

УДК 621.43.056

**С. И. СЕРБИН**, д-р техн. наук, проф.; директор Машиностроительного института НУК им. адм. Макарова, Николаев;  
**Н. А. ГОНЧАРОВА**, ассистент кафедры турбин НУК им. адм. Макарова, Николаев;  
**В. В. ВИЛКУЛ**, нач. сектора расчетных и экспериментальных работ отдела камер сгорания ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД МОЩНОСТЬЮ 2,5 МВт, РАБОТАЮЩЕЙ НА СИНТЕЗ-ГАЗЕ**

Статья посвящена вопросам численного моделирования рабочих процессов камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на синтез-газе. Авторами исследованы вопросы возможности применения синтез-газов в качестве основного топлива для камер сгорания. Рассмотрены вопросы применения конструктивных модификаций топливосжигающих устройств с целью применения *RQL*-технологии для улучшения экологических характеристик существующих камер сгорания газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** камера сгорания, синтез-газ, *RQL*-технология, математическое моделирование, горение.

#### **Введение**

Одним из перспективных вариантов применения высокочольных углей в энергетике является технология их предварительной газификации с последующим сжиганием получаемого синтез-газа в газотурбинной установке с выработкой электроэнергии и утилизацией теплоты на основных стадиях технологического процесса [1].

Для функционирования технологического комплекса по переработке высокочольных углей в синтез-газ и выработки электроэнергии в цикле ГТУ необходимо исследовать возможности работы существующих газотурбинных камер сгорания на синтез-газах различного состава.

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

В качестве исследуемого объекта выбрана камера сгорания энергетического газотурбинного двигателя мощностью 2,5 МВт [2], обеспечивающего выработку электроэнергии в комплексе по переработке углей.

Расчеты проводились для трех вариантов состава топливного газа. Вариант 1 предусматривал подачу в камеру сгорания метана; результаты его расчетов сравнивались с результатами экспериментальных исследований традиционной камеры сгорания диффузионного типа. Варианты 2 и 3 предполагают подачу в камеру сгорания синтез-газа разного компонентного состава и различной теплотворной способности: вариант 2 – 21791 кДж/кг и вариант 3 – 12448 кДж/кг. Для обеспечения одинаковой тепловой мощности горелочного устройства, соответствующей номинальному режиму ГТД, расходы синтез-газа были увеличены по сравнению с расходом метана пропорционально уменьшению теплотворной способности. Были также увеличены площади проходных сечений горелочного устройства, что обеспечило необходимую скорость истечения синтез-газа из отверстий без срыва факела. На данном этапе, кроме изменений проходных сечений горелочного устройства, конструктивной модернизации камера сгорания не подвергалась.

---

© С.И. Сербин, Н.А. Гончарова, В.В. Вилкул, 2015

### Результаты исследования

В результате проведения трехмерных расчетов с использованием методов вычислительной гидродинамики [3–4] были получены данные о распределении скоростей, температур и концентраций химических компонентов в камере сгорания.

На рис. 1 показано распределение скоростей в камере сгорания. Характерный рост скорости потока на выходе из завихрителя при уменьшении теплотворной способности синтез-газа связан с одновременным увеличением расхода топлива.

Для варианта 3 скорость потока в районе выходного сечения завихрителя достигает величины 120 м/с, тогда как для камеры сгорания, работающей на метане, она находится на рациональном уровне – около 80 м/с. Данная особенность указывает на необходимость изменения площадей проходных сечений в лопаточном завихрителе для достижения расчётных скоростей в зоне горения при модификации традиционной камеры.

Более детально проанализировать характер изменения скоростей рабочего тела можно с использованием рис. 2, где показано распределение осевой компоненты скорости в продольном сечении камеры. Варианты 1 и 2 демонстрируют наличие стабильной симметричной зоны обратных токов, стабилизирующей горение. В варианте 3 (с наименьшей теплотворной способностью синтез-газа) зона обратных токов значительно более размыта, что обуславливает меньшее стабилизирующее действие продуктов сгорания, циркулирующих в ней. Отметим, что для варианта 3 начинается проявляться асимметрия потоков внутри жаровой трубы, что косвенно подтверждает меньшую устойчивость факела горящего топливного газа по сравнению с вариантами 1 и 2.

На рис. 3 показаны контуры температур в жаровой трубе. Со снижением теплотворной способности топливного газа зона горения отдаляется от горелочного устройства и смещается к выходу жаровой трубы. Несимметричность поля температур для варианта 3 с самой низкой теплотворной способностью синтез-газа указывает на нестабильность процессов горения, что потребует в дальнейшем мероприятий по повышению эффективности стабилизации фронта пламени. При этом наличие метана в составе синтез-газа (вариант 2) стабилизирует фронт пламени.

Снижения максимальной температуры в объёме камеры сгорания по мере уменьшения теплотворной способности топливного газа не наблюдается, т.к. в рассмотренной камере реализуется диффузионный принцип горения.

На рис. 4 показано расчётное распределение концентрации оксидов азота в камере сгорания. С уменьшением теплотворной способности синтез-газа и увеличением скорости течения рабочего тела в камере сгорания зона образования  $\text{NO}_x$  сдвигается к выходному сечению. За счёт этого выбросы  $\text{NO}_x$  для варианта 3 с минимальной теплотворной способностью синтез-газа максимальны и составляют около 200 ppm. Выбросы оксидов азота камеры, работающей на синтез-газе, в состав которого входит метан (вариант 2), составили 94 ppm. Расчётные выбросы оксидов азота в камере, работающей на метане (вариант 1) минимальны и составляют 64 ppm.

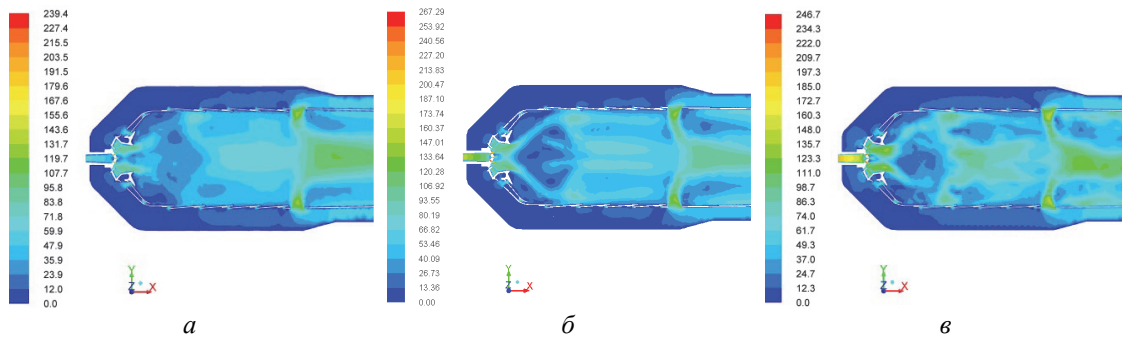


Рис. 1 – Распределение скорости в продольном сечении КС, м/с:  
 а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

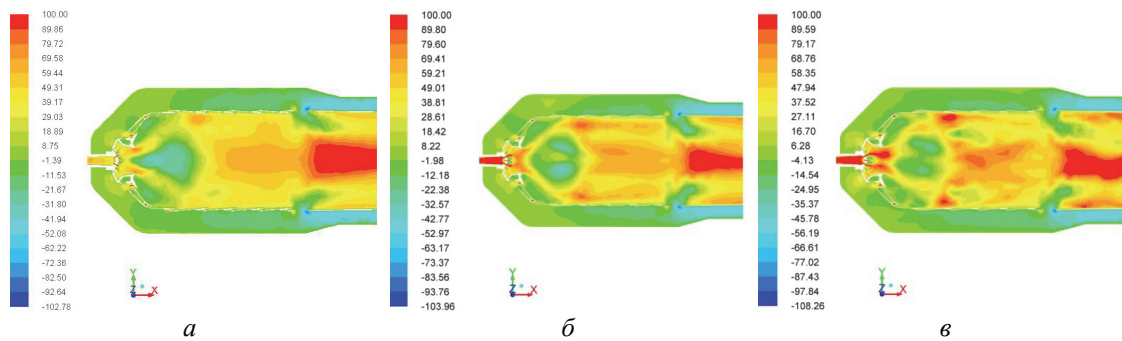


Рис. 2 – Распределение осевой компоненты скорости в продольном сечении, м/с:  
 а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

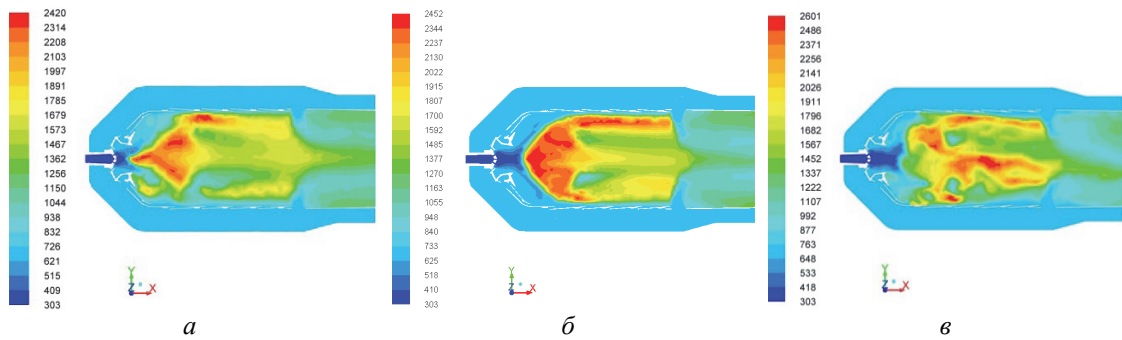


Рис. 3 – Контуры температуры в продольном сечении, К:  
 а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

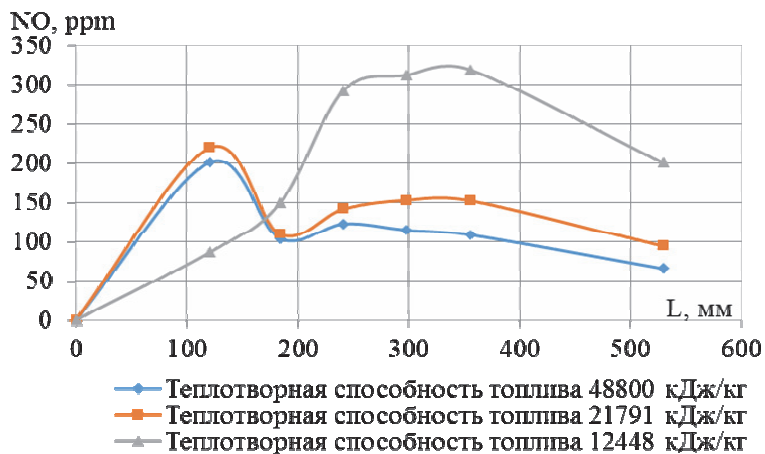


Рис. 4 – Распределение мольных долей NO по длине камеры сгорания

Проведенное численное исследование характеристик серийной камеры сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт при переводе её на синтез-газ показало необходимость внесения существенных изменений в схему организации рабочего процесса камеры сгорания с целью повышения стабильности и эффективности её работы, особенно при работе на низкокалорийном синтез-газе. Простая замена природного газа (метана) на синтез-газ для серийной камеры сгорания ГТД приводит к увеличению выбросов токсичных компонентов, особенно это касается оксидов азота.

С целью повышения стабильности процессов горения низкокалорийных синтез-газов и улучшения экологических показателей предложено, в отличие от традиционной технологии диффузионного сжигания, в серийной камере сгорания двигателя UGT2500 использовать так называемую технологию *RQL* (*Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn*), т.е. первоначальное горение богатой топливовоздушной смеси, быстрое смешение и горение бедной топливовоздушной смеси [5].

Для уменьшения вероятности образования локальных участков в камере со стехиометрическим значением коэффициента избытка воздуха, сокращения подсосов воздуха в первичную зону (*Rich-Burn*) предложено пережать сечение жаровой трубы перед отверстиями подвода первичного воздуха.

Проведенные трехмерные расчеты показали (рис. 5), что для эффективной организации рабочего процесса в камере сгорания, работающей на синтез-газе, интервал отношений диаметра зауженной части обечайки зоны богатого горения топливовоздушной смеси ( $d_1$ ) к диаметру цилиндрической части ( $d_2$ ) жаровой трубы составляет 0,4–0,55 [6].

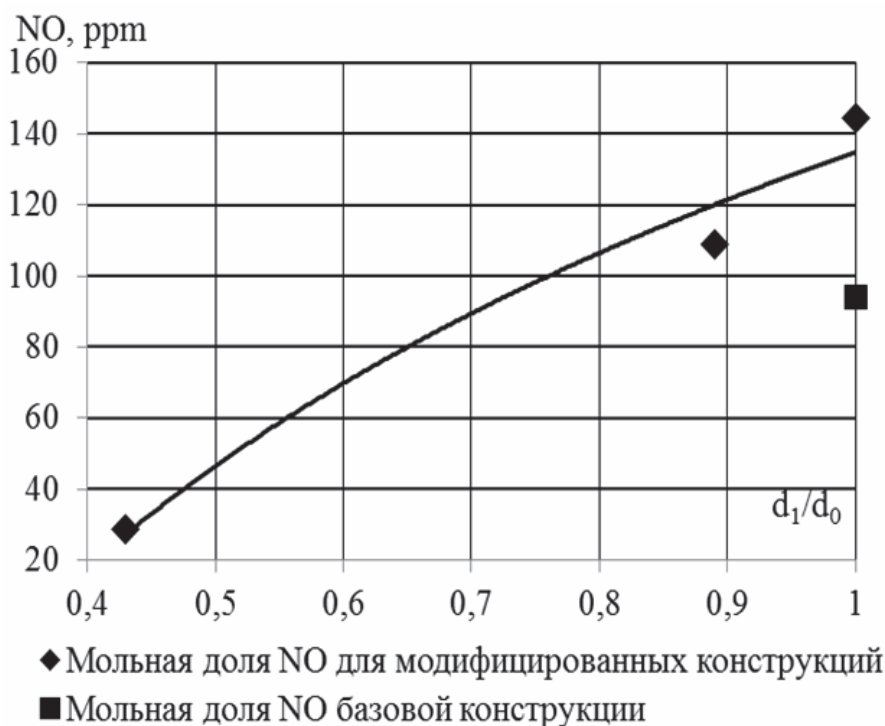


Рис. 5 – Эмиссия оксидов азота NO в камере сгорания, работающей на синтез-газе

### Выводы

1) Проведённые трёхмерные исследования влияния состава синтез-газа на рабочий процесс камеры сгорания диффузионного типа газотурбинного двигателя

мощностью 2,5 МВт показали снижение стабилизирующего эффекта зоны обратных токов при работе камеры на синтез-газе с наименьшей (12,45 МДж/кг) теплотворной способностью.

2) Замена природного газа (метана) на синтез-газ для серийной камеры сгорания ГТД, осуществляемая без существенных конструкторских изменений жаровой трубы, приводит к увеличению выбросов токсичных компонентов, в частности оксидов азота NO от 66 до 200 ppm в зависимости от состава топливного газа.

3) С целью повышения стабильности процессов горения низкокалорийных синтез-газов и улучшения экологических показателей камеры сгорания газотурбинного двигателя UGT2500 целесообразно вместо традиционной технологии диффузионного сжигания топливного газа использовать двухзонную технологию *RQL*, что определяет необходимость модификации серийной камеры сгорания.

4) Теоретические исследования показали, что для эффективной организации рабочего процесса в камере сгорания, работающей на синтез-газе, отношение диаметра зауженной части обечайки зоны богатого горения топливовоздушной смеси к диаметру цилиндрической части жаровой трубы должно составлять 0,40–0,55. При этом имеет место снижение эмиссии оксида азота NO в выходном сечении жаровой трубы на (69–36) % соответственно.

**Список литературы:** 1. Гордеев, С. И. Выбор технологии ПГУ на твердом топливе [Текст] / С. И. Гордеев, А. В. Попов, А. Ф. Рыжков // Современная наука : сб. науч. статей. – Днепропетровск, 2011. – № 3(8). – С. 61–67. – ISSN 2076-6866. 2. 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. 3. Serbin, S. I. Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection [Electronic resource] / S. I. Serbin, A. Mostipanenko, I. Matveev // Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. – Honolulu, Hawaii, USA. – March 13–17, 2011. – AJTEC2011-44042. – Opt. disk (CD-ROM). 4. Serbin, S. I. Investigations of the working process in a «Lean-Burn» gas turbine combustor with plasma assistance [Text] / S. I. Serbin, A. Mostipanenko, I. Matveev // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2011. – Vol. 39 (No 12). – P. 3331–3335. – ISSN 0093-3813. 5. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А. Лефевр. – М. : Мир, 1986. – 566 с. 6. Декл. пат. на кор. мод. України 93619. Камера згоряння; F23C 3/00 / С. І. Сербін, Н. О. Гончарова, О. К. Чередніченко. – № и 2014 04451 ; заявл. 25.04.2014 ; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19. – 4 с. : іл.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gordeev, S. I., A. V. Popov and A. F. Ryzhkov. "Vybor tehnologii PGU na tverdom toplive." *Sovremennaja nauka*. No. 3(8). Dnepropetrovsk, 2011. 61–67. ISSN 2076-6866. Print. 2. Romanov's'kij, G. F., S. I. Serbin and V. M. Patlajchuk. *Suchasni gazoturbinni agregati. Agregati virobnictva Ukraïni ta Rosii*. Mikolaïv : NUK, 2005. Print. 3. Serbin, S. I., A. Mostipanenko 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*. AJTEC2011-44042. Honolulu, Hawaii, USA. March 13–17, 2011. Opt. disk (CD-ROM). 4. Serbin, S. I., A. Mostipanenko and I. Matveev. "Investigations of the working process in a "Lean-Burn" gas turbine combustor with plasma assistance." *IEEE Trans. Plasma Sci.* Vol. 39(No 12). 2011. 3331–3335. ISSN 0093-3813. Print. 5. Lefevr, A. *Processy v kamerah sgoranija GTD*. Moscow : Mir, 1986. Print. 6. Serbin S. I., N. O. Goncharova and O. K. Cherednichenko. "Kamera zgorjannja." *Dekl. pat. na kor. mod. Ukraïni* 93619. F23C 3/00. 10 October 2014. Print.

*Поступила (received) 06.02.2015*