

## Частотный анализ электрофизических характеристик рабочего процесса жидкостного ракетного двигателя на углеводородном топливе 77-30569/250245

# 11, ноябрь 2011

авторы: Ягодников Д. А., Бобров А. Н., Рудинский А. В.

УДК 532.525:537.2:621.45

МГТУ им. Н.Э.Баумана  
[daj@mx.bmstu.ru](mailto:daj@mx.bmstu.ru)  
[alexbovr@mail.ru](mailto:alexbovr@mail.ru)  
[alex\\_rudinskiy@mail.ru](mailto:alex_rudinskiy@mail.ru)

Одно из направлений создания современных жидкостных ракетных двигательных установок (ЖРДУ) связано с разработкой надежных и высокоэффективных систем аварийной защиты (САЗ), методов и средств диагностики, необходимых для реализации наилучших технических характеристик ЖРДУ при наименьших экономических затратах. В настоящее время к системам аварийной защиты предъявляются следующие требования: возможность управления исправным и аварийным двигателем; высокая скорость, надежность и эффективность срабатывания; применение цифровых информационных технологий, стандартных алгоритмов и универсальной аппаратуры, минимальная масса системы. При этом (САЗ) должны обеспечивать для многодвигательных установок коэффициент охвата аварийных ситуаций не менее 0,9 при вероятности отсутствия ложных команд не менее 0,995. Указанные параметры могут быть реализованы при использовании характеристик рабочего процесса и состояния конструкции ЖРД, быстродействующей аппаратуры и программных средств обработки первичной информации, а также физических принципов раннего диагностирования аварийных ситуаций.

### *Проблемы диагностики рабочих процессов в ракетных двигателях*

Традиционные методы исследования характеристик рабочего процесса в камерах сгорания (КС) не всегда эффективны, вносят возмущения в рабочий процесс и практически не пригодны для создания системы управления, мгновенно реагирующей на аналогичные изменения рабочего процесса. С целью устранения указанных недостатков в последнее время разрабатываются нетрадиционные и особенно бесконтактные методы диагностики, основанные, например, на электрофизических и электромагнитных явлениях [1, 2], поскольку их параметры в значительной степени зависят от качества рабочих процессов и состояния проточной части ЖРД.

Предпосылкой данного метода диагностики является то, что процессы горения большинства встречающихся на практике топливных композиций протекают при достаточно высокой температуре (2000 ... 4000 К). В связи с этим во фронте пламени (ФП) имеют место процессы ионизации, а в продуктах сгорания (ПС) присутствуют как положительно, так и отрицательно заряженные частицы - ионы.

По своей природе сопровождающие процессы горения электрические явления подразделяются на “собственные” и внешние. Причем первые обусловлены естественным, а вторые - искусственным разделением заряженных частиц в пламени. “Собственные” электрогазодинамические процессы возникают вследствие различной подвижности ионов и электронов, что приводит к диффузионному разделению зарядов и к образованию в пламени электрического поля.

В процессе обтекания содержащим ионы потоком элементов газодинамического тракта ЖРД на границе раздела ионизированный газ - стенка образуется слой определенным образом ориентированных ионов, обуславливающий соответствующее перераспределение ионной структуры поверхностного слоя в материале стенки, в результате чего последняя электризуется и приобретает некоторый потенциал, [3 - 5]. Указанные электрофизические особенности процессов горения и истечения продуктов сгорания, несущие информацию о состоянии системы, могут быть использованы для интенсификации внутри камерных процессов, а также для разработки систем диагностики и аварийной защиты ЖРДУ.

Целью данной работы является комплексное экспериментальное исследование электрофизических процессов в жидкостных ракетных двигателях.

Исследование электрофизических характеристик процесса истечения продуктов сгорания и электризации сопла ЖРД выполнялось на модельном жидкостном реактивном двигателе, использующем в качестве горючего используется этиловый спирт с объемной концентрацией 75 %, а в качестве окислителя - газообразный кислород. Выбор такой пары компонентов топлива продиктован требованиями безопасности работы стенда, значительным опытом эксплуатации кислородно-спиртовых ЖРД. Кроме того, высокая температура горения указанной топливной композиции обуславливает ионизацию продуктов сгорания, что позволяет проводить электрофизические исследования.

Пневмогидравлическая схема (ПГС) модельного ЖРД обеспечивает проведение подготовительных предпусковых операций, запуск, работу и выключение двигателя. Пневмогидравлическая схема стенда для испытания модельного ЖРД состоит из систем подачи окислителя, горючего, охлаждающей КС воды, электропневматического управления агрегатами стенда, системы измерений и регистрации параметров на ЭВМ.

Газообразный кислород поступает из сорокалитровых баллонов под начальным давлением  $\approx 15$  МПа. На магистрали окислителя находится дроссельная шайба со сверхкритическим перепадом и потенциометрический дифференциальный датчик давления, используемый для определения массового расхода окислителя. Для предохранения трубопроводов и агрегатов от перегрузки устанавливаются предохранительный и обратные клапана.

В установке используется вытеснительная система подачи горючего. Давлением воздуха, поступающего в бак с горючим, горючее вытесняется из бака и проходит к камере через дозирующее устройство – дозатор, дроссельную шайбу, турбинный расходомер типа ДТР-10. Давление перед форсунками показывает специальный манометр, расположенный на пульте управления. Расход горючего устанавливается дроссельной шайбой.

В разработанной конструкции охлаждение стенок камеры производится водой. Система подачи воды - вытеснительная. В процессе пуска вода через фильтр, дроссельную шайбу с потенциометрическим дифференциальным датчиком давления поступает в межрубашечное пространство камеры.

Пневмогидравлическая схема позволяют варьировать основные режимные параметры работы ЖРД в следующих диапазонах.

- |                      |                  |
|----------------------|------------------|
| 1. Давление в КС     | 2 ... 3 МПа.     |
| 2. Расход окислителя | 100 ... 250 г/с. |
| 3. Расход горючего   | 100 ... 300 г/с. |

4. Коэффициент избытка окислителя  $0,2 \dots 2$ .

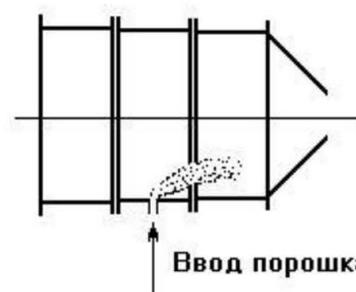
Для проведения экспериментальных исследований используется модельный ЖРД тягой порядка  $500 \dots 750$  Н. Выбор данного двигателя обусловлен простотой его конструкции, практически неограниченным ресурсом работы, безопасностью эксплуатации и возможностью реализации различных режимов истечения из сопла. Общий вид модельного ЖРД представлен на рис. 2.19. Основными элементами ЖРД являются форсуночная головка и камера сгорания, выполненные по блочному принципу, позволяющему заменять отдельные узлы в зависимости от задачи конкретного эксперимента. Для воспламенения топливной смеси используется разряд между корпусом КС и авиационной свечой.



Рис. 1. Общий вид камеры сгорания модельного ЖРД



*a*



*б*

Рис. 2. Блок (а) и схема ввода (б) порошка в камеру сгорания

Для имитации разгара элементов конструкции ЖРД предусматривается подача порошкообразного материала (ПМ) в проточную часть камеры сгорания в режиме заторможенного плотного слоя (ЗПС) [30]. С этой целью из нержавеющей стали типа 1Х18Н10Т была изготовлена вставка (рис. 2.20, *a*). Через специальный штуцер, установленный на последней на расстоянии 50 мм критического сечения, в камеру сгорания через струйную форсунку диаметром 2 мм подавался порошок (по схеме рис. 2.20, *б*) алюминий-магниевого сплава АМД-50. Среднестатистические размеры порошка приведены в таблице 2.6.

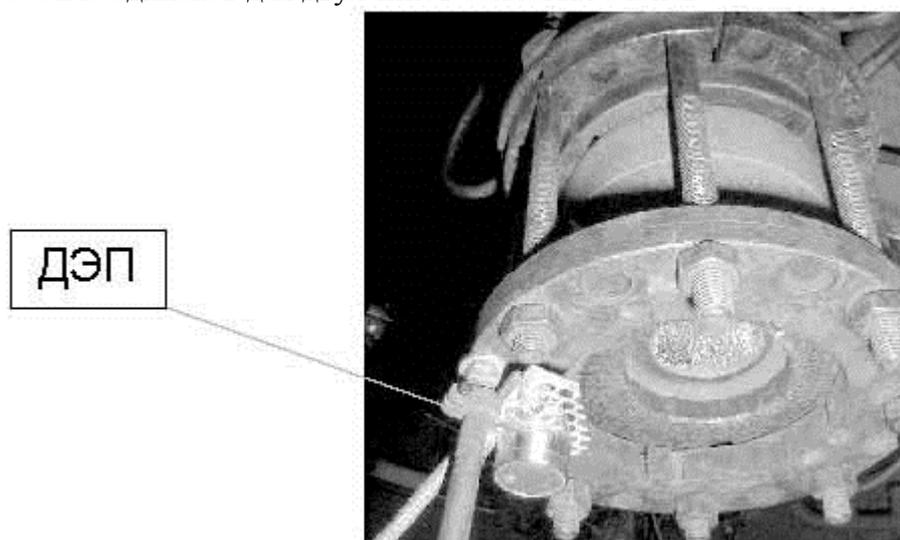
Таблица 2.6

Диаметр, мкм	$D_{10}$	$D_{20}$	$D_{30}$	$D_{32}$	$D_{43}$
	7,6	9,5	11,7	17,7	23,2

*Примечание.* Здесь используются следующие диаметры: среднесчетный  $D_{10}$ , среднеквадратический  $D_{20}$ , среднеобъемный  $D_{30}$ , диаметр Заутера  $D_{32}$ , среднемассовый  $D_{43}$ .

Выбор порошка АД-50 обусловлен тем, что из сплавов на основе алюминия изготавливаются отдельные элементы конструкции ЖРД, в частности корпус турбонасосного агрегата. Кроме того, частицы этого сплава, попадая в высокотемпературный поток, могут воспламеняться, оставляя при этом светящиеся треки. Тем самым представляется возможным получить информацию, подтверждающую наличие в газовом потоке частиц конденсированной фазы.

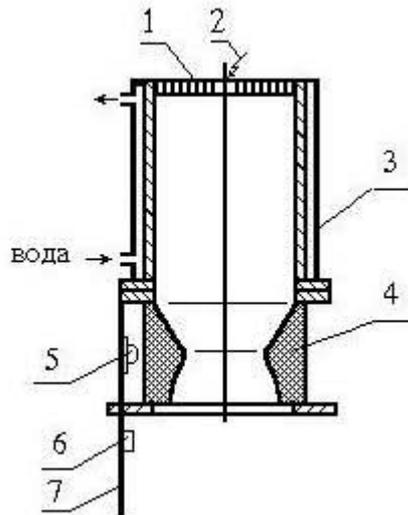
Для экспериментального исследования процесса разгара вместо охлаждаемого соплового блока (диаметр критического сечения равен 18 мм, диаметр среза сопла - 40 мм) из стали 1Х18Н10Т устанавливался сопловой блок из стеклопластика типа (рис. 2.21). Он подстыковывается к цилиндрическому участку камеры сгорания. Причем газодинамический профиль до-, транс- и сверхзвуковой части сопла – углы входа и раскрытия конуса, диаметры критики и среза сопла одинаков для двух типов сопловых блоков.



**Рис. 2.21.** Вид соплового блока с разгорающимся критическим сечением

Известно, что при разгаре критического сечения происходит падение давления в камере сгорания, приводящее к уменьшению перепада давления на форсунках и, следовательно, к уменьшению расхода горючего и изменению соотношения компонентов. В связи с этим проведена доработка магистрали подачи горючего (этилового спирта), заключающаяся в установке специального сопла, позволяющего обеспечить постоянство соотношения расходов газообразного кислорода и этилового спирта (и, следовательно значение  $\alpha$ ) в течение пуска.

Для регистрации электромагнитного поля выхлопной струи продуктов сгорания ЖРД использовались датчики магнитного (ДМП) и электрического (ДЭП) полей, расположение которого за срезом соплового блока представлено на рис. 2.22. Используемые ДМП и ДЭП позволяют в процессе эксперимента регистрировать переменные составляющие магнитного и электрического полей. Кроме того, оба датчика регистрируют огибающие электромагнитных колебаний.



**Рис. 2.22.** Схема расположения датчиков на камере ЖРД.

1- форсуночная головка; 2- электрическая свеча; 3- камера сгорания; 4- сопловой блок; 5- датчик магнитного поля; 6- датчик электрического поля; 7- кронштейн

Пространственное положение ДМП и ДЭП по отношению к потоку продуктов сгорания выбиралось таким, чтобы регистрируемый им сигнал был наибольшим. Это достигалось с учетом данных предварительных тарировок датчиков, а также на основе электрофизической картины истечения продуктов сгорания из сопла. Поскольку известно, что линии напряженности ЭП  $\vec{E}$  находятся в меридиональной плоскости, то ДЭП расположен таким образом, чтобы вектор  $\vec{E}$  пересекал чувствительный элемент датчика. Линии напряженности МП  $\vec{H}$  расположены в радиальной плоскости и представляют собой окружности, соосные потоку ПС. В связи с этим ДМП крепится снаружи КС в районе критического сечения сопла таким образом, чтобы вектор  $\vec{H}$  оказался соосным цилиндрической обмотке датчика.

Для удобства представления, обработки и анализа информации введем условные обозначения каналов измерения.

*Основные режимные параметры*

$p_k$ - давление в КС;

$\dot{m}_{ПМ}$  - датчик открытия клапана подачи ПМ в камеру ЖРД;

$\dot{m}_Г$  - массовый секундный расход горючего;

$\dot{m}_O$  - массовый секундный расход окислителя.

*Датчик электрического поля:*

ЭП2П- переменная составляющая сигнала напряженности МП;

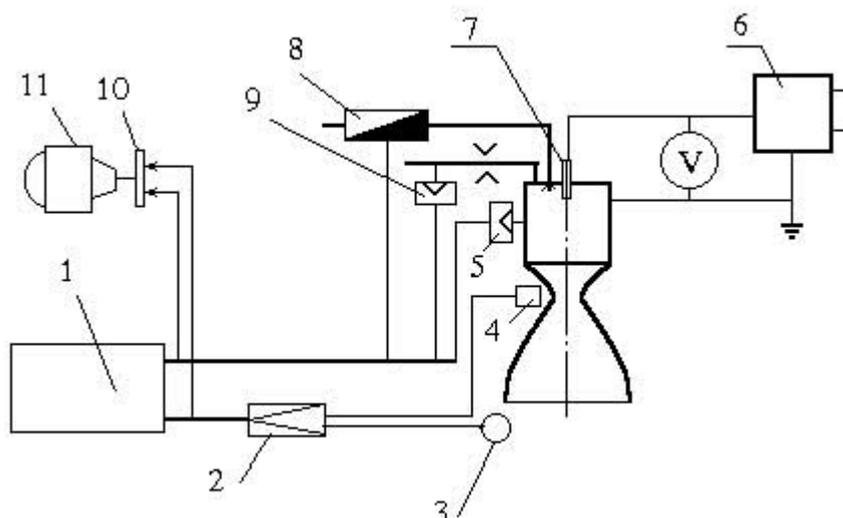
ЭП4П- огибающая сигнала напряженности ЭП по 100 Гц 2-100 кГц.

*Датчик магнитного поля:*

МП2П- переменная составляющая сигнала напряженности МП;

МП4П- огибающая по 100 Гц сигнала напряженности МП в диапазоне 2-100 кГц.

Регистрация информации происходит следующим образом (рис. 2.23). Сигнал с первичных преобразователей поступает на промежуточные усилители. Далее осуществляется разделение сигналов на два потока. Первый поступает на избиратели пределов РО9, РО10 и шлейфовый осциллограф типа Н-117.



**Рис. 2.23.** Сема регистрации параметров электромагнитного поля. 1- осциллограф Н-117; 2- усилитель; 3- датчик электрического поля; 4- датчик магнитного поля; 5- датчик давления в КС; 6- высоковольтный генератор; 7- свеча зажигания; 8- турбинный расходомер горючего; 9- датчик давления кислорода перед мерным соплом; 10- плата сопряжения Е-330; 11- персональный компьютер

Второй поток информации регистрируется и обрабатывается с помощью средств микропроцессорной и вычислительной техники. Практическая реализация аппаратно-программного комплекса для регистрации и обработки электрофизических характеристик рабочего процесса ЖРД осуществлена при помощи компьютера типа Pentium и платы устройства сопряжения с объектом Е-330, которая позволяет регистрировать 16 дифференциальных или 32 с общей "землей" каналов. Максимальная частота преобразования платы составляет 300 кГц, однако частота опроса определена временем преобразования платы Е-330 и временными затратами на обращение к последней и пересылку данных. Суммарное время регистрации ограничено емкостью накопителя на жестком диске.

В созданном аппаратно-программном комплексе применен принцип разделения программ регистрации и обработки сигналов. Данные фиксируются в бинарном виде, то есть в кодах, получаемых от платы устройства сопряжения с объектом Е-330. После проведения эксперимента записанные коды преобразуются программой в соответствии с ее настройкой либо в значения напряжений поступающих от датчиков, либо, в соответствии с аппроксимирующими зависимостями для показаний датчиков, в физические величины. При этом файл результатов имеет текстовый формат DOS и может быть импортирован в стандартные пакеты программ. Например, для визуализации регистрируемых сигналов без дополнительной обработки (фильтрации, сглаживания и т.д.) использовался редактор Excel. В качестве программы вторичной обработки с целью проведения спектрального анализа сигналов, их взаимной корреляции и т.д. был использован пакет Matlab, имеющий встроенную программу статистической обработки.

Особенность модуля Е-330 заключается в наличии встроенной памяти достаточно большого объема до 128 кСлов, что обеспечивают теоретическую максимальную частоту передачи данных по каналу модуль - ПЭВМ  $f_{max.теор.} = 500$  кГц. Реальная частота ввода (оцифровки) данных зависит от множества факторов: числа опрашиваемых каналов, скорости фиксации поступающей в ПЭВМ информации и т.д. Кроме того, при работе на предельных скоростях оцифровки возможны сбои: пропуски отсчетов и неточность преобразования аналог-код. С учетом вышесказанного, для огневых испытаний программный опрос каналов построен на следующем алгоритме: "медленные" каналы опрашиваются один раз на 200 замеров

"быстрых". Таким образом, были выбраны частоты опроса различные по каналам: для канала переменных составляющих датчиков ЭП2П и МП2П ~ 20 кГц (в отдельных экспериментах ~40 кГц), для остальных ~ 100 Гц.

При обработке результатов регистрации использовались различные алгоритмы "развертки" данных. Первый - каждому замеру по каналу с максимальной скоростью оцифровки добавлялись значения "медленных" каналов, которые определялись линейной интерполяцией по времени данных ближайших замеров. Второй алгоритм развертки давал таблицу реальных значений с пропусками для "медленных" каналов (табл. 2.7).

**Таблица 2.7.**

Пример реализации алгоритма опроса датчиков

Время ;	ЭП2П ;	ЭП3П ;	МП2П ;	МП3П ;	$p_k$ ;	$\dot{m}_0$ ;	..... ;	$\dot{m}_r$
13,85385000;	1,928;	0,218;	1,260;	0,155;	3,358;	0,281;	2,172;	0,269
13,85389000;	1,920;	;	;	;	;	;	;	;
13,85392000;	2,033;	1,337;	--;	--;	;	;	;	;
13,85396000;	1,967;	;	;	;	;	;	;	;
13,85399000;	1,965;	1,280;	;	;	;	;	;	;
13,85402000;	1,925;	;	;	;	;	;	;	;
13,85406000;	1,935;	;	1,270;	;	;	;	;	;
13,85409000;	1,925;	;	;	;	;	;	;	...
13,86741000;	1,920;	;	;	;	;	;	;	;
13,86745000;	1,935;	;	1,265;	;	;	;	;	;
13,86748000;	1,920;	;	;	;	;	;	;	;
13,86752000;	1,930;	;	1,265;	;	;	;	;	;
13,86755000;	1,915;	;	;	;	;	;	;	;
13,86759000;	1,935;	0,207;	1,265;	0,138;	3,380;	0,281;	2,160;	0,270
13,86762000;	1,923;	;	;	;	;	;	;	;
13,86765000;	2,040;	1,340;	;	;	;	;	;	;
13,86769000;	1,967;	;	;	;	;	;	;	;

Работа по первому алгоритму существенно упрощает обработку результатов, так как для любой точки "быстрого" канала наличествуют данные по всем остальным каналам. Работа по второму алгоритму позволяет оценить реальное соотношение частоты регистрации и частоты фиксируемого сигнала.

С целью получения конкретных значений напряженностей электрического и магнитного полей проведена градуировка датчиков ЭМ и МП. Градуировка датчика МП осуществлялась путем измерения магнитного поля внутри соленоида длиной 300 мм и диаметром 30 мм. Поскольку соотношение длины и диаметра соленоида равно 10, то внутри соленоида поле однородно, то есть имеет одинаковую напряженность и направление (вдоль оси соленоида) во всех точках. Датчик магнитного поля располагался внутри соленоида примерно на его середине и ось датчика была перпендикулярна оси соленоида.

Градуировка датчика электрического поля осуществлялась путем измерения электрического поля внутри пространства, образованного двумя плоскими пластинами металлизированного стеклотекстолита размером 200x200 мм, установленными параллельно на расстоянии 10 мм. Поскольку направление поля - перпендикулярно пластинам, а краевые эффекты незначительны, ДЭП располагался между пластинами примерно посередине между ними таким образом, чтобы линии напряженности поля были перпендикулярны плоскости чувствительного элемента.

### **Методика частотного анализа результатов электрофизической диагностики продуктов сгорания**

На основе полученных в результате вторичной обработки информации возможно проведение:

- фильтрации и сглаживания сигналов;
- спектрального анализа;
- исследования взаимной корреляции сигналов магнитных, электрических датчиков с параметрами внутрикамерных процессов.

Основным методом частотного анализа, использованным на данном этапе при вторичной обработке – являлся метод расчета статистических спектральных характеристик сигнала. При анализе данных, часто встречаются случаи, когда больший интерес вызывает спектральная характеристика сигнала, позволяющая выделить устойчивые частотные составляющие на фоне случайных шумов. Например, в работе [31] применение данного метода для анализа процесса горения твердого топлива, дало возможность легко определять моменты начала и конца процесса горения, а также находить время задержки зажигания.

Спектральный анализ основан на методе дискретного преобразования Фурье. Под дискретным преобразованием Фурье понимается пара преобразований, устанавливающих взаимосвязь между конечным числом дискретных выборок как временной функции  $f(t)$  и ее частотного спектра  $S(\nu)$  [32]. Пусть имеется  $2 \cdot N$  равноудаленных выборок в точках

$$t_k = t_0 + k \cdot \Delta t, \quad k = 0, 1, \dots, 2 \cdot N - 1,$$

$$\nu_n = \nu_0 + n \cdot \Delta \nu, \quad n = 0, 1, \dots, 2 \cdot N - 1$$

$$\bar{S}(\nu_n) = \Delta t \cdot \sum_{k=0}^{2 \cdot N - 1} f(t_k) \cdot e^{-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \nu_n \cdot t_k}, \quad n = 0, 1, \dots, 2 \cdot N - 1 \quad (1)$$

$$f(t_k) = \Delta \nu \cdot \sum_{n=0}^{2 \cdot N - 1} \bar{S}(\nu_n) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \nu_n \cdot t_k}, \quad k = 0, 1, \dots, 2 \cdot N - 1 \quad (2)$$

При этом функция  $|S(\nu_k)|^2$  называется спектром плотности энергии и характеризует относительный вклад различных частотных составляющих в общую энергию. Использование для нахождения спектральной плотности непосредственно выражений (1, 2) неэффективно с точки зрения вычислительных затрат. Для их вычислений применяются эффективные алгоритмы быстрого преобразования Фурье [33, 34], реализуемые в прикладных пакетах.

При использовании системы Matlab, спектральные характеристики удобно анализировать с помощью программ SPECTRUM и SPECGRAM из пакета прикладных программ Signal Processing Toolbox, которые используют алгоритм построения периодограмм Велча (Welch's), описанный в работе [35].

Подпрограмма Spectrum позволяет для двух групп статистически соотнесенных временных выборок данных  $x$  и  $y$  и доверительным интервалам их значений рассчитать следующие спектральные функции:

- вектор спектральной плотности энергии сигнала  $x$  и его доверительный диапазон;
- вектор спектральной плотности энергии сигнала  $y$  и его доверительный диапазон;
- вектор взаимной спектральной плотности сигналов  $x$  и  $y$  и его доверительный диапазон;
- комплексную передаточную функцию от  $x$  к  $y$ ;
- функцию корреляции между спектральными плотностями энергии  $x$  и  $y$ .

При этом программа позволяет устранять линейный тренд временной зависимости,

разбивать данные на группы записей с определенным числом точек для частичного сглаживания, варьировать длиной последовательности используемой для нахождения дискретного преобразования Фурье, использовать технологию оконных фильтров, снижающую погрешность вычисления спектра. При желании результаты расчетов, могут быть представлены в виде графиков.

Программа SPECGRAM позволяет получать трехмерную спектрограмму, показывающую изменение спектральной мощности различных частот от времени, отображая, можно ее в виде двумерного цветного изображения, на котором изменение цвета соответствует изменению спектральной плотности.

С учетом частоты опроса датчиков ЭП и МП при построении спектра с использованием 256 коэффициентов ряда Фурье (параметры программ SPECTRUM и SPECGRAM по умолчанию) мощность спектра оценивалась в 129 точках, на частотах приведенных в таблице 2.8.

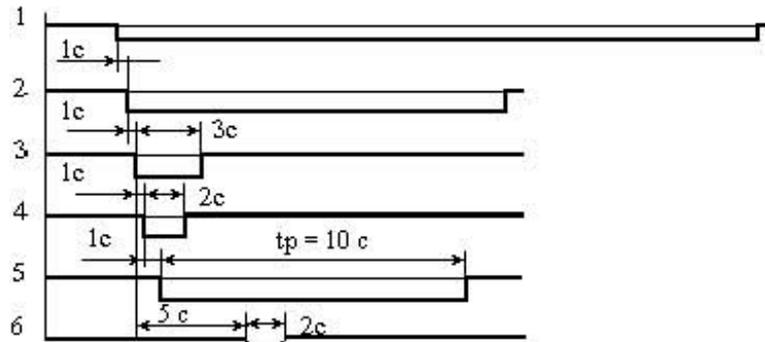
Таблица 2.8

Список частот спектра, Гц

83,2002	1081,60 3	2080,00 5	3078,40 8	4076,81	5075,21 3	6073,61 6	7072,01 8	8070,42 1	9068,82 3
166,400 4	1164,80 3	2163,20 6	3161,60 8	4160,01 1	5158,41 3	6156,81 6	7155,21 8	8153,62 1	9152,02 3
249,600 6	1248,00 3	2246,40 6	3244,80 8	4243,21 1	5241,61 3	6240,01 6	7238,41 9	8236,82 1	9235,22 4
332,800 9	1331,20 3	2329,60 6	3328,00 9	4326,41 1	5324,81 4	6323,21 6	7321,61 9	8320,02 1	9318,42 4
416,001 1	1414,40 4	2412,80 6	3411,20 9	4409,61 1	5408,01 4	6406,41 6	7404,81 9	8403,22 2	9401,62 4
499,201 3	1497,60 4	2496,00 6	3494,40 9	4492,81 2	5491,21 4	6489,61 7	7488,01 9	8486,42 2	9484,82 4
582,401 5	1580,80 4	2579,20 7	3577,60 9	4576,01 2	5574,41 4	6572,81 7	7571,21 9	8569,62 2	9568,02 5
665,601 7	1664,00 4	2662,40 7	3660,80 9	4659,21 2	5657,61 5	6656,01 7	7654,42	8652,82 2	9651,22 5
748,801 9	1747,20 5	2745,60 7	3744,01	4742,41 2	5740,81 5	6739,21 7	7737,62	8736,02 2	9734,42 5
832,002 1	1830,40 5	2828,80 7	3827,21	4825,61 2	5824,01 5	6822,41 8	7820,82	8819,22 3	9817,62 5
915,202 3	1913,60 5	2912,00 8	3910,41	4908,81 3	5907,21 5	6905,61 8	7904,02	8902,42 3	9900,82 5
998,402 6	1996,80 5	2995,20 8	3993,61	4992,01 3	5990,41 5	6988,81 8	7987,22	8985,62 3	9984,02 6
10067,2 3	10150,4 3	10233,6 3	10316,8 3	10400,0 3	10483,2 3	10566,4 3	10649,6 3		

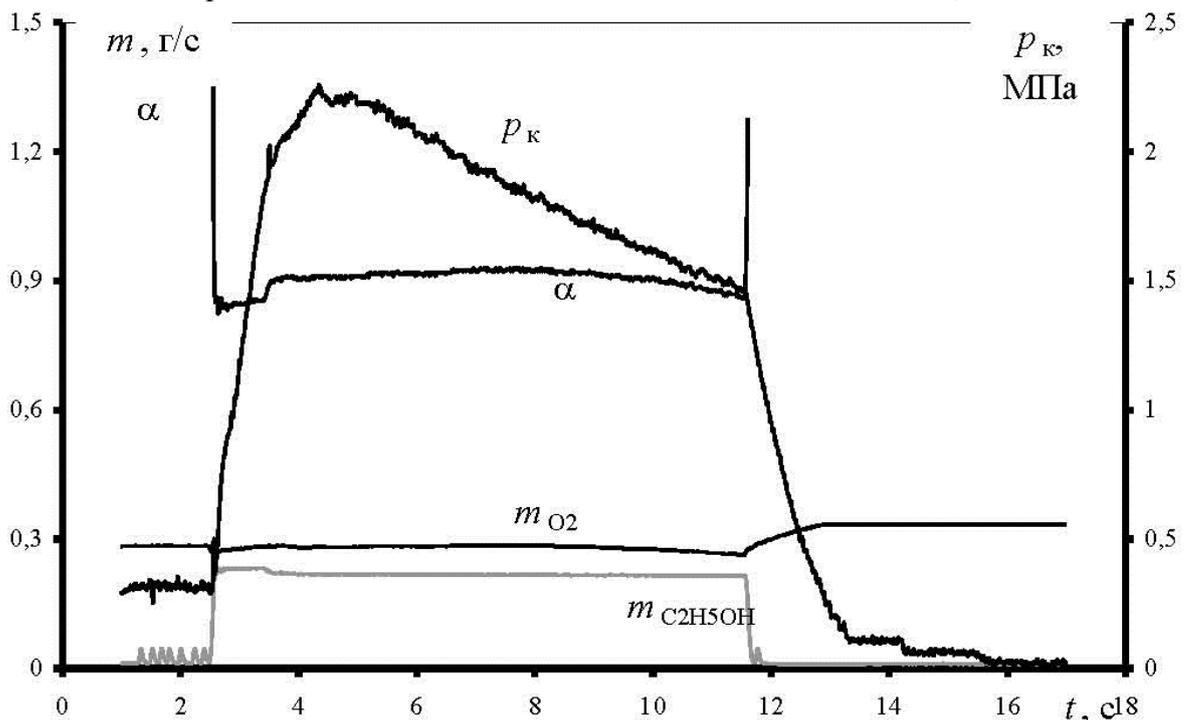
### *Интегральные электрофизические характеристики продуктов сгорания ЖРД*

Рассмотрим результаты моделирования возникновения аномальных режимов работы ЖРД, которые могут быть обусловлены разрушением элементов системы подачи топлива (прогар лопаток турбины, форсуночной головки), стенок камеры сгорания, а также разгаром критического сечения и сверхзвуковой части сопла. Циклограмма проведения ОСИ длительностью ~30 с составлена следующим образом (рис. 2.24).



**Рис. 2.24.** 1- подача воды в рубашку охлаждения ЖРД; 2- включение ПЭВМ и шлейфового осциллографа; 3- включение свечи; 4- открытие клапанов промежуточной ступени; 5- открытие клапанов основной ступени; 6- подача порошкообразного материала в КС

Экспериментальные исследования разгара критического сечения проводились с использованием двух вкладышей критического сечения, выполненного из разных композитных материалов. Осциллограмма пуска при установке вкладыша из стеклопластика П5-4 представлены на рис. 2.25. В данном эксперименте разгар критического сечения начинается практически одновременно с выходом модельного ЖРД на номинальный режим. Об этом свидетельствуют тот факт, что давление в КС не достигает расчетного значения (~3 МПа) и останов двигателя произошел автоматически после падения давления до 1,5 МПа.



**Рис. 2.25.** Осциллограмма пуска. Материал критического сечения П5-4

Одновременно с уменьшением давления начинает уменьшаться абсолютное значение сигнала датчика МП по каналу огибающей 100 Гц в частотном диапазоне 2-100 кГц (МП4П): на останове ЖРД величина напряженности МП составила  $H = 20$  А/м.

По изменению давления в КС можно рассчитать увеличение диаметра критического сечения (рис. 2.26), используя уравнение неразрывности

$$p_k/p_k^0 = (d_{кр}/d_{кр}^0)^2$$

Общий вид вкладыша критического сечения после ОСИ представлен на рис. 2.27.

Осциллограмма пуска также иллюстрирует практически постоянные значения массовых расходов горючего и окислителя и (рис. 2.25), следовательно, незначительное изменение коэффициента избытка окислителя в течение всего пуска. Поэтому можно утверждать, что изменение характеристик электромагнитного поля ПС непосредственно обусловлено падением давления в КС.

В случае использования более термостойкого стеклопластика П5-7 разгар вкладыша зарегистрирован позже (на ~16 с пуска), когда, согласно уравнению неразрывности, начинается монотонное падение давления в КС.

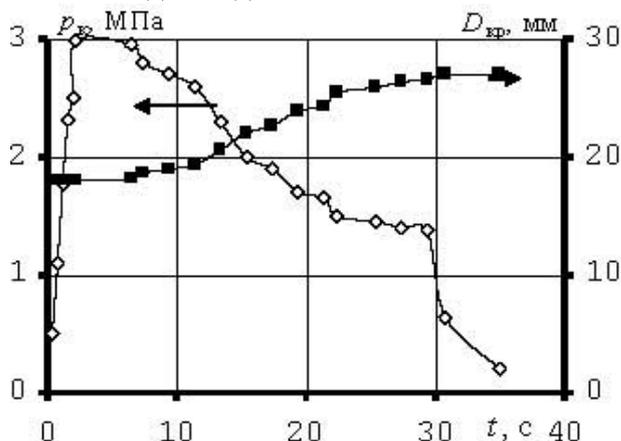


Рис. 2.26. Осциллограмма изменения давления в камере сгорания



Рис. 2.27. Вкладыш критического сечения после огневого стендового испытания

Анализ экспериментальных данных серии ОСИ при различных давлениях в КС позволил установить зависимость амплитуды напряженности магнитного поля по каналу МП4П (рис. 2.27) от давления в КС, которая в диапазоне давлений 2,5 – 3,5 МПа может быть аппроксимирована линейной функцией

$$H = 23,814 p_k - 37,626, \text{ А/м.}$$

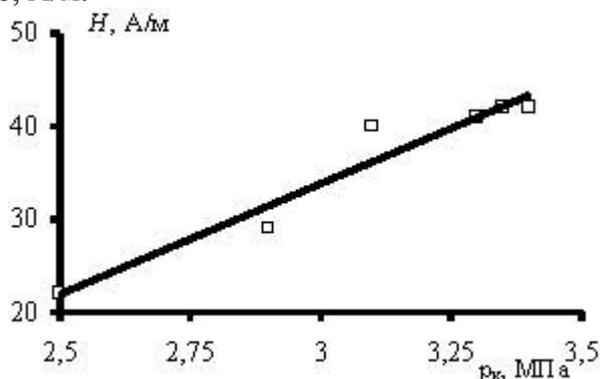


Рис. 2.27. Зависимость напряженности магнитного поля от давления в камере сгорания

Данный результат может быть объяснен следующим. Значения тока уноса, определяющего характеристики электромагнитного поля истекающей струи продуктов сгорания, пропорциональны диаметру среза сопла  $d_a$ , скорости потока в этом сечении  $V_a$  и концентрации заряженных частиц  $N_{e,i}$  (ионов и электронов) [26, 36]

$$I_y \sim d_a V_a N_{e,i}.$$

Тогда при постоянном диаметре критического сечения уменьшение давления в камере

сгорания, согласно уравнению неразрывности, приводит к уменьшению степени расширения потока и, следовательно, скорости потока на срезе сопла. Таким образом, установлена корреляция между давлением в КС и показаниями датчика магнитного поля, которая может быть использована в системе электрофизической диагностики и регулирования ЖРД.

Показания датчиков ЭП и МП на осциллограммах рис. 2.28 (б- д) свидетельствуют, что наиболее информативны сигналы по каналам ЭП2П, МП2П, МП4П. После прохождения команды «Пуск» включается промежуточная ступень и свеча электроискровой системы воспламенения, работа которой зарегистрирована по всем каналам измерений. Причем канал ЭП4П регистрирует параметры электромагнитного поля продуктов сгорания только тогда, когда включена система воспламенения и работает электрическая свеча. Величина напряженности ЭП, регистрируемой каналом ЭП4П в этот момент, составляет 10 кВ/м.

Отметим также, что по каналу ЭП4П (огибающая по 100 Гц сигнала напряженности ЭП в диапазоне 2-100 кГц) зарегистрированы также моменты открытия и закрытия клапанов. Это может быть использовано для контроля открытия-закрытия клапанов и определения наличия опережения подачи горючего или окислителя в камеру сгорания.

Определенный интерес представляет сравнение значений напряженности ЭП, зарегистрированные на огневых испытаниях, с данными других авторов. Так, например, в работе Черепнина С.Н. [13] проводились измерения электрического потенциала ПС внутри камеры модельного двигателя, использующего в качестве топлива предварительно перемешанную пропан-воздушную смесь. Наибольшее значение потенциала составило  $\sim 30$  мВ, что при радиусе КС 50 мм соответствует уровню напряженности  $\sim 0,6$  В/м. Значительное количественное расхождение может быть связано с относительно невысокими значениями температуры ПС (не более 1000 К) и скорости потока ( $\sim 50$  м/с).

В работе [37] проводились измерения электрофизических параметров ПС, истекающих из сопла воздушно-реактивного двигателя самолета Як-40. Наибольшее значение потенциала зарегистрировано на расстоянии 5 калибров струи при наибольшей мощности двигателя и составляет  $\sim 5$  кВ. Если принять, что характерный размер не превышает  $\sim 1$  м, то эта величина потенциала соответствует напряженности ЭП, превышающей 5 кВ/м.

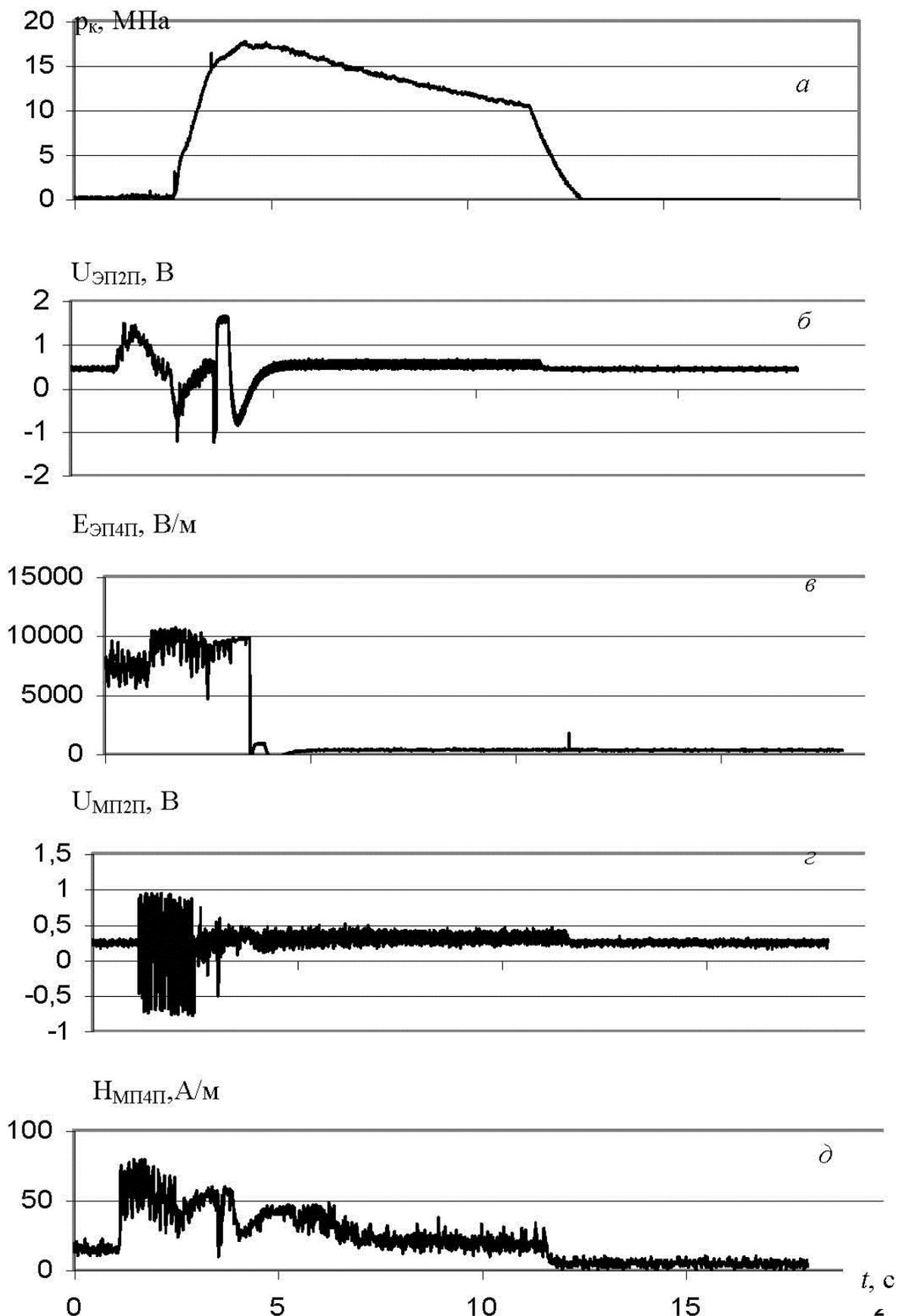
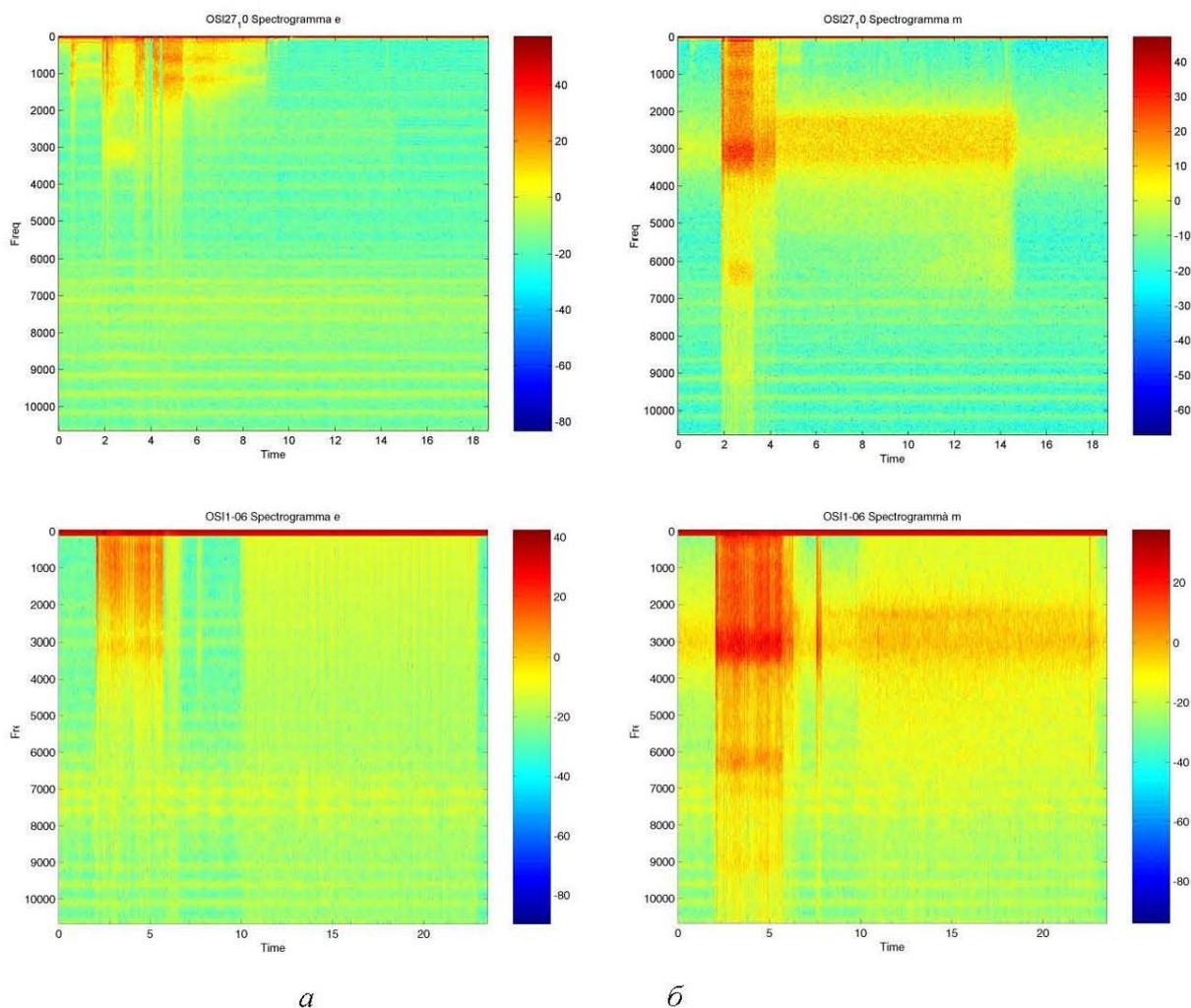


Рис. 2.28. Осциллограммы регистрации параметров электромагнитного поля продуктов сгорания

Отметим так же, что экспериментальные данные по величине напряженности магнитного поля продуктов сгорания ракетного двигателя получены впервые.

### **Результаты частотного анализа электромагнитного поля струи продуктов сгорания ЖРД**

Частотный анализ информации проводился по каналам ЭП2П (колебания напряженности ЭП) и МП2П (колебания напряженности МП), которые опрашивались аппаратно-программным комплексом с частотами до 30 кГц. Топограммы спектральной мощности колебаний магнитного поля, полученные при обработке информации за все время пуска, представлены на рис. 2.29.

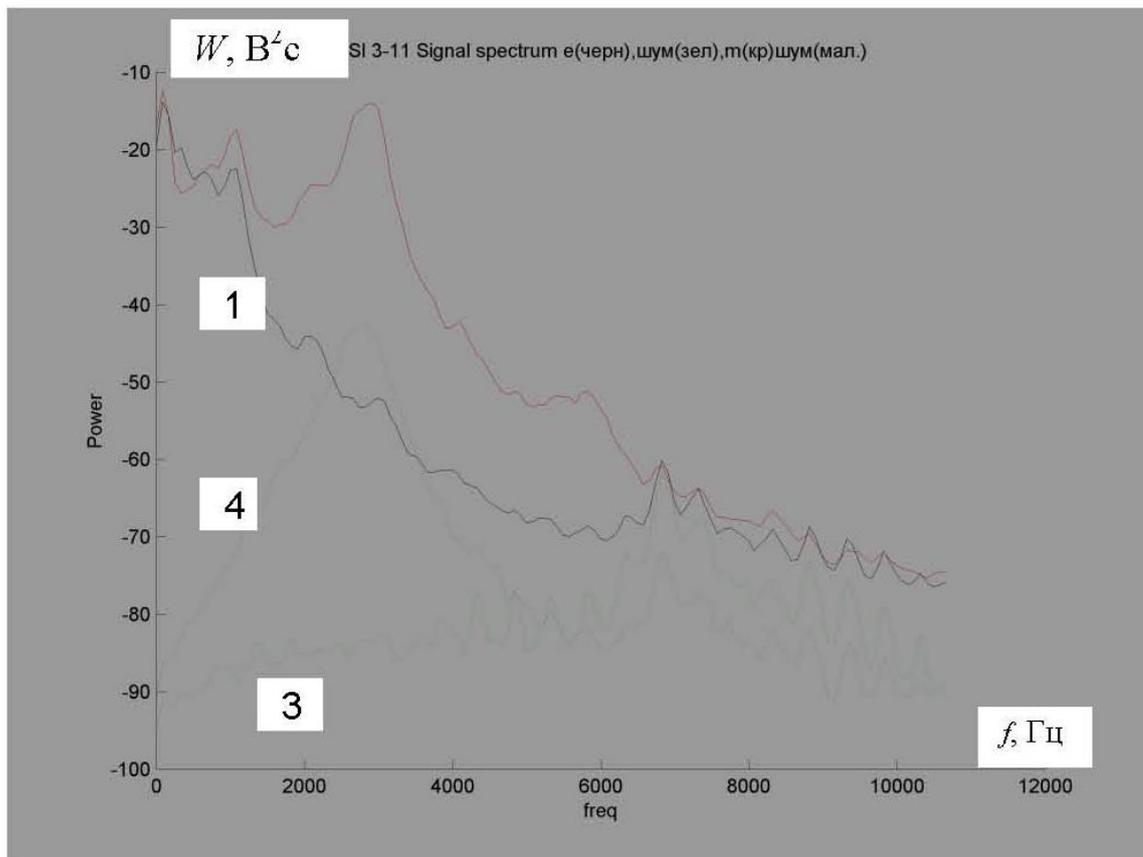


**Рис. 2.29.** Топограммы сигналов электромагнитной диагностики ЖРД:  
*a* – электрическое поле, *б* – магнитное поле

Они представляют проекцию на плоскость  $f$  (частота)-  $t$  (время пуска) двумерной спектральной мощности колебаний электромагнитного поля струи продуктов сгорания. Их визуальный анализ позволяет выделить в общем спектре колебания от работы электроискровой системы воспламенения, от прохождения команд на открытие и закрытие клапанов, по которым поступают топливо и ПМ в камеру сгорания, сигналы, вызванные наличием «шумов» в системе регистрации, а также собственных электромагнитных колебаний истекающей из сопла струи продуктов сгорания.

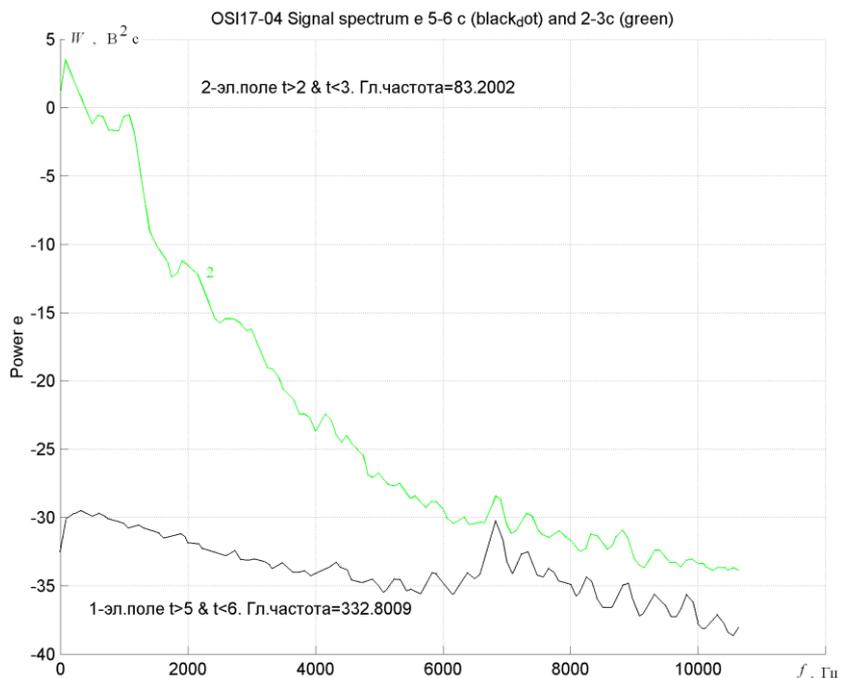
В связи с этим сначала было выполнено исследование «шума», генерируемого системой регистрации, в частности, источниками питания и коммутирующими элементами

измерительной цепи. Анализ спектральной плотности «шума» каналов ЭП2П и МП2П проводился по сигналам, зарегистрированным датчиками после включения системы регистрации и до прохождения команды «Пуск». Результаты исследования шума представлены на рис. 2.30 в виде зависимости спектральной мощности сигнала  $W$  от частоты колебаний электромагнитного поля. Таким образом, сравнивая сигнал шума с уровнем полезного сигнала, можно видеть, что в ряде области 6000-8000 Гц уровень шумового сигнала и полезного сигнала сопоставимы. Для корректных измерений в этом диапазоне необходимо предпринимать специальные исследования для выяснения причин появления шумов и возможности их снижения.



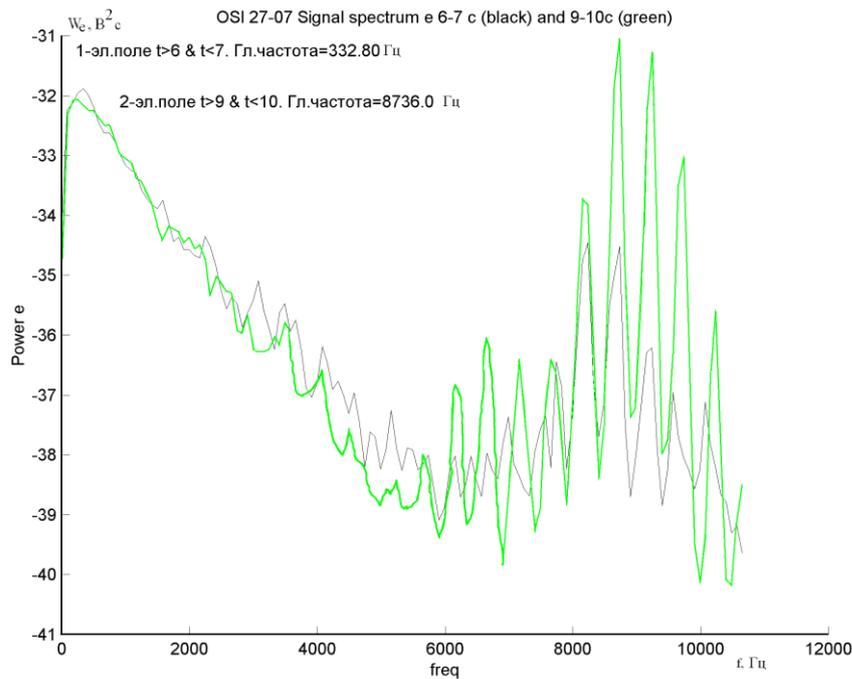
**Рис. 2. 30.** Спектрограммы различных режимов работы ЖРД. 1, 2- измерение на пуске ЭП2П и МП2П соответственно, 3, 4- шум по каналам ЭП2П и МП2П соответственно

Определенный интерес представляют спектральные характеристики электромагнитного поля, генерируемого электроискровой системой воспламенения. На рис. 2. 31 представлена спектрограммы, полученные в моменты времени, когда работает свеча (2 – 3 с пуска) и после ее выключения (5 – 6 с пуска). Обращает внимание, что мощные электроискровые разряды, генерируемые свечой обуславливают не только смещение максимума спектральной мощности сигнала в область низких частот  $f = 83,2$  Гц, но и увеличение значения  $W$ . Данный результат может быть объяснен взаимодействием процессов реализации электрических разрядов и генерации ионов продуктов сгорания под действием внешнего источника.

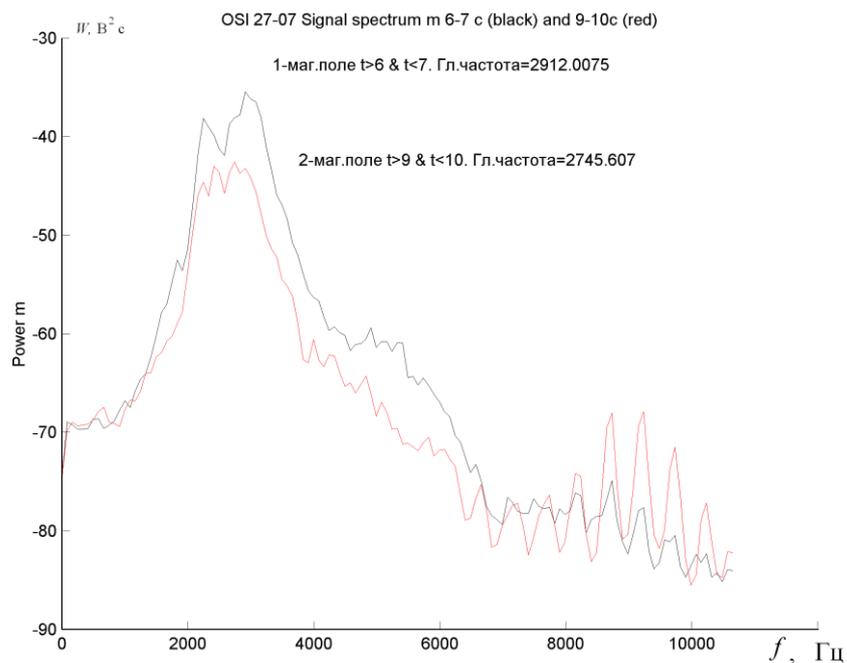


**Рис. 2.31.** Спектрограмма работы электроискровой системы воспламенения (2)

Анализ спектральных характеристик электромагнитных колебаний на огневом испытании с разгорающимся соплом (осциллограмма пуска приведена на рис. 2.28) показывает, что наибольшие отличия наблюдаются в спектральной мощности колебаний ЭП. Как следует из рис. 2.32, в процессе разгара критического сечения максимум частоты колебаний смещается в длинноволновую область спектра. Так, на 10 с  $f_{max} = 8736$  Гц. В случае гомогенного потока ПС  $f_{max} = 83$  Гц. Частотные характеристики МП изменяются менее существенно: максимум частоты колебаний остается в районе 3 кГц (рис. 2.33). Эти результаты могут быть объяснены тем, что продукты разложения стеклопластика, электризуясь, непосредственно изменяют параметры ЭП.

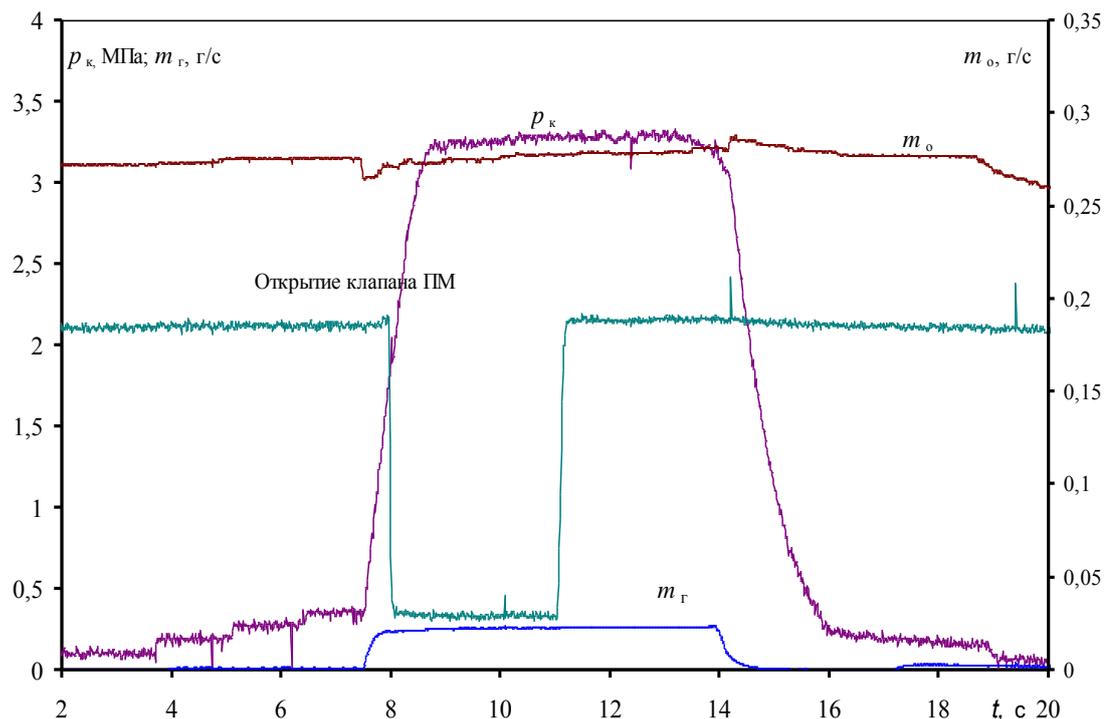


**Рис. 2.32.** Спектра плотности энергии электрического поля



**Рис. 2.33.** Спектра плотности энергии магнитного поля

В серии экспериментов (типичные осциллограммы пуска приведены на рис. 2.34) с вводом порошка алюминиево-магниевого сплава установлено, что частицы в большей степени изменяют спектральные характеристики ЭП (рис. 2.35), а зависимость сигналов для МП практически не изменяется (рис. 2.36).



**Рис. 2. 34.** Осциллограмма пуска с подачей порошка

На указанных спектрограммах для частотного анализа использовались следующие характерные моменты ОСИ, отсчитываемые от начала регистрации (см. рис. 2.34).

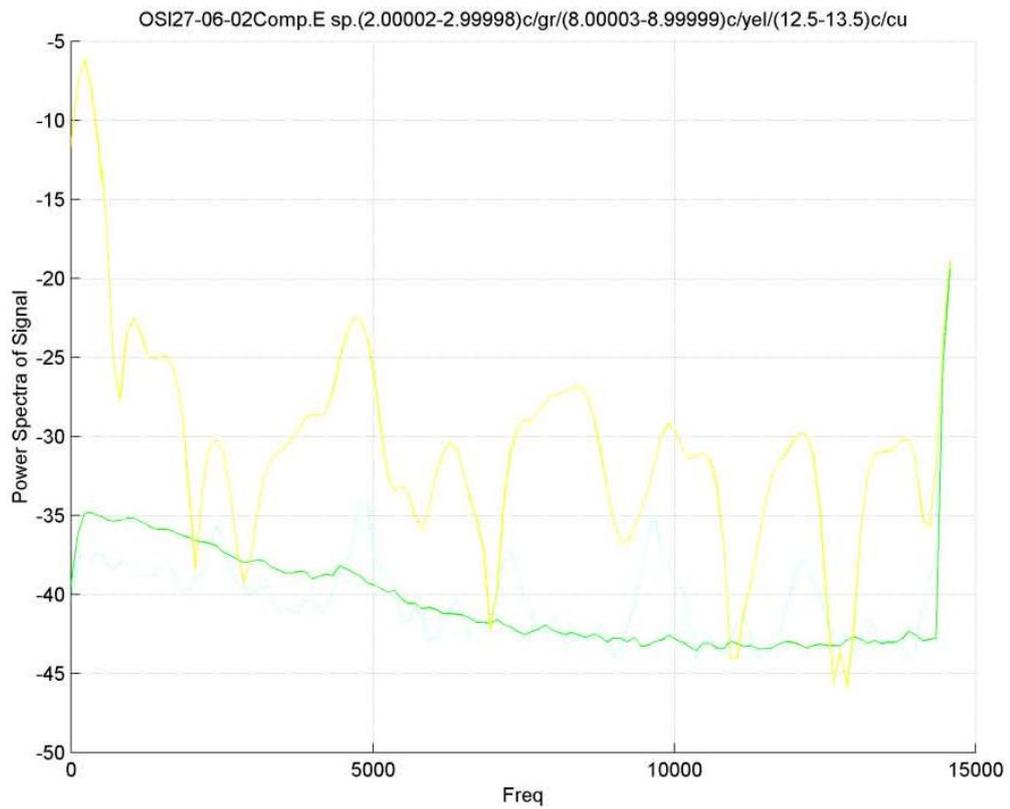
- 2 с – 3 с – двигатель не включен, то есть представлены «шумы» каналов измерения.
- 8 с – 9 с – двигатель работает на номинальном режиме, система воспламенения отключена, в КС подается порошок.
- 12,5 с – 13,5 с - двигатель работает на номинальном режиме, система воспламенения отключена, в КС порошок не подается.

Из представленных данных можно сделать следующие выводы.

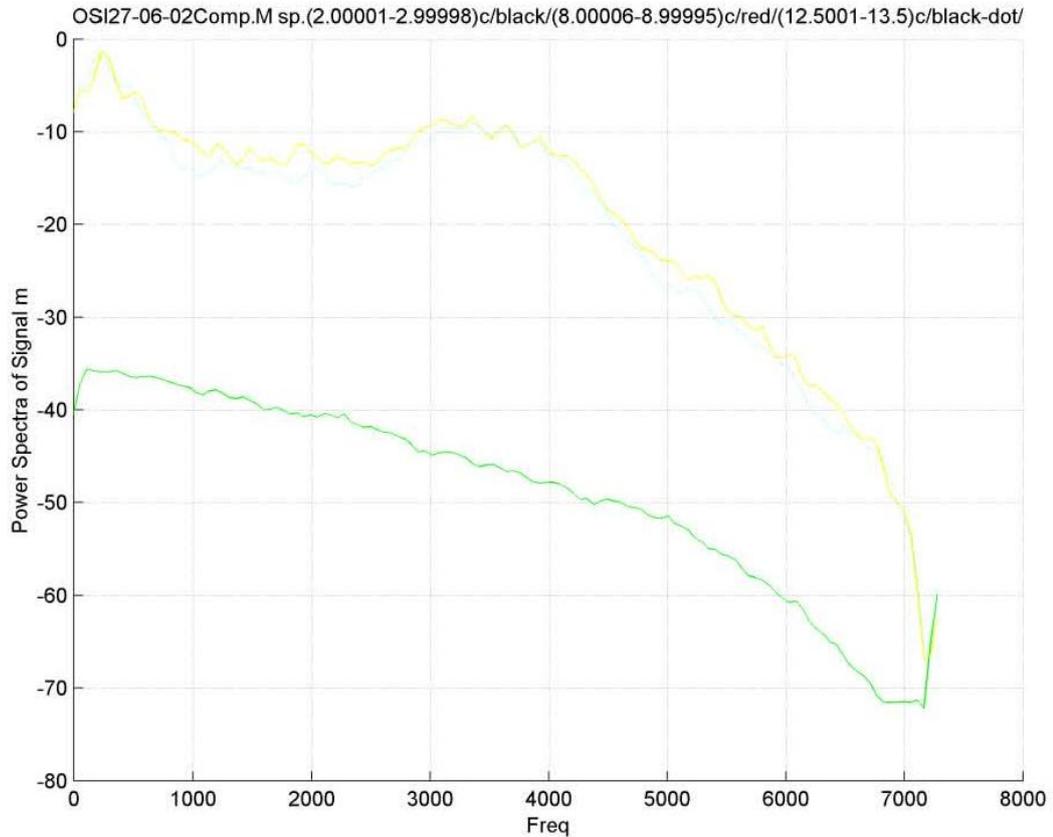
1. После попадания в КС частиц металла спектр колебаний ЭП (зависимость 2) характеризуется наличием нескольких максимумов во всем регистрируемом диапазоне частот (0 – 15 кГц), а без ввода ПМ количество максимумов и их интенсивность оказываются меньшими (зависимость 3).

2. На высоких частотах отношение сигнал-шум становится близким к единице.

3. Спектрограмма колебаний МП является убывающей функцией с глобальными максимумами в диапазоне частот ~200 Гц и ~3500 Гц. Полученный результат можно объяснить спектральной характеристикой пропускания канала ДМП, имеющей бимодальный характер.



**Рис. 2.35.** Спектра плотности энергии электрического поля.  
Интервал времени пуска 1-2с – 3с, 2-8с – 9с 3-12,5с -13,5с.



**Рис. 2.36.** Спектра плотности энергии магнитного поля.  
Интервал времени пуска: 1- 2 с – 3 с, 2- 8 с – 9 с, 3- 12,5 с – 13,5 с.

4. Спектрограммы колебаний МП при вводе порошка в КС и без ввода практически одинаковы, что может свидетельствовать о слабой чувствительности колебаний напряженности МП к наличию в продуктах сгорания конденсированных частиц. Данный результат также подтверждает превалирующее влияние электризации частиц конденсированной фазы, попадающей в высокотемпературный поток, на характеристики ЭП.

5. Зарегистрированные скачкообразные увеличения спектра плотности энергии на границах частотного анализа 7500 Гц и 15000 Гц объясняются наличием в спектре колебаний ЭМ и МП частот, превышающих частоты опросов ДМП и ДЭП.

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.

## ВЫВОДЫ

1. Приведенные в данной работе результаты по влиянию давления на электрофизические характеристики рабочего процесса, а также данные по параметрам магнитного поля сверхзвуковой струи продуктов сгорания ЖРД и частотным характеристикам являются необходимыми для завершения формирования базы данных по электрофизическим аспектам рабочего процесса в двигательных и энергетических установках.

1.1. Экспериментально зарегистрирована линейная зависимость амплитуды колебаний напряженности магнитного в частотном диапазоне 2-10 кГц от давления в КС.

1.2. Экспериментально установлено, что максимум спектральной мощности колебаний ЭП лежит в диапазоне 82 Гц, а МП лежит в диапазоне 3 кГц. Кроме того, спектр магнитной составляющей показывает локальные максимумы в диапазонах практически во всем диапазоне частот до 10 кГц.

1.3. При попадании в продукты сгорания к-фазы (ввод порошка) и при разгаре критического сечения сопла наибольшее изменение претерпевают частотные характеристики ЭП: максимум частоты колебаний смещается в длинноволновую область спектра:  $f_{max} = 8736$  Гц.

1.4. Применение в системах диагностики ДУ параметров ЭП и МП имеет ограничение по габаритам сопла (что определяет диаметр струи и скорость потока ПС), в связи с чем можно ожидать генерирование более мощных электромагнитных полей при огневых испытаниях и летной эксплуатации натуральных ЖРД.

2. При создании системы диагностики рабочего процесса ЖРД электрофизическими методами в качестве входных параметров могут использоваться следующие:

- величина собственного электрического поля продуктов сгорания для контроля соотношения топлива и полноты сгорания топлива;
- электрические импульсы, обусловленные электризованными частицами к-фазы (для контроля процесса эрозии элементов конструкции ЖРД и ранней диагностики отказа);
- изменение спектральной и частотной диаграммы электромагнитных колебаний, генерируемых выхлопной струей продуктов сгорания ЖРД;
- величина тока зарядки сопла и тока уноса (для контроля  $\alpha$  и полноты сгорания топлива);
- потенциал электризации элементов проточной части ЖРД, в частности соплового блока.

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ, УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СИМВОЛОВ

- ДУ - двигательная установка;
- КС - камера сгорания;
- МП - магнитное поле;
- ПС - продукты сгорания;
- ФП - фронт пламени;
- ЭП - электрическое поле;
- ЭСУ - энергосиловая установка.
- $E$  - напряженность ЭП;
- $D_a$  - диаметр среза сопла;
- $H$  - напряженность магнитного поля;
- $I_c$  - ток зарядки сопла;
- $I_y$  - ток уноса;
- $N$  - объемная концентрация;
- $p$  - давление;
- $q$  - заряд;
- $T$  - температура;
- $x$  - координата;
- $\alpha$  - коэффициент избытка окислителя;
- $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость;
- $\phi$  - электрический потенциал;
- $\sigma$  - электрическая проводимость;
- $k$  - параметр камеры сгорания;
- $a$  - параметр потока на срезе сопла;
- $c$  - параметр сопла;
- $e$  - электрон;
- $i$  - ион.

## Литература

1. Гафуров Р.А., Соловьев В.В. Диагностика внутрикамерных процессов в энергетических установках.- М.: Машиностроение, 1991.- 272 с.
2. Головин Ю.М. Перспективы развития систем диагностики и аварийной защиты ЖРД // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики.- 2002.- № 9.- С. 34 – 38.
3. 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 – 26.
4. Нагель Ю.А. Электризация двигателей при истечении продуктов сгорания. Экспериментальные результаты.- Там же.- 1999.- Т. 69, № 8.- С. 55 – 59.
5. Лоеб Л. Статическая электризация. М.:Госэнергоиздат, 1963.- 406 с.
6. Лаутон Д., Вейнберг Ф. Электрические аспекты горения / Пер. с англ. Н.М.Вентцель, И.Я.Полонского. - М.: Энергия, 1976. - 296 с.
7. Кидин Н.И., Либрович В.Б. О собственном электрическом поле ламинарного пламени // Физика горения и взрыва. - 1974. - Т.10, N 5. - С. 696 - 705.
5. Calcote H.F. The Influence of Pressure on Electrophysical Characteristics of methane-air mixture Combustion // 8-th International Symposium on Combustion, Baltimore: Williams and Wilkins, 1962 - P. 184-190.
7. Кидин Н.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Электрические свойства ламинарных пламен. Препринт // Институт проблем механики АН СССР, 1975. - N 51. - 32 с.
8. Кидин Н.И., Махвиладзе Г.М. Электрическое поле ламинарного пламени с большой степенью ионизации // Физика горения и взрыва. - 1978. - Т.12, N 6. - С. 865-871.
9. Мак-Даниэль И. Процессы столкновения в ионизированных газах. - М.: Мир, 1967. - 423 с.
10. Фиалков Б.С., Щербаков Н.Д., Птицын В.Т. Распределение электрического потенциала в углеводородных пламенах // Физика горения и взрыва. - 1978. - Т.14, N 3.- С. 87-90.
11. Структура собственного электрического поля пламени / Б.С.Фиалков, Н.Д.Щербаков, В.И.Ботова и др. // Исследование процессов неустойчивого горения. Межвузовский сборник. - Чебоксары, 1984. - С. 53-70.
12. Использование электрических явлений для контроля и управления теплотехническими и технологическими процессами. / Б.С.Фиалков, Н.Д.Щербаков, Н.К.Акст и др. // Физика горения и взрыва. - 1983. - Т.19, № 5. - С. 29-30.
13. Черепнин С.Н. Исследование электрофизических явлений в камерах сгорания реактивных двигателей // Физика горения и взрыва. - 1990. - Т.26, N 2. - С. 58-59.
14. Богословский В.П., Зайчиков В.В., Самойлов И.Б. О зондовых измерениях ионизации в пламени // Физика горения и взрыва. - 1974. - Т.10, N 5. - С. 705-709.
15. Черепнин С.Н. К вопросу о влиянии ионизирующих добавок и внешнего электрического поля на горение и окисление.- Там же.- 1991. - Т.27, N 1. - С. 75-77.
16. Резник В.Е., Токарев В.В., Шайкин А.П. Электропроводность факела пламени неоднородной смеси при впрыске жидкого топлива в зону рециркуляции за плохообтекаемым телом // Известия ВУЗ'ов. Авиационная техника. - 1977, N 3.- С. 93-97.
17. Исследование электрических характеристик реактивных струй, истекающих из двигателей самолетов / А.Б.Ватажин, А.Ф.Казаков, В.А.Лихтер и др. - ЦИАМ, 1974. - 4 с. - (Тр. ЦИАМ; Вып. 628).
18. Электрогазодинамические течения / А.Б.Ватажин, В.И.Грабовский, В.А.Лихтер и др. - М.: Наука, 1983. - 344 с.
19. Couch R.P. Detecting Abnormal Turbine Engine Deterioration Using Electrostatic Methods // Journal of Aircraft & - 1978. - V.15, N 10. - P. 692-695.
20. Фот Г.Э. Исследование электрических характеристик горючих жидкостей //

Электрофизические способы пылеулавливания. - Алма-Ата: Казахский политех. ин-т, 1987. - С. 89-94.

21. *Ужов В.М.* Очистка промышленных газов электрофильтрами. М.: Госхимиздат, 1962. - 300 с.

22. *Импульсный* метод исследования электрических характеристик плазмы с конденсированной дисперсной фазой / А.Н.Золотко, С.В.Козицкий, А.В.Флорко и др. // Физика аэродисперсных систем. - 1984. - Вып.26. - С. 79-83.

23. *Головкин В.В., Козицкий С.В., Флорко А.В.* Электрическое поле горячей одиночной частицы магния // Физика горения и взрыва. - 1985. - Т.21, N 4. - С. 27-32.

24. *Акишин А.И., Новиков Л.С.* Электризация космических аппаратов. - М.: Знание, 1985. - 64 с.

25. *Потапов Г.П., Ившин В.П.* К вопросу определения электрофизических характеристик поверхности, находящейся в плотной плазме с добавкой ионизируемого металла // Тепловые процессы и свойства рабочих тел двигателей летательных аппаратов. - Казань, 1973. - С. 67-73. - (Тр. КАИ; Вып. 158).

26. *Потапов Г.П.* Электризация реактивных сопел // Известия ВУЗ'ов. Авиационная техника. - 1978, N 4.- С. 112-116.

27. *Черепнин С.Н., Дашевский В.Н.* Влияние внешнего электрического поля на параметры горения и электризацию сопла энергетической установки // Физика горения и взрыва. - 1990. - Т.26, N 6. - С. 74-78.

28. *Экспериментальное* исследование электризации энергоустановок / Г.Б.Муравьев, Р.Х.Сабилов, Г.П.Потапов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. - 1991, N 2.- С. 103-106.

29. *Экспериментальный* стенд для исследования электризации энергоустановок / Г.П.Потапов, Г.Б.Муравьев, Р.Х.Сабилов и др. // Там же. - 1990, N 4.- С. 105-107.

30. *Шацкий О.Е., Щербатов А.А., Власов Ю.Н.* Подача псевдооживленных порошков в режиме заторможенного плотного слоя // Процессы горения и охраны окружающей среды.- Рыбинск: РАТИ, 1993.- С. 43 - 47.

31. *Экспериментальное* исследование зажигания и распространения пламени при конвективном нагреве твердого топлива / Л. Галфетти, Дж. Коломбо, А. Меналли, Дж. Бенцони, К. Галли // Физика горения и взрыва. - 2000.- Т. 36, № 1.- С. 119 – 130.

32. *Cooley J. W., Lewis P. A. W., Welch P. D.* The fast Fourier transform algorithm: Programming considerations in the calculation of sine, cosine and Laplace transforms. J. Sound Vib. 12, 315-337, 1970.

33. *Бэдсел Ч., Ленгдон А.* Физика плазмы и численное моделирование: Пер. с англ.— М.: Энергоатомиздат, 1989.—452 с.

34. *Cooley J. W., Lewis P. A. W., Welch P. D.* The fast Fourier transform algorithm: Programming considerations in the calculation of sine, cosine and Laplace transforms. J. Sound Vib. 12, 315-337, 1970.

35. *Proakis J.G. and Manolakis D. G.* Digital Signal Processing, 3rd Ed. Prentice Hall Intern , 1996. - 556 p.

36. *Потапов Г.П., Дрегалин А.Ф.* Образование статического электричества при истечении из сопла ионизированного газа // Известия ВУЗ'ов. Авиационная техника. - 1977, N 5.- С. 90-92.

37. *Исследование* электрических характеристик реактивных струй, истекающих из двигателей самолетов / А.Б.Ватажин, А.Ф.Казаков, В.А.Лихтер и др. - ЦИАМ, 1974. - 4 с. - (Тр. ЦИАМ; Вып. 628).

38. *Ягодников Д.А., Воронежский А.В., Пушкин Н.М.* Исследование электризации сопла жидкостного ракетного двигателя // Физика горения и взрыва.- 1995.- Т. 31, № 4.- С. 54-58

39. *Применение ЭВМ* для термодинамических расчетов / Г.Б.Синярев, Н.А.Ватолин,

Б.Г.Трусов, Г.К.Моисеев.- М.: Наука, 1982.- 282 с.

40. *Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г.* Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах.- М.: Metallurgia, 1994.- 352 с.

---

**Frequency analysis of carbon fuel liquid rocket engine working process' electrophysical characteristics**  
**77-30569/250245**

**# 11, November 2011**

**authors: Yagodnikov D.M., Bobrov A.N., Rudinskii A.V.**

Bauman Moscow State Technical University  
[daj@mx.bmstu.ru](mailto:daj@mx.bmstu.ru)  
[alexbovr@mail.ru](mailto:alexbovr@mail.ru)  
[alex\\_rudinskiy@mail.ru](mailto:alex_rudinskiy@mail.ru)

This article deals with complex experimental research of electrophysical processes in liquid rocket engines. Subject for study of products of combustion flow process' electrophysical characteristics is a model of liquid rocket engine, using ethanol as a fuel and gaseous oxygen as an oxidizing compound. Dependences of magnetic and electric intensity on LRE mode parameters were obtained. Resulting data could be used for the development of noncontact diagnostic system and disaster facilities of LRE in real time.

**Publications with keywords:** liquid rocket engine, intensity of electric field, a frequency spectrum of an electromagnetic field

**Publications with words:** liquid rocket engine, intensity of electric field, a frequency spectrum of an electromagnetic field

#### Reference

1. Gafurov R.A., Solov'ev V.V., Diagnostics of intrachamber processes in power installations, Moscow, Mashinostroenie, 1991, 272 p.
2. Golovin Iu.M., Fundamental'nye i prikladnye problemy kosmonavтики 9 (2002) 34 – 38.
3. Pinchuk V.A., Zhurnal tekhnicheskoi fiziki 67 (8) (1997) 21 – 26.
4. Nagel' Iu.A., Zhurnal tekhnicheskoi fiziki 69 (8) (1999) 55 – 59.
5. Loeb L., Static electrization, Moscow, Gosenergoizdat, 1963, 406 p.
6. Lauton D., Veinberg F., Electrical aspects of the combustion, Moscow, Energiia, 1976, 296 p.
7. Kidin N.I., Librovich V.B., Fizika goreniia i vzryva 10 (5) (1974) 696 - 705.
8. Calcote H.F., The Influence of Pressure on Electrophysical Characteristics of methane-air mixture Combustion, in: Proc. of the 8-th International Symposium on Combustion, Baltimore, Williams and Wilkins, 1962, pp. 184-190.
9. Kidin N.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M., Institut problem mekhaniki AN SSSR, 1975, N 51, 32 p.
10. Kidin N.I., Makhviladze G.M., Fizika goreniia i vzryva 12 (6) (1978) 865-871.
11. Mak-Daniel' I., The processes of collisions in ionized gases, Moscow, Mir, 1967, 423 p.
12. Fialkov B.S., Shcherbakov N.D., Ptitsyn V.T., Fizika goreniia i vzryva 14 (3) (1978) 87-90.

13. B.S.Fialkov, N.D.Shcherbakov, V.I.Botova, et al., in: The interuniversity collection on Investigation of processes of unstable combustion, Cheboksary, 1984, pp. 53-70.
14. B.S.Fialkov, N.D.Shcherbakov, N K.Akst, et al., Fizika goreniia i vzryva 19 (5) (1983) 29-30.
15. Cherepnin S.N., Fizika goreniia i vzryva 26 (2) (1990) 58-59.
16. Bogoslovskii V.P., Zaichikov V.V., Samoilov I.B., Fizika goreniia i vzryva 10 (5) (1974) 705-709.
17. Cherepnin S.N., Fizika goreniia i vzryva 27 (1) (1991) 75-77.
18. Reznik V.E., Tokarev V.V., Shaikin A.P., Izvestiia VUZ'ov. Aviatsionnaia tekhnika 3 (1977) 93-97.
19. A.B.Vatazhin, A.F.Kazakov, V.A.Likhter, et al., TsIAM Works 628 (1974) 4 p.
20. A.B.Vatazhin, V.I.Grabovskii, V.A.Likhter, et al., Electro-gas-dynamic flows, Moscow, Nauka, 1983, 344 p.
21. Couch R.P., Detecting Abnormal Turbine Engine Deterioration Using Electrostatic Methods, Journal of Aircraft & 15 (10) (1978) 692-695.
22. Uzhov V.M., Clearing of industrial gases by electrofilters, Moscow, Goskhimizdat, 1962, 300 p.
23. A.N.Zolotko, S.V.Kozitskii, A.V.Florko, et al., Fizika aerodispersnykh system 26 (1984) 79-83.
24. Golovko V.V., Kozitskii S.V., Florko A.V., Fizika goreniia i vzryva 21 (4) (1985) 27-32.
25. Akishin A.I., Novikov L.S., Electrization of spacecraft, Moscow, Znanie, 1985, 64 p.
26. Potapov G.P., Ivshin V.P., Kazan', KAI Works 158 (1973) 67-73.
27. Potapov G.P., Izvestiia VUZ'ov. Aviatsionnaia tekhnika 4 (1978) 112-116.
28. Cherepnin S.N., Dashevskii V.N., Fizika goreniia i vzryva 26 (6) (1990) 74-78.
29. G.B.Murav'ev, R.Kh.Sabirov, G.P.Potapov, Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaia tekhnika 2 (1991) 103-106.
30. G.P.Potapov, G.B.Murav'ev, R.Kh.Sabirov, et al., Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaia tekhnika 4 (1990) 105-107.
31. Shatskii O.E., Shcherbakov A.A., Vlasov Iu.N., Processes of combustion and environmental protection, Rybinsk, RATI, 1993, pp. 43 - 47.
32. L. Galfetti, Dzh. Kolombo, A. Menalli, Dzh. Bentsoni, K. Galli, Fizika goreniia i vzryva 36 (1) (2000) 119-130.
33. Cooley J. W., Lewis P. A. W., Welch P. D., The fast Fourier transform algorithm: Programming considerations in the calculation of sine, cosine and Laplace transforms, J. Sound Vib. 12 (1970) 315-337.
34. Bedsel Ch., Lengdon A., Plasma physics and numerical simulation, Moscow, Energoatomizdat, 1989, 452 p.
35. Cooley J. W., Lewis P. A. W., Welch P. D., The fast Fourier transform algorithm: Programming considerations in the calculation of sine, cosine and Laplace transforms, J. Sound Vib. 12 (1970) 315-337.
36. Proakis J.G. and Manolakis D. G., Digital Signal Processing, 3rd Ed. Prentice Hall Intern, 1996, 556 p.
37. Potapov G.P., Dregalin A.F., Izvestiia VUZ'ov. Aviatsionnaia tekhnika 5 (1977) 90-92.
38. A.B.Vatazhin, A.F.Kazakov, V.A.Likhter, et al., TsIAM Works 628 (1974) 4 p.
39. Iagodnikov D.A., Voronetskii A.V., Pushkin N.M., Fizika goreniia i vzryva 31 (4) (1995) 54-58.
40. G.B.Siniarev, N.A.Vatolin, B.G.Trusov, G.K.Moiseev, The using of COMPUTERS for thermodynamic calculations, Moscow, Nauka, 1982, 282 p.
41. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G., Thermodynamic modeling of high-temperature inorganic systems, Moscow, Metallurgii, 1994, 352 p.