

УДК 629.7.035 621.43-44:001.5

Разработка и применение бесконтактной технологии исследования процессов горения в камере сгорания газотурбинного двигателя*

А.А. Иноземцев¹, А.Н. Саженов¹, В.В. Цатишвили¹, Т.В. Абрамчук¹,
В.А. Шипигусев¹, Т.П. Андреева², А.Р. Гумеров², А.Н. Ильин²,
И.Т. Губайдуллин²

¹ОАО «Авиадвигатель», Пермь

²ОАО УНПП «Молния», Уфа

E-mail: office@avid.ru; molniya@molniya-ufa.ru

Сформулирована задача создания и оснащения экспериментальной базы бесконтактными оптико-электронными средствами контроля процессов горения в камере сгорания газотурбинного двигателя. Представлена структура, основные технические характеристики образца-демонстратора оптико-электронной системы, разработанной в ходе выполнения программы реализации базовых критических технологий для создания авиационного газотурбинного двигателя ПД-14. Приведены результаты стендовых испытаний на модельной установке.

Ключевые слова: камера сгорания, процессы горения, оптико-электронная аппаратура, бесконтактный метод; ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный диапазоны излучения.

Введение

При создании малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей актуальной является задача идентификации внутрикамерных процессов, носящих существенно турбулентный характер. Наряду с методами численного моделирования для решения задач идентификации целесообразно использовать оптические средства измерения, позволяющие без контакта с исследуемой средой, практически безынерционно регистрировать параметры излучения нестационарных газодинамических и физико-химических многофазных процессов горения.

В рамках выполнения национальной программы создания семейства авиационных двигателей для магистральных самолетов МС-21 [1] с 2010 г. ОАО «Авиадвигатель» совместно с ОАО УНПП «Молния» инициировали научно-исследовательские работы по разработке отечественной оптико-электронной аппаратуры. Программа создания образцов

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Развитие гражданской авиационной техники России на 2002–2010гг и на период до 2015 годы» как составная часть ОКР «Разработка ключевых технологий в области авиационного газотурбинного двигателестроения, необходимых для реализации программы создания семейства перспективных двигателей для гражданской авиации тягой от 9 до 18 тонн», шифр «Технологии» (гос. контракт № 9411.1003800.18.001 от 29.04.2009 г.).

© Иноземцев А.А., Саженов А.Н., Цатишвили В.В., Абрамчук Т.В., Шипигусев В.А., Андреева Т.П., Гумеров А.Р., Ильин А.Н., Губайдуллин И.Т., 2015

оптико-электронной аппаратуры предусматривает решение комплекса научных, конструкторских, технологических задач, которые должны позволить сформулировать основные технические требования, предъявляемые к оптико-электронной аппаратуре, определить концепцию технической реализации системы как измерительно-диагностического комплекса, выработать методику применения бесконтактной технологии экспериментальной доводки камеры сгорания современных авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), промышленных газотурбинных установок (ГТУ).

Бесконтактные оптические технологии давно и широко применяются для измерения температуры рабочих лопаток газовых турбин [2, 3], контроля розжига пламени в форсажных камерах авиационных ГТД [4], контроля инфракрасного излучения ГТД в задней полусфере.

Следует заметить, что проектирование и применение оптико-электронной аппаратуры для исследования процессов горения в основной камере сгорания, в отличие от применения пирометрической аппаратуры для контроля температуры рабочих лопаток турбины, имеет существенную специфику. Она заключается в весьма ограниченных возможностях создания аэродинамической защиты наружной поверхности объектива. Это обусловлено тем, что расход воздуха, обдувающего объектив, не должен приводить к значительным локальным искажениям, деформациям расчетных полей температуры, скоростей, давлений, концентраций газового потока в камере сгорания. Кроме этого, необходимо также обеспечить более высокую термостойкость объектива из-за неизбежного подогрева деталей конструкции объектива излучением пламени. Помимо вышеуказанного, требуется еще создание инфраструктуры метрологического обеспечения, включающей образцовые и рабочие средства поверки, калибровки.

Эти специфичные особенности требуют дополнительных конструкторских, технологических усилий и оригинальных решений для создания работоспособной конструкции объектива, выдерживающего давление газового потока, циклические изменения температуры, многократные термоудары как с положительной, так и с отрицательной производной. Для решения этой непростой задачи потребовалось применение целого арсенала инновационных технических решений, включающих использование жаростойких материалов (монокристаллов лейкосапфира, термостойкой керамики, слюдокерамики, металлических сплавов с особыми свойствами), применение высокотехнологичных компонентов (вибропрочных, термостойких оптических волокон, сверхпрочных углеволокон, упругопластичных уплотнительных материалов на основе терморасширенного графита), новейших полупроводниковых фотоприемных устройств (ФПУ), работающих в двух и более спектральных диапазонах, использование технологии герметичного неразъемного соединения деталей из разнородных материалов, имеющих существенно различные коэффициенты термического расширения.

В настоящей статье представлены основные конструкторско-технологические решения и результаты натурных испытаний первого экспериментального образца-демонстратора оптико-электронной системы в составе модельной установки — одnogорелочного отсека камеры сгорания.

Постановка задачи

Для применения бесконтактной технологии исследования камеры сгорания и процессов, происходящих в ней, необходимо решить ряд практических задач. К ним следует отнести:

- выбор способа оптического доступа к внутреннему объему камеры сгорания для приемлемого визирования наиболее значимой информативной зоны (объема) пламени;
- обеспечение работоспособности (термостойкости, герметичности) объектива оптического зонда, смонтированного на посадочные гнезда внешнего корпуса камеры сгорания;

- обеспечение защиты наружной поверхности объектива от отложения продуктов сгорания в процессе длительной наработки;
- выбор контролируемых участков оптического спектра, где наиболее существенно проявляются особенности процесса горения топливовоздушной смеси, в том числе характеристики эмиссии;
- прием, усиление, детектирование оптических сигналов во всем диапазоне работы камеры сгорания, включая режим зажигания (воспламенения) топливовоздушной смеси;
- обработку принятых сигналов в реальном масштабе времени с дискриминацией сигналов по оптическому и частотному спектрам, по интенсивности излучения.

При разработке оптико-электронной аппаратуры для контроля процессов горения топливовоздушной смеси в основной камере сгорания использовался опыт создания авиационных оптических пирометрических систем, широко применяемых для бесконтактного измерения температуры поверхности рабочих лопаток турбины авиационных ГТД и промышленных ГТУ.

Анализ технических решений, используемых в оптико-электронной аппаратуре обнаружения (регистрации) наличия (отсутствия) пламени, контроля эмиссии, измерения температуры пламени [5–7], показывает, что применяются разнообразные методы, технологии, направленные на получение измерительной информации о спектральных характеристиках излучения пламени, а именно, о распределении спектральной плотности излучения в ультрафиолетовом (УФ), в оптическом видимом (ОВ), в ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах; о динамических (частотных) характеристиках излучения пламени, а именно, о распределении амплитуд гармоник пульсации излучения; о яркостной температуре фронта пламени; о плотности излучения и динамике изменения излучения поверхностей твердых тел, а именно, стенки внутреннего корпуса камеры сгорания, решетки соплового аппарата первой ступени турбины высокого давления.

Анализ возможных конструкторских решений, технологических приемов по технической реализации оптико-электронной системы показал, что наиболее проблемным звеном в конструкции системы является объектив оптического зонда. Именно это звено конструкции подвержено наиболее жестким воздействиям со стороны газового потока. Для отработки приемлемой конструкции объектива рассматривались различные варианты технических решений, по которым были изготовлены макетные образцы. Все образцы подвергались испытаниям на стойкость к циклическим изменениям температуры и термоударам. В результате проведенных работ установлено, что наиболее перспективной является конструкция, реализующая схему “керамическая оболочка–кварцевая (лейкосапфировая) оптика–неразъемное герметичное соединение керамической оболочки с металлическим корпусом зонда”. На первых экспериментальных образцах применялась традиционная технология изготовления объектива, при которой в качестве термостойкой оболочки используется тонкостенная втулка из жаропрочного хромоникелевого сплава, соединяемая через промежуточный химически активный металл с лейкосапфировой оптикой посредством бесфлюсовой пайки в вакууме. Автономные испытания таких образцов на циклические изменения температуры показали удовлетворительные технические характеристики. На рис. 1 представлена фотография образцов-прототипов термостойкого объектива с применением керамических деталей. Диаметр линзы составляет 8 мм, наружный диаметр керамического объектива — 14 мм (слева) и 12 мм (справа), длина объектива — 20–25 мм, внутренний диаметр, сообщающийся с оптоволоком составляет 5–6 мм.

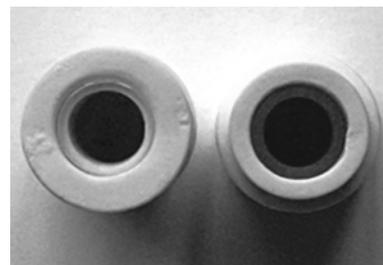


Рис. 1. Термостойкие модельные образцы объективов с керамическим корпусом.

Комплекс предварительных лабораторных испытаний позволил сформировать облик экспериментальной системы и сформулировать основные технические требования, предъявляемые к ней. Практической реализацией комплекса отбора технических решений стал экспериментальный образец-демонстратор оптико-электронной системы ОЭС-2011.

Основные технические характеристики экспериментального образца-демонстратора

Образец-демонстратор системы представляет собой агрегатированный аппаратно-программный комплекс, состоящий из двух модулей. Один представляет собой три термовибростойких оптических зонда с линзовой или апертурной (лейкосапфировой либо кварцевой) оптикой, обеспечивающей прием электромагнитного излучения в спектральном диапазоне от 0,2 до 5,0 мкм; другой — электронный блок, содержащий три фотоприемных устройства, включающие шесть фотодиодов (ФД), воспринимающих излучение в диапазонах УФ(190–550 нм), ОВ (400–720 нм), ближнем ИК (0,72–1,15 и 1–1,7 мкм); один датчик динамического давления, позволяющий измерять пульсации абсолютного давления в диапазоне 0–40 бар с задержкой не более 1 мс; многоканальный аналого-цифровой преобразователь со встроенным микроконтроллерами с выходным цифровым интерфейсом; монтажную раму с амортизаторами для установки электронного блока на силовую раму испытательного стенда; портативный компьютер в пылевлагоударозащищенном исполнении со специализированным программным обеспечением, поддерживающим дружественный графический интерфейс пользователя; электрический кабель для стыковки электронного блока с компьютером и источником электропитания.

Блочная-модульная конструкция предусматривает возможность последующей модернизации системы путем замены отдельных модулей, в том числе замены объективов оптических зондов. Фотография образца-демонстратора представлена на рис. 2.

Образец-демонстратор системы осуществляет непрерывное бесконтактное преобразование излучения пламени на разных участках спектра в аналоговый и цифровой электрические сигналы в реальном масштабе времени, обнаруживает розжиг (погасание) пламени, выявляет искрогенерацию запальной свечи, осуществляет прием и обработку в реальном масштабе времени информации, визуализацию, архивирование и передачу принятых и обработанных сигналов в цифровом виде в автоматизированную систему управления (АСУ) верхнего уровня.

Кроме трех оптических входов, имеется еще вход для приема пневмосигнала — абсолютного давления газовоздушного тракта газогенератора (последняя ступень компрессора высокого давления или пневмоотвод из полости камеры сгорания). Наличие канала измерения давления позволяет осуществлять комплексирование данных от разных источников информации, расширяет функциональные возможности и выявляет корреляционные взаимосвязи между газодинамическим параметром (давление) и теплофизическим параметром (излучение) процесса горения.

Объектив визирует пламя через отверстия штатных лючков для эндоскопического осмотра, либо через отверстие специального посадочного гнезда. Объем визируемой области составляет 10–15 %



Рис. 2. Фотография образца-демонстратора оптико-электронной системы.

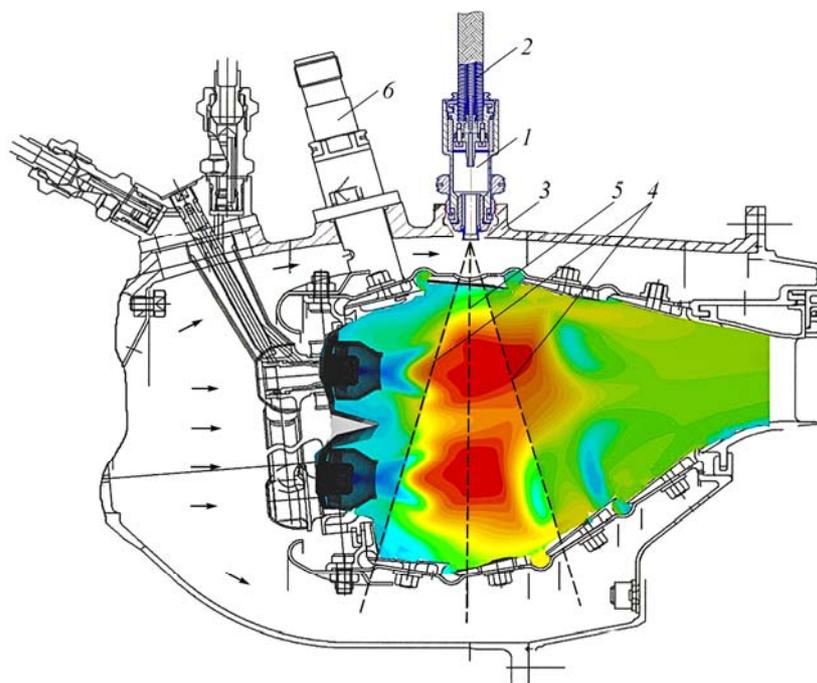


Рис. 3. Схема визирования пламени объективом оптического зонда.

1 — объектив, 2 — гибкий металлорукав оптического зонда, 3 — внешний корпус камеры сгорания, 4 — конус визирования пламени, 5 — главная оптическая ось объектива, 6 — свеча.

внутреннего объема жаровой трубы. Конструкция оптического зонда позволяет оперативно устанавливать объективы в любые свободные лучки на внешнем корпусе камеры сгорания. Схема визирования пламени одним из трех объективов приведена на рис. 3.

Для визирования возможно большего объема камеры сгорания разработана конструкция объектива, которая позволяет осуществить как прямой, так и угловой (перископический) доступ к внутреннему объему камеры сгорания. При испытаниях в составе модельной установки (одногорелочного отсека) применялись однолинзовые объективы со световым диаметром 6 мм и фокусными расстояниями 25 и 34 мм.

Объектив каждого зонда содержит термостойкие оптические компоненты (диски, призмы, призмлинзы), изготовленные из кристаллов лейкосапфира, кварца. Оптический сигнал передается на расстояние 3–4 м по высокопрочному световодному жгуту из многомодового кварцевого волокна к полупроводниковым детекторам.

Схема регистрации сигналов

Блок-схема экспериментального образца-демонстратора оптико-электронной системы и регистрации сигналов представлена на рис. 4. Во всех трех ФПУ происходит преобразование оптических сигналов в маломощные аналоговые электрические сигналы, которые далее усиливаются, масштабируются широкополосными усилителями. Одновременно происходит прием пневмосигнала, несущего информацию о динамике изменения абсолютного давления в камере сгорания, преобразование его в электрический аналоговый сигнал.

Далее происходит преобразование формы сигналов и их первичная обработка. Все принятые аналоговые сигналы усиливаются, фильтруются, мультиплексируются, оцифровываются, синхронизируются, форматируются и передаются по цифровому сетевому интерфейсу в компьютер в реальном масштабе времени.

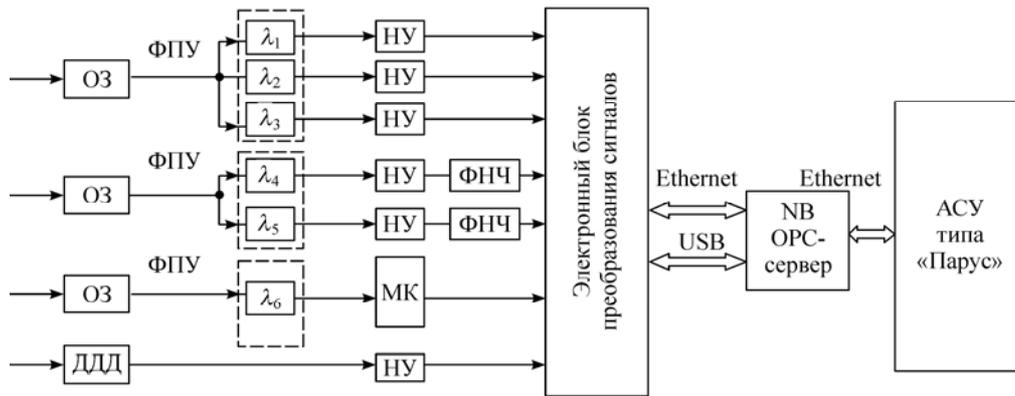


Рис. 4. Блок-схема опико-электронной системы и регистрации сигналов.

ОЗ — оптический зонд, ДДД — датчик динамического давления, ФПУ — фотоприемные устройства, НУ — нормирующие усилители, ФНЧ — фильтр низких частот, NB — компьютер с ПО OPC-сервер, МК — микроконтроллер.

Дальнейшая обработка информации производится с использованием вычислительных ресурсов компьютера. Для обеспечения возможности обработки зарегистрированной в нём архивированной информации совместно с информацией, хранящейся в АСУ испытаний типа «Парус-9», осуществлен сетевой интерфейс через OPC-сервер АСУ. Обмен информацией с OPC-сервером осуществляется по стандарту «OPC Foundation» (спецификация OPC Data Access Custom Interface Specification 3.0) посредством технологии Ethernet. Такая организация обмена цифровой информацией обеспечивает однозначную привязку по временным меткам всей зарегистрированной информации, что затем значительно облегчает контекстный анализ данных для последующего создания соответствующих моделей взаимосвязи.

Объект исследования — пламя — представляет собой разогретую слабоионизированную смесь атомов и молекул, в основном низкомолекулярных (одноатомных, двух-, трехатомных соединений), при рабочих давлениях 30–40 атм. Помимо химических компонентов, присутствующих в углеводородном топливе, атмосферном воздухе и продуктах сгорания, здесь также присутствуют короткоживущие активные химические радикалы с нестабильными разорванными валентными связями, а кроме того, содержится твердая фаза в виде агломераций дисперсного углерода (сажи). Именно наличие сажистых образований, имеющих непрерывный спектр излучения и представляет собой значительную помеху для измерения селективного излучения разогретых газов, находящихся под давлением, превышающим атмосферное в десятки раз.

Интенсивность излучения на отдельных участках спектра характеризует присутствие и концентрацию химических соединений, регламентируемых авиационными правилами АП-34, нормами ICAO (в том числе эмиссию CH, CO, NO_x). На рис. 5 представлено распределение интенсивности излучений по всему спектру и на его отдельных участках, а также типичные спектры излучения продуктов сгорания топливоздушного смеси в камере сгорания.

Форма распределений спектральной плотности излучения характеризует неравномерную температуру визируемого объема пламени. По отдельным, заранее выбранным участкам спектра излучения пламени, где имеет место сходство с формой спектра излучения абсолютно черного тела, возможно проводить экспериментально-расчетную оценку температуры пламени [8].

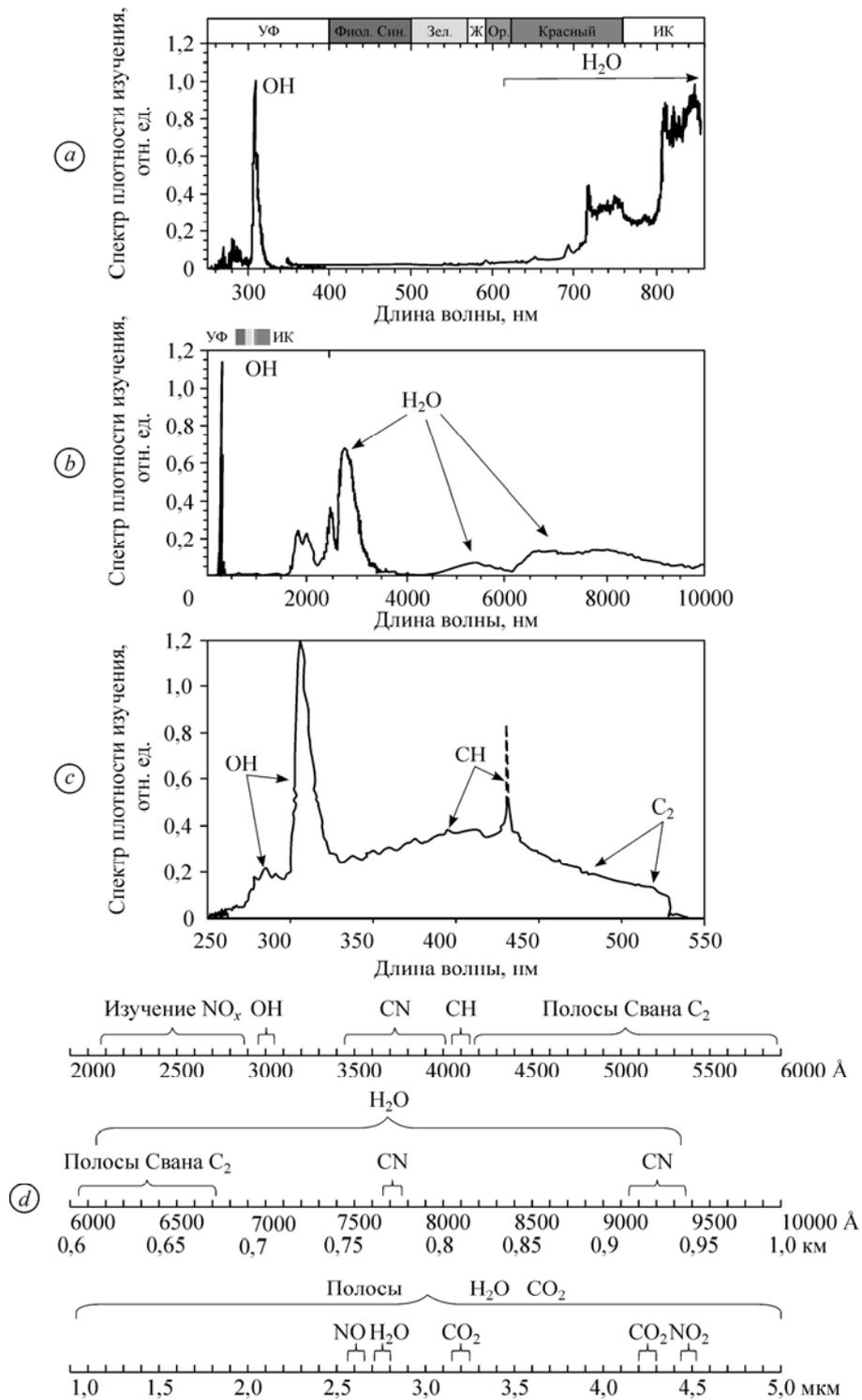


Рис. 5. Спектры эмиссии и расположение полос излучения продуктов сгорания углеводородных топлив.

a — эмиссия OH и H₂O в коротковолновой части спектра, *b* — эмиссия OH и H₂O в длинноволновой части спектра, *c* — эмиссия OH, CH и C₂ в коротковолновой части спектра, *d* — шкала размещения полос излучения (NO_x, CH, CN и др.) в спектре углеводородных пламени.

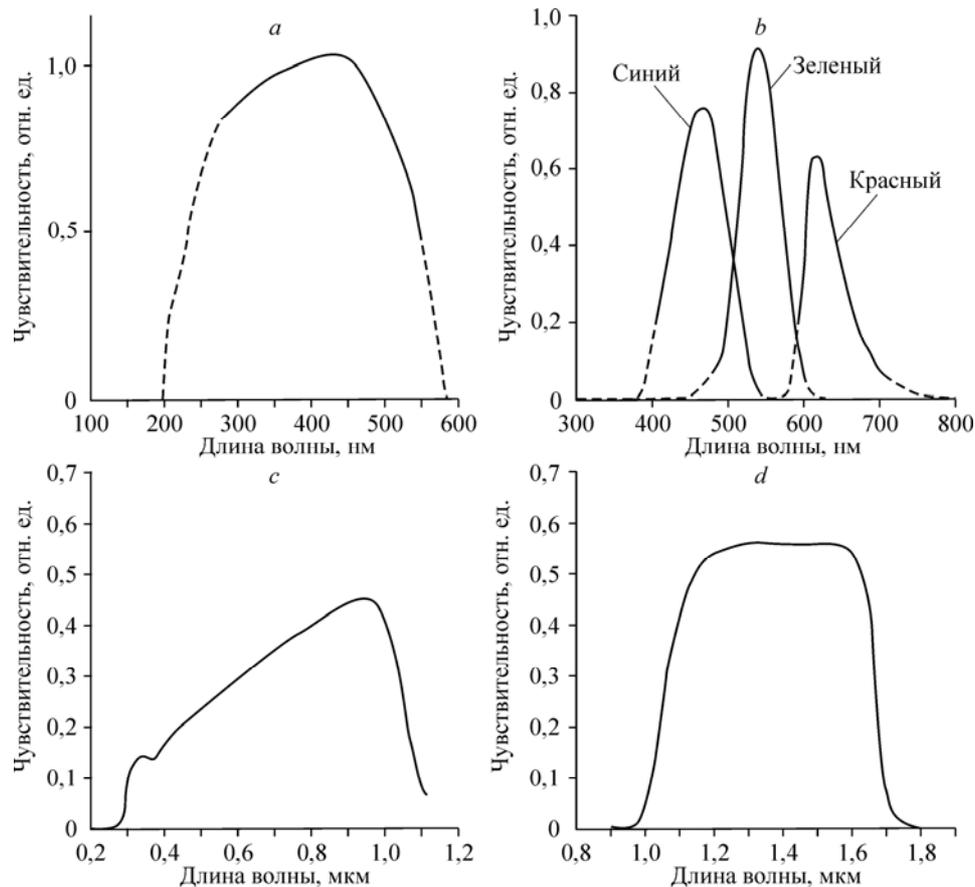


Рис. 6. Эпюры распределения спектральной чувствительности ФПУ.

ФПУ, сенсibilизированный на УФ (а), на видимую область спектра (b), на видимую и ближнюю ИК (с), на видимую и ИК (d) области спектра.

Для обеспечения приема излучения с отдельных участков спектра электронный блок содержит три различных полупроводниковых ФПУ. На рис. 6 представлены эпюры распределения спектральной чувствительности применяемых ФПУ.

В ФПУ осуществляется практически безынерционное преобразование оптического сигнала в аналоговый электрический сигнал. Являясь одним из первых звеньев в измерительной цепи, ФПУ задает пороговые характеристики измерительной системы. Именно по этой причине выбор конкретных типов ФПУ является ключевым действием при проектировании оптико-электронной системы. К основным, наиболее значимым техническим характеристикам ФПУ относятся: энергетическая чувствительность, спектральная избирательность, диапазон линейного преобразования, относительный (динамический) диапазон, быстродействие (нормированная полоса воспроизводимых частот), уровень и частотный спектр внутренних шумов, собственная электрическая емкость р-п перехода чувствительного элемента — фотодиода. Подробный анализ этих характеристик по обширной номенклатуре коммерчески доступных ФПУ позволил осуществить выбор наиболее подходящих для создания образца-демонстратора оптико-электронной системы. Для контроля излучения в спектральном диапазоне от ближнего УФ до ближнего ИК, включая видимый поддиапазон, были выбраны серийные ФПУ с полупроводниками разной структуры (фотодиод с барьером Шоттки на материале GaP, пара фотодиодов «сендвич»-структуры на материалах Si, InGaAs).

Специализированное программное обеспечение

Для извлечения полезной информации из принимаемых сигналов разработано программное обеспечение, позволяющее получать в реальном масштабе времени информацию о каждом сигнале, наблюдать и регистрировать сигналы, как в виде осциллограмм, так и в виде частотных спектрограмм.

Текущие частотные спектры (спектрограммы) всех исследуемых оцифрованных сигналов формировались с помощью вычислительной процедуры — быстрого преобразования Фурье. Количество одновременно обрабатываемых сигналов, выбранная частота дискретизации и применяемый последовательный сетевой интерфейс OPC-сервера позволяют регистрировать текущий частотный спектр каждого сигнала за время не более 0,3 с.

Одновременная параллельная регистрация оптических сигналов излучения пламени от штатных датчиков (давления, расхода топлива, частоты вращения ротора компрессора высокого давления) и нештатных (в том числе от ДДД) позволяет сформировать необходимый массив данных для последующего выявления скрытых неявных количественных связей режимных параметров камеры сгорания и параметров оптических сигналов.

Пример практического применения бесконтактной технологии

Первые испытания образца-демонстратора ОЭС-2011 проводились на автономном испытательном стенде ОАО «Авиадвигатель» в г. Перми на модельной установке с высокими параметрами — на одnogорелочном отсеке с жаровой трубой камеры сгорания газотурбинной установки ГТУ-25П мощностью 25 МВт. Камера сгорания реализует технологию сжигания топливовоздушной смеси по типу «богато-бедного» горения с преобладанием диффузного пламени. В качестве углеводородного топлива использовался природный газ с 97–98-процентным объемным содержанием метана CH_4 .

В корпусе отсека было выполнено одно посадочное гнездо, в которое поочередно в ходе выполнения программы испытаний устанавливался каждый из трех объективов. На рис. 7 приведена фотография фрагмента модельной установки с объективом одного из зондов

На рис. 8 и 9 приведены примеры графического отображения на экране монитора наблюдаемых сигналов одного из измерительных каналов. В качестве иллюстрации приведен фрагмент записи сигнала с Si-ФПУ, что соответствует видимой и коротковолновой границе ближнего ИК диапазона излучения. Фурье-анализ сигналов системы показывает, что мощность сигнала лежит в диапазоне 0–1,5 кГц, на малых режимах имеют

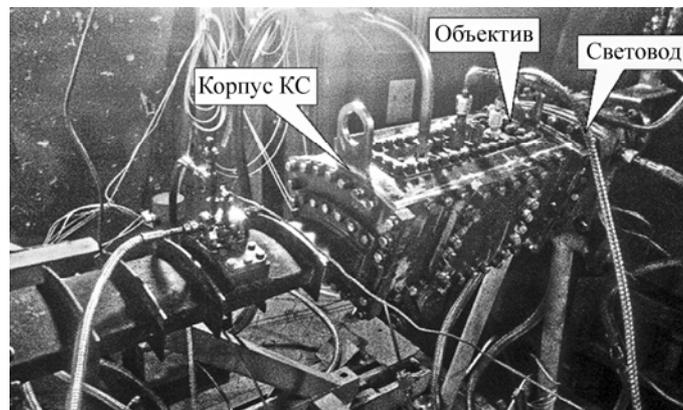


Рис. 7. Фотография одnogорелочного отсека с установленным объективом.

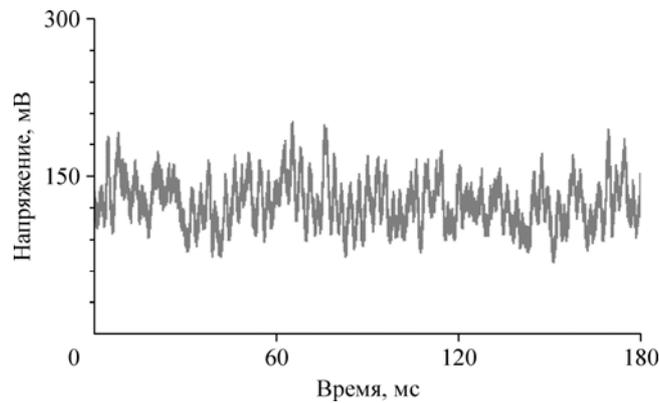


Рис. 8. Мгновенный снимок текущего сигнала одного из каналов на минимальном режиме.

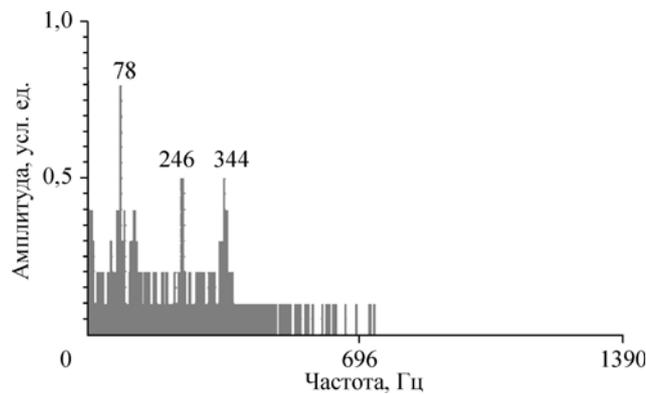


Рис. 9. Мгновенный снимок частотного представления сигнала одного из каналов на минимальном режиме.

место три четко выраженных пика в частотном спектре — 78 ± 10 Гц, 246 ± 10 Гц, 344 ± 10 Гц, сдвигающихся группой в область более высоких частот с увеличением режима. Связь указанных частот с особенностями процессов горения в жаровой трубе является одним из направлений дальнейших исследований.

На рис. 10 показано изменение выходных сигналов оптико-электронной системы при увеличении режима работы модельной установки на двух участках спектра: УФ и ИК.

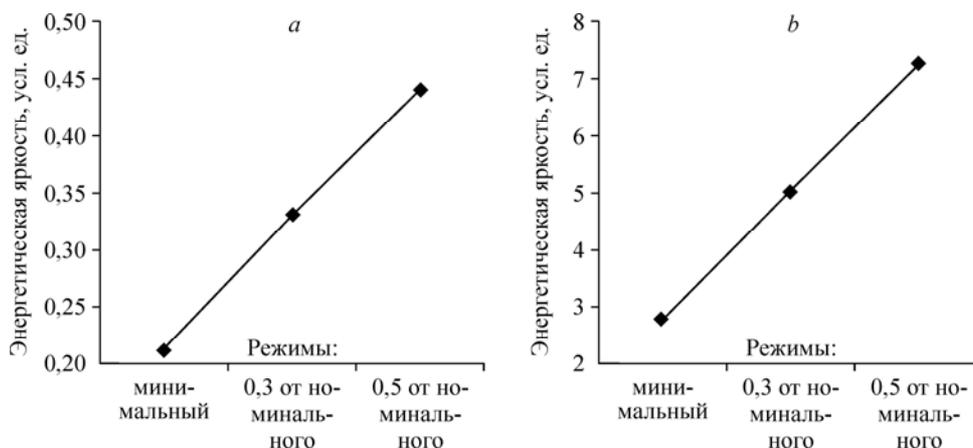


Рис. 10. Изменение выходного сигнала.

a — УФ ФПУ, *b* — ИК ФПУ.

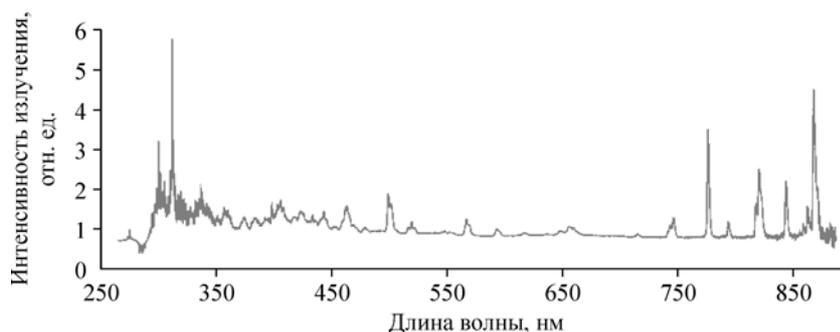


Рис. 11. Спектр излучения искрового разряда запальной свечи в воздушной среде.

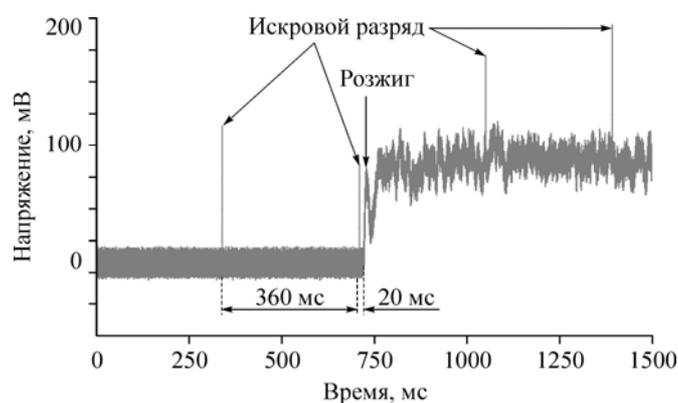


Рис. 12. Оциллограмма сигнала одного из каналов ИК ФПУ, показывающая момент воспламенения топливовоздушной смеси.

Следует отметить, что с помощью каналов, работающих в УФ, видимом и ближнем ИК спектрах, удалось устойчиво регистрировать излучение искровых разрядов запальной свечи, работающей от штатной системы зажигания с накопленной энергией не более 6 Дж. Канал с ФПУ, сенсibilизированным на дальнюю ИК-область более 1,15 мкм (см. рис. 6d), не позволяет выделить импульсы излучения искрового разряда.

Типичный спектр излучения искрового разряда серийной запальной свечи поверхностного разряда с полупроводниковым покрытием в воздушной среде при нормальном атмосферном давлении представлен на рис. 11. Анализ спектра излучения искрового разряда показывает, что доминирующая часть энергии испускаемых фотонов сконцентрирована в диапазонах 0,3–0,45 и 0,75–0,85 мкм. Эти диапазоны частот излучения удовлетворительно фиксируют УФ и ближний ИК каналы системы. Характерные оциллограммы импульсов излучения искрового разряда запальной свечи и момента воспламенения топливовоздушной смеси приведены на рис. 12. Возможности опико-электронной аппаратуры позволяют определить, на каком именно по счету искровом разряде запальной свечи произошло воспламенение и сколько предшествующих искровых разрядов оказались «холостыми», а также сформировать сигнал на отключение работы системы зажигания.

Заключение

Разработанная опико-электронная аппаратура контроля процессов горения представляет собой удобный инструмент исследования.

Полученные экспериментальные данные показывают наличие корреляционных связей опических сигналов, регистрируемых на различных участках спектра, с режимными параметрами модельной установки.

Экспериментально подтверждено, что характеристики используемых полупроводниковых фотоприемных устройств дают принципиальную возможность регистрации розжига, погасания пламени, а также импульсов искровых разрядов запальной свечи. Установлено, что свечение, создаваемое искровыми разрядами свечи, обнаруживается как на интервалах времени, предшествующих воспламенению, так и во время горения топливовоздушной смеси.

Показана возможность применения представляемой системы для анализа процессов воспламенения топливовоздушной смеси при экспериментальной доводке камер сгорания.

Список литературы

1. **Иноземцев А.А.**, О программе создания авиационных газотурбинных двигателей пятого поколения для семейства самолетов МС-21 // Вестник Пермского научного центра. 2010. № 4. С. 28–46.
2. **Taniyuchi T., Sanbonsugi K., Ozaki Y., Norimoto A.** Temperature measurement of high speed rotating turbine blades using a pyrometer // ASME Paper. 2006. No. GT2006-90247. P. 521–529.
3. **Барчем Ф.У., Майерс Л.П., Уолш К.Р.** Летные исследования цифровой электронной системы автоматического управления двигателем самолета F-15 // Аэрокосмическая техника. 1987. № 3. С. 82–90.
4. **Ohyama Y., Ohsuga M., Kuroiwa H.** Study on mixture formation and ignition process in spark ignition engine using optical combustion sensor // SAE Techn. Paper 901712. 1990. P. 1712-1–11.
5. **More** Intelligent Gas Turbine Engines. RTO Technical Report TR-AVT-128, RTO NATO, France. April. 2009. 178 p.
6. **Работы** ведущих авиадвигателестроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под ред. В.А. Скибина, В.И. Солонина, М.: ЦИАМ, 2010. 673 с.
7. **RARIERE**: An innovation industrial optical measurement system for scramjet flows (first phase project final status in 2002). J-P. Minard, M. Bouchez, O. Legras, I. Vallet, Ph. Harve, P. Chelin, Ph. Alcochory, B. Sarh, I. Gokalp // AIAA Paper. 2002–5156. P. 1–12.
8. **Магунов А.Н.** Спектральная пирометрия объектов с неоднородной температурой // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, № 7. С. 78–82.

*Статья поступила в редакцию 28 октября 2013 г.,
после доработки — 16 мая 2014 г.*