

Корреляционный и спектральный анализ электрофизических характеристик продуктов сгорания углеводородного топлива модельного жидкостного ракетного двигателя

© Д.А. Ягодников¹, А.В. Сухов¹, Н.Я. Ирьянов¹,
В.И. Лапицкий¹, С.А. Гришин², А.А. Бунчук²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
Минск, 220072, Республика Беларусь

Представлены методика и результаты корреляционного и спектрального анализа электрофизических характеристик продуктов сгорания керосина и кислорода, зарегистрированных в процессе огневых стендовых испытаний модельного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) с помощью первичных измерительных преобразователей электромагнитного поля. Разработаны математический аппарат и методика вторичной обработки массивов характеристик электромагнитных полей для проведения в диапазоне частот 0...28 ГГц корреляционно-частотного анализа режимных параметров (давление в камере сгорания), а также определяемых параметров (напряженность магнитного поля продуктов сгорания). Установлена близкая к линейной (коэффициент корреляции 0,863) зависимость напряженности магнитного поля продуктов сгорания за соплом от давления в камере сгорания модельного ЖРД. Эта зависимость может быть использована в качестве диагностического признака быстродействующей системы аварийной защиты ЖРД.

Ключевые слова: жидкостный ракетный двигатель, огневые испытания, диагностика, электромагнитное поле, корреляционный анализ, спектральный анализ

Введение. Одно из направлений создания современных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) для ракетно-космической техники связано с разработкой надежных и высокоэффективных методов и средств диагностики, необходимых для реализации наилучших технических характеристик ЖРД при наименьших экономических затратах. Традиционные методы исследования характеристик рабочего процесса в камерах сгорания (КС) не всегда эффективны, в особенности если необходима диагностика физико-химических процессов в объеме КС, и практически не пригодны для создания системы управления, мгновенно реагирующей на аналогичные изменения рабочего процесса.

Для устранения указанных недостатков в последнее время разрабатываются нетрадиционные методы, основанные, например, на акустооптических и электрофизических методах диагностики рабочего процесса в ЖРД [1–3]. Кроме того, при огневых стендовых испытаниях

(ОСИ) регистрируют в основном медленно протекающие процессы, например изменение тяги двигателя, давления, расхода компонентов топлива, температуры и др. [4]. Номенклатура регистрируемых и обрабатываемых быстропротекающих процессов меньше и включает вибрации, число оборотов ротора турбонасосного агрегата и некоторые другие.

Вместе с тем для создания надежных систем диагностики и аварийной защиты ЖРД необходимо использовать информацию, которая формируется первичными измерительными преобразователями (ПИП), опрашиваемыми системой регистрации с большой частотой (свыше 10...20 кГц). Очевидно, что большая дискретизация полезного сигнала обуславливает применение специальных методов обработки, например, с использованием математического аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Среди современных высокоскоростных методов диагностики физико-химических процессов, протекающих в газовых трактах ЖРД, перспективными представляются бесконтактные методы, основанные, например, на регистрации электрофизических характеристик продуктов сгорания топлив, содержащих положительно и отрицательно заряженные ионы, электронный газ. Часть электрического заряда выносится из камеры двигателя, создавая плотность электрического конвективного тока. При этом электрофизические характеристики ионизированного газового потока можно контролировать на основе измерения электромагнитных параметров этого потока как внутри газовых трактов ЖРД, так и на внешней их поверхности. Учитывая, что параметры генерируемого продуктами сгорания электромагнитного поля изменяются с большой частотой, регистрировать их необходимо также с большой частотой, а для анализа применять методы, традиционные для теории случайных процессов [5].

Целью настоящей работы являлись регистрация и проведение корреляционного и спектрального анализа параметров электрических и магнитных полей продуктов сгорания углеводородного топлива, истекающих из сопла модельного ЖРД, для создания базы диагностических признаков систем диагностики и аварийной защиты.

Описание экспериментальной установки и модельного ЖРД. Экспериментальная установка разрабатывалась для проведения ОСИ модельного ЖРД, моделирования различных аварийных ситуаций в работе двигателя и регистрации параметров электромагнитного поля продуктов сгорания углеводородного топлива, истекающих из камеры модельного ЖРД.

Пневмогидравлическая схема (ПГС) экспериментальной установки (рис. 1) включает камеру модельного ЖРД (рис. 2); магистраль подачи окислителя (газообразного кислорода); магистраль подачи горючего (керосин); магистраль подачи азота на продувку магистралей

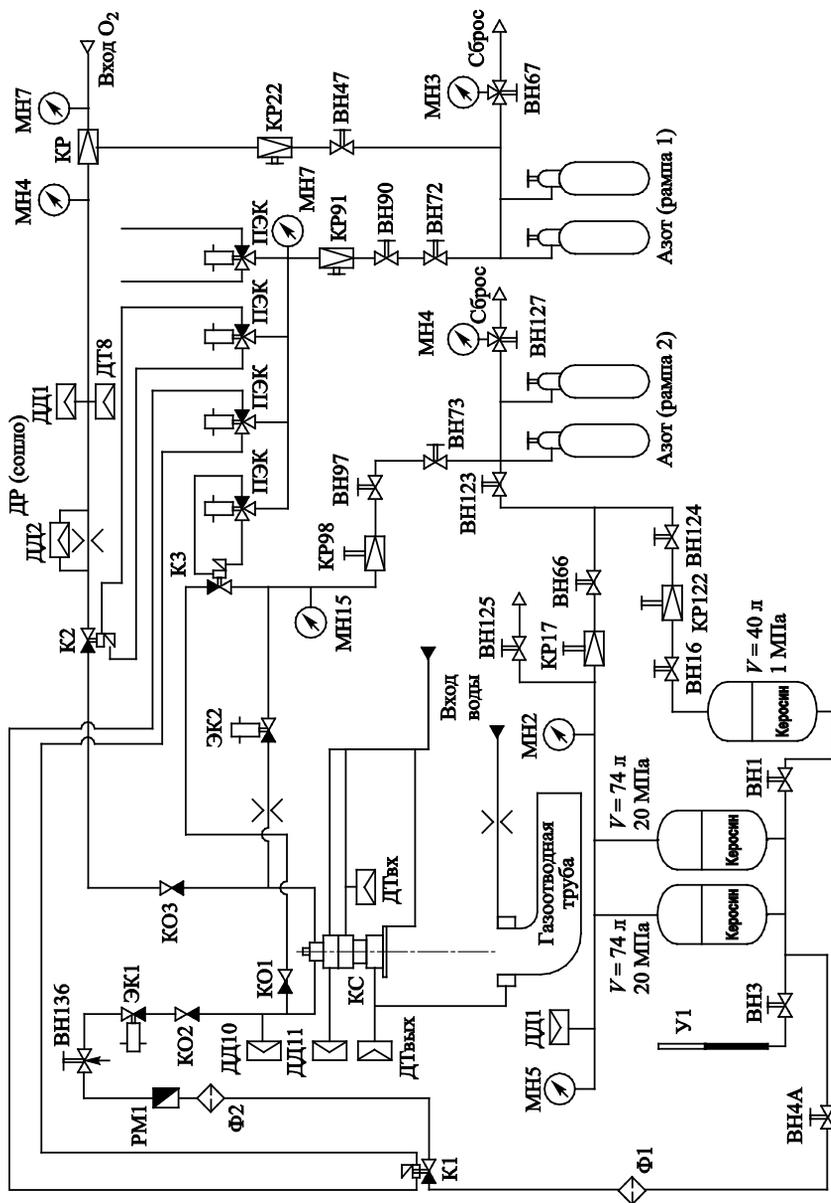


Рис. 1. Пневмогидравлическая схема экспериментальной установки.

ВН — вентиль; К — клапан; ДД — датчик давления; ДР — дроссельный расходомер; МН — манометр; КР — командный редуктор; РМ — расходомер; ЭК — электроклапан; КО — обратный клапан; ПЭК — пневмоэлектроклапан; Ф — фильтр; КС — камера сгорания; У — уровень

подачи кислорода, керосина и КС после останова ЖРД; магистраль подачи воды на охлаждение элементов проточного тракта ЖРД и подводящие газовые магистрали управления стендовой арматурой (в качестве управляющего газа используется воздух, поступающий из рампы высокого давления).

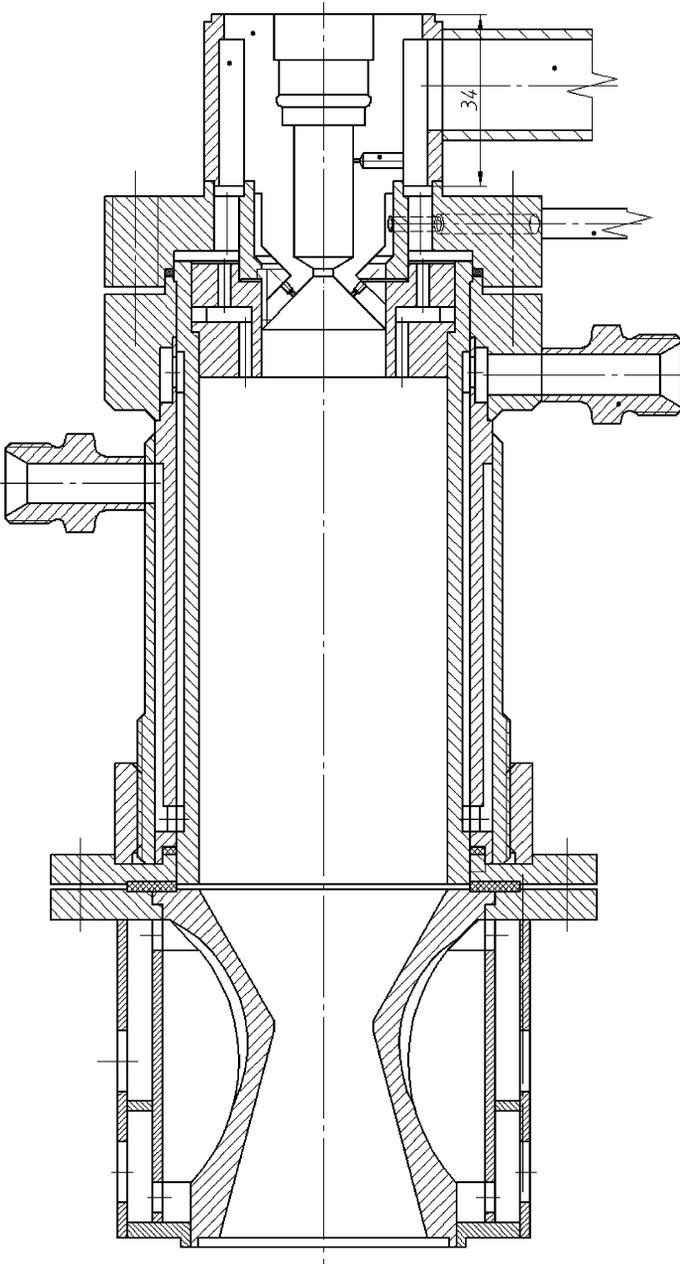


Рис. 2. Схема модельного ЖРД

На рис. 3 представлен модельный ЖРД с охлаждаемым соплом и установленными в области критического сечения сопла ПИП электрического (ПИП ЭП) и магнитного (ПИП МП) полей.

В структуру ПГС (см. рис. 1) входит система воспламенения, которая включает блок питания агрегата зажигания на основе авиационной свечи. Бак керосина наддувается воздухом. Перед началом работы установки открывают клапан К3, производят продувку магистрали кислорода азотом, открывая последовательно вентили ВН73, ВН97 и задавая необходимое давление командным редуктором КР98.



Рис. 3. Расположение первичных измерительных преобразователей:
1 — ПИП МП; 2 — ПИП ЭП

Затем происходит последовательный запуск модельного ЖРД: подается напряжение на свечу зажигания, открывается командный редуктор кислорода КР, подается вода на охлаждение, открывается клапан К2, и в КС через обратный клапан КО3 подается кислород, после чего открывается электроклапан ЭК1 и начинается подача керосина в камеру модельного ЖРД. После запуска двигатель выходит на промежуточный или основной режим. При этом оператор пуска с помощью командного редуктора КР устанавливает соответствующее заданному режиму давление кислорода перед дроссельным расходомером ДР.

После останова модельного ЖРД (когда последовательно закрываются клапаны ЭК1 и К2) открывается электроклапан ЭК2 и идет продувка азотом магистрали кислорода. При открытии клапана К3 продувается магистраль подачи керосина. После завершения продувки клапаны К3, ЭК2 закрываются и происходит останов.

Испытания модельного ЖРД проводятся в наземных условиях (давление окружающей среды 0,1 МПа). Основные параметры работы модельного ЖРД приведены ниже:

Давление в КС p_k , МПа	1...3
Расход окислителя (газообразного кислорода) m_o , кг/с	0,10...0,30
Расход горючего (керосина) m_f , кг/с	0,10...0,30
Коэффициент избытка окислителя, α	0,2...2,0
Время отдельного пуска t , с	1...20

Установленные на модельном ЖРД и магистралях стенда ПИП соединяются двухпроводными соединительными переходными кабе-

лями через коммутационный блок с измерительно-вычислительным комплексом МІС-026 (Ethernet) на базе восьмимодульного крейт-шасси (см. рис. 1, где приведена схема установки следующих ПИП: ДД1 — давление в баке керосина; ДД1, ДД2 — перепад давления на дроссельном расходомере магистрали кислорода; ДД10 — давление в магистрали подачи керосина; ДД11 — давление в камере сгорания модельного ЖРД; ДТ8 — температура в магистрали подачи кислорода; ДТвх — температура охлаждающей воды на входе в камеру сгорания; ДТвых — температура охлаждающей воды на выходе из камеры сгорания; РМ1 — турбинный расходомер для определения расхода керосина).

Частота опроса ПИП медленноменяющихся процессов составляет 100 Гц, ПИП ЭП и ПИП МП — не менее 50 кГц.

Результаты расчета по методике [6] относительных предельных погрешностей основных режимных и определяемых косвенным способом параметров представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Предельные погрешности регистрации основных режимных параметров

Измеряемый параметр	ПИП	Обозначение на ПГС (см. рис. 1)	Предельная погрешность, %
Давление в КС	МД-60	ДД11	± 1,4
Давление кислорода перед мерной шайбой	МД-100	ДД1	± 1,4
Расход горючего	ТДР-8	РМ1	± 1,9

Таблица 2

Предельные погрешности косвенных измерений параметров

Измеряемый параметр	Расчетная формула	Предельная погрешность, %
Соотношение компонентов	$K_m = \frac{\dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_r}$	± 2,36
Экспериментальное значение расходного комплекса	$\beta_3 = \frac{p_k F_{кр}}{m_{O_2} + \dot{m}_r}$	± 2,74
Коэффициент расходного комплекса	$\Phi_\beta = \frac{\beta_3}{\beta_T}$	± 2,74

Таким образом, при расчете предельных погрешностей получена удовлетворительная для теплофизического эксперимента точность,

что свидетельствует о надежности получаемых экспериментальных данных.

Описание ПИП электромагнитного поля. В процессе проведения ОСИ регистрируются амплитуда и частота колебаний напряженности электрического и магнитного полей продуктов сгорания углеводородного топлива за срезом охлаждаемого сопла модельного ЖРД.

Оцениваемыми характеристиками, определяющими зависимость параметров собственного электромагнитного поля продуктов сгорания от давления в КС, являются амплитуда сигнала, частотный спектр и коэффициент корреляции, который характеризует меру линейности связи между реализациями сигналов ПИП ЭП, ПИП МП и ПИП давления в КС.

Пространственная ориентация ПИП ЭП и ПИП МП обусловлена направлением линий напряженности электрического и магнитного полей и обеспечивает максимальное значение регистрируемого полезного сигнала (см. рис. 3). Подробное описание ПИП ЭП и ПИП МП разработки ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (г. Минск, Республика Беларусь) приведено в [7].

Конструкция и размеры ПИП оптимизированы для их размещения и крепления на модельном ЖРД. ПИП выполнен на основе многослойной цилиндрической катушки без магнитного сердечника. На внутренней стороне корпуса предусмотрен электростатический экран из алюминиевой фольги, который не образует короткозамкнутых витков. Габаритные размеры ПИП 21×21×80 мм.

Сигналы с ПИП передаются на модуль кондиционирования, который предназначен для усиления принимаемых сигналов до уровней, достаточных для работы модулей оцифровки измерительно-вычислительным комплексом МИС-026 и ввода в ЭВМ. Коэффициент усиления — переключаемый: 40 дБ (100) и 60 дБ (1000).

Результаты корреляционного и спектрального анализа. Рассмотрим результаты регистрации и обработки характеристик электромагнитного поля продуктов сгорания керосин-кислородного топлива, истекающих из соплового блока модельного ЖРД. На рис. 4 представлена типовая осциллограмма изменения избыточного давления p_k в КС при проведении ОСИ. Наблюдается плавное увеличение давления после запуска до значения $p_k = 19$ ати и последующее медленное его уменьшение.

На этом же рисунке представлен сигнал, зарегистрированный с помощью ПИП МП. По вертикальной оси отложена амплитуда сигнала в процентах от полной шкалы аналого-цифрового преобразователя, составляющая около 1 В. Отчетливо видны характерные периоды работы модельного ЖРД: открытие клапана окислителя, включение и выключение системы воспламенения (резкое увеличение амплитуды), а также срабатывание (закрытие) клапана подачи горю-

чего, после чего амплитуда сигнала начинает медленно уменьшаться. Это уменьшение объясняется продолжающейся в течение 3 с продувкой КС азотом и наличием избыточного давления в КС (около 4 ати). Заметим, что наибольший сигнал регистрируется при работе электроискровой системы воспламенения.

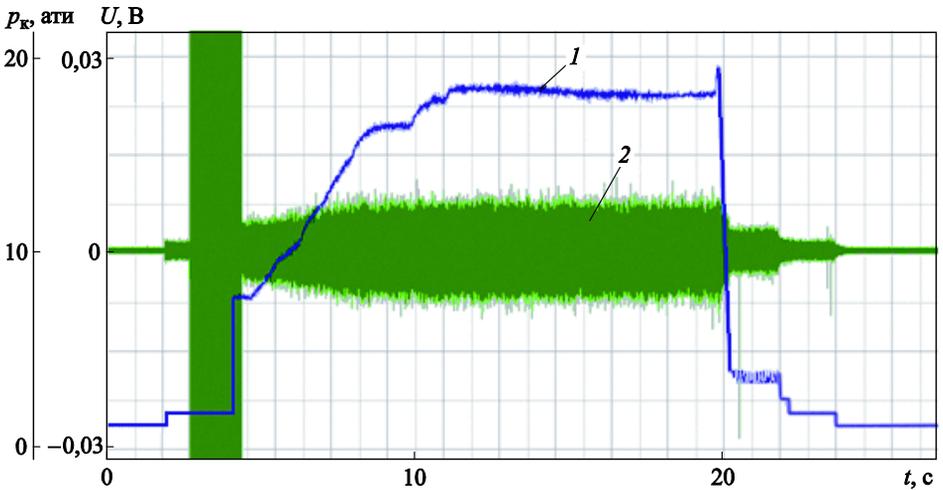


Рис. 4. Осциллограмма изменения давления в КС (1) и сигнала с ПИП МП (2) (масштаб по оси ординат увеличен)

На рис. 4 прослеживается взаимосвязь постепенного роста давления в КС и увеличения амплитуды колебаний напряженности магнитного поля, что использовано при проведении корреляционного анализа.

Взаимная зависимость параметров электромагнитного поля продуктов сгорания и режимных параметров работы КС модельного ЖРД оценивают с помощью коэффициента корреляции β независимо от регистрируемых величин X и Y . Для дискретных случайных величин, в частности для давления в КС и напряженностей электрического и магнитного полей, значение β может быть рассчитано по соотношению

$$\beta = \frac{\sum_i^N (p_{к,i} - \overline{p_k})(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_i^N (p_{к,i} - \overline{p_k})^2} \sqrt{\sum_i^N (y_i - \overline{y})^2}},$$

где $\overline{p_k}$, \overline{y} — средние значения (математические ожидания) давления в КС и параметра электромагнитного поля продуктов сгорания; N — число обрабатываемых зарегистрированных значений.

Особенность корреляционного анализа заключалась в том, что частота опроса ПИП давления составляла 100 Гц, а ПИП МП —

57 кГц, при этом проводилась процедура осреднения показаний ПИП МП в промежутках между единичными опросами ПИП давления. Результат осреднения приведен на рис. 5, где сигнал ПИП МП представлен сглаженным. В результате число элементов массива показаний ПИП МП соответствовало числу элементов в массиве значений давления в КС.

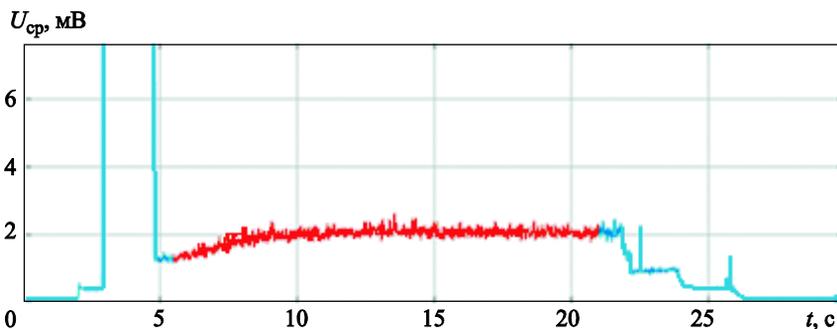


Рис. 5. Оциллограмма изменения осредненного сигнала ПИП МП

На рис. 6 представлены результаты расчета коэффициента корреляции колебаний давления в КС и колебаний напряженности магнитного поля β_{p_k-U} на интервале времени ОСИ 12...15 с через 1 с.

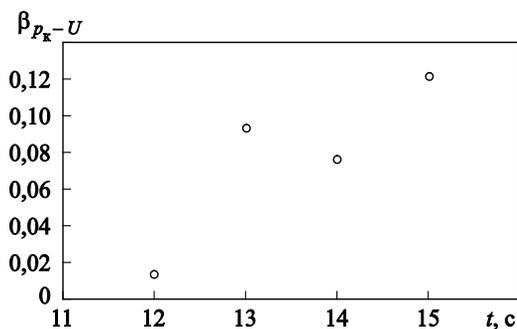


Рис. 6. Изменение коэффициента корреляции β_{p_k-U}

Из представленных данных можно сделать следующие выводы. Во-первых, значение коэффициента корреляции положительное, что может свидетельствовать о пропорциональной зависимости напряженности магнитного поля от давления в КС. Во-вторых, поскольку значение β_{p_k-U} близко к 0,1, то можно заключить, что эта зависимость является достаточно слабой.

Аналогичные расчеты выполнены за полное время испытания начиная с запуска модельного ЖРД, т. е. в интервале времени ОСИ

5,5...21,0 с. Полученное значение коэффициента корреляции $\beta_{p_k-U} = 0,863$ свидетельствует о сильной зависимости напряженности магнитного поля от давления в КС в течение всего времени проведения ОСИ, особенно в период выхода двигателя на расчетный режим работы, когда зависимость близка к линейной. Это подтверждает приведенный на рис. 7 график, построенный в координатах p_k-U_{cp} .

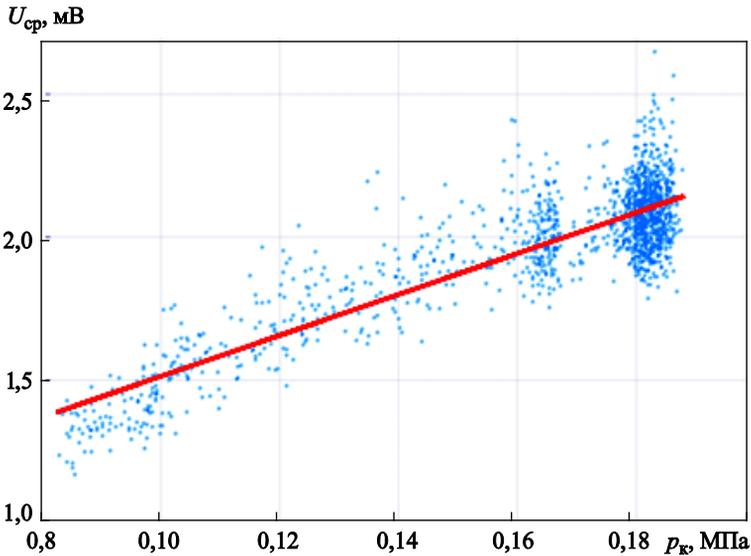


Рис. 7. Зависимость осредненного значения сигнала ПИП МП от давления в камере сгорания

Рассмотрим результаты спектрального анализа колебаний напряженности электрического и магнитного полей в процессе ОСИ. На рис. 8 представлены осциллограммы изменения давления в КС и сигналов с ПИП ЭП и ПИП МП. Спектральный анализ проводился для следующих характерных периодов времени: работа электроискровой системы воспламенения и работа модельного ЖРД на расчетном режиме.

На рис. 9 приведены спектры сигналов ПИП МП и ПИП ЭП в момент работы электроискровой системы воспламенения. Спектр электрического поля реализуется в более широком диапазоне частот, чем спектр магнитного поля, и его максимум соответствует частоте около 118 Гц. Для спектра колебаний напряженности магнитного поля наибольший максимум приходится на частоту 0,88 Гц, второй экстремум — примерно на 120 Гц.

На рис. 10 приведены спектры сигналов, регистрируемых ПИП МП и ПИП ЭП.

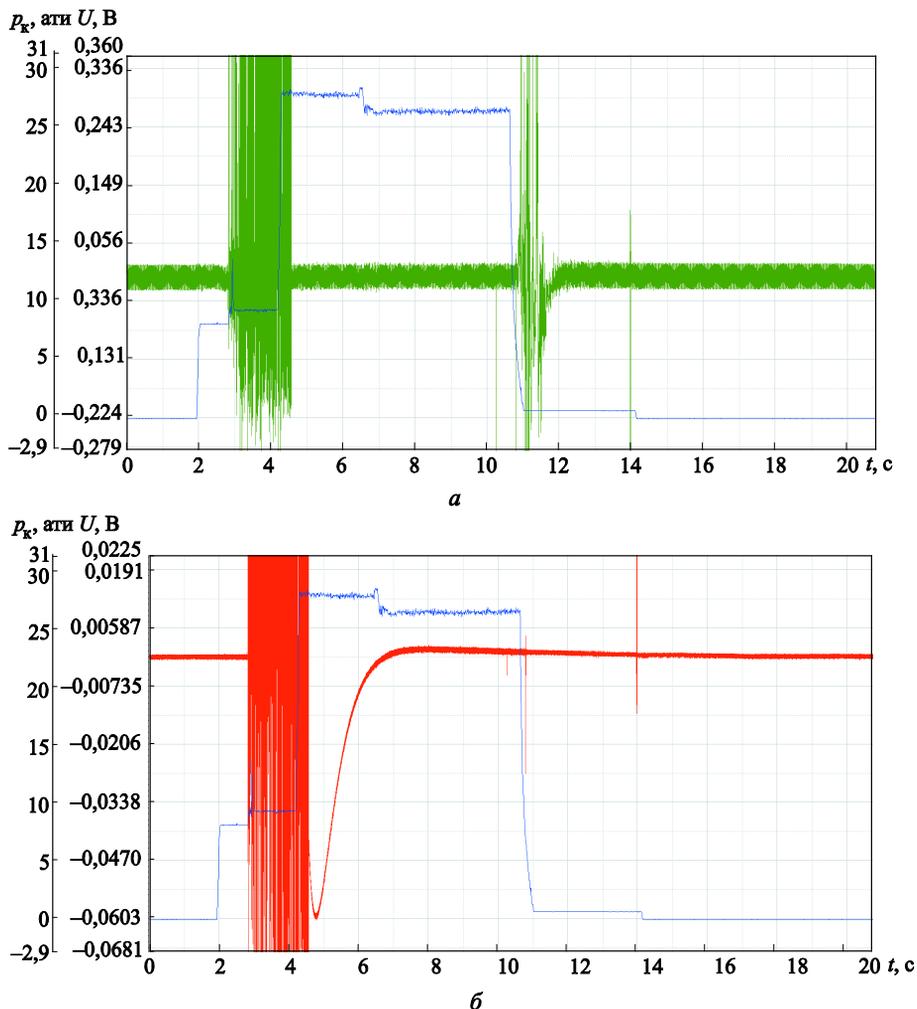


Рис. 8. Осциллограммы изменения давления в КС и сигналов с ПИП ЭП (а) и ПИП МП (б)

Частотный анализ рабочего процесса модельного ЖРД проводился для интервала времени 7,81...8,69 с, в течение которого давление в камере практически не изменялось (см. рис. 8). Характерно значительное уменьшение мощности сигнала по сравнению с мощностью сигнала в период работы электроискровой системы зажигания. Максимальная мощность спектра напряженности магнитного поля составила $9 \cdot 10^{-5}$ В при частоте 144 Гц. Вторые экстремумы мощности спектра напряженности магнитного поля имеют одинаковое значение около $(3,0 \dots 3,5) \cdot 10^{-5}$ В при частотах 400, 1350, 1750 Гц.

Максимальная мощность спектра напряженности электрического поля также уменьшилась и составила 0,017 В на частоте 49 Гц. Второй экстремум имеет значение около 0,0018 В при частоте 15 Гц. В связи с этим можно заключить, что спектр колебаний напряженности электрического поля стал узким.

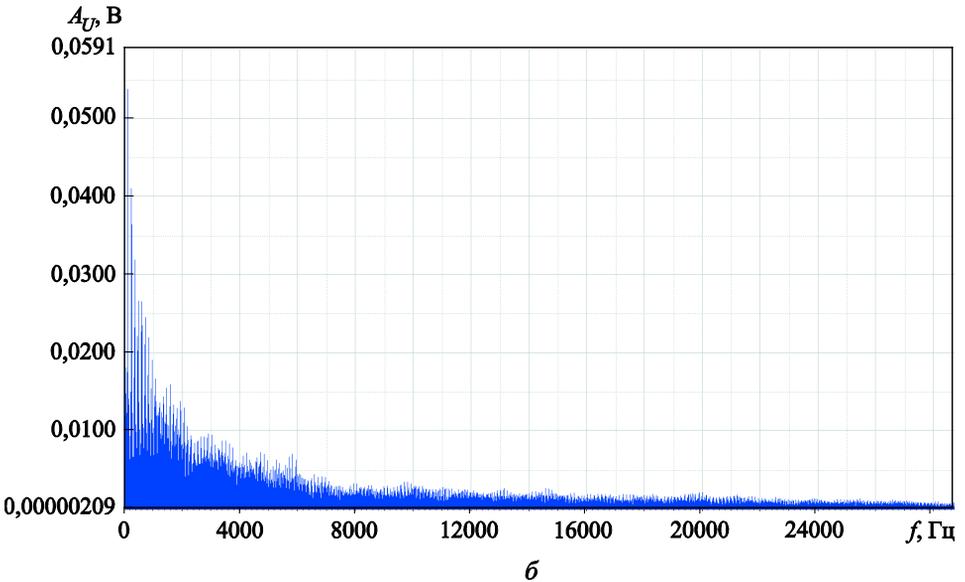
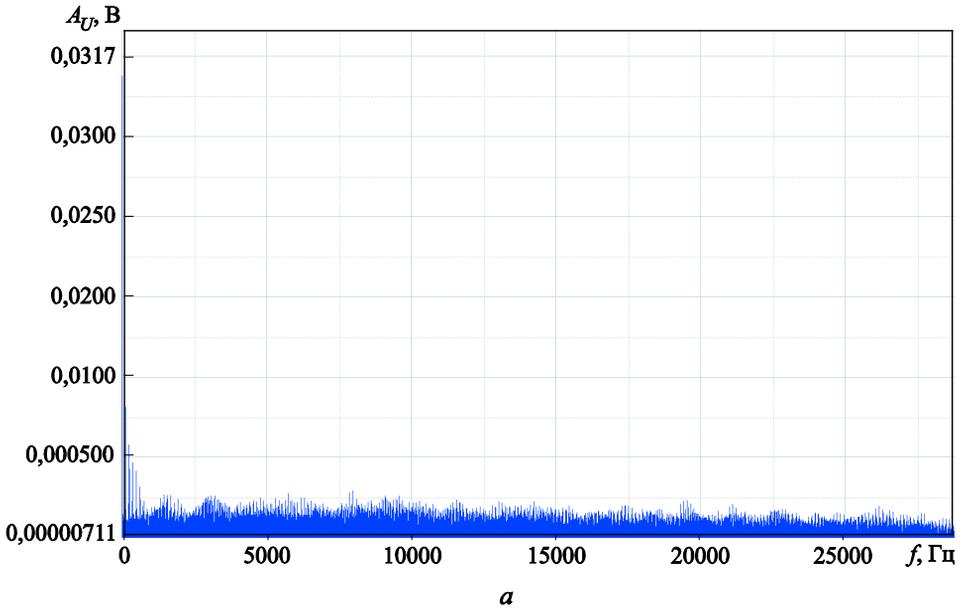


Рис. 9. Спектры сигналов ПИП МП (а) и ПИП ЭП (б) в момент работы электроискровой системы воспламенения

Общей особенностью всех спектров является сильное влияние электроискровой системы зажигания на амплитуду сигнала и реализуемые максимальные частоты, а также несовпадение значений последних для напряженностей электрического и магнитного полей как в условиях дополнительно электризирующего продукты сгорания электрического разряда, так и при работе на расчетном режиме модельного ЖРД.

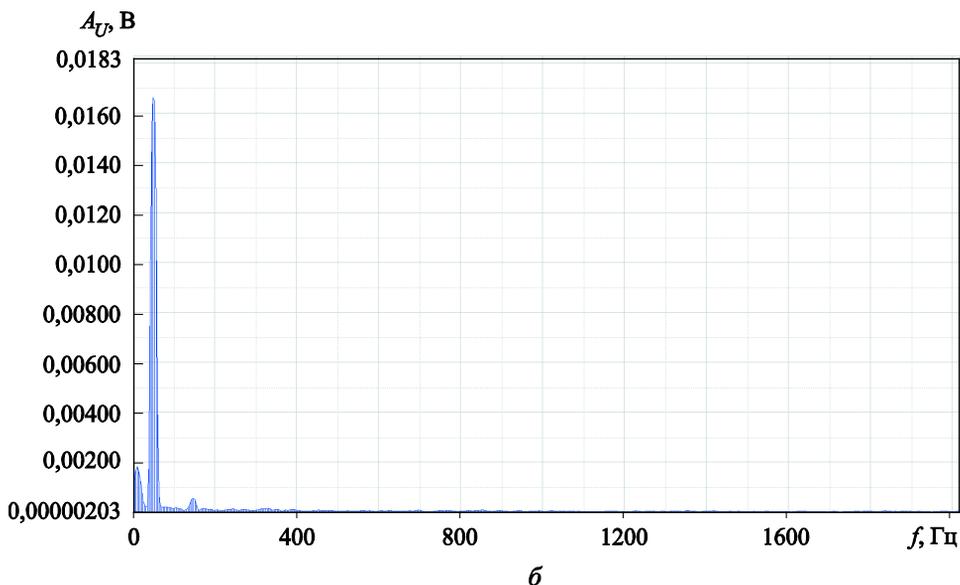
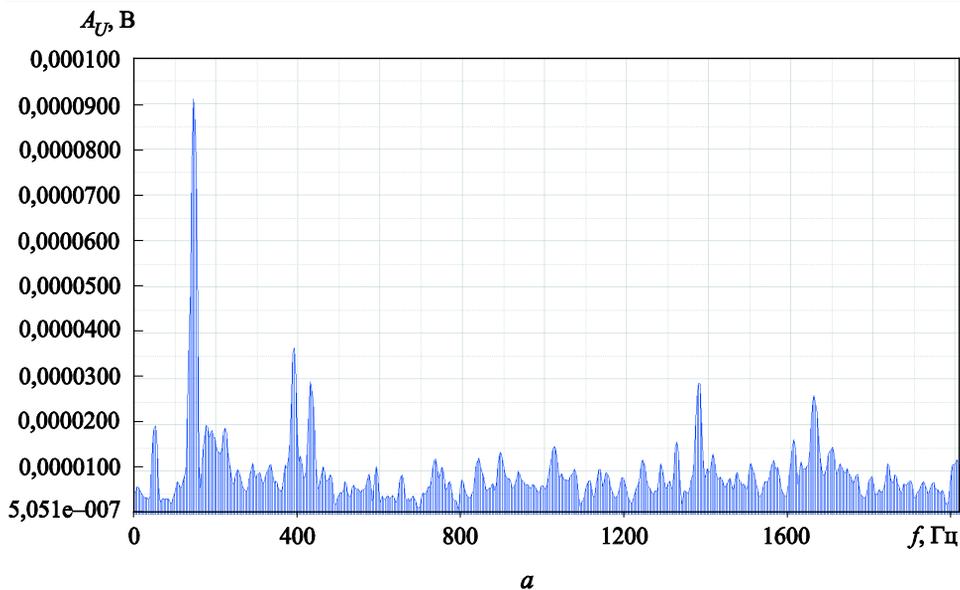


Рис. 10. Спектры сигналов ПИП МП (а) и ПИП ЭП (б) при работе модельного ЖРД в период времени 7,81...8,69 с

Выводы. 1. Разработанные методики и применение ПИП МП и ПИП ЭП обеспечивают регистрацию работы системы воспламенения, выхода ЖРД на расчетный режим, а также возможных шумов, которые можно учесть в процессе вторичной обработки получаемой информации.

2. Установлена близкая к линейной зависимость напряженности магнитного поля от давления в КС модельного ЖРД, что может быть использовано в качестве диагностического признака системы аварийной защиты ЖРД.

3. Рассчитанные значения коэффициентов корреляции отличны от нуля, что свидетельствует о существовании зависимости колебаний напряженности электрического и магнитного полей от внутрикамерных процессов, обосновывающей их использование в качестве диагностического признака, а также в качестве сигнала системы аварийной защиты ЖРД.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мазур М.М., Шорин В.Н., Жогун В.Н., Пустовойт В.И. и др. Акустооптический рамановский спектрометр. *Акустооптические, акустические и рентгеноспектральные методы и средства измерений в науке и технике*, ВНИИФТРИ, 2005, с. 16–26.
- [2] Ягодников Д.А., Бобров А.Н., Рудинский А.В., Аникеев В.М. Частотный анализ электрофизических характеристик рабочего процесса жидкостного ракетного двигателя на углеводородном горючем. *Наука и образование*, 2011. № 11. URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/250245.html>
- [3] Пушкин Н.М., Ковалев В.И., Пушков С.А. и др. Системы контроля и бесконтактной диагностики рабочих процессов при проведении огневых испытаний ЖРД. *Тр. НПО Энергомаш*, 2012, № 29, с. 328–341.
- [4] Галеев А.Г., Денисов К.П., Ищенко В.И. и др. *Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей*. Москва, Машиностроение, 2012, 368 с.
- [5] Волков И.К., Зуев С.М., Цветкова Г.М. *Случайные процессы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000, 448 с.
- [6] Преображенский В.П. *Теплотехнические измерения и приборы*. Москва, Энергия, 1978, 704 с.
- [7] Гришин С.А., Климентовский В.В., Ягодников Д.А. Результаты регистрации параметров переменных магнитных полей модельного ЖРД с использованием преобразователя индукционного типа. *Электроника*, 2015, № 12, с. 51–54.

Статья поступила в редакцию 01.11.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Ягодников Д.А., Сухов А.В., Ирьянов Н.Я., Лапицкий В.И., Гришин С.А., Бунчук А.А. Корреляционный и спектральный анализ электрофизических характеристик продуктов сгорания углеводородного топлива модельного жидкостного ракетного двигателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-01-1574>

Ягодников Дмитрий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 220 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований рабочих процессов и разработки бесконтактных методов диагностики ракетных и реактивных двигателей. e-mail: daj@bmsu.ru

Сухов Алексей Васильевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области горения металлосодержащих энергетических конденсированных систем и методологии диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Ирьянов Николай Яковлевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области двухфазных течений в газовом тракте ракетных двигателей и методологии отработки ракетных двигателей. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Лапицкий Владимир Иванович — канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 20 научных работ в области стендовой отработки ракетных двигателей и энергетических установок. e-mail: vlapitsky@gmail.com

Гришин Сергей Александрович — старший научный сотрудник лаборатории оптико-электронных и магнитных измерений ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси. Автор более чем 200 научных работ в области систем автоматизации, мониторинга, контроля и управления. e-mail: grs@mail@mail.ru

Бунчук Александр Алексеевич — инженер-электроник лаборатории оптико-электронных и магнитных измерений ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси. e-mail: andreybunchuk@tut.by

Correlation and spectral analyses of electrophysical characteristics of hydrocarbon fuel exhaust products in a model liquid rocket engine

© D.A. Yagodnikov¹, A.V. Sukhov¹, N.Ya. Iryanov¹, V.I. Lapitskiy¹,
S.A. Grishin², A.A. Bunchuk²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

² SSPA “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”,
Minsk, 220072, Republic of Belarus

The article presents the methodology and results of correlation and spectral analysis of electrophysical characteristics of kerosene and oxygen combustion products registered in the process of bench firing tests of the model liquid rocket engine (LRE) with the primary sensors of the electromagnetic field. Mathematical apparatus and techniques of secondary processing arrays of electromagnetic field characteristics were developed for the frequency correlation analysis in the range of 0...28 kHz of an operating condition - the pressure in the combustion chamber and a defined parameter — the magnetic field strength of the combustion products. It is found (with correlation coefficient 0.863) that the dependence of magnetic field strength of the combustion products beyond the nozzle on the pressure in the model LRE combustion chamber is close to linear. This dependence can be used as a diagnostic feature for creating a high-speed emergency LRE protection system.

Keywords: liquid rocket engine, firing tests, diagnostics, electromagnetic field, correlation and spectral analyses

REFERENCES

- [1] Mazur M.M., Shorin V.N., Zhogun V.N., Pustovoyt V.I. et al. Akustoopticheskiy ramanovskiy spektrometr [Acoustooptical Raman spectrometer]. *Akustoopticheskie, akusticheskie i rentgenospektralnye metody i sredstva izmereniy v nauke i tekhnike* [Acoustic and X-ray spectral methods and means of measurement in science and technology]. VNIIFTRI Publ., 2005, pp. 16–26.
- [2] Yagodnikov D.A., Rudinskiy A.V., Anikeev V.M. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/250245.html>
- [3] Pushkin N.M., Kovalev V.I., Pushkov S.A. et al. Systemy kontrolya i beskontaktnoy diagnostiki rabochnykh protsessov pri provedenii ognevnykh ispytaniy ZhRD [Control systems and diagnosing contactless workflows when carrying out firing tests of liquid rocket engines (LRE)]. *Trudy NPO “Energomash”* [Proceedings of the SPA “Energomash”]. Moscow, 2012, no. 29, pp. 328–341.
- [4] Galeev A.G., Denisov K.P., Ishchenko V.I. et al. *Ispytatelnye komplekсы i eksperimentalnaya otrabotka zhidkostnykh raketnykh dvigateley* [Test complexes and experimental development of liquid rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012, 368 p.
- [5] Volkov I.K., Zuev S.M., Tsvetkova G.M. *Sluchaynye protsessy* [Random processes]. Moscow, BMSTU Publ., 2000, 448 p.
- [6] Preobrazhenskiy V.P. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory* [Thermal measurements and devices]. Moscow, Energia Publ., 1978, 704 p.
- [7] Grishin S.A., Klimentovskiy V.V., Yagodnikov D.A. *Elektronika — Electronics*, 2015, no. 12, pp. 51–54.

Yagodnikov D.A. (b. 1961) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1984. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 research publications in the field of two-phase flow in a gas path of rocket engines and methodology of rocket engines development. e-mail: daj@bmstu.ru

Sukhov A.V. (b. 1937) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 research publications in the field of burning metal-containing energy condensed systems and diagnostics of working processes in rocket and jet engines. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Iryanov N.Ya. (b. 1938) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 research publications in the field of two-phase flow in a gas path of rocket engines and methodology of rocket engines development. e-mail: kafedra-e1@yandex.ru

Lapitsky V.I. (b. 1958) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1986. Cand. Sci. (Eng.), Research Fellow, Power Engineering Research Institute, Bauman Moscow State Technical University. Author of 20 research publications in the field of experimental research of working processes in rocket and jet engines. e-mail: vlapitsky@gmail.com

Grishin S.A. (b. 1957) graduated from the Belarusian State University (Physics Department). Senior Researcher, Laboratory of Optoelectronic and Magnetic Measurements, State Research and Production Association “Optics, optoelectronics and laser technology”, National Academy of Sciences of Belarus. Author of over 200 research publications in the fields of automation, monitoring and control systems. e-mail: grsamail@mail.ru

Bunchuk A.A. (b. 1992) graduated from the Belarusian National Technical University in 2015, line of profession “Automobile production (electronics)”. Electronics engineer, Laboratory of Optoelectronic and Magnetic Measurements, State Research and Production Association “Optics, optoelectronics and laser technology”, National Academy of Sciences of Belarus. e-mail: andreybunchuk@tut.by