

УДК 537.8:621.464.2

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЦ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В ПРОТОЧНОМ ТРАКТЕ ЖРД. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А. В. Рудинский^{1,2}, В. И. Лапицкий¹, Д. А. Ягодников¹

¹Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 105005 Москва
alex_rudinskiy@mail.ru

²Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова, 111116 Москва

Проведено экспериментальное исследование амплитудных (с частотой до 50 кГц) и интегральных характеристик собственного магнитного поля высокотемпературных продуктов сгорания углеводородного горючего, истекающих из сопла модельного жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) с имитацией разгара камеры сгорания при впрыске частиц алюминийево-магниевого сплава (к-фазы) в камеру сгорания. Определена зависимость амплитуды напряженности магнитного поля, генерируемой высокотемпературными (до 3500 К) продуктами сгорания, от режимов работы ЖРД и наличия в потоке частиц к-фазы. Зарегистрировано опережающее на ≈ 0.2 с увеличение амплитуды напряженности магнитного поля на 20 % при прогаре ЖРД относительно начала падения давления в камере сгорания. Проведены оценки суммарного объемного электрического заряда, генерируемого потоком продуктов сгорания с к-фазой.

Ключевые слова: углеводородное горючее, продукты сгорания, электромагнитное поле, заряд струи.

DOI 10.15372/FGV20190507

ВВЕДЕНИЕ

Применяемые в настоящее время при стендовой отработке и эксплуатации ракетных и реактивных двигателей системы технического диагностирования основаны, как правило, на отслеживании информации от традиционных средств контроля ряда ключевых параметров, характеризующих работу агрегатов и систем двигателя. Датчики и преобразующая аппаратура таких систем требуют внедрения чувствительных элементов во внутренние полости двигателя и не обладают достаточным быстродействием по ряду быстропротекающих аварий, что позволяет охватывать не более 60 % аварийных ситуаций [1, 2].

Применение методов электрофизической диагностики, основанных на исследовании амплитудно-частотных характеристик электромагнитного поля, позволяет увеличить коэффициент охвата аварийных ситуаций. При данном подходе собственное поле, генерируемое высокотемпературными продуктами сго-

рания, регистрируется магнитными датчиками [3–5] и электростатическими зондами-антеннами [6–8]. Использование таких первичных измерительных преобразователей не требует внесения дополнительных изменений в конструкцию двигателя. При этом появляется возможность обнаружения с их помощью конденсированной фазы (к-фазы) в продуктах сгорания, что приводит к росту коэффициента охвата аварийных ситуаций выше 0.9.

Решение задачи обнаружения твердых частиц электрофизическими методами может найти прикладное применение в ранней диагностике начала механического разрушения камеры двигателя. Периоду наступления интенсивного разгара предшествует появление множества твердых микрочастиц металла, из которого изготовлена огневая стенка газового тракта, в частности камеры двигателя. Вносимые таким образом в высокотемпературный газовый поток частицы к-фазы взаимодействуют с продуктами сгорания и, как следствие, приобретают электрический заряд [9, 10]. Заряженные частицы к-фазы вовлекаются в движение несущего потока и выносятся из газо-

вого тракта и далее из внутрикамерного пространства. Известные работы [9, 10] заложили фундаментальную основу в решение задачи электризации микрочастиц, образующихся при разрушении различных тел в газовом потоке. Однако результаты проведенных исследований были получены при низких температурах несущего газа (до ≈ 1000 К) и при подаче в поток уже заряженных твердых частиц, что накладывает ограничения на их применение в условиях горения углеводородного горючего. Стоит также отметить, что обнаружение таких заряженных частиц с помощью прямых измерений зондами Ленгмюра [11–14] в условиях жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) затруднено ввиду очевидных причин, связанных, например, с их разрушением. Тем не менее характеристики генерируемого электромагнитного поля потока с к-фазой изменяются по сравнению с гомогенным потоком и могут быть зарегистрированы.

В связи с этим цель данной работы состояла в экспериментальном исследовании временных реализаций амплитуды сигналов, полученных с первичных измерительных преобразователей магнитного поля (ПИМП) и индукционных датчиков (ИД) в процессе огневых испытаний модельного жидкостного ракетного двигателя как при отсутствии в продуктах сгорания частиц металла (к-фазы), так и при их наличии с массовой долей до 0.015 %, что применительно к реальным режимам работы ЖРД в условиях высокотемпературного потока продуктов сгорания углеводородного горючего с температурой до 3600 К выполнено впервые.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для имитации начала разрушения элементов проточного тракта ракетного двигателя была создана экспериментальная установка (рис. 1) на базе модельной камеры сгорания ЖРД, оборудованная системой впрыска порошкообразного металла в проточную часть камеры сгорания и за срезом сопла. Геометрическая степень расширения сопла составила $f_a = 4.35$.

Впрыск порошкообразного металла осуществлялся на цилиндрическом участке камеры сгорания, несущий газ — азот высокого давления ($7 \div 11$ МПа). Порошок, имитирующий появляющиеся в газовом тракте частицы, засыпался в полость за штуцером, отделяемую от камеры сгорания прорывной мембраной. При

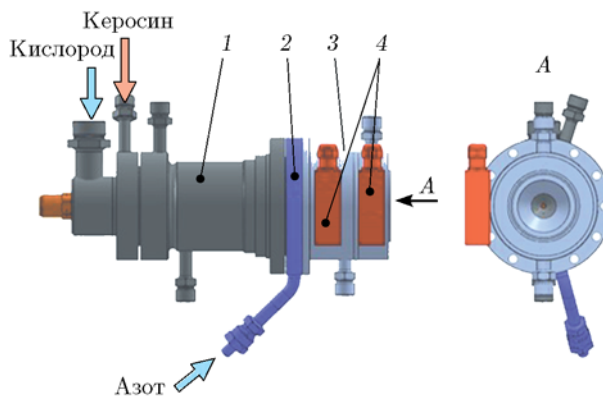


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию электрофизических свойств ионизированных потоков с к-фазой на базе модельного ЖРД и магнетометров газового потока:

1 — камера сгорания, 2 — система впрыска порошка, 3 — сопло, 4 — ПИМП и ИД

поступлении команды мембрана под действием давления азота прорывалась и порошок попадал в полость камеры двигателя.

Так как одной из задач работы является моделирование и диагностирование раннего разрушения камеры сгорания, массовая доля частиц к-фазы (порции порошка) по отношению к расходу топлива не превышала 0.015 %.

В качестве компонентов топлива для ЖРД использовались газообразный кислород и керосин ТС-1. В качестве порошкообразного металла применялась навеска алюминиево-магниевого сплава АМг6 массой 0.05 г с диаметром частиц $160 \div 200$ мкм. Выбор сплава обусловлен тем, что из сплавов на основе алюминия изготавливаются отдельные элементы конструкции ЖРД и ракеты-носителя, например корпус турбонасосного агрегата, топливные баки и др. Присутствие в компонентах топлива твердых частиц такого сплава может инициировать разгар конструкции при их нагреве и воспламенении в камере сгорания и сопле [15].

В экспериментальных исследованиях использовались датчики двух производителей: ПИМП производства «НПО измерительной техники», г. Королев [3], и ИД разработки ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», г. Минск [5]. В основе конструкции обоих типов датчиков лежит магнитный элемент, чувствительный к изменению внешнего магнитного поля. ИД выполнен в виде многослойной цилиндрической катушки без магнит-

ного сердечника. Размеры датчиков оптимизированы для их установки и применения в условиях стендовых огневых испытаний модельного ЖРД.

ПИПМП и ИД (см. рис. 1) закреплялись на внешней стенке охлаждаемого соплового блока ЖРД. Их пространственное положение по отношению к потоку продуктов сгорания выбиралось на основе электрофизической картины истечения продуктов из сопла. Как было показано в работе [16], линии напряженности собственного магнитного поля расположены в радиальной плоскости и представляют собой окружности, соосные потоку продуктов, а максимальная напряженность магнитного поля соответствует области критического сечения сопла. Характеристики первичных датчиков магнитного поля приведены в табл. 1, 2.

Характеристики ИД (табл. 1) использова-

лись для пересчета регистрируемого напряжения, генерируемого катушкой датчика за время t , в напряженность магнитного поля по известной зависимости [17]

$$H_{ИД} = -\frac{1}{\mu_0 S_k} \int_0^{\tau} U(t) dt, \quad (1)$$

где $U(t)$ — напряжение, генерируемое ИД, μ_0 — магнитная постоянная, S_k — площадь катушки.

Для того чтобы определить напряженность магнитного поля при регистрации ПИПМП с помощью зависимости (1), параметров, приведенных изготовителем (табл. 2), недостаточно. Поэтому зависимость напряженности магнитного поля от напряжения, генерируемого ПИПМП, была получена по результатам предварительной градуировки, при проведении которой датчик помещался в соленоид, как показано на рис. 2.

В процессе градуировки регистрировалась амплитуда выходного напряжения U_0 датчика в зависимости от амплитуды напряженности магнитного поля соленоида H_0 , которая являлась известной функцией амплитуды силы тока в цепи соленоида (рис. 3). Основная погрешность измерения составила 3 %. Погрешность измерения магнитных величин с учетом дополнительных воздействий (нагрев, вибрации, акустика и др.) не превышала 5 %.

Циклограмма огневых испытаний с регистрацией параметров собственного магнитного поля приведена на рис. 4. Характерной ее особенностью является обеспечение регистрации параметров собственного магнитного поля продуктов сгорания в режимах работы ЖРД

Таблица 1

Технические характеристики ИД

Характеристики	Значение
Количество витков	480
Индуктивность, мГн	1.13
Соппротивление обмотки, Ом	8.5
Средний диаметр обмотки, мм	8
Ширина намотки, мм	10.5
Диаметр провода, мм	0.22
Габаритные размеры, мм	21 × 21 × 80

Таблица 2

Технические характеристики ПИПМП в составе системы измерения поверхностного магнитного поля «Зонд-РД»

Характеристики	Значение
Диапазон измерения магнитного поля, мкТл	7.5 ÷ 75
Частотный диапазон измерения переменного магнитного поля, кГц	1 ÷ 20
Ток потребления, А	0.05
Уровень выходного напряжения переменного сигнала, В	4.0 ± 0.5
Габаритные размеры, мм	18 × 30 × 20

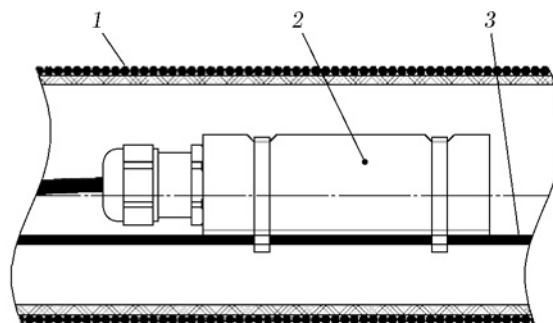


Рис. 2. Схема градуировки ПИПМП:

1 — соленоид, 2 — ПИПМП, 3 — немагнитная платформа

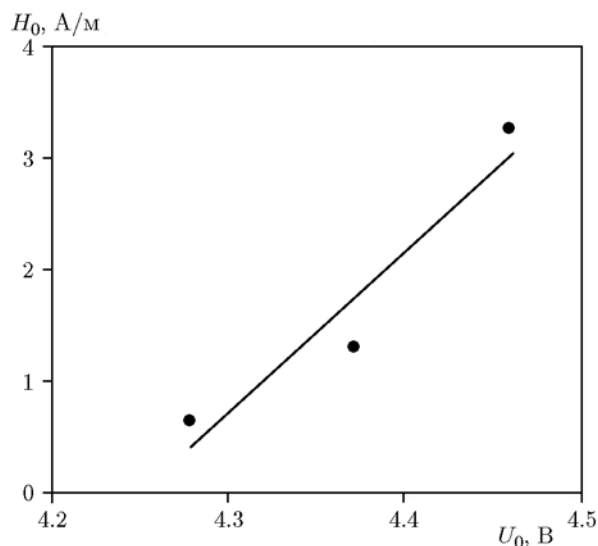


Рис. 3. Зависимость сигнала ПИПМП от напряженности магнитного поля соленоида при градуировке

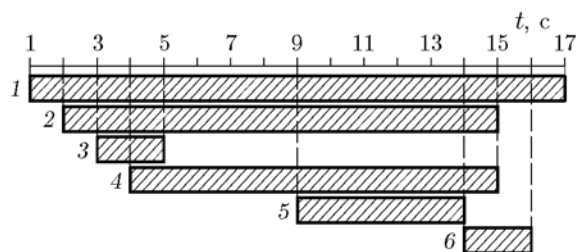


Рис. 4. Циклограмма испытаний ЖРД с системой регистрации магнитных полей:

1 — регистрация режимных и электромагнитных параметров, 2 — открытие клапана подачи кислорода в камеру сгорания, 3 — подача напряжения на агрегат зажигания, 4 — открытие клапана подачи керосина в камеру, 5 — подача азота в систему ввода порошкообразного металла, 6 — подача азотом магистралей кислорода и керосина

без ввода порошкообразного металла и при его подаче в камеру сгорания или на срез сопла.

Система измерения стендовой установки реализована на базе измерительно-вычислительного комплекса МИС-300 разработки АО НПП «Мера». Причем медленно меняющиеся параметры с первичных измерительных преобразователей давления регистрировались с частотой опроса 100 Гц и предельной погрешностью $\pm 0.3\%$, а быстро меняющиеся характеристики магнитного поля — с частотой опроса 50 кГц. Погрешность косвенного измерения коэффициента избытка окислителя составляла $\pm 2.2\%$.

АНАЛИЗ АМПЛИТУДНЫХ СИГНАЛОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Эксперименты проводили в два этапа: определение амплитудных характеристик продуктов сгорания без содержания к-фазы и в присутствии твердых частиц. На первом этапе испытаний выход на режим камеры сгорания по давлению 3.03 МПа при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 1.76$ был осуществлен за 7 с от начала регистрации параметров (рис. 5,а). В интервале времени $7 \div 10.5$ с наблюдалось монотонное снижение давления в камере сгорания с 3.032 до ≈ 2.9 МПа, что обусловлено уменьшением расхода газообразного кислорода с 0.545 до 0.518 кг/с. После начала горения топлива амплитуда сигнала индукционного датчика повысилась примерно в четыре раза. При работе электроискровой системы зажигания за интервал времени $4 \div 5$ с амплитуда сигнала увеличивалась более чем в десять раз.

На втором этапе испытаний в камеру сгорания модельного ЖРД подавался порошкообразный металл в интервале времени $\approx 8.8 \div 9.4$ с (рис. 5,б). Узел его подачи был установлен в соответствии с рис. 1 (поз. 2). Модельный ЖРД вышел на режим по давлению в камере сгорания ≈ 2.03 МПа при $\alpha = 1.76$ за 7 с от начала регистрации параметров. На 9-й секунде давление повысилось до ≈ 2.65 МПа ($\alpha = 1.43$) за счет подачи в камеру сгорания дополнительного кислорода. Спустя ≈ 0.2 с подавалась команда на открытие порошкового клапана и в камеру сгорания поступал порошкообразный металл.

Как видно из рис. 5,б, амплитуда сигнала с ИД также существенно возрастает при работе электроискровой системы зажигания в интервале времени $3.5 \div 5$ с. При подаче металла в камеру сгорания амплитуда сигнала ИД повысилась в ≈ 1.5 раза (рис. 5,б), что может быть объяснено следующим механизмом. Частицы конденсированной фазы с несущим газом азотом поступают в камеру сгорания и, взаимодействуя с высокотемпературными продуктами сгорания кислорода и керосина, нагреваются до температуры, достаточной для термоэлектронной эмиссии, и приобретают электрический заряд. Перемещаясь по тракту сопла в потоке продуктов сгорания, электризованные частицы к-фазы ускоряются и вносят изменение в электромагнитное поле.

Подача порошкообразного металла в ин-

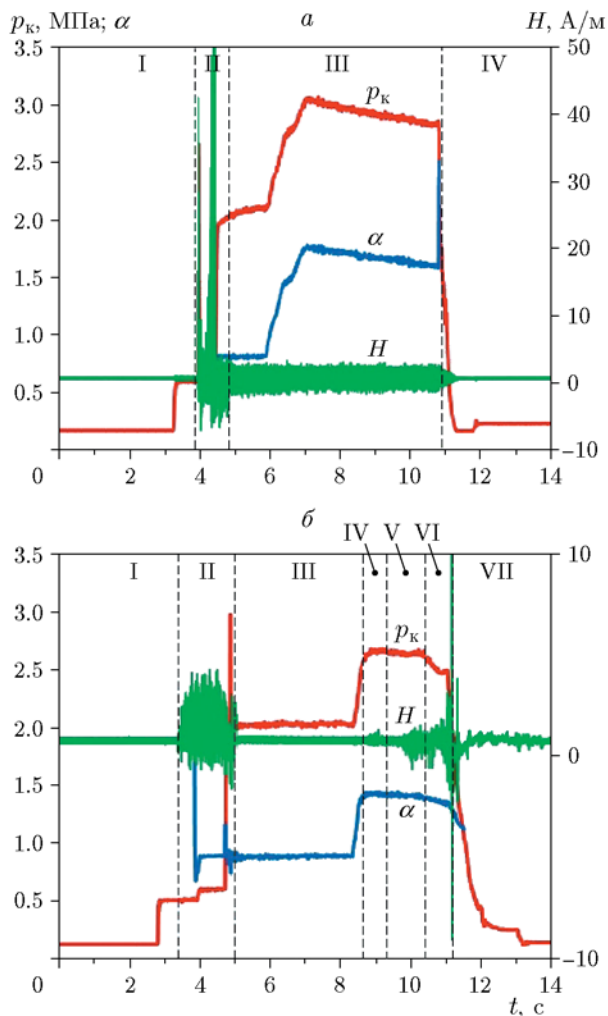


Рис. 5. Осциллограмма режимных параметров ЖРД при использовании ИД:

а — испытание без подачи к-фазы: I — подача топлива в камеру сгорания, II — работа агрегата зажигания, III — работа ЖРД, IV — останов ЖРД; б — испытание с подачей к-фазы: I — подача порошкообразного металла в камеру сгорания (к-фазы), II — работа агрегата зажигания, III — работа ЖРД в режиме $p_{k1} = 2$ МПа и переходном режиме, IV — подача порошкообразного металла, V — работа ЖРД в режиме $p_{k2} = 2.6$ МПа, VI — прогар элемента уплотнения камеры сгорания, VII — останов ЖРД

тервале времени $10 \div 11$ с (см. рис. 5, б) инициировала прогар уплотнительного элемента в месте стыка камеры сгорания и узла подачи порошка, что сопровождалось падением давления с 2.65 до ≈ 2.5 МПа примерно на 11-й секунде испытания (область VI). В момент начала прогара уплотнения и стенок вставки за ≈ 0.2 с до того, как начинало падать давление, амплитуда сигнала ИД повышалась в $\approx 1.5 \div 2$ раза.

При падении давления в камере сгорания до 2.5 МПа (область V) амплитуда увеличивалась примерно в два раза: $\Delta H \approx 2$ А/м. В момент интенсивного прогара элементов камеры (область VI) амплитуда сигнала ИД продолжала повышаться до $\Delta H \approx 4$ А/м.

Анализ реализации сигналов с ИД и ПИПМП показал зависимость амплитудных характеристик как от изменения режимных параметров (давления в камере сгорания и коэффициента избытка кислорода), так и от наличия в продуктах сгорания частиц к-фазы. Данный факт объясняется зависимостью концентраций заряженных частиц в продуктах сгорания от температуры, плотности продуктов сгорания, а также от нестационарных термодинамических процессов (первичной генерации ионов, реакций диссоциации, рекомбинации и т. д.), протекающих в камере модельного ЖРД. Таким образом, колебания характеристик электромагнитного поля являются отображением быстропротекающих газодинамических процессов в камере сгорания.

Далее проведем оценку напряженности электромагнитного поля, зарегистрированной ИД и ПИПМП в процессе огневых испытаний модельного двигателя.

Экспериментальные значения относительной амплитуды напряженности собственного магнитного поля струи продуктов сгорания $\Delta H / \langle H \rangle$, приведенные на рис. 6 в зависимости от коэффициента избытка окислителя, рассчитывались следующим образом:

$$\frac{\Delta H}{\langle H \rangle} = \frac{H_{\max} - \langle H \rangle}{\langle H \rangle}, \quad (2)$$

где ΔH — амплитуда напряженности собственного магнитного поля, $\langle H \rangle$ — уровень напряженности собственного поля, $H_{\max}$ — максимальное отклонение от среднего значения напряженности.

Средние значения (уровень) $\langle H \rangle$ в интервалы времени Δt , соответствующие конкретным областям осциллограмм испытания (см. рис. 5), вычислялись согласно выражению

$$\langle H \rangle = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_1}^{t_2} H(t) dt.$$

Как видно из рис. 6, относительная амплитуда напряженности магнитного поля струи продуктов сгорания, содержащих к-фазу, почти

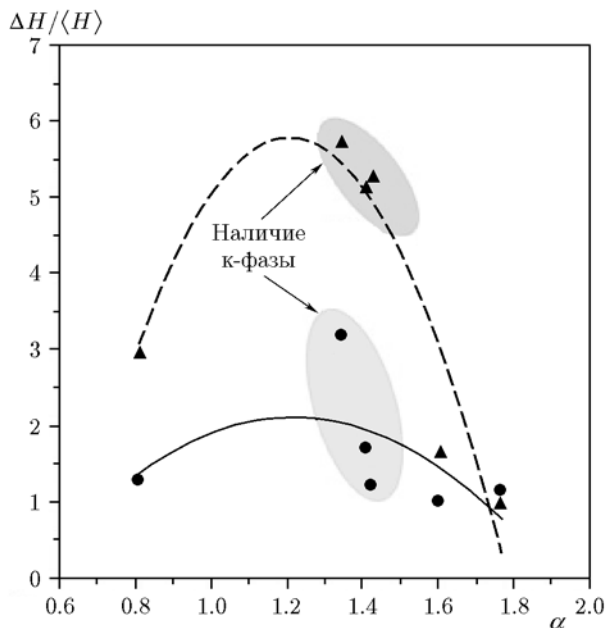


Рис. 6. Изменение относительной напряженности собственного магнитного поля продуктов сгорания при наличии к-фазы:

▲ — измерения с помощью ПИПМП, ● — измерения с помощью ИД

в два раза больше амплитуды, соответствующей «чистому» газу. При этом расчетная равновесная температура продуктов сгорания газовой фазы (без частиц порошкообразного металла) составляет $T^* = 3600$ К ($\alpha = 0.8$) и превышает соответствующее значение в случае ввода частиц металла — $T^* = 3460$ К ($\alpha = 1.4$). Следовательно, наличие электризованных частиц к-фазы приводит к большему изменению напряженности магнитного поля.

Стоит также отметить, что абсолютные значения амплитуд сигналов ПИПМП и ИД отличаются, что можно объяснить разными коэффициентами усиления преобразующей аппаратуры и различными конструктивными параметрами самих датчиков (количество витков, ширина намотки, наличие сердечника и др.), однако для ИД и ПИПМП превышения относительного значения амплитуды вследствие наличия частиц к-фазы примерно одинаковы — $1.5 \div 2$ раза.

Особый интерес представляет задача экспериментально-теоретического определения суммарного электрического заряда, создаваемого частицами к-фазы. По известному значению относительной напряженности магнитного поля, определенному эксперимен-

тально (см. рис. 6), можно оценить электрический заряд в некотором эффективном объеме V струи продуктов сгорания. Из системы дифференциальных уравнений Максвелла, описанных в математической модели [18], следуют оценки напряженности магнитного поля, создаваемого объемным зарядом:

$$H = H_i \approx Q_V v_s D_a, \quad (3)$$

где D_a — диаметр выходного сечения сопла, H_i — индуцированное магнитное поле, Q_V — суммарная плотность заряда в объеме струи V , обусловленная наличием положительно заряженных ионов и частиц к-фазы, v_s — скорость электрически заряженных частиц.

Оценим вклад твердых частиц в суммарный электрический заряд. Согласно выражению (3), уровень напряженности собственного магнитного поля струи продуктов сгорания можно оценить по зависимости

$$\langle H \rangle = Q_V v_a D_a,$$

где v_a — скорость струи продуктов сгорания, содержащих объемный заряд Q_V .

Из экспериментальных данных, приведенных на рис. 6, известны значения, полученные по зависимости (2), в которой максимальное отклонение от среднего значения $H_{\max}$ определяется за промежуток времени испытания, соответствующий конкретному соотношению компонентов α .

Таким образом, с учетом экспериментальной зависимости $\Delta H / \langle H \rangle = f(\alpha)$ при скорости струи продуктов сгорания $v_a \approx 2600$ м/с и диаметре среза сопла $D_a = 41.7$ мм был оценен суммарный объемный заряд, генерируемый струей продуктов сгорания ЖРД (рис. 7). Как видно из приведенных данных, появление даже незначительной концентрации частиц к-фазы в струе приводит к увеличению суммарного заряда от $\approx 0.6 \cdot 10^{-3}$ до $\approx 0.7 \cdot 10^{-3}$ Кл/м³, а в начале разгара стенки камеры ЖРД до $\approx 0.75 \cdot 10^{-3}$ Кл/м³.

Проведем количественное сравнение полученного объемного заряда в струе продуктов сгорания ЖРД (см. рис. 7) с результатами экспериментов [19] по исследованию двигательной электризации ЖРД. В испытаниях измерялся электрический ток $I_a = v_a D_a Q_V t$ между кольцевым электродом, омываемым газовой струей, и заземленным двигателем [19] при режимных параметрах в камере сгорания $p^* =$

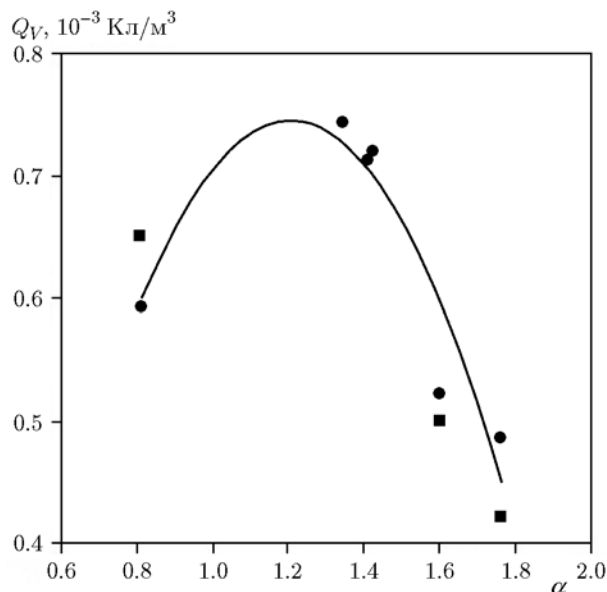


Рис. 7. Зависимость $Q_V(\alpha)$ в струе продуктов сгорания углеводородного топлива ЖРД:

● — расчетно-экспериментальные значения, ■ — расчетные значения для «чистого» газа, линия — параболическая аппроксимация

0.6 МПа, $T^* = 3150$ К и геометрических параметрах сопла $f_a = 32.65$, $D_a = 40$ мм за

время t . Электрический заряд $q(t) = \int_0^t I_a dt$,

генерируемый струей, составил $\approx 0.6 \cdot 10^{-6}$ Кл при времени испытания ≈ 2 с. Интегрируя данное выражение, можно получить величину q с учетом характерного времени, определяющего генерацию электризованных частиц при горении углеводородного топлива. Для ЖРД таким временем является среднее время пребывания в камере сгорания τ . Поэтому с учетом того, что для кислородокеросинового топлива $\tau \approx 10^{-3}$ с, абсолютное значение электрического заряда составит $q \approx v_a D_a Q_V \tau \approx 1.5 \cdot 10^{-6}$ Кл, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными $q \approx 0.6 \cdot 10^{-6}$ Кл из работы [19].

В заключение отметим, что изучение электрофизических свойств газовых потоков в системах стендовой диагностики нуждается в проведении дополнительных исследований. В частности, известен факт электризации элементов конструкции ракетных и реактивных двигателей, однако отсутствуют фундаментальные исследования механизма образования объемного заряда вблизи стенки сопла ракет-

ного двигателя. Подробные экспериментально-теоретические исследования в этой области могут дать дополнительную информацию о качестве рабочего процесса в энергосиловых установках летательных аппаратов, например о полноте сгорания.

Внедрение системы электрофизической диагностики в условиях реального полета изделия повлечет за собой проблему вероятного экранирования электромагнитных полей, содержащих полезный сигнал. Решение может быть найдено при детальном анализе частотных спектров магнитных полей высокотемпературных газовых потоков.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований с имитацией разгара проточной части модельного ЖРД при вводе частиц сплава АМг6 (≈ 50 мг) зарегистрирован полезный сигнал индукционного датчика в виде двукратного увеличения амплитуды сигнала ΔH с 0.1 до 0.2 А/м с опережением на ≈ 0.2 с начала падения давления в камере сгорания вследствие прогара огневой стенки и с последующим увеличением до 2 А/м.

Установлена зависимость относительной амплитуды напряженности магнитного поля от содержания в продуктах сгорания частиц сплава АМг6, характеризуемая увеличением на 160 % по сравнению с «чистым» газом относительной амплитуды напряженности магнитного поля.

Экспериментально подтверждена возможность использования электрофизических характеристик продуктов сгорания углеводородного топлива в ЖРД для разработки бесконтактных средств диагностики и аварийной защиты.

Авторы выражают благодарность С. А. Гришину и Н. М. Пушкину за творческое сотрудничество и предоставленный комплекс измерительной аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галеев А. Г., Денисов К. П., Ищенко В. И., Лисейкин В. А., Сайдов Г. Г., Черкашин А. Ю. Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей. — М.: Машиностроение, 2012.
2. Методология экспериментальной отработки ЖРД и ДУ, основы проведения испытаний

- и устройства испытательных стендов: [Электронный ресурс] / А. Г. Галеев, В. Н. Иванов, А. В. Катенин, В. А. Лисейкин, В. П. Пикалов, А. Д. Поляхов, Г. Г. Сайдов, А. А. Шибанов. — Электрон. текст. дан. (1 файл 9,7 Мб). — Киров: МЦНИП, 2015.
3. **Пушкин Н. М., Бацев С. В., Иванов Т. В.** Магнитное поле ионизированного газового потока как диагностический параметр при испытаниях и эксплуатации ЖРД // Информ.-технолог. вестн. — 2015. — Т. 5, № 3. — С. 124–132.
 4. **Пушкин Н. М., Ковалев В. А., Пушков С. А. и др.** Системы контроля и бесконтактной диагностики рабочих процессов при проведении огневых испытаний ЖРД // Тр. НПО Энергомаш им. акад. В. П. Глушко. — 2012. — Вып. 29. — С. 328–341.
 5. **Гришин С. А., Пашкевич Г. А., Селянтьев В. А., Недвецкий Н. С., Бунчук А. А., Желудевич К. Ю., Климентовский В. В., Ягодников Д. А.** Автоматизированный комплекс «Мониторинг-М» для изучения процессов разгара теплонапряженных элементов конструкции ракетных двигателей // V Конгресс физиков Беларуси (27–30 октября 2015 г.): сб. науч. тр. — Минск: Ковчег, 2015. — С. 241–242.
 6. **Ватажин А. Б., Голенцов Д. А., Лихтер В. А.** Экспериментальное исследование активной компенсации электрического заряда тел, обтекаемых потоком с ионами и заряженными каплями // Изв. РАН. МЖГ. — 2010. — № 4. — С. 26–34.
 7. **Ватажин А. В. и др.** Электростатическая диагностика состояния элементов двигательных аппаратов и энергетических устройств // Мир измерений. — 2012. — № 5. — С. 52–58.
 8. **Couch R. P.** Detecting abnormal turbine engine deterioration using electrostatic methods // J. Aircraft. — 1978. — V. 15, N 10. — P. 692.
 9. **Жуховицкий Д. И., Храпак А. Г., Якубов И. Т.** Ионизационное равновесие в сильно неидеальной плазме с конденсированной дисперсной фазой // Теплофизика высоких температур. — 1984. — Т. 22, вып. 5. — С. 833–840.
 10. **Голенцов Д. А., Ватажин А. Б., Улыбышев В. А., Лихтер В. А., Гулин А. Г.** Некоторые аспекты электризации тел при их разрушении: теоретические и экспериментальные исследования // XI Всерос. съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20–24 августа 2015 г. — С. 969–972.
 11. **Bradley D., Matthews K. J.** Double electrostatic probe continuum theory and electron temperature measurement // Phys. Fluids. — 1967. — V. 10, N 6. — P. 1336.
 12. **Кунаков С. К., Сон Э. Е.** Зондовая диагностика ядерно-возбуждаемой плазмы гексафторида урана // Теплофизика высоких температур. — 2010. — Т. 48, № 6. — С. 828–844.
 13. **Ватажин А. Б., Голенцов Д. А., Лихтер В. А., Холщевникова Е. К.** Теоретическое и экспериментальное исследование частотных характеристик отрицательного коронного разряда в горячей турбулентной струе воздуха // Изв. РАН. МЖГ. — 2011. — № 5. — С. 65–75.
 14. **Calcote H. F.** The influence of pressure on electrophysical characteristics of methane-air mixture combustion // 8th Int. Symp. on Combustion. — Baltimore: Williams and Wilkins, 1962. — P. 184.
 15. **Аджян А. П., Курков А. В., Ромасенко Е. Н., Самсонов М. А., Солнцев В. Л., Тюрин Ю. А.** Совершенствование низкочастотной фильтрации компонентов топлива ЖРД // Тр. НПО Энергомаш им. акад. В. П. Глушко. — 2014. — Вып. 31. — С. 221–233.
 16. **Ягодников Д. А., Рудинский А. В.** Моделирование неравномерного течения и параметров электромагнитного поля в камере жидкостного ракетного двигателя при наличии пристеночного слоя // Наука и образование: электрон. науч. изд. — МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2015. — № 4. — С. 141–154. — <http://www.technomag.edu.ru/issue/763210.html>. (0.875 пл./ 0.44 пл.).
 17. **Рудинский А. В., Александров В. Ю., Ягодников Д. А.** Экспериментальное исследование электрофизических характеристик газовых потоков при стендовых испытаниях элементов проточного тракта ПВРД // Изв. вузов. Машиностроение. — 2017. — № 4 [685]. — С. 21–26.
 18. **Ватажин А. Б., Голенцов Д. А., Лихтер В. А., Шульгин В. И.** Бесконтактная электростатическая диагностика авиационных двигателей. Теоретическое и лабораторное моделирование // Изв. РАН. МЖГ. — 1997. — № 2. — С. 83–95.
 19. **Нагель Ю. А.** Электризация двигателей при истечении продуктов сгорания. Экспериментальные результаты // Журн. техн. физики. — 1999. — Т. 69, № 8. — С. 55–59.

Поступила в редакцию 19.04.2018.

После доработки 20.06.2018.

Принята к публикации 11.07.2018.