

УДК 537.566:621.454.2

Моделирование неравномерного течения и параметров электромагнитного поля в камере жидкостного ракетного двигателя при наличии пристеночного слоя

Рудинский А. В.^{1,*}, Ягодников Д. А.¹

[*alex_rudinskiy@mail.ru](mailto:alex_rudinskiy@mail.ru)

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

Составлена осесимметричная конечно-элементная математическая модель истечения ионизированных продуктов сгорания углеводородного топлива, выбраны граничные условия применительно к геометрии камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД). Получены распределения напряженности магнитного поля и электрической проводимости с учетом низкотемпературного пристеночного слоя. Полученные пространственные распределения выноса из камеры электрического заряда (тока) и напряженности магнитного поля в зависимости от режимного параметра двигателя, коэффициента избытка окислителя, могут быть использованы для реализации бесконтактных методов электростатической диагностики технического состояния ЖРД.

Ключевые слова: ракетный двигатель, плотность тока, магнитное поле продуктов сгорания

Введение

Одно из основных направлений создания перспективных двигательных установок (ДУ) в изделиях ракетно-космической техники связано с разработкой надежных и высокоэффективных методов и средств диагностики, необходимых для реализации наилучших технических характеристик ДУ при наименьших экономических затратах [1]. Традиционные методы исследования характеристик рабочего процесса в камерах сгорания (КС) ДУ не всегда эффективны, в особенности в случае необходимости диагностики физико-химических процессов в объеме КС, и практически не пригодны для создания системы управления, мгновенно реагирующей на аналогичные изменения рабочего процесса. С целью устранения указанных недостатков в последнее время разрабатываются нетрадиционные методы диагностики ДУ, основанные, например, на регистрации электрофизических и электромагнитных характеристик рабочего процесса [2]. Предпосылкой данного метода диагностики является то, что процессы горения большинства встречающихся на практике топливных композиций протекают при достаточно высокой температуре (2000 ... 4000 К). В связи с этим во фронте пламени

имеют место процессы ионизации, а в продуктах сгорания (ПС) присутствуют как положительно, так и отрицательно заряженные частицы - ионы. Важнейшим этапом разработки такой системы является математическое моделирование истечения ионизированных продуктов сгорания и описание характеристик создаваемого магнитного поля. Применение конечно-элементной схемы при решении магнитогазодинамической системы, описывающей данное течение, позволяет получить необходимые распределения электромагнитных параметров потока и выявить области их максимальных значений, что может являться критерием при установке первичных измерительных преобразователей, например магнитного поля, для диагностики рабочего процесса в двигателе.

Известные экспериментальные исследования электрофизических характеристик продуктов сгорания ЖРД весьма немногочисленны. Наиболее обширные, комплексные по охвату учитываемых факторов и весьма надежные результаты в этой области получены авторами работ [3, 4, 5]. Так, в работе Ю.А. Нагеля [3] представлены обобщенные результаты экспериментальных исследований электризации тепловых ракетных двигателей на жидких и твердых топливах при давлениях и температурах в КС $p_k = 5,7 \dots 0,3$ МПа и $T_k = 3600 \dots 2300$ К. Определены значения токов уноса и потенциалов элементов конструкции. Теоретическая модель, описывающая электрофизические свойства ПС ЖРД на основе представления продуктов сгорания как смеси из ионов, электронов и нейтральных атомов, изложена в работе В.А. Пинчука [6]. Автор рассматривает одномерную стационарную задачу истечения газовой смеси ионов, электронов и нейтральных атомов без детального рассмотрения химического состава. Основным параметром, определяющим концентрацию заряженных частиц в смеси ПС, являлся потенциал ионизации. Результаты распределений электрофизических характеристик ПС (плотность конвективного тока и относительная скорость заряженных частиц) были получены только для расширяющейся части сопла.

На основе проведенного анализа литературных источников были поставлены следующие задачи исследования:

- разработка математической модели, описывающей электрофизические процессы в высокоскоростном потоке ПС углеводородного топлива ЖРД (этиловый спирт + кислород),
- проведение численных расчетов электрофизических характеристик (электромагнитных полей ПС) рабочего процесса в камере сгорания и газовом тракте ЖРД при варьировании соотношения компонентов топлива.

1. Модель расчета электромагнитных характеристик гомогенных ПС ЖРД на углеводородном топливе

Модель истечения продуктов сгорания (ПС) углеводородного топлива (УВТ) из сверхзвукового конического сопла жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) состоит из системы уравнений газовой динамики, уравнений электродинамики и уравнений сохранения для электрически заряженных компонент (ионов и электронов). В последних

уравнениях с использованием обобщенных законов Ома содержатся члены, описывающие конвекцию и диффузию заряженных частиц, и их дрейф, а также источники члены, обусловленные физико-химическими реакциями.

Так как параметр электрогазодинамического взаимодействия мал (т.е. мало отношение электрогазодинамической силы к инерционным силам), то это позволяет вначале исследовать общую газодинамическую систему уравнений. Затем с помощью найденных распределений газодинамических параметров представляется возможным определить электрические токи, поля и концентрации электрически заряженных компонент газовой смеси на основе уравнений, описывающих только электрические явления (магнито-электродинамики, электростатики, уравнений Максвелла и т.д.).

Для моделирования осесимметричного равновесного стационарного течения газа в сопле с использованием программы «Ansys Fluent» составлялась система уравнений, которая включала в себя уравнения неразрывности, сохранения количества движения в проекциях на координатные оси r и x в форме Навье-Стокса, энергии и уравнение состояния. Диссипация энергии и касательные напряжения определялись в рамках стандартной двухпараметрической (k - ϵ)-модели турбулентности [7]. Для геометрии проточной части модельной камеры ЖРД (Рисунок 1) была построена конечно-элементная модель в виде структурированной сетки с общим числом элементов 24053.

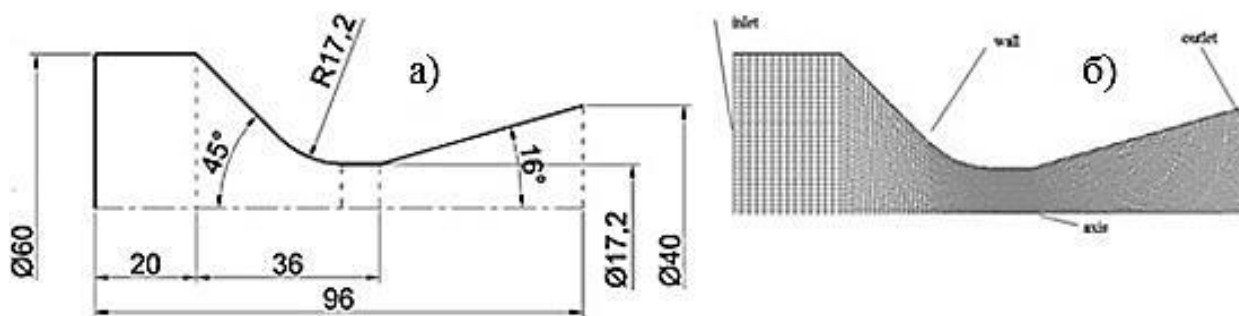


Рис. 1. Геометрия расчетной области камеры модельного ЖРД (а) и осесимметричная конечно-элементная модель (б)

Описание граничных условий и области их приложения применительно к геометрии проточного тракта камеры (рис. 1, б), приведено в табл. 1. Моделирование рабочего тела проводилось путем расчета термодинамических свойств ПС водного раствора этилового спирта (C_2H_5OH) с объемной концентрацией 75% и газообразного кислорода (O_2) при $\alpha = 0,58; 085; 2$. В результате термодинамического расчета горения указанной топливной пары в программе «Тетра» [8] были получены распределения теплоемкостей C_p в зависимости от температуры ПС T при исходном значении коэффициента избытка окислителя α . Расчетные значения C_p при $\alpha = 0,58; 085; 2$ аппроксимировались полиномами третьей степени:

$$C_p^{\alpha=0,58}(T) = -3,975 \cdot 10^{-5} (T^2) + 0,371 \cdot T + 1723.$$

Таблица 1. Граничные условия газодинамической мат. модели ПС УВТ

Тип ГУ	Описание
Inlet (вход в КС)	Массовый расход топлива $m_T = 0,5$ кг/с; температура $T_K = 3240$ ($\alpha = 0,85$); давление $p_K = 3$ МПа; параметры турбулентности;
Axis (Ось камеры)	Градиент скорости, температуры и давления на оси равен 0
Wall (Стенка камеры)	Адиабатная стенка, тепловой поток равен 0 (г.у. второго рода).
Outlet (Выходное сечение сопла)	Значения на границе находятся путем экстраполяции значений из центра ячейки: $w_r = 0$; $p_a = 0,099$ МПа; $T_a = 293$ К.

Расчет электромагнитного поля ПС УВТ проводился согласно математической модели описанной в работе А.Б. Ватажина [9]. Для ионизированной реактивной струи возникновение внешних электромагнитных полей протекает по следующим основным стадиям.

Генерация заряженных частиц за счет химических реакций во фронте горения в сечении КС, уровни концентраций которых обеспечивают электрическую проводимость ПС σ .

Непрерывное распределение заряженных частиц, вовлекаемых в турбулентное движение несущего газа, создает нескомпенсированный электрический заряд, выносимый из внутрикамерного пространства, характеризующийся плотностью тока уноса j_y .

Создаваемое за счет такого движения заряженных частиц электрическое поле напряженностью E и потенциалом ϕ порождает магнитное поле H , характеризующееся током уноса j_y .

Напряженности магнитного H и электрического полей E , генерируемые заряженными частицами в струе ПС, определялись уравнениями Максвелла

$$\frac{\partial E}{\partial x} - \frac{\partial E}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{E}{r} = \frac{e}{\varepsilon_0} (N_i - N_e), \quad (2)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\partial H}{\partial r} = j_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{H}{r} = 0, \quad (4)$$

где E – амплитуда напряженности электрического поля; H – амплитуда напряженности магнитного поля; N_i , N_e – концентрации положительных ионов и электронов; e – заряд электрона; j_y – плотность тока уноса; ε_0 – электрическая постоянная.

Для исследования полученного магнитогазодинамического течения ионизированных ПС УВТ необходимо дополнить граничные условия и ввести описание физических свойств ионизированного рабочего тела. Таким свойством является электрическая

проводимость. В данной математической модели электрическая проводимость ПС УВТ с удовлетворительной точностью описывалась по методу Фроста [10] выражением

$$\sigma_{ПС}^{УВТ} = e^2 \cdot (N_e + N_i) \mu_e \quad (5)$$

где μ_e – подвижность электрона.

При таком методе подлежат определению концентрации заряженных частиц в ПС УВТ (газообразный кислород и 75% водный раствор этилового спирта), которые определялись с помощью термодинамических расчетов в программе «Тетра» в зависимости от коэффициента избытка окислителя α (табл. 2).

Таблица 2. Концентрация заряженных частиц с отрицательным зарядом в ПС $O_{2(газ)} + C_2H_6O$ (75% по объему), $p_k = 3$ МПа

α	Объемная концентрация отрицательных ионов $N, м^{-3}$						Концентрация электронов $N_e, м^{-3}$	Т, К
	O^-	O_2^-	OH^-	H^-	HO_2^-	C^-		
0,58	$0,159 \cdot 10^{15}$	$0,6098 \cdot 10^{13}$	$0,1212 \cdot 10^{17}$	$0,5024 \cdot 10^{15}$	$0,2029 \cdot 10^{13}$	$7,354 \cdot 10^6$	$0,6147 \cdot 10^{17}$	2803
0,85	$0,302 \cdot 10^{17}$	$0,843 \cdot 10^{16}$	$0,282 \cdot 10^{18}$	$0,366 \cdot 10^{16}$	$0,724 \cdot 10^{15}$	$82,82 \cdot 10^6$	$0,483 \cdot 10^{18}$	3240
2	$0,632 \cdot 10^{14}$	$0,467 \cdot 10^{15}$	$0,121 \cdot 10^{16}$	$0,107 \cdot 10^{11}$	$0,175 \cdot 10^{14}$	≈ 0	$0,484 \cdot 10^{15}$	2445

По результатам термодинамических расчетов носителями положительных зарядов в ПС являются ионы CHO^+ , $C_2H_2O^+$, $C_3H_3^+$, CH_3^+ , O^+ , CO^+ , OH^+ , H_2O^+ , H_3O^+ , $H_5O_2^+$, $H_3O_3^+$, преобладающими из которых являются ионы H_3O^+ . Носителями отрицательного электрического заряда в продуктах сгорания являются свободные электроны (табл. 2).

Полученные значения объемных концентраций положительных ионов H_3O^+ и электронов аппроксимировались в зависимости от значений α в КС и текущей температуры потока T следующими функциями.

$$N_{H_3O^+} = (A_1 \ln \alpha + A_2) \left(\frac{T}{1000} \right)^{A_3 \alpha + A_4}, \quad (6)$$

$$N_{e^-} = (B_1 \alpha^2 + B_2 \alpha + B_3) \left(\frac{T}{1000} \right)^{B_4 \alpha + B_5}, \quad (7)$$

где $A_1 = 1,167 \cdot 10^6$; $A_2 = 9,429 \cdot 10^5$; $A_3 = 1,249$; $A_4 = 23,749$; $B_1 = -1,325 \cdot 10^6$; $B_2 = 4,19 \cdot 10^6$; $B_3 = -6,488 \cdot 10^5$; $B_4 = 0,379$; $B_5 = 24,656$ - константы аппроксимации.

Подстановкой полученного выражения для концентраций заряженных частиц из (6), (7) в выражение (5) была получена зависимость электропроводности ПС УВТ кислород-этанол в зависимости от статической температуры, которая для ввода в базы данных «Fluent МНД» [11] была аппроксимирована полиномом четвертого порядка

$$\sigma_{ПС}^{УВТ}(T) = 9,155 \cdot 10^{-10} (T^3) - 6,765 \cdot 10^{-6} (T^2) + 0,017 \cdot T - 13,433.$$

Граничными условиями для решения системы уравнений (1) - (4) являлись потенциалы электростатического поля в КС и на срезе сопла (табл. 3).

Значение электрического потенциала в сечении камеры сгорания определялось выражением

$$\phi_{KC0} = - \int_{r=0}^{r=R_D} E dr = - \int_{r=0}^{r=R_D} \frac{e(N_e^{KC0} - N_{H_3O^+}^{KC0})}{\varepsilon_0} \cdot R_D dr = \sqrt{\frac{k \cdot T_{K0}}{\varepsilon_0 \cdot N_e^{KC0}}} (N_{H_3O^+}^{KC0} - N_e^{KC0}) \cdot R_D,$$

где N_e^{KC0} , $N_{H_3O^+}^{KC0}$ – концентрации з.ч. в КС; $R_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 k T}{e^2 N_e}}$ – радиус Дебая.

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

$$\phi_a = \sqrt{\frac{k \cdot T_a}{\varepsilon_0 \cdot N_e^a}} N_{H_3O^+}^a,$$

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

Таблица 3. Граничные условия магнитогазодинамической мат. модели ПС УВТ

Тип ГУ	Описание
inlet	Электрический потенциал $\phi_{KCI} = 0,268$ В
wall	Условие изолированной стенки, электрический ток равен 0 ($j_y = 0$ А/м ²)
outlet	Электрический потенциал при условии выноса положительного заряда $\phi_a = 0,01$ В

2. Результаты математического моделирования и численных расчетов

Результаты численных расчетов истечения ПС из сопла ЖРД по определению термогазодинамических параметров в программе «Fluent MHD» (статического давления, чисел Маха) и электрофизических параметров (плотности тока, потенциала электрического поля) представлены на рис. 2.

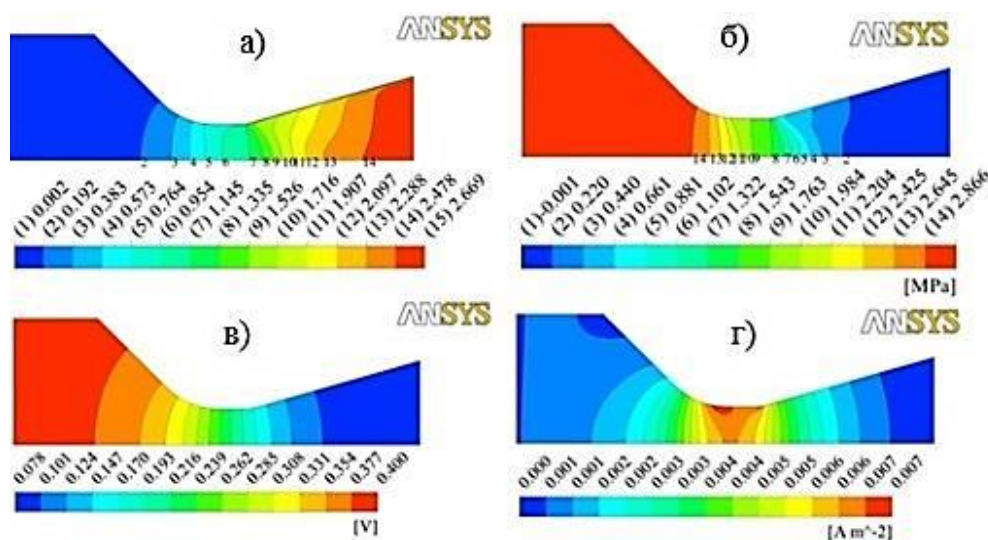


Рис. 2. Распределение числа Маха (а) статического давления (б) электрического потенциала (в), плотности тока уноса (г)

Значение потенциала ПС при движении к срезу сопла по результатам, приведенным на рис. 2, а, носит убывающий характер, что обуславливает вынос положительного заряда при данном режиме работы модельного ЖРД.

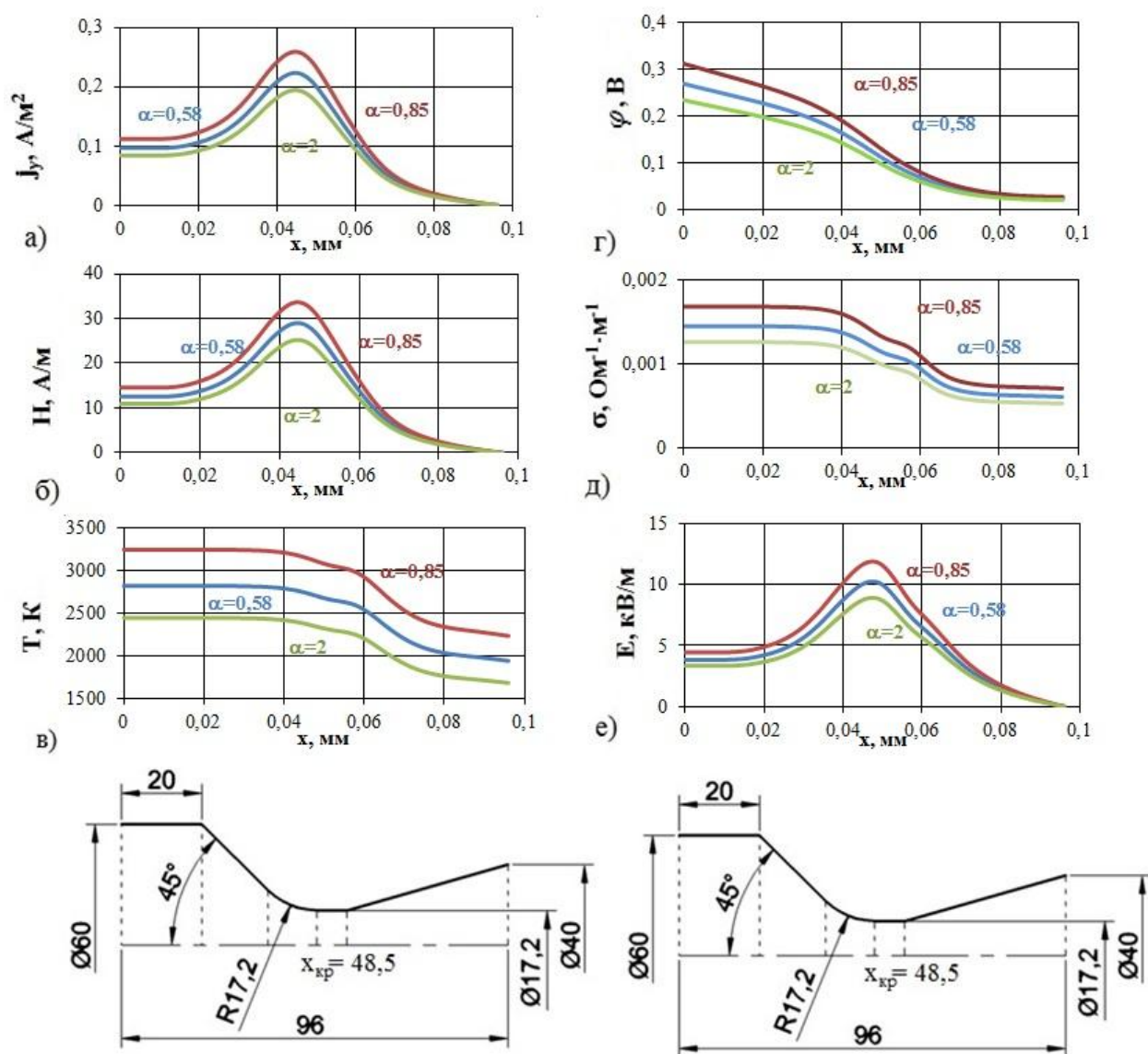


Рис. 3. Распределение плотности тока уноса (а), напряженности магнитного поля (б), температуры (в), потенциала (г), проводимости (д) и напряженности электрического поля (е), по оси модельного ЖРД

Как следует из осредненных по оси распределений (рис. 3), плотность тока j_y увеличивается по мере движения продуктов сгорания по камере двигателя и достигает максимального значения в области критического сечения. Хотя концентрация заряженных частиц падает в этой области, произведение скорости потока на концентрацию заряженных частиц достигает наибольшего значения, что объясняет максимум плотности тока уноса. Скорость движения заряженных частиц в потоке продуктов сгорания

подчиняется законам электрогазодинамического взаимодействия и носит возрастающий характер. При дальнейшем движении ПС по соплу вследствие понижения температуры и наличия реакций рекомбинации концентрация заряженных частиц падает, это вызывает снижение плотности тока. Значение тока уноса на срезе сопла составила $I_y^a = j_y^a \cdot F_a = 236$ мА при $\alpha = 0,58$ (рис. 3, а). Расчетное значение амплитуды напряженности магнитного поля в критическом сечении сопла составляет $H_1 = 29$ А/м при $\alpha_1 = 0,58$; $H_2 = 34$ А/м при $\alpha_2 = 0,85$ и $H_3 = 24$ А/м при $\alpha_3 = 2$ (рис. 3, б), что соответствует изменению температуры потока в КС $T_k = 2803$; 3240 ; 2445 К (рис. 3, в) при изменении коэффициента избытка окислителя в диапазоне $\alpha = 0,58$; $0,85$; 2 .

По результатам работы [3], ток на срезе сопла, измеренный в РДТТ с параметрами $d_{кр} = 18$ мм, $d_a = 40$ мм, $p_k = 4$ МПа, $T_k = 3300$ К, составил от 50 мА до 200 мА. Удовлетворительное согласование рассчитанных по предложенной модели уровней электрических токов с экспериментальными данными [3] свидетельствуют о корректности используемого алгоритма расчета и принятых допущений.

В процессе проведения численных экспериментов дополнительно моделировались электрофизические характеристики ПС в области «холодного» пристеночного слоя. При такой поставленной задаче задавалось распределение соотношения компонентов по радиусу КС. Процесс моделировался путем задания расхода газа в КС в области пристенка с температурой не более 2000 К. Область цилиндрической КС выбиралась длиной $l_k = 148$ мм (рис. 4). В результате полученных данных (картины течений с учетом пристенка, рис. 5, 6) были определены профили распределений газодинамических и электрофизических параметров ПС по радиусу КС (рис. 7).

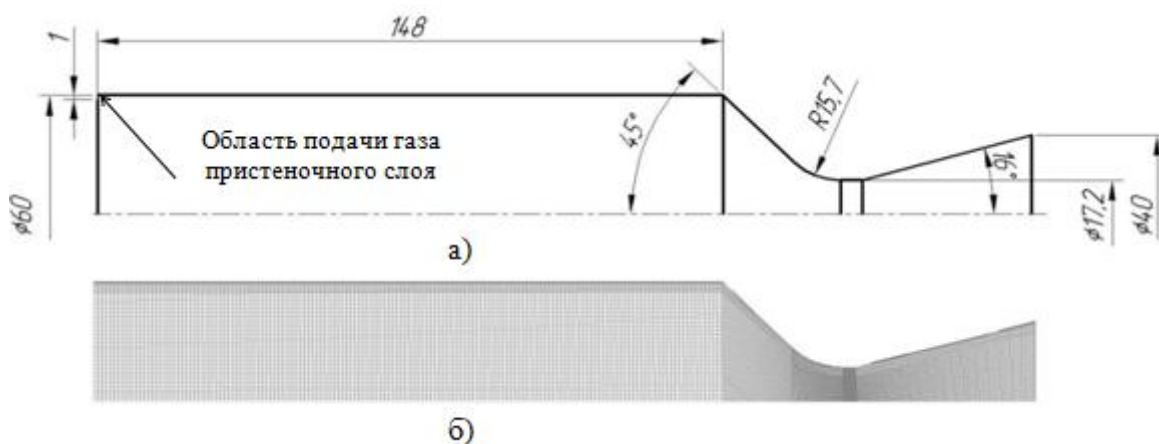


Рис. 4. Геометрия проточной части камеры модельного ЖРД для исследования пристеночного слоя

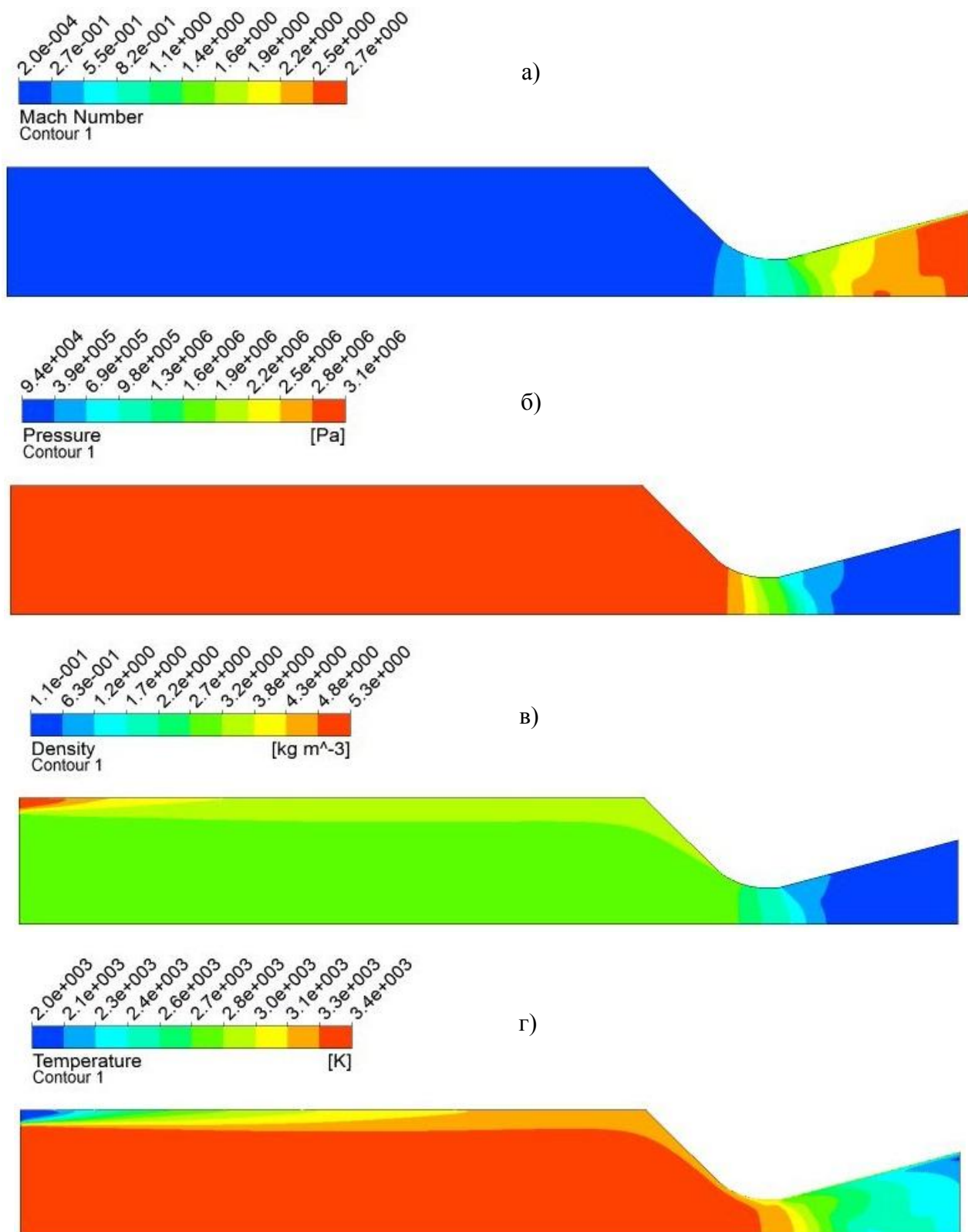


Рис. 5. Распределение числа Маха (а) статического давления (б), плотности (в) и температуры (г) по камере модельного ЖРД. Расчет с пристеночным слоем

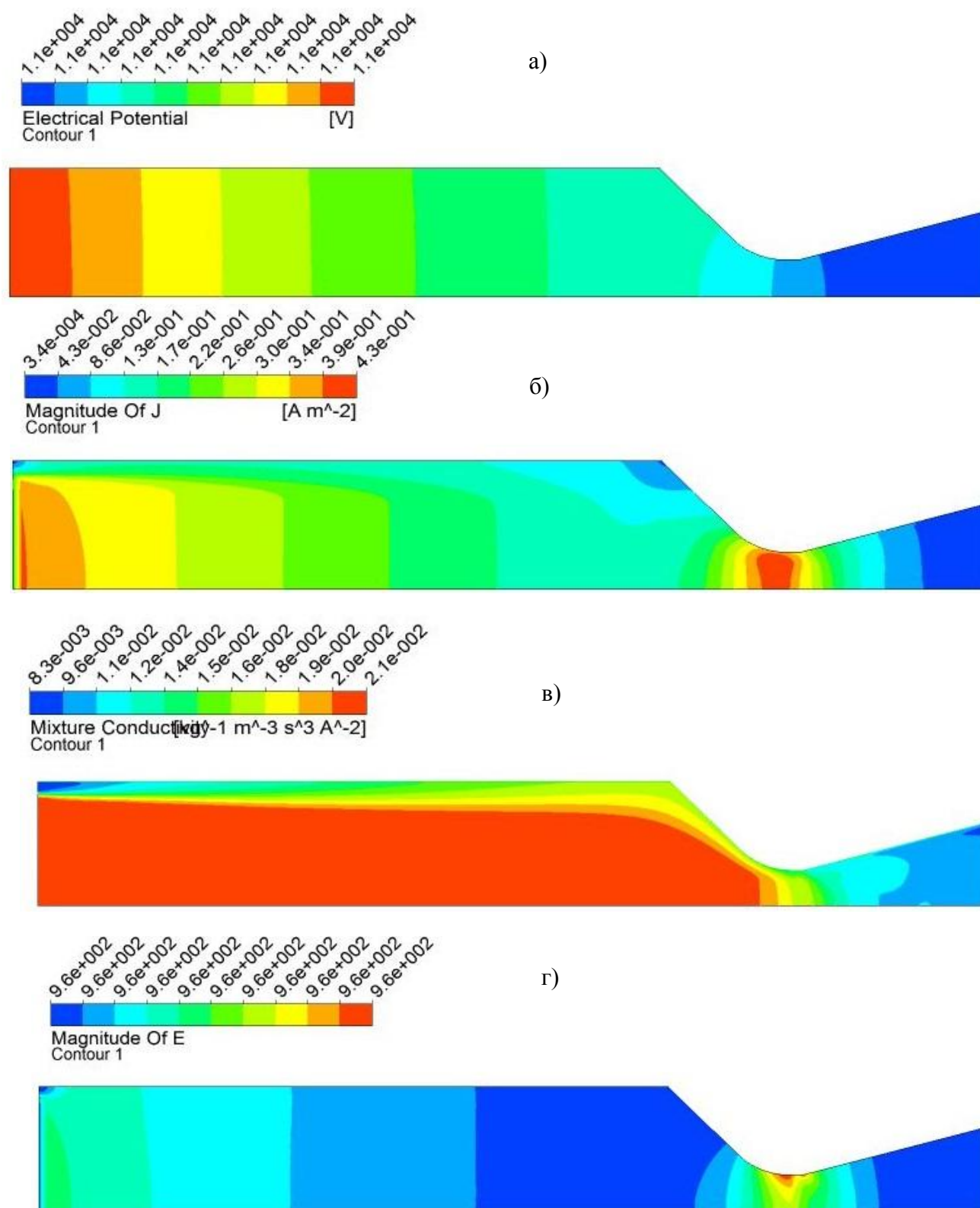


Рис. 6. Распределение электрического потенциала (а), плотности тока уноса (б), электропроводности (в) и напряженности электрического поля (г) по камере модельного ЖРД

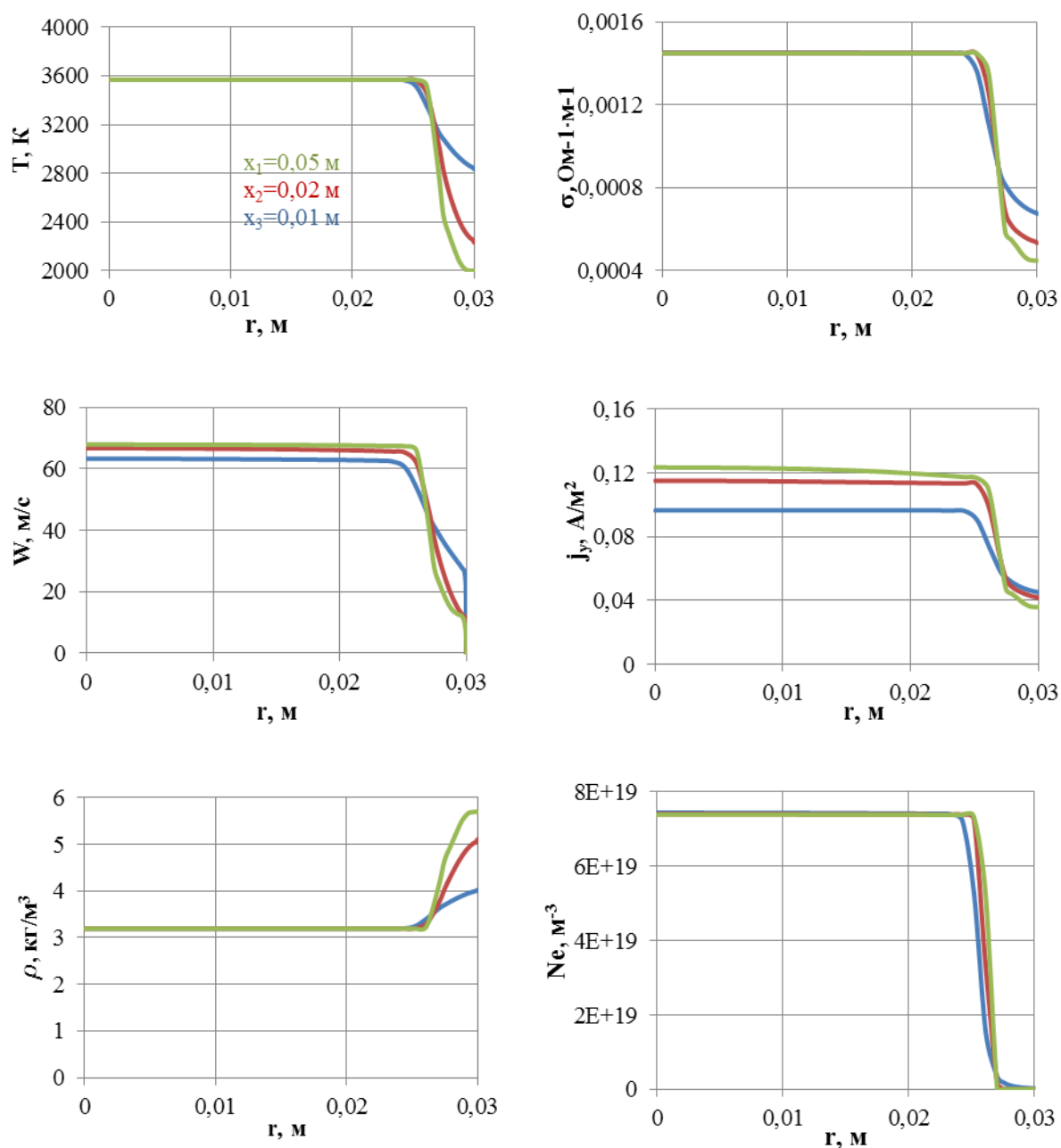


Рис. 7. Распределения плотности тока уноса (а), напряженности магнитного поля (б), температуры (в) и проводимости (г) по радиусу камеры модельного ЖРД при $x_1 = 0,05 \text{ м}$; $x_2 = 0,02 \text{ м}$; $x_3 = 0,01 \text{ м}$

Полученные результаты распределений по радиусу носят убывающий характер при движении от ядра потока к стенке. При отсутствии дрейфа электронов в стенку камеры зависимость убывает по причине понижения температуры в области низкотемпературного пристеночного слоя, созданного завесой.

Заключение

Полученные пространственные распределения выносимого из камеры электрического заряда (тока) и напряженности магнитного поля в зависимости от

режимных параметров двигателя могут быть использованы для реализации бесконтактных методов электростатической диагностики технического состояния ЖРД.

Список литературы

1. Головин Ю.М., Губертов А.М., Якушин Н.И. Новые подходы к диагностике жидкостных ракетных двигателей // Российский космос. 2002. № 2. С. 9-12.
2. Пинчук В.А., Грибакин В.А., Болдырев К.Б., Перфильев А.С. Диагностирование технического состояния жидкостных ракетных двигателей на основе электрофизических измерений // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2007. № 11. С. 17-23.
3. Нагель Ю.А. Электризация двигателей при истечении продуктов сгорания. Экспериментальные результаты // Журнал технической физики. 1999. Т. 69, № 8. С. 55-59.
4. Грибакин В.А., Поспишенко В.И., Болдырев К.Б., Султанов А.Э., Герасименко Е.Ю. 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. 88-93
5. Грибакин В.А., Поспишенко В.И., Болдырев К.Б., Султанов А.Э., Герасименко Е.Ю. Экспериментальное исследование спектра электромагнитных колебаний, создаваемых факелом модельного жидкостного ракетного двигателя в условиях стенда огневых испытаний // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2011. № 632. С. 94-99.
6. Пинчук В.А. Двигательная электризация как явление, отображающее развитие зарядовой неустойчивости в среде продуктов сгорания при истечении // Журнал технической физики. 1997. Т. 67, № 8. С. 21-24.
7. Белов И.А., Имаев С.А. Моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. СПб.: БалтГТУ, 2002. 108 с.
8. Белов Г.В., Трусков Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 96 с.
9. Ватажин А.Б., Лихтер В.А., Рушайло А.М. Электрические пульсации в турбулентных электрогазодинамических потоках. М.: Физматлит, 2005. 720 с.
10. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы: учеб. пособие. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 528 с.
11. Spitans S., Jakovics A., Baake E., Nacke B. Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. Part I. Implementation and verification of model // Metallurgical and Materials Transactions B. 2013. Vol. 44, no. 3. P. 593-605.

Modeling of Uneven Flow and Electromagnetic Field Parameters in the Combustion Chamber of Liquid Rocket Engine with a Near-wall Layer Available

A.V. Rudinskii^{1,*}, D.M. Yagodnikov¹

^{*}alex_rudinskiy@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: rocket engine, current density, magnetic field of combustion products

The paper concerns modeling of an uneven flow and electromagnetic field parameters in the combustion chamber of the liquid rocket engine with a near-wall layer available.

The research objective was to evaluate quantitatively influence of changing model chamber mode of the liquid rocket engine on the electro-physical characteristics of the hydrocarbon fuel combustion by-products.

The main method of research was based on development of a final element model of the flowing path of the rocket engine chamber and its adaptation to the boundary conditions.

The paper presents a developed two-dimensional non-stationary mathematical model of electro-physical processes in the liquid rocket engine chamber using hydrocarbon fuel. The model takes into consideration the features of a gas-dynamic contour of the engine chamber and property of thermo-gas-dynamic characteristics of the ionized products of combustion of hydrocarbonic fuel. Distributions of magnetic field intensity and electric conductivity received and analyzed taking into account a low-temperature near-wall layer. Special attention is paid to comparison of obtained calculation values of the electric current, which is taken out from intra-chamber space of the engine with earlier published data of other authors.

References

1. Golovin Yu.M., Gubertov A.M., Yakushin N.I. New approaches to the diagnosis of liquid rocket engines. *Rossiiskii kosmos*, 2002, no. 2, pp. 9-12. (in Russian).
2. Pinchuk V.A., Gribakin V.A., Boldyrev K.B., Perfil'ev A.S. Diagnosis of Technical State of Liquid-Fuel Rocket Engines on the Basis of Electrophysical Measurements. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* = *Mechatronics, Automation, Control*, app., 2007, no. 11, pp. 17-23. (in Russian).
3. Nagel' Yu.A. Electrical charging of engines in the efflux of combustion products. Experimental results. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1999, vol. 69, no. 8, pp. 55-59. (English version)

- of journal: *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 1999, vol. 44, no. 8, pp. 918-922. DOI: 10.1134/1.1259405).
4. Gribakin V.A., Pospishenko V.I., Boldyrev K.B., Sultanov A.E., Gerasimenko E.Yu. Analysis of the diagnostic informative of integral parameters of spectrum of electromagnetic waves in the vicinity of the liquid rocket engine torch in problem of identification mode of functioning camera. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhayskogo = Proceedings of Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky*, 2011, no. 632, pp. 88-93. (in Russian).
 5. Gribakin V.A., Pospishenko V.I., Boldyrev K.B., Sultanov A.E., Gerasimenko E.Yu. Experimental study of the spectrum of electromagnetic waves generated by model liquid rocket engine torch in a fire test stand. *Trudy Voenno-kosmicheskoi akademii im. A.F. Mozhayskogo = Proceedings of Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky*, 2011, no. 632, pp. 94-99. (in Russian).
 6. Pinchuk V.A. Jet engine electrification as a phenomenon reflecting the evolution of charge instability in an outflowing combustion product mixture. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1997, vol. 67, no. 8, pp. 21-24. (English version of journal: *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 1997, vol. 42, no. 8, pp. 872-876. DOI: 10.1134/1.1258733).
 7. Belov I.A., Imaev S.A. *Modelirovanie turbulentnykh techenii* [Modeling of turbulent flows]. St. Petersburg, Baltic STU Publ., 2002. 108 p. (in Russian).
 8. Belov G.V., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie khimicheskii reagiruyushchikh system* [Thermodynamic modeling of chemically reacting systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2013. 96 p. (in Russian).
 9. Vatazhin A.B., Likhter V.A., Rushailo A.M. *Elektricheskie pul'satsii v turbulentnykh elektrogazodinamicheskikh potokakh* [Electric pulsations in turbulent electrogasdynamic flows]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 720 p. (in Russian).
 10. Fortov V.E., Khrapak A.G., Yakubov I.T. *Fizika neideal'noi plazmy* [Nonideal plasma physics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 528 p. (in Russian).
 11. Spitans S., Jakovics A., Baake E., Nacke B. Numerical modelling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field. Part I. Implementation and verification of model. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2013, vol. 44, no. 3, pp. 593-605.