

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ГРАФИТОМ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА

© 2022 г. М. К. Досболаев^{а, *}, Ж. Б. Игибаев^а, А. Б. Тажен^а, Т. С. Рамазанов^а

^а Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: merlan@physics.kz

Поступила в редакцию 21.07.2021 г.

После доработки 10.11.2021 г.

Принята к публикации 15.11.2021 г.

Было проведено предварительное испытание модели твердотельного импульсного плазменного двигателя (ИПД) с графитом в качестве твердого топлива предназначенного для корректировки и поддержания орбиты малых космических аппаратов. С помощью эмиссионного спектра плазмы, пояса Роговского и баллистического маятника экспериментально были исследованы структурные, электрические и тяговые характеристики твердотельного ИПД. Кроме того, с помощью высокоскоростной CMOS Phantom VEO710S камеры была исследована динамика образования импульсной плазмы.

Ключевые слова: импульсный плазменный двигатель, разрядный ток, эмиссионный спектр плазмы

DOI: 10.31857/S0367292122030040

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последних лет развитие мирового космического рынка в области научных и технологических исследований привело к росту тенденции улучшения характеристик малых космических аппаратов (МКА) в таких сферах, как навигация, спутниковая связь и т.п. [1]. Расширение функционального потенциала МКА стало возможным с момента появления и разработки малогабаритных, высокоэффективных электро-реактивных двигателей [2, 3]. В частности, все более популярными становятся импульсные плазменные двигатели (ИПД) предназначенные для выполнения функции корректирования и управления движением МКА [4–9]. Используя электрическую энергию для увеличения скорости ионизированного топлива, плазменные двигатели сочетают в себе высокий удельный импульс и КПД при малой тяге для долгосрочного контроля над относительным положением и ориентацией орбитальных спутников.

Принцип работы импульсных плазменных электродвигателей (ИПД) описывается законом сохранения импульса и идеальным уравнением реактивного движения. Движение космического аппарата подчиняется закону действия–противодействия или принципу сохранения количества

движения. Таким образом, ускорение МКА создается за счет выброса топливной массы [10–12].

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И АППАРАТУРЫ

2.1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой твердотельный импульсный плазменный двигатель. Основными частями твердотельного ИПД являются: 1 – катод, 2 – анод, 3 – поджигающий (эродируемый) электрод (рис. 1). Катод и анод изготовлены из меди (Cu) и расположены коаксиально. Расстояние между ними составляет 12 мм. Графитовый плоский электрод (поджигающий электрод) служит в качестве твердого топлива. Поджигающий электрод расположен на боковом прямоугольном отверстии катода. Вся система находится в вакуумной камере. Камера предварительно откачивается до давления 10^{-6} Торр. Принцип работы экспериментальной установки иллюстрированы на рис. 2. Конденсаторная батарея заряжается до напряжения U_p от внешнего источника питания двигателя (рис. 2а). Более того, напряжение U_e прилагается к поджигающему электроду. Затем, специальный электромагнитный механизм приводится в действие для обеспечения прямого контакта между поджигающим электро-

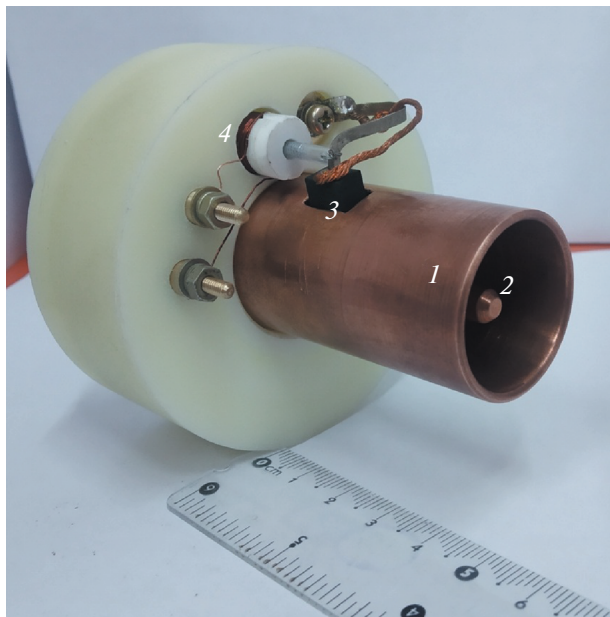


Рис. 1. Фото твердотельного импульсного плазменного двигателя: 1 – катод (заземленный общий электрод, диаметр 30 мм, длина 50 мм), 2 – анод (диаметр 6 мм, длина 45 мм), 3 – эродирующий графитовый электрод (твердое топливо), 4 – электромагнитный контактирующий механизм.

дом и катодом (рис. 26). Электромагнитный механизм запускается импульсом напряжения $U_{ЭМ}$, подаваемым на неподвижную катушку.

Механизм инициирования разряда и ускорения плазмы между катодом и анодом заключается в следующем: для инициирования основного разряда (плазменной перемычки), в первую очередь, необходимо обеспечить проводящий канал между катодом и анодом. Проводящий канал образуется в результате ионизации газа первичными электронами, ускоряющимися в электрическом поле между катодом и анодом. Первичные электроны появляются в искровом разряде, который возникает при прямом контакте между поджигающим электродом и катодом, т.е. при электрической эрозии (рис. 26). Искровой разряд не инициируется до момента их соприкосновения, поскольку на поджигающий электрод прикладывается небольшой положительный потенциал U_e около 50 В относительно катода. После этого, конденсаторная батарея полностью разряжается через проводящий канал, и вся накопленная энергия переходит в газовый разряд. В результате чего, создается плазменная перемычка с сильным собственным магнитным полем (рис. 2в). Следовательно, на плазму действует сила Ампера. Вследствие чего, поток плазмы ускоряется к выходу из двигателя с достаточно высокой направленной скоростью и так создается тяга.

2.2. Пояс Роговского

Импульсный разрядный ток измерялся поясом Роговского [13]. Принцип измерения поясом Роговского заключается в измерении магнитного поля в пространстве вокруг проводника. Он изготовлен в виде замкнутого соленоида с диаметром 4.5 см. Характеристики катушки следующие: число витков $N = 335$, индуктивное сопротивление катушки $R_L = 1.45$ Ом, индуктивность катушки $L = 31$ мкГн.

2.3. Высокоскоростная CMOS Phantom VEO710S камера

Процессы образования и ускорения плазмы в твердотельном ИПД регистрировались с помощью высокоскоростной CMOS Phantom VEO710S камеры [14]. Минимальное разрешение и время экспозиции высокоскоростной камеры составляет 1280×800 пикселей и 1 мкс. В эксперименте разрешение камеры установлено соответственно 128×128 пикселей для высокоскоростной съемки с торца и 128×64 пикселя для съемки сбоку коаксиальной электродной системы.

2.4. Измерение тяговой характеристики твердотельного ИПД

Тяговая характеристика твердотельного ИПД была экспериментально определена измерением отклонения баллистического маятника. Он состоит из титановой пластины ($m = 1.41 \pm 0.01$ г.) подвешенной к нерастяжимой вольфрамовой нити с диаметром 40 мкм. Зафиксированные углы отклонения маятника позволили нам рассчитать тягу с помощью простейшей формулы баллистического маятника. Ошибка измерения полученных результатов не превышает 10–15% [15].

2.5. Электрический зонд

Электрический зонд использовался для измерения скорости электронного облака в плазменном потоке. Зонд представляет собой вольфрамовый проводник с диаметром 0.5 мм и длиной 5 мм. Расстояние от поджигающего электрода до зонда 5 см. Искра появляется, в первую очередь, на месте, где располагается поджигающий электрод. Поэтому мы рассматриваем его как начальную точку отсчета. На зонд подается положительный потенциал относительно точки заземления. После чего, электроны притягиваются к нему. Поток электронов создает электрический ток в цепи зонда. Зонд вместе с поясом Роговского, одновременно подключается к входу четырехканального осциллографа. Сигнал с поясом Роговского, фиксируется как основной, опорный сигнал (t_1). Сигнал на зонде появляется после

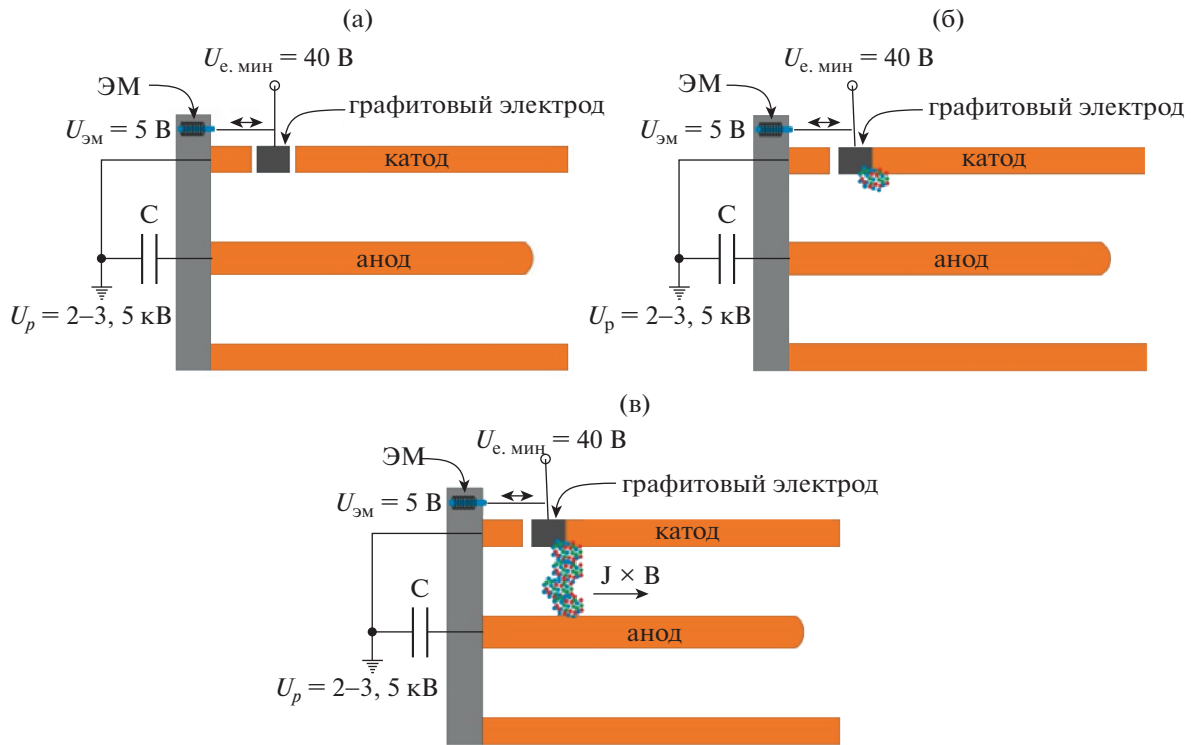


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: заряд конденсатора (а), зажигание искрового разряда (б), генерация плазмы (в).

сигнала пояса Роговского за время t_2 [16]. В таком случае, скорость электронного облака в плазменном потоке может быть рассчитана по формуле (1):

$$v_e = \frac{d}{t_2 - t_1}, \quad (1)$$

где d – расстояние между поджигающим электродом и зондом.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В этом разделе мы сосредоточились в исследовании влияния геометрии электродов и системы поджига на режим работы твердотельного ИПД и генерацию плазмы в нем. Наши первые экспериментальные результаты, полученные на твердотельном ИПД с плоскопараллельными электродами представлены в работе [17]. Основными недостатками этих экспериментов были большие габариты, значительный удельный вес твердотельного ИПД. Кроме того, убегание плазменного канала между неограниченными плоскопараллельными электродами может отрицательно влиять на тяговую эффективность твердотельного

ИПД. Поэтому, для улучшения рабочих характеристик твердотельного ИПД плоскопараллельные электроды были заменены на коаксиальные. Более того, габариты твердотельного ИПД были уменьшены в размерах по сравнению с первой моделью. Таким образом, уменьшился его удель-

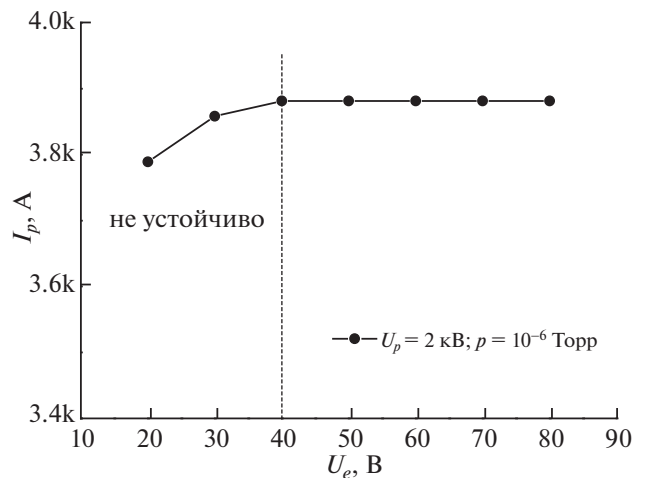


Рис. 3. Зависимость разрядного тока от напряжения, приложенного к поджигающему электроду.

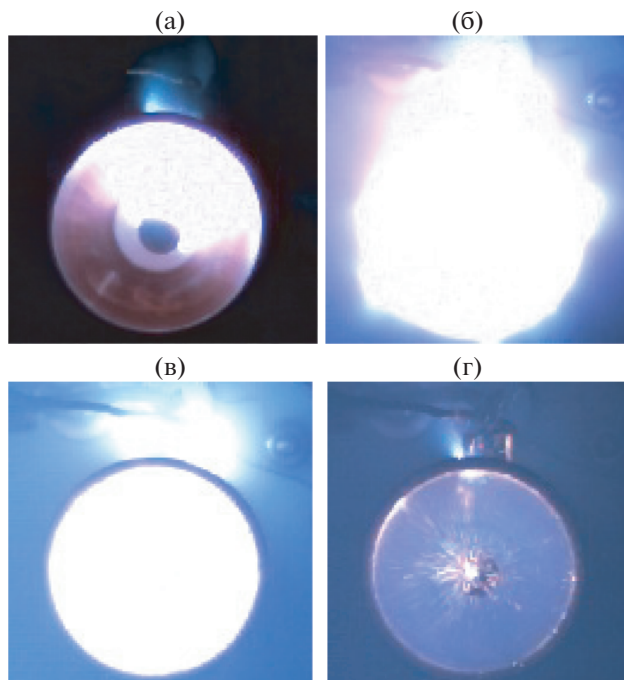


Рис. 4. Развитие и динамика импульсного разряда в межэлектродном пространстве. Диаметр наружного электрода 30 мм (большой круг на рисунках). Межкадровое время 4.75 мкс: 0 (а); 4.75 (б); 23.75 (в); 28.5 (г).

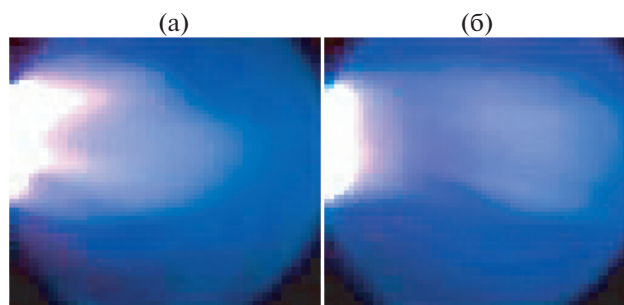


Рис. 5. Развитие и динамика импульсного разряда, полученные при 3.5 кВ (вид сбоку). Диаметр смотрового окошка 60 мм. Межкадровое время 2.16 мкс: 0 (а); 4.32 (б).

ный вес. Фотография твердотельного ИПД показана на рис. 1.

Экспериментально была определена зависимость импульсного разрядного тока от напряжения, приложенного к поджигающему электроду (рис. 3). Оптимальным значением является $U_e \geq 40$ В. Выше порогового напряжения, разрядный ток не изменяется, и основной разряд воспламеняется стабильно, как это видно из рис. 3.

Мгновенные кадры образования искрового разряда и ускорения плазмы, полученные высокоскоростной CMOS-камерой показаны на рис. 4. Скорость плазменного потока, выходящего из двигателя, была оценена с использованием

двух последовательных кадров, показанных на рис. 5. Время между кадрами составляет 2.16 мкс. Высокоскоростная CMOS-камера расположена рядом со смотровым окошком на вакуумной камере (диаметр окошка составляет 60 мм). Объектив камеры направлен перпендикулярно к оси ускорения плазмы. В этой позиции максимальное разрешение камеры было установлено 128×64 пикселя. В качестве начальной точки наблюдения считается момент времени, когда фронт сгустка плазмы фиксируется объективом камеры (рис. 5а). За время 4.32 мкс фронт сгустка плазмы смещается на некоторое расстояние (рис. 5б), которое можно определить из кадра с известными масштабами. Следовательно, зная

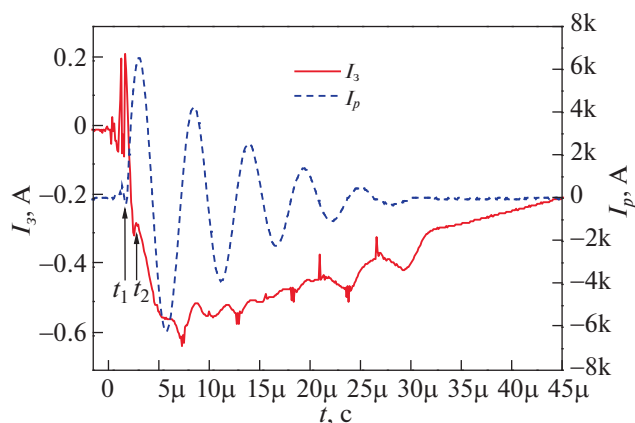


Рис. 6. Сигналы разрядного (I_p) и зондового (I_3) тока, полученные при 3 кВ.

расстояние и интервал времени между двумя последующими кадрами, была рассчитана скорость первичного потока плазмы, которая составляет 27.8 км/с.

Скорость истечения заряженных частиц в первичном плазменном потоке была экспериментально определена одиночным электрическим зондом и сигналом пояса Роговского, который используется как опорный сигнал. Электрический зонд положительно смещен относительно точки заземления и располагается на расстоянии 5 см от системы поджига. Осциллограммы тока зонда и разрядного тока, зарегистрированные одновременно цифровым осциллографом LeCroy 456A показаны на рис. 6. Точковый сигнал на зонде возникает после сигнала с пояса Роговского. Высокочастотные колебания (шум) в начале зондового сигнала появляются вследствие зажигания искрового разряда. Таким образом, средняя скорость упомянутых выше заряженных частиц на фронте потока плазмы, оцененная измерением разницы времени между двумя сигналами ($t_2 - t_1$) составляет 47 км/сек.

Также было обнаружено образование пылевых частиц в результате зажигания плазмы и эрозии графитового и медных электродов. Причиной эрозии является искровой разряд и взаимодействие энергичной плазмы с электродами. Основываясь на том факте, что плазма концентрируется на центральном электроде (униполярная дуга,

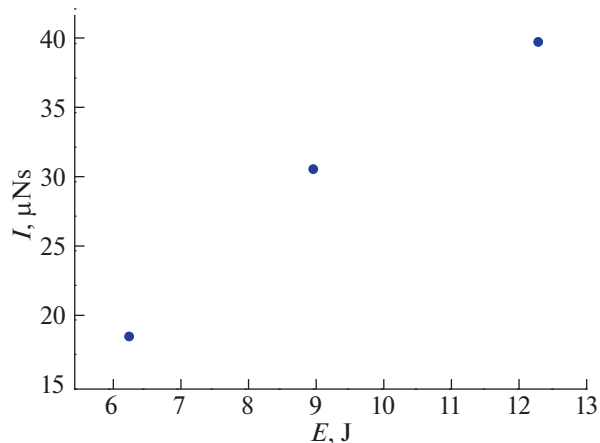


Рис. 7. Зависимость удельного импульса тяги твердотельного ИПД от энергии, накопленной в конденсаторной батарее.

рис. 4г), можно судить, что большинство пылевых частиц появляются в основном на кончике анода. По сравнению с плазменными частицами, они имеют больше массы, поэтому могут ускоряться с небольшой начальной скоростью. Однако они могут производить дополнительную тягу.

В табл. 1 представлены результаты измерения тяговой характеристики твердотельного ИПД в одиночном импульсе. Эти результаты были получены в зависимости от напряжения U_p , приложенного к катоду и аноду, а также от напряжения U_e , приложенного к поджигающему электроду. Для этого использовалась титановая мишень, подвешенная на нерастяжимую вольфрамовую нить. Масса вольфрамовой нити пренебрежимо мала и не учитывается в наших расчетах. Мишень была расположена на пути плазменному потоку. Мы рассматриваем маятник как баллистический маятник. Вышедшая с начальной скоростью из двигателя плазма взаимодействует с этой мишенью. Это взаимодействие происходит за короткое время. В это время баллистический маятник приобретает скорость и отклоняется на некоторое расстояние. Тогда мы можем записать закон сохранения импульса для этих систем следующим образом:

$$Mv_1 + mv_2 = (M + m)v', \quad (2)$$

Таблица 1. Экспериментальные данные измерения удельного импульса твердотельного ИПД

	$U_p = 2.5$ кВ	$U_p = 3$ кВ	$U_p = 3.5$ кВ
$U_e = 50$ В	18.8 мкН · с	30.9 мкН · с	40.1 мкН · с
$U_e = 80$ В	19.8 мкН · с	26.9 мкН · с	40.5 мкН · с
$U_e = 110$ В	18.3 мкН · с	26.9 мкН · с	38 мкН · с

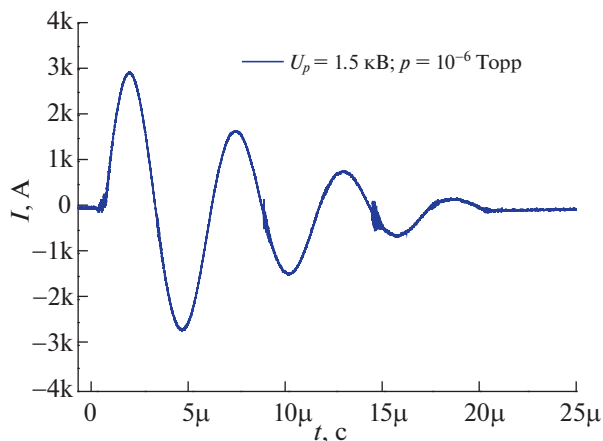


Рис. 8. Осциллограмма разрядного тока.

где M — масса плазменного сгустка, выходящего из двигателя, m — масса маятника (масса мишени), v_1 — скорость плазменного потока до взаимодействия с мишенью, $v_2 = 0$, скорость баллистического маятника до взаимодействия с плазмой равна нулю, v' — скорость маятника после взаимодействия с плазмой. В результате взаимодействия баллистический маятник не только смещается на расстояние x , но и поднимается на высоту h . Высоту маятника можно получить, как $h = l - \sqrt{l^2 - x^2}$. В таком случае, скорость маятника во время взаимодействия с плазмой может быть оценена по формуле

$$v' = \sqrt{2gh}, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения. Выражение для измерения удельного импульса твердотельного ИПД ($I_{bit} = Mv_1$) может быть получено путем подстановки выражения (3) в (2) [18]

$$I_{bit} = Mv_1 = (M + m)\sqrt{2gh} = m\sqrt{2g(l - \sqrt{l^2 - x^2})}, \quad (4)$$

где учитывается условие $m \gg M$.

Полученные результаты показаны в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что с увеличением напряжения U_p , удельный импульс твердотельного ИПД также увеличивается. Абсолютное значение удельного импульса двигателя было получено при напряжении 3.5 кВ и составляет 40.5 мкН · с. Это можно объяснить увеличением кинетической энергии плазменного потока, поскольку накопленная энергия в конденсаторной батарее преобразуется в кинетическую энергию (как можно видеть на рис. 7). Энергия, накопленная в конденсаторной батарее прямо пропорциональна квадрату напряжения U_p .

Осциллограмма разрядного тока и вольтамперная характеристика (ВАХ) твердотельного

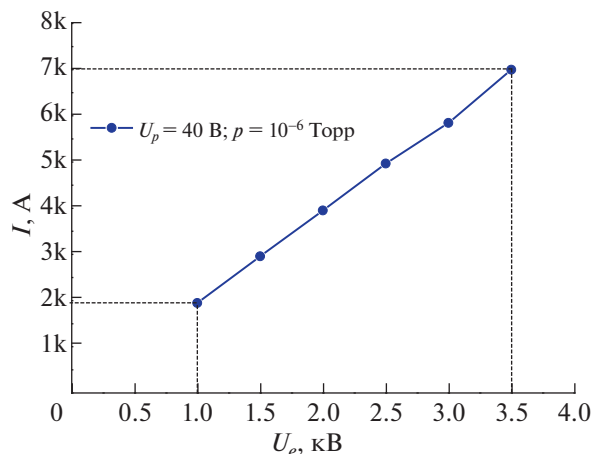


Рис. 9. Вольтамперная характеристика твердотельного импульсного плазменного двигателя.

ИПД, полученные поясом Роговского представлены на рис. 8 и 9. Осциллограмма разрядного тока представляет затухающую кривую типичных для всех типов импульсных плазменных ускорителей [14, 19]. Разрядный ток увеличивается линейно с увеличением напряжения на конденсаторе U_p . Такая зависимость может быть объяснена увеличением энергии, вложенной в разряд. В эксперименте абсолютное значение разрядного тока $I_p = 7$ кА было получено при напряжении $U_p = 3.5$ кВ.

Линейный спектрометр Solar S100 использовался для получения эмиссионного спектра плазмы в твердотельном ИПД показан на рис. 10. Оно включает линии CuII с длиной волны 465.2 и 656.4 нм, Си с длиной волны 465.7, 658.3, 723.1 нм. Возникновение этих линии объясняется эрозией графитового и медных электродов в результате искрового разряда и взаимодействия с энергичной плазмой. Это свидетельствует о наличии в потоке плазмы пылевых частиц, вылетевших из графитового электрода. Кроме того, спектр плазмы включает спектральные линии остаточного воздуха (при давлении газа в вакуумной камере $p = 10^{-6}$ Торр).

Ловушка из алюминиевой фольги, смещенная отрицательным потенциалом относительно точки заземления, использовалась для измерения массы, исходящей из электродов (топлива) и переносимая потоком плазмы в одиночном импульсе. Диаметр ловушки в 2 раза превышает диаметр внешнего электрода. Она была закреплена на массивной медной пластине и установлена на расстоянии 2 см от конца внешнего электрода. Отрицательный потенциал, приложенный к ловушке, и медная пластина, на которой она была закреплена, обеспечивают и усиливают конден-

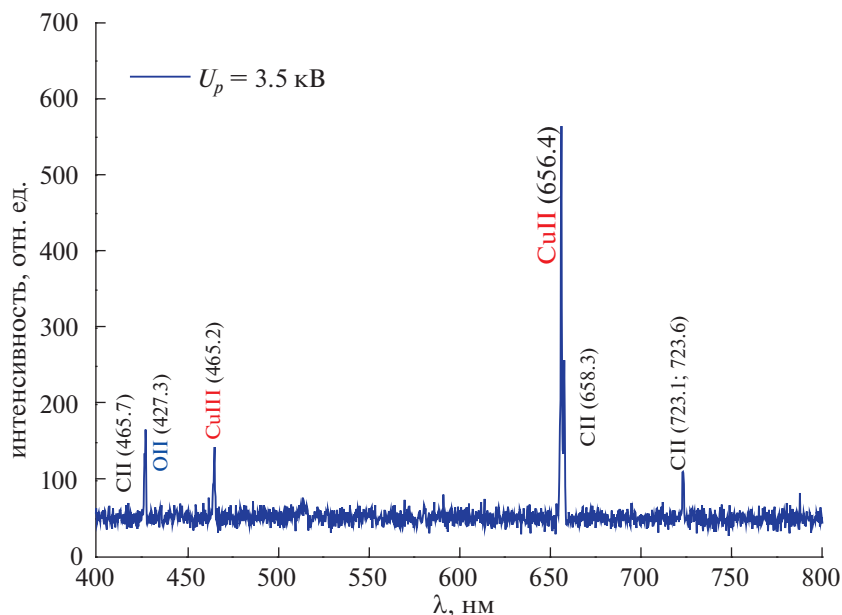


Рис. 10. Эмиссионный спектр плазмы в твердотельном импульсном плазменном двигателе.

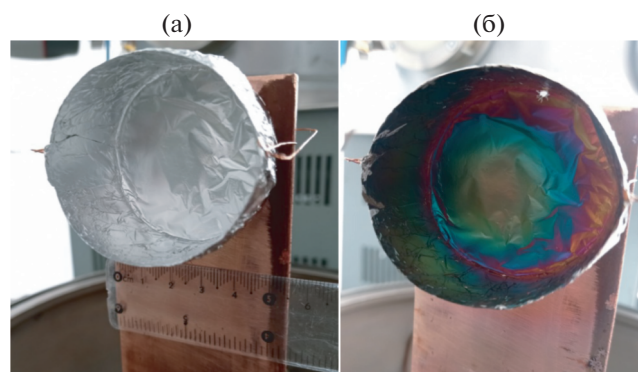


Рис. 11. Ловушка для ионов и пылевых частиц: до экспериментов (а), после экспериментов (б).

сацию и осаждение ионов плазмы на дне ловушки. Фотография ловушки до начала экспериментов показана на рис. 11а.

Расход топлива в одном импульсе невелик, поэтому мы провели серию экспериментов из 5400 импульсов в автоматизированном твердотельном ИПД. Для автоматизации работы твердотельного ИПД используется электронная плата управления. После облучения 5400 плазменными импульсами ловушка выглядит так, как показано на рис. 11. Отчетливо видно, что на внешней поверхности ловушки была образована пленка (налет), за счет осаждения продуктов плазмы на дне ловушки. Для измерения массы ловушки до и после экспериментов использовались весы типа CPA 225D с точностью 0.01 мг. Измеренная общая масса ловушки (истощенная из твердотель-

ного ППТ) составила 5.9 мг после облучения 5400 импульсами. Из этого следует, что расход плазменного топлива за импульс составляет 0.001 мг/импульс. Необходимо отметить, что в процессе взаимодействия высокоскоростного плазменного ступка с поверхностью ловушки конденсирующееся вещество может распылиться энергичными ионами, испариться или отразиться. В таком случае, коэффициент конденсации будет меньше 1. Поэтому полученную оценку расхода топлива следует считать заниженной.

Измеренное значение удельного импульса тяги составило 30.9 мкН·с при зарядном напряжении 3 кВ (табл. 1). В этом случае можно оценить среднюю скорость истечения массы экспериментальной установки как 30.9 км/с (разделив удельный импульс на расход массы за импульс). Но это

значение скорости следует считать завышенным с учетом неопределенности реального коэффициента конденсации. Измеренные зондовым методом значения скорости зарядов при одинаковом зарядном напряжении составили 47 км/с. Как видно, результаты двух экспериментов различаются на 35%. Это различие можно объяснить тем, что скорость движения заряженных частиц на фронте плазменного сгустка, измеренная зондом не полностью отражает среднюю скорость истечения всех частиц, вылетающих из устройства за импульс. Поэтому в рамках будущих экспериментов планируется более точное исследование скоростей всех компонентов плазмы и массового расхода топлива (электродов).

В экспериментах частота импульсов составляла 1 Гц. Из всех импульсов 5% теряются, например, из 60 импульсов в течение одной минуты 3–4 импульса не инициируются.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был собран и разработан твердотельный импульсный плазменный двигатель. Твердотельный ИПД имеет следующие конструктивные особенности: коаксиальные электроды изготовлены из меди; расстояние между электродами составляет 12 мм; поджигающий электрод изготовлен из графита и используется в качестве твердого топлива. Экспериментально оценены скорости истечения плазменных заряженных частиц на фронте плазменного потока, которые находятся в диапазоне 27.8 км/с и 47 км/сек. Кроме того, были получены электрические, структурные и тяговые характеристики твердотельного ИПД. Выявлено, что за счет увеличения накопленной энергии в конденсаторной батарее можно получить большой удельный импульс тяги. Абсолютное значение удельного импульса тяги 40.5 мкН·с было получено при напряжении 3.5 кВ. Также было обнаружено, что частицы пыли образуются во время искрового разряда и вследствие взаимодействия энергичной плазмы с электродами. Массовое истощение электродов (топлива) в твердотельной модели ИПД измерялось с помощью ловушки из алюминиевой фольги. Отрицательный потенциал, приложенный к ловушке и медная пластина, на которую она закреплена, усиливают конденсацию и осаждение ионов плазмы на дне ловушки. Для измерения массы ловушки до и после экспериментов использовались весы CPA 225D с точностью 0.01 мг. Измеренная общая масса ловушки (истощенная из твердотельного ИПД) составила 5.9 мг после воздействия 5400 импульсов. Следовательно, скорость потребления плазменного топлива за импульс составляет 0.001 мг/импульс, а средняя скорость выхлопа была оценена как отношение удельного импульса к скорости потребления массы за импульс и составила

30.9 км/с. При том же зарядовом напряжении скорости зарядов, полученные зондовым методом измерения, составили 47 км/с. Как видно, разница двух экспериментальных результатов различается на ~35% и может быть больше измеренного, потому, что коэффициент конденсации топлива на самом деле может быть меньше 1. В целом, эта разница может быть объяснена разницей средней массовой скорости всех частиц, вылетающих из исследуемого устройства за импульс. Поэтому в рамках будущих экспериментов планируется более точное исследование скоростей и массовых долей всех компонентов плазмы, выходящих из исследуемого устройства за импульс.

Полученные результаты показывают возможность применения данного устройства в космических технологиях. В частности, оно может использоваться для коррекции и контроля орбит наноспутников. В будущем планируется увеличение веса твердотельного ИПД, улучшение его тяговых и энергетических характеристик.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан (проект НТП № AP08053373).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Levchenko I., Bazaka K., Ding Y., Raitse Y., Mazouffre S., Henning T., Klar P.J., Shinohara S., Schein J., Garrigues L., Kim M., Lev D., Taccogna F., Boswell R.W., Charles C., Koizumi H., Shen Y., Scharlemann C., Keidar M., Xu S.* // *Appl. Phys. Rev.* 2018. V. 5. P. 011104.
2. *Garrigues L., Coche P.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2011. V. 53. P. 124011.
3. *Keidar M., Zhuang T., Shashurin A., Teel G., Chiu D., Lukes J., Haque S., Brieda L.* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2015. V. 57. P. 014005.
4. *Gessini P., Hahl T.C., Barcelos N.D., Ferreira J.L., Marques R.I., Coletti M.* // *Proc. of the 33rd Int. Electric Propulsion Conf. IEPC, USA, 2013.* V. 3. P. 344.
5. *Gatsonis N.A., Lu Y., Blandino J., Demetriou M.A., Paschalidis N.* // *J. Spacecraft and Rockets.* 2016. V. 53. P. 57–73.
6. *Koizumi H., Noji R.* // *Phys. Plasmas.* 2007. V. 14. P. 033506.
7. *Molina-Cabrera P., Herdrich G., Lau M., Fausolas S., Schoenherr T., Komurasaki K.* // *Proc. of the 32nd Int. Electric Propulsion Conf. IEPC, Wiesbaden, Germany, 2011.* V. 8. P. 340.
8. *Szelecka A., Kurzyńska J., Daniłko D., Barral S.* // *Nukleonika.* 2015. V. 60. P. 257.
9. *Antropov N.N., Bogatyy A.V., Dyakonov G.A., Lyubinskaya N.V., Popov G.A., Semenikhin S.A., Tyutin V.K., Khrustalev M.M., Yakovlev V.N.* // *Solar System Res.* 2012. V. 46. P. 531.
10. *Huang T., Wu Zh., Sun G., Liu X., Liang Ling W.Y.* // *Acta Astronautica.* 2020. V. 173. P. 69.

11. *Gluscock M.S., Rovey J.L., Polzin K.A.* // *Aerospace*. 2020. V. 7. P. 1.
12. *Miyasaka T., Nishigaki K., Matsui Y., Asahara M., Inaba T., Ono R., Kumagai S.* // *Vacuum*. 2021. V. 186. P. 110039.
13. *Martinez H.* // *J. Phys. Confer. Series*. 2015. V. 591. P. 012028.
14. *Tazhen A.B., Rayimkhanov Zh.R., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S.* // *Plasma Phys. Reports*. 2020. V. 46. P. 465.
15. *Göksel B., Mashek I.Ch.* // *J. Phys. Confer. series*. 2017. V. 825. P. 012005.
16. *Li Y.H., Palagiri S., Chang P.Y., Montag Ch., Herdrich G.* // *J. Aeronautics, Astronautics and Aviation*. 2019. V. 51. P. 031.
17. *Dosbolayev M.K., Ussenov Ye.A.* // *J. PEOS*. 2020. № 22. V. 2. P. 45.
18. *Aheieva K., Toyoda K., Cho M.* // *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*. 2016. V. 14. P. Pb91.
19. *Tazhen A.B., Dosbolayev M.K.* // *Recent Contributions to Physics*. 2021. V. 77. P. 30.