

Варламов Г.Б., Камаев Ю.М., Позняков П.О., Юрашев Д.Н.

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

Особенности горелочной системы трубчатого типа для камеры сгорания газотранспортной установки

Рассмотрены вопросы компьютерного моделирования аэродинамических и тепловых процессов, протекающих в камере сгорания газотурбинной установки в составе газоперекачивающего агрегата типа ГТК-10 с горелочным устройством нового типа, разработанного на основе трубчатой технологии сжигания газа.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, трубчатая технология газосжигания.

Розглянуто питання комп'ютерного моделювання аеродинамічних та теплових процесів, що відбуваються у камері згоряння газотурбінної установки у складі газоперекачуючого агрегата типу ГТК-10 з палинковим пристроєм нового типу, розробленого на основі трубчастої технології спалювання газу.

Ключові слова: газотурбінний двигун, камера згоряння, трубчаста технологія спалювання газу.

В газотранспортной системе (ГТС) Украины в последние годы нарастает количество серьезных проблем, имеющих системный характер. Эксплуатация на компрессорных станциях (КС) морально устаревших и физически изношенных приводных газовых турбин с низким КПД на уровне 18–25 % приводит к большим затратам газа на собственные нужды. Низкий уровень экологической безопасности процессов сжигания приводит к значительным объемам выбросов вредных токсических веществ в окружающую природную среду, наличие неуправляемых аэродинамических и тепловых процессов в камерах сгорания сужает рабочие диапазоны стабильной работы агрегатов [1].

В связи с этим актуальной становится реконструкция и модернизация газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на компрессорных станциях за счет отечественных технологий с незначительным сроком окупаемости, который не должен превышать существующих нормативных значений.

Среди наиболее распространенных ГПА в составе КС на ГТС страны является агрегат типа ГТК-10 производства ЗАО «НЗЛ» (Санкт-Петербург, РФ) [2, 3].

Цель настоящей работы — определение эффективных приемов модернизации штатной камеры сгорания ГТК-10.

Был выполнен анализ возможности реализации существующих классических методов минимизации эмиссии оксидов азота и оксида углерода в процессе работы таких камер сгора-

ния в составе ГТУ. В том числе проанализирована возможность применения микрофакельной трубчатой технологии газосжигания, а также повышенного избытка первичного воздуха, предварительного смесеобразования прямо-точности движения смеси в зоне горения и внедрение новых конструктивных элементов в горелочном устройстве.

В качестве объекта исследований выбраны тепловые и аэродинамические процессы сжигания газообразного топлива в камерах сгорания газотранспортной установки (ГТУ) в составе ГПА типа ГТК-10. Учеными НТУУ «КПИ» разработаны и внедрены на реальных установках новые горелочные системы на основе трубчатой технологии газосжигания (ТТГ) [1–4]. Эта технология выбрана для проведения модернизации горелочной системы ГТУ для агрегата данного типа ГТК-10.

Исследование проводилось с помощью метода компьютерного моделирования теплообменных, аэродинамических процессов и процессов смесеобразования, а также натуральных изменений параметров работы ГПА в период эксплуатации агрегата. Данный подход хорошо зарекомендовал себя в предыдущих испытаниях [4], где была отмечена высокая точность определения основных характеристик тепловых и аэродинамических процессов в КС (погрешность составляет менее 5 %) и сравнения результатов с данными, полученными в натурном эксперименте.

Исследование аэродинамических процессов в модернизированной камере сгорания

Суть модернизации состояла в замене штатного горелочного устройства регистрового типа на горелочное устройство трубчатого типа. Общий вид фронтального устройства, созданного на базе трубчатой технологии в составе камеры сгорания ГТК-10, приведен на рис.1. Горелочная система трубчатого типа выполняет функции такие же, как и в штатной камере сгорания.

Моделирование горелочной системы, аэродинамических и тепловых процессов в камере сгорания проведено с помощью программного продукта SolidWorks и расчетного модуля Flow-Simulation.

Для исследования и анализа процессов в жаровой трубе были выбраны характерные плоскости фронтальных сечений (рис.2), которые размещены в соответствии с плоскостями сечения в камере сгорания со штатной горелочной системой регистрового типа. Это позволило провести сравнительный анализ и выявить особенности каждой горелочной системы.

Тестирование модели проходило на основе проведенных предварительных исследований данной камеры сгорания со штатной горелочной системой регистрового типа [2]. Кроме того, моделирование осуществлялось с проведением предварительных определений основных величин, характеризующих аэродинамические и тепловые поля для штатной системы, и сопоставлением их с данными, полученными при исследованиях для горелочной системы трубчатого типа [5]. Относительная погрешность определений этих величин не превышает 8 % [2].

Исследование аэродинамических процессов в камере сгорания

Исследовались аэродинамические и тепловые процессы в модернизированной камере сго-

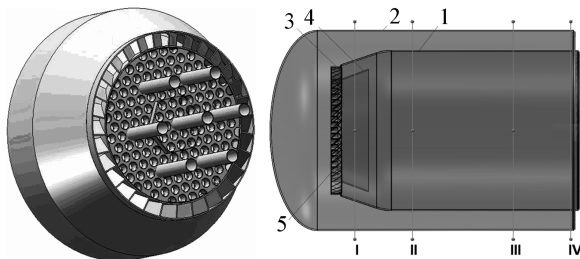


Рис.1. Общий вид модернизированного варианта горелочной системы трубчатого типа в составе ГТУ для ГПА типа ГТК-10.

Рис.2. Расположение плоскостей фронтальных сечений (I–IV) в камере сгорания: 1 – жаровая труба; 2 – корпус; 3 – большой воздушный регистр; 4 – стабилизатор; 5 – горелочная система трубчатого типа.

рания ГТУ с горелочной системой трубчатого типа в составе ГПА типа ГТК-10 для номинального режима работы.

Важной аэродинамической характеристикой фронтальной части камеры сгорания ГТУ является аэродинамическое сопротивление движению воздушного потока и потеря давления воздуха на входе в камеру сгорания ГТУ. Исследование этих характеристик на модели и сопоставление результатов с другими источниками свидетельствуют о высокой точности расчетов на модели (табл.1).

Таблица 1. Сводные результаты определения аэродинамических величин

Величины	Расчет [6]	Модель	Относительная погрешность, %
Коэффициент закрытия потока K_f	0,00066	0,00066	0
Коэффициент местного сопротивления ξ	0,52	0,52	0
Перепад давления ΔP (Па)	8564	8617	0,06

Для оценки потерь давления воздушного потока на входе в жаровую трубу проведены расчеты коэффициентов, характеризующих аэродинамические показатели [6].

Исследования на модели полей скорости газового потока позволило определить основные аэродинамические особенности трубчатой горелочной системы.

Поля скоростей в камере сгорания с фронтальным устройством, выполненным на основе ТТГ, характеризуются высокой степенью однородности, абсолютные значения скоростей в центре камеры сгорания и на периферии рядом с стенкой жаровой трубы имеют незначительные расхождения. Небольшая кольцевая область пониженных значений скоростей в начальной зоне жаровой трубы вызвана наличием стабилизатора, и разница в этих значениях размывается и нивелируется на выходе из камеры сгорания (рис.3).

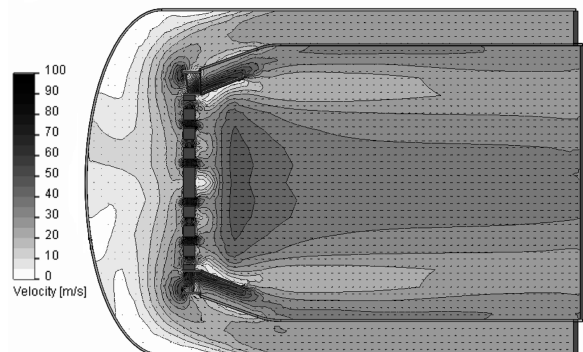


Рис.3. Распределение скоростей (фронтальный разрез).

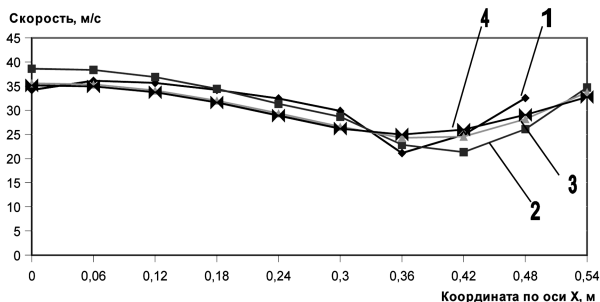


Рис.4. Скорость движения газовой смеси в контрольных точках на фронтальных сечениях: 1 – I; 2 – II; 3 – III; 4 – IV.

Например, для фронтального сечения II (на рис.2, на расстоянии $L/D = 0,17$ от фронтальной зоны подачи воздуха и топлива) скорость в центре жаровой трубы (по оси X) около 38 м/с, а в пристенной зоне у поверхности жаровой трубы ее значение составляет 26–34 м/с, равной $S_H = 10\%$ неравномерности поля скоростей:

$$S_H = (W_{max} - W_{min}) / W_{cp},$$

где W_{max} , W_{min} , W_{cp} – скорости газа максимальная, минимальная и средняя соответственно.

Для фронтального сечения IV на выходе газового потока из жаровой трубы КС максимальное и минимальное значения соответственно 35 и 32 м/с, что составляет 8,5 % неравномерности (рис.4).

В отличие от штатного фронтального устройства трубчатая горелка не имеет малых регистров, а следовательно, не создает дополнительных закруток потока, которые приводили в штатной КС к неравномерности поля скоростей. Стабилизатор создает необходимый заслон для микрофакельного сжигания смеси. В данной камере сгорания также отсутствуют области резкого замедления потока и неравномерности скоростей (рис.4).

Расположение точек измерения скорости потока по поперечному сечению жаровой трубы приведено на рис.5. Максимальный перепад скорости в сечении достигает 10,33 м/с, что в 4 раза меньше соответствующего значения в данном сечении для штатной камеры сгорания.

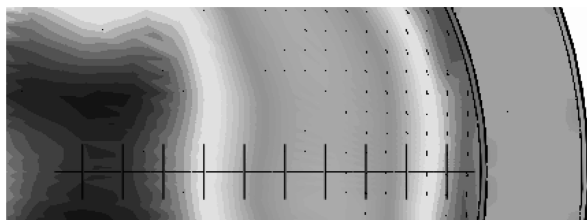


Рис.5. Размещение точек измерения температуры и скорости потока на выходе из камеры сгорания.

Важными также являются результаты исследований процессов смесеобразования в камере сгорания, которые являются основой процессов сжигания газовой смеси.

Главной идеей создания горелочной системы трубчатого типа является обеспечение процесса микрофакельного горения природного газа с наличием большого числа диффузионных микрофакелов, количество которых определяется количеством газовых отверстий на поверхности рабочей стенки, что обеспечивает высокий уровень выгорания топлива, высококачественное и экологически безопасное сжигание газозвоздушной смеси.

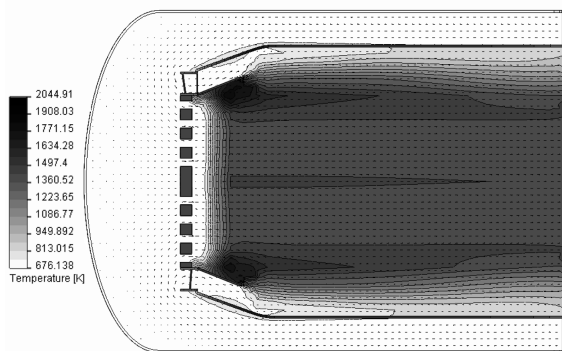


Рис.6. Поле температур в жаровой трубе с горелочной системой трубчатого типа.

Исследования на модели массовых долей воздуха и топливного газа во фронтальных сечениях камеры сгорания обнаружили, что локальная подача топлива через отверстия в наружной трубной доске в комбинации с шахматным расположением воздушных трубок более эффективна, чем централизованная подача топлива с последующим ее перемешиванием с воздухом в объеме штатной камеры сгорания.

Установлено также достаточно качественное перемешивание газа и воздуха уже на расстоянии около 50 мм от наружной трубной доски. В местах образования мелких факелов воздух распределяется равномерно. Не выявлено предпосылок к механической и химической неполноте сгорания, а следовательно, есть возможность утверждать, что горелочные системы трубчатого типа создают предпосылки для уменьшения образования СО по сравнению со штатным горелочным устройством. Перечисленные условия оказывают положительное влияние на экологические показатели работы установки и повышение ее КПД за счет более полного использования химической энергии топлива.

Исследование тепловых процессов в камере сгорания

Модель позволила осуществить анализ тепловых процессов и проанализировать передачу

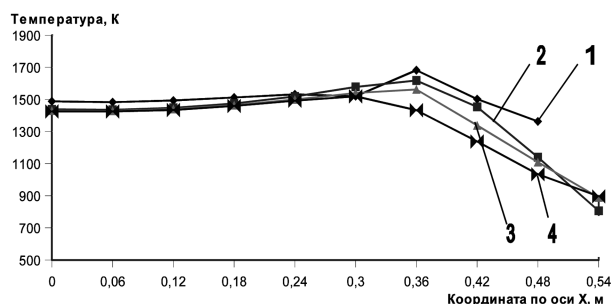


Рис. 7. Температура газовой смеси в контрольных точках на фронтальных сечениях: 1 – I; 2 – II; 3 – III; 4 – IV.

теплоты конвекцией и лучистым теплообменом при сжигании природного газа (рис. 6).

Таким образом, конструкция горелочного устройства трубчатого типа позволяет обеспечить микрофакельное горение природного газа и получить поле температур высокой равномерности в сечении жаровой трубы (рис. 7).

Максимальная температура в ядре факела значительно меньше температуры факела в штатном фронтальном устройстве $T_{3\max} \approx 1700$ К и не превышает 1500 К. Следствием этого ожидается значительное снижение эмиссии термических NO_x [5].

Сопоставляя изотермы на основе компьютерного моделирования камеры сгорания газотурбинной установки в составе ГПА типа ГТК-10 с штатным горелочным устройством и с горелочным устройством трубчатого типа (рис. 8) можно сделать следующие выводы:

- температура в центре жаровой трубы значительно ниже соответствующей температуры штатной горелки регистрового типа;
- перепад температур во фронтальном сечении на выходе из камеры сгорания не превышает 300 К по всей плоскости сечения, что позволяет получить высокий уровень равномерности температуры газового потока на входе в лопаточный аппарат;

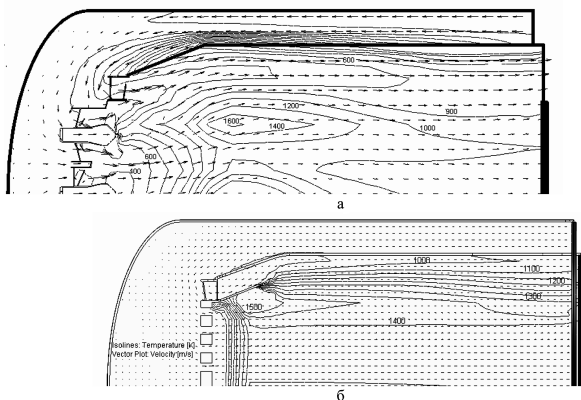


Рис. 8. Изотермы в камере сгорания с горелочной системой разных типов: а – штатной [2]; б – трубчатой.

- поля скоростей газовых потоков по поперечному сечению жаровой трубы и в осевом направлении от фронтального устройства к выходу из камеры сгорания характеризуются значительной однородностью;

- конструкция горелочного устройства трубчатого типа характеризуется сниженным значением аэродинамического сопротивления фронтального устройства камеры сгорания на 30–35 % по сравнению со штатным устройством.

Заключительные положения

Сравнение результатов исследований на 3-мерной теплофизической модели горелочного устройства трубчатого типа с исследованиями штатной горелочной системы в идентичных условиях [2, 3, 5] подтверждают преимущества трубчатой технологии газосжигания по сравнению со штатными регистровыми горелочными системами, которые заключаются в следующем:

- уровень равномерности температуры в поперечном разрезе жаровой трубы и вдоль ее длины от фронта до выхода на лопатки турбины высокого давления значительно выше характеризуется неравномерностью на уровне 5–8 %;
- температурные градиенты от центра жаровой трубы к ее стенке существенно снижены и не превышают 5%;
- поле скоростей во всем объеме жаровой трубы характеризуется повышенной равномерностью, а именно: отклонение значений скорости в центре и на периферии жаровой трубы не превышает 10 %;
- отсутствуют зоны с повышенными значениями температуры, низким значением скорости, что способствует снижению эмиссии вредных оксидов азота;
- обеспечение микродиффузионного смешения и горения топливовоздушной смеси по всему поперечному сечению жаровой трубы позволяет достичь высококачественного режима сгорания топлива с нейтрализацией условий образования оксида углерода.

Выводы

Полученные результаты исследований аэродинамических и тепловых особенностей работы камеры сгорания с горелочной системой трубчатого типа свидетельствуют о наличии комплекса положительных эффектов, которые позволяют повысить уровень эффективности и экологической безопасности эксплуатации с одновременным удлинением рабочего моторесурса ГПА за счет осуществления краткосрочной и малозатратной модернизации горелочной

системи з використанням трубчастої технології газосжигання.

Список літератури

1. Халатов А.А., Долинский А.А., Костенко Д.А., Парафейник В.П. Состояние и проблемы развития механического привода для ГТС Украины // Пром. теплотехника. — 2010. — Т. 32, № 1. — С. 44–53.
2. Сударев А.В., Антоновский В.И. Камеры сгорания газотурбинных установок : Теплообмен. — Л. : Машиностроение, 1985. — 272 с.
3. Сторожук Я.П. Камеры сгорания стационарных газотурбинных и парогазовых установок. — Л. : Машиностроение, 1978. — 231 с.
4. Варламов Г.Б., Позняков П.О., Юрашев Д.М. Комплексні дослідження енергоекологічних показників експлуатації ГТУ у складі газоперекачувального агрегату типу ГТК-10 «Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит». — 2012. — Т. 95, № 1. — С. 15–24.
5. Варламов Г.Б., Марчук Я.С., Беккер М.В. и др. Трубчаста технологія газоспалювання — прорив у енергозбереженні та екологічності транспортування природного газу // Нафтогазова енергетика. — 2010. — № 1. — С. 60–63.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М. : Машиностроение, 1992. — 672 с.

Поступила в редакцію 02.02.12

**Varlamov G.B., Kamaev Yu.M.,
Poznyakov P.O., Yurashev D.N.**

National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev

**The Features of Tubular Type Burner System
for Combustion Chamber Gas Transporting Unit**

The problems of computer simulation of aerodynamic and thermal processes in gas turbine combustion chamber in gas-pumping unit of GTK-10 type with new type of burner device developed on the basis of tubular gas combustion technology basis are considered.

Key words: gas turbine engine, combustion chamber, tubular gas combustion technology.

Received February 2, 2012

з 10 квітня!

Передплатіть наше видання на II півріччя 2012 року!

У кожному поштовому відділенні України!

А також на сайті **www.presa.ua**

Подписывайтесь на журнал
**«Енерготехнології
и ресурсозбереження»**
(индекс 74546)

на II полугодие 2012 г.
по Каталогу изданий Украины,
Каталогу Агентства «Роспечать»,
Сводному Каталогу агентства
«УКРИНФОРМНАУКА»

**Информацию о журнале
и правилах оформления статей
можно найти на сайтах:**

<http://www.ingas.org.ua/index.files/Page765.html>
<http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/ETRS/index.html>