

УДК 629.78:621.368

Абляционный импульсный плазменный двигатель для малоразмерных космических аппаратов

Дьяконов Г.А., Любинская Н.В.*, Семенихин С.А. Хрусталеv М.М.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: riame3@sokol.ru*

Аннотация

Рассматривается применение абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД) для малоразмерных космических аппаратов (КА) с запасаемой мощностью ~25 Вт. В рамках работы проведены расчётные и экспериментальные исследования лабораторных моделей. Разработана физико-математическая модель процессов происходящих в абляционном импульсном плазменном двигателе данного типа. Результаты полученные на лабораторных моделях были успешно внедрены на экспериментальный образец ДУ ИПД-120 с запасаемой энергией 20 Дж, предназначенного для поддержания и коррекции орбиты малого низкоорбитального космического аппарата массой менее 100 кг.

Ключевые слова: ускорение плазмы, плазменный сгусток, абляционный импульсный плазменный двигатель.

Введение

В последнее время уделяется особое внимание малоразмерным космическим аппаратам (МКА) с массой от единиц до нескольких десятков килограммов. Это объясняется целым рядом факторов, таких как:

- сокращение сроков создания космических аппаратов;
- многократное снижение стоимости;
- существенное снижение затрат на выведение КА;
- значительно меньшие финансовые потери в случае отказа;
- функциональными возможностями, свойственными для МКА.

Согласно принятой классификации такие аппараты делятся на микро – с массой 20...100 кг, нано – с массой от 1 до 10 кг, пико – с массой менее килограмма. Аппараты с массой менее 1 кг в данной статье не рассматриваются.

Управление движением МКА позволяет расширить спектр их функциональных возможностей, поэтому существует необходимость в разработке высокоэффективного малогабаритного двигателя коррекции и поддержания орбиты. На такую двигательную установку (ДУ), исходя из характеристик МКА, накладываются жесткие ограничения по величине допустимой массы и потребляемой энергии. Она должна быть легкой, малогабаритной и дешевой, обладающей высокой эффективностью в области потребляемой мощности до ~ 25 Вт.

Импульсный плазменный двигатель (ИПД) является одним из перспективных типов двигателей для применения в составе подобной ДУ. Он обладает целым рядом важных достоинств. Это постоянная готовность к работе, предельно малая инерционность и практически полное отсутствие импульса последствия, возможность точной дозировки импульса, достаточно высокий ресурс, а также линейный ход тяговой регулировочной характеристики (зависимости тяги от потребляемой мощности). Его принцип действия состоит в ионизации рабочего тела и последующем его ускорении в скрещенном электрическом и магнитном полях.

На протяжении всей истории развития микро АИПД во всём мире были исследованы различные конфигурации разрядного канала, принципиальные схемы, был осуществлён подбор конденсаторов, рассмотрены варианты различных рабочих тел. Основные проблемы, с которыми столкнулись исследователи процессов АИПД за рубежом, это поддержание длительной работы двигателя, которому препятствует науглероживание поверхности. [1,2]

Наиболее успешный вариант из зарубежных образцов АИПД был установлен на спутнике Earth Observer 1 (ЕО-1), который предназначался для системы угловой стабилизации аппарата дистанционного зондирования Земли. Однако он не может претендовать на двигатель коррекции МКА в связи с высокой потребляемой мощностью (60 Вт) и низким суммарным импульсом (0,46 кН·с). [1-7]

1. Основные особенности абляционного импульсного плазменного двигателя рельсовой геометрии.

Основными элементами любого импульсного плазменного двигателя являются накопитель электромагнитной энергии, блок коммутации или система инициирования разряда, система хранения и подачи рабочего вещества, электроды.

Среди большого числа различных импульсных плазменных двигателей наиболее просты в конструктивном исполнении эрозионные, поскольку в них отсутствует газовый клапан и сравнительно просто обеспечивается подача рабочего вещества. Принципиальная схема подобного ИПД, а именно абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД), получившего развитие в НИИ ПМЭ МАИ, представлена на рисунке 1.

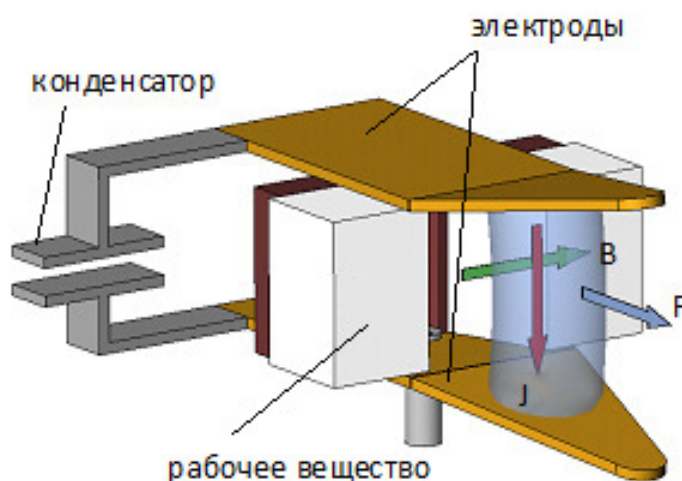
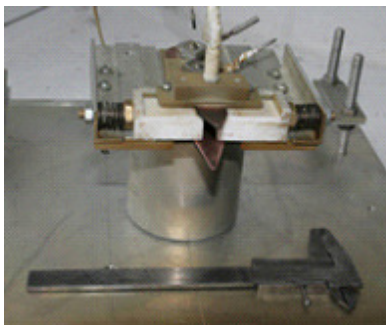


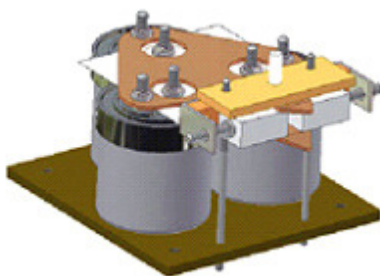
Рисунок 1. Принципиальная схема импульсного плазменного двигателя рельсовой геометрии с боковой подачей рабочего тела.

2. Экспериментальные исследования АИПД малой энергии.

В НИИ ПМЭ МАИ для исследования рабочих процессов в микро-АИПД была создана серия лабораторных моделей двигателей диапазона мощностей от 6 до 45 Вт, работающий на фторопласте. Их внешний вид приведен на рисунке 2. [7,9]



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Внешний вид лабораторных образцов АИПД.

а – АИПД-8, б – АИПД-5-3б, в- АИПД-ит.

Первые эксперименты с моделями микро-АИПД различного исполнения были посвящены определению факторов влияющих на работоспособность двигателя и выработке технических решений позволяющих их устранить. Необходимо было добиться отсутствия науглероженных участков на рабочей поверхности шашек фторопласта, не допустить перегрева конденсаторов и их перегрузки по току. Так на модели АИПД-8 при энергии 8,44 Дж (напряжение 1500 В) была зафиксированна незначительная науглероженность краев шашки вблизи электродов (рисунок 3), которую удалось устранить исключив тепловой контакт шашек с электродами. Однако при снижении энергии (напряжение 1400 В и менее), несмотря на принятые меры, зачернение углеродом рабочей поверхности шашек возникает вновь и все попытки его устранить к успеху не привели. Таким образом, только при энергии 8,44 Дж и более модель АИПД-8 можно было признать работоспособной.

Параметрические испытания моделей микро двигателей показали, что их характеристики ведут себя типичным для АИПД образом, а именно большей энергии соответствует больший удельный импульс и зависимость эта линейная. Осциллограммы тока представляли собой периодическую затухающую кривую с большим числом полупериодов (рисунок 3) характерную для АИПД энергией менее 20 Дж.

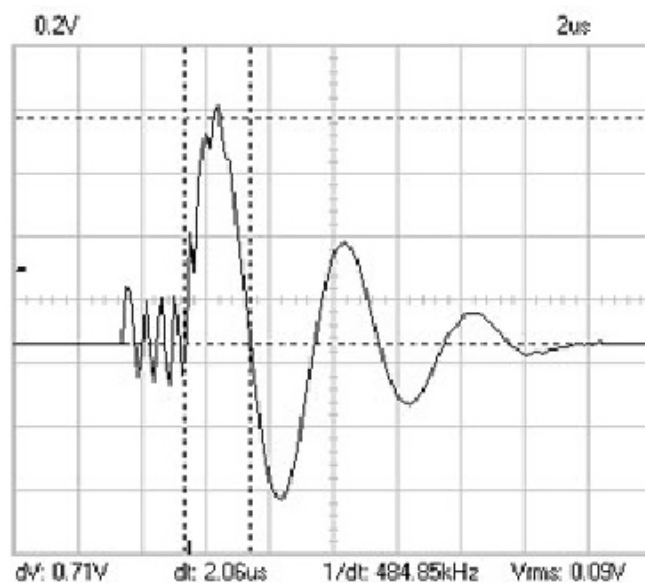


Рисунок 3 – Типичная осциллограмма разрядного тока с пятью полупериодами для АИПД-8.

Для оценки пределов работоспособно микро-АИПД по тепловому критерию использовалась модель АИПД-5 с конденсатором емкостью 4 мкФ. В процессе этих исследований, путем варьирования энергии разряда и мощности двигателя, изучалась динамика нагрева и остывания конденсатора, как элемента конструкции АИПД с наиболее жесткими температурными ограничениями. Измерялась температура вывода конденсатора и его боковой поверхности. Было установлено,

что температура вывода конденсатора отличается от температуры его боковой поверхности не только существенно более резким характером своего роста, но и уровнем величины, которая приближается и даже превышает верхний предел рабочего интервала температур конденсатора ($+85^{\circ}\text{C}$). То есть величина температуры выводов конденсаторов является важным показателем, определяющим возможность длительной работы двигателя. Прогрев массива конденсатора до равновесной температуры происходит медленными темпами, поскольку он сам по себе имеет достаточно большую массу и кроме того закреплен на алюминиевой платформе, образующей с конденсатором тепловую пару. Результаты температурных испытаний дали возможность определить допустимую максимальную мощность (порядка 25 Вт), ниже которой критического нагрева конденсатора не наблюдается. [7,8] Это позволило регулировать режимы работы, оставаясь в диапазоне работоспособности модели по тепловым показателям. Недостатком модели АИПД-5 являлось существенное превышение значения разрядного тока над предельно допустимой величиной характерной для использовавшегося типа силового конденсатора. С учетом полученных данных была разработана модель микро-АИПД с конденсаторной батареей, состоящей из трех параллельно соединенных конденсаторов емкостью 1,5 мкФ каждый – АИПД-5-3б. Данный вариант исполнения двигателя позволил не только уменьшить ток приходящийся на каждый из конденсаторов, но и практически вдвое снизить индуктивность электрической цепи, которая составила $22 \cdot 10^{-9}$ Гн по сравнению с $45 \cdot 10^{-9}$ Гн у модели АИПД-5. На модели АИПД-5-3б при частоте работы 5 Гц

науглероживание шашек рабочего тела отсутствовало при снижении энергии вплоть до 2,25 Дж (напряжение 1000 В). Ее характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики модели АИПД-5-3б:

Емкость	Напряжение	Частота	Ед. импульс тяги	Энергия	Мощность
С, мФ	U, В	f, Гц	мН*с	J, Дж	N, Вт
4,5	1500	5	0,1120	5,0625	25,3125
4,5	1400	5	0,0932	4,41	22,05
4,5	1300	5	0,0730	3,8025	19,0125
4,5	1200	5	0,0620	3,24	16,2
4,5	1100	5	0,0466	2,7225	13,6125
4,5	1000	5	0,0426	2,25	11,25

Важным фактором, влияющим на эффективное протекание процесса абляции фторопласта в разрядном канале, являются геометрические параметры разрядного канала. Исследования показали, что с увеличением расстояния между шашками растет КПД модели, однако при слишком большой величине этого промежутка начинается процесс науглероживания разрядного канала, то есть модель перестает быть работоспособной. На первой стадии испытаний модели АИПД-5-3б были определены оптимальные расстояние между шашками фторопласта и их геометрические размеры и все последующие эксперименты проводились при данных размерах разрядного канала. В процессе работы АИПД, на этапе приработки шашек рабочего тела, геометрия его разрядного канала постоянно меняется, что в некоторых случаях, при отсутствии стабилизации формы канала, отражается на работоспособности двигателя. Длительные испытания модели АИПД-5-3б показали,

что вначале ее работы выработка шашек рабочего тела принимает бочкообразную форму (рисунок 4), затем данная форма стабилизируется и продолжает оставаться неизменной в течение всей последующей работы двигателя. Это говорит о равномерной выработке шашек после этапа их приработки и подтверждает правильность выбора параметров разрядного канала АИПД-5-3б.

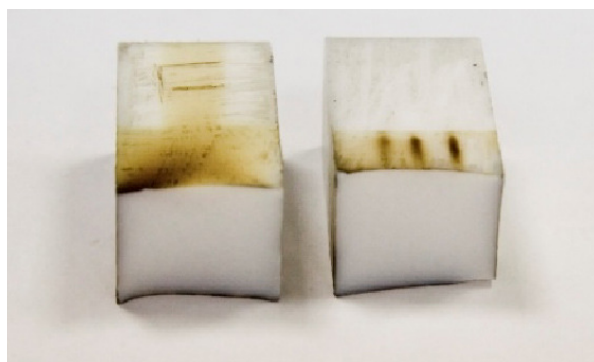


Рисунок 4 - Внешний вид шашек фторопласта после проведения эксперимента.

Масса двигательной установки на базе АИПД главным образом зависит от массы конденсаторной батареи [6]. Для уменьшения ее величины на базе модели АИПД-5-3б была разработана модель АИПД-ИТ накопитель энергии которой состоял из двух конденсаторов суммарной емкостью 9,2 мкФ с улучшенными весовыми характеристиками. Ее параметры, наряду с параметрами других испытывавшихся моделей, приведены в таблице 2. Видно, что она обладает не только лучшими весовыми характеристиками, но и более высокими удельными параметрами. Длительные испытания показали, что у модели АИПД-ИТ выработка

шашек приблизилась к форме характерной для моделей больших энергий, где основная доля энергии разряда выделяется за срезом шашек (рисунок 5).

Таблица 2.

	АИПД-8	АИПД-5	АИПД-5-3	АИПД-ИТ			
Энергия разряда, Дж	8,4	4,5	3,8	5,0	3,8	4,6	6,6
Потребляемая мощность, Вт	42,2	22,5	16,9	25	19	9,2	13,2
Единичный импульс тяги, мН·с	0,14	0,06	0,05	0,11	0,07	0,07	0,11
Расход рабочего вещества, мкг/импульс	33,7	не изм.	12,7	35,3	21,0	15,7	21,4
Удельный импульс, км/с	4,15	не изм.	3,94	3,12	3,33	4,46	5,14
Тяговая эффективность, %	3,4	не изм.	2,6	3,5	3,1	3,4	4,3



а)

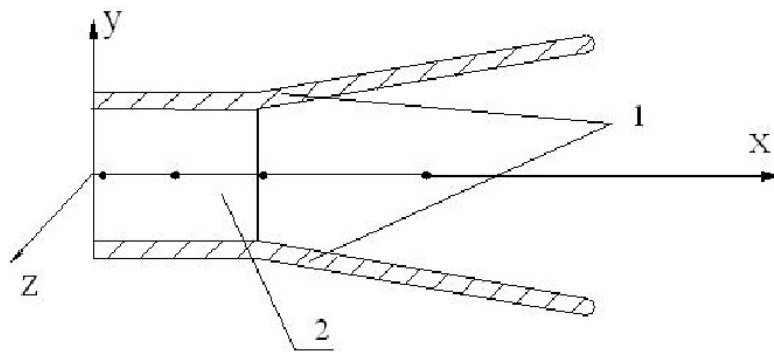


б)

Рисунок 5 – Форма выработки шашек. а – АИПД-5-3б, б – АИПД-ИТ.

Наряду с параметрическими испытаниями моделей микро-АИПД проводились также диагностические исследования параметров плазмы двигателей. Так, для измерения концентрации электронов применялись спектроскопические методы на основе регистрации штарковского уширения спектральных линий плазмы.

Измерения контура спектральной линии H_{β} проводились на средней линии канала, исследуемые точки приведены на рисунке 6.



- – исследуемые точки; 1 – электроды; 2 – фторопластовые шашки

Рисунок 6 – Схема расположения линий просвечивания плазмы при измерениях концентрации электронов в моделях АИПД.

Результаты измерения концентрации электронов приведены на рисунке 7 для модели АИПД-8 и на рисунке 8 для АИПД-ИТ.

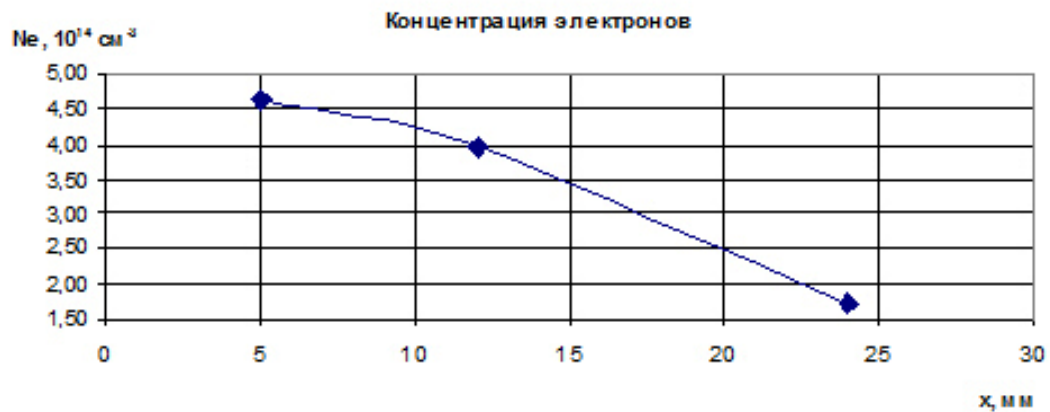


Рисунок 7 - Концентрация электронов модели АИПД-8 по длине канала.

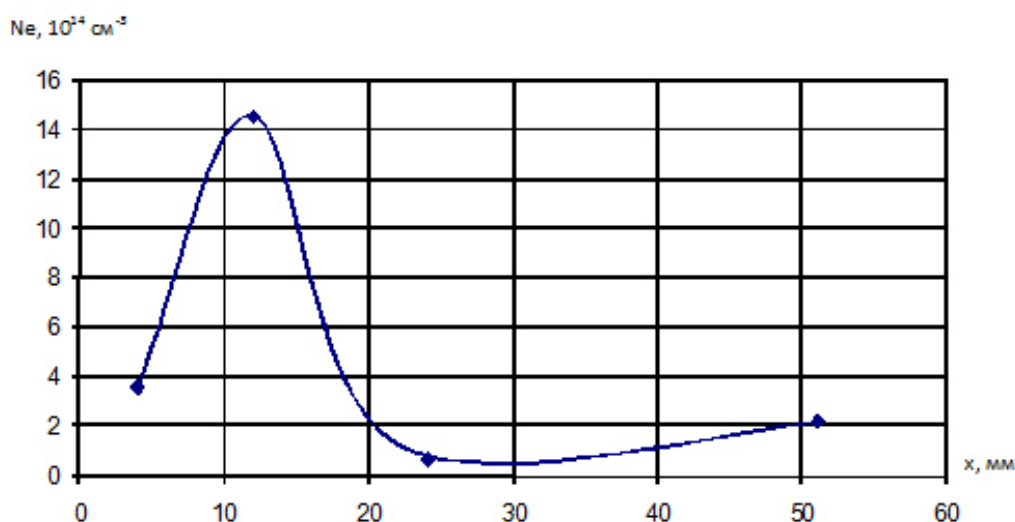


Рисунок 8 Концентрация электронов модели АИПД-ИТ по длине канала.

Как видно из графиков концентрации, спектроскопические измерения подтвердили, что у АИПД-ИТ основной разряд горит на выходе из канала, что характерно для двигателей большей энергии.

3. Физико-математическая модель АИПД малой энергии.

При разработке двигателя желательно иметь математическую модель, которая позволит искать направления улучшения характеристик.

Известные варианты физико-математических моделей [10-14] не учитывают всего комплекса явлений особенно при формировании плазмы за счет абляции полимерного материала.

В НИИ ПМЭ МАИ была разработана квазиодномерная физико-математическая модель течения импульсной плазмы, ускоряемой электромагнитной силой, которая учитывает особенности ускорения плазмы в АИПД. [15] Процесс ускорения плазмы в АИПД с малой запасаемой энергией отличается от процесса

ускорения в АИПД с большой энергией характером электрического разряда. В АИПД с малой энергией разряда имеет место колебательный разряд с числом полупериодов $\sim 4-5$, приводящий к волнообразной генерации и ускорению плазмы.

В квазиодномерной физико-математической модели описан процесс ускорения и изменение средних параметров состояния плазмы (температура, давление, степень ионизации и т.д.) в виде достаточно простой системы интегродифференциальных уравнений.

Волнообразность процесса генерации плазмы моделируется в виде нескольких последовательно возникающих плазменных сгустков, движущихся друг за другом в канале ускорения.

Несмотря на то, что модель, в основном, описывает движение центра масс плазменного сгустка, используются двумерные пространственные модели излучения плазмы, переноса излучения и поглощения энергии стенками канала.

В качестве объекта моделирования был рассмотрен импульсный ускоритель плазмы сверх малой мощности с энергией в импульсе 6,62 дж.

Математическая модель реализована в виде компьютерной программы в системе математических вычислений MAPLE. [16]

При описании течения плазмы в АИПД использовались следующие соотношения:

Гидродинамические уравнения движения плазмы имеют вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho V)}{\partial x} + q_m,$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \partial \frac{\partial V}{\partial x} V + q_m \cdot V = -h \cdot d \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_o \cdot d \cdot j_{\Sigma} \cdot H$$

Здесь t - время, x - положение элемента плазмы вдоль продольной оси канала, $\rho(t,x)$ - плотность плазмы (на ед. длины канала), $q_m(t,x)$ - поток массы за счет абляции рабочего тела (на ед. длины в ед. времени), $j_{\Sigma}(t,x)$ - плотность тока на ед. длины, $V(t,x)$ - скорость движения плазмы вдоль оси, $H(t,x)$ - напряженность магнитного поля, d - расстояние между электродами, h - ширина электродов, $p(t,x)$ - давление в плазме,

μ_0 - абсолютная магнитная проницаемость вакуума.

Уравнение состояния плазмы и уравнение для температуры имеют вид [11]:

$$p = \frac{1}{h \cdot d} \cdot \frac{k}{m_i} \cdot \rho \cdot T \cdot (1 + \xi_u),$$

$$\rho \cdot (c_v + \xi_{ион}) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} V \right) = \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot q_m + R_c \cdot j_{\Sigma}^2 - c_v \cdot q_m \cdot (T - T_{аб}) - q_{из}^{\Sigma} - q_{аи} - p \frac{\partial V}{\partial x}$$

Здесь m_i - масса иона, k - постоянная Больцмана, $\xi_{и}$ - степень ионизации, $T(t,x)$ - температура плазмы, c_v - теплоемкость,

$\xi_{ион}$ - изменение теплоемкости за счет изменения степени ионизации, R_c - сопротивление плазмы (на единицу длины канала), $T_{аб}$ - температура абляции рабочего материала.

Слагаемые в правой части уравнения для температуры $T(t,x)$ имеют следующий содержательный смысл: $\frac{1}{2} V^2 \cdot q_m$ - энергия распределенной ударной волны, $R_c \cdot j_{\Sigma}^2$ - омический нагрев плазмы, $c_v \cdot q_m \cdot (T - T_{аб})$ - затраты энергии на абляцию

рабочего материала, $q_{\text{из}}^{\Sigma}$ – потери на излучение плазмы, $q_{\text{ан}}$ – затраты энергии на ионизацию аблировавшей массы, член $p \frac{\partial V}{\partial x} h \cdot d$ – влияние гидростатических сил.

Электромагнитное поле и ток в плазме описываются уравнениями:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} = -H \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{h}{d} \cdot R \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2},$$

$$j_{\Sigma} = -h \frac{\partial H}{\partial x},$$

$$E = \frac{1}{d} R_c \cdot j_{\Sigma} + \mu_0 \cdot V \cdot H,$$

$$R_c = \frac{d}{\sigma \cdot h}, \quad \sigma = k_{\sigma} \frac{T^{3/2}}{\Lambda}, \quad \Lambda = \ln \left(\frac{k_{\Lambda} \cdot T^{3/2}}{\sqrt{Ne}} \right).$$

Здесь σ – проводимость плазмы, $E(t,x)$ – напряженность электрического поля, Λ – кулоновский логарифм, Ne – количество электронов в ед. объема, $Ne = Ni$ – количеству ионов в ед. объема (предполагается, что плазма квазинейтральна), k_{σ} , k_{Λ} – постоянные.

Указанные выше уравнения дополняются алгебраическими зависимостями, описывающими процесс ионизации и интегральными соотношениями, описывающими процессы излучения плазмы, поглощения излучения рабочим веществом и его абляции. Считается, что абляция проходит в основном за счет поглощения излучения плазмы. Приблизительно считается, что энергия, излучаемая элементом плазмы, пропорциональна T^4 (серое тело). [12]

Посредством оптимизации параметров разрядной цепи, для увеличения эффективности процесса преобразования энергии в плазме микро АИПД, и как

следствия повышения удельных характеристик двигателя, необходимо сократить число полупериодов колебаний тока до 2-3, и по возможности увеличить длительность первого полупериода.

Ранее, в соответствии с электродинамической моделью ускорения плазмы, разрядная цепь в АИПД проектировалась исходя из требований минимальных значений её сопротивления и индуктивности. [14] Согласно проведенным расчетам для АИПД малой энергии данный подход оказался не вполне верным, т.к. электродинамическая модель не учитывает возможного рассогласования поступления массы и энергии в разрядный канал. Полученные результаты показывают, что некоторое увеличение индуктивности цепи приводит к улучшению характеристик.

4. Сравнение результатов математического моделирования с экспериментом.

Для подтверждения этих расчетов была создана модель АИПД с изменяемой индуктивностью. Для этого между конденсаторным блоком и ускорительной частью разрядного канала были расположены дополнительные гибкие токопроводящие медные шины, являющиеся продолжениями электродов. Варьируя расстояние между этими шинами, можно было добиться различных значений индуктивности разрядного канала.

Таблица 3.

Эксперимент		Расчет	
Индуктивность, нГн	Уд. импульс, м/с	Индуктивность, нГн	Уд. импульс, м/с
33	4966	33	5012
40	7058	40	6700
50	6976	50	8996
100	-	100	16614

Видно, что тенденция роста характеристик двигателя совпадает с прогнозами расчётов. В тоже время эксперименты показали, что при существенном увеличении индуктивности наблюдается такое отрицательное явление как науглероженность шашек рабочего тела, которое не учитывается в теоретических построениях, что объясняется наблюдающимся расхождением полученных результатов при индуктивности более 50 нГн.

5. Применение полученных результатов в конструкции прототипа лётного образца АИПД.

Полученные результаты были успешно реализованы в улучшении характеристик экспериментального образца ДУ ИПД-120, предназначенного для поддержания и коррекции орбиты малого низкоорбитального космического аппарата массой менее 100 кг (рисунок 9).

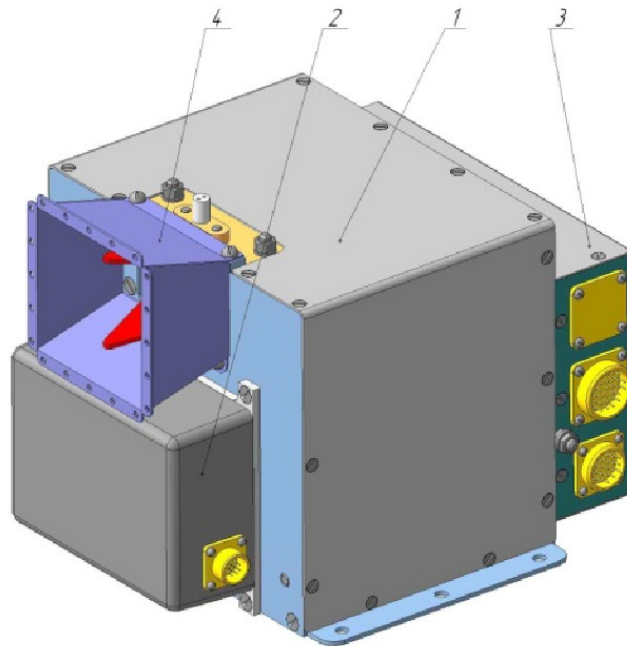


Рисунок 9 - Внешний вид экспериментального образца ДУ ИПД-120.

1 блок накопителя энергии; 2 - блок инициирования разряда; 3 - система питания и управления; 4 - разрядный канал

Экспериментальный образец ДУ ИПД-120 имеет следующие характеристики:

Энергия разряда	20 Дж
Единичный импульс тяги	0,345 мН·с
Потребляемая мощность	60 Вт
Средняя тяга	0,909 мН
Рабочее тело	фторопласт-4
Ресурс по запасу рабочего тела	$2 \cdot 10^6$ имп

Увеличивая индуктивность цепи ИПД-120 (начальная индуктивность ДУ АИПД-120 была равна 37 нГн), были получены следующие результаты, которые отражены на графиках (рисунок 10,11).

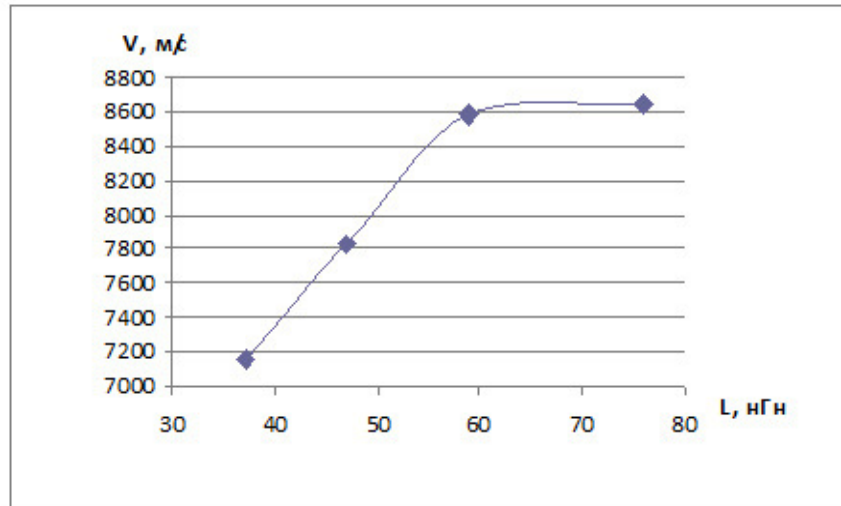


Рисунок 10. Зависимость удельного импульса от индуктивности.

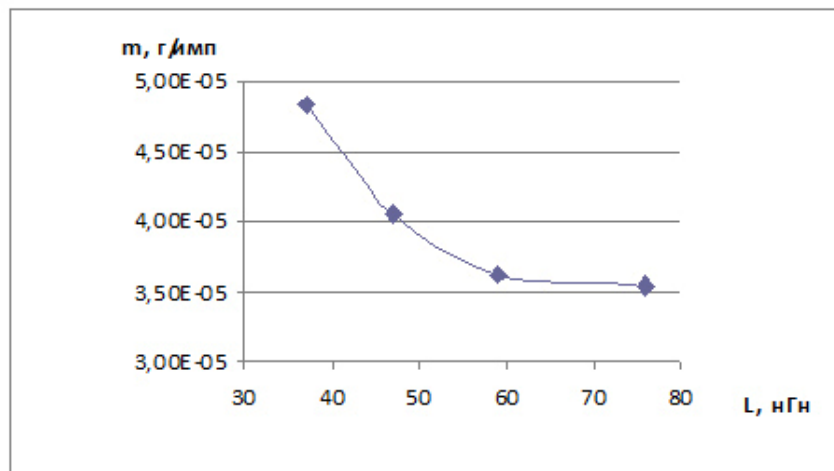


Рисунок 11. Зависимость расхода за один импульс от индуктивности.

Из графиков видно, что увеличение индуктивности приводит к существенному росту удельного импульса, с 7125 м/с до ~8500 м/с, что обусловлено уменьшением расхода рабочего вещества за импульс при отсутствии значительного снижения единичного импульса тяги. Уменьшение величины расхода связано с уменьшением

эффекта послепарения шашек рабочего вещества после завершения процесса ускорения основной массы фторопласта. При увеличении индуктивности это происходит вследствие увеличения длительности разряда и снижения пикового значения тока. Это приводит к соответствующему уменьшению энергии излучения плазмы и отдалению излучающей токовой перемычки от шашек рабочего тела на большее расстояние.

Заключение

Таким образом, испытания показали хорошую работоспособность микро АИПД в диапазоне энергии разряда 3...8 Дж. Достигнутый уровень интегральных характеристик дает возможность рассматривать микро АИПД как наиболее перспективные для решения задач управления движением МКА. Результаты полученные на лабораторных моделях были успешно внедрены на экспериментальный образец ДУ ИПД-120 с запасаемой энергией 20 Дж, для которых также характерна периодическая затухающая кривая разряда, что позволило увеличить удельный импульс ДУ АИПД-120 на 19%.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации по поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-143.2012.8.

Библиографический список

1. Mueller J. Thruster Options for Microspacecraft: A Review and Evaluation of State-of-the-Art and Emerging Technologies. // Micropropulsion for Small Spacecraft. Progress in Astronautics and Aeronautics. Reston, Virginia, V.187, PP. 45-137, 2000
2. Spanjers G., Bromaghim D., Lake J., Dulligan M., White D., Schilling J., Bushman S. AFRL MicroPPT Development for the TechSat 21 Flight // IEPC-01-166, Pasadena, CA, 2001
3. Zakrzwski C., Benson S., Sanneman P., Hoskins A. On-Orbit Testing of the EO-1 Pulsed Plasma Thruster // AIAA, 2002, No. 2002-3973
4. Popov G.A., Antropov N.N. Ablative PPT. New Quality, New Perspectives // Acta Astronautica, 2006, V. 59, PP. 175-180.
5. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Орлов М.М., Попов Г.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н.. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ прикладной механики и электродинамики // Космонавтика и ракетостроение. М.: ЦНИИМАШ.2008, № 3, С. 28-34.
6. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К. Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Космонавтика и ракетостроение. 2011, № 5, С. 30-40.
7. Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А. Экспериментальные исследования моделей АИПД малой мощности // Авиационная и космическая техника и технология. т. 9/66, с. 136-138, 2009.
8. Diakonov G.A., Lyubinskaya N.V., Semenikhin S.A. Experimental Studies for Micro-APPT at RIAME // Proc. Second International Conference Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites, Russia, Samara, 2011, P. 87.
9. Морозов А.И. Физические основы космических электро-реактивных двигателей, Т. 1. Элементы динамики потоков в ЭРД, М., Атомиздат, 1978, С.326.

10. Александров В.А., Белан, Н.П. Козлов, Н.А. Маштылев, Г.А. Попов, Ю.С. Протасов, В.И. Хвесюк. Импульсные плазменные ускорители. Учебное пособие. Харьков: Харьковский авиационный институт, 1983, С. 247.
11. Вихрев В.В., Земсков А.И., Прут В.В., Храбров В.А. Моделирование процесса разряда на ЭВМ. Вопросы физики низкотемпературной плазмы. Минск: Наука и техника, 1970, С. 276-282.
12. Брушлинский К.В., Жданова Н.С. МГД-течения в каналах плазменных ускорителей с продольным магнитным полем. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 12. С. 1120-1128.
13. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы. ЖЭТФ, 1957, Т. 33, Вып. 1(7), С.3.
14. Khrustalev M.M., Lyubinskaya N.V. Calculation Studies for Plasma Parameters in Pulsed Plasma Thruster // Proc. 4th International Space Propulsion Conference, Chia Laguna, Sardinia, Italy, 2004.
15. Хрусталёв М.М., Любинская Н.В. Физико-математическая модель течения плазмы в канале абляционного плазменного двигателя с учетом реальных процессов в разрядной цепи двигателя. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2011614430 от 6 июня 2011г.