

МРНТИ 29.27.39; 29.27.51; 89.25.25

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v85.i2.05>

Ж.Б. Игибаев , А.К. Хамзаев* , О.А. Ертаев , М.К. Досболаев 
НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г.Алматы
*email: khamzayevaset@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Целью данной работы, являются изучения зависимости тягово-энергетических характеристик и геометрии электродов импульсно-плазменного двигателя (ИПД) с твердым топливом была проведена серия экспериментов. Результаты исследования позволили выявить полезные зависимости, которые раскрывают связь между емкостью конденсатора и импульсом бита ИПД, а также между геометрией электродов и тяговыми характеристиками ИПД. По полученным данным можно сделать следующие выводы, с увеличением емкости конденсаторов с 3 мкФ на 5 мкФ способствует улучшению тяговых характеристик, в то время как уменьшение расстояния между электродами посредством изменения диаметра анода с 6 мм на 10 мм отрицательно влияет на тяговые характеристики ИПД. Эти зависимости были получены при изменении напряжения между коаксиальных электродов с 2 кВ до 3,5 кВ с шагом 0,5 кВ. Они играют важную роль в дальнейшем улучшении и оптимизации конструкции твердотопливных ИПД, а также позволяют обеспечить их эффективное функционирование в условиях космического пространства. Полученные результаты представляют собой ценную информацию для разработчиков и инженеров, работающих в области космической технологии. Они могут быть использованы в дальнейших исследованиях и разработках, направленных на создание более эффективных и надежных твердотопливных ИПД, способных успешно выполнять задачи корректировки орбиты и поддержания стабильного положения малых космических аппаратов. Это открывает новые перспективы для развития космической инженерии и обеспечения более эффективного использования твердого топлива в плазменных двигателях.

Ключевые слова: импульсная плазма, импульсный плазменный двигатель, разрядный ток, электроэрозия электрода.

Ж.Б. Игибаев, А.К. Хамзаев*, О.А. Ертаев, М.К. Досболаев
ЭТФЭЗИ, Эл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.
*email: khamzayevaset@gmail.com

Қатты отынмен жұмыс істейтін импульстік плазмалық қозғалтқыштың тиімділігін эксперименттік зерттеу

Бұл жұмыстың мақсаты қатты отынмен импульстік-плазмалық қозғалтқыштың (ИПҚ) тартқыш-энергетикалық сипаттамалары мен электродтарының геометриясына тәуелділікті зерттеу болып табылады. Зерттеу нәтижелері конденсатордың сыйымдылығы мен ИПҚ бит импульсі арасындағы, сондай-ақ электродтардың геометриясы мен ИПҚ тарту сипаттамалары арасындағы байланысты ашатын пайдалы тәуелділіктерді анықтау. Алынған мәліметтерге сәйкес келесі тұжырымдар жасауға болады, конденсаторлардың сыйымдылығын 3 мкФ-тан 5 мкФ-қа дейін арттырған кезде, тарту сипаттамалары арттады, ал анодтың диаметрін 6 мм-ден 10 мм-ге өзгерту арқылы электродтар арасындағы ара қашықтықты азайту ИПҚ -тың тарту сипаттамаларына кері әсер етеді. Бұл тәуелділіктер коаксиалды электродтар арасындағы кернеу 0,5 кВ қадаммен 2 кВ-тан 3,5 кВ-қа дейін өзгерген кезде алынды. Олар қатты отынмен ИПҚ дизайнын одан әрі жақсартуда және оңтайландыруда маңызды рөл атқарады, сонымен қатар олардың ғарыш кеңістігінде тиімді жұмыс істеуін қамтамасыз етеді. Нәтижелер ғарыштық технология саласында жұмыс істейтін әзірлеушілер мен инженерлер үшін құнды ақпарат болып табылады. Олар орбитаны түзету және шағын ғарыш аппараттарының тұрақты күйін сақтау міндеттерін сәтті орындай алатын тиімдірек және сенімді қатты отынмен ИПҚ құруға бағытталған қосымша зерттеулер мен әзірлемелерде пайдаланылуы мүмкін. Бұл ғарыштық инженерияны

дамытудың және плазмалық қозғалтқыштарда қатты отынды тиімді пайдалануды қамтамасыз етудің жаңа перспективаларын ашады.

Түйін сөздер: импульстік плазма, импульстік плазмалық қозғалтқыш, разрядты ток, электрод электр эрозиясы.

Zh.B. Igibayev, A.K. Khamzayev *, O.A. Yertayev, M.K. Dosbolayev

IETP Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*email: khamzayevaset@gmail.com

Experimental study of the efficiency of a solid-fuel pulsed plasma engine

The purpose of this work is to study the dependence of thrust-power characteristics and electrode geometry of a solid-fueled pulse-plasma engine (PPE) was carried out in a series of experiments. The results of the study revealed useful dependences that reveal the relationship between the capacitor capacity and the pulse bit of the PPE, as well as between the geometry of the electrodes and the thrust characteristics of the PPE. According to the obtained data the following conclusions can be made, with increasing the capacitor capacitance from 3 μ F to 5 μ F contributes to improving the traction characteristics, while reducing the distance between the electrodes by changing the anode diameter from 6mm to 10mm negatively affects the traction characteristics of a PPE. These dependencies were obtained by changing the voltage between the coaxial electrodes from 2kV to 3.5kV in 0.5kV increments. They play an important role in further improvement and optimization of the solid-propellant PPE design, as well as to ensure their effective operation in space conditions. The results obtained are valuable information for designers and engineers working in the field of space technology. They can be used in further research and development aimed at creating more efficient and reliable solid-propellant PPEs that can successfully perform the tasks of orbit correction and maintaining the stable position of small spacecraft. This opens new prospects for the development of space engineering and ensuring more efficient use of solid propellant in plasma engines.

Key words: pulsed plasma, pulsed plasma engine, discharge current, electrode electrical erosion.

Введение

Импульсный плазменный двигатель (ИПД) представляет собой перспективную систему для двигательных установок с уникальными характеристиками, включающими низкое энергопотребление, небольшую массу, низкий импульсный бит, высокий удельный импульс и простую конфигурацию [1-3]. ИПД находит широкое применение в таких задачах, как поддержание орбиты космических аппаратов и обслуживание микро спутников [4-11].

Основной вызов при исследовании абляционного импульсного плазменного двигателя заключается в эффективном использовании ограниченной энергии системы для достижения наилучших характеристик двигателя, учитывая ограниченную мощность энергетической системы спутника [12, 13]. Когда режим энергоснабжения системы определен, можно улучшить характеристики двигателя путем оптимизации конструктивных параметров электродов и энергетических параметров [14].

Таким образом, оптимизация конструкции электродов и энергетических параметров является важным фактором для улучшения

характеристик импульсного плазменного двигателя, позволяющего эффективно использовать ограниченные ресурсы и обеспечить эффективную работу в космических задачах.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка представляет собой твердотопливный импульсный плазменный двигатель. Он состоит из нескольких основных компонентов: катода, анода и поджигающего (эродированного) электрода, как показано на рис. 1. Катод и анод изготовлены из медного материала и расположены цилиндрический коаксиально. Расстояние между ними составляет 12 мм. Плоский графитовый электрод (поджигающий электрод) используется в качестве твердого топлива. Он расположен на прямоугольном проеме катода, и с ним контактирует в определенных условиях. Вся система находится в вакуумной камере, которая предварительно откачивается до давления 10^{-6} Торр.

Принцип работы экспериментальной установки показан на рис. 1.

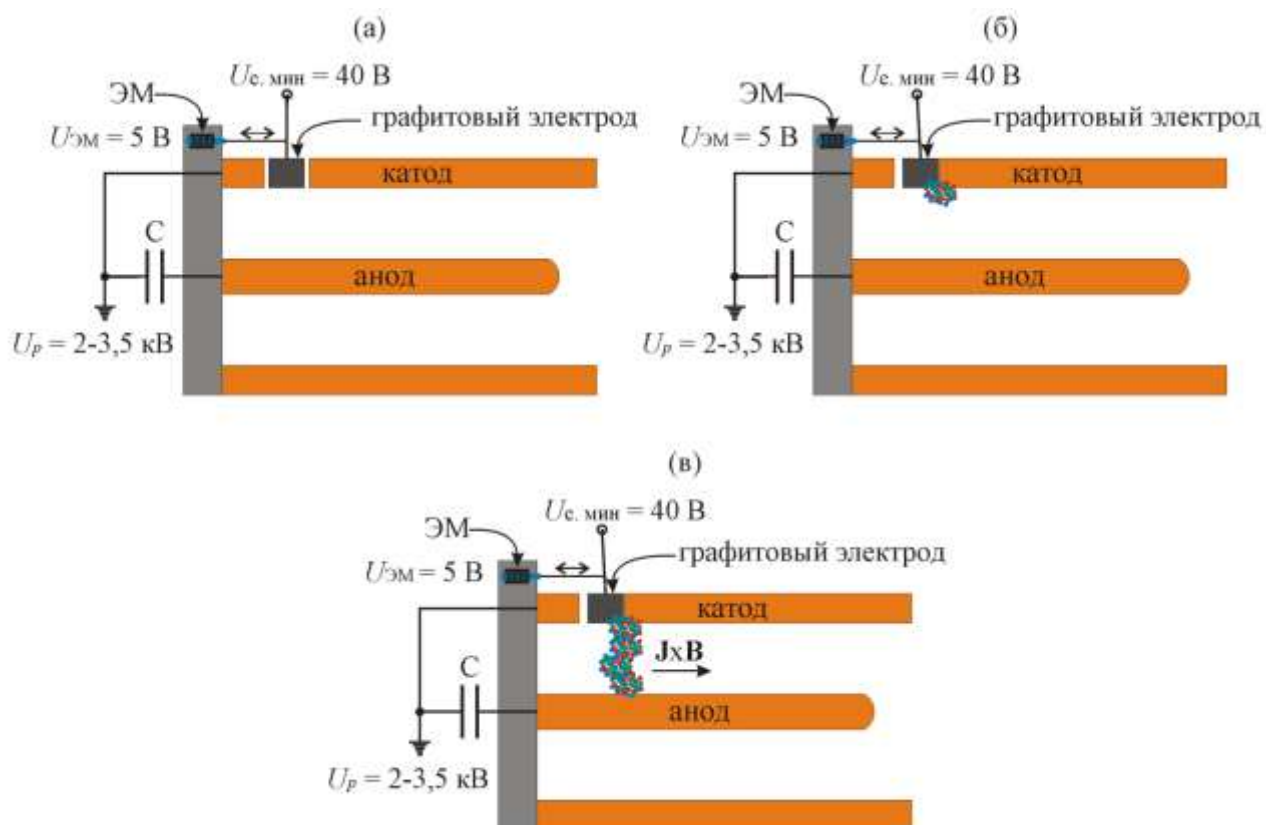


Рисунок 1. Иллюстрационная схема экспериментальной установки
a – зарядка конденсатора, *b* – зажигание искрового разряда, *c* – генерация плазмы.

Конденсаторная батарея заряжается до напряжения U_p с внешнего источника питания двигателя (Рис. 1*a*). Кроме того, напряжение U_e подается на поджигающий электрод. Затем специальный электромагнитный механизм активируется, чтобы обеспечить прямой контакт между поджигающим электродом и катодом (Рис. 1*b*). Электромагнитный механизм запускается импульсом напряжения $U_{ЭМ}$, подаваемого на неподвижную катушку.

Процесс иницирования разряда и ускорения плазмы между катодом и анодом происходит следующим образом: для начала необходимо установить проводящий канал между катодом и анодом, чтобы иницировать основной разряд (плазменную перемычку). Этот проводящий канал формируется за счет ионизации газа первичными электронами, которые ускоряются в электрическом поле между катодом и анодом. Первичные электроны (заряды, молекулы) появляются при искровом разряде, который возникает при прямом контакте между поджигающим электродом и катодом, то есть при электрической эрозии (см. Рис. 1 *b*). Искровой разряд не иницируется до момента контакта, так как на поджигающий электрод прикладывается

небольшое положительное напряжение U_e около 40 В относительно катода.

Затем конденсаторная батарея полностью разряжается через проводящий канал, и всё накопленная энергия переходит в газовый разряд. В результате образуется плазменная перемычка с собственным магнитным полем (см. Рис. 1*c*). Тем самым плазма подвержена силе Ампера, и в результате поток плазмы ускоряется в направлении выхода из двигателя со значительной скоростью, создавая тягу.

Таким образом, иницирование разряда и ускорение плазмы происходят путем создания проводящего канала и передачи энергии от конденсаторной батареи в газовый разряд, что приводит к образованию плазменной перемычки и созданию тяги за счет ускорения плазмы.

Экспериментальная часть

В настоящей статье представлены результаты, дополняющие предыдущие исследования [15], связанным с экспериментальной установкой твердотопливного импульсного плазменного двигателя.

Результаты и обсуждение

Влияния емкости накопительных конденсаторов на тяговую характеристику ИПД

В ходе исследования был проведен анализ зависимости удельной тяги от ёмкости накопительных конденсаторов. Путем серий экспериментов и анализов полученных результатов было установлено, что существует прямая связь между ёмкостной энергией системы питания и удельным импульсом, который может быть достигнут двигателем. Это позволяет оптимизировать работу двигателя и выбирать наилучшие параметры для достижения более эффективных характеристик.

Для исследования влияния емкости энергонакопительных конденсаторов на тяговую характеристику были проведены серии экспериментов. С учетом ограничений по массогабаритным характеристикам, были выбраны конденсаторы с номинальными емкостями 2 мкФ и 5 мкФ. Запасенная на этих конденсаторах энергия определяет количество доступной электрической энергии, которая может быть преобразована в кинетическую энергию и ионизацию рабочего газа в плазму. [16-17]. Напряжение, подаваемое как на основные электроды, так и на поджигающий электрод, оставалось постоянным на протяжении экспериментов.

Тяговая характеристика импульсного плазменного двигателя (ИПД) была определена с использованием метода баллистического маятника [18]. Данный метод предназначен для измерения небольших величин момента в микроньютон-секундах (мкНс). Баллистический маятник - это устройство, которое используется для измерения силы реакции на действующее усилие, в данном случае тяги, производимой ИПД.

Применение метода баллистического маятника позволяет точно измерить момент силы, возникающий при работе ИПД, даже при малых значениях. Также этот метод обеспечивает высокую чувствительность и точность измерений, что важно для характеристики ИПД, поскольку их тяга обычно невелика.

Таким образом, применение метода баллистического маятника для определения тяговой характеристики ИПД обеспечивает надежные результаты измерений и позволяет получить информацию о производимой тяге при малых значениях момента. Ёмкостная энергия относится к энергии, хранящейся в электрической емкости, которая используется для питания ИПД.

Результаты полученных данных представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Зависимость тяговой характеристики от емкости конденсаторов

C [мкФ] U [кВ]	2	5
	I_{bit} [мкНс]	I_{bit} [мкНс]
2		55,17
2,5	18,8	80,42
3	30,9	97,52
3,5	40,1	141,71

На основании полученных данных можно сделать вывод, что увеличение емкости энергонакопительных конденсаторов приводит к увеличению тяговых характеристик. Особенно заметно это проявляется при более низких напряжениях, где тяга в импульсе увеличивается в 4 раза при использовании более высокой емкости конденсаторов. энергия заряженного конденсатора играет важную роль в определении удельной тяги импульсного плазменного двигателя (ИПД).

Чем выше ёмкостная энергия, тем больше энергии доступно для преобразования в тягу. Это может привести к увеличению удельной тяги ИПД. [19] Более высокая ёмкостная энергия позволяет ИПД работать с более высокой электрической мощностью, что приводит к более интенсивной ионизации рабочего тела и более высокой скорости истечения ионов, что в свою очередь увеличивает тягу [20].

Однако, повышение ёмкостной энергии может также привести к увеличению массогабариты системы хранения энергии, так как для достижения большей ёмкости могут потребоваться более массивные или более сложные компоненты. Это может ограничить возможность увеличения удельной тяги из-за увеличения массы двигателя.

Таким образом, влияние ёмкостной энергии на удельную тягу ИПД зависит от компромисса между доступной энергией и массой системы хранения энергии. Оптимизация этих параметров является важной задачей при проектировании ИПД для достижения максимальной удельной тяги.

Были получены осциллограмма разрядного тока и вольтамперная характеристика (ВАХ) твердотопливного ИПД при разных значениях накопительных конденсаторов с использованием пояса Роговского. Пояс Роговского представляет собой замкнутый соленоид диаметром 45 мм, который используется для измерения магнитного поля вокруг проводника. [21-22] Характеристики

этого соленоида следующие: число витков $N = 335$, активное внешнее нагрузочное сопротивление $R = 1,45$ Ом, индуктивность катушки пояса $L = 31$ мкГн.

Путем применения пояса Роговского были получены данные о разрядном токе, который протекает через твердотельный ИПД, а также о вольтамперной характеристике, которая показывает зависимость напряжения на ИПД от тока. Эти измерения позволяют получить информацию о работе ИПД и его электрических характеристиках во время разрядных процессов. Один из примеров полученной осциллограммы представлена на рис. 2

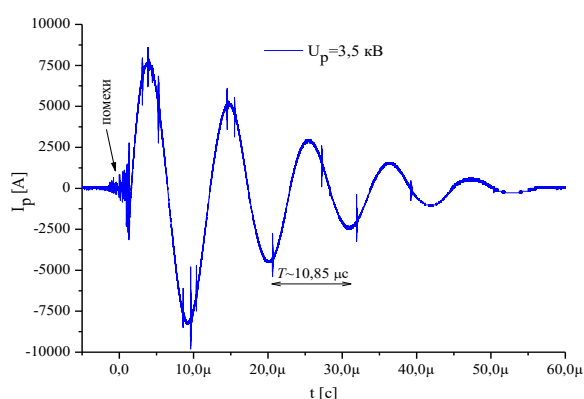


Рисунок 2. Осциллограмма разрядного тока при емкости конденсатора 5 мкФ

Осциллограмма разрядного тока представляет затухающую кривую типичных для всех типов импульсных плазменных ускорителей [23]. Разрядный ток увеличивается линейно с увеличением емкости конденсатора. Такая зависимость может быть объяснена увеличением энергии, вложенной в разряд. В эксперименте, абсолютное значение разрядного тока $I_d = 7,5$ кА, было получено при напряжении $U_p = 3,5$ кВ и емкости конденсатора $C = 5$ мкФ.

Влияния геометрических параметров электродов на тяговую характеристику ИПД

В рамках исследования была проанализирована зависимость тяговой характеристики двигателя от параметров геометрии его электродов. Путем изменения геометрических параметров электродов и измерения тяговой силы при различных условиях эксперимента были получены зависимости, описывающие взаимосвязь между геометрией электродов и тяговой характеристикой. Это позволяет оптимизировать конструкцию

электродов для достижения максимальной тяги и эффективности работы двигателя.

В целях изучения влияния геометрии электродов на функционирование твердотопливного импульсного плазменного двигателя (ИПД) и процесс генерации плазмы в нем, проведены исследования, направленные на анализ зависимости тяговых характеристик ИПД от расстояния между электродами и для этого был увеличен диаметр внутреннего электрода (анода). В результате, уменьшение расстояния между электродами на 4 мм привело к ухудшению тяговых характеристик ИПД, как показано в таблице 2. В целом, эти результаты не являются окончательными положительными и зависят от конкретных условий и массогабаритных показателей.

Таблица 2 - Зависимость тяговой характеристики от геометрии электродов ИПД

	6 [мм]	10 [мм]
U [kV]	I_{bit} [мкНс]	I_{bit} [мкНс]
2	55.17	16.48
2,5	80.42	27.48
3	97.52	80.42
3,5	141.71	94.66

Результаты исследования показали, что изменение расстояний между электродами оказывает значительное влияние на тяговые характеристики ИПД. Надо отметить, такое поведение ИПД были обнаружены и в аналогичных работах [24-25]. Таким образом, было обнаружено, что уменьшение расстояния между электродами приводит к ухудшению тяговых характеристик. Это может быть объяснено тем, что уменьшение расстояния между электродами приводит к увеличению сопротивления плазмы и уменьшению эффективности передачи энергии в плазму. Кроме того, уменьшенное расстояние привело к более колебательному разряду при том же уровне разрядного напряжения. Это приводит к уменьшению относительной величины импульса бита и уменьшению эффективности тяги.

С другой стороны, достаточно большое расстояние между электродами также может негативно сказаться на тяговых характеристиках ИПД. Это связано с возникновением более колебательных разрядов между электродами, при одном и том же разрядном напряжении.

Таким образом, оптимальное расстояние между электродами является важным фактором для обеспечения высокой тяговой эффективности твердотопливного ИПД. Дальнейшие исследования и оптимизация конструкции могут

помочь определить оптимальные значения расстояний между электродами для достижения наилучших тяговых характеристик.

Заключение

Проведенные эксперименты позволили сделать следующие выводы относительно зависимости между расстояниями между электродами и тяговыми характеристиками твердотопливного импульсного плазменного двигателя (ИПД).

Во-первых, установлено, что увеличение емкости энергонакопительных конденсаторов приводит к повышению тяговых характеристик. Это наблюдается особенно при более низких напряжениях, где тяга в импульсе возрастает в 4 раза при использовании более высокой емкости конденсаторов. Энергия конденсатора играет важную роль в определении удельной тяги ИПД.

Во-вторых, выявлено, что разрядный ток линейно увеличивается с ростом емкости конденсатора. Это объясняется увеличением энергии, передаваемой в разряд. В эксперименте было получено абсолютное значение разрядного тока $I_p = 7,5$ кА при напряжении $U_p = 3,5$ кВ и емкости конденсатора $C = 5$ мкФ.

В-третьих, вывод состоит в том, что уменьшение расстояния между электродами отрицательно влияет на тяговые характеристики. Это объясняется тем, что уменьшение расстояния между электродами приводит к повышению сопротивления плазмы и снижению эффективности передачи энергии в плазму. Кроме того, более большие промежутки между электродами приводят к более колебательному разряду при одном и том же разрядном напряжении. Это снижает относительный импульс и эффективность тяги.

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают, что расстояния между электродами оказывают значительное влияние на тяговые характеристики твердотопливного ИПД, и оптимальное расстояние между электродами следует выбирать с учетом достижения максимальной эффективности тяги.

Финансирование

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, грант № AP19576858.

Литература

- 1 Yang Ou, Jianjun Wu, Yu Zhang, Jian Li. Theoretical Modeling and Parameter Analysis of Micro-Pulsed Plasma Thruster / *Energies*. – 2018. – Vol.11. – P.1146.
- 2 Zhao Yuanzheng, Sheng Tan, Jianjun Wu, Yu Zhang. The ablation characteristics of laser-assisted pulsed plasma thruster with metal propellant // *Plasma Sci. Technol.* – 2021. – Vol.23. – Art.No 104007.
- 3 William Yeong, Liang LING, Song ZHANG, Hao FU, Mengcheng HUANG, Justin QUANSAH, Xiangyang LIU Ningfei, WANG. A brief review of alternative // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2020. – Vol.33, Iss.12. – P. 2999-3010.
- 4 Zhiwen W.U., Tiankun Huang, Xiangyang Liu, William Yeong Liang Ling, Ningfei Wang, Lucheng J.I. Application and development of the pulsed plasma thruster // *Plasma. Sci. Technol.* – 2020. – Vol.22. – P.131–144.
- 5 Dan L., Roger M. Myers, Kristina M. Lemmer, Jonathan K., Hiroyuki K., Kurt P. The technological and commercial expansion of electric propulsion // *Acta Astronaut.* – 2019. – Vol.159. – P.213–227.
- 6 Gessini P., Habl L., Barcelos M., Ferreira J.L., Marques R.I., Coletti M. Low Power Ablative Pulsed Plasma Thrusters // *Proc. of the 33rd Int. Electric Propulsion Conf. IEPC, USA.* – 2013. – Vol.3. – P. 344.
- 7 Gatsonis N.A., Lu Y., Blandino J., Demetriou M.A., Paschalidis N. Micropulsed plasma thrusters for attitude control of a low-earth-orbiting cube sat // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 2016. – Vol. 53. – P.57-73.
- 8 Hiroyuki Koizumi, Ryosuke Noji, Kimiya Komurasaki, Yoshihiro Arakawa. Plasma acceleration processes in an ablative pulsed plasma thruster // *Physics of Plasmas*. – 2007. – Vol. 14. – Art.No 033506.
- 9 Molina-Cabrera P., Herdrich G., Lau M., Fausolas S., Schoenherr T., Komurasaki K. Pulsed Plasma Thrusters: a worldwide review and long yearned classification // *Proc. of the 32nd Int. Electric Propulsion Conf. IEPC, Wiesbaden, Germany.* – 2011. – Vol.8. – P.340.
- 10 Szelecka A., Kurzyna J., Daniłko D. Barral S. Liquid micro pulsed plasma thruster // *Nukleonika*. – 2015. – Vol. 60. – P. 257–261.
- 11 Antropov N.N., Bogatyuy A.V., Dyakonov G.A., Lyubinskaya N.V., Popov G.A., Semenikhin S.A., Tyutin V.K., Khrustalev M.M., Yakovlev V.N. A New Stage in the Development of Ablative Pulsed Plasma Thrusters at the RIAME // *Solar System Research*. – 2012. – Vol.46. – P.531-541.
- 12 Rui Zhang, Wenxiong Xil, Qiang Huang. Influence of Different Energy Supply Methods on Performance of Ablative Pulsed Plasma Thrusters // *Front. Energy Res.* – 2021. – Vol.9. – Art.No 752017.
- 13 Zhiwen Wu, Guorui Sun, Tiankun Huang, Xiangyang Liu, Kan Xie, Ningfei Wang. Optimization of the energy distribution in ablative pulsed plasma thrusters // *AIAA J.* – 2018. – Vol.56. – P.3024–3034.

- 14 Zhe Zhang, William Yeong Liang Ling, Haibin Tang, Jinbin Cao, Xiangyang Liu Ningfei Wang. A review of Energy Operation of the characterization and optimization of ablative pulsed plasma thrusters // *Rev. Mod. Plasma Phys.* – 2019. – Vol.3. – P.3-5.
- 15 Dosbolayev M.K., Igiybayev Zh.B., Tazhen A.B., Ramazanov T.S. Preliminary Study of the Solid-State Pulsed Plasma Thruster Model with Graphite as a Propellant // *Plasma Physics Reports.* – 2022. – Vol.48. – P.263–270.
- 16 Rui Zhang, Wenxiong Xi, Qiang Huang. Influence of Different Energy Supply Methods on Performance of Ablative Pulsed Plasma Thrusters // *Front. Energy Res.*, 31 August 2021. *Sec. Electrochemical Energy Conversion and Storage. China.* – 2021. – Vol.9. – 10.3389.
- 17 Jianjun W.U., Yu Zhang, Yang O.U., Hua Zhang. Experimental investigation on the plasma morphology of ablative pulsed plasma thruster with tongue-shaped and flared electrodes // *Plasma Sci. Technol.* – 2020. – Vol.22 – Art.No 094007.
- 18 Aheieva K., Toyoda K., Cho M. Vacuum Arc Thruster Development and Testing for Micro and Nano Satellites // *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan.* – 2016. – Vol. 14. – P.Pb91-Pb97.
- 19 Huang, T., Wu, Z., Zhu, K. The energy distribution mechanism in an ablative pulsed plasma thruster // *Chin.Space Sci. Tech.* – 2018. – Vol.38. – P.38–45.
- 20 Zhang, Y., Wu, J., Ou, Y. Investigation on plasma characteristics in a laser ablation pulsed plasma thruster by optical emission spectroscopy // *Plasma Sci.* – 2020. *Tech. 4.* – P.83–89.
- 21 Perusquía S., Castillo F., Reyes P.G., Martínez H. Study of the Rogowski coil response in a plasma focus device // *Journal of Physics Conference Series.* – 2015. – Vol. 591. – Art.No. 012028.
- 22 Yi Liu, Fuchang Lin, Qin Zhang, Heqing Zhong. Design and Construction of a Rogowski Coil for Measuring Wide Pulsed Current // *IEEE Sensors Journal.* – February 2011. – Vol.11(1). – P.123-130.
- 23 Tazhen A.B., Rayimkhanov Zh.R., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S. Generation and Diagnostics of Pulse Plasma Flows // *Plasma Physics Reports.* – 2020. – Vol. 46. – No. 4. – P. 465–471.
- 24 Keidar M., Boyd I.D., Antonsen E.L., Burton R., Spanjers G.G. Optimization issues for a micropulsed plasma thruster // *J. Propul. Power.* – 2006. – Vol. 22(1). – P.48–55.
- 25 Zhe Zhang, William Yeong, Liang Ling, Haibin Tang, Jinbin Cao, Xiangyang Liu, Ningfei Wang. A review of the characterization and optimization of ablative pulsed plasma thrusters // *Reviews of Modern Plasma Physics.* – 2019. – Vol.3. – Art.No 5.

References

- 1 Yang Ou, Jianjun Wu, Yu Zhang and Jian Li, *Energies*, 11, 1146 (2018).
- 2 Zhao Yuanzheng, Sheng Tan, Jianjun Wu and Yu Zhang, *Plasma Sci. Technol.* 23, 104007 (2021).
- 3 William Yeong, Liang Ling, et al., *Chinese Journal of Aeronautics*, 33 (12), 2999-3010 (2020).
- 4 Zhiwen Wu, et al., *Plasma. Sci. Technol.*, 22, 131–144 (2020).
- 5 Dan Lev, Roger M. Myers, et al., *Acta Astronaut.*, 159, 213–227 (2019).
- 6 P. Gessini, L. et al., *Proc. of the 33rd Int. Electric Propulsion Conf. IEPC, USA*, 3, 344 (2013).
- 7 Gatsonis N.A., Lu Y., et al., *Journal of Spacecraft and Rockets*, 53, 57-73 (2016).
- 8 Hiroyuki Koizumi, Ryosuke Noji, Kimiya Komurasaki and Yoshihiro Arakawa, *Physics of Plasmas*, 14, 033506 (2007).
- 9 Molina-Cabrera P., Herdrich G., Lau M., Fausolas S., Schoenherr T. and Komurasaki K., *Proc. of the 32nd Int. Electric Propulsion Conf. IEPC, Wiesbaden, Germany*, 8, 340 (2011).
- 10 A. Szelecka, J. Kurzyrna, D. Daniłko and S. Barral, *Nukleonika*, 60, 257-261. (2015).
- 11 N.N. Antropov, A.V. Bogaty, et al., *Solar System Research*, 46, 531 – 541 (2012).
- 12 Rui Zhang, Wenxiong Xi and Qiang Huang, *Front. Energy Res.* 9, 752017 (2021).
- 13 Zhiwen Wu, et al., *AIAA J.*, 56, 3024–3034 (2018).
- 14 Zhe Zhang, et al., *Rev. Mod. Plasma Phys.*, 3, 3-5 (2019).
- 15 M.K. Dosbolayev, Zh.B. Igiybayev, A.B. Tazhen and T.S. Ramazanov, *Plasma Physics Reports*, 48, 263–270 (2022).
- 16 Rui Zhang, et al., *Front. Energy Res.*, 31 August 2021, *Sec. Electrochemical Energy Conversion and Storage. China*, 9 10.3389 (2021).
- 17 Jianjun Wu, et al., *Plasma Sci. Technol.*, 22, 094007 (2020).
- 18 K. Aheieva, et al., *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan*, 14, Pb91-Pb97 (2016).
- 19 Huang T., Wu, Z. and Zhu, K., *-Chin.Space Sci. Tech.* 38, 38–45, (2018).
- 20 Zhang Y., Wu, J. and Ou, Y., *Plasma Sci Tech.* 4, 83–89 (2020).
- 21 Perusquía S., F. Castillo, P.G. Reyes and H. Martínez, *Journal of Physics Conference Series*, 591, 012028 (2015).
- 22 Yi Liu, et al., *IEEE Sensors Journal*, 11(1), 123-130 (2011).
- 23 A.B. Tazhen, Zh.R. Rayimkhanov, M.K. Dosbolayev and T.S. Ramazanov, *Plasma Flows. Plasma Physics Reports*, 46, (4), 465–471 (2020).
- 24 M. Keidar, et.al., *J. Propul. Power* 22(1), 48–55 (2006)
- 25 Zhe Zhang, et.al., *Reviews of Modern Plasma Physics*, 3, 5 (2019).