

Влияние химического состава рабочих тел на интегральное сопротивление АИПД

*Д.К. Федорова**, *Д.А. Егшин*, *А.В. Павлов*, *Д.О. Новиков*, *В.Д. Телех*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**fedorovadk@student.bmstu.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются результаты экспериментальной отработки фторопласта и капролона в качестве рабочих тел в абляционном импульсном плазменном двигателе. Анализируется изменение характеристик двигателя с течением времени для двух рабочих тел. На основе полученных данных предлагается обоснование падения сопротивления цепи в случае использования капролона и роста сопротивления в случае использования фторопласта.

Ключевые слова: электрический ракетный двигатель, абляционный импульсный плазменный двигатель, импульсный разряд, RLC-контур.

1. Введение

Благодаря низкой стоимости производства и запуска и широкому спектру выполняемых задач нано- и пико-спутники приобретают всё большую популярность в последнее время. Для таких аппаратов актуальна задача создания двигательной установки, которая позволила бы увеличить функционал спутника [1]. Ввиду того, что на наноспутниках существуют строгие габаритные и массовые ограничения, необходима такая двигательная установка, которая при своих малых габаритах будет обеспечивать высокий удельный импульс, т.е. большую скорость истечения вещества. Этим требованиям отвечают электроракетные двигатели (ЭРД), поэтому именно этот класс ракетных двигателей рассматривается в качестве наиболее подходящих для наноспутников [2]. Однако большинство ЭРД тяжело поддаются масштабированию в сторону уменьшения массогабаритных характеристик, так как теряется стабильность рабочего процесса в двигателе. К тому же, некоторые ЭРД не могут обеспечить постоянной готовности к работе [3]. Абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД) – перспективный тип ЭРД для наноспутников. Такие двигатели конструктивно просты: занимают малый объём, имеют малую массу; дешёвые в изготовлении [4], а также надёжные и готовы к работе в любой момент, однако КПД таких двигателей обычно не превышает 10% [5]. Существует ряд разработанных АИПД для малых аппаратов [5]–[8].

Принцип работы АИПД основан на ускорении массы под действием пондеромоторных и газодинамических сил. Газодинамическое ускорение происходит после окончания основного разряда, когда поверхность рабочего тела не успела остыть и с неё улетают нейтральные частицы с тепловыми скоростями, однако такое ускорение массы снижает удельный импульс двигателя. Сегодня, основным рабочим телом, используемым в микроАИПД, является фторопласт, недостатком которого является «науглероживание» поверхности диэлектрика и электродов в процессе работы.

Для уменьшения негативного влияния газодинамического ускорения на характеристики двигателя необходимо организовать разрядный процесс таким образом, чтобы большая часть массы ускорялась пондеромоторными силами, чего можно добиться согласованием ускорения массы со временем, в течение которого вкладывается энергия в разряд [9], например оптимизируя параметры разрядного контура. Для уменьшения «науглероживания» предлагается рассмотреть другие рабочие тела.

2. Проведение эксперимента

Для сравнения характеристик АИПД с разными рабочими телами был изготовлен макет, характеристики которого представлены в Таблице 1. В качестве рабочих тел использовались

диэлектрические втулки из фторопласта и капролона. На каждом рабочем теле была сделана серия выстрелов с фиксацией параметров разряда для определения изменения характеристик двигателя с течением времени. Испытания АИПД происходили в вакуумной камере при давлении $p = 10^{-3}$ Па. Двигатель работал в режиме одиночных выстрелов (время импульса много меньше времени между импульсами).

Таблица 1. Характеристики испытываемого образца

Параметр	Значение
Радиус катода	3 мм
Радиус анода	7 мм
Материал электродов	Латунь
Материал рабочего тела	Фторопласт, капролон
Емкость накопителя	5 мкФ
Напряжение на накопителе	1.5 кВ

Были выполнены серии из 200 выстрелов для капролона и из 300 выстрелов для фторопласта. Зафиксированы законы изменения тока в цепи для отдельных выстрелов. Характерные осциллограммы тока представлены на Рис.1 для фторопласта (а) и капролона (б).

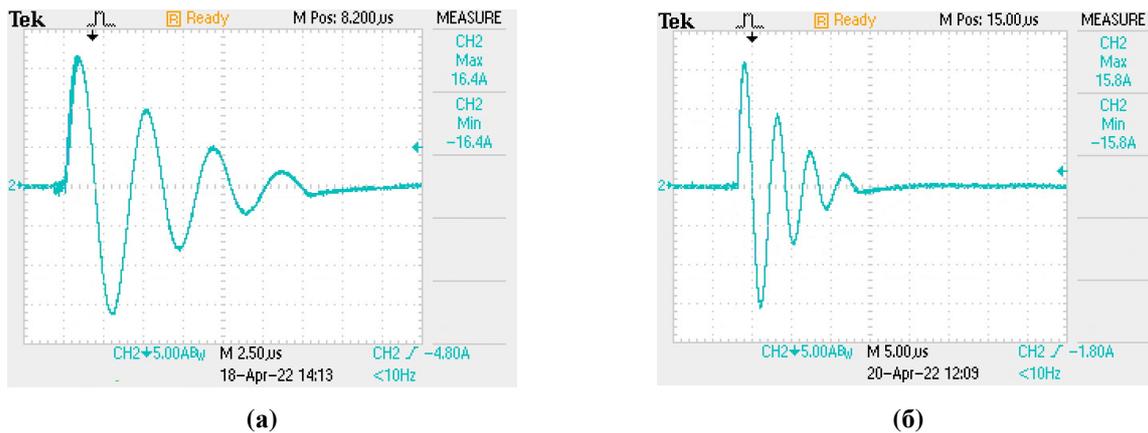


Рис.1 Осциллограммы токов при использовании (а) фторопласта и (б) капролона в качестве рабочего тела.

По полученным осциллограммам тока определены декременты затухания и резонансные частоты колебаний, которые представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Значения декремента и частоты

№	Капролон		Фторопласт	
	Декремент, c^{-1}	Частота, Гц	Декремент, c^{-1}	Частота, Гц
1	$1.76 \cdot 10^5$	$1.48 \cdot 10^6$	$1.19 \cdot 10^5$	$1.52 \cdot 10^6$
2	$1.41 \cdot 10^5$	$1.48 \cdot 10^6$	$1.29 \cdot 10^5$	$1.51 \cdot 10^6$
3	$1.32 \cdot 10^5$	$1.48 \cdot 10^6$	$1.27 \cdot 10^5$	$1.51 \cdot 10^6$
4			$1.31 \cdot 10^5$	$1.52 \cdot 10^6$
5			$1.36 \cdot 10^5$	$1.51 \cdot 10^6$

Представим декремент затухания и частоту в виде [11]:

$$\gamma = \frac{R}{2L}, \quad (1)$$

где R – суммарное сопротивление цепи, Ом; L – суммарная индуктивность цепи, Гн.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (2)$$

где C – емкость накопителя энергии, Ф.

Постоянство резонансной частоты колебаний, представленной в таблице 2, говорит о неизменности суммарной индуктивности цепи и ее емкости, согласно (2). Следовательно, изменение декремента затухания, в соответствии с формулой (1), происходит из-за изменения суммарного сопротивления цепи. На Рис. 2 приведена зависимость суммарного сопротивления цепи от количества произведенных выстрелов.

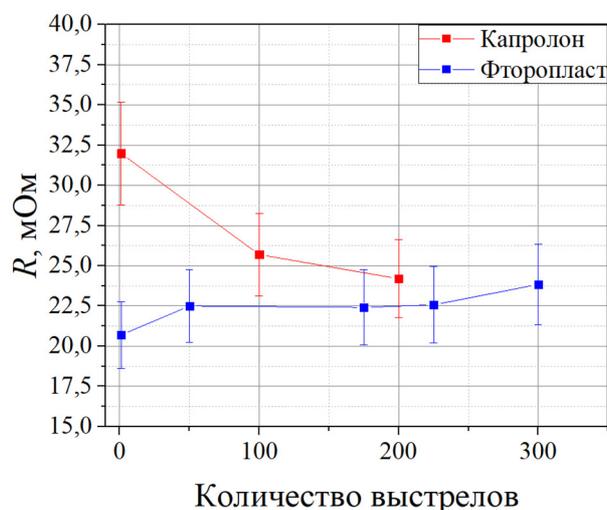


Рис.2. Зависимость суммарного сопротивления цепи от количества выстрелов для фторопласта и капролона.

Как уже отмечалось выше, особенностью АИПД, использующих полимеры в качестве рабочего тела, является образование углеродной пленки на рабочих поверхностях. Различия в интегральном сопротивлении для фторопласта и капролона (Рис.2), очевидно, обусловлены строением и составом полимерных звеньев. В капролоне присутствуют кислород, водород и азот. Они образуют летучие соединения совместно с углеродом, тем самым уменьшая его количество, осажденное на поверхностях разрядного канала. При использовании фторопласта, в котором помимо углерода присутствует только фтор, летучих соединений углерода не образуется, поэтому часть углерода остается в качестве пленки на диэлектрике и электродах.

В эксперименте наблюдался рост сопротивления со временем при использовании фторопласта, что может быть следствием высокой химической активности фтора. Будем считать, что ионизация испаренного вещества происходит только за счет электронного удара [12]. Помимо движения, обеспеченного пондеромоторными силами за срез двигателя, ионизованные частицы движутся под действием электрического поля по направлению к катоду. Фтор, образованный при деполимеризации фторопласта, после ионизации превратится в ион F^+ и начнет движение в сторону катода. На катоде F^+ окисляется до атомарного фтора, который в силу своей высокой реакционной способности [13], будет реагировать с материалом катода, образуя предельные фториды. Как было описано выше, катод изготовлен из латуни, поэтому основные реакции, происходящие на поверхности электродов, можно описать как:



Будем считать, что реакции проходят с атомарным фтором, так как при высоких температурах существование фтора в виде двухатомного газа затруднено в связи с малой прочностью π -связи [13]. Образованные на поверхности катода соли меди и цинка, в соответствии с (3), увеличивают суммарное сопротивление цепи, так как предельные фториды обладают меньшей чем латунь проводимостью [13]. На Рис.3 представлены снимки катода АИПД после 300 импульсов с фторопластом в качестве рабочего тела.



Рис.3. Поверхность катода АИПД, работающего на фторопласте, после 300 импульсов.

Различимые пятна беловатого цвета имеют характерный оттенок фторида цинка.

В эксперименте с использованием капролона наблюдается падение интегрального сопротивления. Азот и кислород, входящие в состав полимерного звена капролона, не являются столь реакционноспособными элементами как фтор [13], поэтому почти не реагируют с материалами электродов. Падение сопротивления обуславливается образованием слоя углерода на поверхности диэлектрика. Такая пленка обладает гораздо меньшим сопротивлением, чем диэлектрик, вследствие чего на ней образуются проводящие каналы с малым сопротивлением, что, вероятно, является причиной падения суммарного сопротивления цепи.

3. Заключение

Выполнены экспериментальные исследования АИПД с различными плазмообразующими вставками. На основе полученных данных определено изменение интегрального сопротивления цепи в зависимости от количества произведенных импульсов.

Предложена гипотеза, объясняющая экспериментально полученные данные, в соответствии с которой увеличение суммарного сопротивления, при использовании фторопласта, связано с образованием фторидов на поверхности катода. Визуально подтверждено наличие солей фтора на электроде.

Использование капролона в качестве рабочего тела позволяет избежать образования фторидов на поверхности катода, что уменьшает суммарное сопротивление цепи и позволяет избежать лишних тепловых потерь транспортируемой к плазме энергии.

Благодарности

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по государственному заданию № 0705-2020-0046.

4. Список использованных источников

- [1] Zanola S., *Assessment of the impact of miniaturized electric propulsion systems on small satellites technology*. (Tornio: Politecnico di Torino, 2019).
- [2] O'Reilly D., Herdrich G., Kavanagh D.F., *Aerospace*, **8**(1), 22, 2021; doi: 10.3390/aerospace8010022.
- [3] Ling W.Y.L., Zhang S., Fu H., Huang M., Quansah J., Liu X., Wang N., *Chin. J. Aeronaut.*, **33**(12), 2999, 2020; doi: 10.1016/j.cja.2020.03.024
- [4] Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К., *Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»*, **5**(21), 30, 2011.
- [5] Molina-Cabrera P., Herdrich G., Lau M., Fausolas S., Schoenherr T., and Komurasaki K., *In Proc. 32nd International Electric Propulsion Conference*, Wiesbaden, Germany, 1, no. IEPC-2011-340, 2011.
- [6] Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Семенихин С.А., Хрусталёв М.М., *Труды МАИ*, **73**, 2014.
- [7] Lemmer K., *Acta Astronaut.*, **134**, 231, 2017; doi: 10.1016/j.actaastro.2017.01.048
- [8] Levchenko I., et al., *Appl. Phys. Rev.*, **5**, 011104, 2018; doi: 10.1063/1.5007734
- [9] Zhang Z., et al., *Rev. Mod. Plasma Phys.*, **3**(1), 5, 2019; doi: 10.1007/s41614-019-0027-z
- [10] Wu Z., et al., *AIAAJ*, **56**(8), 2018; doi: 10.2514/1.J056272
- [11] Ling S. J., Moebs W., and Sanny J. *University Physics Volume 2*. (Houston: OpenStax, 2016). [online]; <https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-introduction>
- [12] Keidar M., et al., *J. Appl. Phys.*, **89**, 3095, 2001; doi: 10.1063/1.1345860
- [13] Третьяков Ю. Д. *Неорганическая химия. Т. 2: Химия непереходных элементов*. (Москва: Академия, 2004).