

УДК 544.431.53

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ РАБОТЕ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ НА СИНТЕЗ-ГАЗЕ

**У. В. Жижина<sup>1</sup>, Я. О. Морозов<sup>2</sup>, Ю. А. Каграманов<sup>3</sup>,  
С. А. Грицук<sup>4</sup>, В. Г. Тупоногов<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> uly-zhh@mail.ru

**Аннотация.** В настоящей работе был применен новый метод оценки концентраций оксидов азота при горении синтез-газа в камере сгорания газовой турбины, который позволил связать полный детальный механизм массива параллельных реакций Grimech 3.0 с уравнениями компьютерной гидродинамики. Проведены верификационные расчеты на модельной камере сгорания газовой турбины в интервале значений коэффициента избытка топлива 0,5–2. Новая методика была применена при определении выбросов оксида азота и максимальной температуры стенки пламенной трубы промышленной камеры сгорания.

**Ключевые слова:** синтез-газ, газовая турбина, оксиды азота, ANSYS

## SIMULATION OF NITROGEN OXIDE FORMATION DURING SYNGAS GAS TURBINE OPERATION

**U. V. Zhizhina<sup>1</sup>, I. O. Morozov<sup>2</sup>, Y. A. Kagramanov<sup>3</sup>,  
S. A. Gritsuk<sup>4</sup>, V. G. Tuponogov<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3,4,5</sup> Ural Federal University named after the First  
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> uly-zhh@mail.ru

**Abstract.** In this paper, we applied a new method for estimating the concentrations of nitrogen oxides during combustion of synthesis gas in the combustion chamber of a gas turbine. It allowed us to link the complete detailed mechanism of the Grimech 3.0 parallel reaction array with the equations of computer hydrodynam-

ics. Verification calculations were carried out on a model combustion chamber of a gas turbine in the range of values of the fuel excess factor of 0,5–2. The new method was used to determine nitrogen oxide emissions and the maximum temperature of the flame tube wall of an industrial combustion chamber.

**Keywords:** synthesis gas, gas turbine, nitrogen oxides, ANSYS

**Введение.** Технологии парогазовых циклов с внутрицикловой газификацией твердого топлива, по мнению многих специалистов [1; 2], могут составить конкуренцию традиционным системам генерации электроэнергии; в последнее время такие технологии активно развиваются. Одной из проблем при проектировании газовой турбины, входящей в состав парогазовой установки (ПГУ) является оценка выбросов оксидов азота. В настоящее время не существует единой методики расчета выбросов, ввиду сложности процесса образования оксидов. В рассматриваемом процессе могут реализовываться 11 реакций образования оксидов азота [3]. Для реакций в таблице приведены параметры уравнения Аррениуса: предэкспоненциальный множитель —  $k_0$ , энергии активации —  $E$ .

Таблица

Ключевые реакции процесса образования оксидов азота [3]

Реакция	$k_0$ , моль/(см <sup>3</sup> · с)	$E$ , Дж/моль	Источник
$O + N_2 = NO + N$	$4,5487e + 10$	35991,4	Bose, 1996
$N + O_2 = NO + O$	$6e + 9$	6300,0	Waldman, 1974
$N + OH = NO + H$	$6e + 11$	8000,0	
$N_2O + O = 2NO$	$1e + 14$	28000,0	
$N_2O + H = NH + NO$	$3,87e + 14$	18880,0	Gri 3.0
$N_2O + CO = NCO + NO$	$1,9e + 17$	740,0	
$NO_2 + OH = HO_2 + NO$	$2,11e + 12$	-480,0	
$NO_2 + M = O + M + NO$	$1e + 20$	0,0	
$NO_2 + O = O_2 + NO$	$3,9e + 12$	-240,0	
$NO_2 + H = OH + NO$	$1,32e + 14$	360,0	
$NO_2 + CN = NCO + NO$	$1e - 10$	-171,0	Park, 1993

В настоящей работе разработана новая методика расчета процессов образования оксидов азота в камере сгорания газовой турбины, работающей на угольном синтез-газе. Расчеты выполнены в программных

пакетах компании CHEMKIN, Ergico и Reaction Design, недавно появившихся в составе ANSYS.

**Постановка задачи и методика расчета.** Объемная модель камеры была выстроена в соответствии с известными чертежами изделия [4]. Благодаря функции ANSYSFluent объединения тетраэдральных элементов в более крупные полиэдрические (рис. 1), количество элементов расчетной области было снижено с 900 тыс. до 492 тыс., что сказалось на скорости расчета.

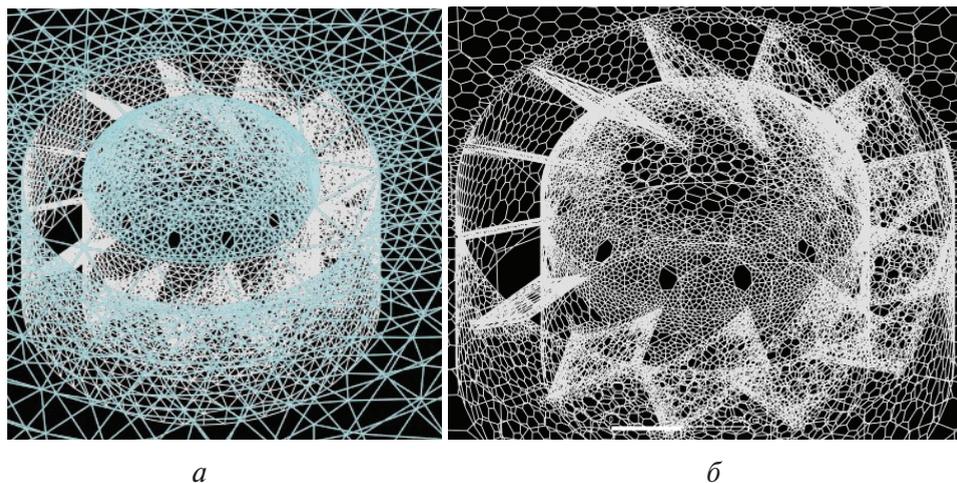


Рис. 1. Преобразование тетраэдральной (*а*) сетки в полиэдрическую (*б*)

Были проведены расчеты при коэффициентах избытка топлива  $\varphi$ , равных 0,5; 1; 1,5; 2. Температура продуктов сгорания на выходе из камеры равнялась 1450 °С. Расход топлива составлял 0,01 кг/с. Состав топлива:  $\text{H}_2 : \text{CO} : \text{H}_2\text{O} : \text{CO}_2 : \text{N}_2 = 0,26 : 0,56 : 0,06 : 0,03 : 0,09$  («модельный синтез-газ» кислородной газификации угля [5]).

**Результаты.** Расчеты показали отличие от экспериментальных данных [4] на 2,5–10 % (рис. 2). Максимальное расхождение результатов CHEMKIN и опытных данных при коэффициенте избытка топлива  $\varphi = 1$  уменьшилось на 20 % по сравнению с расчетными данными CFX [5].

Были выполнены расчеты выбросов оксидов азота и монооксида углерода в камере сгорания турбины ГТ-100–750 КСВД. В качестве топливного газа были использованы угольные синтез-газы различного состава и типа газификации, а также природный газ.

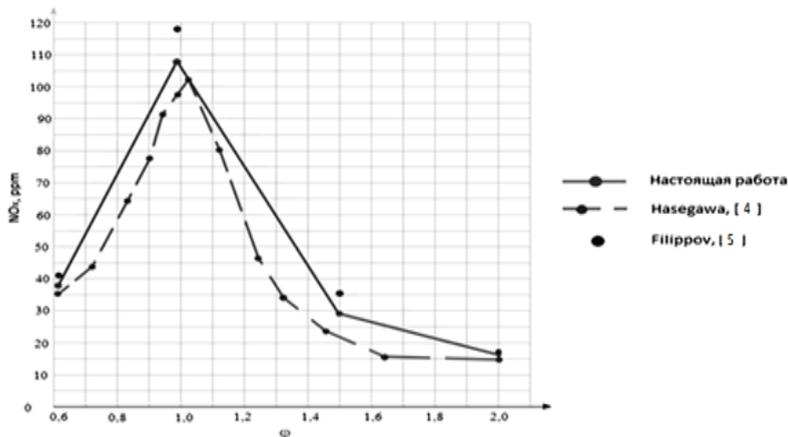


Рис. 2. Сравнение методик оценки выбросов азота

Наилучшие результаты по выбросам оксидов азота показал состав газа GE. Самыми проблемными газами являются синтез-газы Polk Power и Техасо (кислородный процесс). Близкими к GE являются синтез-газы, полученные в ходе KRW и Техасо воздушной газификации. Выбросы монооксида углерода оказались максимальными при сжигании природного газа, минимальными при сжигании синтез-газа Техасо (воздушный процесс).

Несмотря на значительную разницу значений низшей теплоты сгорания природного газа и синтез-газов, расчетные максимальные температуры стенок имеют близкие значения. Это связано с неравномерностью распределения поля температур по длине камеры.

Варьирование температуры топлива слабо влияет на выбросы оксидов азота и монооксида углерода, при этом наблюдается нелинейная зависимость изменения максимальной температуры стенки, которая достигается при температуре топлива, близкой к 500 °С.

С увеличением температуры воздушного дутья монотонно возрастает максимальная температура стенок, а выбросы оксидов азота и монооксида углерода сокращаются на полпорядка.

**Заключение.** В работе была протестирована новая методика расчета параллельных гомогенных реакций образования оксидов азота в камере сгорания газовой турбины при совместном применении ANSYS Fluent и CHEMKIN-Pro. Результаты расчетов показали, что при неизменной скорости расчета точность возросла на 20 % по сравнению с расчетами в CFX.

### Список источников

1. Giuffrida A., Romano M. C., Lozza, G. Thermodynamic Analysis of Air-Blown Gasification for IGCC Applications // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. P. 3949–3958.
2. Ryzhkov A. Technological solutions for an advanced IGCC plant [Electronic resource] // *Fuel*. 2018. Vol. 214. P. 63–72. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.10.099 (date of access: 11.11.2020).
3. Eun-Seong Cho. Numerical Evaluation of NO<sub>x</sub> Mechanisms in Methane-Air Counter Flow Premixed Flames [Electronic resource] // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2009. Vol. 23, № 3. P. 659–666. DOI: 10.1007/s12206-008-1222-y (date of access: 11.11.2020).
4. Hasegawa T. Gas Turbine Combustion Technology Reducing Both Fuel-NO<sub>x</sub> and Thermal-NO<sub>x</sub> Emissions for Oxygen-Blown IGCC With-Hot/Dry Synthetic Gas Cleanup [Electronic resource] // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007. Vol. 129, № 2. P. 358–369. DOI: 10.1115/1.2432896 (date of access: 11.11.2020).
5. Filippov P., Khudyakov P., Ryzhkov A. F. Validation of the thermal NO<sub>x</sub> emissions model from a gas fuel combustor under atmospheric pressure [Electronic resource] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 899, № 9. P. 1–5. DOI: 10.1088/1742–6596/899/9/092005 (date of access: 11.11.2020).