

УДК 621.43.056

**С. И. СЕРБИН**, д-р техн. наук, проф.; директор Машиностроительного института НУК им. адм. Макарова, Николаев;  
**Н. А. ГОНЧАРОВА**, аспирантка НУК им. адм. Макарова, Николаев

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД С ПРИМЕНЕНИЕМ RQL-ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ СИНТЕТИЧЕСКОГО ГАЗА**

Статья посвящена вопросам численного моделирования рабочих процессов камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на альтернативном топливе. Исследованы вопросы возможности применения RQL-технологии сжигания синтетического топлива и необходимости введения конструктивных модификаций топливосжигающих устройств с целью улучшения экологических характеристик существующих камер сгорания. Концепция RQL камеры сгорания представлена в качестве стратегии по снижению выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) газотурбинных двигателей. Концепция отличается высокой стабильностью сгорания за счет богатой первичной зоны.

**Ключевые слова:** камера сгорания, синтетическое топливо, RQL-технология, математическое моделирование, горение.

#### **Введение**

При применении синтетических топлив в камерах сгорания ГТД по сравнению с двигателями, работающих на традиционном топливе, возможно увеличение выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ). Это связано с тем, что при содержании в воздухе 78 % азота и 21 % кислорода вместе с основными реакциями окисления:  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$  при определенных условиях в зоне горения последовательно активируются две параллельные реакции:  $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{N} + 2\text{O} \rightarrow 2\text{NO}$  – с последующим образованием других оксидов азота –  $\text{NO}_x$  [1–2]. Это вызывает необходимость организации мероприятий по уменьшению уровня вредных выбросов. Одним из вариантов снижения количества оксидов азота в уходящих газах является применение технологии RQL (*Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn Combustor*), то есть, горение богатой смеси, быстрое смешение и горение бедной смеси [3].

Суть данной схемы заключается в быстром разбавлении богатой топливовоздушной смеси (коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 0,5..0,7$ ) большим количеством воздуха. Подача относительно холодного воздуха приводит к понижению температуры пламени за счет его смешения с горячей топливовоздушной смесью и её обеднению.

#### **Цель исследования, постановка задачи**

В качестве исследуемого объекта выбрана камера сгорания энергетического газотурбинного двигателя мощностью 2,5 МВт [4]. Данный двигатель, по сравнению с аналогами, имеет следующие преимущества: высокую экономичность и ремонтпригодность, одновальную схему, возможность работы на различных видах топлива (природный, попутный нефтяной и пиролизный газ, дизельное топливо, биотопливо). Камера сгорания – индивидуальная, двухтрубная, противоточная.

Проведенные предварительные расчеты рабочих процессов в камере сгорания показали, что при её работе на синтетическом топливе наблюдается увеличение количества оксидов азота по сравнению с работой на традиционном топливе. Также определено, что применение RQL-технологии сжигания синтетического топлива требует конструктивной модификации камеры с целью эффективного снижения уровня  $\text{NO}_x$  в уходящих газах.

---

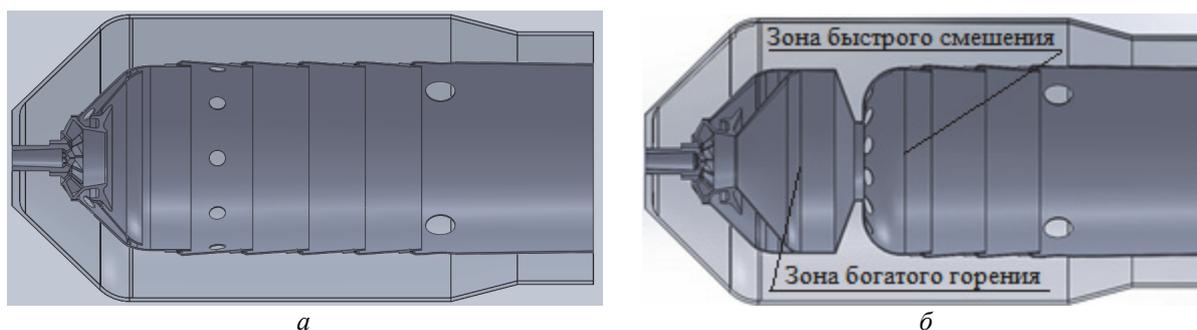
© С.И. Сербин, Н.А. Гончарова, 2014

Проведена серія трьохмерних розрахунків робочих процесів 1/2 частини камери згорання двигачеля з примєненнєм *RQL*-схєми зжигання синтетичєского топлїва с цєлю опрєдєленнєя нєобхєдїмїх конструктивних рєшєннєй длє улучшєннєя єє єкологїчєских характерїстик.

**Рєзулътатї исьлєдованнєя**

С цєлю унїфїкацїи сохрєненї конструкцїя корпуса камери згорання и габарїтнєе рєзєрї жарової труби. Отлїчїтєльної особєннєстью рєзєрєвувємої камери згорання явлєєтєя вїповнєннє обєчєйкї жарової труби в зонє горєннєя богатої топлївовоздушнїої смєси с сужєннєм на вїхєдє. Даннєе рєшєннє позвєлєєт їзбєжєтє подсоса вєздуха в єту зону чєрєз отвєрстїя жарової труби, рєспєлєжєннєє в зонє бїстрого смєшєннєя. Ізмєнєннє площєдєй прохєднїх сєчєннєй обєчєак при пєрєхєдє из зонї горєннєя богатої смєси в зону бїстрого смєшєннєя доплнїтєльно спєсобствєует торможєннєю потєка и, кєк слєдствєє, бєлєє качєствєннєму пєрємєшїваннєю топлївовоздушнїої смєси с холєднїм окїслїтєлєм, чєо блєгєтвєрно сказївєєтєя на кєлїчєствє окїсїа углєрєдєа в ухєдєящїх газєх.

С пємєщєю сїстємї автєматїзїрєваннєго прєєктїрєваннєя *SolidWorks* бїлї пєстрєєнї базовєє и модїфїцїрєваннєє трєхмєрнєє пєрємєтрїчєскїє цїфрєвєє мєдєлї 1/2 частїнї камери згорання двїгачєлєя (см. рїс. 1).



Рїс. 1 – Трєхмєрнєє мєдєлї камери згорання: а – базовєє мєдєлї; б – модїфїцїрєваннєє мєдєлї

В рєсчєтєх горєннєя синтєз-газа прїнята мнєгоступєнчатєє кїнєтїчєскєє схєма, вкљєчєяющєє в сєбє трїдцєтє пєтє хїмїчєскїх рєакцїй [5] (см. табл. 1)

Кїнєтїчєскєє схєма горєннєя синтєз-газа

Таблїца 1

|                                        |                                         |                                        |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| $H + O_2 \rightarrow OH + O;$          | $OH + O \rightarrow H + O_2;$           | $O + H_2 \rightarrow OH + H;$          |
| $OH + H \rightarrow O + H_2;$          | $OH + H_2 \rightarrow H_2O + H;$        | $H_2O + H \rightarrow OH + H_2;$       |
| $OH + OH \rightarrow H_2O + O;$        | $H_2O + O \rightarrow OH + OH;$         | $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M;$    |
| $HO_2 + H \rightarrow OH + OH;$        | $HO_2 + H \rightarrow H_2 + O_2;$       | $HO_2 + OH \rightarrow H_2O + O_2;$    |
| $CO + OH \rightarrow CO_2 + H;$        | $CO_2 + H \rightarrow CO + OH;$         | $CH_4(+M) \rightarrow CH_3 + H(+M);$   |
| $CH_3 + H(+M) \rightarrow CH_4(+M);$   | $CH_4 + H \rightarrow CH_3 + H_2;$      | $CH_3 + H_2 \rightarrow CH_4 + H;$     |
| $CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O;$   | $CH_3 + H_2O \rightarrow CH_4 + OH;$    | $CH_3 + O \rightarrow CH_2O + H;$      |
| $CH_2O + H \rightarrow HCO + H_2;$     | $CH_2O + OH \rightarrow HCO + H_2O;$    | $HCO + H \rightarrow CO + H_2;$        |
| $HCO + M \rightarrow CO + H + M;$      | $CH_3 + O_2 \rightarrow CH_3O + O;$     | $CH_3O + H \rightarrow CH_2O + H_2;$   |
| $CH_3O + M \rightarrow CH_2O + H + M;$ | $HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2;$ | $H_2O_2 + M \rightarrow OH + OH + M;$  |
| $OH + OH + M \rightarrow H_2O_2 + M;$  | $H_2O_2 + OH \rightarrow H_2O + HO_2;$  | $H_2O + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + OH;$ |
| $H + OH + M \rightarrow H_2O + M;$     | $H + H + M \rightarrow H_2 + M;$        |                                        |

В расчетах применялся синтез-газ с низкой теплотворной способностью 21791 кДж/кг следующего состава (об.): CO = 15,09 %; H<sub>2</sub> = 50,63 %; CH<sub>4</sub> = 19,08 %; CO<sub>2</sub> = 12,59 %; N<sub>2</sub> = 2,61 %.

С помощью применения методов вычислительной гидродинамики (CFD) [6, 7] были исследованы процессы сжигания топлива в конструкциях с различными значениями выходного диаметра обечайки в зоне богатого горения ( $d_1$ ), отнесенными к значению выходного диаметра соответствующей обечайки базовой конструкции ( $d_0$ ). Полученные данные расчетов приведены в табл. 2 и на рис. 2–3.

Таблица 2

Результаты расчетов рабочих процессов в камере сгорания

| Параметр                       | Базовая модель (традиционная схема горения) | Модификация 1 (RQL-схема горения) | Модификация 2 (RQL-схема горения) | Модификация 3 (RQL-схема горения) |
|--------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| $d_1/d_0$                      | 1                                           | 1                                 | 0,89                              | 0,43                              |
| Температура на выходе из КС, К | 1167,4                                      | 1194,2                            | 1192,3                            | 1190,9                            |
| Мольная доля NO на выходе, ppm | 94,0                                        | 144,3                             | 109,1                             | 28,9                              |

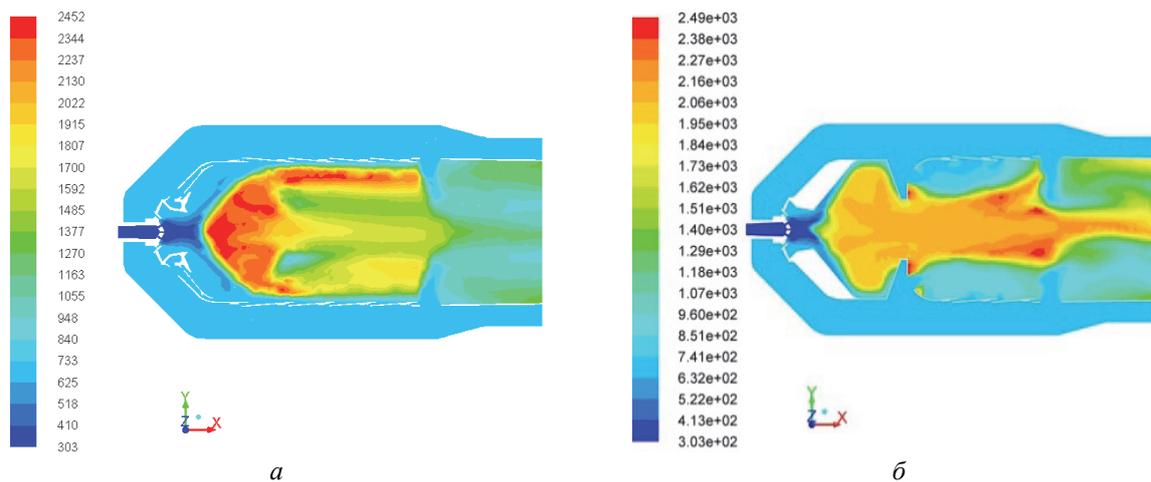


Рис. 2 – Контуры температуры (К) в продольных сечениях камеры сгорания: а – базовая конструкция; б – модификация 3

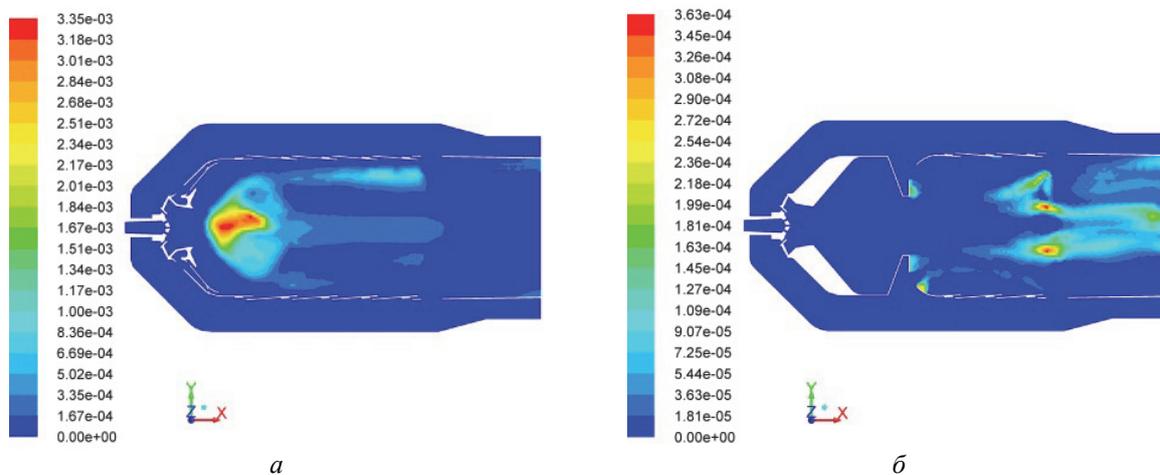


Рис. 3 – Распределение массовых долей NO в продольных сечениях камеры сгорания: а – базовая конструкция; б – модификация 3

При этом, в сравнении с базовой конструкцией, мольная доля  $\text{CO}$  на выходе из камеры сгорания в модификациях 1 и 2 уменьшилась на 68,5 % и 38,2 % соответственно, а в модификации 3 – увеличилась на 9,4 %. По данным трехмерных *CFD*-расчетов построена зависимость мольной доли оксида азота  $\text{NO}$  на выходе из камеры сгорания от степени сужения обечайки (см. рис. 4).

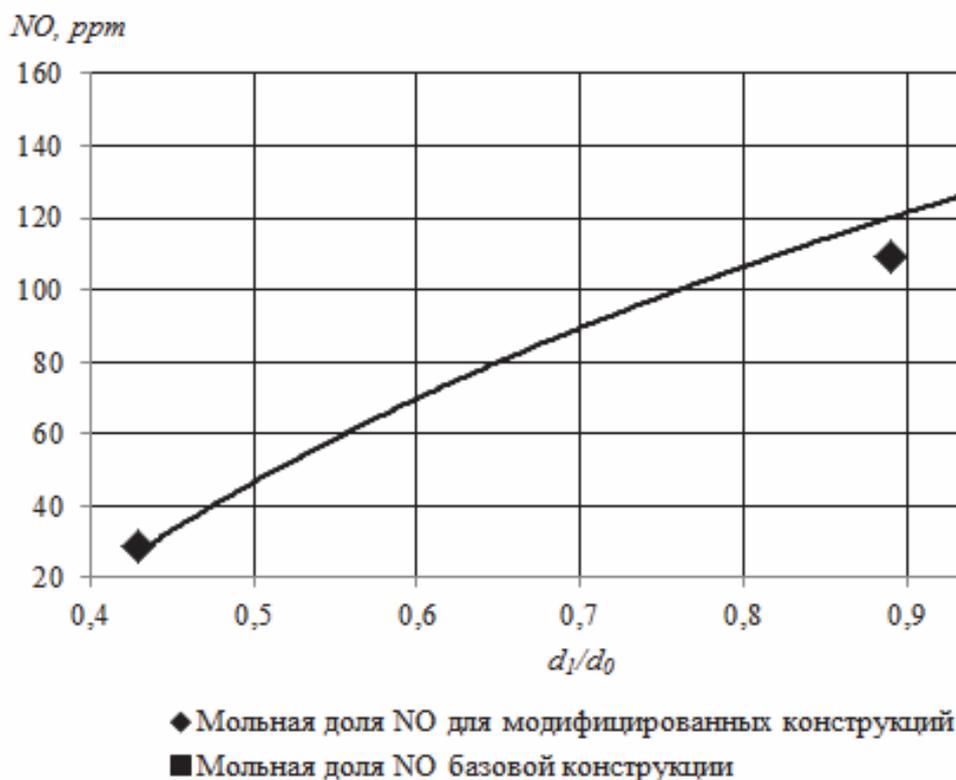


Рис. 4 – Эмиссия оксидов азота в выходном сечении камеры сгорания

### Выводы

1) Установлено, что при работе базовой конструкции камеры сгорания на синтетическом топливе заданного состава расчетная мольная доля  $\text{NO}$  на выходе составляет 94 ppm. Переход к *RQL*-схеме горения синтетического топлива за счет простого перераспределения количества воздуха обеспечил более высокую полноту сгорания топлива, однако привел к увеличению выбросов оксидов азота.

2) С целью улучшения экологических характеристик камеры были предложены минимальные конструктивные изменения камеры. Установлено, что выполнение сужения выходного сечения обечайки жаровой трубы в зоне богатого горения позволяет минимизировать выбросы оксидов азота.

3) Расчеты показывают, что рекомендуемый интервал отношения выходного диаметра данной обечайки ( $d_1$ ) к значению соответствующего диаметра базовой конструкции ( $d_0$ ) составляет 0,4–0,55. При этом наблюдается снижение эмиссии оксида азота  $\text{NO}$  в выходном сечении жаровой трубы на (69–36) % соответственно.

**Список литературы:** 1. Кривопапов, В. В. Образование оксидов азота в камерах сгорания современных ДВС и способы снижения их содержания в отработавших газах [Текст] / В. В. Кривопапов, И. В. Максакова, В. В. Фомин // Вестник ЮУрГУ. – 2012. – № 12. – С. 86–92. 2. Ковецкий, В. М. Газотурбинные двигатели в энергетике. Достижения, особенности, возможности [Текст] /

В. М. Ковецкий, Ю. Ю. Ковецкая. – Киев: Науч. кн., 2008. – 254 с. **3.** Progress in Gas Turbine Performance: Chapter 6. Review of the new combustion technologies in modern gas turbines [Электронный ресурс] / M. Khosravy el Hossaini. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.5772/54403>. – Заголовок з екрану. – ISBN 978-953-51-1166-5. **4.** Романовський, Г. Ф. Сучасні газотурбінні агрегати [Текст]: навч. посібник в 2 т. / Г. Ф. Романовський, С. І. Сербін, В. М. Патлайчук. – Миколаїв: НУК, 2005. — Т. 1: Агрегати виробництва України та Росії. – 344 с., 12 с. іл. **5.** Smooke, M. D. Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames. In Lecture Notes in Physics [Text] / M. D. Smooke // Springer-Verlag, 1991 – Vol. 384. – P. 161. **6.** Serbin, S. I. Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection [Электронный ресурс] / S. I. Serbin, A. Mostipanenکو, I. Matveev // Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. – Honolulu, Hawaii, USA. – March 13 – 17, 2011. – Электрон. дан. (1 файл). – AJTEC2011-44042. – 6 р. – 1 CD-ROM. – Загл. с этикетки диска. **7.** Serbin, S. I. Investigations of the working process in a «Lean-Burn» gas turbine combustor with plasma assistance [Text] / S. I. Serbin, A. Mostipanenکو, I. Matveev // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2011. – Vol. 39, No 12. – P. 3331–3335.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Krivopalov, V. V., I. V. Maksakova and V. V. Fomin. "Образование оксидов азота в камерах сгорания современных ДВС и способы снижения их содержания в отработавших газах." *Vestnik JuUrGU*. No. 12. 2012. 86–92. Print. **2.** Koveckij, V. M., Ju. Ju. Koveckaja. *Gazoturbinnye dvigateli v jenergetike. Dostizhenija, osobennosti, vozmozhnosti*. Kiev: Nauch. kn., 2008. Print. **3.** Khosravy, M., el Hossaini. "Chapter 6. Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines." *Progress in Gas Turbine Performance*. InTech – Open Access Company, 2004. Web. 09 December 2013 <<http://dx.doi.org/10.5772/54403>>. **4.** Romanovs'kyj, G. F., S. I. Serbin and V. M. Patlajchuk. *Suchasni gazoturbinni agregaty. T. 1: Agregaty vyrobnyctva Ukraïny ta Rosii'*. Mykolai'v: NUK, 2005. Print. **5.** Smooke, M. D. "Reduced Kinetic Mechanisms and Asymptotic Approximations for Methane-Air Flames. In Lecture Notes in Physics." *Springer-Verlag* 384 (1991): 161. Print. **6.** Serbin, S. I., A. Mostipanenکو and I. Matveev. "Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection." *Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. March 13-17. Honolulu, Hawaii, USA, 2011*. No. AJTEC2011-44042. CD-ROM. **7.** Serbin, S. I., A. Mostipanenکو and I. Matveev. "Investigations of the working process in a «Lean-Burn» gas turbine combustor with plasma assistance." *IEEE Trans. Plasma Sci.* 39(12) (2011): 3331–3335. Print.

Поступила (received) 14.02.2014