

Д. А. Ягодников, А. В. Рудинский

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ ЖРД

Проведено экспериментальное исследование электромагнитного поля сверхзвуковой струи жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) при варьировании режимных параметров двигателя. Получены частотные и корреляционные характеристики датчика магнитного поля (ДМП), позволяющие проводить диагностику рабочего процесса ЖРД.

E-mail: daj@bmstu.ru; Alex_rudinskiy@mail.ru

Ключевые слова: *ракетный двигатель, рабочий процесс, напряженность магнитного поля, частотный спектр, система диагностики, система аварийной защиты.*

Разработка систем аварийной защиты (САЗ) включает в себя решение ряда задач по обеспечению заданной надежности работы, быстродействия и устойчивости к внешним помехам. Предпочтение отдают бесконтактным системам, которые не вносят изменения в рабочий процесс двигательной установки и позволяют контролировать данный процесс по косвенным параметрам газового потока. Однако эти параметры должны находиться в однозначной зависимости от термодинамических свойств потока. В работах [1, 2] описана возможность определения температуры высокоэнтальпийного потока продуктов сгорания ЖРД по его электрической проводимости. Выявленная в процессе экспериментально-теоретических исследований зависимость температуры потока от электропроводности позволила установить температуру с достаточной точностью. В качестве датчика в такой системе использован зонд — уловитель заряженных частиц, которые образуются в результате эндотермических реакций в камере ракетного двигателя. Существенным минусом описанной выше системы является ограничение ее применения по температуре (2 200...2 400 К в зависимости от материала зонда), а также зависимость частотного диапазона принимающего сигнала от конструкции самого зонда.

Применение датчиков магнитного и электрического полей позволяет расширить частотные диапазоны опроса системы диагностики двигателя, предоставляя возможность отслеживать малейшие колебания параметров потока (пульсаций давления, температуры, расхода компонентов), определять наличие частиц металлов (используется в качестве диагностики аварийного разгара элементов проточного тракта), не внося возмущений в истекающий из сопла двигателя поток. Отсутствие прямого воздействия высокотемпературных продук-

тов сгорания на элементы приема сигнала (датчики магнитного и электрического полей) повышает надежность такой системы.

Цель данной работы заключается в экспериментально-теоретическом определении характеристик электромагнитного поля сверхзвуковой струи продуктов сгорания углеводородного топлива для диагностики рабочего процесса и создания САЗ ЖРД.

Экспериментальные исследования проведены на модельном ЖРД, работающем на этиловом спирте (75 % (об.)) и газообразном кислороде [3]. Выбор такой пары компонентов топлива продиктован требованиями безопасности работы стенда. Высокая температура горения указанной топливной композиции обуславливает достаточную ионизацию продуктов сгорания для проведения электрофизических исследований.

Экспериментальная установка для определения электромагнитных характеристик (рис. 1) включала в себя осциллограф 1, персональный компьютер 2, плату сопряжения 3, усилитель 4, датчик электрического поля 5, датчик магнитного поля 6, свечу зажигания 7, высоковольтный генератор 8, реостат 9, источник питания 10.

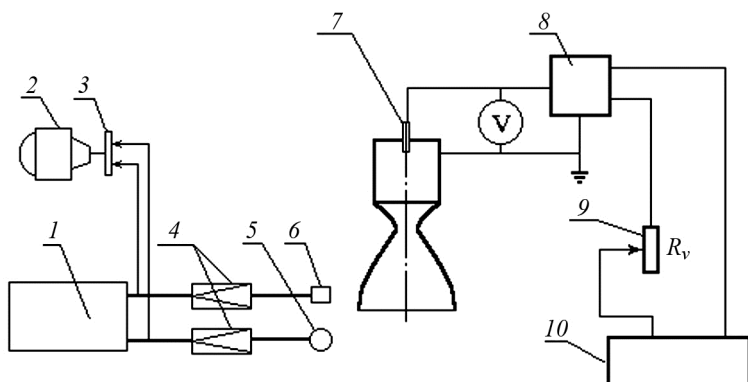


Рис. 1. Схема регистрации параметров электромагнитного поля

Для регистрации электромагнитного поля выхлопной струи продуктов сгорания ЖРД использованы датчики магнитного (ДМП) и электрического (ДЭП) полей, которые позволяли в процессе эксперимента фиксировать переменные составляющие магнитного и электрического полей в диапазонах значений частот $10^2 \dots 10^5$ Гц. Сигнал с первичных преобразователей 5, 6 (см. рис. 1) поступал на промежуточные усилители 4. Регистрацию и обработку потока информации осуществляли с помощью средств микропроцессорной и вычислительной техники.

В целях исследования возможности применения электрофизических методов для ранней диагностики прогара элементов конструкции ЖРД разработана конструкция и методика подачи порошкообразного материала (ПМ) в проточную часть камеры двигателя в режиме заторможенного плотного слоя (рис. 2). В процессе экспери-

ментов исследовано влияние электроискровой системы зажигания ЖРД на напряженность магнитного поля продуктов сгорания.

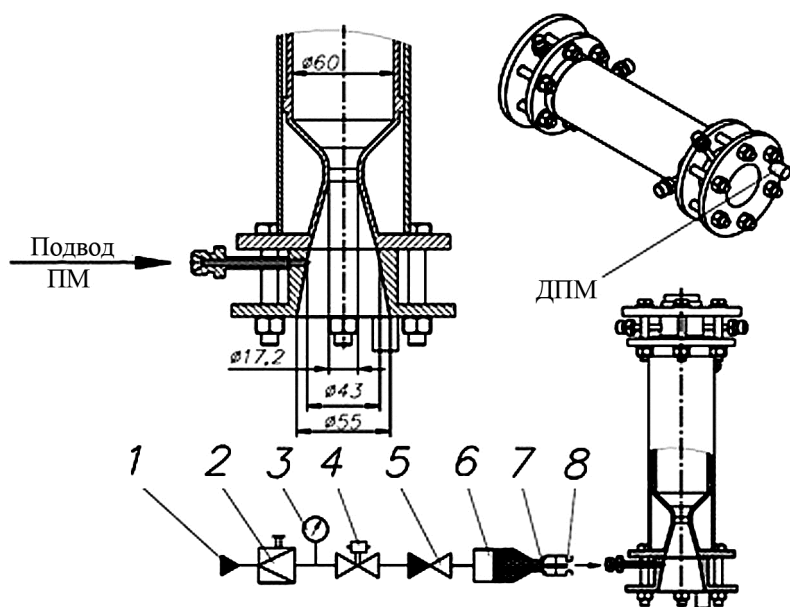


Рис. 2. Подача порошкообразного материала методом заторможенного плотного слоя

Система подачи ПМ состоит из магистрали подачи основного воздуха 1, редуктора 2, манометра 3, электропневмоклапана 4, обратного клапана 5, бака с ПМ 6, дросселя 7, клапана ПМГ 8, камеры сгорания (КС).

Одним из основных элементов конструкции является дроссель 7, который выполнен с коническим конфузурным входом. Клапан 8 служит для подачи ПМ в заданный момент времени.

В процессе прогара элементов проточной части ЖРД (подводящие магистрали, форсуночная головка, стенки камеры сгорания и сопла) в рабочее тело неизбежно будут попадать частицы оксидов металлов, выступающих в виде конденсированной фазы (*k*-фазы). Конструкционные материалы, используемые в ЖРД, с одной стороны, обуславливают химический состав *k*-фазы, а с другой — могут вызывать различные изменения электромагнитных характеристик рабочего тела. Поскольку в ЖРД широко используются сплавы на основе хрома, никеля и меди, то в данной работе при моделировании разгара проточной части использованы порошкообразные материалы на основе упомянутых химических элементов: хромоникелевый сплав Sulzer-Metco 2001 и бронза (БрХ08) с частицами размером 1...100 мкм.

Амплитудно-частотный анализ полученных сигналов ДМП и ДЭП, проведенный в пакете обработки сигналов WinПос 3, основан на преобразованиях Фурье:

$$X_k = \sum x_n e^{-\frac{2\pi i}{N} kn},$$

где N — число значений сигнала, измеренных за период; x_n — измеренные значения сигнала.

На рис. 3 представлены реализации сигналов ДЭП и ДМП и их спектры. В момент увеличения давления в КС происходила подача ПМ в сверхзвуковую область сопла, при фиксировании которой отмечено скачкообразное повышение давления в магистрали клапана.

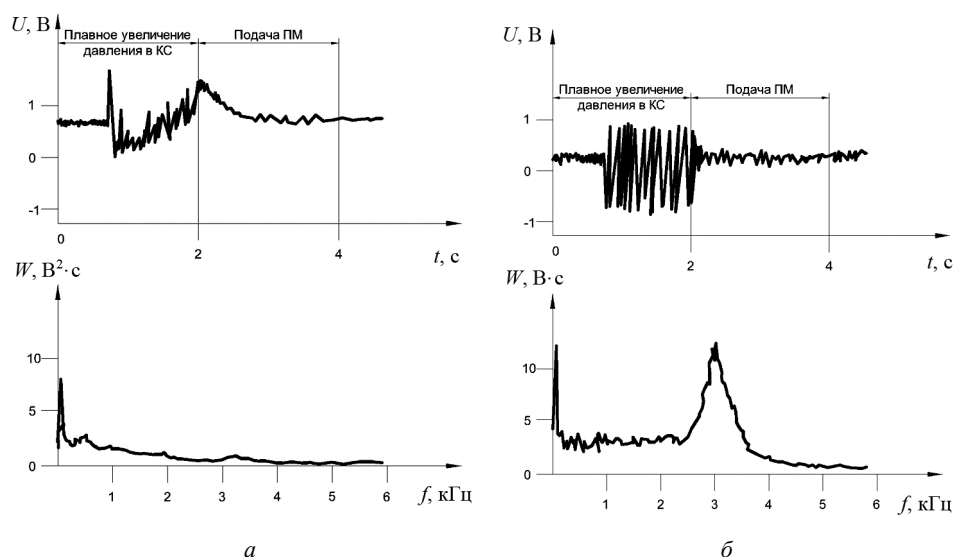


Рис. 3. Реализации $U(t)$ и частотные спектры $W(f)$ сигналов ДЭП (а) и ДМП (б)

Возникающие вследствие термоэлектронной эмиссии с поверхности частиц металлов электрические заряды генерируют переменные по времени электрические и магнитные поля, которые при истечении продуктов сгорания (ПС) фиксируют с помощью датчиков электрического и магнитного полей, расположенных вблизи среза сопла (см. рис. 1).

Зарегистрированные сигналы переменных по времени электрических и магнитных полей имеют характерный вид ограниченных по времени импульсов. Длительность импульсов определяется временем подачи порошка в сверхзвуковую часть сопла.

После окончания подачи порошка, фиксируемого скачкообразным уменьшением давления на управляющем клапане 8 (см. рис. 2), значения сигналов датчиков ДМП и ДЭП снижаются до нуля.

Зависимости от времени давления, зарегистрированные изменения давления подачи ПМ и в КС, представляют собой, как и сигналы с датчиков ДМП и ДЭП, ограниченные по времени переходные процессы. Такие динамические процессы отличаются непрерывным распределением спектральных амплитуд пульсаций давления. Зафиксированные сигналы характеризуются распределением спектральных составляющих, сходным с нормальным законом в области низких частот. Это наиболее отчетливо видно по спектру сигнала ДЭП (см. рис. 3, а).

Дополнительную информацию об измеренных сигналах можно определить, если зависимость амплитуд спектральных составляющих представить в виде функции двух параметров — частоты и времени. Такое представление позволяет проследить последовательную трансформацию спектров сигналов в каждый момент времени всего цикла проведения испытаний. Пример полученного результата приведен на рис. 4.

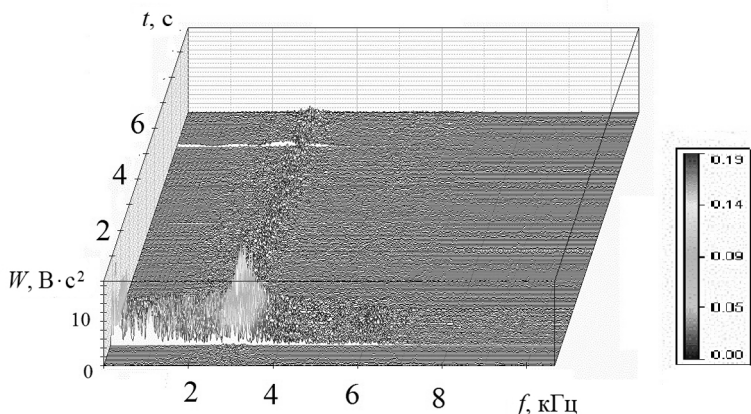


Рис. 4. Изменение по времени спектров сигналов ДМП

При разных моментах времени проведения испытаний для сигналов ДМП в спектрах появляются характерные дискретные доминирующие составляющие. На рис. 4 видно, что в момент подачи ПМ доминирующими частотами спектра являются, Гц: $f_1 = 3\ 010$, $f_2 = 3\ 360$, $f_3 = 3\ 550$. На момент подачи ПМ в сверхзвуковую часть сопла максимальным амплитудам спектральных составляющих сигнала соответствует частота $f \approx 3\ 010$ Гц.

Сравнительный анализ спектров различных сигналов (ДМП, ДЭП, датчика давления и т. д.) позволяет получать необходимые данные для определения характеристик динамических систем. Однако для решения целого ряда задач, которые, например, связаны с выявлением зон разрушений элементов проточного тракта сопла, оказывается недостаточно только данных анализа спектров сигналов,

передаваемых от источника в точку замера. Как отмечалось, один из методов решения таких задач состоит в применении синхронного спектрального анализа двух исследуемых сигналов и полученной на его основе функции когерентности, которая определяет количественную меру линейной взаимосвязи между этими сигналами. При обработке результатов испытаний данный метод применен к двум парам сигналов — ДМП и ДЭП.

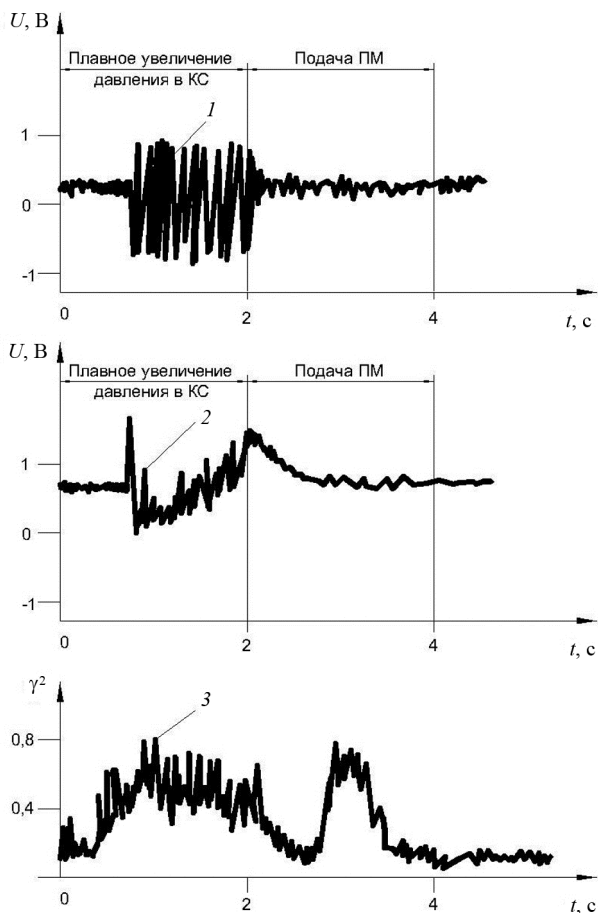


Рис. 5. Функция когерентности сигналов ДМП и ДЭП:

1 — сигнал ДМП; 2 — сигнал ДЭП; 3 — функция когерентности сигналов ДМП и ДЭП

Например, на выделенных частотах, Гц, $f_1 = 940$, $f_2 = 1\,005$, $f_3 = 2\,990$, $f_4 = 3\,010$ (рис. 5) локальных максимумов когерентного спектра значения спектральных составляющих γ^2 более 0,8, что отчетливо указывает на взаимосвязь двух сигналов — электрического и магнитного поля.

Таким образом, проведенные огневые стендовые испытания позволили установить зависимость характеристик электромагнитного

поля ПС от основных режимных параметров работы модельного ЖРД, а также подтвердили возможность использования электрофизических методов для диагностики разрушения проточной части ракетных двигательных установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинчук В.А. Диагностирование технического состояния жидкостных ракетных двигателей на основе электрофизических измерений / В.А. Пинчук, В.А. Грибакин, К.Б. Болдырев, А.С. Перфильев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 11. С. 17–23.
2. Пинчук В.А. Двигательная электризация как явление, отображающее развитие зарядовой неустойчивости в среде продуктов сгорания при истечении // Журнал технической физики. 1997. Т. 67, № 8. С. 21–24.
3. Экспериментально-теоретическое исследование и разработка электрофизических методов контроля и диагностики жидкостных ракетных двигателей / Д.А., Ягодников А.Н. Бобров, В.М. Анисеев, Л.А. Филимонов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2009. № 3. С. 66–76.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012