

# СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. И. Сербин, проф., д-р техн. наук;  
А. Б. Мостипаненко, канд. техн. наук

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы повышения экологической безопасности современных стационарных газотурбинных двигателей. Разработаны рекомендации по совершенствованию низкоэмиссионных камер сгорания, позволяющие создавать новые образцы продукции, удовлетворяющие международным нормам на выбросы токсичных компонентов.

**Ключевые слова:** камера сгорания, газотурбинный двигатель, экологические характеристики, токсичные компоненты.

**Анотація.** Розглянуто питання підвищення екологічної безпеки сучасних стаціонарних газотурбінних двигунів. Розроблено рекомендації з удосконалення низькоемісійних камер згорання, які дозволяють створювати нові зразки продукції, що задовольняють міжнародним нормам на викиди токсичних компонентів.

**Ключові слова:** камера згорання, газотурбінний двигун, екологічні характеристики, токсичні компоненти

**Abstract.** Problems of ecological safety improvement of the modern stationary gas turbine engines are considered. The recommendations for improvement of low-emission combustors are developed and allow to build up the modern products, which satisfy the international standards for toxic components emission.

**Keywords:** combustor, gas turbine engine, ecological characteristics, toxic components

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Применение газотурбинных установок является одним из перспективных направлений совершенствования стационарных энергетических систем. В настоящее время практически не существует альтернативы этим установкам как по мощностным, так и по габаритным показателям. В этой связи последнее десятилетие характеризуется интенсивным развитием газотурбостроения в передовых в техническом отношении странах мира, в том числе и в Украине.

Анализ, проведенный Межведомственной комиссией по промышленным газовым турбинам, показал, что разработка новых экологически чистых камер сгорания, технологий сжигания топлива и более совершенных методов расчета теплообмена в камерах сгорания — одни из самых актуальных направлений при создании ГТД нового поколения для газотранспортной системы Украины.

Основными требованиями к современным газотурбинным двигателям помимо эко-

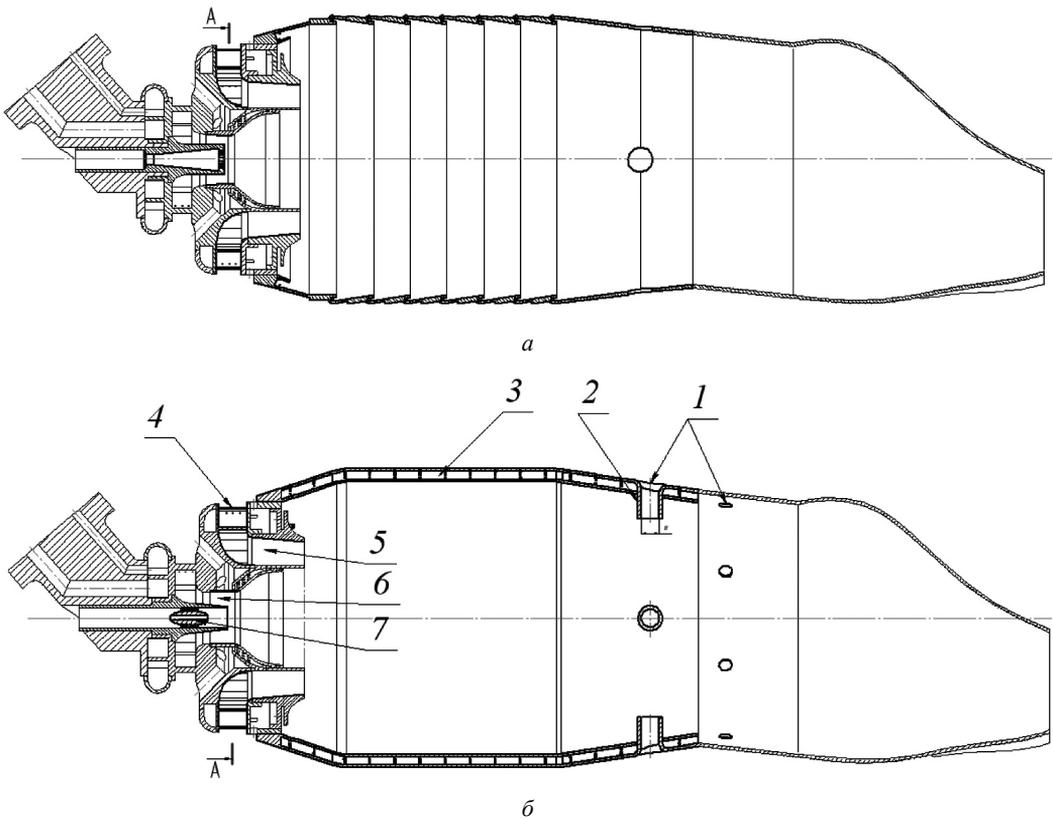
номичности, надежности и большого ресурса являются максимально низкий уровень выбросов вредных веществ и высокая стабильность работы топливосжигающих устройств [1–3]. В полной мере удовлетворить весьма жесткие ограничения на выбросы токсичных компонентов можно лишь путем создания так называемых низкоэмиссионных камер сгорания, в которых происходит горение обедненной топливоздушной смеси. Это обеспечивает снижение температуры в зоне горения камеры до 1950...1970 К, уменьшение области химического реагирования и соответственное снижение выбросов оксидов азота. Существенным недостатком таких камер сгорания является сужение диапазона устойчивой работы. Устранить его можно применением дежурного диффузионного

факела дополнительного топлива, который обеспечивает стабилизацию горения основной обедненной топливоздушной смеси.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — совершенствование характеристик низкоэмиссионной камеры сгорания с частичным предварительным перемешиванием топлива и воздуха для газотурбинного двигателя стационарного типа.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В качестве объекта исследования выбрана камера сгорания газотурбинного двигателя мощностью 25 МВт производства ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (Николаев) (рис. 1, *a*), в которой реализован принцип горения бедной частично перемешанной газозвушной смеси [3–5].



**Рис. 1.** Базовый (*a*) и модернизированный (*б*) варианты жаровой трубы газотурбинной камеры сгорания: 1 — отверстия вторичного воздуха; 2 — гильзы на отверстиях вторичного воздуха; 3 — конвективная система охлаждения жаровой трубы; 4 — межлопаточные каналы периферийного завихрителя; 5, 6 — выходные каналы периферийного и внутреннего завихрителей; 7 — дополнительный завихритель

Из результатов теоретических и экспериментальных исследований известно, что для режимов работы двигателя, близких к номинальному, характерно неблагоприятное распределение температур в выходном сечении камеры (максимальная неравномерность около 22 %), значения выбросов  $\text{NO}_x$  составляют 36 и 20 ppm на режимах  $0,8N_e$  и  $1,1N_e$ . Кроме того, отсутствие эффективного охлаждения выходного смесителя жаровой трубы и высокий уровень температур в районе стенки в условиях длительной эксплуатации могут привести к прогару жаровых труб камеры сгорания.

Авторами проведен анализ причин этих явлений с помощью трехмерного численного моделирования рабочего процесса в камере сгорания с использованием вычислительного комплекса ANSYS Fluent и модернизированных кинетических механизмов горения газообразного топлива с учетом образования токсичных компонентов [6, 7].

Результаты численного моделирования исходного варианта конструкции показали следующее:

в зону смешения камеры сгорания подается недостаточное количество вторичного воздуха. Это приводит к тому, что струи вторичного воздуха не осуществляют эффективное и равномерное разбавление продуктов сгорания и не достаточно глубоко проникают в радиальном направлении в горячее ядро потока;

коэффициент избытка воздуха для внутреннего завихрителя жаровой трубы составляет 1,39. Это вызывает повышение максимальной температуры газа в камере сгорания до 2340 К и создает благоприятные условия для образования термических оксидов азота и формирования горячего ядра потока в жаровой трубе;

коэффициент избытка воздуха для периферийного завихрителя составляет 2,3. Такое значение коэффициента в комбинации с заградительной системой охлаждения может негативно сказаться на выбросах оксида углерода и стабильности работы камеры сгорания и привести к возникновению режимов пульсационного горения, что наблюдалось в эксплуатационных условиях;

система охлаждения камеры спроектирована нерационально, что приводит к увеличению температуры стенки смесителя жаровой трубы.

Исходя из результатов математического моделирования предложены следующие направления улучшения характеристик низкоэмиссионной камеры сгорания:

снижение коэффициента избытка воздуха для периферийного завихрителя жаровой трубы до 2,1 с одновременным увеличением коэффициента избытка воздуха для внутреннего завихрителя до 1,6–1,7. Это позволит снизить максимальную температуру рабочего тела в камере сгорания, повысить устойчивость ее работы и уменьшить выбросы оксидов азота;

рациональное проектирование системы охлаждения стенок жаровой трубы, позволяющее снизить общий расход охлаждающего воздуха до 10 %;

увеличение расхода вторичного воздуха и обеспечение его рационального подвода в зону смешения;

установка дополнительного завихрителя для стабилизации процессов горения в жаровой трубе на всех режимах.

Для реализации направлений улучшения характеристик камеры сгорания в конструкции серийной жаровой трубы выполнены изменения (рис. 1, б). Отметим, что конструктивные изменения на этом рисунке показаны утолщенными линиями.

Площадь отверстий вторичного воздуха 1 увеличена. Это позволило повысить относительный расход вторичного воздуха с 15,7 до 19,4 %.

На первом ряду отверстий вторичного воздуха установлены специальные гильзы 2, что обеспечивает необходимую глубину проникновения струй вторичного воздуха в зону смешения в радиальном направлении.

Заградительная система охлаждения серийной жаровой трубы заменена конвективной 3, что позволило сократить относительный расход воздуха на охлаждение жаровой трубы с 11,4 до 10,2 %. Предложенная конвективная система охлаждения представляет собой кольцевой канал толщиной 5 мм, в который через 825 отверстий диаметром

0,8 мм подається воздух из міжтрубного пространства. Отверстия расположены равномерно в шахматном порядке.

В качестве материала стенки жаровой трубы выбран сплав ВЖ159 с рабочей температурой 1523 К. С внутренней стороны стенка канала имеет термобарьерное покрытие толщиной 500 мкм, представляющее собой диоксид циркония  $ZrO_2$ , стабилизированный пентаксидом иттрия  $Y_2O_5$ . Как известно из результатов расчетов, максимальная температура стенки жаровой трубы с керамическим термобарьерным покрытием ниже рабочей температуры сплава, что доказывает работоспособность данной системы охлаждения.

Сброс воздуха из кольцевого канала конвективной системы охлаждения в жаровую трубу происходит через торцевую щель за первым рядом отверстий вторичного воздуха и щели вокруг гильз на отверстиях вторичного воздуха, осуществляя тем самым их охлаждение.

Площадь проходного сечения межлопаточного канала периферийного завихрителя 4 увеличена за счет роста высоты лопаток и их поворота на 1,5 град. Аналогичным образом увеличена площадь выходного сечения канала 5 периферийного завихрителя. На 7% увеличена проходная площадь канала внутреннего завихрителя 6. Рост проходных сечений необходим для обеспечения рекомендуемых коэффициентов избытка

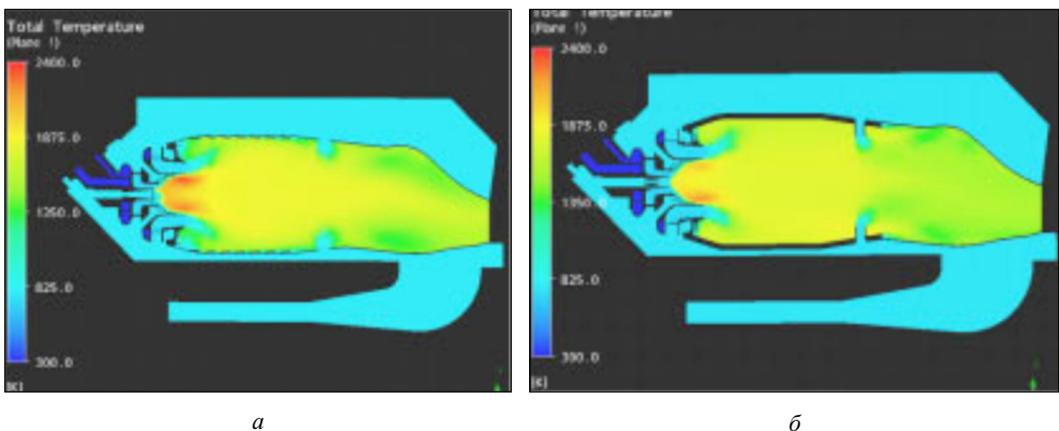
воздуха для периферийного и внутреннего завихрителей, которые равняются 2,11 и 1,7 соответственно.

В центральный канал внутреннего завихрителя вставлен дополнительный завихритель 7 с целью дополнительной стабилизации процессов в зоне горения.

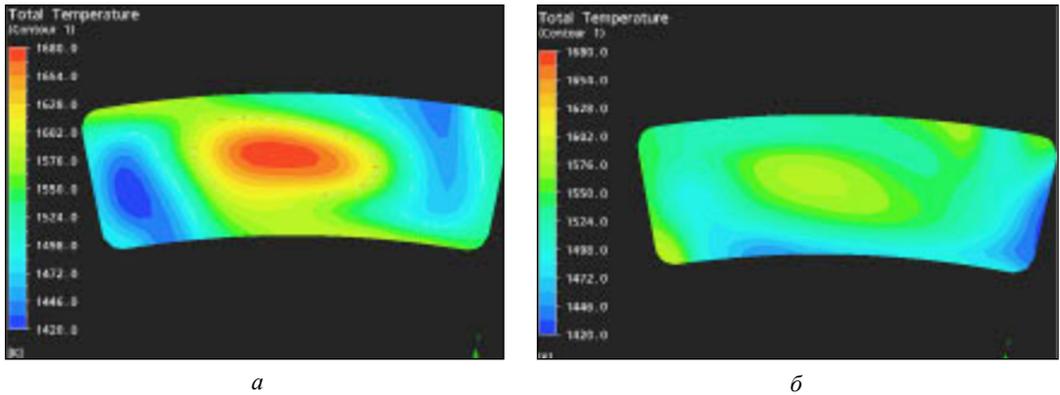
Общий расход газообразного топлива сохранен, но соотношение расходов топлива через внутренний и периферийный завихрители изменено таким образом, чтобы были достигнуты рекомендуемые коэффициенты избытка воздуха.

Проведенные трехмерные расчеты рабочего процесса в модернизированной камере сгорания ГТД позволили получить следующие результаты, свидетельствующие о значительном улучшении температурного режима и экологических характеристик камеры:

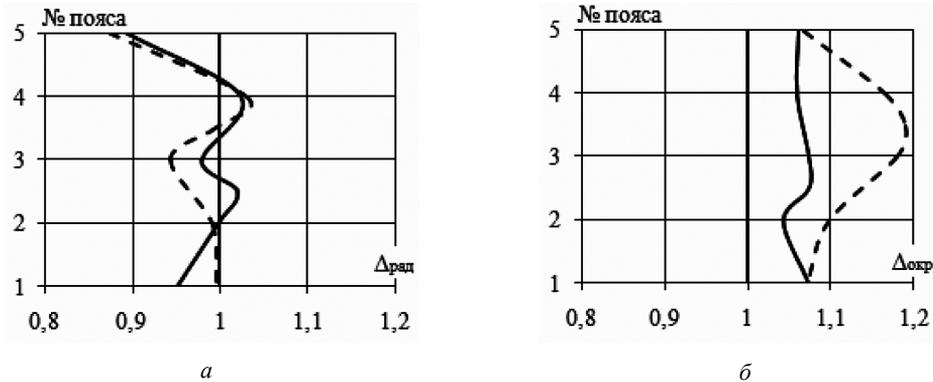
1. Максимальные температуры продуктов сгорания (рис. 2) в камере снижаются на 190 град (с 2340 до 2150 К) и, как следствие, эмиссия оксидов азота, по расчетным данным, уменьшается с 16 до 1 ppm при сохранении выбросов оксида углерода на прежнем уровне (около 10 ppm). Для данного режима работы камеры сгорания замеренные выбросы оксидов азота составляли 20 ppm. Соответствие расчетных и экспериментальных данных для базового варианта жаровой трубы позволяет утверждать, что и в условиях эксплуатации уровни вредных выбросов существенно сокра-



**Рис. 2.** Температурное поле в камере сгорания ГТД: *а* — исходный вариант конструкции; *б* — усовершенствованный вариант



**Рис. 3.** Температурное поле в выходном сечении камеры сгорания: *а* — исходный вариант конструкции; *б* — усовершенствованный вариант



**Рис. 4.** Неравномерность температурного поля в выходном сечении: *а* — радиальная (осредненная); *б* — окружная (максимальная); — усовершенствованный вариант конструкции; - - - исходный вариант конструкции

тятся. При проведении вычислений сделаны следующие допущения: расчеты выполнены для одной жаровой трубы, не учтены технологические отклонения при изготовлении, утечки рабочего тела через неплотности конструкции и неравномерность раздачи топлива по жаровым трубам. Исходя из изложенного, на двигателе можно прогнозировать снижение уровня выбросов оксида азота в 1,5–2,0 раза с сохранением величины выбросов CO.

2. Суммарный расход воздуха на охлаждение жаровой трубы в результате применения предложенной конвективной системы охлаждения снижается. Вследствие увеличения расхода вторичного воздуха и глубины его проникновения в жаровую трубу при использовании специальных гильз наряду с понижением максимальной температуры продуктов

сгорания уменьшается и окружная неравномерность температурного поля в выходном сечении — с 19 до 8,6 % (рис. 3, 4).

3. Границы устойчивой работы камеры сгорания в условиях обедненной топливовоздушной смеси расширяются за счет стабилизации горения при помощи дополнительного завихрителя.

4. Температурное поле в районе стенок выходного смесителя жаровой трубы более благоприятно за счет разделения отверстий подвода вторичного воздуха на два ряда и сброса воздуха из кольцевого канала конвективной системы охлаждения (рис. 5).

5. Потери полного давления в модернизированной камере сгорания несколько уменьшаются и составляют 5,72 % (в исходном варианте 6,11 %).

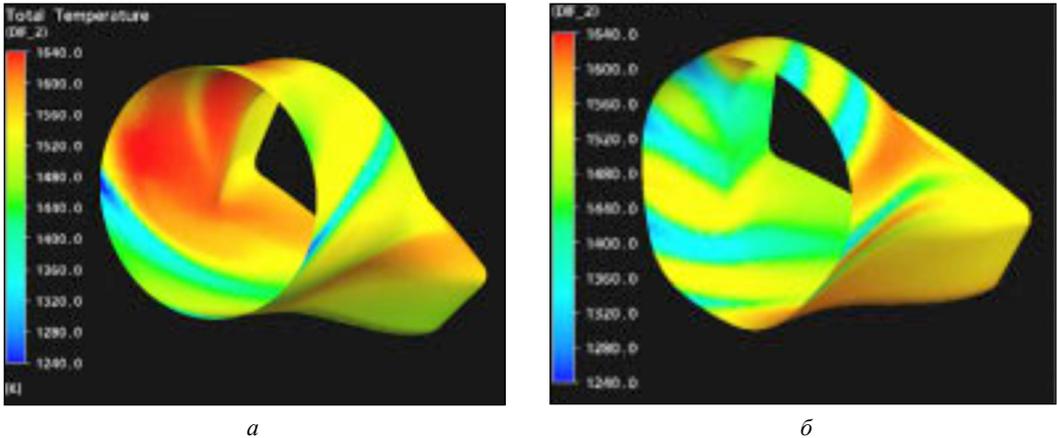


Рис. 5. Температурное поле возле внутренней стенки выходного смесителя: *a* — исходный вариант конструкции; *б* — усовершенствованный вариант

## ВЫВОДЫ

1. На основе результатов математического моделирования разработаны практические рекомендации по улучшению температурного режима и экологических характеристик камеры сгорания ГТД мощностью 25 МВт.

2. Рациональная организация рабочего процесса в камере сгорания обеспечит снижение уровня выбросов оксида азота в 1,5–2,0 раза с сохранением эмиссии оксида углерода и уменьшение потерь полного давления в камере на 7 % относительных.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Романовський Г.Ф., Сербін С.І. Екологічно чисті камери згоряння газотурбінних установок: Навчальний посібник. — Миколаїв: УДМТУ, 2002. — 84 с.
- [2] Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД; Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — 566 с.
- [3] Бондин Ю.И., Михайлов А.Б. Основные результаты опытно-промышленной эксплуатации ГТД ДН80Л на КС «Софиевская» // Судовое и энергетическое газотурбостроение. — Николаев: НПКГ «Зоря»–«Машпроект», 2004. — Т. 1. — С. 7–16.
- [4] Мостипаненко А.Б. Повышение экологической безопасности газотурбинных установок использованием технологии малоэмиссионного сжигания топлив // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв: НУК, 2007. — №1 (412). — С. 100–108.
- [5] Буданова Н.А., Ванцовский В.Г., Коротич Е.В. Создание низкоэмиссионных камер сгорания для газотурбинных двигателей ДН70, ДН80, ДБ90 // Судовое и энергетическое газотурбостроение. Т. 1: Научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки. — Николаев: НПКГ «Зоря»–«Машпроект», 2004. — С. 31–35.
- [6] Сербин С.И., Мостипаненко А.Б. Разработка математической модели образования загрязняющих веществ в камерах сгорания энергетических ГТУ // Техногенна безпека: Науково-метод. журнал. — Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2006. — № 49 (36). — С. 38–44.
- [7] Сербін С.І., Мостипаненко Г.Б. Числове моделювання процесів горіння в експериментальному відсіку гібридної камери згоряння ГТД потужністю 25 МВт // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Зб. наук. праць. — Х.: НТУ «ХПІ», 2006. — № 5. — С. 59–66.