

Рудинский Александр Викторович

**Экспериментально-теоретическое исследование и разработка
электрофизического метода диагностики ракетных двигателей**

**Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук**

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and strokes, likely representing the author's name.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана».

Научный руководитель: д.т.н., профессор Ягодников Д. А.

Официальные оппоненты: д.т.н. Семенов В. И.;
(НПО «Энергомаш им. академика
В. П. Глушко)

д.т.н. Головин Ю. М.
(ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр им.
М. В. Келдыша»)

Ведущая организация: ОАО Ракетно-космическая корпорация
«Энергия» им. С. П. Королёва
(РКК «Энергия»)

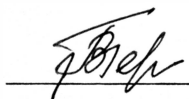
Защита состоится «14» октября 2015 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д. 1, факультет «Энергомашиностроение».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного Совета Д 212.141.08

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета д.т.н., доцент



В. В. Перевезенцев

Актуальность темы. В настоящее время средства аварийной защиты (САЗ) жидкостной ракетной двигательной установки (ЖРДУ) для любого летательного аппарата (ЛА) являются её неотъемлемой частью конструкции и обеспечивают её функционирование с заданной вероятностью безотказной работы 0,9995...0,9998.

В связи с вышесказанным появляется необходимость в создании таких активных САЗ, которые бы позволили осуществлять диагностику рабочего процесса в ЖРДУ в реальном времени с целью эффективного и своевременного обнаружения развития аномальных явлений. Существующие системы диагностики, например, в ЖРДУ основываются на получении информации о работоспособности узлов двигателя, в частности турбонасосного агрегата, регистрируя частоту вращения и перемещения ротора, температуру генераторного газа и др. Описанные системы косвенно отражают рабочие процессы в двигателе и не могут дать первичную информацию о последних с необходимым быстродействием. Высокие значения температуры газового потока (3100...3900 К) в камерах сгорания ЖРД и сложность конструкции также накладывают определенные трудности при реализации стандартных методов и систем диагностики рабочих процессов, в частности зондовых.

Среди современных методов диагностики внутрикамерных физико-химических процессов, протекающих в газовых трактах энергосиловых установок, представляются наиболее перспективными бесконтактные методы, основанные, например, на регистрации электрофизических характеристик продуктов сгорания (ПС) топлив, которые содержат положительно и отрицательно заряженные ионы, электронный газ. Часть электрического заряда выносится из камеры двигателя основным потоком ПС. Реализуемое при этом течение можно назвать электрогазодинамическим, т.к. характеризуется малым значением плотности электрического тока (10 мА) и большим электрическим потенциалом (~100 кВ).

Регулирование тяги двигателя, соотношения компонентов, ввод в камеру сгорания присадок и т.д. - процессы, являющиеся неотъемлемой частью эксплуатации двигателя, влияют непосредственно на физико-химический и ионный состав ПС. Измерение концентраций заряженных частиц, регистрация электромагнитных полей дает информацию об электрофизических параметрах, по которым, в свою очередь, можно судить о качестве протекания внутрикамерных рабочих процессов.

Таким образом, актуальность темы диссертации определяется потребностью в разработке эффективных систем диагностики и аварийной защиты ракетных двигателей, основанных на бесконтактных методах диагностики рабочего процесса по электрофизическим характеристикам ПС топлив в обеспечение сохранности уникального стендового оборудования и анализа результатов летных испытаний и эксплуатации ракет-носителей.

Цель диссертационной работы заключается в экспериментально-теоретическом обосновании использования электрофизических характеристик ПС ЖРД на углеводородном топливе для разработки бесконтактных эффективных средств диагностики и аварийной защиты.

Предмет исследований. В диссертации экспериментально и теоретически исследовалось влияние изменения режимных параметров модельной камеры ЖРД на электрофизические характеристики ПС углеводородного топлива.

Объект исследований. В качестве объектов исследований в диссертации рассматриваются камеры модельного и натурных ЖРД на углеводородном топливе и первичные измерительные преобразователи - датчики магнитного и электрического поля.

Научная новизна работы.

1. Разработана осесимметричная математическая модель электрофизических процессов в камере жидкостного ракетного двигателя на углеводородном топливе, учитывающая особенности газодинамического контура камеры двигателя и свойства термо-газодинамических характеристик ионизированных продуктов сгорания углеводородного топлива при различных начальных режимных параметрах.

2. Получены расчетные зависимости от основных режимных параметров работы модельного ЖРД и камеры маршевого ЖРД РД-171М электрических потенциалов элементов конструкции сопла двигателя и амплитуды напряженности магнитного поля в диапазоне изменения коэффициента избытка окислителя $\alpha_{ок} = 0,5 \dots 0,85$ для углеводородного топлива.

3. Определена близкая к линейной зависимость напряженности магнитного поля продуктов сгорания углеводородного топлива в области критического сечения от давления в камере сгорания, которая может быть рекомендована в качестве задающего параметра системы контроля и диагностики ЖРД.

4. С помощью частотного анализа колебаний напряженности магнитного и электрического полей впервые получены спектры сигналов и их частотно-амплитудные характеристики в зависимости от времени испытания и текущего давления в камере сгорания.

5. Разработана математическая модель и методика расчетного анализа параметров быстродействия системы аварийной защиты ЖРД на основе контроля характеристик магнитного поля продуктов сгорания при скачкообразном изменении давления в КС и площади критического сечения сопла.

Практическая значимость результатов заключается в следующем.

1. В разработке математической модели, описывающей генерацию и протекание электромагнитных процессов в ПС ЖРД при горении топлив с учетом геометрических особенностей проточного тракта камеры ЖРД и состава топлива, а также режимных параметров двигателя.

2. В выявлении зависимостей электрофизических характеристик ПС от режимных параметров ЖРД для назначения диагностических признаков протекания рабочих процессов.

3. Разработана структурная схема системы аварийной защиты ЖРД на основе регистрации амплитуды напряженности магнитного поля, обладающей большим быстродействием ($\sim 0,02$ с) по сравнению с традиционными средствами ($\sim 0,04 \dots 0,05$ с).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Осесимметричная математическая модель, алгоритм и результаты численного анализа электрофизических характеристик модельного и маршевого ЖРД на углеводородном топливе (УВТ).

2. Методика огневых испытаний модельного ЖРД с регистрацией электрофизических характеристик ПС углеводородного топлива.

3. Результаты частотного анализа переменных составляющих сигналов измерительных преобразователей электрического и магнитного полей при моделировании разгара критического сечения.

4. Результаты анализа возможности использования САЗ на основе регистрации амплитуды напряженности магнитного поля ПС.

Достоверность полученных результатов подтверждаются.

1. Использованием фундаментальных уравнений газодинамики, магнитогидродинамики, теории горения.

2. Удовлетворительным согласованием результатов численных расчетов и проведенных в работе экспериментов, а также их удовлетворительным согласованием с экспериментальными данными других авторов.

3. Применением аттестованных средств измерения и регистрации, обеспечивающих необходимую точность для теплотехнических экспериментов.

Апробация работы проведена на Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2010», ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана, (Москва. 2010); на Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки», ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана, (Москва. 2010); на «XXXVI Академических Королёвских научных чтениях по космонавтике», ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана, (Москва. 2012); на Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки», ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н. Э. Баумана, (Москва. 2013); на XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов РКК «Энергия», (Москва. 2014)

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы; содержит 142 страницы, 75 рисунков и 19 таблиц. Список литературных источников состоит из 83 позиции.

Основное содержание работы

Во введении показана актуальность темы диссертации, описаны свойства диагностического метода по электрофизическим характеристикам полей продуктов сгорания топлива, сформулирована цель работы, а также изложены её суть и экспериментально-теоретические результаты.

Первая глава посвящена обзору экспериментально-теоретических исследований в области электрофизических методов диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях. Сформулированы задачи исследования. Приводится обзор математических моделей, используемых авторами для описания генерации заряженных частиц (ионов и электронов) и процессов разделения зарядов в пламени горелок, в камерах сгорания модельных и натурных ЖРД и ВРД. Проведен анализ выбранных граничных условий для решения задач распределения электрического тока, коэффициента электропроводности ПС и потенциала элементов конструкций камеры модельных и натурных ЖРД и ВРД. Приводятся выводы о необходимости учета взаимного движения ионов и электронов на участках камеры с наибольшей концентрацией заряженных частиц (камера сгорания) с целью повышения точности в определении характеристик магнитных полей. Выполнен анализ влияния коэффициента избытка окислителя на потенциал элементов конструкции как в энергетических силовых установках, так и в модельных ЖРД, что позволило выявить диагностические признаки состояния ЖРД. Проведен сравнительный анализ данных различных авторов по экспериментальному определению тока, суммарного электрического заряда в потоке продуктов сгорания и потенциала конструкции ракетных двигателей на различных типах топлив. Количественные расхождения в результатах, приводимых в обзоре, свидетельствуют о различных методах градуировки измерительных преобразователей (электростатических зондов) и условиях проведения экспериментов. Однако характер зависимостей электрофизических свойств от режимных параметров всех исследуемых двигательных установок идентичен. В заключении главы сформулированы задачи экспериментально-теоретического исследования.

Во второй главе описывается осесимметричная математическая модель электрофизических процессов в камере ЖРД. Предлагаемая модель включает в себя электрогазодинамический расчет истечения ПС углеводородного топлива (УВТ) из сверхзвукового конического сопла ЖРД и состоит из уравнений газовой динамики, в которые включены уравнения электродинамики и уравнения сохранения для электрически заряженных компонент (ионов и электронов). Применительно к осесимметричной геометрии камеры ЖРД выбрана двумерная модель течения. Ввиду малого отношения электрогазодинамической силы к инерционным силам отдельно исследовалась общая газодинамическая система уравнений. Затем с помощью найденных распределений газодинамических параметров определялись электрические токи, поля и концентрации электрически заряженных компонент газовой смеси на основе уравнений, описывающих только электрические явления (магнитогидродинамики, электростатики, уравнений Максвелла и т.д.).

Математическая модель, описывающая собственное электромагнитное поле, основывалась на рассмотрении ПС как слабо ионизированного газа, в состав которого входят ионы, электроны и нейтральные молекулы и атомы. Для

ионизированной реактивной струи возникновение собственного электромагнитного поля протекает по следующим основным стадиям.

1. Генерация заряженных частиц (ионов и электронов) за счет химических реакций во фронте горения в сечении КС, где уровни концентраций электронов обеспечивают электрическую проводимость ПС σ .

2. Подвижность электронов на несколько порядков больше, чем положительных ионов, и поэтому поток электронов из ядра электрически квазинейтрального потока газа к внутренней поверхности канала превосходит поток положительных ионов.

3. Непрерывное распределение положительных ионов, вовлекаемых в турбулентное движение несущего газа, создает не скомпенсированный положительный электрический заряд, выносимый из внутрикамерного пространства и характеризующийся плотностью тока уноса j_y .

4. Создаваемое за счет такого движения заряженных частиц электрическое поле напряженностью $\vec{E}$ и потенциалом $\varphi_{\text{пс}}$ порождает магнитное поле, векторы напряженности $\vec{H}$ которого расположены в радиальной плоскости и представляют собой окружности, соосные потоку ПС.

Последовательность подготовки исходных данных для решения газодинамической задачи истечения ионизированных ПС и электрофизической задачи, описывающей собственное электромагнитное поле ПС, схематично представлена на Рис. 1.

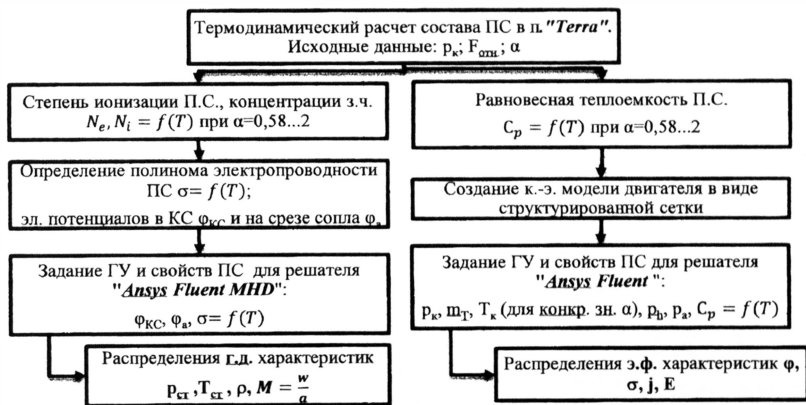


Рис. 1.

Схема расчета характеристик собственного электромагнитного поля ПС УВТ

Моделирование осесимметричного течения газа в сопле осуществлялось в программе «Ansys Fluent» с помощью системы уравнений, состоящей из уравнения: неразрывности (1), сохранения количества движения в проекциях на координатные оси r (2) и x (3) в форме Навье-Стокса, энергии (4) и уравнение состояния (5). Диссипация энергии и касательные напряжения определялись в

рамках стандартной двухпараметрической (k-ε)-модели турбулентности из уравнений (6) и (7).

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_r)}{\partial r} + \frac{\rho w_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho w_x w_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho w_r w_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial w_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} \right) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial w_x}{\partial r} + \frac{\partial w_r}{\partial x} \right) \right], \quad (2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho w_x w_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho w_r w_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial w_r}{\partial x} + \frac{\partial w_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial w_r}{\partial r} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} \right) \right) \right] - 2 \mu \frac{w_r}{r^2} + \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_r}{r} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w_x H_0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_r H_0)}{\partial r} + \frac{\rho w_r H_0}{r} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(k_t H_{0x} \right) + \frac{\partial^2}{\partial r^2} \left(k_t H_{0r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial H_{0r}}{\partial r}, \quad (4)$$

$$p = \rho R_\mu T \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho k w_x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] - \rho \epsilon + \tau_{xr} \frac{\partial w_r}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon w_x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \tau_{xr} \frac{\partial w_r}{\partial r} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (7)$$

где ρ – плотность, w_r , w_x – проекции скорости на оси r и x , p – давление, T – температура, μ – вязкость, H_0 – энтальпия, k_t – турбулентная теплопроводность, C_p – теплоемкость, R_μ – газовая постоянная, k – турбулентная кинетическая энергия, ϵ – скорость диссипации турбулентной энергии, μ_t – турбулентная вязкость, σ_ϵ , σ_k – числа Прандтля для k и ϵ соответственно, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ – константы модели турбулентности, τ_{xr} – тензор напряжений.

Собственное электромагнитное поле ПС в модуле «Ansys Fluent MHD» описывалось уравнениями Максвелла методом электрических потенциалов

$$\frac{\partial E_r}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial r} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_r}{\partial r} + \frac{E_r}{r} = \frac{4\pi}{\epsilon_0} q, \quad (9)$$

здесь E – напряженность электрического поля; q – заряд в объеме ПС; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для модельной камеры ЖРД (Рис. 2, а) была построена конечно-элементная (КЭ) модель в виде структурированной сетки (Рис. 2, б).

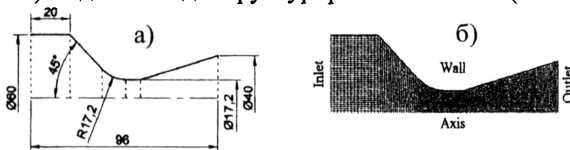


Рис. 2.

Проточной часть (а) и осесимметричная КЭ модель камеры ЖРД (б)

Моделирование рабочего тела проводилось путем расчета термодинамических свойств ПС этилового спирта ($C_2H_5OH_{(ж)}$) с объемной концентрацией 75% и газообразного кислорода (O_2) при $\alpha = 0,58...2$. В результате термодинамического расчета горения указанной топливной пары в программе «Тетра» были получены распределения теплоемкостей C_p в зависимости от

температуры ПС Т при исходном значении α , которые аппроксимировались полиномиальными зависимостями:

$$C_{p1}(T) = 1,939 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 7,539 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,98 \cdot T + 1774, \text{ при } \alpha = 0,58;$$

$$C_{p2}(T) = -1,875 \cdot 10^{-12} \cdot T^5 + 3,226 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2,17 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 - 0,713 \cdot T^2 - 1143 \cdot T + 71650, \text{ при } \alpha = 0,85;$$

$$C_{p3}(T) = 2,304 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 9,377 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 1,515 \cdot T + 612,807, \text{ при } \alpha = 0,85.$$

Для исследования полученного магнитогазодинамического течения ионизированных ПС УВТ проводилось совместное решение систем уравнений (1) – (7) и (8) – (9). При этом граничные условия дополнялись значениями электрической проводимости рабочего тела (ПС УВТ). В математической модели электрическая проводимость ПС УВТ определялась выражением

$$\sigma = k_{\sigma} q_e N_e \mu_e, \quad (10)$$

где k_{σ} – поправочный (кинетический) коэффициент; q_e , – элементарный заряд; N_e – объемная концентрация электронов; μ_e – подвижность электрона.

Подвижность электронов находилась из зависимости

$$\mu_e = \frac{q_e}{m_e} \frac{1}{\langle v_e \rangle},$$

здесь m_e – масса электрона; $\langle v_e \rangle$ – средняя частота электронных столкновений, которая определялась выражением

$$\langle v_e \rangle = 3,64 \cdot 10^{-6} \cdot N_e (\ln(\Lambda))^{1,5},$$

где $\ln \Lambda = \ln \left[1,24 \cdot 10^7 \left(\frac{T^3}{N_e} \right)^{0,5} \right]$ – кулоновский логарифм.

Плотность электрического тока уноса описывалась уравнением

$$j_y = q_e N_i W_i, \quad (11)$$

где N_i , W_i – концентрация и скорость положительно заряженных ионов.

Ток уноса, обусловленный объемным зарядом, выносимым из внутрикамерного пространства, определялся выражением

$$I_y^a = \int_s q_e \cdot N_{H_3O^+} \cdot W_{H_3O^+} \cdot ds, \quad (12)$$

где s – элемент площади слоя, занятый зарядом.

При методе, представленном на схеме (Рис. 1) концентрации заряженных частиц в ПС УВТ (газообразный кислород и 75% водный раствор этилового спирта), определялись с помощью термодинамических расчетов по программе «Тетга» в зависимости от коэффициента избытка окислителя α .

По результатам термодинамических расчетов в программе «Тетга» для указанной топливной пары носителями положительных зарядов, преобладающими в ПС, являются ионы H_3O^+ . Носителями отрицательного электрического заряда принимались свободные электроны e^- .

Граничными условиями для решения системы уравнений (8) - (9) являлись потенциалы электростатического поля в КС и на срезе сопла.

Значение электрического потенциала во входном сечении камеры сгорания определялось выражением

$$\varphi_{KCO} = - \int_{r=0}^{r=R_D} E dr = - \int_{r=0}^{r=R_D} \frac{q_e (N_{H_3O^+}^{KCO} - N_e^{KCO})}{\epsilon_0} \cdot R_D dr = \frac{q_e}{\epsilon_0} (N_e^{KCO} - N_{H_3O^+}^{KCO}) \cdot R_D^2,$$

здесь $N_e^{КСО}$, $N_{H_3O^+}^{КСО}$ – концентрации электронов и ионов в КС,
 $R_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T}{q_e^2 N_e}}$ – радиус Дебая.

Значение электрического потенциала в сечении среза сопла задавалось, исходя из условия выноса положительного заряда истекающей струей ПС из внутрикамерного пространства:

$$\varphi_a = \frac{q_e}{\epsilon_0} (N_e^{a0} - N_{H_3O^+}^{a0}) \cdot R_D^2,$$

где $N_{H_3O^+}^{a0}$, N_e^{a0} – концентрация ионов и электронов на срезе сопла, T_a – статическая температура на срезе сопла.

Расчет напряженности собственного магнитного поля, создаваемого положительными ионами H_3O^+ , движущимися со скоростью основного потока ПС, в месте установки датчика МП определялся из уравнения

$$H = \frac{Q_V W_{H_3O^+}}{4\pi r_{ДМП}^2} = \frac{q_e N_{H_3O^+} V_K}{4\pi r_{ДМП}^2} W_{H_3O^+}, \quad (13)$$

здесь Q_V – объемный суммарный положительный заряд, $W_{H_3O^+}$ – скорость ионов (равная скорости газа); q_e – элементарный заряд; $r_{ДМП}$ – расстояние от датчика МП до линии, вдоль которой движутся заряженные частицы (ионы); V_K – объем КС.

Описание граничных условий (ГУ) и области их приложения применительно к камере модельного ЖРД, приведено в Таблице 1.

Таблица 1.

Граничные условия магнитогазодинамической математической модели

Тип ГУ	Описание ГУ
Inlet (вход в КС)	Расход топлива $m_T = 0,5$ кг/с; температура $T_K = 3240$ К ($\alpha = 0,85$); давление $p_K = 3$ МПа; параметры турбулентности; электрический потенциал $\varphi_{КС1} = 0,268$ В
Axis (Ось камеры)	Градиент скорости, температуры и давления по нормали к границе $\frac{\partial w_r}{\partial r} = 0$, $\frac{\partial w_z}{\partial z} = 0$, $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$, $\frac{\partial p}{\partial r} = 0$
Wall (Стенка камеры)	Адиабатная стенка, тепловой поток равен 0 (г.у. второго рода). Условие изолированной стенки, электрический ток равен 0 ($j_y = 0$ А/м ²)
Outlet (Вых. сечение сопла)	Значения на границе находятся путем экстраполяции из центра ячейки: $w_r = 0$; $p_a = 0,099$ МПа; $T_a = 293$ К. Электрический потенциал при условии выноса положительного заряда $\varphi_a = 0,01$ В

Тестирование математической модели электрофизических процессов в камере сгорания модельного ЖРД позволило в развитии метода использовать её для моделирования и исследования электрофизических особенностей рабочего процесса и продуктов сгорания кислород-керосинового топлива маршевого ЖРД РД-171М конструкции НПО «Энергомаш» имени академика В.П. Глушко.

Распределения электрофизических характеристик на оси камеры модельного и натурного ЖРД представлены на Рис. 3.

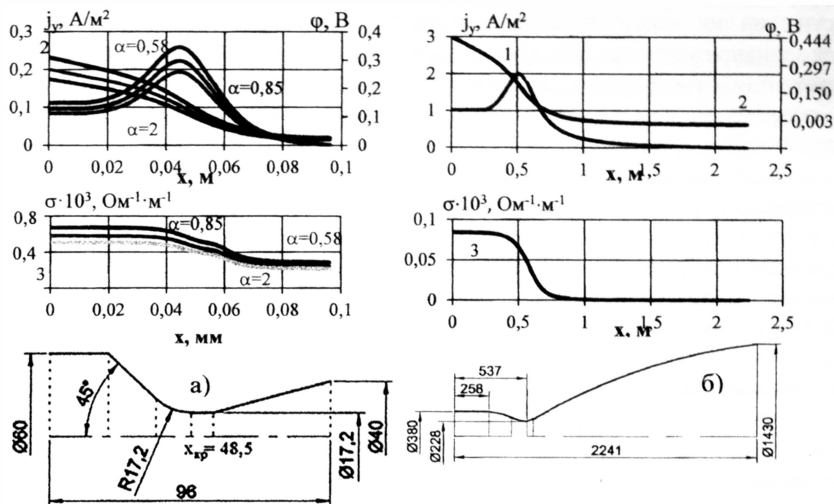


Рис. 3.

Распределение электрофизических характеристик ПС по длине камеры модельного ЖРД при $\alpha=0,85$ (а) и РД-171М при $\alpha=0,78$ (б): 1 – плотность электрического тока уноса j_y ; 2 – потенциал ϕ ; 3 – электропроводность σ

По результатам полученных распределений (Рис. 3) и оценочных расчетов уровень тока уноса на срезе сопла, определявшийся по выражению (12), для модельного ЖРД составил $I_y^a = 117$ мА при $\alpha = 0,85$. Для натурного ЖРД $I_y^a = 4170$ мА при $\alpha = 0,78$. Плотность тока уноса, найденная из зависимости (12), для модельного ЖРД в критическом сечении ($x_{кр}=48,5$ мм) составила $j_y^{кр} = 0,26$ А/м², в сечении среза ($x_a=98$ мм) $j_y^a = 0,042$ А/м² при $\alpha = 0,85$. Для натурного ЖРД в критическом сечении ($x_{кр}=537$ мм) $j_y^{кр} = 2$ А/м², в сечении среза ($x_a=2241$ мм) $j_y^a = 6,188 \cdot 10^{-3}$ А/м² при $\alpha = 0,78$. Электропроводность ПС в камере сгорания модельного ЖРД $\sigma = 0,675 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹·м⁻¹ при $\alpha = 0,85$ и $\sigma = 0,986 \cdot 10^{-3}$ Ом⁻¹·м⁻¹ при $\alpha = 0,78$ для натурного ЖРД. Значение потенциала ПС в камере сгорания модельного ЖРД $\phi_{к0} = 268$ мВ (проверить) при $\alpha = 0,85$ и $\phi_{к0} = 444$ мВ при $\alpha = 0,78$ для натурного ЖРД. Уровни напряженностей собственного магнитного поля ПС в месте установки датчика магнитного поля (на внешней стенке в области критического сечения сопла), найденные из выражения (13), для модельного ЖРД составили $H_1 = 0,818$ А/м при $\alpha_1 = 0,58$; $H_2 = 8,679$ А/м при $\alpha_2 = 0,85$ и $H_3 = 0,019$ А/м при $\alpha = 2$, что соответствует температурам потока в КС $T_k = 2803$; 3240; 2445 К.

Из расчетных распределений на Рис. 3 для камер модельного и натурного ЖРД следует, что плотность тока уноса, определяющая напряженность собственного магнитного поля ПС, увеличивается по мере движения газового

потока и достигает наибольшего значения в области критического сечения. Это обусловлено тем, что в этом сечении произведение скорости потока заряженных частиц на их концентрацию достигает наибольшего значения, аналогично расходонапряженности ρW . При дальнейшем движении ПС по соплу вследствие понижения температуры и наличия реакций рекомбинации концентрация заряженных частиц падает, это вызывает снижение плотности тока уноса и величины H .

Наибольшее значение уровня тока I_y натурального двигателя (РД-171М) значительно превышает уровень тока модельного ЖРД (например, на срезе сопла $I_{y^a} = 4170$ мА и 117 мА соответственно). Это объясняется значительными различиями в расходах топлива (598,25 кг/с для РД-171М и $\approx 0,5$ кг/с для модельного ЖРД). Однако рекомбинация заряженных частиц на срезе натурального ЖРД с большим расходом топлива также интенсифицируется. Вследствие этого расчетные значения уровня тока уноса на срезе сопла натурального двигателя больше модельного ЖРД почти в 18 раз.

Для верификации разработанной математической модели дополнительно проводилось сравнение с опубликованными экспериментальными данными других авторов, например, по определению электропроводности ПС в камере сгорания РД (Рис. 5, а) (Пинчук В. А., Грибакин В. А. и др.) и электрического потенциала сопла ЖРД (Рис. 5, б) (Ягодников Д. А., Воронецкий А.В., Пушкин Н. М.). Экспериментальные данные по определению потенциала сопла ЖРД были получены при параметрах: $p_k = 1$ МПа, $d_{кр} = 10$ мм, $d_a = 18$ мм, горючее – этиловый спирт, окислитель – кислород (газ). Расчетные значения потенциала сопла (Рис. 5, б) определялись из условия дрейфа электронов в стенку, что придавало элементу конструкции суммарный отрицательный заряд.

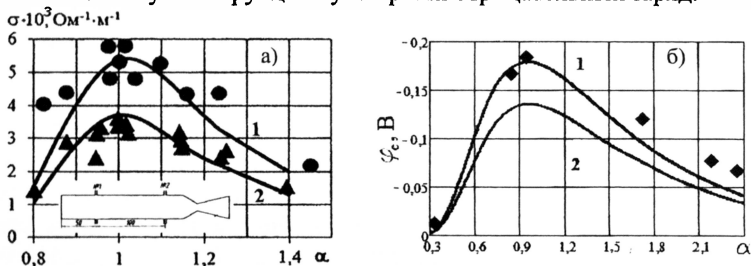


Рис. 5.

Зависимости $\sigma(\alpha)$ в КС РД (а): 1 – сечение №1; 2 – сечение №2 и $\phi_c(\alpha)$ ЖРД (б):
1 – $p_k = 1$ МПа; 2 – $p_k = 0,5$ МПа. Значки - эксперимент

Максимальные расчетные значения электропроводности ПС в сечениях камеры РД №1 и №2 составили $\sigma_{\text{№1}} = 4,49 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ и $\sigma_{\text{№2}} = 4,62 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Этим значениям соответствует соотношение компонентов близкое к 1 ($\alpha \approx 1$), что обусловлено наибольшей температурой ПС $T_{\text{к№1}} = 2102$ К (сечение №1), $T_{\text{к№2}} = 2107$ К (сечение №2) и подтверждает наибольшие расчетные значения концентраций электронов в этой области $N_{\text{е№1}} = 5,5 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ и $N_{\text{е№2}} = 5,8 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$.

Максимальное значение $\phi_c = -210$ мВ соответствует области $\alpha \approx 1$ (Рис. 5, б, кривая 1), при котором достигается максимальная температура ($T_k = 3614$ К), что обуславливает максимальную расчетную концентрацию заряженных частиц вследствие термической ионизации ($N_e = 2,569 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; $N_{\text{H}_3\text{O}^+} = 9,835 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$).

Таким образом, удовлетворительное согласование рассчитанных по предложенной модели электропроводности ПС и потенциалов сопла ЖРД с ранее опубликованными результатами других авторов свидетельствуют о корректности используемого алгоритма расчета и принятых допущений.

В третьей главе приведены описания экспериментальной установки, систем измерения и регистрации, а также методика проведения огневых стендовых испытаний, основными задачами которых являются экспериментальное подтверждение прогнозируемых электрофизических характеристик ПС ЖРД и их изменение в процессе варьирования режимных параметров (давления в КС и соотношения компонентов топлива газообразный кислород и 75% – ый раствор этанола).

Конструкция камеры модельного ЖРД состоит из нескольких секций, закрепленных вертикально на стапеле (Рис. 6). Выбор данного двигателя обусловлен простотой его конструкции, практически неограниченным ресурсом работы, безопасностью эксплуатации и возможностью реализации различных режимов истечения из сопла. В серии экспериментов по определению электромагнитных свойств ПС в процессе разгара элементов проточного тракта двигателя на присоединительный фланец последней секции КС 1 монтировался

неохлаждаемый вкладыш 4, из композитных материалов типа стеклопластика П5-7, или углепластика П5-13.

Для регистрации электромагнитного поля выхлопной струи ПС ЖРД использовались датчики магнитного 2 и электрического 3 полей (ДМП и ДЭП), которые позволяли в процессе эксперимента регистрировать переменные составляющие магнитного и электрического полей в частотных диапазонах 10 Гц...20 кГц. Сигнал с первичных преобразователей поступал на промежуточные усилители.

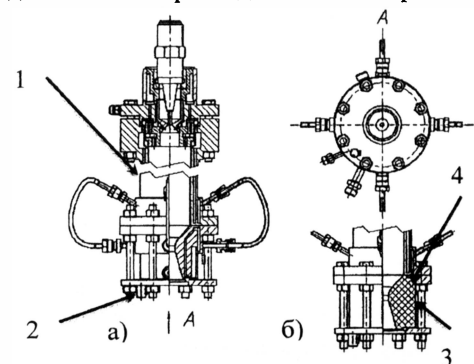


Рис. 6.

Конструкция модельного ЖРД с охлаждаемым (а) и неохлаждаемым вкладышем критического сечения (б)

Информация регистрировалась и обрабатывалась с помощью средств микропроцессорной и вычислительной техники с использованием аппаратно-программного комплекса «ПИРС».

Пространственное положение ДМП и ДЭП по отношению к потоку ПС выбиралось таким, чтобы регистрируемый ими сигнал был наибольшим. Это

достигалось с учетом данных предварительных градуировок датчиков, а также на основе электрофизической картины истечения ПС из сопла.

Осциллограммы на Рис. 7 были получены при моделировании разгара критического сечения и сверхзвуковой части сопла. Уменьшение давления в КС в диапазоне $p_k = 2,2...1,5$ МПа происходило за время $\tau = 4...12$ с, что сопровождалось увеличением площади критического сечения в интервале $2,4 \cdot 10^{-4}...3 \cdot 10^{-4}$ м².



Рис. 7.

Осциллограммы пуска: 1 – p_k , 2 – F_{kp} , 3 – H при разгаре критического сечения сопла модельного ЖРД, материал сопла П5-13

Из осциллограммы пуска (Рис. 7) следует, что по мере уменьшения давления в КС происходит монотонное уменьшение амплитуды напряженности магнитного поля, регистрируемой измерительным преобразователем магнитного поля, с $H = 40$ А/м ($p_k = 2,2$ МПа) до $H = 25$ А/м ($p_k = 1,4$ МПа).

Анализ результатов серии ОСИ при различных давлениях в КС позволил установить зависимость амплитуды напряженности магнитного поля от давления в КС (Рис. 8), которая в диапазоне $p_k = 2,5...3,5$ МПа аппроксимировалась линейной функцией $H(p_k) = 27,66 \cdot p_k - 25,86$.

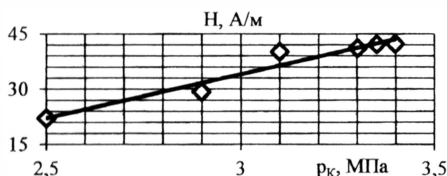


Рис. 8.

Зависимость амплитуды H от давления в КС при разгаре критического сечения модельного ЖРД. Значки—эксперимент

уменьшение давления в камере сгорания обуславливает снижение концентраций носителей положительного и отрицательного зарядов. Указанные причины приводят к уменьшению тока уноса в истекающей струе, что в свою очередь

Данный результат может быть объяснен тем, что значение тока уноса, определяющего характеристики электромагнитного поля истекающей струи продуктов сгорания, пропорционально произведению значений диаметра среза сопла, скорости потока и концентрацией заряженных частиц в этом сечении, т.е. $I_y \sim d_a \cdot w_a \cdot N_{e,i}$. Тогда при постоянном диаметре среза сопла

приводит к уменьшению амплитуды напряженности магнитного поля, регистрируемой датчиком магнитного поля.

При испытании с разгорающимся критическим сечением интенсивно изменялся спектр амплитуд электрического поля по времени (Рис. 9).

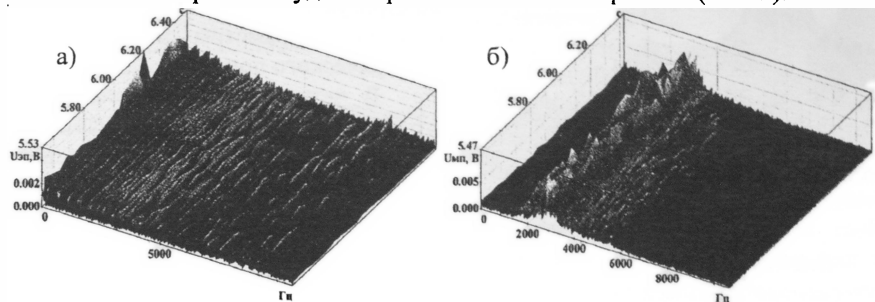


Рис. 9.

Трехмерные графики амплитудных спектров сигналов с ДМП (а) и ДЭП (б) при разгаре сопла (время анализа 5...6 с). Материал вкладыша П5-13

Из Рис. 9, а наглядно видно, что максимальные амплитудные спектры сигнала магнитного поля сосредоточены в ограниченном диапазоне частот 2900...3200 Гц. В отличие от амплитудного спектра магнитного поля, максимальные амплитуды спектральных плотностей мощности сигнала электрического поля находятся в более широком диапазоне 10...900 Гц низкочастотной области. Так, в процессе разгара критического сечения максимум плотности мощности смещается в коротковолновую область спектра,

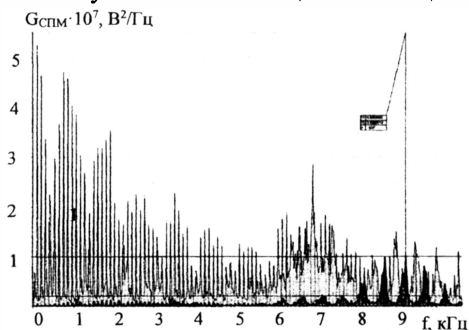


Рис. 10.

Спектр плотности мощности сигнала ДЭП при постоянном значении p_k (1) и $p_k = \text{var}$ (2). Материал вставки критического сечения П5-13

где соответствует частоте $f_{\text{max}} = 9241$ Гц, а в случае постоянного давления в КС $f_{\text{max}} = 41,6$ Гц (Рис. 10).

Спектральные характеристики сигнала ДМП при изменении давления в КС p_k изменяются менее существенно и плотности мощности ($G_{\text{СПМ}}$) сигнала соответствует частоте $f_{\text{max}} \sim 3$ кГц (Рис. 11). Однако плотность мощности сигнала ДМП при уменьшении давления в КС уменьшается почти в 10 раз при уменьшении давления, вызванного разгаром критического сечения.

Эти результаты могут быть объяснены тем, что с одной стороны, разгар критического сечения, сопровождающийся монотонным снижением давления, влечет за собой уменьшение скорости потока ПС, а значит и плотности электрического тока уноса, что в свою очередь вызывает снижение уровня сигнала магнитного поля.

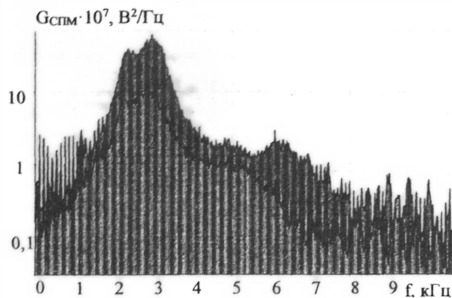


Рис. 11.

Спектр плотности мощности сигнала ДМП при постоянном значении p_k (1) и при падении p_k в результате разгара критического сечения. Материал П5-13

С другой стороны, продукты горения материала вкладыша критического сечения (углепластика П5-13), электризуясь, непосредственно изменяют параметры магнитного и электрического поля.

В четвертой главе рассмотрена структурная схема системы аварийной защиты (САЗ) ЖРД на основе регистрации амплитуды напряженности магнитного поля (МП), обладающей большим быстродействием по сравнению с традиционными средствами (40...50 мс). Выполнено моделирование системы камера ЖРД - первичный измерительный преобразователь

магнитного поля высокотемпературного потока ПС углеводородного топлива и определено время инерционности (быстродействия) при скачкообразном изменении давления в камере сгорания (КС) и диаметра критического сечения сопла. В результате параметрического анализа установлено, что на конечное быстродействие такой системы главным образом влияет объем КС диагностируемого двигателя, конструктивные особенности измерительного преобразователя и параметры колебательного контура. Временные характеристики переходного процесса предлагаемой САЗ позволяют рекомендовать электрофизические характеристики как источник информации о работоспособности ЖРД.

Описание динамического процесса возникновения сигнала в измерительном преобразователе МП в результате изменения давления в камере двигателя проводилось с помощью составления структурной схемы «двигатель - измерительный преобразователь МП» в программе «МВТУ 3.5». Схема включала в себя задающее воздействие, которое описывалось ступенчатым законом изменения площади критического сечения, передаточную функцию камеры двигателя и измерительного преобразователя МП. Результатами программных вычислений являлись временные графики, описывающие переходные процессы в звеньях системы (Рис. 12).

По результатам проведенных расчетов можно заключить, что ступенчатое увеличение площади критического сечения вызывает монотонное падение давления в КС за время 14,2 мс. Длительность переходного процесса в измерительном преобразователе магнитного поля составило 17,6 мс, что свидетельствует о слабой инерционности последнего при мгновенном

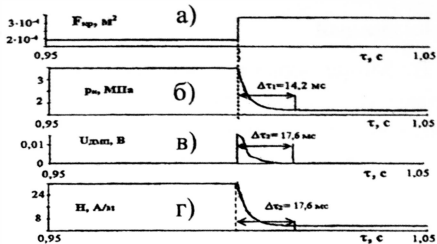


Рис. 12.

Изменение давления (б), напряжения в измерительном преобразователе МП (в) и амплитуды напряженности МП (г) при увеличении площади критического сечения (а)

изменении площади критического сечения и подтверждает возможность использования САЗ на основе контроля электрофизических характеристик ПС.

Основные результаты и выводы

1. Разработана осесимметричная математическая модель электрофизических процессов в камере ЖРД на углеводородном топливе, учитывающая особенности газодинамического контура камеры двигателя и термодинамических свойств ионизированных продуктов сгорания при различных начальных режимных параметрах и геометрии проточного тракта ЖРД.
2. Получены расчетные зависимости электрических потенциалов ПС и конструкции сопла двигателя, уровни напряженностей магнитного поля и электрической проводимости ПС в диапазоне изменения коэффициента избытка окислителя $\alpha_{ок} = 0,58 \dots 2$ и давления в КС $p_k = 3$ МПа для топлива кислород-этанол. Для топлива кислород-керосин камеры маршевого ЖРД РД-171М в диапазонах $\alpha_{ок} = 0,5 \dots 2$ и $p_k = 24,5$ МПа.
3. Разработана методика проведения эксперимента, система регистрации и обработки результатов измерений характеристик электромагнитного поля при огневых испытаниях модельного ЖРД на топливе кислород-этанол, при моделировании аномальных режимов работы и процессов разгара сопла.
4. В диапазоне изменения давления в камере сгорания $p_k = 1,5 \dots 3,5$ МПа экспериментально определена близкая к линейной зависимость напряженности магнитного поля от давления в камере сгорания, которая может быть использована как входной сигнал и диагностический признак для системы аварийной защиты ЖРД.
5. В результате частотного анализа сигнала, полученного с измерительного преобразователя магнитного поля, установлено, что в процессе уменьшения давления в диапазоне $p_k = 2,5 \dots 1,5$ МПа, вызванного разгаром критического сечения сопла, максимум плотности мощности сигнала магнитного поля, соответствующий частоте 3 кГц, уменьшается с $8 \cdot 10^6 \text{ В}^2 \cdot \text{с}$ до $10^6 \text{ В}^2 \cdot \text{с}$.
6. Разработана структурная схема системы аварийной защиты двигателя на основе регистрации амплитуды напряженности магнитного поля, обладающей большим быстродействием (17,6 мс) по сравнению с традиционными средствами (40...50 мс).
7. Выполнено моделирование системы «камера двигателя - измерительный преобразователь магнитного поля» и определено время инерционности (17,6 мс) при скачкообразном изменении давления в камере сгорания и площади критического сечения сопла. В результате параметрического анализа установлено, что на быстродействие такой системы главным образом влияет объем камеры сгорания диагностируемого двигателя, конструктивные особенности измерительного преобразователя и параметры колебательного контура.

Список публикаций

1. Ягодников Д. А., Рудинский А. В. Моделирование электрофизических процессов в газовых трактах энергосиловых установок // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. №4(81). С.39–46. (0,2 пл./ 0,1 пл.).
2. Ягодников Д. А., Бобров А. Н., Рудинский А. В. Частотный анализ электрофизических характеристик рабочего процесса ЖРД на углеводородном топливе // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. С. 1–26. <http://technomag.edu.ru/doc/250245.html>. (1,625 пл./ 0,5 пл.).
3. 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. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 4. С. 141–154. <http://www.technomag.edu.ru/issue/763210.html>. (0,875 пл./ 0,44 пл.).
4. Ягодников Д. А., Рудинский А. В. Моделирование электрофизических процессов в камере жидкостного ракетного двигателя // Ракетно-космические двигательные установки: Сборник материалов Всероссийской науч.-тех. конф. М., 2010, С. 51–52. (0,125 пл./ 0,07 пл.).
5. Ягодников Д. А., Рудинский А. В. Электрофизические процессы в ЖРД // Студенческая научная весна-2010: Сб. тез. докладов. НТК. М., 2010. Т.10. ч.3. С. 219–220. (0,125 пл./ 0,07 пл.).
6. Ягодников Д. А., Рудинский А. В. Исследование характеристик магнитных элементов для диагностики процессов разгара теплонапряженных элементов конструкции жидкостных ракетных двигателей // XXXVI Академические чтения по космонавтике 2012, Секция 3. С. 76–77. (0,127 пл./ 0, 07 пл.).
7. Ягодников Д. А., Рудинский А. В. Исследование частотных характеристик электромагнитного поля сверхзвуковой струи ЖРД // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спецвыпуск №7. Теория и практика энергетического и транспортного машиностроения. 2012. С.12–18. (0,44 пл./ 0,22 пл.).
8. Ягодников Д. А., Рудинский А. В. Оценка параметров быстродействия САЗ ЖРД по электромагнитным свойствам продуктов сгорания // Ракетно-космические двигательные установки: сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции. 2013. С. 88–89. (0,125 пл./ 0,07 пл.).
9. Ягодников Д. А., Рудинский А. В. Экспериментально-теоретическое определение параметров быстродействия САЗ ЖРД по электромагнитным свойствам продуктов сгорания // Труды МГТУ имени Н.Э. Баумана. Теория и практика современного ракетного двигателестроения. 2013. №607. С.24–31. (0,5 пл./ 0,25 пл.).
10. Рудинский А.В. Экспериментально-теоретическое исследование магнитометрического метода контроля и диагностики рабочего процесса ЖРД // XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов РКК «Энергия». Тезисы докладов. 2014. С.424–425. (0,125 пл.).