

БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА ЖРД ПО СПЕКТРУ ИЗЛУЧЕНИЯ ФАКЕЛА

Завелевич Ф.С., Головин Ю.М., Маицкий Ю.П., Мошкин К.Б.,
Романовский А.С.

Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, г. Москва

В настоящее время существует достаточно много методов диагностики узлов и агрегатов жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Суть этих методов заключается в измерении основных параметров двигателей в процессе испытаний с помощью установки на агрегаты ЖРД измерительной аппаратуры (датчики давления, температуры, расходов, вибраций и т.д.), что усложняет проведение испытаний за счет внесения различных доработок в узлы и агрегаты двигателя и в ряде случаев недопустимо из-за возможного изменения характеристик двигателя.

Метод диагностики ЖРД по спектру излучения факела имеет очевидные преимущества перед традиционными. Во-первых, этот метод не требует никаких доработок двигательной установки. Во-вторых, ввиду малой инерционности он позволяет получать информацию в реальном масштабе времени и, в случае необходимости, принимать соответствующие меры. В-третьих, этот метод позволяет судить об эрозии деталей и узлов ЖРД по спектральным линиям излучения металлов, которые не могут быть определены другими методами. Мониторинг уноса материалов крайне важен не только для оценки ресурса различных элементов ЖРД, но и, в первую очередь, для задачи предотвращения возгорания.

Идея определения содержания различных химических элементов в истекающей струе рабочих газов по спектру излучения факела и использования этих данных для диагностики ЖРД получила развитие в последние годы. [1, 2].

Измерительная аппаратура. Разработанная аппаратура для измерения спектров излучения факела ЖРД [3] состоит из фокусирующего сферического зеркала диаметром 120 мм и фокусным расстоянием 1.2 м, дифракционного монохроматора, фотоприемного блока, видеобластера и ПЭВМ.

Монохроматор имеет в своем составе плоскую дифракционную решетку с количеством штрихов - 1200 на мм; два сферических зеркала с фокусным расстоянием 600 мм. Рабочая область монохроматора по спектру составляет 300–1000 нм, обратная линейная дисперсия – 1.3 нм/мм.

В фотоприемный блок входит ПЗС-линейка (2120 элементов; размер элемента – 14×14 мкм), контроллер и буферные операционные усилители.

Видеобластер предназначен для преобразования видеосигнала в

цифровой поток данных, поступающий в ПЭВМ для дальнейшей обработки и отображения результатов на дисплее. В состав видеобластера входят: контроллер, оперативное запоминающее устройство, аналого-цифровой преобразователь и компаратор.

Основные характеристики аппаратуры следующие:

- спектральный диапазон – 320–800 нм;
- спектральный диапазон единичного измерения – 30 нм;
- максимальное спектральное разрешение – 0.02 нм;
- частота измерений – 3-100 спектров/с.

Результаты измерения спектров факела ЖРД. Измерения спектров излучения факелов были проведены при испытаниях на стендах Конструкторского бюро химической автоматики двух типов двигателей: на топливе азотный тетраоксид + несимметричный диметилгидразин (ЖРД II и III ступеней РН «Протон») и на топливе кислород + керосин (разрабатываемый ЖРД для семейства РН «Ангара»).

При испытаниях ЖРД РН «Протон» продукты сгорания истекали в открытое пространство, т.е. струя была перерасширена, и аппаратура наводилась на участок факела на расстоянии ~ 0.7 м от среза сопла непосредственно за диском Маха, что контролировалось видео съемкой испытаний. При испытаниях кислородно-керосинового двигателя аппаратура наводилась на участок факела вблизи выходного сечения цилиндрического насадка камеры сгорания, поскольку диск Маха находился внутри насадка. Частота измерений при испытаниях составляла 3 спектра в секунду. Ширина входной щели монохроматора устанавливалась 0.2 мм, что обеспечивает спектральное разрешение 0.25 нм.

На рис. 1 представлен типичный спектр излучения факела, характерный для штатного режима работы двигателя. В течение всего испытания спектр не претерпевает существенных изменений, кроме моментов вброса посторонних частиц и запуска двигателя. На фоне непрерывного излучения четко выделяются сильные линии железа 385.99 и 388.63 нм. Интенсивность излучения в линиях не меняется во времени, что свидетельствует о постоянном расходе железа. Причиной появления железа в факеле является присутствие железа растворенного в топливе, что подтверждают результаты химического анализа, который проводится перед каждым испытанием. Для данного испытания расход составляет ≈ 20 мг/с.

На рис. 1 приведен также спектр излучения факела при вводе в магистраль горючего 2.5 г стали 18ХН10Т (70% Fe, 18% Cr, 10% Ni, 1-2% Mn). Из сравнения результатов, видно, что резко увеличивается интенсивность излучения в линиях Fe 385.99 и 388.63 нм и появились новые линии Fe 376.72, 382.59, 388.0, 389.97, 392.29, 392.79 нм.

При проведении одного из измерений сразу после запуска было зарегистрировано резкое увеличение излучения в спектральных линиях и

увеличение фонового излучения в 3 раза. Фоновое излучение пришло в норму через несколько секунд, а излучение в линиях, постепенно спадая, пришло в норму только через 30 секунд. После испытаний этот двигатель подвергся дефектации и было установлено существенное выгорание соплового аппарата ТНА. На рис. 2 показан спектр излучения, зафиксированный в момент запуска двигателя, и фотография соплового аппарата с обгоревшими лопатками.

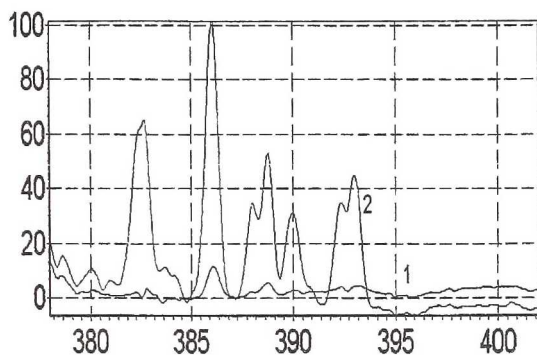


Рис. 1. Спектры излучения:
1- штатная работа, 2 – ввод стали

с обгоревшими лопатками. При проведении некоторых испытаний в спектрах регистрировались линии циана рис. 3. После сопоставления с результатами дефектаций и анализа расходов горючего и окислителя был сделан вывод, что такая спектральная особенность обозначает появление пролизов в критическом сечении и, следовательно, попадания горючего в зону за критическим сечением. Оптическим методом пролизы были зарегистрированы на 30 сек раньше регистрации их штатными методами стенда.

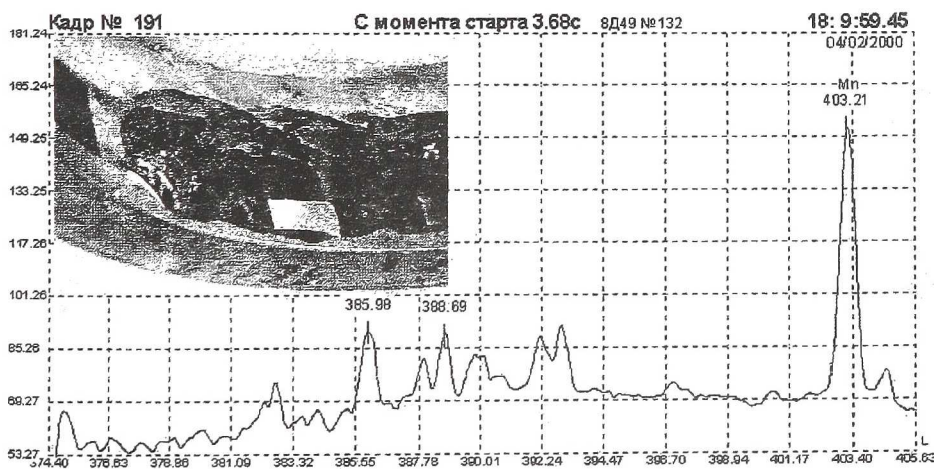


Рис. 2. Спектр излучения и обгоревший сопловой аппарат

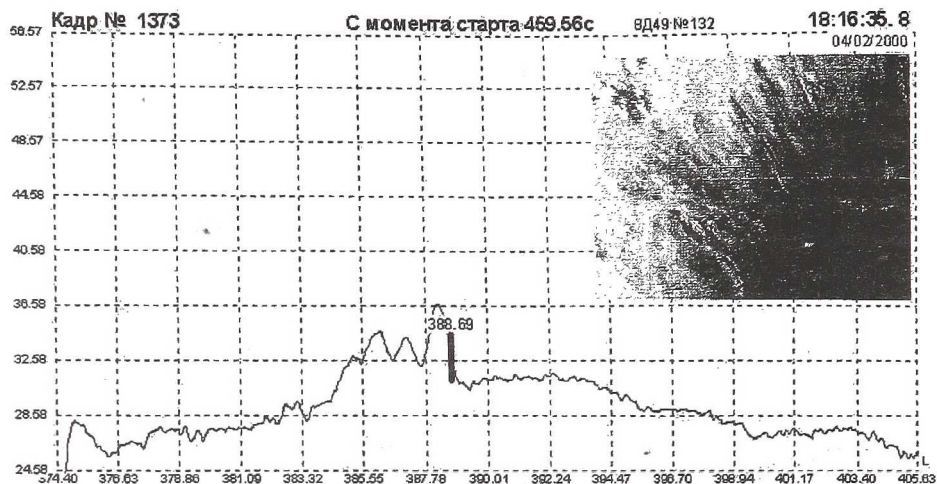


Рис. 3. Регистрация пролизов. Вертикальной линией отмечено положение линии Fe

В отличие от ЖРД РН «Протон» спектр излучения ЖРД РН «Ангара» носит неселективный характер, что обусловлено наличием частиц сажи, формирующем сплошной спектр.

Непосредственно после запуска были зарегистрированы линии Al, присутствующего в составе пускового заряда, и ионов Ca (рис. 4).

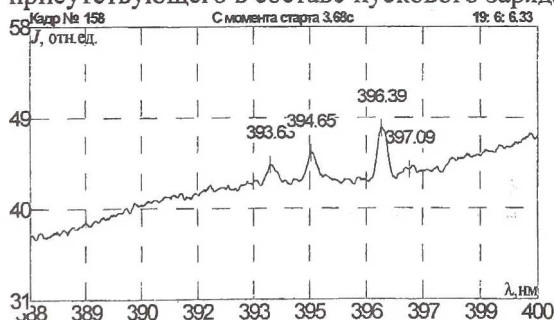


Рис. 4. Спектр излучения факела РН «Ангара»

Интерпретация результатов. В случае малой оптической толщины $\tau = KNl \ll 1$, где K – коэффициент поглощения, N – объемная концентрация атомов, l – толщина излучающего слоя, объемная плотность интегральной мощности излучения J определяется формулой

$$J = \frac{N g A \cdot h \frac{c}{\lambda}}{4 \pi n} \exp\left(-\frac{E_B}{kT}\right), \quad (1)$$

где A – вероятность перехода, g – статистический вес, n – сумма по состояниям, h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – длина волны, E_B – энергия верхнего уровня, k – постоянная Больцмана, T – температура.

С помощью данных [4] для каждой линии по энергиям верхнего уровня E_v , произведению вероятности перехода A и статистический веса g по результатам измерений J можно определить Nl . Однако в центре сильных линий железа оптическая толщина порядка 1 и более. Поэтому была разработана методика расчета излучения в неоднородных слоях газа, основанная на решении уравнения переноса излучения.

Уравнение переноса для монохроматического излучения вдоль луча l имеет вид

$$\frac{dJ_v}{dl} = I_v - K_v J_v. \quad (2)$$

Здесь J_v - спектральной функции источника, I_v - функция источника, v - волновое число ($v=1/\lambda$).

В условиях локального термодинамического равновесия функция источника имеет вид

$$J_v = K_v B_v, \quad (3)$$

где B_v - интенсивность излучения АЧТ (функции Планка).

Коэффициент поглощения K_v есть функция концентрации излучающих частиц (атомов), температуры и давления. Для интересных с точки зрения решаемой задачи линий паров металлов такие данные в литературе отсутствуют.

Величина J - интегральная функция источника (1), которая, очевидно, связана с величиной спектральной функции источника соотношением:

$$J = \int_v J_v dv = \int_v B_v K_v dv = \int_v S \cdot f_v B_v dv, \quad (4)$$

где S - интенсивность линии, f_v - фойгтовский контур линии.

Так как для каждого значения v K_v определяется не одной спектральной линией, то надо учитывать суммарное излучений от всех линий.

Решение дифференциального уравнения (2) имеет вид

$$J = \int_0^l B_v(l') K_v(l') e^{-\int_{l'}^l K_v(l'') dl''} dl' \quad (5)$$

Для определения массового расхода железа используется методика расчета неизотермической струи с переменной концентрацией и переменным давлением по радиусу. Для построения профилей относительного распределения температуры (T/T_0) и давления (P/P_0) использовались данные [5], а для определения профиля относительного распределения концентрации атомов железа Fe в свободном состоянии (N/N_0 , N_0 -число атомов Fe в свободном и связанном состояниях) использовалась программа расчета химически равновесных течений «Астра». Профили приведены на рис. 5.

Так как каждый спектральный прибор имеет аппаратные искажения (аппаратную функцию), то для сравнения с измеренными спектрами расчетный спектр сворачивается с функцией Гаусса, где дисперсия берется эквивалентной разрешающей способности прибора во время измерений – 0.25 нм.

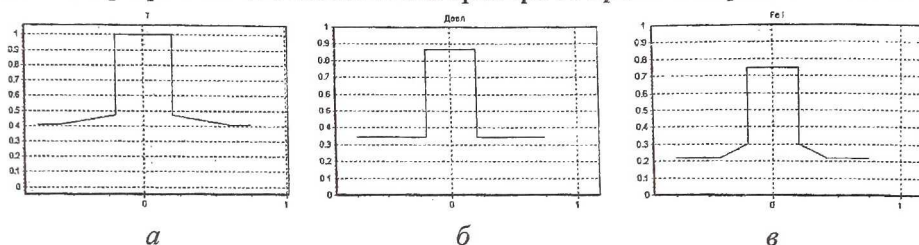


Рис. 5. Профили исходных данных, температуры $T_0=3200$ К (а), давления $P_0=200$ кПа (б), концентрации атомов (в) по оси абсцисс расстояние от центра струи в м

В результате сопоставления спектра, полученного при горении соплового аппарата (рис. 2) и рассчитанных спектров при разных значениях N_0 оказалось, что их удовлетворительное совпадение (рис. 6) имеет место при $N_0=3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ соответствующего расхода железа $C_{\text{Fe}}=4 \text{ г/с}$.

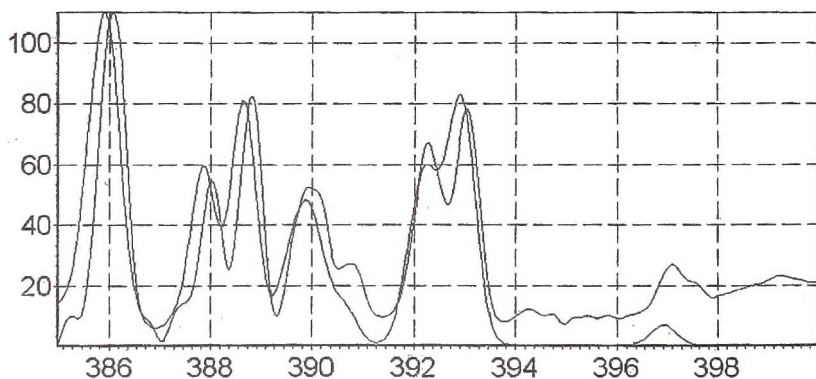


Рис. 6. Сопоставление измеренного спектра с расчетным

Список литературы

1. G.D.Tejewani et. al. "Space Shuttle main engine health monitoring with exhaust plume emission spectroscopy". J. Spac. Rock. № 3, 1998.
2. D.A.Benzing, K.W.Whitaker. "Approach to Space Shuttle main engine health monitoring using plume spectra". J. Spac. Rock. № 6, 1998.
3. F.S. Zavelevich, Yu.M. Golovin, Yu.P. Matsitsky, K.B. Moshkin, A.S. Romanovsky. Engine Health Monitoring with Exhaust Plume Emission Spectroscopy. Fourth International Symposium on Liquid Space Propulsion: Sci-

- entific Progress in the Service of Space Access at the Beginning of the Third Millenium. DLR-Lampoldshausen, Germany, March 13-15, 2000.
4. Корлиз Ч., Бозман У. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. – М.: «Мир», 1968.
 5. Аверенкова Г.И., Ашратов Э.А. Сверхзвуковые струи идеального газа. – М.: Изд-во МГУ, Ч.2, 1971.

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ АОС ПО НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Губанов А.Н., Чемпинский Л.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Актуальность разработки автоматизированных обучающих систем (АОС) по начертательной геометрии обусловлена тем, что современные инструментальные средства машиностроительных САПР всё чаще используют для описания проектируемого изделия его геометрическую модель, на основе которой получают требуемую технологическую и конструкторскую документацию. Соответственно для оперирования геометрической моделью необходимо развитое пространственное воображение. Курс начертательной геометрии является базовым, для развития пространственного воображения. Дополненный современными средствами информационных технологий, классический курс начертательной геометрии даёт мощный инструмент для развития пространственного воображения. Использование АОС позволяет значительно повысить качество обучения за счёт индивидуального подхода к обучению.

Основной недостаток классического курса начертательной геометрии по развитию пространственного воображения связан с отсутствием визуальной трёхмерной модели, соответствующей построениям, выполняемым на плоскостях проекций. Для решения этой проблемы необходимо дополнить классический курс, основанный на трёх проекционных построениях визуальным представлением пространственного макета. Следует отметить, что объёмное изображение должно иметь функцию вращения, позволяющую менять угол зрения на пространственный макет. Иначе, плоская интерпретация пространственной модели не позволяет в должной мере развивать пространственное воображение.

Реализовать пространственную модель и механизм её свободного вращения позволяют средства OpenGL, содержащие основные функции по работе с трёхмерными изображениями. На рис. 1 приведен пример интер-