

УДК 629.7.036

Г.А. ДЬЯКОНОВ, Н.В. ЛЮБИНСКАЯ, С.А. СЕМЕНИХИН

*Федеральное государственное научное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт механики и электродинамики», Москва, Россия***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
МОДЕЛЕЙ АИПД МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

*Описание экспериментальных исследований лабораторных моделей микро абляционных импульсных плазменных двигателей малой мощности, подтверждение работоспособности моделей АИПД в условиях ограниченного потребления мощности с разрядным каналом рельсовой геометрии, исследования температурных режимов при работе с большой частотой следования импульса. Сравнение удельных характеристик (импульса тяги, расхода рабочего вещества, коэффициента полезного действия) изготовленных лабораторных моделей АИПД. Улучшение характеристик за счет увеличения длительности полупериодов разряда.*

**Ключевые слова:** модель абляционного импульсного плазменного двигателя, малая мощность, накопитель энергии, абляция, науглероживание, расход рабочего вещества, осциллограмма разрядного процесса.

**Введение**

Данная работа посвящена исследованию рабочих процессов в лабораторных моделях абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД) малой мощности.

**Основной материал**

В ФГНУ «НИИ ПМЭ» для исследования физических процессов была создана серия лабораторных моделей АИПД диапазона мощностей от 6 до 45Вт. Принцип их действия основан на ускорении плазмы, которая образуется за счет абляции и ионизации рабочего вещества. Схема исследовавшейся модели представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что электромагнитная ускоряющая сила  $F$  создается за счет взаимодействия тока  $J$  и собственного магнитного поля  $B$ .

По своей принципиальной схеме модели представляют собой рельсотрон и включают электроды, шашки рабочего вещества (фторопласт) и конденсаторный накопитель энергии. Разрядный канал образован электродной системой, торцевым керамическим изолятором и рабочими поверхностями шашек рабочего вещества.

Были последовательно разработаны и изготовлены лабораторные модели АИПД-8, АИПД-5, АИПД-5-3 и АИПД-ит позволяющие определить характеристики данных моделей.

В качестве накопителя энергии для моделей АИПД-8 и АИПД-5 использовались единичные конденсаторы с уменьшенными джоулевыми потерями, с возможностью запасать энергию от 2 Дж и

до 8,5 Дж. В моделях АИПД-5-3 и АИПД-ит рассматривался вариант параллельного соединения конденсаторов.

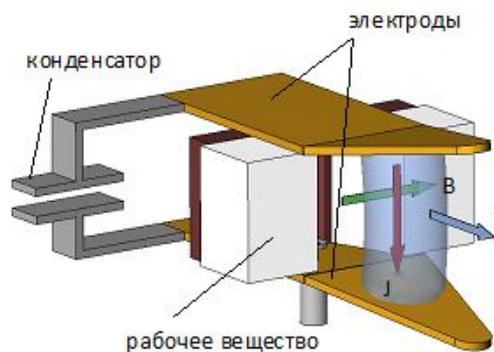


Рис. 1. Схема модели абляционного импульсного плазменного двигателя

Модели позволяли изменять в широких пределах конфигурацию и размеры разрядного канала, что было необходимо для выявления оптимальных геометрических параметров.

Внешний вид лабораторных моделей представлен на рис. 2. Для снижения джоулевых потерь электроды непосредственно соединены с выводами конденсатора. Разрядная цепь спроектирована исходя из требований минимальных сопротивления и индуктивности разрядной цепи. Поджиг разряда осуществляется установленной у поверхности электрода свечой (игнайтером), питание на которую поступает от высоковольтного блока инициирования разряда (БИР).

На рис. 3 приведена фотография лабораторной модели АИПД в процессе ее работы.

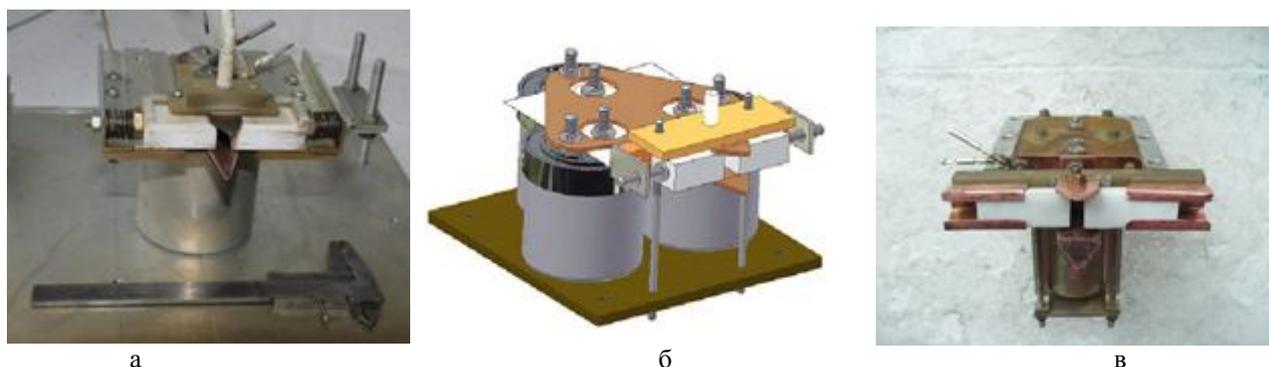


Рис. 2. Модели АИПД: а – АИПД-8; б – АИПД-5-3; в – АИПД-ит



Рис. 3. Внешний вид лабораторной модели в процессе работы

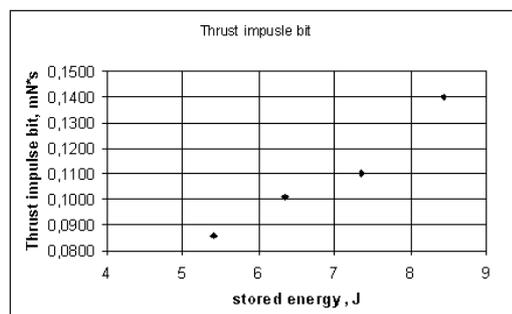


Рис. 4. Зависимость единичного импульса тяги от запасаемой энергии для модели АИПД-8

Был проведен ряд экспериментов на лабораторных моделях АИПД, с целью выявить их работоспособность при мощности менее 25 Вт.

В ходе экспериментов измерялись: реактивная сила  $F$ , расход рабочего тела за один импульс  $m$ , разрядный ток  $J$ , частота следования импульсов  $f$ , напряжение на конденсаторе  $U_0$ . По результатам измерений рассчитывались:  $P_{ед} = F/f$  – единичный импульс;  $W = \frac{1}{2}CU_0^2$  – энергия конденсаторной батареи;  $N = W \cdot f$  – потребляемая мощность;  $\langle V \rangle = P_{ед}/m$  – среднemasовая скорость плазменного сгустка (удельный импульс).

В качестве измерителя реактивной силы моделей использовался струнный тягомер с погрешностью измерения от  $-5$  до  $+10\%$ . Расход рабочего вещества измерялся путем взвешивания шашек фторопласта на высокоточных аналитических весах до и после эксперимента с учетом количества импульсов.

Науглероживание разрядного канала и шашек рабочего тела позволили исключить некоторые

режимы работы моделей как нерабочие, а также определить оптимальные размеры разрядного канала.

Результаты экспериментов на модели АИПД-8 представлены на рис. 4, где показана зависимость единичного импульса тяги от запасаемой энергии.

Одной из задач исследования являлось изучение теплового режима работы моделей АИПД при большой частоте следования импульсов. С этой целью с помощью термодатчика проводились измерения температуры на выводах конденсаторов. Результаты экспериментов показали, что, не превышая мощность модели в 25 Вт путем варьирования напряжения разряда, можно увеличить частоту следования импульсов до 20 Гц без потери работоспособности модели и без ухудшения ее характеристик. Модели АИПД-5-3 и АИПД-ит разрабатывались с целью повышения удельных характеристик. Изменяя индуктивность и сопротивление в цепи, удалось достичь более лучших результатов по сравнению с первыми моделями. Измеренные и рассчитанные по полученным результатам характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики моделей АИПД

		АИПД-8	АИПД-5		АИПД-5-3		АИПД-ит	
Энергия	Дж	8,4	4,5	3,8	5	3,8	4,6	6,6
Мощность	Вт	42,18	22,5	16,9	25	19	9,2	13,2
Импульс тяги	мН*с	0,14	0,06	0,05	0,11	0,07	0,07	0,1
Расход	$\cdot 10^{-5}$ г/ед	3,37	Не изм.	1,27	3,53	2,1	1,57	2,14
КПД	%	3,4	Не изм.	2,5	3,5	3	3,4	4,1

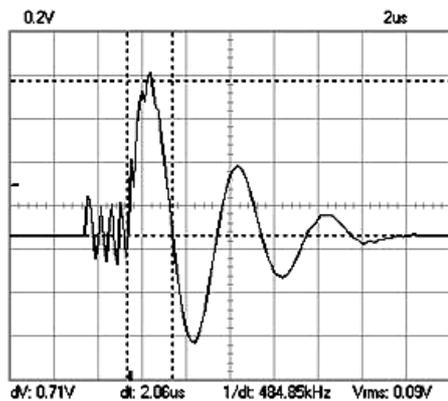


Рис. 5. Вид осциллограммы разрядного процесса с шестью полупериодами для АИПД-8

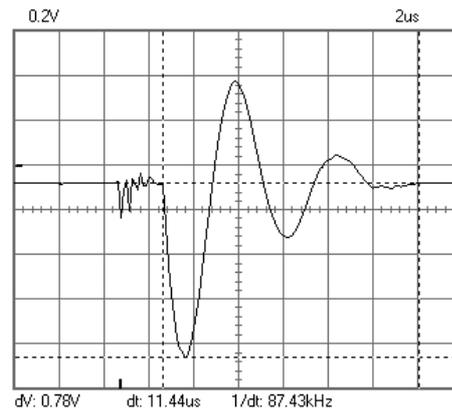


Рис. 6. Вид осциллограммы разрядного процесса с пятью полупериодами для АИПД-ит

На моделях АИПД-8, АИПД-5 и АИПД-5-3 наблюдалась бочкообразная выработка шашек рабочего вещества, что характерно для разрядных процессов с большим количеством полупериодов (рис. 5). Это отличает их от моделей больших энергий с аperiодичным разрядом с высокими характеристиками. В результате сокращения числа и увеличения длительности полупериодов разряда (рис. 6) на модели АИПД-ит удалось добиться сходной с моделями больших энергий формы выработки шашек.

### Выводы

Таким образом, экспериментальные исследования моделей АИПД подтвердили их работоспособ-

ность в диапазоне энергий от 2 до 8,5 Дж при изменении частоты следования импульсов от 2 до 20 Гц.

### Литература

1. Popov G.A. *Ablative PPT. New Quality, New Perspectives* / G.A. Popov, N.N. Antropov // *Acta Astronautica*. – 2006. – 59. – P. 175-180.
2. *Correction Propulsion System with Ablative Pulsed Plasma Thrusters for Unified Space Platform "Vulcan"* / N. Antropov, G. Diyakonov, N. Liubinskaya, M. Orlov, G. Popov, P. Trubnikov, V. Tiutin, V. Yakovlev, V. Isayev, Yu. Pugatchiov, N. Shelkov // *Space Propulsion 2004, 4<sup>th</sup> International Spacecraft Propulsion Conference*.

Поступила в редакцию 29.05.2009

Рецензент: канд. техн. наук Н.Н. Антропов, ФГНУ «НИИ ПМЭ», Москва, Россия.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ АІПД МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Г.А. Дьяконов, Н.В. Любинская, С.А. Семенихин

Опис експериментальних досліджень лабораторних моделей мікро АІПД малої потужності, дослідження працездатності таких моделей в умовах обмеженого вжитку потужності, температурні дослідження при роботі з великою частотою дотримання імпульсу. Порівняння питомих характеристик виготовлених лабораторних моделей.

**Ключові слова:** модель абляційного імпульсного плазмового двигуна, мала потужність, накопичувач енергії, абляція, вуглецювання, витрата робочої речовини, осцилограма розрядного процесу.

### EXPERIMENTAL RESEARCHES OF SMALL POWER APPT MODELS

G.A. Diakonov, N.V. Lyubinskaya, S.A. Semenikhin

Description of experimental researches with small power micro AIPD laboratory models, research of such models capacity in the conditions of the limited power consumption, temperature researches during work with large frequency of the following of impulse. Comparison of the made laboratory models specific descriptions.

**Key words:** model of ablation pulsed plasma thruster, small power, store of energy, ablation, expense of working matter, oscillogram of bit process.

Дьяконов Григорий Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГНУ «НИИ ПМЭ», Москва, Россия, e-mail: riame3@sokol.ru.

Любинская Наталия Валентиновна – научный сотрудник ФГНУ «НИИ ПМЭ», Москва, Россия, e-mail: riame3@sokol.ru.

Семенихин Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГНУ «НИИ ПМЭ», Москва, Россия, e-mail: riame3@sokol.ru.