

УДК 621.43.056

С.И. СЕРБИН, Н.А. ГОНЧАРОВА

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина***ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД МОЩНОСТЬЮ 2,5 МВт,
РАБОТАЮЩЕЙ НА СИНТЕЗ-ГАЗЕ**

Статья посвящена вопросам численного моделирования камер сгорания газотурбинных двигателей, работающих на традиционном и альтернативном топливах, с помощью современных инструментов вычислительной гидродинамики (CFD). Показана возможность применения численного эксперимента при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей. Проведены варианты расчеты и на основе результатов математического моделирования проанализированы основные выходные характеристики камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 2,5 МВт, работающей на метане и низкокалорийном синтез-газе.

Ключевые слова: камера сгорания, газотурбинный двигатель, горение, синтез-газ, численные методы, математическое моделирование.

Введение

В последние годы возрастает интерес к энергетическим системам, работающим на синтетическом газообразном топливе, полученном в процессах пиролиза или газификации. Применение синтез-газа в небольших энергетических системах пока еще не достигло уровня технологической зрелости, и поэтому требует как экспериментальных, так и теоретических исследований для достижения максимальной производительности и надежности, характерных для технологий, основанных на традиционных видах топлива [1].

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что перспективным направлением использования синтез-газа в энергетических системах является концепция комбинированных технологий. Ужесточение экологических требований к традиционным атмосферным загрязнителям, а также необходимость обеспечения конкурентоспособности угольных энергетических систем вызывают повышенный интерес к комбинированным угольным технологиям, характеризующимся повышенными значениями термического КПД, а тем самым и меньшим удельным потреблением топлива при производстве тепловой и электрической энергии [2].

В основе данной технологии лежит идея сочетания двух циклов трансформации энергии. Первый цикл обеспечивается за счет использования продуктов газификации или сгорания углей, второй – традиционный, паросиловой цикл, осуществляется паром, генерируемым за счет остаточной тепловой энергии продуктов сгорания.

Комбинированный парогазовый цикл с газификацией угля (КПГЦ с ГУ) основан на частичном сжигании (окислении) угля в газификаторе под давлением при нехватке окислителя. В результате уголь превращается в топливный газ – преимущественно водород и монооксид углерода, который после очистки может использоваться в парогазовом цикле как обычное газообразное топливо.

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 внесения ряда изменений в конструкцию камер сгорания. Эффективность организации рабочего процесса в камере сгорания газотурбинного двигателя, работающей на синтез-газе различного химического состава, требует понимания особенностей физико-химического процесса горения данного топлива. Для правильного проектирования камеры сгорания такого типа необходимы данные о форме и скорости распространения пламени, температуре газов на выходе из камеры сгорания, уровне токсичных выбросов (таких как СО и NO_x) при использовании синтез-газа различного химического состава.

Основными отличиями синтез-газа от природного являются: меньшая в несколько раз теплотворная способность, возможное высокое содержание негорючих веществ (до 60 %), в том числе водяных паров, более высокая плотность.

Для перевода системы топливопитания газотурбинных установок на низкокалорийный синтез-

газ требуется решение следующих основных вопросов по камере сгорания: исследование и отработка процесса сжигания (в том числе при возможных колебаниях химического состава синтез-газа), обеспечение устойчивой работы камеры сгорания на низкокалорийном синтез-газе на режимах от холодного хода до максимальной нагрузки, отработка конструкции камеры сгорания и системы подачи топлива.

В статье представлены результаты анализа возможности использования трехмерного численного эксперимента для определения основных характеристик камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 2,5 МВт, работающей на метане и синтез-газе.

1. Математическая модель трехмерных химически реагирующих потоков

Математическая модель учитывает особенности организации рабочего процесса в камерах сгорания, в которых организовывается гомогенно-диффузионное горение топливо-воздушных смесей, обусловленное как физическими процессами смесеобразования, так и кинетикой химических реакций [3-5]. При разработке модели рабочих процессов в камере сгорания выбраны и обоснованы соответствующие модели турбулентности.

Эти математические модели принимают форму систем дифференциальных и алгебраических уравнений, решения которых в важнейших аспектах полностью согласуются с характеристиками элементов моделируемого устройства или процесса. Модель рассматривается как идеализированное или неполное описание фактически существующих зависимостей между конструктивными и рабочими характеристиками камеры сгорания, с одной стороны, и фундаментальными законами физики и химии – с другой.

Разработанная модель химически реагирующих потоков основана на решении систем уравнений, описывающих конвективный, диффузионный перенос для каждого компонента реагирующей смеси.

Предложенная математическая модель основана на следующих уравнениях [6, 7, 8]: неразрывности (1); сохранения количества движения (2); сохранения энергии (3); переноса химических компонентов смеси (4):

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m; \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}; \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \vec{J}_q + S_h; \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i, \quad (4)$$

где ρ – массовая плотность;

\vec{v} – вектор локальной скорости;

S_m – источник, который определяет дополнительную массу, привносимую в поток,

p – статическое давление;

$\vec{\tau}$ – тензор давления;

$\rho \vec{g}$ – сила тяжести;

\vec{F} – внешние силы;

E – внутренняя энергия;

\vec{J}_q – плотность теплового потока смеси;

S_h – источник, который описывает тепловыделение в результате химических реакций;

Y_i – массовые концентрации химического компонента i ;

\vec{J}_i – массовая диффузия i -го компонента;

R_i – скорость образования i -го компонента в результате химической реакции;

S_i – скорость образования i -го компонента из дисперсной фазы.

Для термических и быстрых оксидов азота необходимо решить уравнение переноса для NO, записанное в векторной форме (5):

$$\frac{d}{dt}(\rho Y_{NO}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_{NO}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO}. \quad (5)$$

где Y_{NO} – массовая концентрация NO;

D – коэффициент диффузии;

S_{NO} – источниковый член, определяющийся в зависимости от механизма образования NO_x.

В уравнениях RNG $k-\varepsilon$ - модели турбулентности (6, 7) по сравнению со стандартной моделью присутствует дополнительное условие (8) и соотношение (9) для вычисления турбулентной вязкости, которые позволяют более эффективно рассчитать гидродинамические показатели сильно закрученных потоков.

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_i}(\rho k u_i) = \frac{d}{dx_j} \left[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{dk}{dx_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k; \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \varepsilon) + \frac{d}{dx_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{d}{dx_j} \left[(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}) \frac{d\varepsilon}{dx_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon, \quad (7)$$

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta / \eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3 k}; \quad (8)$$

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}}\right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v}, \quad (9)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности;

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$ – величины, обратные значениям эффективного числа Прандтля для k и ε соответственно;

μ_{eff} – эффективная вязкость;

G_k – генерация турбулентной кинетической энергии вследствие градиентов осредненных скоростей;

G_b – генерация турбулентной кинетической энергии под действием сил плавучести для идеальных газов;

Y_M – член, учитывающий влияние пульсационного расширения;

S_k, S_ε – дополнительные источниковые члены для k и ε соответственно;

ε – удельная скорость диссипации кинетической энергии турбулентности;

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \eta_0, \beta$ – эмпирические константы;

$\eta = Sk / \varepsilon$;

$\hat{v} = \mu_{\text{eff}} / \mu$;

μ – коэффициент ламинарной вязкости.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений, описывающих физико-химические процессы в камерах сгорания ГТД, использован метод контрольного объема, реализованный в программном комплексе ANSYS Fluent.

2. Результаты численных экспериментов

Проведено моделирование процессов горения в камере сгорания ГТД мощностью 2,5 МВт, работающей на метане и низкокалорийном синтез-газе. С помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks была построена трехмерная параметрическая цифровая модель 1/2 части камеры сгорания двигателя UGT-2500 мощностью 2,5 МВт (рис. 1).

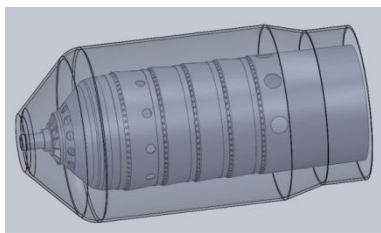


Рис. 1. Трехмерная модель камеры сгорания

Для обеспечения тепловой мощности камеры сгорания, соответствующей ее значению при работе

на метане, расход синтез-газа был пропорционально увеличен. Были также изменены площади проходных сечений форсуночного узла камеры сгорания, что обеспечило необходимую скорость истечения синтез-газа.

В расчетах горения синтез-газа принята многоступенчатая кинетическая схема, включающая в себя тридцать пять химических реакций [9] (табл. 1).

Таблица 1

Кинетическая схема горения синтез-газа

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

Используемые граничные условия для расчетов процессов горения в камере сгорания (КС) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Граничные условия

	Вариант 1	Вариант 2
Низшая теплотворная способность, кДж/кг	48800	21791
Состав газа, % (об.)		
CO ₂	0	12,59
CO	0	15,09
H ₂	0	50,63
CH ₄	100	19,08
N ₂	0	2,61
Стехиометрическое количество воздуха, кг/кг	16,72	6,7039
Расход воздуха через КС, кг/с	6,9105	
Температура воздуха в КС, К	650,02	
Давление воздуха в КС, Па	1191288	
Расход топлива, кг/с	0,096958	0,2173826
Температура топлива, К	303	

На рис. 2, 3 представлены распределения температур, массовых долей основных продуктов сгорания и компонентов топлива в продольном сечении камеры сгорания для исследуемых вариантов.

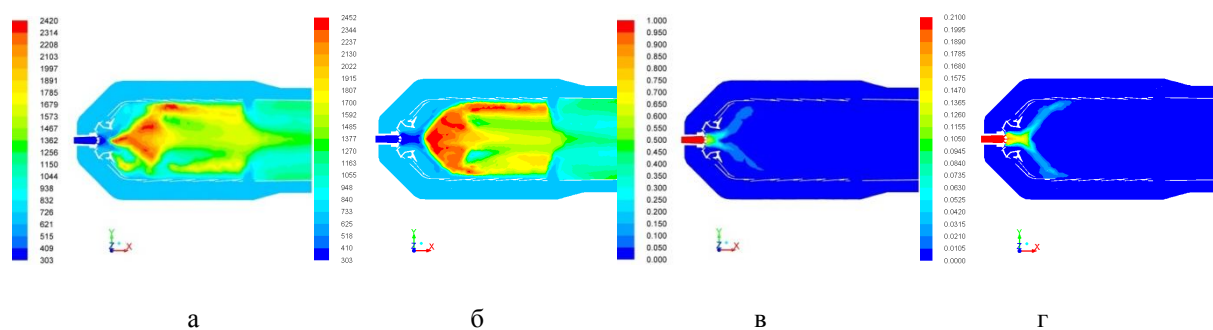


Рис. 2. Контуры температуры (а, б) и распределение массовых долей CH_4 в продольных сечениях КС: а, в – вариант 1; б, г – вариант 2

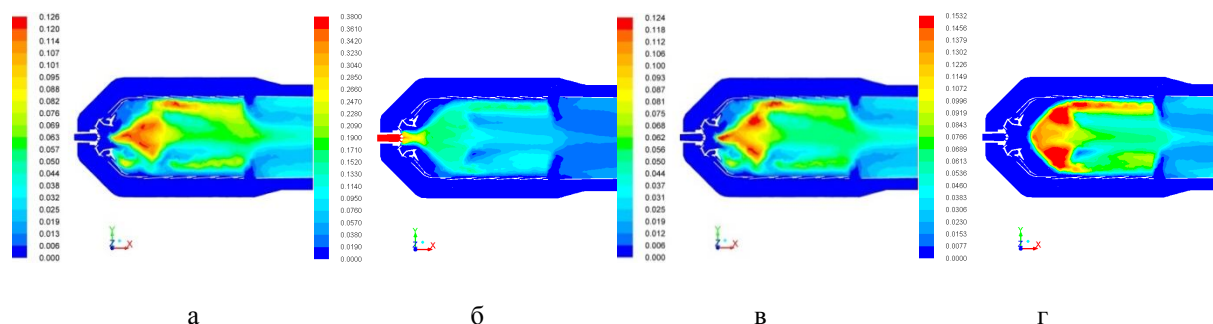


Рис. 3. Распределение массовых долей CO_2 (а, б) и H_2O (в, г) в продольных сечениях КС: а, в – вариант 1; б, г – вариант 2

Полученные данные расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов

	Вариант 1	Вариант 2
Температура газов на выходе из КС, К	1223,7	1167,4
Мольная доля CH_4	0,00042	0,00022
Мольная доля O_2	0,1544	0,1604
Мольная доля CO_2	0,0235	0,0261
Мольная доля CO	0,0016	0,00089
Мольная доля H_2O	0,0501	0,051
Содержание N_2O , ppm	0,363	0,260
Содержание NO , ppm	65,7	94,0

Применение синтез-газа в модифицированной камере сгорания позволяет получить выходные характеристики аналогичные базовой камере при работе на метане. При использовании синтез-газа расчетные суммарные выбросы CO почти в два раза меньше, чем при работе камеры сгорания на метане. Большее значение на выходе оксидов NO для варианта 2 объясняется большим значением суммарного коэффициента избытка воздуха (4,74) по сравнению с вариантом 1 (4,26).

Заключение

Применена универсальная трехмерная математическая модель низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей, в которых организовыв-

вается гомогенно-диффузионное горение традиционных и альтернативных топливовоздушных смесей, обусловленное физическими процессами смешения и кинетикой химических реакций.

Предложена многоступенчатая кинетическая схема, включающая в себя тридцать пять химических реакций, для моделирования рабочих процессов в камерах сгорания, работающих на традиционном и альтернативном топливах.

На основе результатов математического моделирования проанализированы основные выходные характеристики камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 2,5 МВт, работающей на метане и низкокалорийном синтез-газе.

Литература

1. 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.
2. Накоряков, В.Е. *Технико-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.
3. Варнатц, Ю. *Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, обра-*

зование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатиц, У. Маас, Р. Дибл. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.

4. Сербин, С.И. Исследование структуры течения во фронтальном устройстве камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт [Текст] / С.И. Сербин, А.Б. Мостипаненко, В.В. Вилкул // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8(24). – С. 146-149.

5. Сербин, С.И. Числове моделювання процесів горіння в експериментальному відсіку гібридної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт [Текст] / С.И. Сербин, Г.Б. Мостіпаненко // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – № 5. – С. 59-66.

6. Патанкар, С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст] / С.В. Патанкар; пер. с англ.; под ред. В.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

7. Batchelor, G.K. *An Introduction to Fluid Dynamics [Text]* / G.K. Batchelor. – Cambridge: Univ. Press, 1967. – 615 p.

8. Serbin, S.I. Investigation of the working processes in a gas turbine combustor with steam injection [Text] / 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. – 6 p.

9. 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.

Поступила в редакцию 30.05.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедры турбин Г.Ф. Романовский, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина.

ХАРАКТЕРИСТИКИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД ПОТУЖНІСТЮ 2,5 МВТ, ЩО ПРАЦЮЄ НА СИНТЕЗ-ГАЗІ

С.І. Сербін, Н.О. Гончарова

Стаття присвячена питанням числового моделювання камер згоряння газотурбінних двигунів, що працюють на традиційному та альтернативному паливах, за допомогою сучасних інструментів обчислювальної гідродинаміки (CFD). Показана можливість застосування числового експерименту при проектуванні камер згоряння газотурбінних двигунів. Проведено варіантні розрахунки і на основі результатів математичного моделювання проаналізовано основні вихідні характеристики камери згоряння газотурбінного двигуна потужністю 2,5 МВт, що працює на метані і низькокалорійному синтез-газі.

Ключові слова: камера згоряння, газотурбінний двигун, горіння, синтез-газ, числові методи, математичне моделювання.

THE CHARACTERISTICS OF 2.5 MW GAS TURBINE COMBUSTOR WORKING ON SYNTHESIS GAS

S.I. Serbin, N.A. Goncharova

The article is devoted to the questions of the numerical simulation of gas turbine engine combustors working on traditional and 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 variant calculations are carried out and output characteristics of 2.5 MW gas turbine engine combustor working on methane and low-calorific synthesis gas based on the results of mathematical modeling are analyzed.

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

Сербин Сергей Иванович – д-р техн. наук, профессор, директор Машиностроительного института Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: siserbin@yandex.ru.

Гончарова Наталия Александровна – аспирант кафедры турбин Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: natashka87-87@mail.ru.