов азота возможно использовать только уравнение переноса для NO, записанное в векторной форме [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO},$$

где  $\rho$  – плотность оксида азота;

$Y_{NO}$  – массовая концентрация NO ;

$D$  – коэффициент диффузии;

$\vec{u}$  – вектор скорости;

$S_{NO}$  – источниковый член, определяемый в зависимости от механизма образования NO.

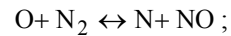
В данной работе использован постпроцессорный метод моделирования оксидов азота, реализованный в программном комплексе Fluent. Основной его особенностью является предположение о том, что формирование оксидов азота не влияет ни на гидродинамическую структуру течения рабочего тела, ни на температурное поле в камере сгорания. Таким образом, решив все вышеуказанные уравнения, можно получить необходимые исходные данные для прогнозирования концентраций оксидов азота. Однако от количественного соответствия расчетных и экспериментальных данных, в особенности распределения температур по сечениям камеры, зависит и точность результатов моделирования  $NO_x$ .

## 2. Механизмы образования оксидов азота в камере сгорания, используемые при моделировании

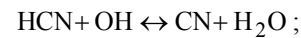
В общем виде в турбулентных пламенах различают четыре механизма образования оксидов азота

[2, 3]. Во-первых, это термические оксиды, которые образуются вследствие окисления атмосферного азота при высоких температурах. Во-вторых, быстрые оксиды азота, получаемые в результате высокоскоростных химических реакций, протекающих во фронте пламени. В третьих, образование оксидов азота через промежуточное соединение  $N_2O$ . И, наконец, топливные оксиды азота, которые образуются из азота, содержащегося в топливе.

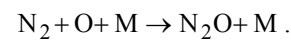
Термический механизм был предложен Я.Б. Зельдовичем [4]. Им было доказано, что образование оксидов азота не связано непосредственно с реакцией горения, а идет через диссоциацию молекулярного кислорода при температурах выше 1800К. Данный механизм состоит из следующих элементарных реакций:



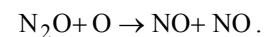
Механизм быстрого образования NO предложен Фенимором по результатам измерений концентрации NO над плоским углеводородным пламенем [6]. Действительный механизм образования оксидов азота во фронте пламени более сложный, поскольку в нем участвуют углеводородные радикалы CH:



Механизм образования NO из закиси азота  $N_2O$  аналогичен термическому механизму, в котором атом кислорода O реагирует с молекулой азота. Однако в присутствии третьей частицы M в этой реакции образуется также молекула  $N_2O$  (впервые эта реакция была предложена в работе [7]):



Молекула  $N_2O$  может затем прореагировать с атомом кислорода O и образовать NO:



Превращение топливного азота, который иногда называется топливно-связанным азотом, в NO наблюдается главным образом при горении твердых топлив. Для энергетических ГТУ, используемых на большинстве тепловых станций, в качестве топлива, как правило, используют природный газ. Содержание азота в газообразном топливе незначительно, поэтому в представленной работе этот механизм не учитывался.

### 3. Результаты численного и натурного экспериментов

Математическая модель использована для исследования рабочего процесса в камере сгорания стационарной ГТУ типа «Водолей» с впрыском экологического и энергетического водяного пара [8] для девяти ее режимов (табл. 1).

Особенностью камеры сгорания ГТД является раздельная подача топлива и окислителя и впрыск водяного пара в пространство жаровой трубы. Одна часть пара (экологический) подводится непосредственной в зону горения, а другая (энергетический) - разбавляет продукты сгорания. Соотношения расходов экологического и энергетического пара варьировались согласно данным табл. 1.

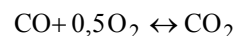
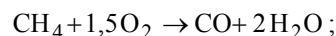
Таблица 1

Соотношения расходов экологического и энергетического пара

Режим	Мощность	Расход экологического пара, кг/с	Расход энергетического пара, кг/с
1	$0,250 \bar{N}_e$	0	0
2	$0,265 \bar{N}_e$	0	2,131
3	$0,425 \bar{N}_e$	0	2,869
4	$0,488 \bar{N}_e$	0	3,142
5	$0,487 \bar{N}_e$	0,558	2,567
6	$0,589 \bar{N}_e$	0,703	2,819
7	$0,740 \bar{N}_e$	0,828	3,153
8	$0,866 \bar{N}_e$	0,858	3,564
9	$0,868 \bar{N}_e$	0,774	3,606

Расчетная сетка состояла из 3,8 млн. тетраэдральных элементов. При моделировании образования оксидов азота учитывались три основных механизма, рассмотренные выше.

Для расчета рабочих процессов в камере сгорания ГТД использовалась простейшая двухстадийная реакция окисления метана



совместно с RNG разновидностью  $k-\varepsilon$ -модели турбулентности [9], которая в условиях анизотропности потоков зарекомендовала себя значительно лучше [10] по сравнению со стандартной  $k-\varepsilon$ -моделью.

На рис. 1 приведены графические зависимости экспериментальных (полученных в НПКГ «Зоря»-«Машпроект») и расчетных концентраций оксида азота от относительной мощности ГТД  $\bar{N}_e$ . Видно, что подвод энергетического пара незначительно влияет на выбросы NO, тогда как впрыск экологического пара в зону горения существенно снизит эмиссию. На режимах, близких к номинальному, выбросы оксидов азота не превышают 35 ppm. Отметим хорошую корреляцию экспериментальных и расчетных данных.

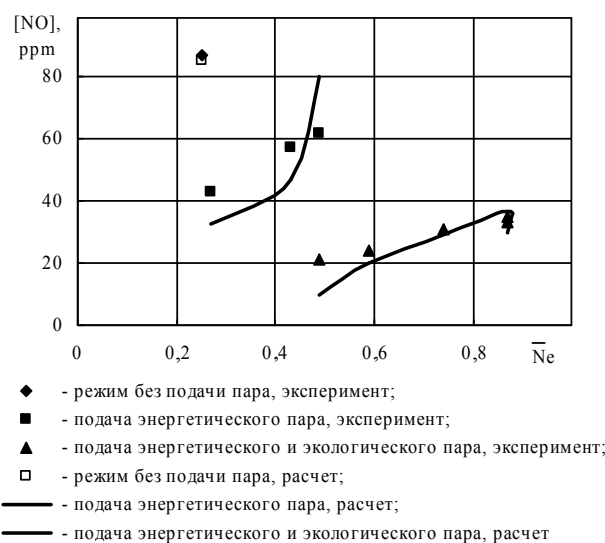


Рис. 1. Зависимости концентраций оксидов азота на выхлопе камеры сгорания

Без подачи водяного пара (рис. 2, а) распределение концентраций оксидов азота в объеме жаровой трубы достаточно равномерное. Подача энергетического пара (рис. 2, б) вызывает значительные неоднородности температур в сечениях камеры (вследствие неравномерности его раздачи по радиальным отверстиям) и, как следствие, – существенные градиенты концентраций NO. Впрыск экологического пара (рис. 2, в) смещает зону активного образования оксидов азота и уменьшает их суммарные выбросы в 2 – 2,5 раза.

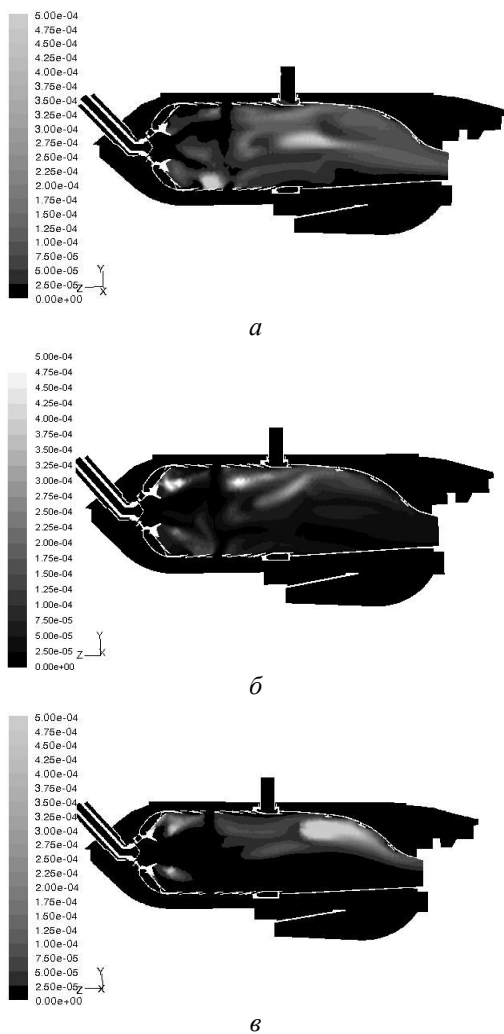


Рис. 2. Распределение мольных долей NO:  
а – режим 1; б – режим 3; в – режим 7

Определено влияние каждого из трех рассмотренных выше механизмов на скорость образования оксидов азота  $W_{NO}$ . Выяснено, что в условиях камеры сгорания с подводом водяного пара скорость

$W_{NO}$  согласно термическому механизму на порядок выше ее значения согласно механизму получения оксидов азота через  $N_2O$ . Наименьший вклад в суммарную эмиссию оксидов азота вносит схема быстрого образования NO.

Экологический пар, подаваемый в зону горения, снижает температуру смеси, тем самым, препятствуя образованию термических оксидов азота. Эта тенденция четко прослеживается на рис. 3, где участки активного образования термических оксидов азота (с большей скоростью  $W_{NO}$ ) при подаче экологического пара перераспределяются между зонами горения и смешения.

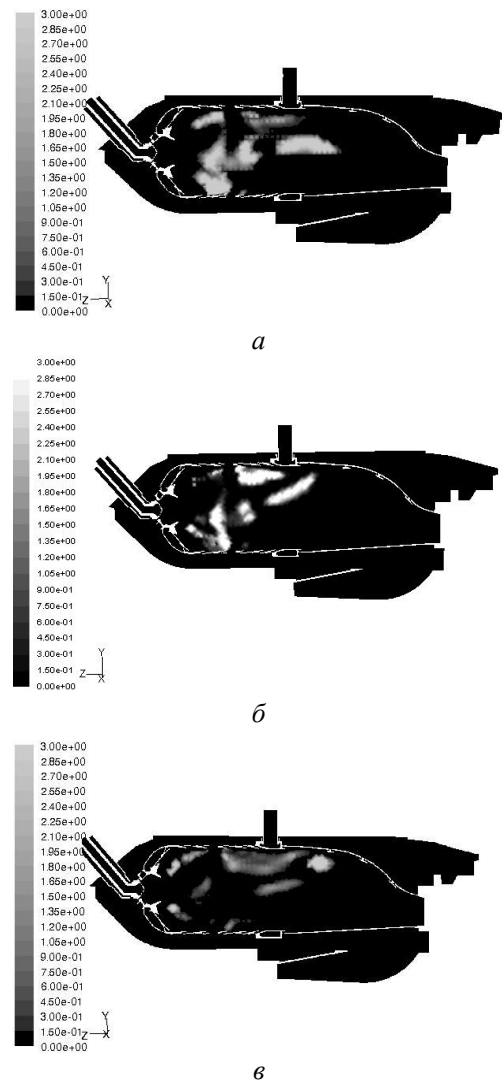


Рис. 3. Скорость образования термических оксидов азота, кмоль/(м<sup>3</sup>·с):  
а – режим 1; б – режим 3; в – режим 7

## Заключение

Результаты трехмерного моделирования достаточно хорошо соотносятся с экспериментальными данными, что позволяет применять предложенный метод при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей с впрыском пара.

Определены основные локальные участки интенсивного образования оксидов азота в жаровой трубе без подачи и с подачей экологического и энергетического пара.

Наибольший вклад в образование оксидов азота вносит термический механизм. Уменьшение температуры в зоне горения путем впрыска экологического пара существенно снижает выбросы  $\text{NO}_x$ .

Существуют возможности дальнейшего снижения эмиссии оксидов азота путем перераспределения потоков энергетического пара и вторичного воздуха в зоне смешения.

## Литература

1. ГОСТ 29328-92. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. – ОКП 311121.
2. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ: Пер. с англ. – И.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
3. Романовський Г.Ф., Сербін С.І. Камери згорання суднових газотурбінних двигунів: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2000. – 259 с.

4. Correa S.M. A review of  $\text{NO}_x$  formation under gas-turbine combustion conditions // Comb. Sci. Technol., 1992.

5. Dupont V., Porkashanian M., Williams A., and Woolley R. Reduction of  $\text{NO}_x$  formation in natural gas burner flames // Fuel, April 1993.

6. Fenimore C.P. Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases // 17<sup>th</sup> Symp. (Int.) Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, 1979.

7. Wolfram J. Bildung von Stickstoffoxiden bei der Verbrennung // Chemie-Ingenieur-Technik, 1972.

8. Опыт эксплуатации газотурбинной установки ГПУ-16К с впрыском пара / Ю.Н. Бондин, В.А. Кривуца, С.Н. Мовчан и др. // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 5. – С. 18-20.

9. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. – London: Academic Press, 1972. – 310 p.

10. Сербин С.И., Мостипаненко А.Б., Вилкул В.В. Исследование структуры течения во фронтовом устройстве камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Национальный аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2005. – № 8/24. – С. 146-149.

*Поступила в редакцию 19.05.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Г.Ф. Романовский, Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев.