

УДК 662.75

## Метод и аппаратура оптической диагностики факела ракетного двигателя при стендовых испытаниях

Р.И. Травников, Н.А. Попов

Представлен метод оптической диагностики факела ракетного двигателя при огневых испытаниях во время стендовой отработки двигателя. Описана работа комплекса аппаратуры оптической диагностики с использованием волоконно-оптического кабеля для передачи излучения, в состав которого входят два независимых измерительных канала для регистрации спектра факела в разных диапазонах спектра. Приведены примеры спектров излучения факела ракетного двигателя и динамики линий конструкционных материалов при штатной работе и при появлении дефектов.

Ключевые слова: оптическая диагностика; аварийная защита; стендовые испытания.

Метод оптической диагностики факела ракетного двигателя при стендовой отработке основан на измерении спектра излучения факела двигателя в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, выделении в спектре линий химических элементов, уносимых с элементов конструкции двигателя или присутствующих в качестве загрязнений в топливе, внутриводительных полостях и в стендовых системах, и оценки степени уноса и загрязнений. Метод позволяет работать в реальном масштабе времени, и может быть эффективно использован не только в системах диагностики, но и в системах аварийной защиты для предотвращения возгорания ракетного двигателя или развития интенсивных эрозионных процессов. Другие важные достоинства метода – высокое быстродействие и бесконтактность – огромный объем информации о "здоровье" двигателя, содержащийся в спектре излучения факела, измеряется аппаратурой расположенной вне двигателя.

Износ и разрушение деталей конструкции ракетного двигателя приводит к появлению в спектрах излучения факела спектральных линий конструкционных материалов (Al, C, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mo, Ni, Ti, W и др.), причем линии определенного химического вещества

характеризуют износ или разрушение конкретного агрегата (подшипников, лопаток турбин, насосов, камеры сгорания и т.д.).

Разработка оптических методов и оптико-электронных систем диагностики и аварийной защиты активно проводится в NASA (США) в Центрах Льюиса, Маршалла и Стенниса (Lewis Research Center, Marshall Space Flight Center, Stennis Space Center). Одной из основных причин, инициировавших развитие оптических средств диагностики ракетных двигателей, послужило то обстоятельство, что большинству аварий двигателей предшествовали аномальные изменения видимого излучения факела. Подавляющее большинство работ, опубликованных в открытой печати, посвящено оптической диагностике основного двигателя Space Shuttle (SSME) [1,2].

В России разработки оптических методов и оптико-электронных систем диагностики и аварийной защиты ракетных двигателей в основном сосредоточены в Центре Келдыша и в КБХА. Начиная с 2000 года был получен большой объем экспериментальных данных и подтверждена его высокая чувствительность и информативность, разработаны экспериментальная аппаратура СФИК-1, испытанная при огневых испытаниях двигателей 8Д411К, 8Д412К и 8Д49, и методические подходы к интерпретации результатов измерений, что позволило в конечном итоге создать научно-технический задел, дающий возможность перейти к регулярной диагностике дефектов при огневых испытаниях двигателей 8Д411К, 8Д412К и 8Д49 и также возможность использовать данный метод при испытаниях двигателей других типов, например ЭРД.

Переход к регулярной диагностике и создание штатной аппаратуры для универсального применения требует выполнения ряда технических требований и задач.

Первое требование – это то, что выпускаемая спектральная аппаратура предназначена в основном для лабораторного применения и при использовании ее в стендовых условиях при испытании ракетных двигателей требуется обеспечить ее защиту от акустического, механического и теплового воздействия.

Второе – то, что для получения наиболее полной информации о процессах происходящих в двигателе при испытаниях требуется использовать многоканальную аппаратуру, чтобы охватить широкий интервал спектра с высоким разрешением. Например, для того, чтобы одновременно регистрировать Cu, Ni, Mn и Al требуется использовать два канала.

Основные решаемые задачи при переходе к регулярной диагностике созданию штатной аппаратуры – это разработка конструкторской и эксплуатационной документации,

программ калибровки и испытаний, создание программного обеспечения, которое управляет аппаратурой и обрабатывает получаемые данные в автоматическом режиме.

В рамках дальнейшего развития работ по спектральной диагностике был изготовлен опытный образец СФИК-2. В состав СФИК-2 входят два независимых измерительных канала для регистрации спектра факела ракетного двигателя в разных диапазонах спектра.

При размещении аппаратура СФИК-2 делится на базовую и выносную часть. Выносная часть аппаратуры располагается на монтажном столе в кожухе в зоне прямого наблюдения факела ракетного двигателя. Базовая часть аппаратуры располагается в помещении, защищенном от механических и акустических воздействий, возникающих при испытаниях. Для передачи излучения от выносной части аппаратуры к базовой части используется волоконно-оптический кабель. Пример схемы размещения аппаратуры на стенде представлен на рисунке 1.

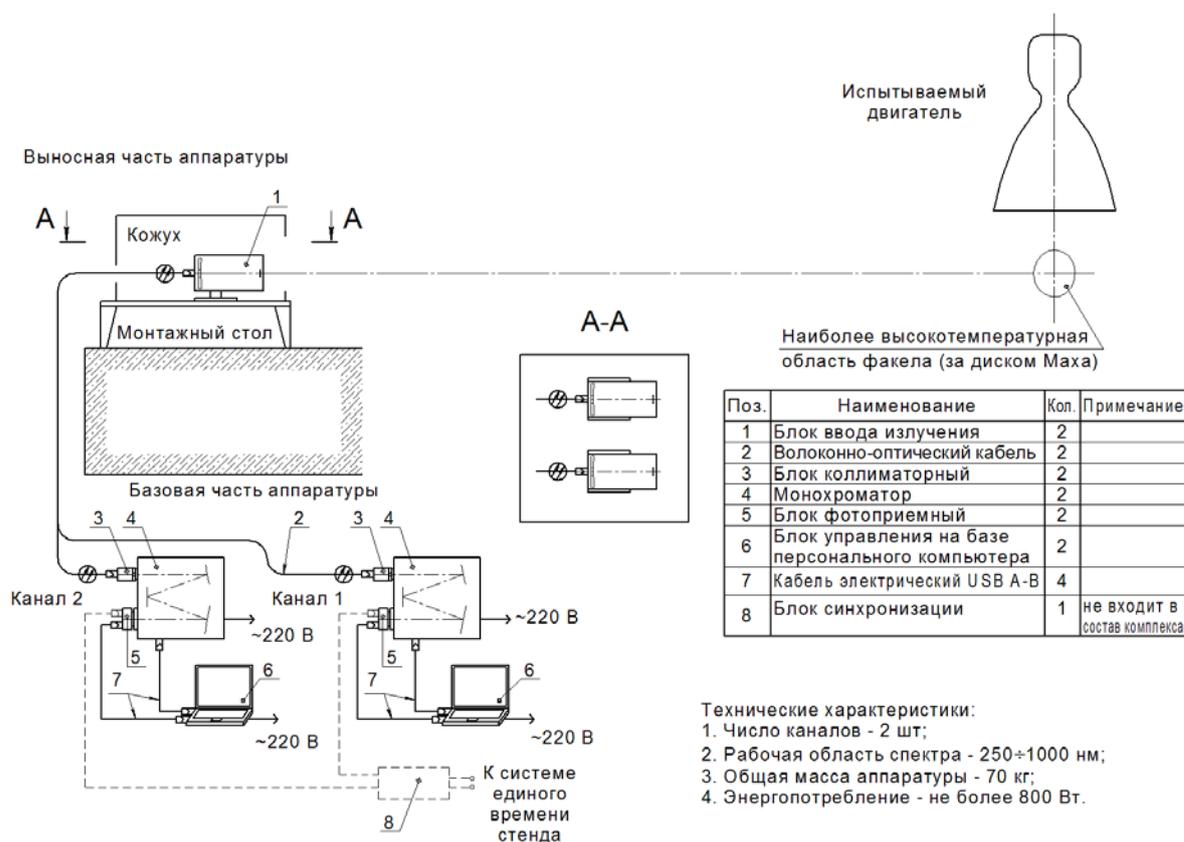


Рисунок 1 - Схема размещения спектральной аппаратуры при испытаниях

При регистрации спектрограмм используется алгоритм автоматической подстройки времени накопления ПЗС-камеры под уровень сигнала. При обработке данных используются

функции автоматического вычитания линии фона и определения интенсивности линий элементов.

Обработка опытного образца аппаратуры СФИК-2 проводилась во время испытаний двигателя 8Д49 на стенде 50 испытательного комплекса ОАО «КБХА».

На рисунке 2 приведен типичный спектр излучения в канале 1 (370-405 нм). На спектрах хорошо отождествляются линии железа Fe и марганца Mn, две линии 393,4 и 396,8 нм отождествлены с ионом кальция Ca II. Линии излучения Fe сохраняют сильную интенсивность на протяжении всего периода испытаний, линии Mn и Ca II интенсивны только в первые секунды. Излучение в линиях Fe обуславливается присутствием его в растворенном виде в топливе.

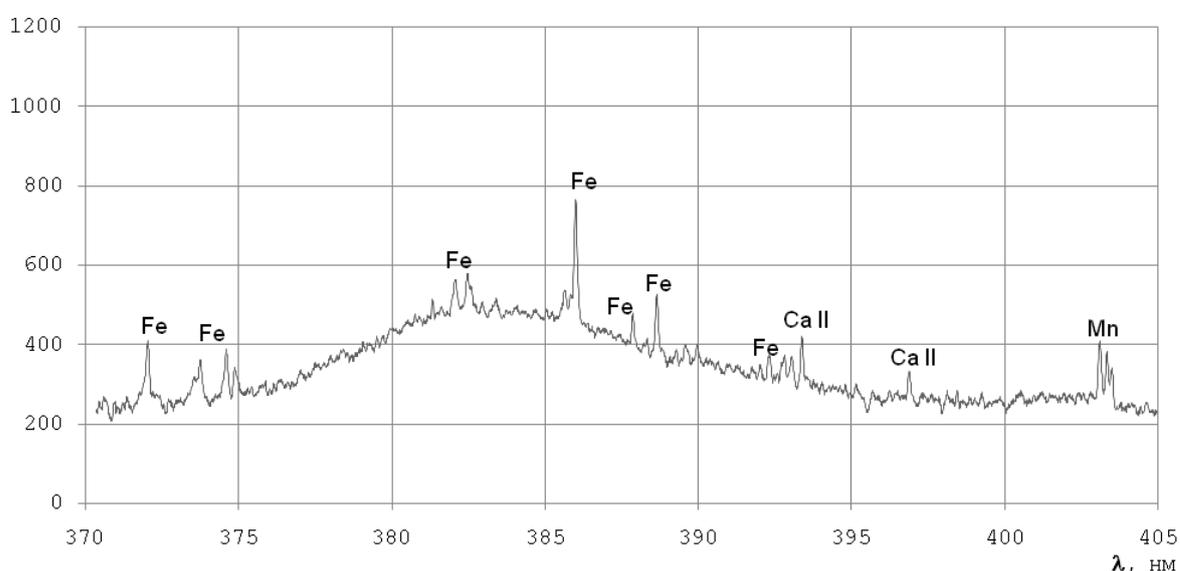


Рисунок 2 - Спектр излучения факела ракетного двигателя (370-405 нм)

В канале 2 проводились измерения в диапазоне спектра 305-350 нм с целью обнаружения линий меди Cu. Для повышения чувствительности канала аппаратура была временно размещена на крыше комплекса. Интенсивные линии излучения спектра меди Cu 324,8 и 327,4 нм в спектре не обнаружены, что свидетельствует о нормальном ходе испытаний и отсутствии уноса меди с элементов конструкции (рисунок 3).

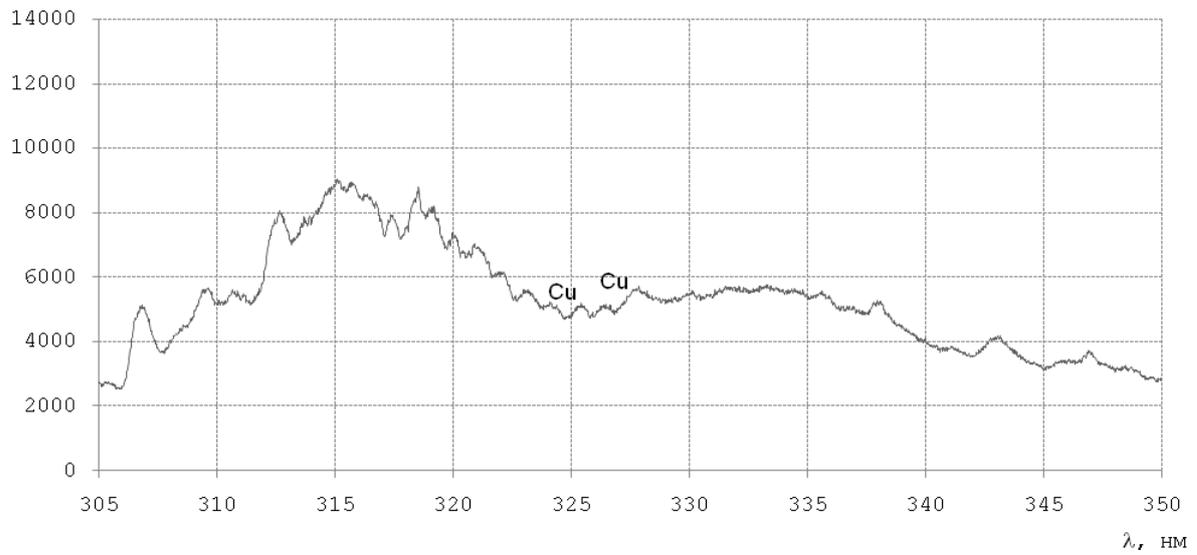


Рисунок 3 - Спектр излучения факела ракетного двигателя (305-350 нм)

Общая динамика интенсивности излучений линий элементов по времени испытаний представлена на рисунке 4

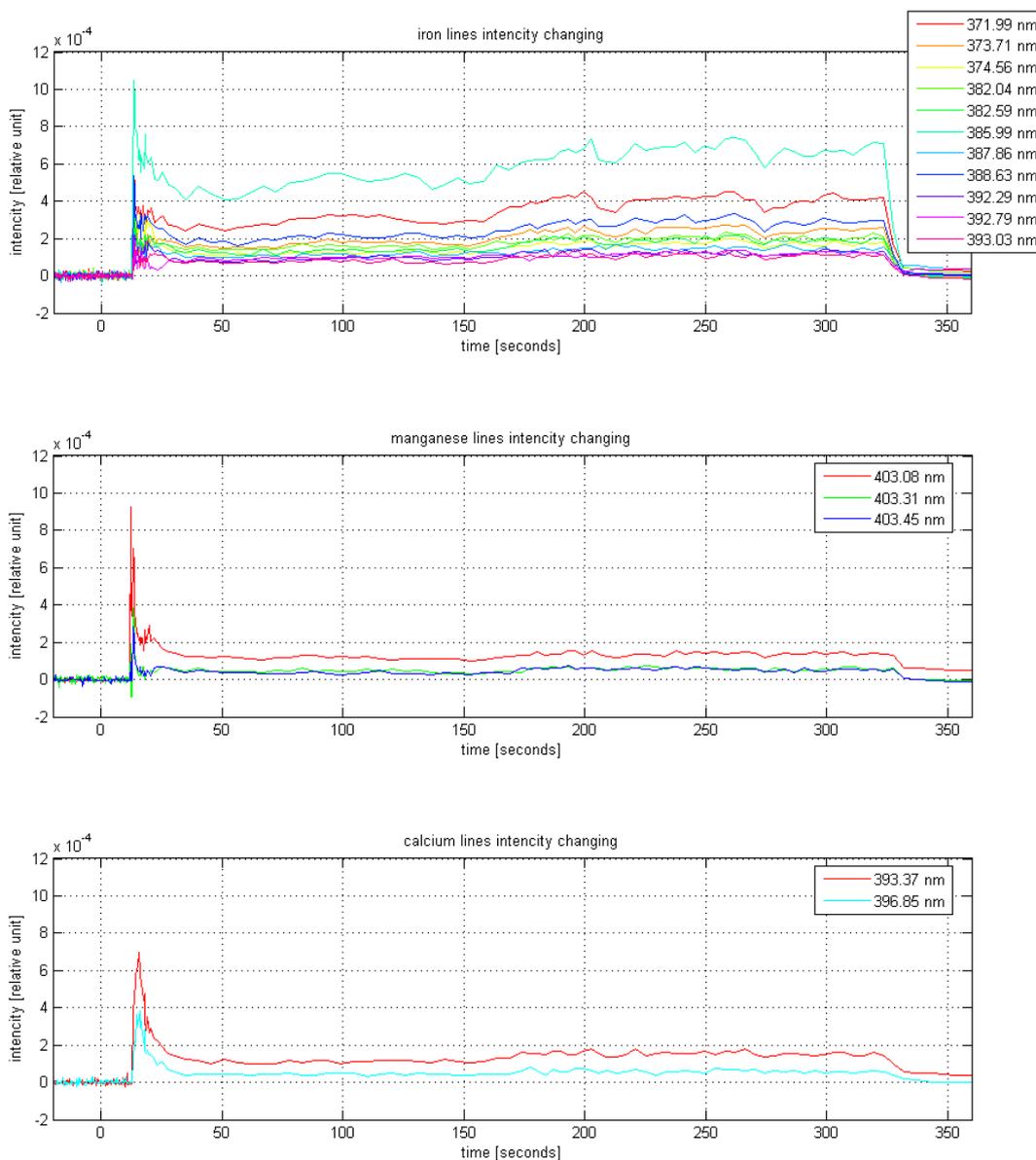


Рисунок 4 - Динамика линий Fe, Mn, Ca II

Штатная работа двигателя характеризуется, как правило, стабильной "спектральной" картиной – спектр излучения факела практически не меняется во времени. Исключение составляют первые ~3 сек работы, когда могут выгорать загрязнения из внутриводвигательных полостей и стендовых систем. В это время на некоторых испытаниях наблюдалось повышенное содержание Fe и Ni, а также присутствие Ca, Mn, Ag, CN.

Другая картина наблюдается при наличии в двигателе загрязнений. Хотя существенного влияния ввода частиц на унос стали непосредственно в момент ввода частиц не обнаружено, внесение загрязнений в двигатель (металлических порошков в топливо)

стимулировало усиление эрозионных процессов. Усиление эрозии наблюдалось по увеличению интенсивности линий Fe, а при появлении сквозных пролизов по появлению полос CN (рисунок 5). Наличие пролизов в критическом сечении камеры сгорания подтвердили результаты дефектации, проведенной после испытания. Следует отметить, что наличие прогаров во внутренней стенке камеры было отождествлено по изменению параметров двигателя через ~ 50 с после появления информации в спектрах излучения.



Рисунок 5 - Спектр излучения при наличии пролизов и прогаров камеры сгорания

Созданные аппаратные и программные средства, разработанная эксплуатационная документация позволяют перейти к регулярной технической диагностике ракетных двигателей, используя спектральный эмиссионный анализ. Проведение измерений с помощью передачи излучения по оптическому волокну позволяет использовать унифицированную аппаратуру при испытаниях ракетных двигателей других типов и на других стендах. При этом данные полученные на первых ("установочных") испытаниях используются для получения "спектрального портрета" двигателя при штатной работе.

При регулярной технической диагностике сравнение результатов испытания со «спектральным портретом» конкретного двигателя позволит сделать следующие выводы:

**двигатель успешно прошел испытание** – унос материалов не наблюдался, или находился в пределах нормы;

**двигатель не прошел испытание или испытание было остановлено**, когда унос материалов превысил допустимые нормы (резкое возрастание интенсивности в линии – критерий аварийной ситуации);

**двигатель прошел испытание, но для принятия решения о возможности его дальнейшего использования необходимы дополнительные исследования** (визуальный контроль, дефектация и т. п.) – наблюдался унос материалов, но он находился в пределах, при которых сохраняется работоспособность двигателя.

### **Библиографический список**

1. D.B. Van Dyke, G.D. Tejwani, F.E. Bircher, and T.J. Cobb, SSME Plume Spectral Data Obtained During Ground Testing at SSC: Analysis and Correlation with Engine Operating Characteristics, 1992 Conference on Advanced Earth-to-Orbit Propulsion Technology, Huntsville, AL, May 19-21, 1992.

2. G.D. Tejwani, J.A. Loboda, D.G. Gardner, D.B. Van Dyke, and D.J. Chenevert, Spectral Studies of SSME Materials in a  $H_3-O_2$  Exhaust Plume, NASA CP 3092, Vol. I, Advanced Earth-to-Orbit Propulsion Technology, Huntsville, AL, May 15-17, 1990.

### **Сведения об авторах**

ТРАВНИКОВ Роман Игоревич, научный сотрудник ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша".  
Ул. Онежская, 8, г. Москва, 125438; e-mail: smoke\_belou@mail.ru.

ПОПОВ Никита Александрович, научный сотрудник ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша".  
Ул. Онежская, 8, г. Москва, 125438; e-mail: radio7@yandex.ru.