

УДК 536.24

ДИАГНОСТИКА СРЫВА ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ

С.В. ВОРОБЬЕВ, Ю.И. ПАВЛОВ

Статья представлена доктором технических наук Медведевым В.В.

Рассматривается применение тепловизионной техники для диагностики срыва горения при испытании жаровой трубы основной камеры сгорания газотурбинного двигателя (ГТД). Регистрация теплового излучения струи продуктов сгорания и внутренних элементов осуществлялась с помощью коротковолновой тепловизионной системы АГА-782 с применением спектральных фильтров в нескольких диапазонах от 3,2 до 5,6 мкм. Тепловизор устанавливался по оси жаровой трубы. Выходной сигнал записывался и обрабатывался на компьютере в режиме реального времени, что позволяло контролировать процесс горения и тепловое состояние объекта во время эксперимента.

Ключевые слова: тепловое излучение, тепловизор, камера сгорания.

Введение

Целью работы было испытание камеры сгорания на углеводородном топливе и определение границ устойчивой работы с имитацией различных режимов полета на газодинамическом стенде. Тепловизионная система применялась в экспериментах для определения момента срыва горения, а также контроля теплового состояния теплонапряженных элементов, находящихся в зоне видимости. Проведен анализ срыва горения тепловизионным, бесконтактным методом и контактным измерением температуры заторможенного потока термопарой, установленной на гребенке на выходе из камеры сгорания. Показана возможность применения в тепловизионных измерениях для определения оптических свойств потока и состояния защитных окон, данных от источников опорного излучения.

Объект исследования

На стенде (рис. 1) подогретый чистый воздух по трубопроводу 1 через мерную шайбу 2 подается на вход жаровой трубы или отсека камеры сгорания 3. Для снятия характеристик камеры применяется турель с гребенками 4, препарированная термопарами, приемниками полного давления и отбора проб для химанализа. С помощью горячего дросселя 5 имитируется турбина и регулируется давление в камере. Предварительно поток продуктов сгорания охлаждается за счет вдува холодного воздуха 6 в ресивер 7. Наблюдение за процессом горения и визуальный контроль в месте поворота выходной трубы осуществляются с помощью тепловизора 8 через защитное стекло 9 из CaF_2 толщиной 10 мм, которое позволяет проводить измерения в спектральном диапазоне работы тепловизионной системы и обеспечивает безопасность сканера при тепловых и силовых нагрузках. Охлаждение стекла поверхности 9 и сдув сажистых частиц с целью уменьшения влияния потока осуществляется системой обдува 10, подающей воздух с перепадом давления 5...7 кг/см².

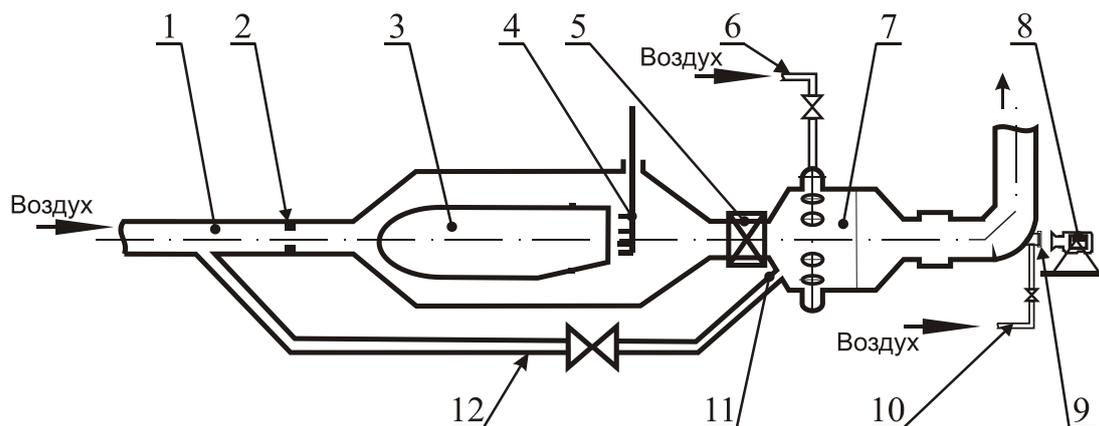


Рис. 1. Схема для тепловизионных исследований камеры сгорания на стенде:

- 1 – входной трубопровод от электроподогревателя; 2 – мерная шайба; 3 – жаровая труба КС; 4 – гребенка термомпар, полного давления и приемника для отбора проб; 5 – горячий дроссель; 6 – подача воздуха для охлаждения продуктов сгорания; 7 – выхлопной ресивер; 8 – тепловизор; 9 – иллюминатор с защитным стеклом; 10 – подача воздуха для охлаждения иллюминатора; 11 – источник опорного излучения; 12 – байпасная линия

При исследовании процессов тепломассообмена в потоках продуктов сгорания спектральные характеристики в ряде случаев следует определять непосредственно в условиях проведения эксперимента. Для этого в качестве источника опорного излучения 11 использовались показания от термопары, установленной в зоне видимости тепловизора на зачерненной поверхности байпасной линии 12. Источники опорного излучения представляют из себя поверхность с известными излучательными характеристиками и контролируемой температурой, по данным от которых рассчитывалось поглощение и излучение струи на различных режимах, а также проводилась коррекция показаний тепловизора.

Исследование в ИК-диапазоне

Мощность излучения от потока продуктов сгорания зависит от градиентов температурного поля, давления, химического состава, распределения по размерам и концентрации частиц сажи. Степень черноты струи продуктов сгорания $\varepsilon \approx 0,2 \div 0,3$, а окисленных металлических частей $\varepsilon \approx 0,9$, поэтому при повышении коэффициента избытка воздуха сила излучения от струи падает, а от нагретых металлических частей увеличивается. Тепловизионный контроль теплового состояния элементов камеры сгорания 3 и горячего дросселя 5 осуществлялся с применением спектрального фильтра в диапазоне от 4,76 до 5,6 мкм, где влияние трехатомных газов H_2O и CO_2 незначительно, а излучают сажа и твердые частицы [1].

Во время эксперимента для определения влияния потока продуктов сгорания, излучающего и (или) поглощающего излучение при определении температуры поверхности по ИК-излучению, в зоне видимости тепловизора 9 размещались источники опорного излучения 11, представляющие собой поверхность с известной температурой и излучательными характеристиками, показания от которых использовались в расчетах как реперные точки.

Наиболее эффективно оказалось проводить измерения для оценки равномерности горения и диагностики срыва горения в камере с выделением спектра излучения CO_2 , поэтому сканирование проводилось с применением фильтра в диапазоне длин волн от 4,14 до 4,36 мкм. После подмешивания холодного воздуха 6 в ресивере 7 и понижения температуры потока, CO_2 начинает поглощать излучение, поступающее в тепловизор 8. На рис. 2 показан режим, на котором по данным с термопар, установленных на гребенке был зафиксирован срыв, хотя процесс горения по тепловизионным данным еще продолжался 12 с. Снижение подачи топлива

(рис. 2) приводит к уменьшению зоны горения и концентрации CO_2 , вследствие чего поглощение излучения падает, а влияние нагретых поверхностей растет. Срыв пламени соответствует максимальному уровню излучения от нагретых частей камеры сгорания, когда поглощение от продуктов сгорания практически отсутствует. Далее нагретые части остывают, и интенсивность излучения от них падает.

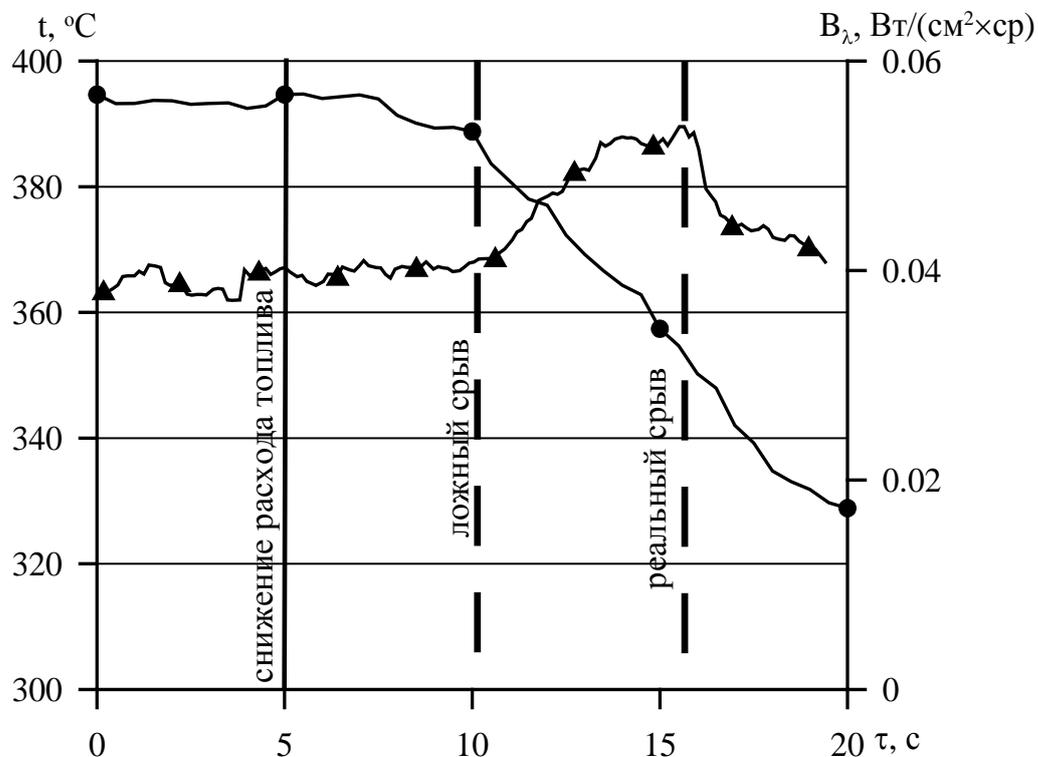


Рис. 2. Определение момента срыва горения в камере сгорания по данным, полученным с помощью тепловизора и термопары, установленной в потоке на гребенке:
 ▲ - показания тепловизора, Вт/(см²×ср); ● - показания термопары, °C

Настройка и калибровка системы

Процедура калибровки необходима для определения зависимости сигнала тепловизора от температуры. Для этого необходимо получить зависимость сигнала прибора от температуры модели абсолютно черного тела (АЧТ), которое применяется в качестве эталонного комплекса для поверки и контроля оптических приборов в ИК-диапазоне. При этом на тепловизоре 1 (рис. 3) устанавливают диафрагму и фильтры, а также защитные окна 2, которые применялись или будут использоваться во время измерений. Оптическая ось тепловизора 1 должна совпадать с осью 3 модели абсолютно черного тела 4, а сам прибор визироваться на перегородку 5, установленную в нагревательной трубе 6, которая находится внутри теплоизолированного и экранированного корпуса 7. Температура перегородки 5 контролируется термопарой 8 типа ТПР30/6, которая подсоединена к электронному регулятору мощности 9, подаваемой на нагревательную трубу 6 в автоматическом или ручном режиме. Сигнал с термопары измеряется микровольтметром 10 и передается на компьютер 11, который также регистрирует сигнал с блока управления 12, яркость излучения, измеренную тепловизором 1, от перегородки 5. Значение температуры исследуемой поверхности с учетом ее оптических свойств и условий проведения измерения определяют по калибровочным коэффициентам, представляющим собой зависимость сигнала тепловизора 1 от температуры абсолютно черного тела 4.

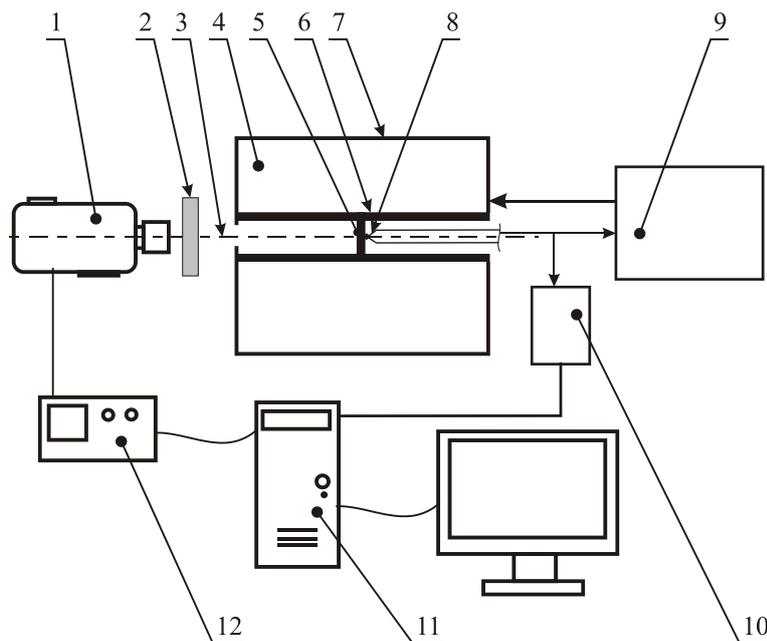


Рис. 3. Стенд для калибровки ИК-приборов: 1 – тепловизор; 2 – фильтр, защитное окно; 3 – оптическая ось тепловизора; 4 – МАЧТ; 5 – перегородка; 6 – нагревательная труба; 7 – теплоизолированный корпус; 8 – термопара; 9 – электронный регулятор температуры; 10 – микровольтметр; 11 – компьютер; 12 – блок управления тепловизором

Во время эксперимента возможно выпадение слоя сажи, пыли, воды или других веществ, которые изменяют оптические характеристики стекла, поэтому для коррекции влияния загрязнения стекла, производилась дополнительная калибровка тепловизионной системы после каждого испытания. Следует учитывать, что поток продуктов сгорания дает максимальное загрязнение непосредственно перед запуском и после срыва пламени или остановки камеры сгорания, когда в потоке присутствует несгоревшее топливо и повышенное содержание сажи. Кроме того, возможно загрязнение потока пылью и конденсированной влагой из газоздушного контура. Поэтому рекомендуется включать обдув защитных окон до начала подачи основного воздуха. В случае испытаний основных камер сгорания и их отсеков, когда вдуваемый на охлаждение воздух влияет на равномерность потока на выходе, желательно регулировать его расход, увеличивая при запуске, остановке и на максимально напряженных режимах.

Заключение

Термоизображение предоставляет полную картину распределения излучения струи по всему сечению, что позволяет оценить качественно распределение топлива в камере сгорания, провести диагностику коксования и изменение работы форсунок во время эксперимента. Кроме того, гребенки с термопарами и отборами пробы для химанализа не перекрывают всю проточную часть выхлопной струи и имеют некоторую инерционность, поэтому тепловизионная система позволяет более информативно и качественно контролировать работу камеры сгорания. По полученным во время экспериментов термограммам были более четко определены границы срыва пламени, а также проведен контроль теплового состояния элементов жаровой трубы камеры сгорания и стендового оборудования с предупреждением аварийных ситуаций. Применение источников опорного излучения позволило определить влияние поглощения от газового потока и защитного окна на регистрируемую интенсивность излучения от нагретых поверхностей в процессе эксперимента, что позволяет более точно рассчитывать температуру по излучению и проводить анализ теплового состояния контролируемых элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох А.Г. Основы теплообмена излучением. - М.: Госэнергоиздат, 1962.

**DIAGNOSIS OF FAILURE OF COMBUSTION IN THE COMBUSTION CHAMBER
WITH A THERMOVISION EQUIPMENT**

Vorobiev S.V., Pavlov Yu.I.

The use of thermovision technology to diagnose failure of the combustion flame test tube of the main combustion chamber gas turbine engine is deal with in the article. Join the thermal radiation of the jet of combustion products and the internal elements was carried out using short-wave thermovision system AGA-782 with spectral spectral filters in several ranges from 3.2 to 5.6 microns. Thermovision is mounted on the axis of the flame tube. The output signal was recorded and processed on a computer in real time, allowing monitor the combustion process and the thermal state of the object during the experiment.

Keywords: thermal radiation, thermal imager, a combustion chamber.

Сведения об авторах

Воробьев Сергей Владимирович, 1978 г.р., окончил МАТИ (2001), начальник сектора отделения газовой динамики ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова, автор более 17 научных работ, область научных интересов – оптические методы исследования.

Павлов Юрий Иванович, 1934 г.р., окончил МАТИ (1959), кандидат технических наук, профессор МАТИ, автор 168 научных работ, область научных интересов – испытания двигателей летательных аппаратов и их узлов.