

УДК 533.59, 621.455

Канев С.В., Латышев Л.А., Нигматзянов В.В., Хартов С.А.

Моделирование рабочего процесса в газоразрядной камере высокочастотного ионного двигателя

Аннотация

В работе приведены результаты напряженности электрического поля, температура электронов в камере радиочастотного ионного двигателя в зависимости от условий разряда – шага намотки индуктора, наличия ионно-оптической системы.

Ключевые слова: электроракетный двигатель; радиочастотный ионный двигатель; высокочастотный разряд; моделирование.

Введение

В последнее время наметились тенденции развития современных и перспективных космических аппаратов (КА) – рост энерговооруженности и сроков активного существования, увеличение полезной нагрузки, расширение номенклатуры КА по массе (от микроспутников до тяжелых спутниковых платформ). Все это обуславливает появление новых задач для бортовой двигательной установки (ДУ), ужесточение требований к двигателям с точки зрения их эффективности, надежности и совместимости с аппаратурой КА. Для решения большинства задач возникает потребность в создании двигателей нового поколения, отличающихся, в частности, более высоким значением удельного импульса тяги (до 20000...30000 м/с и выше), эффективностью и длительным временем активного существования.

Решение этих проблем возможно при использовании при использовании ЭРД.

К настоящему времени разработано целое семейство электроракетных двигателей, отличающихся и способом ускорения рабочего тела, и режимом работы (импульсный или непрерывный). Среди всех модификаций ЭРД наиболее эффективными являются

электростатические двигатели (ЭСД). В ЭСД рабочее тело в виде положительно заряженных частиц (ионов) ускоряется в электростатическом поле с последующей компенсацией, вытекающей из двигателя, струи электронами. Классическим представителем ЭСД является ионный двигатель (ИД). В ИД функционально разделены область генерации плазмы – газоразрядная камера (ГРК) и область ускорения ионов – ионно-оптическая система (ИОС). Для ионизации рабочего тела применяется электрический разряд постоянного тока – ИД по схеме Кауфмана [1], или высокочастотный разряд – радиочастотный ионный двигатель (РИД) [2]. Данная работа посвящена рассмотрению рабочего процесса в ВЧ ИД.

1. Особенности рабочего процесса и конструкции радиочастотных ионных двигателей

Типовая конструктивная схема РИД приведена на рисунке 1. [2] Основными узлами данного изделия являются ГРК, индуктор, ВЧ-генератор с согласующим устройством, ИОС и нейтрализатор. ВЧ-генератор дает синусоидально изменяющийся по времени ток; согласующее устройство позволяет согласовать режим работы генератора и нагрузки; ИОС необходима для извлечения и ускорения ионов пучка; нейтрализатор используется для компенсации заряда в струе.

Переменный ток, текущий по индуктору, создает изменяющееся по времени электромагнитное поле, которое проникает в ГРК, где энергия поля поглощается электронами, а они, в свою очередь, участвуя в столкновениях с атомами, ионизуют их.

В зависимости от частоты электромагнитного излучения и наличия или отсутствия внешнего магнитного поля могут быть реализованы различные модели двигателей. Для того что бы переменное электрическое поле проникало в разрядную камеру, её стенки должны быть выполнены из диэлектрического материала, например из кварца или же из любого другого материала с малым тангенсом угла диэлектрических потерь.

Использование безэлектродной системы ионизации рабочего тела выгодно отличает РИД от ИД по схеме Кауфмана. Она позволяет изначально избавиться от всех проблем, возникающих при ионной эрозии электродов, «отравлении» эмиттера катода примесями в рабочем теле, растрескивании элементов катода и т.п.

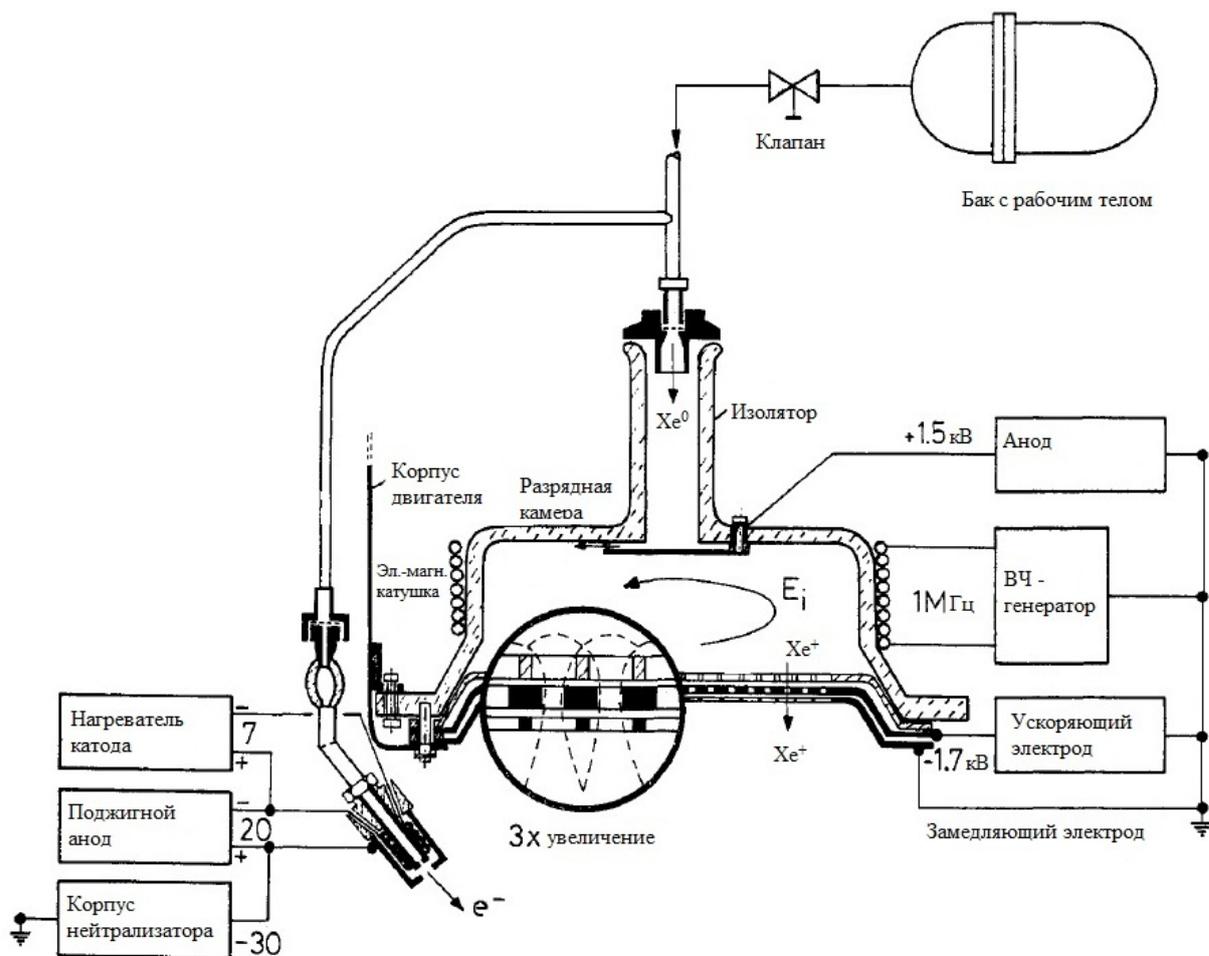


Рисунок 1. Радиочастотный двигатель [2]

ВЧ-разряд создает неравновесную плазму, которая служит источником ионов. На рисунке 2 приведены экспериментальные данные [3] о распределении параметров в ГРК ВЧ ИД работающего на ртути диаметром 100 мм. Из рисунка видно, что плотность заряженных частиц уменьшается от центра камеры к стенкам, температура электронов, напротив, растет и достигает на стенках величины приблизительно 8 эВ. Величина напряженности электрического поля увеличивается от центра камеры к её стенкам, а плотность ионного тока, перед ИОС, остается одинаковой на всем радиусе.

Ионы извлекаются из плазмы, ускоряются и фокусируются в пучок ИОС - трех-сеточной структурой с множеством круглых отверстий

Можно отметить преимущества данного типа двигателя:

- РИД работает без необходимости создания дополнительного магнитного поля. Эффективность генерации ионов настолько высока, что избавляет от необходимости удерживания электронов магнитным полем.

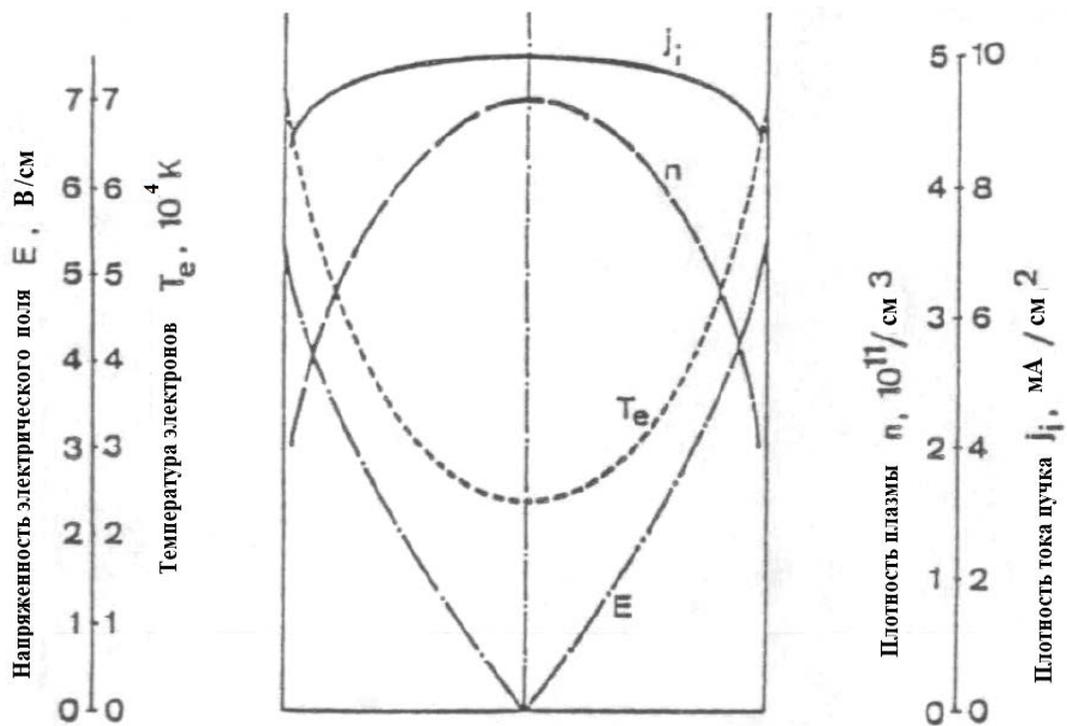


Рисунок 2. Изменение по радиусу характеристик разряда (напряженность электрического поля, температура электронов, плотность плазмы, плотность тока пучка) [3]

- В ГРК РИД в отличие от ИД схемы Кауфмана низкое падение потенциала между плазмой и ограничивающими ее элементами, которое в первую очередь пропорционально температуре электронов, предотвращает распыление материала стенок ГРК и эмиссионного электрода ИОС.
 - РИД обеспечивает малое количество многозарядных положительных ионов в ГРК и сформированном пучке, вследствие низкой температуры электронов. Количество дважды ионизованных атомов менее 1%, количество атомов с более высокой степенью ионизации незначительно.
 - РИД обладает линейной зависимостью между плотностью плазмы и мощностью ВЧ-разряда. При увеличении мощности разряда возрастает количество ионизованных атомов, но возрастает количество ионов со степенью ионизации более единицы. Данная зависимость позволяет создавать небольшие (сравнимые по размерам с двигателями по схеме Кауфмана) двигатели и простое и эффективное управление тягой на большом промежутке времени.
 - Простота изготовления и эксплуатации.
- Вместе с тем потери в разряде у РИДа выше, чем у ИД по схеме Кауфмана, что приводит к снижению полного КПД.

2. Разработка математической модели рабочего процесса в ГРК РИД.

При создании моделей ВЧ ИД важной задачей является обоснование влияния параметров ГРК на тяговые характеристики и эффективность двигателя. Необходимо, как численно, так и экспериментально, исследовать влияние геометрических параметров индуктора, формы и материала ГРК с целью повышения эффективности процессов ионизации рабочего тела.

На тяговые характеристики двигателя оказывают влияние параметры ГРК. Так в работе [4] показано, что изменение формы ГРК с цилиндрической на полусферическую или эллиптическую, позволяет уменьшить на 20% до 25% энергию, затрачиваемую на ионизацию рабочего тела. В [4] отмечается, что на характеристики ГРК влияют взаиморасположение индуктора и ИОС, а также шаг между витками индуктора. По мнению авторов, для проведения систематических исследований влияния различных факторов на характеристики ГРК, перспективным является разработка математической модели в ГРК ВЧ ИД.

ВЧ-ток в индукционной катушке ВЧ-генератора создает в ионизаторе – ГРК, более или менее аксиальное магнитное поле, наводящее вихревое электрическое поле с напряженностью E , которое ускоряет электроны газового разряда и способствует ионизации атомов рабочего тела. При этом для определения магнитного поля B можно записать следующее равенство:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{J}{r^3} \cdot [d\vec{l} \times \vec{r}], \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, равная $4\pi \times 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{m}$, $d\vec{l}$ — элемент катушки, J — ток катушки, \vec{r} — радиус-вектор от элемента катушки до любой точки, в которой генерируется магнитное поле $d\vec{B}$.

Интегрирование по всей катушке позволяет определить $\vec{B}(r, h)$ (в осесимметричном случае). Затем, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, получаем:

$$E = -\frac{d\phi}{dt}. \quad (2)$$

Магнитный поток ϕ через поверхность круга πR^2 (с радиусом R) определяется как:

$$\phi = \int B(r, h) dA = \int_0^R B(r, h) \cdot 2\pi r \cdot dr, \quad (3)$$

где h — расстояние по оси камеры. Подставляя $\vec{B}(r, h)$ из уравнения (1) и ϕ из уравнения (3)

в уравнение (2), получаем $E(h,R)$. Отметим, что с увеличением расстояния от оси r напряженность поля E возрастает. Строго говоря, из-за наличия скин-эффекта в пристеночной области напряженность поля E растет не линейно.

Поскольку E пропорциональна B_0 , то плотность заряженных частиц n , а также плотность ионного тока j_i , генерируемого в двигателе, зависят от ВЧ-мощности, поглощенной плазмой разряда, поскольку электроны приобретают энергию необходимую для ионизации в электромагнитном поле, т.е. от введенной в разряд мощности. Согласно экспериментальным данным [3], температура электронов T_e также растет с увеличением E и максимальна на стенках ионизатора.

Величины n и T_e определяют плотность ионного тока:

$$j_i = 0,6065 * q_i * n * \sqrt{\frac{k * T_e}{m_i}}, \quad (4)$$

где q_i – заряд иона, равный заряду элементарному заряду – e , m_i – масса иона, k — постоянная Больцмана.

Если (см. уравнения (1) и (2)) амплитуда и частота тока J в индукторе поддерживаются на постоянном уровне (например, порядка 3А и 1МГц), индуцированное электрическое поле $E(r,h)$ и скорость ионизации могут быть увеличены путем оптимизации геометрии индуктора. Это допущение основано на следующем: для равновесия состояния плазмы необходимо, чтобы скорость ионизации была равна скорости потери ионов. К последней относится рекомбинация ионов и электронов на стенках ионизатора, а также выход ионов из ионизатора через отверстия в сетке ионно-оптической системы. Для увеличения доли последнего должна быть увеличена интенсивность электрического поля E , особенно вблизи ИОС.

Для оценки влияния геометрии камеры и конфигурации индуктора разработана математическая модель, позволяющая найти электромагнитное поле в ГРК.

Расчет полей по уравнениям (1),(2),(3) слишком трудоемок и требует написания своей собственной программы, но использование стандартных программ для расчета поля переменных токов в заданной пользователем геометрии, значительно облегчает работу и дает возможность сэкономить рабочее время. Для реализации математической модели использовалась программа Ansys Maxwell®, с помощью которой возможно рассчитывать распределение переменных токов в осесимметричной конфигурации, а также получать их графическое изображение. Более того, благодаря встроенному калькулятору полей, мы имеем возможность найти и графически изобразить вихревое электрическое поле, а также другие

величины.

Задача определения вихревых токов для гармонически изменяющихся во времени полей описывается уравнениями Максвелла

$$\nabla \times H = J + \frac{dD}{dt}, \quad (4)$$

$$\nabla \times E = - \frac{dB}{dt}, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot D = \rho, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (7)$$

где $D = \epsilon_0 E$ – электрическая индукция, где ϵ_0 – электрическая постоянная, $H = \frac{B}{\mu_0}$ – напряженность магнитного поля, $\rho = e(n_i - n_e)$ – плотность зарядов, $J = \sigma E$ – плотность тока проводимости, где σ – электропроводность.

Положим, что все величины, зависящие от времени имеют следующий вид:

$$F(t) = F_m \cos(\omega t + \theta). \quad (8)$$

Используя формулу Эйлера

$$e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha, \quad (9)$$

и, полагая, что $\alpha = \omega t + \theta$, а $F(t)$ равно действительной части $e^{i(\omega t + \theta)}$:

$$F(t) = \text{Real}(F_m e^{i(\omega t + \theta)}) = \text{Real}(F_m (\cos(\omega t + \theta) + i \sin(\omega t + \theta))) = F_m \cos(\omega t + \theta). \quad (10)$$

Поскольку любая изменяющаяся во времени величина может быть представлена в виде

$F_m * e^{i\theta} * e^{i\omega t}$, то $\frac{dD}{dt}$ и $\frac{dB}{dt}$ равны $i\omega D$ и $i\omega B$ соответственно.

Следовательно, исходя из этих упрощений и отношений $D = \epsilon_0 E$, $H = \frac{B}{\mu_0}$, $J = \sigma E$, получим что уравнения (4),(5),(6),(7) преобразуются к следующему виду:

$$\nabla \times \frac{B}{\mu_0} = \sigma E + i\omega \epsilon_0 E, \quad (11)$$

$$\nabla \times E = -i\omega B, \quad (12)$$

$$\nabla \cdot \varepsilon E = \rho, \quad (13)$$

$$\nabla \cdot B = 0. \quad (14)$$

Индукция магнитного поля определяется как ротор магнитного потенциала электромагнитного поля A , тогда

$$B = \nabla \times A. \quad (15)$$

Подставляя это выражение в уравнение (5), получаем

$$\nabla \times \left(E + \frac{dA}{dt} \right) = 0. \quad (16)$$

Таким образом, решая уравнение (16), с учетом (10), получим, что

$$E = -\nabla\varphi - i\omega A. \quad (17)$$

В данной работе учитывается изменение напряженности поля E , вследствие изменения члена $i\omega A$, стационарная компонента поля $-\nabla\varphi$ принимается равной нулю. Отсюда конечное выражение для напряженности вихревого электрического поля будет определяться как

$$E = -i\omega A. \quad (18)$$

Следует отметить, что определение стационарного поля $\nabla\varphi$, является следующим шагом разработки модели, при этом будет необходимо учесть наличие заряженных частиц (ионов и электронов) в камере двигателя.

Встроенный калькулятор в программе Ansys Maxwell® дает возможность рассчитать E , а в пост-процессоре можно графически получить вихревое электрическое поле в камере двигателя. На рисунках 3, 4 и 5 представлена амплитуда индуцированного электрического поля двигателя РИД-10. На рисунке 3 показаны эквипотенциальные линии поля, при токе равном 7 А с частотой в 1 МГц. Расстояние между витками было постоянным и равнялось 2 мм. При добавлении в модель тонких пластин, выполненных из молибдена и имитирующих электроды ИОС (эмиссионный и ускоряющий), на рисунке 4 видно, что поле значительно меняет свою конфигурацию, из-за скин-эффекта в проводящих электродах. На рисунке 5 изображена картина поля при изменении шага намотки индуктора. Шаг был выбран произвольно, но с соблюдением условия более плотной намотки на выходе из двигателя. Конфигурация полей, изображенных на рисунках 4 и 5, была получена при том же токе и

частоте – 7 А и 1 МГц.

В компании-разработчике двигателя РИД-10 – EADS Astrium была разработана программа [5] для оптимизации геометрии камеры и катушки, одним из блоков которой являлся расчет электрического поля в ГРК (рис. 6). При сравнении картины поля, полученной в данной работе, с результатами расчета [5], видно их согласие, как по величине, так и по геометрии.

После расчета электромагнитных полей, стало возможным определить влияние величины E на электроны, т.к. энергия электромагнитного поля поглощается ими, как наиболее подвижными частицами.

Энергию электронов, в данном случае, можно определить как сумму двух составляющих – тепловую и индуцированную внешним полем. Тепловой составляющей энергии в модели мы пренебрегаем и предполагаем, что электроны не участвуют в процессах столкновения, диффузии, теплопроводности и т.п.

Электрон приобретает в переменном электрическом поле кинетическую энергию равную $\frac{mv^2}{2}$, при этом скорость частиц можно определить как

$$v = -\frac{a_0}{\omega} \cos \omega t, \quad (19)$$

а амплитудное значение ускорения

$$a_0 = \frac{eE}{m}, \quad (20)$$

где m – масса электрона, e – заряд.

Т.к.

$$\cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}, \quad (21)$$

и, усредняя по времени скорость, можно получить для кинетической энергии следующее соотношение

$$E_{кин} = \frac{ma_0^2}{\omega^2} \frac{1}{4}, \quad (22)$$

Кинетическую энергию частиц плазмы также можно выразить через аналог температуры электронов – «эффективную температуру»

$$\frac{ma_0^2}{\omega^2} \frac{1}{4} = \frac{3}{2} kT_{эфф}, \quad (23)$$

где k – постоянная Больцмана. Отсюда найдем «эффективную температуру» электронов.

$$T_e = \frac{1}{6} \frac{e^2}{\omega^2 k m} E^2, \quad (24)$$

Умножив, полученные значения квадрата напряженности поля E , на постоянную величину, получим значение температуры электронов в камере двигателя. Полученные значения $T_{\text{эфф}}$ представлены на рис. 7 и 8.

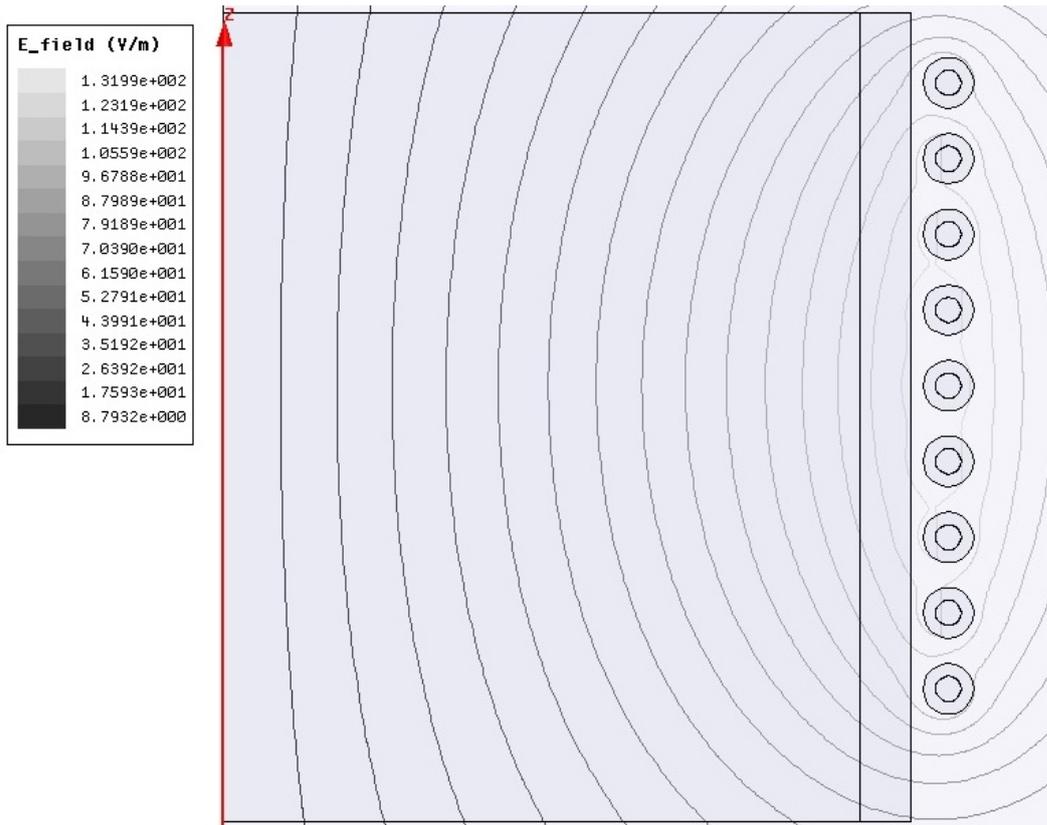


Рисунок 3. Индуцированное электрическое поле в РИД-10, ток 7А, частота – 1 МГц

Из рисунков 7 и 8, видно, что $T_{\text{эфф}}$ минимальна на оси двигателя и растет к стенкам камеры, аналогичная зависимость также наблюдалось и в эксперименте [3].

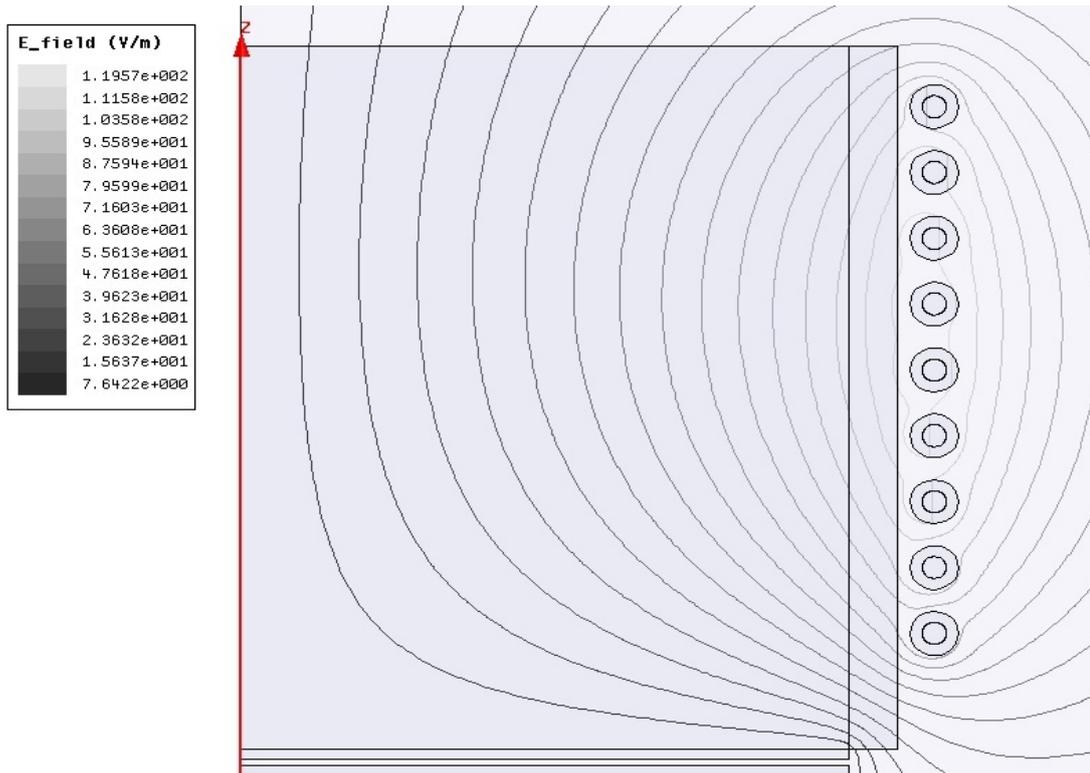


Рисунок 4. Индуцированное электрическое поле в РИД -10, ток 7А, частота – 1 МГц, при наличии ИОС

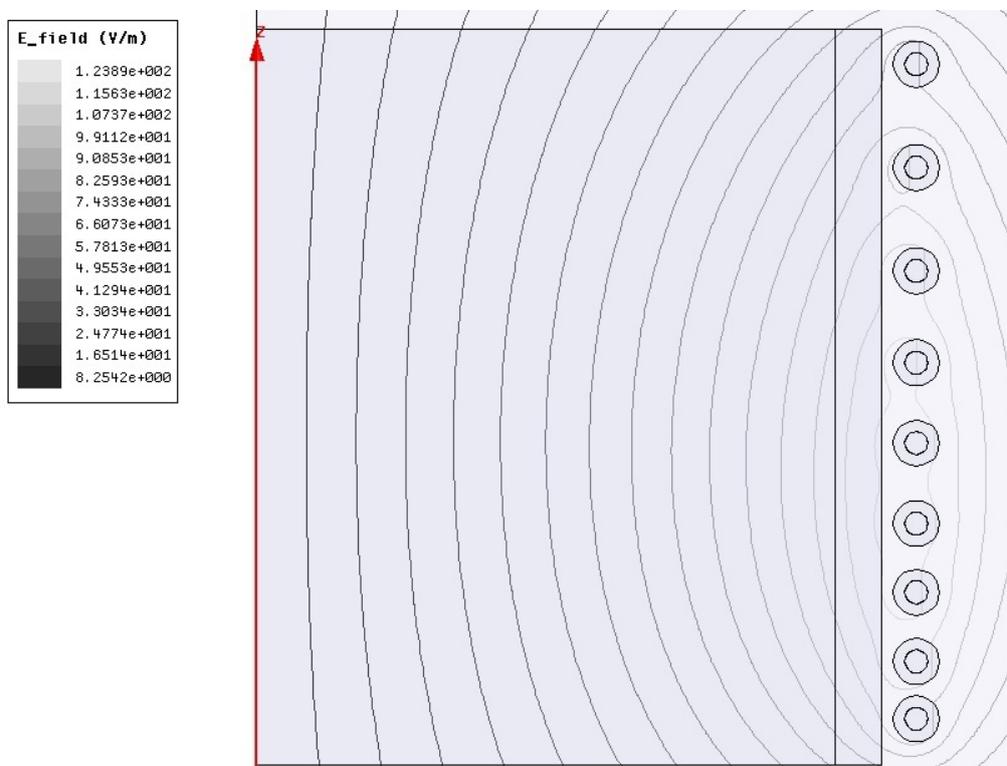


Рисунок 5. Индуцированное электрическое поле в РИД -10 при изменении шага катушки индуктора. Ток 7 А, частота – 1МГц

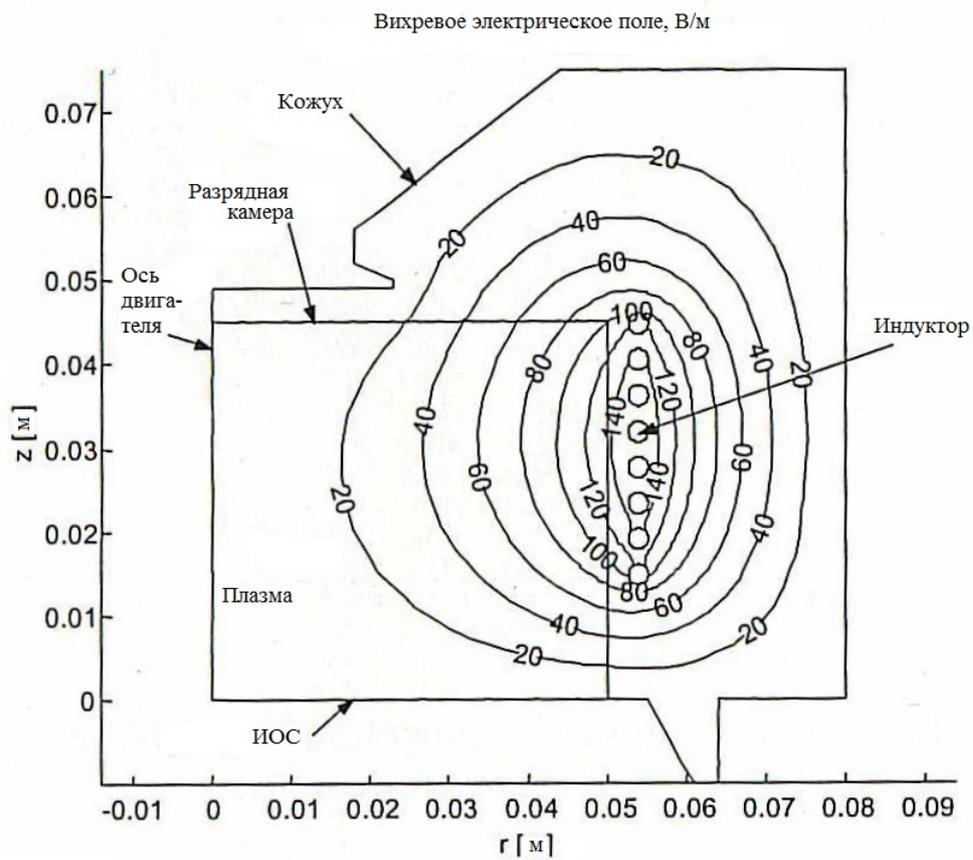


Рисунок 6. Электрическое поле двигателя РИД -10, результаты расчета в EADS Astrium [5]

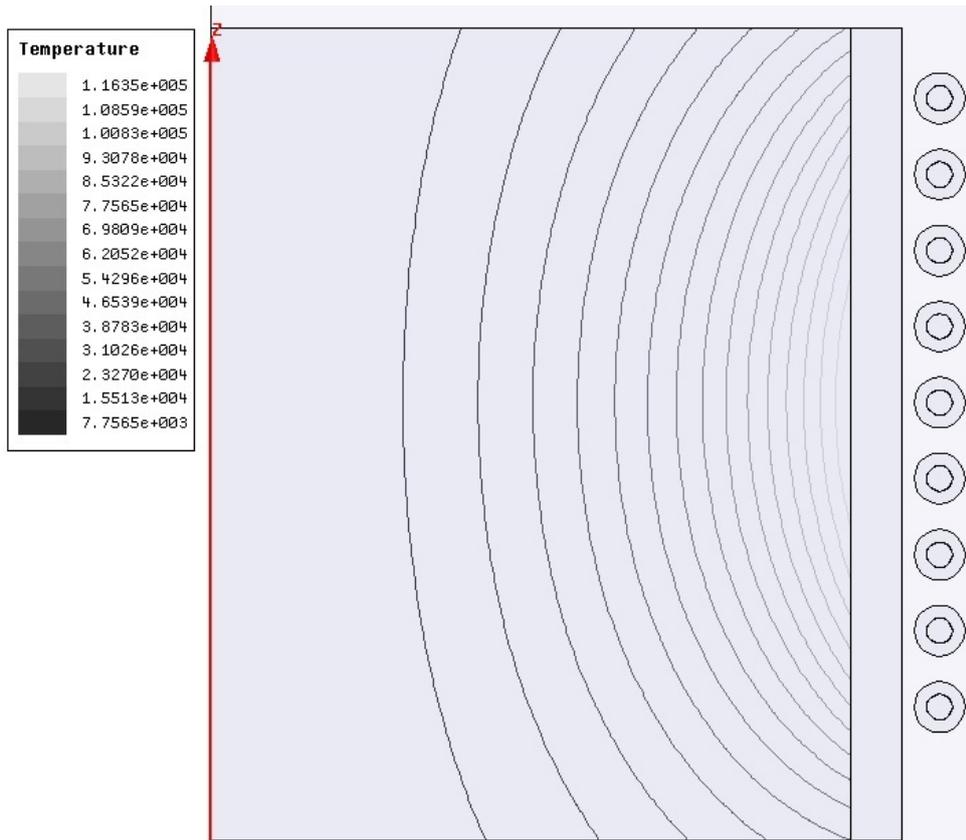


Рисунок 7. Температура, приобретаемая электронами в индуцированном поле (камера без ИОС)

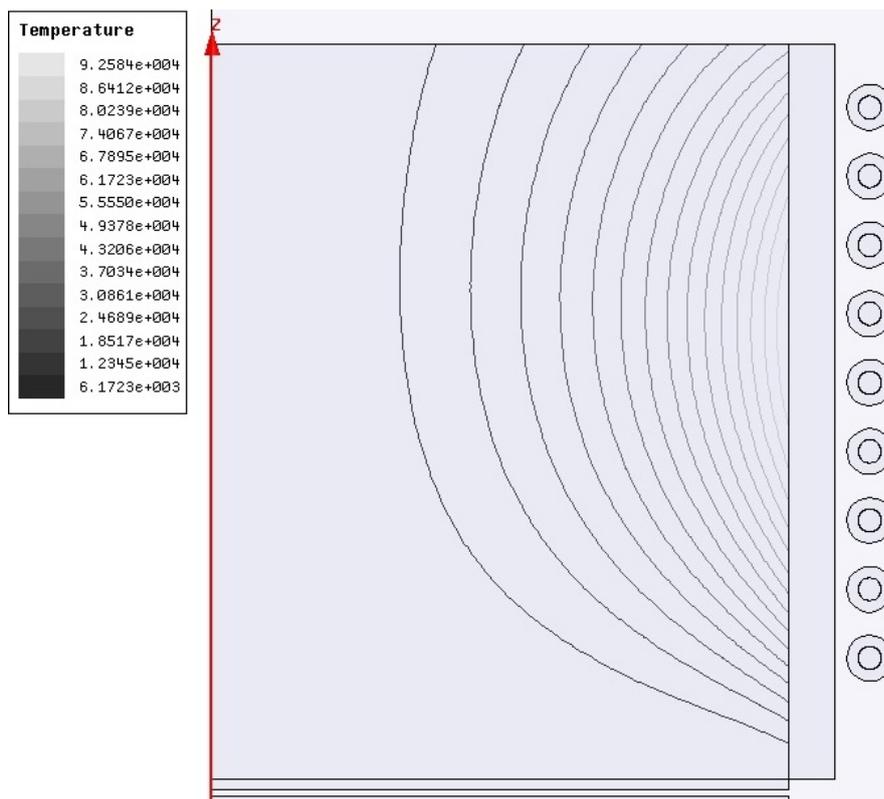


Рисунок 8. Температура, приобретаемая электронами в индуцированном поле (камера с ИОС)

Из полученных данных видно, что распределение напряженности поля и температуры электронов аналогичны результатам, полученных ранее экспериментально в Гиссенском университете (рис.2) и рассчитанными в EADS Astrium. Стоит отметить, что расчет полей в данной программе позволяет учесть влияние ИОС и её нагрев, вследствие вихревых токов, шаг витков катушки индуктора, материал камеры. Импорт значений найденных величин в узлах задаваемой сетки, позволяет использовать их для дальнейшего анализа. Последующее развитие модели должно включать в себя процесс ионизации рабочего тела, концентрацию ионной, электронной и нейтральной компоненты в ГРК ВЧ ИД.

Выводы

Представлена модель расчета энергии приобретаемой электронами в индуцированном электрическом поле; для расчетов использовано готовое программное обеспечение, позволяющее быстро оценить локальные параметры разряда в ГРК радиочастотного ионного двигателя; на основании полученных данных, стало возможно дать предварительную оценку использования геометрии катушки, а также материала и геометрии камеры.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки на исследования проводимые под руководством ведущих ученых (постановление правительства РФ № 220).

5. Библиографический список

1. Kaufman H.R., Technology of Electron-Bombardment for Thruster.//Advances in Electronics and Electron Physics. – 1974. – Vol.36
2. Groh K.H. , Leiter H.J.,Loeb H.W. RIT 15 – a medium range radio-frequency ion thruster // 1997ESASP.398..377G - 1997.- с.377-382
- 3.Groh K.H. and Loeb H.W. State-of-the-Art of Radio-Frequency Ion Thrusters // Journal of Propulsion and Power. - 1991. - VOL. 7, NO. 4. - с. 573-579.
4. Killinger R., Bassner H., Müller J, Kukies R. Status of the RIT_XT High Performance RF-Ion Thruster Development // 2000ESASP.465..443K - 2000.- с.443-450
5. Martin F. C. RF Ion Thruster Design Software Based on Numerical Modelling // ESA SP-465 2000-3274. - 2000. - с. 419-422

Сведения об авторах

Канев Степан Васильевич, старший научный сотрудник Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., e-mail: k208@mai.ru.
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

Латышев Леонид Алексеевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., e-mail: k208@mai.ru.
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

Нигматзянов Владислав Вадимович, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета), e-mail: k208@mai.ru.
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

Хартов Сергей Анатольевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., e-mail: k208@mai.ru.
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;