

УДК.621.45.034

С.И. СЕРБИН, А.Б. МОСТИПАНЕНКО

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Украина***МОДЕРНИЗАЦИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ
ТИПА «ВОДОЛЕЙ» С ВПРЫСКОМ ВОДЯНОГО ПАРА МЕТОДАМИ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Статья посвящена вопросам численного моделирования камер сгорания газотурбинных двигателей. Доказана необходимость и возможность применения численного эксперимента при проектировании камер сгорания газотурбинных двигателей. Полученные в ходе расчетов данные позволили усовершенствовать конструкцию низкоэмиссионной камеры сгорания ГТУ типа "Водолей" мощностью 16 МВт с впрыском экологического и энергетического водяного пара производства ГП НПКГ "Зоря"–"Машпроект" (г. Николаев). Разработанные практические рекомендации по совершенствованию камеры сгорания ГТД дадут возможность увеличить ресурс жаровых труб, а, следовательно, и газотурбинного двигателя в целом, уменьшать количество воздуха на охлаждение лопаток турбин, увеличивая тем самым КПД двигателя, создавать новые образцы конкурентоспособной на мировом рынке продукции, удовлетворяющей международным нормам на выбросы токсичных компонентов.

Ключевые слова: камера сгорания, газотурбинный двигатель, численные методы, математическое моделирование, вредные выбросы, оксиды азота.

Введение

Практика применения украинских ГТД ставит перед производителями вопросы создания конкурентоспособных двигателей с высокой полнотой сгорания топлива, значительным ресурсом всех его элементов, а также соответствия требованиям международных норм на уровни выбросов. Все это определяет актуальность и вызывает необходимость комплексного решения вопросов совершенствования энергетических ГТД и их камер сгорания (КС).

Обеспечить экологические и экономические требования можно за счет улучшения эксплуатационных и экологических характеристик технологических установок и совершенствования рабочего процесса в камерах сгорания [1, 2, 3]. В последнее время ведущие турбиностроительные фирмы мира активно занимаются проектированием и внедрением малотоксичных камер сгорания, позволяющих резко уменьшить выбросы оксидов азота и несгоревших углеводородов.

Создание камер сгорания ГТД тесно связано с возможностью надежного прогнозирования уровней вредных выбросов, а также других характеристик рабочего процесса на стадии проектирования. Такую возможность дает трехмерный численный эксперимент, проводимый при помощи компьютерных систем вычислительной гидродинамики на базе комплексов ANSYS Fluent, ANSYS CFX и других.

Рассмотренные особенности конструктивного

оформления современных камер сгорания ГТД позволяют определить следующие основные направления научных исследований в области уменьшения эмиссии токсичных компонентов: увеличение коэффициента избытка воздуха в зоне горения камеры; улучшение распыливания жидкого топлива и перемешивания его с воздухом; впрыскивание водяного пара (воды) в зону первичного смесеобразования или использование топливоводяной смеси; применение конструкционных материалов – катализаторов; введение специальных присадок в жидкое топливо, которые препятствуют образованию NO_x , способствуют их разложению или уменьшают температуру пламени; циркуляция продуктов сгорания.

Впрыск воды или водяного пара рассматривается ведущими газотурбостроительными фирмами как эффективное средство снижения выбросов оксидов азота. Такая технология перспективна в плане модернизации уже работающих стационарных ГТУ с котлами-утилизаторами, т.к. не требует радикального изменения конструкций завихрителей, форсунок и жаровых труб. Так, при сжигании жидкого топлива за счет впрыска воды или пара в горелки эмиссия NO_x на базовой нагрузке ограничивается величиной около 110 мг/нм^3 [4].

Примером реализации такой конструкции может служить камера сгорания ГТУ типа «Водолей» мощностью 16 МВт с впрыском экологического и энергетического водяного пара производства ГП НПКГ "Зоря"–"Машпроект", г. Николаев (рис. 1) [5].

В связи с вышеизложенным, целью данной работы является определение возможностей использования трехмерного численного эксперимента для улучшения характеристик камер сгорания с впрыском водяного пара на примере конструкции жаровой трубы КС ГТУ типа «Водолей».

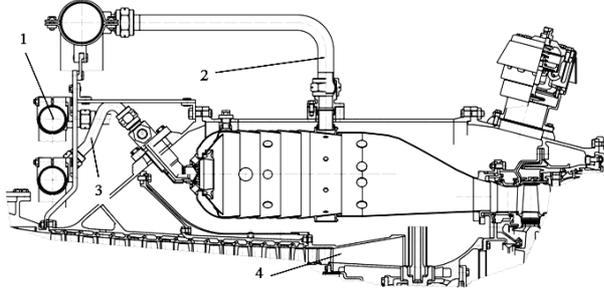


Рис. 1. Камера сгорания ГТУ типа «Водолей» с впрыском водяного пара:

1 – подача экологического пара; 2 – подача энергетического пара; 3 – подвод газа; 4 – подвод воздуха после компрессора высокого давления

1. Математическая модель

Используемая для численного эксперимента математическая модель химически реагирующих потоков в низкоэмиссионных камерах сгорания ГТД, которые работают на газообразном топливе, позволяет корректно прогнозировать гидродинамические и химические процессы в топливосжигающих устройствах.

Математическая модель учитывает особенности организации рабочего процесса в камерах сгорания, в которых организуется гомогенно-диффузионное горение топливовоздушных смесей, обусловленное как физическими процессами смесеобразования, так и кинетикой химических реакций.

Модель химически реагирующих турбулентных потоков базируется на системе дифференциальных уравнений неразрывности (1), сохранения количества движения (2), сохранения энергии (3), переноса химических компонентов смеси (4) и NO (5):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}) = S_m; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \nabla(\rho \bar{v} \bar{v}) = \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \bar{g} + \bar{F}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \bar{J}_q + S_h; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \bar{v} Y_i) = -\nabla \cdot \bar{J}_i + R_i + S_i; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_{NO}) + \nabla(\rho \bar{v} Y_{NO}) = -\nabla \cdot (\rho D \nabla Y_{NO}) + S_{NO}, \quad (5)$$

где ρ – массовая плотность;

\bar{v} – вектор локальной скорости;

S_m – источник, определяющий массу, вносимую в

поток,

p – статическое давление;

$\rho \bar{g}$ – гравитационная сила;

\bar{F} – внешние силы;

$\bar{\tau}$ – тензор напряжений;

E – внутренняя энергия;

Y_i, Y_{NO} – массовая концентрация химического компонента i и NO;

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

\bar{J}_j – плотность диффузного теплового потока j -го компонента;

S_h – источник, описывающий тепловыделение в результате химических реакций;

S_i – уровень дополнительного образования i -го компонента из дисперсной фазы или других источников;

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

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

D – коэффициент диффузии;

S_{NO} – источник NO в зависимости от механизма образования.

Обычно скорость химической реакции и уровень образования R_i определяют величиной характерного масштаба перемешивания k/ε . Однако в реальных конструкциях низкоэмиссионных камер сгорания ГТД всегда есть участки предварительного смешения горючего и окислителя. Если использовать модель горения, которая учитывает только турбулентные характеристики, то можно получить чрезмерно высокую скорость выгорания топлива. Избежать этого эффекта можно учитывая выражение Аррениуса при расчете скорости химических реакций

$$k = A T^\beta e^{-E/RT},$$

где A, β, E – константы и энергия активации смеси.

В модели использовался трехреакционный кинетический механизм горения газообразного топлива на базе метана [6], учитывающий разложение диоксида углерода. Эффективность применения данного механизма для моделирования процессов в камере сгорания с впрыском водяного пара показана в работе [7].

Замыкание системы уравнений (1)–(5) проводится путем добавления соответствующих дифференциальных уравнений моделей турбулентности, полуэмпирических зависимостей для тензора давлений, теплового и диффузного потоков, а также уравнения состояния смеси идеальных газов. Зависимости термодинамических и теплофизических свойств газов от температуры учитываются с помощью аппроксимирующих формул.

Для стационарных задач прогнозирования ха-

рактеристик камер сгорания использована RNG разновидность стандартной $k-\epsilon$ -модели турбулентности, которая является полуэмпирической и представляет собой совокупность дифференциальных уравнений переноса кинетической энергии турбулентности k и удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ϵ .

В уравнениях RNG $k-\epsilon$ -модели турбулентности (6, 7) в дополнение к стандартной модели присутствуют уравнение (8) и соотношение (9) для вычисления турбулентной вязкости, которые позволяют более эффективно рассчитывать гидродинамические показатели сильно закрученных потоков.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_k \mu_{eff}) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k; \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\alpha_\epsilon \mu_{eff}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon; \quad (7)$$

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

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

где μ_{eff} – коэффициент эффективной вязкости;

G_k – генерация турбулентной кинетической энергии от градиентов осреднённых скоростей;

G_b – генерация турбулентной кинетической энергии в результате плаучести для идеальных газов;

Y_M – влияние пульсационного расширения;

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, C_\mu, C_v, \eta_0, \beta$ – эмпирические константы;

S_k, S_ϵ – дополнительные источники для k и ϵ ;

$\alpha_k, \alpha_\epsilon$ – величины обратные значениям эффективных чисел Прандтля для k и ϵ соответственно;

$$\eta = Sk/\epsilon;$$

$$\hat{v} = \mu_{eff}/\mu; \mu - \text{коэффициент ламинарной вязкости.}$$

Для численного решения системы дифференциальных уравнений, которая описывает физико-химические процессы в низкоэмиссионных камерах сгорания ГТД, использован метод контрольного объема, реализованный в программных комплексах ANSYS Fluent и ANSYS CFX.

Верификация предложенной математической модели проведена на базе экспериментальных данных, полученных при испытаниях ГТУ типа «Водолей», проводившихся в рамках подготовки к межведомственным испытаниям на газоперекачивающей станции "Ставищенская" (Черкасская обл., Украина). Данные предоставлены ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект».

2. Модернизация камеры сгорания

Анализ структуры потока в камере сгорания ГТУ типа «Водолей», проведенный по результатам численного моделирования режима, близкого к номинальному, позволил выявить следующие характерные недостатки в организации рабочего процесса: 1) высокая неравномерность подачи экологического пара в первичную зону камеры сгорания, которая приводит к возникновению участков интенсивного образования оксидов азота. Вследствие сноса экологического пара воздухом в межтрубное пространство внутри жаровой трубы образуется локальная зона, в которой водяной пар практически отсутствует; 2) значительная неравномерность распределения первичного воздуха в отверстиях и его частичное подсосывание в сторону лопаточного завихрителя. Отметим, что воздух из трех верхних отверстий жаровой трубы течет в сторону завихрителя, а из остальных пяти отверстий – в сторону выходного сечения. Это приводит к значительной неравномерности поля температур во вторичной зоне камеры и, как следствие, к увеличению образования оксидов азота и степени неравномерности выходного поля температур.

Для устранения характерных недостатков исходного варианта КС ГТУ типа «Водолей», выявленных с использованием трехмерных математических моделей, предложено внести следующие изменения в конструкцию жаровой трубы (рис. 2), которые приведут к улучшению ее характеристик без существенного усложнения технологии производства: 1) перед входом в лопаточный завихритель установлено дополнительное кольцо-дефлектор 1 высотой 30 мм и диаметром 84 мм, препятствующее перетеканию экологического пара в межтрубное пространство; 2) три верхние отверстия первичного воздуха 2 смещены на следующую обечайку и их площадь уменьшена на 25 %.

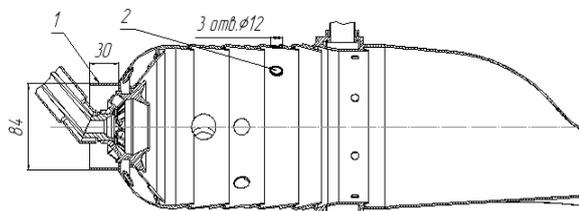


Рис. 2. Модернизированный вариант жаровой трубы ГТУ типа «Водолей»

Выполненные расчеты показали, что установка дефлектора и уменьшение площади отверстий, приведет к незначительному росту потерь полного давления в камере (на 0,2 % абсолютных). Дополнительный дефлектор обеспечивает значительно более равномерное распределение экологического пара в

головной части жаровой трубы, что понижает максимальную температуру продуктов сгорания в камере на 200 градусов (с 2400 до 2200 К) (рис. 3, а), существенно сокращает протяженность участков с концентрацией NO_x более 100 ppm внутри жаровой трубы (рис. 3, б). Снижается также интенсивность образования СО во вторичной зоне; и в модернизированном варианте максимальные локальные концентрации оксида углерода не превышают 10000 ppm, тогда как в базовом варианте они достигали 17000 ppm (рис. 3, в).

Все это привело к уменьшению расчетных суммарных выбросов СО (с 12 до 4 ppm) и NO_x (с 33 до 10 ppm) для модернизированного варианта кон-

струкции (замеренные выбросы NO_x и СО в базовом варианте составили 30 и 8 ppm соответственно). Причиной такого значительного снижения концентраций оксидов азота является не только уменьшение максимальной температуры газов, но и сокращение объемов зон с оклостехиометрическими коэффициентами избытка воздуха 1,1-1,2, в которых, как известно, и создаются наиболее благоприятные условия для образования термических оксидов азота. Соответствие расчетных и экспериментальных данных для базового варианта позволяет предположить, что предложенные конструктивные изменения приведут к существенному уменьшению выбросов токсичных веществ.

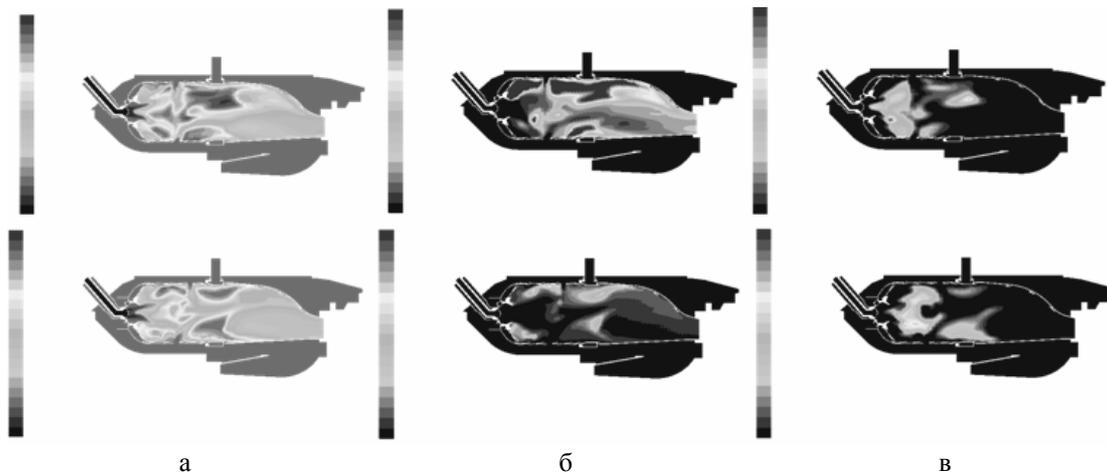


Рис. 3. Распределения температур (а), концентраций оксидов азота (б) и концентраций оксида углерода (в) в исходном и модернизированном вариантах камеры сгорания ГТУ «Водолей»

Отметим, что расчеты проведены для одной жаровой трубы без учета технологических отклонений при ее изготовлении, утечки рабочего тела через неплотности конструкции и неравномерности раздачи топлива по жаровым трубам. Следовательно, на работающем двигателе можно прогнозировать снижение уровня выбросов оксида азота в 1,3-1,5 раза и уровня СО на 20-25 %.

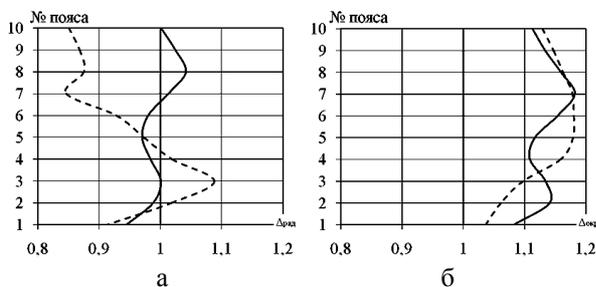


Рис. 4. Неравномерность температурного поля в выходном сечении КС ГТУ «Водолей»:

- а – радиальная (осредненная);
- б – окружная (максимальная)
- — — — исходный вариант;
- — модернизированный вариант

Смещение трех верхних отверстий подачи первичного воздуха на следующую обечайку по длине жаровой трубы (по сравнению с базовой конструкцией) и уменьшение их площади позволило избежать подтекания первичного воздуха в направлении лопаточного завихрителя, что положительно сказалось на радиальной равномерности температурного поля во вторичной зоне, увеличило глубину проникновения воздуха в жаровую трубу, улучшило качество его перемешивания с продуктами горения, снизило неравномерность выходного поля температур.

В результате радиальная неравномерность температур на выходе уменьшилась с 8 до 3,8 %, а окружная осталась на прежнем уровне (рис. 4, а, б).

Заключение

На основании обобщения данных трехмерных расчетов модернизированных вариантов камеры сгорания ГТУ типа «Водолей» мощностью 16 МВт с впрыском экологического и энергетического водяного пара разработаны практические рекомендации по совершенствованию ее выходных характеристик.

Эти рекомендации позволят увеличить ресурс жаровых труб, лопаточных аппаратов первых ступеней турбин, а, следовательно, и газотурбинного двигателя в целом, уменьшить выбросы оксидов азота и углерода, а также расход охлаждающего воздуха на лопатки первых ступеней турбин.

Литература

1. Романовський Г.Ф. Камери згоряння суднових газотурбінних двигунів: Навчальний посібник / Г.Ф. Романовський, С.І. Сербін. – Миколаїв : УДМУ-ТУ, 2000. – 259 с.

2. Воронин В.Г. Улучшение энергетических и экологических параметров одновалных ГТД / В.Г. Воронин // Двигателестроение. – 1990. – № 6. – С. 43-47.

3. Ольховский Г.Г. Совершенствование ГТУ для электростанций / Г.Г. Ольховский // Теплоэнергетика. – 1991. – № 6. – С. 66.

4. Moore M.J. *NO_x emission control in gas turbines for combined cycle gas turbine plant* / M.J. Moore // *Proc. ImechE.* – 1977. – Vol. 211. – Part A. – P. 43-52.

5. Опыт эксплуатации газотурбинной установки ГПУ-16К с впрыском пара / Ю.Н. Бондин, В.А. Кривуца, В.И. Романов и др. // Газотурбинные технологии. – 2004. – № 5. – С. 18-20.

6. Karl V. Meredith. *Automated Global Mechanism Generation for use in CFD Simulations* / Karl V. Meredith, David L. Black // *44-th AIAA-Paper.* – Reno, Nevada, 2006. – P. 1-13.

7. Мостипаненко А.Б. Повышение экологической безопасности газотурбинных установок использованием технологии малоэмиссионного сжигания топлив / А.Б. Мостипаненко // Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2007. – №1 (412). – С. 100-108.

Поступила в редакцию 27.04.2009

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

МОДЕРНІЗАЦІЯ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ ТИПУ "ВОДОЛІЙ" З ВПОРСКУВАННЯМ ВОДЯНОЇ ПАРИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

С.І. Сербін, Г.Б. Мостіпаненко

Стаття присвячена питанням числового моделювання камер згоряння газотурбінних двигунів. Доведено необхідність і можливість застосування числового експерименту при проектуванні камер згоряння газотурбінних двигунів. Отримані в ході розрахунків дані дозволили вдосконалити конструкцію низькоемісійної камери згоряння ГТУ типу "Водолій" потужністю 16 МВт із впорскуванням екологічної й енергетичної водяної пари виробництва ДП НВКГ "Зоря"- "Машпроект" (м. Миколаїв). Розроблені практичні рекомендації з удосконалювання камери згоряння ГТД дадуть можливість збільшити ресурс жарових труб, а, отже, і газотурбінного двигуна у цілому, зменшити кількість повітря на охолодження лопаток турбін, збільшуючи тим самим ККД двигуна, створити нові зразки конкурентоспроможної на світовому ринку продукції, що задовольняє міжнародним нормам на викиди токсичних компонентів.

Ключові слова: камера згоряння, газотурбінний двигун, числові методи, математичне моделювання, шкідливі викиди, оксиди азоту.

CHARACTERISTIC IMPROVEMENT OF GAS TURBINE UNIT «VODOLEJ» COMBUSTION CHAMBER WITH WATER STEAM INJECTION BY THE METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

S.I. Serbin, A.B. Mostipanenko

The article is devoted to the questions of numerical simulation of combustion chambers of gas turbine engines. A necessity and possibility of numerical experiment application during gas turbine engine designing is well-proven. The results of the numerical experiment allows to improve the construction of the low-emission combustion chamber of the gas turbine unit "Vodolej" of 16 MW capacity with ecological and energetic water steam injection, produced by GTR&PC "Zorya-Mashproekt" (Nikolaev). Developed practical recommendations for the GTE combustion chamber give an opportunity to increase the flame tube service life and resource of the whole engine consequently, decrease the quantity of the cooling air for the turbine blades, increasing the effectiveness of the engine at the same time, develop the new competitive constructions for the world market which correspond the international norms for harmful emissions.

Key words: combustion chamber, gas turbine engine, numerical methods, computer flow modeling, harmful emissions, nitrogen oxides.

Сербин Сергей Иванович – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры турбин Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: siserbin@yandex.ru.

Мостипаненко Анна Борисовна – ассистент кафедры турбин Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: shershniova@yandex.ru.