

УДК 535.243

УФ-спектрометр для диагностики жидкостных ракетных двигателей

Ю. М. Лотошников

Федеральное государственное унитарное предприятие «НПО «Орион» — ГНЦ РФ, Москва, Россия

Приведены краткие сведения о методах диагностики жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) при стендовых испытаниях. Дано описание ультрафиолетового спектрометра, предназначенного для мониторинга ЖРД методом эмиссионного спектрального анализа излучения факела.

Существующие методы диагностики ЖРД при огневых стендовых испытаниях базируются на регистрации их основных параметров, для чего на агрегаты ЖРД устанавливаются различные датчики (давления, температуры и др.). Эти методы достаточно инерционны и не позволяют обнаруживать начальные стадии разрушения узлов двигателя, вызванные эрозией металлов, и своевременно принимать меры для предотвращения аварий.

В последние годы для мониторинга ЖРД получил развитие метод эмиссионного спектрального анализа излучения факелов, с помощью которого в реальном масштабе времени возможно определить содержание различных химических элементов в струе рабочих газов, характеризующих, в частности, степень эрозии элементов конструкции ЖРД.

Уместно напомнить, что эмиссионный спектральный анализ давно используется в промышленности для контроля качества металлов и сплавов. Аппаратура, применяемая для этого, весьма громоздка и функционирует только в лабораторных условиях [1]. Она совершенно непригодна для работы на испытательных ракетных стендах при огромных вибрационных и акустических нагрузках.

Недавно сотрудниками Центра им. Келдыша под руководством д-ра техн. наук Ф. С. Завелевича на базе монохроматора МДР-23 был изготовлен спектрометр, предназначенный для диагностики ЖРД. Спектральный диапазон работы прибора (320—800 нм) выбран с таким расчетом, чтобы в нем располагались чувствительные линии основных химических элементов, входящих в состав конструкционных сплавов, применяемых для изготовления ЖРД. С помощью этого прибора были выполнены исследования спектрального состава излучения факелов различных типов ЖРД и показана высокая эффективность спектрометрического метода диагностики [2].

Недостаток указанного спектрометра — узкий спектральный диапазон (30 нм) единичного из-

мерения. Для регистрации спектра излучения факела в границах всего рабочего диапазона (320—800 нм) необходимы многократная перестройка монохроматора и проведение соответствующего числа единичных измерений.

В ФГУП «НПО «Орион» под руководством автора данной статьи был разработан и изготовлен быстродействующий спектрометр БРС-6УФ, предназначенный для мониторинга ЖРД, свободный от указанного выше недостатка.

В основу разработки положены оптическая схема и конструкция самолетного быстродействующего спектрометра БРС-6 [3]. Монохроматор прибора построен по автоколлимационной схеме Литтрова.

На рис. 1 представлена принципиальная оптическая схема прибора. Излучение удаленного исследуемого источника проектируется на входную щель 6 монохроматора с помощью осветительного объектива, состоящего из внеосевого параболоида 13 (фокусное расстояние $f = 278$ мм, относительное отверстие $A = 1:3$, внеосевой угол 19°) и плоского зеркала 2. Прошедший через входную щель расходящийся пучок падает на коллиматорный объектив 10 и направляется параллельным пучком на дифракционную решетку 11. Дисперсия исследуемого излучения осуществляется репликой дифракционной решетки с количеством штрихов на один мм $N = 1200$ и рабочей площадью 90×90 мм². В качестве коллиматорного объектива использована такая же внеосевая парабола, что и в осветительном объективе. Диспергированный пучок возвращается на параболу 10, которая в этом случае выполняет функцию камерного объектива, фокусирующего спектр излучения в плоскости выходной щели 8. Непосредственно за щелью установлен приемник лучистой энергии 9. При вращении дифракционной решетки вокруг оси «О» спектр перемещается в плоскости выходной щели, через которую исследуемое излучение попадает в фотоприемник. Спектр сканируется со скоростью 10 раз в секунду. Углы дифракции для гранич-

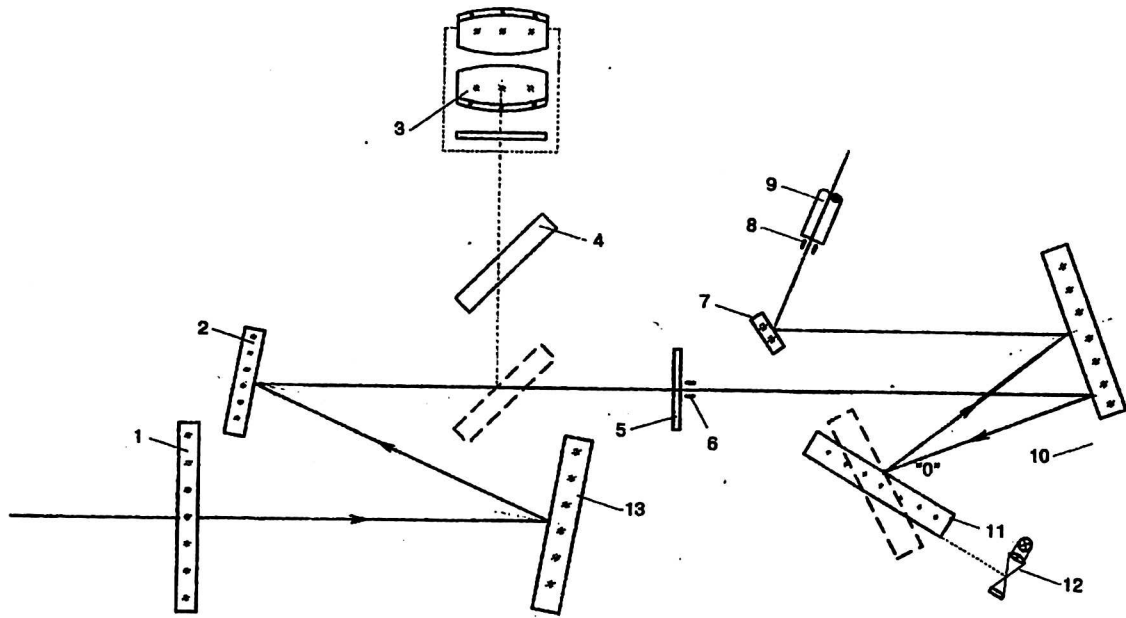


Рис. 1. Оптическая схема спектрометра БРС-6УФ:

- 1 — защитное окно; 2, 7 — плоские зеркала; 3 — оптический визир; 4 — подвижное зеркало; 5 — отрезающий фильтр; 6 — входная щель; 8 — выходная щель; 9 — фотоумножитель; 10, 13 — внеосевые параболы; 11 — дифракционная решетка; 12 — реперный отметчик

ных длин волн рабочего диапазона монохроматора 300 и 600 нм составляют, соответственно, 10,3 и 21°. Линейная дисперсия прибора равна 346 мм/мкм, при этом протяженность спектра в плоскости щели составляет 104 мм.

В качестве приемника лучистой энергии применен фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) типа ФЭУ-115МУ, который имеет специальную жесткую конструкцию блока динодов. Это позволяет эксплуатировать ФЭУ в условиях больших уровней вибраций и акустических шумов. Входное окно ФЭУ выполнено из увиолевого стекла,

обеспечивающего его высокую чувствительность S_1 в ультрафиолетовой области спектра (рис. 2, а).

Перед входной щелью монохроматора установлен отрезающий светофильтр 5, изготовленный из стекла марки СЗС-14 толщиной 2,0 мм. На рис. 2, б приведена относительная спектральная чувствительность S_2 спектрометра БРС-6УФ, рассчитанная с учетом распределения энергии в спектре дифракционной решетки, относительной спектральной чувствительности ФЭУ-115МУ и спектрального коэффициента пропускания стекла СЗС-14.

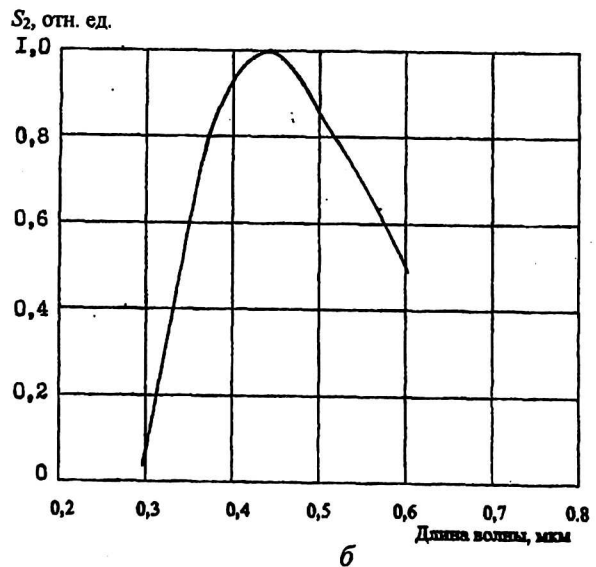
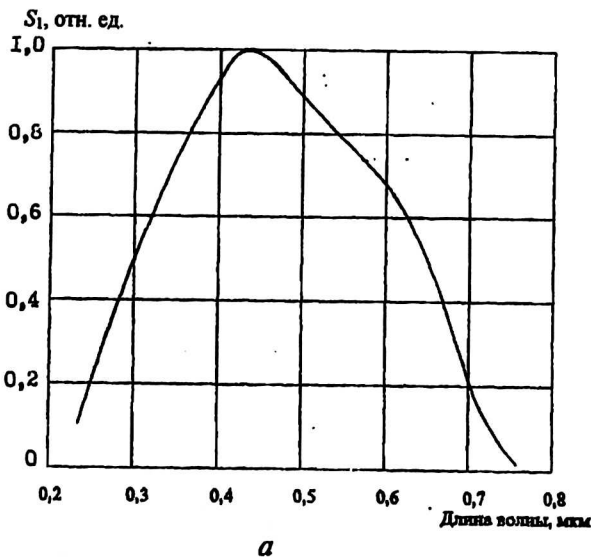


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность, S : а — ФЭУ-115МУ; б — спектрометра БРС-6УФ

Конструкция прибора

Оптические и механические узлы монохроматора смонтированы на плате из алюминий-магниевого сплава. После механической обработки для снятия остаточных напряжений плата прошла соответствующую термическую обработку. На верхней стороне платы размещены все оптические элементы монохроматора: узел коллиматорного объектива 10, узел дифракционной решетки, плоское поворотное зеркало 7, входная 6 и выходная 8 щели и фотоумножитель 9. Входная щель с отрезающим светофильтром установлена неподвижно в фокальной плоскости коллиматорного объектива. Выходная щель объединена в один узел с ФЭУ. С помощью микрометрических винтов выходная щель перемещается вдоль спектра, для уточнения границ спектрального диапазона прибора, и поперек, для точной фокусировки щели в фокальной плоскости камерного объектива.

На нижней стороне платы установлен механизм поворота дифракционной решетки, состоящий из электродвигателя, соединенного с червячным редуктором, и эксцентрикового узла, соединенного с осью решетки. На оси вращения решетки укреплен датчик угла поворота, сигналы которого служат для привязки спектрограмм к шкале длин волн. Здесь же находятся усилители реперных импульсов, стабилизатор напряжения питания электродвигателя и стабилизатор тока питания лампы-датчика углов поворота решетки.

Плата с оптико-механическими элементами установлена в коробчатом корпусе, сваренном из листовой нержавеющей стали. Корпус герметизирован для предохранения деталей монохрома-

тора от действия агрессивных паров компонентов жидкого ракетного топлива.

Осветительный объектив выполнен в виде отдельного узла, для которого в корпусе монохроматора имеется соответствующее посадочное место. В объективе имеется оптический визир, состоящий из подвижного плоского зеркала и окуляра. Визир позволяет наводить спектрометр на удаленный объект. Входное защитное окно изготовлено из кварцевого стекла марки КУ.

Предварительный усилитель сигналов ФЭУ установлен в экране на корпусе монохроматора рядом с ФЭУ. Для снижения электромагнитных помех ФЭУ помещен в экран, изготовленный из магнитомягкой стали.

Обработка и регистрация информационных и служебных сигналов производится на ПЭВМ.

Градуировка спектрометра по длинам волн производилась по линиям паров ртути лампы ПРК-2, приведенном в [4]. На рис. 3 представлена спектрограмма излучения лампы ПРК-2.

Основные технические характеристики ПРК-2

Рабочий спектральный диапазон, нм	300—600
Длина спектра, мм	104
Скорость сканирования, спектр/с	10
Фокусное расстояние осветительного и камерного объективов, мм	278
Относительное отверстие объективов, мм	1:3
Угол поля зрения, угл. мин	30×0,2
Число штрихов дифракционной решетки, штрих/мм	1200
Рабочая площадь решетки, мм ²	90×90
Дисперсия при $\lambda = 450$ нм, нм/мм	2,9
Реальное разрешение, \AA	4
Масса прибора, кг	12

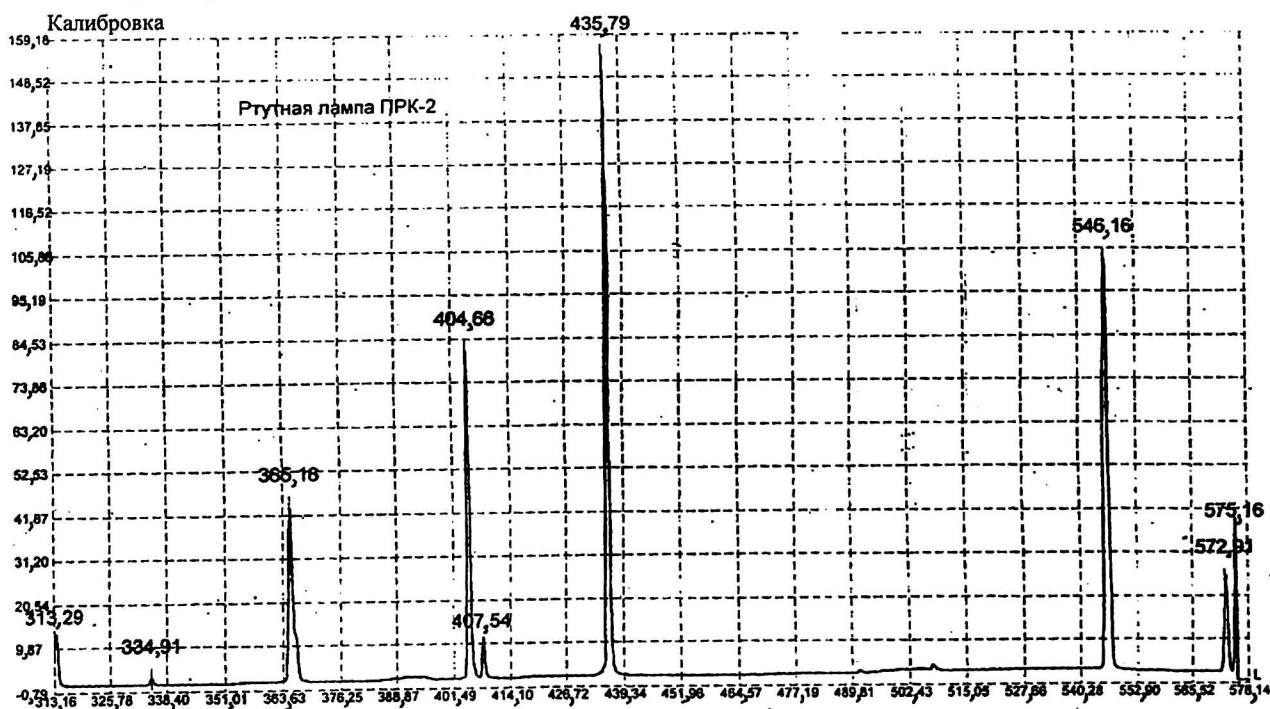


Рис. 3. Спектрограмма излучения лампы ПРК-2

Заключение

Благодаря быстрому сканированию спектра в границах всего рабочего диапазона спектрометр БРС-6УФ позволяет производить анализ чувствительных линий химических элементов в достаточно широкой области спектра, что обеспечивает надежную диагностику состояния деталей, узлов и агрегатов ЖРД при огневых испытаниях в реальном масштабе времени.

Литература

1. Шишовский А. А. Прикладная физическая оптика/ ГИФМЛ. — М., 1961.
2. Головин Ю. М., Завелевич Ф. С., Кучин А. П., Маццкий Ю. П., Мошкин К. Б., Романовский А. С. Спектрометрический метод диагностики ЖРД// ИФЖ. март-апрель 2002. Т. 75. № 2.
3. Лотошников Ю. М., Журавлева Ю. Н. Специальные быстродействующие спектрометры и телерадиометры с полупроводниковыми приемниками излучения// Прикладная физика. 2000. № 5.
4. Справочная книга по светотехнике/ ИАН СССР. — М., 1956. С. 390.

UV-spectrometer for liquid-fuel missile engines diagnostics

Yu. M. Lotoshnikov

ORION Federal Research-and-Production Association, Moscow, Russia

A short information about methods for diagnostics of liquid propellant rockets (LPR) during stand tests is presented. A description of UV-spectrometer destined for LPR monitoring by emission spectral analysis method of plume radiation is given.