

УДК 621.317.2;621.454.2

МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗ АМПЛИТУДНОГО СПЕКТРА КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ МОДЕЛЬНОГО ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

© 2022 г. Д. А. Ягодников*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: daj@bmstu.ru

Поступила в редакцию 08.04.2021 г.

После доработки 19.07.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Представлены методика и результаты корреляционного и спектрального анализов электрофизических характеристик продуктов сгорания топлива на основе кислорода и керосина, зарегистрированных в процессе огневых испытаний модельного жидкостного ракетного двигателя с помощью бесконтактных первичных измерительных преобразователей электромагнитного поля. Разработана методика вторичной обработки массивов характеристик электромагнитных полей для проведения в диапазоне 0–28 кГц корреляционного и спектрального анализов режимного параметра – давления в камере сгорания и определяемого параметра – напряженности электромагнитного поля продуктов сгорания. Определены максимумы амплитудного спектра сигналов датчиков магнитного и электрического поля на частотах 114 и 49 Гц соответственно и близкая к линейной (с коэффициентом корреляции 0.863) зависимость амплитуды колебаний напряженности магнитного поля продуктов сгорания от давления в камере сгорания модельного жидкостного ракетного двигателя, которая может быть использована в качестве диагностического признака параметров рабочего процесса в камере жидкостного ракетного двигателя.

DOI: 10.31857/S0040364422010252

ВВЕДЕНИЕ

Процессы преобразования энергии в современных энергетических и двигательных установках, в частности в жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), характеризуются высокими, в некоторых случаях предельными значениями температур и выделяемой мощности. Например, термодинамическая температура в камере сгорания (КС) маршевого ЖРД РД-191 для разных модификаций ракеты-носителя Ангара составляет $T_k \sim 3800$ К. В таких условиях, а также при движении летательных аппаратов в атмосфере с высокой скоростью возможны ионизация высокоэнтальпийных потоков и продуктов сгорания, протекающая в основном за счет хемоионизации, и пространственное разделение положительных, отрицательных ионов и свободных электронов, концентрации которых в отдельных зонах потока могут превышать равновесные [1, 2]. При этом характеристики собственного электромагнитного поля ионизированного газового потока можно контролировать на основе измерения его электромагнитных параметров как с помощью зондов [3–5], так и бесконтактно, например, на внешних поверхностях летательных

аппаратов и газовых трактов (газоводах, газогенераторах, камерах сгорания и соплах) ЖРД [6–9].

Параметры генерируемого продуктами сгорания электромагнитного поля изменяются с высокой частотой, обусловленной скоростями реакций хемоионизации и рекомбинации зарядов. Поэтому электрофизические параметры рабочих процессов в ЖРД можно отнести к быстропротекающим, номенклатура которых по сравнению с медленно протекающими процессами (например, изменения тяги двигателя, давления, расходов компонентов, температуры и др.) значительно меньше и включает вибрации, число оборотов ротора турбонасосного агрегата, акусто-оптические характеристики [10]. Следовательно, основанные на регистрации характеристик электромагнитного поля продуктов сгорания методы диагностики рабочих процессов в ЖРД можно считать единственно пригодными для создания бесконтактных систем управления, контроля и аварийной защиты, мгновенно реагирующих на изменения параметров рабочего процесса и возмущающие воздействия.

Вместе с тем для создания надежных систем диагностики ЖРД необходимо обрабатывать и

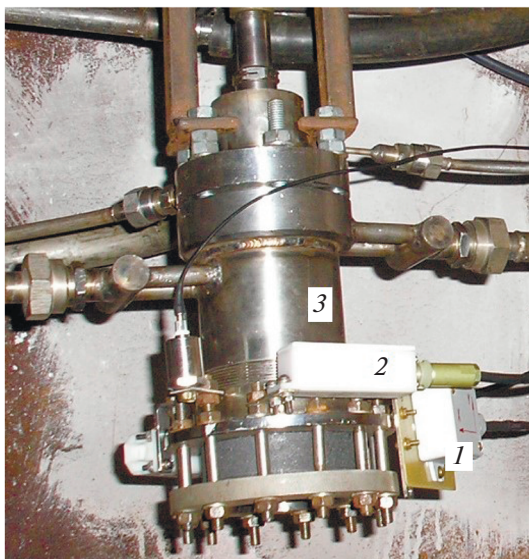


Рис. 1. Модельный ЖРД и расположение датчиков: 1 – датчик МП, 2 – датчик ЭП, 3 – камера модельного ЖРД.

использовать информацию, которая формируется первичными измерительными преобразователями, “опрашиваемыми” системой регистрации с высокой частотой (более 10–20 кГц). Очевидно, что большая дискретизация полезного сигнала обуславливает применение специальных методов ее передачи, хранения и обработки, например, с использованием математического аппарата теории вероятности и математической статистики, а также методов, традиционно используемых в теории случайных процессов [11, 12].

В связи с изложенным целью работы являются экспериментальные исследования и проведение корреляционного и спектрального анализов параметров магнитных и электрических полей продуктов сгорания углеводородного топлива, истекающих из сопла модельного ЖРД, для создания базы диагностических признаков систем измерения и регистрации, используемых при проведении испытаний.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МОДЕЛЬНОГО ЖРД

Экспериментальная установка, описание которой приведено в работе [7], включает в себя: камеру охлаждаемого водой модельного ЖРД; магистраль подачи окислителя (газообразного кислорода); магистраль подачи горючего (керосина, удельная молекулярная формула $C_{71.51}H_{139.895}$; полная энтальпия $I_f = -1958$ кДж/кг); магистраль подачи азота на продувку магистралей подачи кислорода, керосина и камеры сгорания после останова ЖРД; газовые магистрали управления пуско-отсечными клапанами. Топливная смесь в камере

сгорания воспламеняется электроискровым способом с помощью авиационной искровой свечи СД-55-АНМ мощностью ~ 80 Вт, которая после выхода модельного ЖРД на режим отключается.

На рис. 1 представлено изображение модельного ЖРД на испытательном стенде с установленными в районе критического сечения сопла датчиками магнитного (МП) и в районе камеры сгорания электрического поля (ЭП) разработки ГНПО “Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника” (г. Минск, Республика Беларусь), подробное описание которых приведено в работе [7].

Запуск модельного ЖРД осуществляется при последовательном выполнении следующих операций: включается свеча зажигания, подается вода на охлаждение камеры ЖРД, открывается пуско-отсечный клапан окислителя промежуточной ступени и в камеру сгорания подается кислород, после чего происходит открытие клапана горючего и начинается подача керосина в камеру модельного ЖРД. После воспламенения компонентов топлива открывается главный клапан окислителя, двигатель выходит на основной режим и система воспламенения отключается. При останове модельного ЖРД последовательно закрываются клапана горючего, окислителя и осуществляется продувка азотом топливных магистралей и КС.

Испытания модельного ЖРД проводятся в земных условиях (давление окружающей среды – 0.1 МПа) при давлении в камере сгорания 1–3 МПа и массовом соотношении компонентов $K_m = 0.3–6.0$ в зависимости от программы испытания.

Частота опроса датчиков давления в магистралях подачи компонентов и в камере сгорания составляет 1 кГц, частота опроса датчиков ЭП и МП – 57 кГц. Значения рассчитанных по методике [13] относительных предельных погрешностей основных режимных параметров составляют: для давления в КС – $\pm 1.4\%$; давления в магистрали подачи газообразных кислорода и азота – $\pm 1.4\%$; массового расхода керосина – $\pm 1.9\%$; соотношения компонентов – $\pm 2.4\%$. Значения свидетельствуют об удовлетворительной для теплофизического эксперимента точности и о надежности получаемых экспериментальных данных.

Описание датчиков электромагнитного поля. В процессе проведения огневых испытаний регистрируются амплитуда и частота колебаний напряженностей магнитного и электрического полей продуктов сгорания углеводородного топлива в районе критического сечения сопла модельного ЖРД.

Оцениваемой характеристикой, определяющей зависимость параметров собственного электромагнитного поля продуктов сгорания от давления в камере сгорания, являются амплитуда сигнала, частотный спектр и коэффициент корреляции, который характеризует меру линейности связи между

реализациями сигналов датчиков ЭП и МП с показаниями датчика давления в камере сгорания.

Расположения первичных измерительных преобразователей магнитного и электрического поля приведены на рис. 1. Их пространственная ориентация обусловлена направлением линий напряженности электрического и магнитного полей и обеспечивает максимальное значение регистрируемого ими полезного сигнала.

Конструкция и размеры обоих датчиков оптимизированы для их размещения и крепления на модельном ЖРД. Датчик магнитного поля 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 датчиков составляют $21 \times 21 \times 80 \text{ мм}^3$.

Сигналы с датчиков МП и ЭП передаются на усилитель, 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 АНАЛИЗА

На рис. 2 представлена типовая осциллограмма изменения избыточного давления p_k в камере сгора-

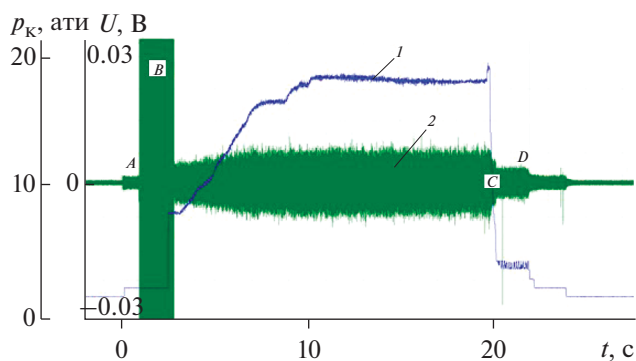


Рис. 2. Осциллограмма изменения давления в КС (1) и сигнала с датчика МП (2) при $K_m = 1.26$.

ния в процессе испытания № 1, характерной особенностью которого является постепенное увеличение давления при выходе на расчетный режим до $p_k = 18.5 \text{ ати}^1$ и последующее медленное его уменьшение на 0.5 ати (что составляет 2.7%) до 18 ати.

На оси ординат приведен сигнал, зарегистрированный при помощи датчика МП и отслеживающий характерные периоды работы модельного ЖРД (рис. 2): открытие пуско-отсечных клапанов А окислителя и горючего, включение и выключение системы воспламенения В, а также закрытие клапанов подачи компонентов топлива С в момент времени $t = 20 \text{ с}$, после чего амплитуда сигнала резко уменьшается D в соответствии со скачкообразным падением избыточного давления до ~4 ати, обусловленным продолжающейся в течение ~4 с продувкой КС модельного ЖРД азотом.

На рис. 2 отчетливо наблюдается взаимосвязь постепенного роста (снижения) давления в КС и увеличения (уменьшения) амплитуды колебаний напряженности магнитного поля, которая не изменяется в расчетном режиме работы ЖРД (10–20 с). Данный результат может быть объяснен следующим. Характеристики электромагнитного поля истекающей струи продуктов сгорания пропорциональны диаметру сопла, температуре T^* , скорости потока и концентрации ионов и электронов. Тогда при прочих равных условиях увеличение (уменьшение) давления в КС приводит к увеличению (уменьшению) объемной концентрации ионов и электронов r_i , что обуславливает увеличение (уменьшение) значений U. В табл. 1 приведены результаты расчетов значений r_i , полученные с использованием программного комплекса “Terга” [14] для условия равновесного состава ионизированных продуктов сгорания, массового соотношения компонентов $K_m = 1.26$ и различных давлений, соответствующих параметрам испытания № 1. Ионный состав продуктов сгорания представлен свободными электронами e^- , H^- , OH^- , а также положительными ионами H_3O^+ , CHO^+ , причем зависимость r_i от давления отличается от линейной.

Взаимная зависимость параметров электромагнитного поля продуктов сгорания и режимных па-

¹ Техническая атмосфера избыточного давления, 101325 Па.

Таблица 1. Ионный состав продуктов сгорания керосин-кислородной смеси при $K_m = 1.26$

$p_k, \text{ МПа}$	$T^*, \text{ К}$	$r_i, \text{ см}^{-3}$				
		e^-	OH^-	H^-	H_3O^+	CHO^+
0.5	1964	0.317×10^7	0.054×10^5	0.023×10^5	0.302×10^7	0.016×10^7
1.0	1965	0.539×10^7	0.131×10^5	0.055×10^5	0.513×10^7	0.028×10^7
2.0	1965	0.914×10^7	0.314×10^5	0.133×10^5	0.871×10^7	0.047×10^7

раметров работы модельного ЖРД оценивается с использованием коэффициента корреляции β независимо от регистрируемых дискретных случайных величин, в частности давления в камере сгорания и амплитуды колебаний напряженности магнитного поля U . Значение β может быть рассчитано по соотношению [11]

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N (p_{ki} - \bar{p}_k)(U_i - \bar{U})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (p_{ki} - \bar{p}_k)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}},$$

где \bar{p}_k , \bar{U} – соответствующие средние значения (математические ожидания) величин давления в камере сгорания и амплитуды сигнала напряженности магнитного поля продуктов сгорания; N – количество участвующих в обработке зарегистрированных значений.

Особенность корреляционного анализа заключалась в том, что поскольку частота опроса датчика давления составляла 1 кГц, а датчика магнитного поля 57 кГц, то по изложенной в [11] методике проводилась процедура осреднения показаний последнего в промежутках единичного опроса датчика давления, в результате число элементов массива показаний датчика МП соответствовало количеству элементов в массиве давления в КС.

Расчетами, выполненными за полное время испытания, начиная с запуска модельного ЖРД до останова (с 3 до 20 с), получено значение коэффициента корреляции $\beta_{p_k-U} = 0.863$. Данное значение свидетельствует о близкой к линейной зависимости напряженности магнитного поля от давления в камере сгорания особенно в период выхода двигателя на расчетный режим работы. Это подтверждают данные графика, приведенного на рис. 3 в координатах p_k-U для начального периода работы ЖРД и аппроксимируемые зависимостью

$$U = 0.276p_k + 2.889.$$

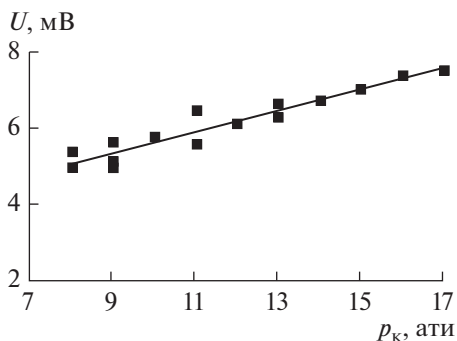


Рис. 3. Зависимость амплитуды сигнала датчика МП от давления в камере сгорания.

Полученное значение β_{p_k-U} удовлетворительно согласуется с данными экспериментальных исследований спектра колебаний электромагнитного поля, генерируемого продуктами сгорания топлива газообразный кислород + этиловый спирт, истекающими из сопла модельного ЖРД [15]. Давление в камере сгорания ЖРД варьировалось в диапазоне 0.83–1.12 МПа и расчетная температура составляла 3200–3260 К. Результаты анализа показали, что в диапазоне частот 2900–3100 Гц коэффициент корреляции средней частоты спектральной плотности напряженности магнитного поля и давления в камере сгорания составляет 0.8–0.9 в течение всего времени испытания.

Результаты расчета коэффициента корреляции в различных временных интервалах установившегося режима испытания представлены в табл. 2, из которой следует, что приведенные значения β_{p_k-U} невелики. Однако из этого нельзя сделать вывод о независимости давления от напряженности магнитного поля продуктов сгорания углеводородного топлива в интервале времени от 12 до 16 с, поскольку данное условие не является достаточным для утверждения о независимости двух случайно изменяющихся величин. Полученный результат может быть объяснен тем, что величины давления в камере сгорания модельного ЖРД и напряженности магнитного поля истекающей струи продуктов сгорания практически не изменяются за эти промежутки времени.

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции в установившемся режиме

Интервал времени, с	12–13	13–14	14–15	15–16
β_{p_k-U}	0.014	0.092	0.076	0.121

Из представленных данных можно также сделать вывод о прямо пропорциональной зависимости напряженности магнитного поля от давления в КС вследствие положительного знака коэффициента корреляции и о подтверждении дополнительного диагностического параметра рабочего процесса в жидкостных ракетных двигателях.

РЕЗУЛЬТАТЫ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Далее рассматриваются результаты спектрального анализа колебаний напряженности МП и ЭП в процессе испытания № 2. Особенности данного испытания заключались в быстром выходе на промежуточный (совмещенный с работой системы зажигания) и расчетный режим со скачкообразным изменением давления, а также в том, что на ~6.5 с после начала регистрации (~4.4 с после прохождения команды “Пуск”) произошло изменение давления в камере сгорания с 2.85 до 2.70 МПа за счет

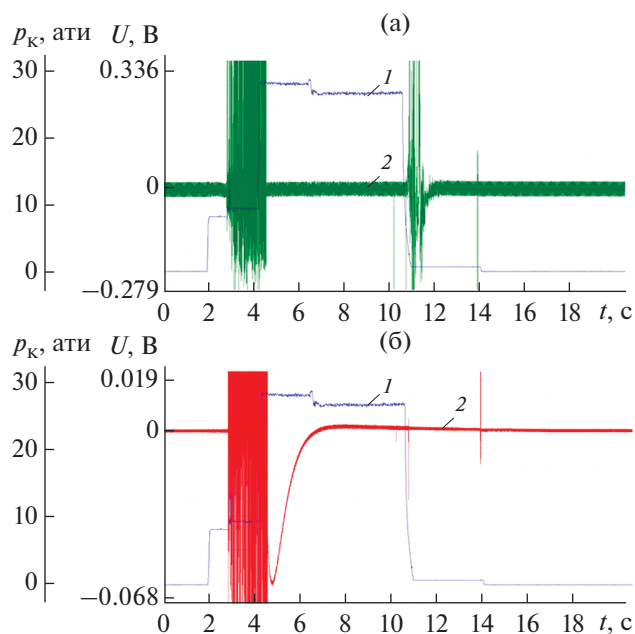


Рис. 4. Осциллограммы изменения давления в КС (1) и сигналов (2) с датчиков ЭП (а) и МП (б).

двукратного уменьшения расхода керосина (рис. 4) и, как следствие, увеличение соотношения компонентов с 2.40 до 4.39.

На рис. 4 также представлены осциллограммы изменения сигналов датчиков ЭП и МП, на которых наблюдаются пиковые значения амплитуд, характеризующие работу электроискровой системы воспламенения и моменты срабатывания пуско-отсечных клапанов, установленных на магистралях окислителя, горючего и продувки камеры азотом.

Спектральный анализ проводился для следующих характерных периодов времени: работа электроискровой системы воспламенения и работа модельного ЖРД в расчетном режиме. На рис. 5 приведены спектры сигналов датчиков МП и ЭП в момент работы электроискровой системы воспламенения. Спектр колебаний напряженности ЭП реализуется с большей интенсивностью и меньшей дисперсией по частоте, чем спектр колебаний напряженности МП, и его максимальное значение мощности ~ 0.54 В соответствует частоте ~ 118 Гц. Для спектра колебаний напряженности МП максимальная мощность спектра составила 0.029 В на частоте 0.88 Гц, а второй максимум (0.008 В) зарегистрирован на частоте ~ 120 Гц. Зарегистрированные локальные максимумы сигналов на частотах ~ 120 Гц могут быть обусловлены частотой срабатывания реле блока питания электроискровой системы воспламенения.

Поскольку в данном испытании не было разгара элементов конструкции, то построенные в раз-

личные моменты времени расчетного режима спектрограммы идентичны и частотный анализ рабочего процесса в расчетном режиме работы модельного ЖРД проводился в интервале времени 7.81–8.69 с, в течение которого давление в камере не изменялось и составляло ~ 2.7 МПа (рис. 4).

Спектры сигналов датчиков МП и ЭП приведены на графиках рис. 6, абсцисса которых ограничена наиболее информативным диапазоном 0–2000 Гц. Характерным является изменение общего вида спектров, а также значительное уменьшение (практически на два порядка) мощности сигнала по сравнению с периодом работы электроискровой системы зажигания. В частности, спектр колебаний напряженности ЭП стал узким, максимальная мощность спектра уменьшилась и составила 16.2 мВ на частоте 49 Гц, близкой к промышленной. Второй экстремум на частоте 15 Гц имеет значение ~ 1.8 мВ. Максимальная мощность спектра напряженности МП составила 0.09 мВ на частоте 144 Гц. Вторые–четвертые экстремумы мощности спектра напряженности МП имеют практически одинаковые значения $\sim (0.03–0.05)$ мВ при частотах 400, 1350, 1750 Гц.

Расчет и анализ значений частот собственных колебаний камеры модельного ЖРД с использо-

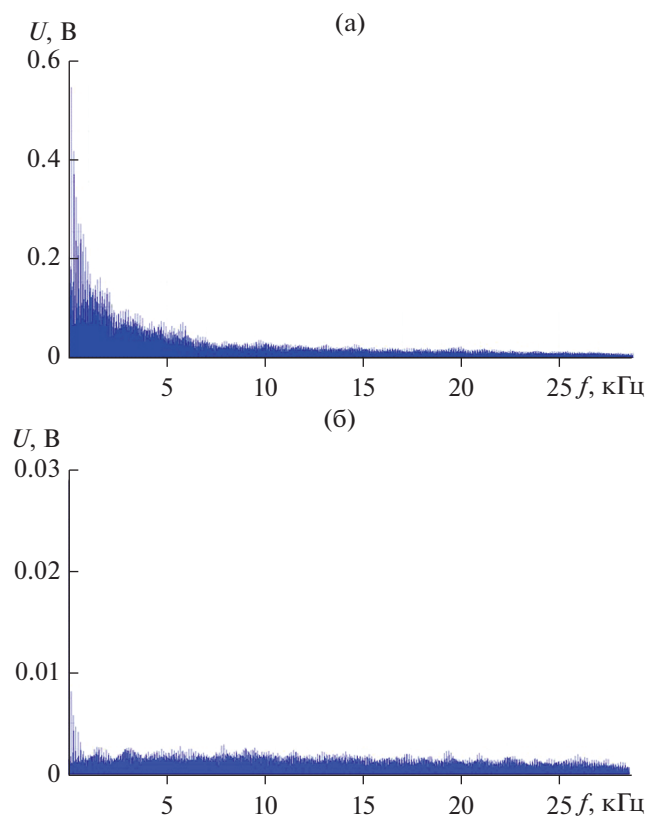


Рис. 5. Спектры сигналов датчиков ЭП (а) и МП (б) в момент работы электроискровой системы воспламенения.

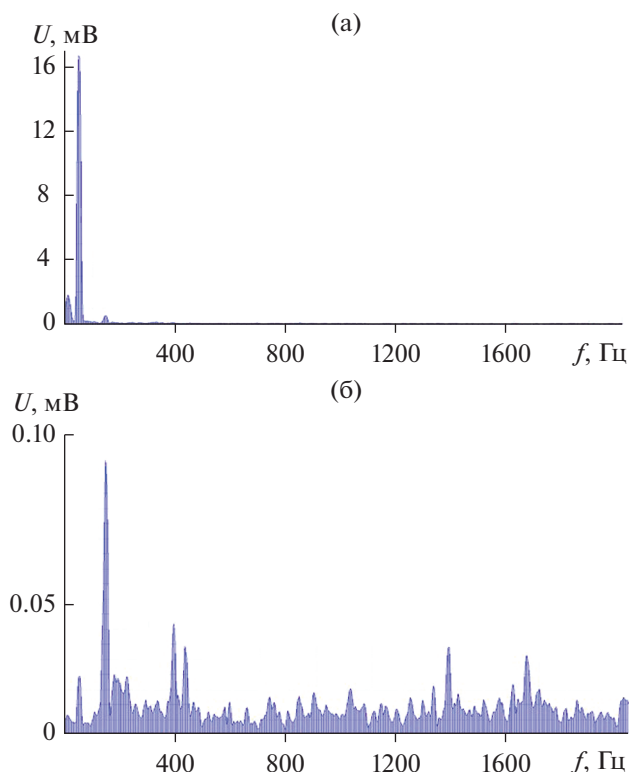


Рис. 6. Спектры сигналов датчиков ЭП (а) и МП (б) при работе модельного ЖРД в период времени 7.81–8.69 с для испытания № 2.

ванием методики [16] по диаметру (0.05 м), длине (0.1 м) камеры сгорания и скорости звука (1100 м/с) при режимных параметрах проведения испытания № 2 показывают, что наименьшие частоты акустических колебаний, соответствующие первым модам продольных (~5500 Гц) и тангенсальных колебаний (~6446 Гц), больше и не совпадают ни с одним из зарегистрированных максимумов частот колебаний напряженностей ЭП и МП, возникновение которых может быть обусловлено процессами горения и образования ионизированных атомов, молекул и свободных электронов в результате реакций гемоионизации.

Полезно сравнить амплитудные спектры с результатами частотного анализа колебаний напряженности электромагнитного поля продуктов сгорания модельного ЖРД, оснащенного датчиками ЭП и МП конструкции НПО “Измерительной техники” и использующего в качестве компонентов топлива газообразный кислород и 75%-ный водный раствор этилового спирта в массовом соотношении 0.67 [17]. При этом внутрикамерные параметры (давление в камере сгорания ~3.2 МПа, адиабатическая температура продуктов сгорания ~2700 К и диаметр критического сечения – 18 мм) близки параметрам модельного ЖРД в данной работе.

Спектральный анализ, выполненный в [17], позволил выявить локальные максимумы для спектров магнитного и электрического полей в областях ~120, ~1040, ~3000 Гц. Причем первая частота соответствует наибольшим значениям спектральной мощности сигнала датчиков ЭП и МП, что согласуется с полученными в данной работе результатами и подтверждает наличие переменного электромагнитного поля, генерируемого ионизированными продуктами сгорания углеводородного горючего в кислороде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установленная линейная зависимость напряженности МП от давления в КС модельного ЖРД и рассчитанное значение коэффициента корреляции в режиме монотонного увеличения давления в КС $\beta_{pk-U} = 0.863$ подтверждают существование зависимости колебаний напряженности магнитного поля от характеристик внутрикамерных процессов, обосновывающее ее использование в качестве диагностического признака рабочего процесса в ракетных двигателях и энергетических установках.

2. Зафиксированы максимумы амплитудного спектра сигналов датчиков МП и ЭП на частотах 114 и 49 Гц соответственно. Определено сильное влияние системы зажигания на величину и реализуемые максимальные частоты, а также установлено несовпадение значений последних для напряженностей МП и ЭП с собственными частотами акустических колебаний в КС как в условиях дополнительно электризирующего продукты сгорания электрического разряда, так и при работе в расчетном режиме модельного ЖРД.

В заключение автор считает необходимым выразить благодарность В.И. Лапицкому и С.А. Гришину за помощь и содействие в проведении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке госпрограммы № 0705-2020-0044 фундаментальных исследований Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ягодников Д.А., Воронцов А.В. Влияние внешнего электрического поля на особенности процессов воспламенения и горения // ФГВ. 1994. Т. 30. № 3. С. 3.
2. Котельников В.А., Котельников М.В., Филиппов Г.С. Электрофизические параметры потоков плазмы, истекающих из жидкостных ракетных двигателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. Т. 47. № 6. С. 13.
3. Егорова З.М., Кашеваров А.В., Фомина Е.М., Цхай Н.С. Об измерении концентрации заряженных частиц цилиндрическим зондом Ленгмюра в плазме пламени // ТВТ. 1988. Т. 26. № 3. С. 577.

4. *Пилюгин Н.Н.* Измерение электрических зарядов около тел при гиперзвуковом движении // ТВТ. 1994. Т. 32. № 1. С. 114.
5. *Котельников В.А., Котельников М.В., Филиппов Г.С.* Зондовые измерения на борту гиперзвукового летательного аппарата // ТВТ. 2020. Т. 58. № 2. С. 175.
6. *Ковалев В.И., Кузнецов С.В., Курина В.В., Пушкин Н.М., Ушков А.Н., Черных В.И.* Системы контроля и бесконтактной диагностики рабочих процессов при проведении огневых испытаний ЖРД // Труды НПО "Энергомаш". 2007. № 25. С. 373.
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.
8. *Бобров А.Н., Рудинский А.В., Пушкин Н.М. и др.* Экспериментальное исследование рабочего процесса в жидкостных ракетных двигателях с использованием электрофизического метода диагностики // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 8. С. 1289.
9. *Нагель Ю.А.* Электризация двигателей при истечении продуктов сгорания. Экспериментальные результаты // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 8. С. 55.
10. *Мазур М.М., Пустовойт В.И., Судденко Ю.А., Шорин В.Н.* Акустооптический монохроматор с управляемой шириной инструментальной функции // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7. № 2. С. 20. <https://doi.org/10.25210/jfor-1802-020037>
11. *Волков И.К., Зуев С.М., Цветкова Г.М.* Случайные процессы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 448 с.
12. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.
13. *Преображенский В.П.* Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978. 704 с.
14. *Трусов Б.Г.* Моделирование кинетики химических превращений: термодинамический подход // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2005. № 3. С. 26.
15. *Грибакин В.А., Поспищенко В.И., Болдырев К.Б. и др.* Анализ диагностической информативности интегральных параметров спектра электромагнитных колебаний в окрестности факела жидкостного ракетного двигателя в задаче идентификации режима функционирования камеры // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2011. № 632. С. 88.
16. *Васильев А.П., Кудрявцев В.М., Кузнецов В.А. и др.* Основы теории и расчета ЖРД. В 2-х т. / Под ред. В.М. Кудрявцева. Т. 2. М.: Высшая школа, 1993. 368 с.
17. *Рудинский А.В., Ягодников Д.А.* Диагностика ракетных и реактивных двигателей по характеристикам собственного электромагнитного поля продуктов сгорания // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 828.