DOI: 10.15593/2224-9982/2015.41.03

УДК 681.785.55:621.438

**И.Т. Губайдуллин¹, Т.П. Андреева¹,
А.Р. Гумеров¹, А.Н. Саженов²**

¹ АО УНПП «Молния», Уфа, Россия

² ОАО «Авиадвигатель», Пермь, Россия

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Оптико-электронный спектрометрический комплекс представляет собой инновационное инструментальное средство, предназначенное для бесконтактного дистанционного контроля процессов горения в модельных установках, камерах сгорания газотурбинных двигателей, газотурбинных установках.

Комплекс обеспечивает непрерывное преобразование электромагнитной энергии излучения пламени в заданном спектральном диапазоне в электрические сигналы для последующей передачи в реальном масштабе времени этих сигналов к автоматизированной системе испытаний. Комплекс позволяет с высокой разрешающей способностью контролировать спектральное распределение, интенсивность излучения пламени, в том числе на участках спектра, где имеет место собственное излучение 2–4 атомных газов (NO, NO₂, NO₃, CN, CO, CO₂).

Возможности данного инструментального средства получать объективную информацию, характеризующую эмиссию вредных веществ в зависимости от изменения режима работы камеры сгорания, представляются исключительно полезными при экспериментальном исследовании малоэмиссионных камер сгорания.

В статье изложены основные результаты работ по созданию экспериментального образца спектрометрического комплекса.

Ключевые слова: спектрометрический комплекс, процессы горения, камера сгорания, газотурбинный двигатель, мониторинг процессов горения.

**I.T. Gubaidullin¹, T.P. Andreeva¹,
A.R. Gumerov¹, A.N. Sazhenkov²**

¹ JSC USPE "Molniya", Ufa, Russian Federation

² OJSC "Aviadvigatel", Perm, Russian Federation

OPTICAL-ELECTRONIC SPECTROMETRIC SYSTEM FOR MONITORING COMBUSTION PROCESSES IN THE COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINE

The optical-electronic spectrometric system is an innovative tool designed to remotely monitor combustion processes in model units, combustion chambers of gas turbine engines and gas turbines.

The system provides continuous transformation of electromagnetic energy of flame radiation within a given spectral range into electrical signals in order to transmit these signals to the automated

test system in real time. The system allows high resolution monitoring of the spectral distribution and intensity of the flame radiation including the spectrum portions of the 2–4 atom gases own radiation (such as NO, NO₂, NO₃, CN, CO, CO₂).

This tool possibility to obtain objective information on the harmful substances emission, depending on the combustion chamber operation mode, seems to be extremely useful in experimental study of low-emission combustors.

This article describes the main results on development of experimental prototype of the spectrometric system.

Keywords: spectrometric system, combustion processes, combustion chamber, gas turbine engine, monitoring of combustion processes.

Введение

Глобальная тенденция по увеличению количества технических объектов, способствующих повышению суммарных выбросов вредных веществ в атмосферу, неизбежно ведет к ужесточению требований к экологическим характеристикам создаваемых авиационных газотурбинных двигателей и энергетических газотурбинных установок.

Ведущие иностранные производители турбомашин за последние 10–15 лет получили конкурентные преимущества за счет применения технологии малоэмиссионного сжигания [1, 2]. Создание малоэмиссионных камер сгорания (МЭКС) позволило General Electric, Pratt & Whitney, Rolls-Royce Plc., Solar, Siemens предлагать заказчикам продукцию, удовлетворяющую требованиям международных экологических стандартов [3, 4].

Многие целевые программы (ESPR, ECO, HSR, ERA, LEAP56, CLAIRE), в которых участвуют передовые зарубежные производители ГТД, предусматривают комплекс НИОКР, ориентированных на широкое и активное применение целого арсенала инструментальных средств для исследования теплофизических и газодинамических процессов.

Для сохранения конкурентоспособности необходимо создание ряда отечественных МЭКС и оснащение ими ГТУ 4, 5 и 6-го поколений [5, 6]. Сложившееся техническое отставание в технологии малоэмиссионного горения создает реальные угрозы вытеснения из авиационного и топливно-энергетического комплексов отечественных ГТД, ГТУ, имеющих высокую топливную экономичность, но неудовлетворительные параметры эмиссии.

Уже на начальных этапах разработки технологии малоэмиссионного горения выявилась проблема, существенно затрудняющая процесс создания отечественных МЭКС, – отсутствие промышленно освоенных, высокоинформативных средств контроля горения, пригодных

для применения в натурных условиях. Ретроспективный обзор публикаций в отечественных и зарубежных научно-технических изданиях, анализ информации из различных источников [7–9] показывает устойчивую тенденцию к активному применению оптических и спектральных методов исследования многофазных нестационарных физико-химических процессов, носящих существенно турбулентный характер. Оптические методы исследования пламен позволяют производить измерения, не нарушая газодинамической, тепловой и химической структуры исследуемой многофазной среды. Поскольку спектральный состав излучения пламени несет информацию о протекающих химических реакциях, то имеется возможность определять состав, количество промежуточных, конечных продуктов горения, их пространственное распределение, оценивать температуру, давление наблюдаемого объема.

В этой связи крайне актуальной является задача создания отечественных средств, позволяющих в реальном масштабе времени, с высоким разрешением и быстродействием, достоверно, не внося искажений в газовый поток, исследовать внутрикамерные процессы горения.

Постановка задачи

По заказу ОАО «Авиадвигатель» в АО УНПП «Молния» (г. Уфа) был разработан и изготовлен экспериментальный образец бесконтактной оптико-электронной аппаратуры – портативный спектрометрический комплекс.

Комплекс представляет собой *системно интегрированный инновационный продукт*, состоящий из оптического зонда, мини-спектрометра, портативного компьютера (ПК) со специализированным программным обеспечением (ПО) и набора излучателей для периодической калибровки и метрологической аттестации.

Для эффективного применения спектрометрической аппаратуры необходимо решить ряд практических задач. К первоочередным задачам можно отнести следующие:

- выбор способа оптического доступа к внутреннему объему камеры сгорания для приемлемого визирования наиболее значимой информативной зоны (объема) пламени;
- обеспечение работоспособности объектива, смонтированного на посадочные гнезда внешнего корпуса камеры сгорания, защиты наружной поверхности объектива от отложения продуктов сгорания.

Основные технические характеристики экспериментального образца спектрометрического комплекса

Экспериментальный образец спектрометрического комплекса, внешний вид которого представлен на рис. 1, состоит из ряда модулей:

- термостойкого оптического зонда с линзовой или апертурной лейкоапфировой, кварцевой оптикой, обеспечивающей прием и передачу электромагнитного излучения в спектральном диапазоне от 0,2 до 2,4 мкм;

- портативного мини-спектрометра, обеспечивающего получение спектров в одном из следующих диапазонов: 0,2–0,8 мкм; 0,32–1,0 мкм; 0,5–1,1 мкм; 0,9–2,55 мкм;

- портативного компьютера в пылевлагоударозащищенном исполнении со специализированным ПО, поддерживающим дружественный графический интерфейс пользователя.

Блочно-модульная конструкция предусматривает возможность последующей модернизации комплекса путем замены отдельных модулей (объектива, световода, мини-спектрометра, ПО) на более совершенные по техническим характеристикам.

Рис. 1. Опико-электронный спектрометрический комплекс: 1 – оптический зонд с кварцевым моноволоконным световодом; 2 – комплект сменных объективов с разными параметрами визирования; 3 – мини-спектрометр с унифицированным оптическим входом и выходным цифровым USB-интерфейсом; 4 – ПК с прикладным ПО; 5 – излучатель для калибровки и метрологической аттестации

Основной хай-тек-компонент комплекса – мини-спектрометр – представляет собой модуль, изготовленный по инновационной МЭМС-технологии без применения механических сканирующих устройств, что позволяет эксплуатировать его в условиях испытательных стендов.

На рис. 2 представлена принципиальная оптическая схема мини-спектрометра фирмы Hamamatsu, поясняющая инновационный уровень хай-тек-компонента.

Рис. 2. Принципиальная оптическая схема мини-спектрометра фирмы Hamamatsu Photonics

Излучение из камеры сгорания (свет) проходит через узкую входную щель, затем попадает на диспергирующий элемент – дифракционную решетку, на которой происходит дифрагирование (разложение) излучения в оптический спектр. Дифрагированный спектр попадает на многоэлементный фотоприемник – линейку фотодиодов, представляющих комплементарный металлооксидный полупроводник – (КМОП), выполненный по CMOS-технологии. Линейка фотодиодов представляет собой структурированный кластер, содержащий большое количество пикселей, в каждом из которых находится фотодиод. Размеры линейки определяет охватываемый спектральный диапазон, а размер пикселей определяет спектральное разрешение. Подобная конструкция обеспечивает разрешение по длине волны на уровне 0,3–10 нм. Сигналы от каждого фотодиода воспринимаются микроэлектронными устройствами, обрабатываются в реальном масштабе времени встроенным микроконтроллером, потоковые цифровые сигналы структурируются и передаются через USB-интерфейс в ПК, где подвергаются дальнейшим преобразованиям, обеспечивающим визуализацию, регистрацию.

Функциональные возможности спектрометрического комплекса

Спектрометрический комплекс позволяет:

- осуществлять непрерывное преобразование электромагнитной энергии теплового излучения пламени в электрические сигналы в реальном масштабе времени;
- формировать оптический спектр, распределение принятого излучения в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах;
- осуществлять программно задаваемые настройки режимов обработки сигналов от линейки фотодиодов (диапазон сканирования, спектральное разрешение, время накопления), компенсацию влияния спектра фонового излучения, коррекцию формы полученного спектра, представляющего собой свертку исследуемого спектра пламени со спектральной чувствительностью аппаратуры (спектральные характеристики оптического зонда, линейки фотодиодов);
- проводить расчетные оценки текущей неравновесной температуры пламени в визируемом объеме по методикам пирометрии спектрального распределения;
- обнаруживать розжиг и погасание пламени;
- осуществлять прием, обработку в реальном масштабе времени информации, визуализацию, архивирование, передачу принятых и обработанных сигналов в цифровом виде по сетевому интерфейсу Ethernet в автоматизированную систему управления верхнего уровня.

Объектив зонда визирует пламя через отверстия штатных лючков для эндоскопического осмотра либо через отверстие специального посадочного гнезда.

Визируемая объективом область составляет 10–15 % от внутреннего объема камеры сгорания. Область, объем визирования может варьироваться за счет применения съемных объективов с различными параметрами визирования. Конструкция оптического зонда позволяет оперативно устанавливать объективы в любые свободные лючки на внешнем корпусе камеры сгорания.

Один из примеров размещения и визирования пламени объективом оптического зонда на корпусе камеры сгорания приведен на рис. 3.

Размещение объектива зонда на модельной установке камеры сгорания аналогично монтажу оптико-электронной системы ОЭС-2011.

Рис. 3. Схема размещения и визирования пламени объективом оптического зонда:
1 – объектив; 2 – гибкий металлорукав оптического зонда; 3 – внешний корпус камеры сгорания; 4 – конус визирования; 5 – главная оптическая ось объектива

На рис. 4–6 представлены примеры зарегистрированных спектров излучения ламинарного пламени горения углеводородного топлива, газоразрядной лампы, предназначенной для калибровки спектрометрической аппаратуры и искровой запальной свечи.

Рис. 4. Спектры излучения пламени углеводородного топлива, измеренные в диапазоне длин волн от 300 до 800 нм при визировании на различные области по оси факела пламени при нормальном атмосферном давлении

Рис. 5. Спектр излучения газоразрядной (дейтериевой) лампы, измеренный в диапазоне длин волн от 300 до 800 нм

Рис. 6. Спектр излучения искровой запальной свечи при нормальном атмосферном давлении

Динамика изменений формы спектра, интенсивность излучения на отдельных участках спектра характеризуют наличие, концентрацию, кинетику химических соединений, присутствующих в пламени. Форма спектра характеризует как состав газообразных химических соединений, фазовый состав (аэрозоли, твердые включения), так и неравновесную температуру пламени.

Представляется целесообразным исследование тонкой структуры спектра излучения пламени в камерах сгорания ГТД, ГТУ с помощью спектрометрической аппаратуры. Интенсивность излучения пламени именно на тех участках спектра, которые характерны для излучения вредных газов в выбросах из камеры сгорания, таких как NO_x , CO ,

CO₂, позволят получать информацию об их наличии, концентрации, а также об их изменениях в зависимости от текущего режима работы камеры сгорания.

Спектрометрический комплекс позволяет измерять спектры испускания, поглощения и отражения. В процессе измерений можно в интерактивном режиме выполнять обработку сигнала:

- компенсировать влияние темнового тока;
- сглаживать и усреднять спектры.

Способ обработки можно выбирать в режиме мониторинга, когда на экран непрерывно выводятся необработанные данные. Отображение данных в реальном времени позволяет оценить работу комплекса, эффективность выбранных алгоритмов, а также оперативно изменить настройки, сразу же увидеть результат изменения и при необходимости сохранить данные. Программное обеспечение спектрометрического комплекса обладает гибкостью в работе, позволяет проводить кинетические измерения. Режим временной диаграммы позволяет контролировать отдельные поддиапазоны длин волн. Одновременно с этим можно регистрировать различные виды опорного сигнала: интенсивность на одной длине волны, интегральную интенсивность в выбранном диапазоне. Появляется возможность непрерывного контроля химического состава, и, что особенно важно, возникают дополнительные возможности для идентификации математических моделей горения. В случае реализации опционной функции определения температуры по спектральному распределению интенсивности излучения пламени по методике, представленной в работе [10], возможна осредненная оценка симптоматических факторов, характерных для механизма образования NO_x в различных зонах горения.

Фирменное ПО изготовителя мини-спектрометра обеспечивает управление всеми функциями спектрометрического комплекса, включая сбор данных, отображение и обработку спектров. Все настройки можно сохранять для использования в последующих экспериментах. Возможно программное управление синхронизацией с различными внешними событиями, например генерацией импульса от лазерного излучателя, включением источника света. Имеются возможности по сохранению полученных результатов, можно независимо сохранять и загружать данные по темновым токам фотоприемника, опорные, необработанные и обработанные спектры. При сохранении данных на

диск ПК возможна автоматическая генерация имен файлов. Также возможен экспорт файлов зарегистрированных спектров в другую программу, например Excel или Word.

Ближайшие испытания предусматривают экспериментальную проверку спектрометрического комплекса на модельных испытательных установках ОАО «Авиадвигатель» (одногорелочный отсек, полно-размерная камера сгорания и т.д.). На первом этапе исследований предстоит выявить наиболее информативные зоны горения, определить значения апертурных углов широкоугольного и коллимирующего объективов для оптимального визирования исследуемого пламени.

Заключение

1. В интересах ОАО «Авиадвигатель» разработан экспериментальный образец оптико-электронного спектрометрического комплекса, который представляет собой удобный (бесконтактный, портативный) высокоинформативный инструмент исследования, не требующий длительного, трудоемкого препарирования объекта испытания.

2. Возможности спектрометрического комплекса позволяют непрерывно контролировать внутрикамерные процессы и извлекать информацию о составе, концентрациях химических соединений, определяющих эмиссию, о текущем значении неравновесной температуры пламени.

3. Лабораторные проверки комплекса продемонстрировали высокие потенциальные возможности комплекса как исследовательского инструмента. Функциональные характеристики экспериментального образца комплекса показали возможность регистрации розжига, погасания пламени, параметров искровых разрядов запальной свечи.

Библиографический список

1. Фаворский О.Н. Проблемы разработки технологий малоэмиссионного горения и создания малоэмиссионных камер сгорания в газотурбостроении // Двигатель. – 2012. – № 6(84). – С. 6–9.

2. Кузнецов Н.Д., Токарев В.В. Многогорелочные камеры сгорания – одно из перспективных направлений развития двигателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 2. – С. 312.

3. Борщанский В.М. Анализ возможных конструкторских решений при создании камер сгорания для обеспечения высоких экологиче-

ских характеристик конвертированных ГТУ // Двигатель. – 2009. – № 4(64). – С. 14–16.

4. More Intelligent Gas Turbine Engines. RTO Technical Report TR-AVT-128 / RTO NATO. – France, 2009. 178 p.

5. Иноземцев А.А. О программе создания авиационных газотурбинных двигателей пятого поколения для семейства самолетов МС-21 // Вестник Перм. науч. центра. – 2010. – № 4. – С. 28–46.

6. Организация горения в низкоэмиссионной камере сгорания ГТУ АЛ-31СТ / В.М. Чепкин, Е.Ю. Марчуков, В.В. Куприк, С.А. Федоров // Газотурбинные технологии. – 1999. – № 09–10. – С. 14–17.

7. Травников Р.И., Попов Н.А. Метод и аппаратура оптической диагностики факела ракетного двигателя при стендовых испытаниях [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – № 51. – URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29136> (дата обращения: 10.03.2015).

8. Rapiere: An innovation industrial optical measurement system for scramjet flows / J-P. Minard, M. Bouchez, O. Legras [et al.] // AIAA Papers. – 2002. – AIAA-2002-5156.

9. Приборы для исследования сажеобразования в вихрекамере дизельного двигателя / В.В. Бразовский, Г.М. Кашкаров, Д.Н. Титов, Н.П. Тубалов // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1. – С. 188–191.

10. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия объектов с неоднородной температурой // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, вып. 7. – С. 78–82.

References

1. Favorskiy O.N. Problemy razrabotki tekhnologiy maloemissionnogo goreniya i sozdaniya maloemissionnykh kamer sgoraniya v gazoturbostroenii [Problems of development of low-emission combustion technology and low-emission combustors in gas turbine construction]. *Dvigatel*, 2012, no. 6(84), pp. 6-9.

2. Kuznetsov N.D., Tokarev V.V. Mnogogorelochnye kamery sgoraniya – jedno iz perspektivnykh napravleniy razvitiya dvigateley [Multiburner combustion chambers as one of the promising trends in engine development]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 1995, no. 2, pp. 312.

3. Borshchanskiy V.M. Analiz vozmozhnykh konstruktorskikh resheniy pri sozdanii kamer sgoraniya dlya obespecheniya vysokikh ekologicheskikh kharakteristik konvertirovannykh GTU [Analysis of possible design solutions when developing combustion chambers to ensure good environmental characteristics of converting gas-turbine units]. *Dvigatel*, 2009, no. 4(64), pp. 14-16.

4. More Intelligent Gas Turbine Engines. RTO Technical Report TR-AVT-128. RTO NATO. France, 2009. 178 p.

5. Inozemtsev A.A. O programme sozdaniya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley pyatogo pokoleniya dlya semeystva samoletov MS-21 [About the program of development of the fifth generation aircraft gas turbine engines for the MC-21 aircraft]. *Vestnik Permskogo nauchnogo tsentra*, 2010, no. 4, pp. 28-46.

6. Chepkin V.M., Marchukov E.Yu., Kuprik V.V., Fedorov S.A. Organizatsiya goreniya v nizkoemissionnoy kamere sgoraniya GTU AL-31ST [Combustion arrangement in the low-emission combustion chamber of "AL-31CT" GTU]. *Gazoturbinnye tekhnologii*, 1999, no. 09-10, pp. 14-17.

7. Travnikov R.I., Popov N.A. Metod i apparatura opticheskoy diagnostiki fakela raketnogo dvigatelya pri stendovykh ispytaniyakh [Method and apparatus for optical diagnostics of the rocket engine blast during bench testing]. *"Trudy MAI" electronic journal*, no. 51, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=29136> (accessed 10 March 2015).

8. Minard J-P., Bouchez M., Legras O. [et al.]. Rapiere. An innovation industrial optical measurement system for scramjet flows. *AIAA Papers*, 2002. AIAA-2002-5156.

9. Brazovskiy V.V., Kashkarov G.M., Titov D.N., Tubalov N.P. Pri-bory dlya issledovaniya sazheobrazovaniya v vikhrekamere dizelnogo dvigatelya [Tools to study soot formation in the diesel engine swirl chamber]. *Polzunovskiy vestnik*, 2009, no. 1, pp. 188-191.

10. Magunov A.N. Spektralnaya pirometriya obektov s neodnorodnoy temperaturoy [Spectral pyrometry of thermally inhomogeneous objects]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2010, vol. 80, no. 7, pp. 78-82.

Об авторах

Губайдуллин Ирек Тимерьянович (Уфа, Россия) – ведущий инженер-конструктор АО УНПП «Молния» (450052, г. Уфа, ул. Зенцова, д. 70, e-mail: molniya@molniya-ufa.ru).

Андреева Татьяна Петровна (Уфа, Россия) – кандидат технических наук, начальник сектора АО УНПП «Молния» (450052, г. Уфа, ул. Зенцова, д. 70, e-mail: molniya@molniya-ufa.ru).

Гумеров Артур Римович (Уфа, Россия) – инженер-конструктор, АО УНПП «Молния» (450052, г. Уфа, ул. Зенцова, д. 70, e-mail: molniya@molniya-ufa.ru).

Саженов Алексей Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, помощник генерального конструктора, начальник административного отдела ОАО «Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: office@avid.ru).

About the authors

Irek T. Gubaidullin (Ufa, Russian Federation) – Leading Design Engineer, JSC USPE “Molniya” (70, Zentsova st., Ufa, 450052, Russian Federation, e-mail: molniya@molniya-ufa.ru).

Tatyana P. Andreeva (Ufa, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Head of Department, JSC USPE “Molniya” (70, Zentsova st., Ufa, 450052, Russian Federation, e-mail: molniya@molniya-ufa.ru).

Artur R. Gumerov (Ufa, Russian Federation) – Design Engineer, JSC USPE “Molniya” (70, Zentsova st., Ufa, 450052, Russian Federation, e-mail: molniya@molniya-ufa.ru).

Alexey N. Sazhenkov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Assistant Chief Designer, Head of the Administrative Department, OJSC “Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: office@avid.ru).

Получено 2.03.2015