

УДК 621.43.056

С.И. СЕРБИН, Н.А. ГОНЧАРОВА

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина*

## ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД, РАБОТАЮЩЕЙ НА СИНТЕЗ-ГАЗЕ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

*Статья посвящена вопросам численного моделирования рабочих процессов камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на альтернативном топливе, с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (CFD). Показана возможность применения численного эксперимента при проектировании камер сгорания ГТД. Исследованы вопросы возможности применения синтетических газов различного состава в камерах сгорания ГТД. Проведены варианты расчеты и на основе результатов математического моделирования проанализированы основные выходные характеристики камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 2,5 МВт, работающей на низкокалорийном синтетическом газе.*

**Ключевые слова:** камера сгорания, газотурбинный двигатель, синтетическое топливо, математическое моделирование, горение, численные методы.

### Введение

В настоящее время актуальными вопросами являются проблемы использования альтернативного топлива в энергетических установках.

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что перспективным направлением использования синтез-газа в энергетических системах является концепция комбинированных технологий. В частности, одним из вариантов использования высокосоольных углей в энергетике является использование технологии предварительной газификации высокосоольных углей и последующем сжигании получаемого синтез-газа в газотурбинной установке с выработкой электроэнергии и утилизацией теплоты на основных стадиях технологического процесса [1].

Применение синтетических топлив с широким диапазоном теплотворной способности в камерах сгорания ГТД вызывает необходимость проведения исследований особенностей их рабочих процессов [1-2]. Газовые турбины, в первую очередь, предназначены для работы на природном газе, состоящем в основном из метана. Обеспечение их работы на синтез-газе, теплотворная способность которого обычно меньше теплотворной способности традиционного топлива, требует проведения ряда исследований. Основными отличиями синтез-газа от природного являются: меньшая в несколько раз теплотворная способность, возможное высокое содержание негорючих веществ.

Пригодность использования того или иного вида топлива можно обосновать с учетом следующих факторов: обширности сырьевой базы и необходимых конструктивных изменений

двигателя, которые необходимо внести для обеспечения работы камеры. Различие физико-химических свойств синтетических топлив вызывает необходимость изменения рабочего процесса, что вызывает затруднения в связи с недостаточно изученными процессами кинетики воспламенения и горения этих топлив.

При работе камеры сгорания на альтернативном низкокалорийном топливе для обеспечения тепловой мощности камеры сгорания, соответствующей ее значению при работе на традиционном топливе, расход синтез-газа пропорционально увеличивается. В результате возникает вопрос об интервале значений теплотворной способности синтез-газа, который можно использовать в камере. В статье представлен анализ проблемы выбора рационального интервала теплотворной способности синтез-газа в камере сгорания, так как значительное увеличение количества синтез-газа в рабочем объеме камеры может привести к некачественным процессам смесеобразования и сжигания топлива, что, в свою очередь, приведет к ухудшению экологических характеристик камеры сгорания.

### 1. Цели исследования, постановка задачи

В качестве исследуемого объекта выбрана камера сгорания энергетического газотурбинного двигателя мощностью 2,5 МВт [3].

Проведена серия трехмерных расчетов рабочих процессов 1/2 части камеры сгорания двигателя с применением RQL-схемы сжигания синтетического топлива [4] с целью определения влияния теплотворной способности синтез-газа на аэродинамические и экологические характеристики камеры.

2. Результаты исследования

С помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks были построены ряд трехмерных параметрических цифровых моделей 1/2 части камеры сгорания двигателя (см. рис. 1).

Вариантные расчеты предполагают подачу в камеру сгорания синтез-газа различного компонентного состава и теплотворной способности: вариант 1 – низшая теплотворная способность синтез-газа – 33089 кДж/кг, вариант 2 – 21791 кДж/кг, вариант 3 – 12448 кДж/кг.

Для обеспечения тепловой мощности камеры сгорания, соответствующей ее значению при работе на метане, расход синтез-газа пропорционально увеличивался. Были также изменены площади проходных сечений форсуночного узла камеры сгорания, что обеспечило необходимую скорость истечения синтез-газа.

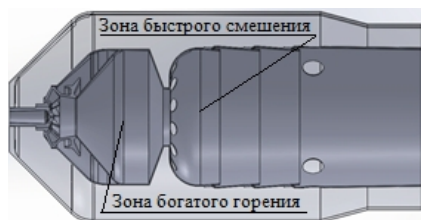


Рис. 1. Трехмерная модель камеры сгорания

Кроме изменений проходных сечений форсунки, были выполнены определенные конструктивные изменения камеры сгорания с целью применения RQL-технологии сжигания синтетического топлива для эффективного снижения уровня NO<sub>x</sub> в уходящих газах [4]. С целью унификации сохранены конструкция корпуса камеры сгорания и габаритные размеры жаровой трубы. Отличительной особенностью камеры сгорания является выполнение обечайки жаровой трубы в зоне горения богатой топливо-воздушной смеси с сужением на выходе. Данное решение позволяет избежать подсоса воздуха в эту зону через отверстия жаровой трубы, расположенные в зоне быстрого смешения.

Так как синтетическое топливо содержит такие компоненты, как CO, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, то при численном моделировании процессов горения необходимо нахождение наиболее подходящих моделей горения и химических схем, для определения основных характеристик пламени при разумных вычислительных усилиях.

В расчетах горения синтез-газа были приняты две многоступенчатые кинетические схемы – Reduced [5] и Yetter [6], каждая из которых включает в себя тридцать пять химических реакций (см. табл. 1-2).

Таблица 1  
Кинетическая схема горения синтез-газа  
Reduced

H+O <sub>2</sub> →OH+O;	OH+O→H+O <sub>2</sub> ;	O+H <sub>2</sub> →OH+H;
OH+H→O+H <sub>2</sub> ;	OH+H <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O+H;	H <sub>2</sub> O+H→OH+H <sub>2</sub> ;
OH+OH→H <sub>2</sub> O+O;	H <sub>2</sub> O+O→OH+OH;	H+O <sub>2</sub> +M→HO <sub>2</sub> +M;
HO <sub>2</sub> +H→OH+OH;	HO <sub>2</sub> +H→H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> ;	HO <sub>2</sub> +OH→H <sub>2</sub> O+O <sub>2</sub> ;
CO+OH→CO <sub>2</sub> +H;	CO <sub>2</sub> +H→CO+OH;	CH <sub>4</sub> +(M)→CH <sub>3</sub> +H+(M);
CH <sub>3</sub> +H+(M)→CH <sub>4</sub> +(M);	CH <sub>4</sub> +H→CH <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> ;	CH <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> →CH <sub>4</sub> +H;
CH <sub>4</sub> +OH→CH <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O;	CH <sub>3</sub> +H <sub>2</sub> O→CH <sub>4</sub> +OH;	CH <sub>3</sub> +O→CH <sub>2</sub> O+H;
CH <sub>2</sub> O+H→HCO+H <sub>2</sub> ;	CH <sub>2</sub> O+OH→HCO+H <sub>2</sub> O;	HCO+H→CO+H <sub>2</sub> ;
HCO+M→CO+H+M;	CH <sub>3</sub> +O <sub>2</sub> →CH <sub>3</sub> O+O;	CH <sub>3</sub> O+H→CH <sub>2</sub> O+H <sub>2</sub> ;
CH <sub>3</sub> O+M→CH <sub>2</sub> O+H+M;	HO <sub>2</sub> +HO <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +O <sub>2</sub> ;	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +M→OH+OH+M;
OH+OH+M→H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +M;	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +OH→H <sub>2</sub> O+HO <sub>2</sub> ;	H <sub>2</sub> O+HO <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +OH;
H+OH+M→H <sub>2</sub> O+M;		H+H+M→H <sub>2</sub> +M;

Таблица 2  
Кинетическая схема горения синтез-газа  
Yetter

H+O <sub>2</sub> →O+OH	HO <sub>2</sub> +H→H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +O→OH+HO <sub>2</sub>
O+H <sub>2</sub> →H+OH	H+O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> →HO <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +OH→H <sub>2</sub> O+HO <sub>2</sub>
OH+H <sub>2</sub> →H+H <sub>2</sub> O	H+O <sub>2</sub> +AR→HO <sub>2</sub> +AR	CO+O+N <sub>2</sub> →CO <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>
OH+OH→O+H <sub>2</sub> O	HO <sub>2</sub> +H→OH+OH	CO+O+AR→CO <sub>2</sub> +AR
H <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> →H+H+N <sub>2</sub>	HO <sub>2</sub> +O→OH+O <sub>2</sub>	CO+O <sub>2</sub> →CO <sub>2</sub> +O
H <sub>2</sub> +AR→H+H+AR	HO <sub>2</sub> +OH→H <sub>2</sub> O+O <sub>2</sub>	CO+OH→CO <sub>2</sub> +H
O+O+N <sub>2</sub> →O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	HO <sub>2</sub> +HO <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	CO+HO <sub>2</sub> →CO <sub>2</sub> +OH
O+O+AR→O <sub>2</sub> +AR	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> →OH+OH+N <sub>2</sub>	HCO+N <sub>2</sub> →H+CO+N <sub>2</sub>
O+H+M→OH+M	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +AR→OH+OH+AR	HCO+AR→H+CO+AR
H+OH+N <sub>2</sub> →H <sub>2</sub> O+N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +H→H <sub>2</sub> O+OH	HCO+O <sub>2</sub> →CO+HO <sub>2</sub>
H+OH+AR→H <sub>2</sub> O+AR	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +H→H <sub>2</sub> +HO <sub>2</sub>	HCO+H→CO+H <sub>2</sub>
HCO+O=CO+OH		HCO+OH=CO+H <sub>2</sub> O

С помощью методов вычислительной гидродинамики (CFD) [7-8] были исследованы процессы сжигания топлива различной теплотворной способности. Полученные данные расчетов приведены в табл. 3 и на рис. 2-5.

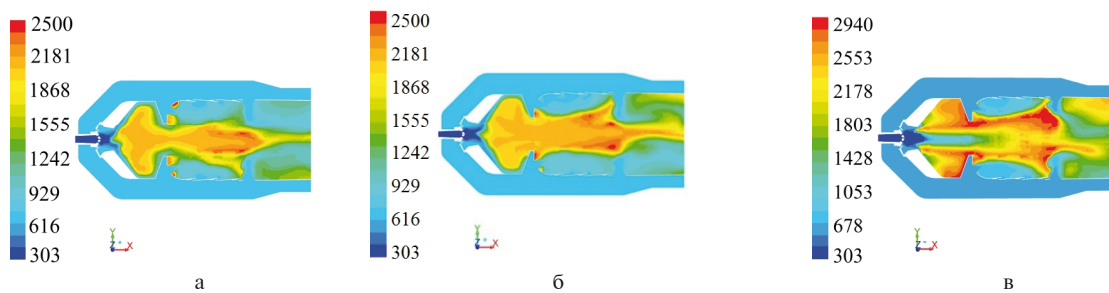


Рис. 2. Контуры температуры (К) в продольных сечениях камеры сгорания: а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

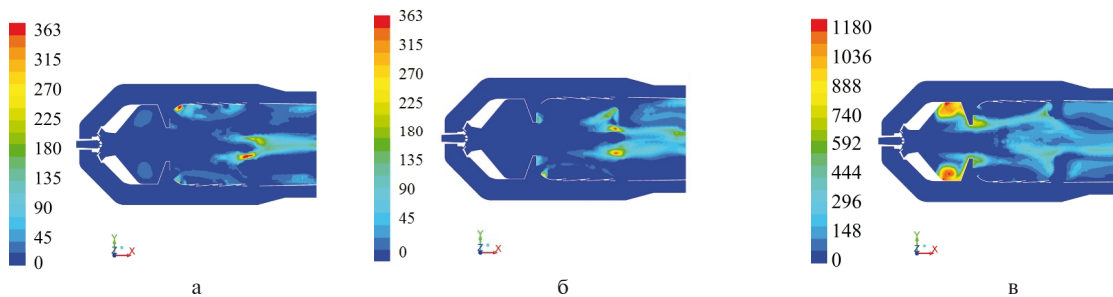


Рис. 3. Массовая доля NO<sub>x</sub> (ppm) в продольных сечениях камеры сгорания: а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

Моделирование рабочих процессов в камере сгорания ГТД дает возможность получить комплекс параметров устройства: поле температур, давлений, скоростей и концентраций химических компонентов. Этот комплекс является исходным также для прогнозирования уровней вредных выбросов из камеры сгорания.

Данные трехмерных CFD-расчетов показывают, что при работе камеры сгорания мощностью 2,5 МВт на альтернативном топливе минимальное рациональное значение низшей теплотворной способности синтез-газа составляет около 20 МДж/кг.

Таблица 3

Кинетическая схема горения синтез-газа

	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Низшая теплотворная способность газа, кДж/кг	33089	21791	12448
Температура на выходе из КС, К	1182,4	1190,9	1300,1
Мольная доля NO на выходе, ppm	31,4	28,9	116,4

Повышение значений максимальной температуры в зоне горения и температуры на выходе в камере сгорания варианта 3 объясняется существенным увеличением расхода топлива и изменением аэродинамической структуры химически реагирующих потоков, что в свою очередь приводит к ухудшению экологических характеристик камеры.

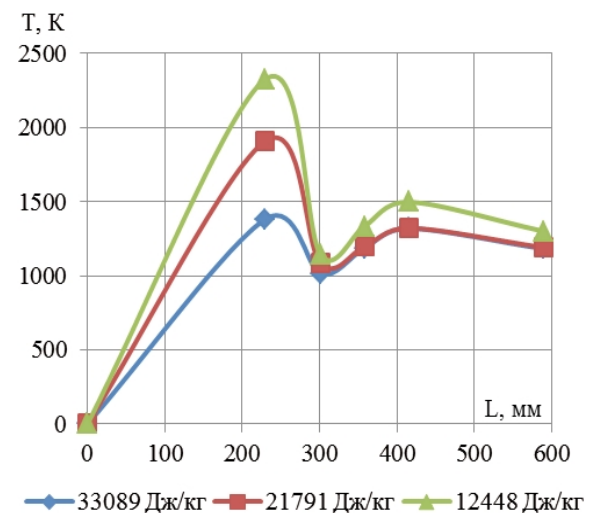


Рис. 4. Изменение среднemasовой температуры (Т) по длине (L) камеры сгорания

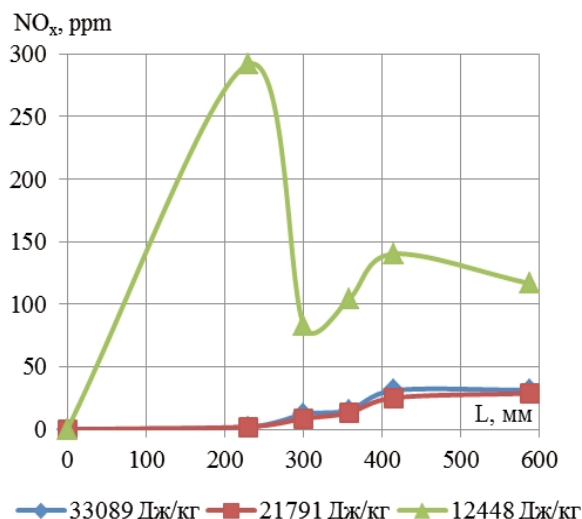


Рис. 5. Изменение мольной доли оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) по длине (L) камеры сгорания

### Заключение

Установлено, что при работе камеры сгорания мощностью 2,5 МВт на альтернативном топливе минимальное значение нижней теплотворной способности синтез-газа составляет около 20 МДж/кг. Увеличение расхода синтез-газа для обеспечения тепловой мощности камеры сгорания при соответствующем изменении площадей проходных сечений форсунки позволяет качественно организовать рабочие процессы камеры и обеспечить параметры, аналогичные параметрам камеры, работающей на природном газе. Применение синтез-газов с теплотворной способностью менее 20 МДж/кг является неэффективным из-за ухудшения экологических характеристик камеры.

### Литература

1. Накоряков В. Е. Технично-экономические показатели ПГУ ТЭЦ с газификацией угля [Текст] / В. Е. Накоряков, Г. В. Ноздренко,

А. Г. Кузьмин // Научный вестник НГТУ : сб. ст. / Теплоэнергетика – М. : МАИК «Наука / Интерпериодика», 2010. – №2. – С.27-29.

2. Cadorin M. Analysys of a micro gas turbine fed by natural gas and synthesis gas: test bench and combustor CFD analysis [Text] / M.Cadorin, M. Pinelli, A. Vaccari // Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, Vancouver, British Columbia, Canada, 2011. – GT 2011-46090.

3. Романовський Г.Ф. Сучасні газотурбінні агрегати: У 2 т. Т. 1: Агрегати виробництва України та Росії [Текст] / Г.Ф.Романовський, С.І.Сербін, В.М.Патлайчук // Навчальний посібник. – Миколаїв: НУК, 2005. – 344 с., 12 с.іл.5

4. Сербин С.И. Исследование рабочих процессов камеры сгорания ГТД с применением RQL-технологии сжигания синтетического газа [Текст] / С. И. Сербин, Н. А. Гончарова // Вестник НТУ ХПИ. – 2014. – №12(1055). – С.29-33.

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. Yetter R.A. A comprehensive reaction mechanism for carbon monoxide/hydrogen/oxygen kinetics [Text] / R.A. Yetter, F.L. Dryer, H Rabitz // Combust. Sci. Tech., 1991. – v. 9. – P. 97-128.

7. Serbin S.I. Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection [Text] / S.I. Serbin, A. Mostipanenکو, I. Matveev // Proceedings of the ASME/JSME 8th Thermal Engineering Joint Conference. – Honolulu, Hawaii, USA. - March 13-17, 2011. – AJTEC2011-44042. – 6 p.

8. 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). – pp. 3331-3335.

Поступила в редакцию 01.06.2014

**С.І. Сербін, Н.О. Гончарова. Особливості робочих процесів камери згоряння ГТД, що працює на синтез-газі різного складу**

*Стаття присвячена питанням числового моделювання робочих процесів камер згоряння газотурбінних двигунів, що працюють на альтернативному паливі, за допомогою сучасних інструментів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Показана можливість застосування числового експерименту при проектуванні камер згоряння газотурбінних двигунів. Досліджені питання можливості застосування синтетичних газів різного складу в камерах згоряння ГТД. Проведено варіантні розрахунки і на основі результатів математичного моделювання проаналізовано основні вихідні характеристики камери згоряння газотурбінного двигуна потужністю 2,5 МВт, що працює на низькокалорійному синтез-газі.*

**Ключові слова:** камера згоряння, газотурбінний двигун, синтетичне паливо, математичне моделювання, згоряння, числові методи.

**S.I. Serbin, N.A. Goncharova. The features of the workflow of gte combustor running on syngas with a different composition**

*The article is devoted to the questions of the numerical simulation of gas turbine combustors working on alternative fuels using the modern tools of computational fluid dynamics (CFD). The opportunity of the application of numerical experiment is shown for developing the gas turbine combustors. The issues of the applicability of synthetic fuel with different composition in combustors are investigated. The variant calculations are carried out and output characteristics of 2.5 MW gas turbine engine combustor working on low-calorific synthesis gas based on the results of mathematical modeling are analyzed.*

**Key words:** combustor, gas turbine engine, synthesis fuel, mathematical simulation, combustion, numerical methods.