

Влияние геометрии разрядного канала и площади поверхности рабочего тела на единичный импульс силы в абляционном импульсном плазменном ускорителе

Д.А. Егوشин^{}, А.П. Подлосинская, Д.К. Федорова, Д.О. Новиков, В.Д. Телех*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**yegoshinda2@gmail.com*

Аннотация. В данной работе оценено влияние геометрических характеристик канала и площади поверхности рабочего тела в импульсном плазменном ускорителе на единичный импульс силы. Выполнена серия экспериментов по измерению единичного импульса силы для ускорительных каналов с внешними диаметрами 12, 15, 18 и 21 мм при энергиях разряда 2.5 и 5.6 Дж. По результатам исследования выявлено, что наибольший импульс силы соответствует диаметру 15 мм как при 2.5, так и при 5.6 Дж.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, импульсный разряд.

1. Введение

Коаксиальные импульсные плазменные ускорители представляют собой простую конструкцию, состоящую из двух соосных цилиндрических электродов, между которыми закрепляется рабочее тело. Также на внешнем электроде закрепляется устройство поджига, после срабатывания которого происходит основной разряд, приводящий к абляции рабочего тела и последующему ускорению его ионизованных паров [1, 2]. Такие устройства нашли применение в различных областях техники в качестве инжекторов плазмы, источников УФ излучения, электроракетных двигателей и т.п. Широкий спектр выполняемых ими задач обусловлен рядом достоинств: высокая мощность импульса, простота и надежность экспериментальных систем, высокие удельные параметры плазменных сгустков. Но вместе с этим сложность и быстротечность происходящих в ускорителе процессов затрудняет их развитие. Определение оптимальных параметров ускорителя является ключом к прогрессу в практическом применении этих устройств.

В данной работе представлено экспериментальное исследование влияния геометрии разрядного канала на эффективность ускорения плазменных сгустков ускорителем, разрабатываемым для аппаратов формата CubeSat. Актуальность такого применения устройства подтверждается большим количеством работ по конструированию и расчету ускорителей иных типов, например, высокочастотных или электроразрядных [3–5].

2. Методика проведения эксперимента

Экспериментальные исследования проводились на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ускоритель размещался в вакуумной камере, которая откачивалась до остаточного давления $3 \cdot 10^{-4}$ Торр. Внешний электрод ускорителя был выполнен из меди, внутренний – из вольфрама, в качестве рабочего тела использовался гомополимер полиоксиметилена. Диаметр внутреннего электрода составлял 3 мм, а внешнего варьировался от 12 до 21 мм с шагом 3 мм. Длина ускорительного канала составляла 20 мм.

Подвод энергии в зону разряда осуществлялся по медным шинам от конденсаторной батареи емкостью 5 мкФ. Напряжение на обкладках конденсатора в одной серии экспериментов составляло 1 кВ, а в другой – 1.5 кВ. Перед ускорителем располагался баллистический маятник массой 0.86 мг. Фотография стенда приведена на Рис. 1.

Запись осциллограмм тока и напряжения разряда осуществлялась с помощью осциллографа Tektronix TDS 2024B, который был гальванически развязан от сети с помощью

трансформатора и находился под плавающим потенциалом камеры. Принципиальная схема измерений представлена на Рис. 2.

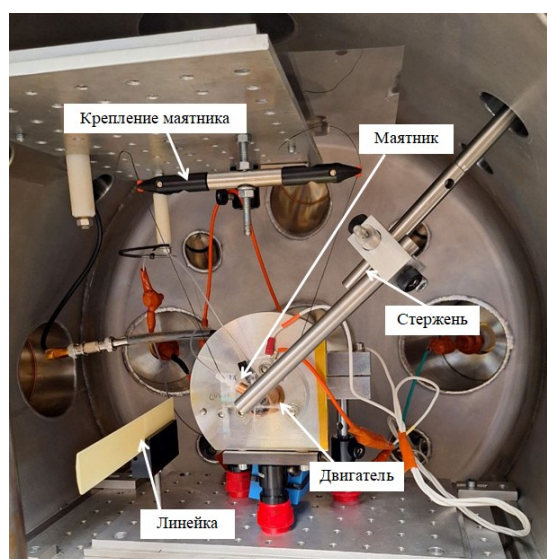


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

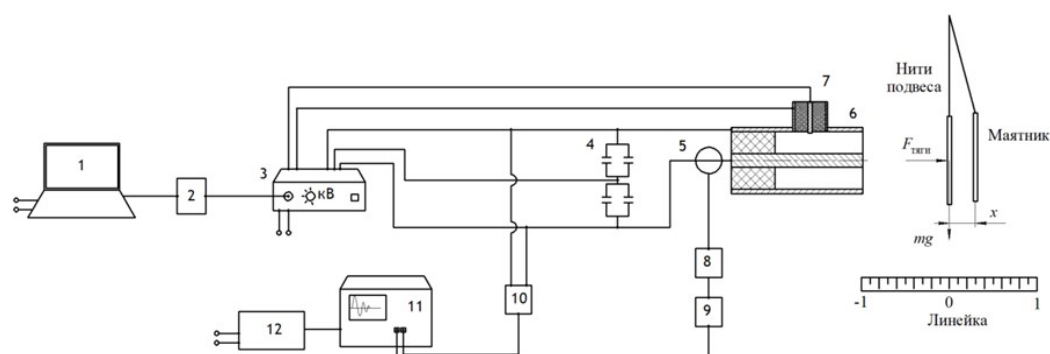


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 – компьютер, 2 – интерфейс RS-485, 3 – блок питания, 4 – конденсаторная батарея, 5 – пояс Роговского, 6 – импульсный плазменный ускоритель, 7 – свеча зажигания, 8 – RC-интегратор, 9 – фильтр, 10 – высоковольтный щуп, 11 – осциллограф, 12 – трансформатор.

Определение импульса силы осуществлялось путем измерения отклонения баллистического маятника. Рядом со смотровым окном располагалась видеокамера, которая записывала все время разряда. Полученная видеозапись обрабатывалась и определялся кадр, соответствующий максимальному отклонению баллистического маятника от начального положения. Полученное перемещение маятника пересчитывалось в импульс силы по методике, использованной в предыдущей работе [6].

3. Результаты экспериментального исследования

В качестве комплексных параметров для оценки результатов исследования будем использовать цену импульса силы – отношение E/I_{bit} (E – энергия разряда, I_{bit} – импульс силы) и удельную вложенную в разряд энергию – E/S (где S – площадь поверхности рабочего тела). Это позволит оценить насколько эффективно происходит передача энергии из системы питания ускорителя в кинетическую энергию потока, что является крайне важным показателем для применения таких устройств на аппаратах CubeSat из-за жестких ограничений по мощности на аппарате [7].

По результатам экспериментального исследования были определены зависимости импульса силы от диаметра ускорительного канала d (Рис. 3), а также от удельной вложенной в разряд энергии E/S (Рис. 4). Из Рис. 3 очевидно, что наибольший импульс силы соответствует диаметру внешнего электрода 15 мм, при этом удельная энергия для данной конфигурации не является максимальной и составляет порядка 3.5 Дж/см^2 . Также, исходя из диаграммы, представленной на Рис. 4, можно отметить, что несмотря на схожие значения удельной энергии для некоторых точек, значения импульса силы для них отличаются более чем в 2 раза. При этом, как видно из Рис. 5, отношение импульсов сил $I_{bit}(1.5 \text{ кВ})/I_{bit}(1 \text{ кВ})$, полученных при разных энергозкладах, незначительно отличается от отношений энергий (менее чем на 10%) для всех точек за исключением, соответствующих диаметру внешнего электрода 15 мм. Также, как видно из Рис. 6, наименьшая цена импульса силы E/I_{bit} соответствует диаметру внешнего электрода 15 мм, что говорит о наиболее эффективном ускорении материала.

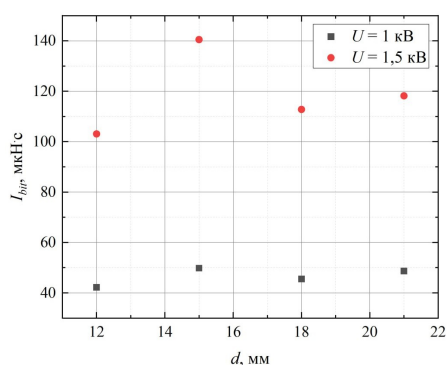


Рис. 3. Зависимость импульса силы от диаметра ускорительного канала.

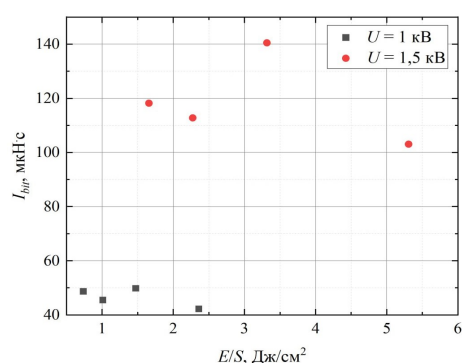


Рис. 4. Зависимость импульса силы от удельной энергии.

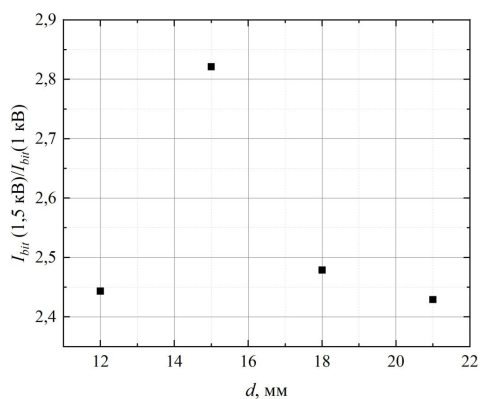


Рис. 5. Зависимость отношения импульсов силы при напряжениях 1.5 кВ и 1 кВ от диаметра ускорительного канала.

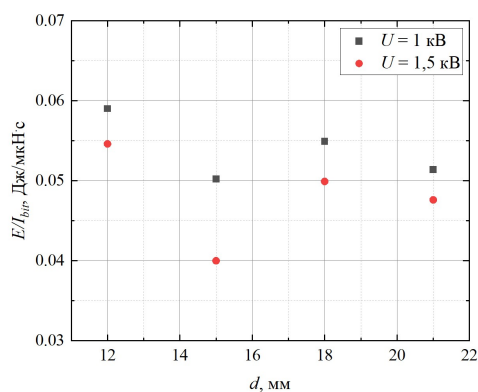


Рис. 6. Зависимость отношения энергии разряда к импульсу силы от диаметра ускорительного канала.

4. Заключение

В работе исследовано влияние геометрии канала на импульс силы и на цену импульса силы абляционного импульсного плазменного ускорителя. Также рассмотрена зависимость импульса силы от удельной энергии, вложенной разряд.

Выявлено, что при диаметре внешнего электрода 15 мм, что соответствует площади поверхности рабочего тела 675 мм^2 , достигается наибольший импульс силы при наименьшей энергетической цене удельного импульса. Стоит отметить, что при данном диаметре ускорительного канала локальный максимум импульса силы и локальный минимум

энергетической цены достигаются при напряжениях как 1 кВ, так и 1.5 кВ на обкладках конденсатора, в следствие чего можно сделать предположение о наиболее эффективном превращении энергии запасенной в конденсаторах в кинетическую энергию потока при данной геометрии канала. При этом отношение импульсов сил $I_{bit}(1.5 \text{ кВ})/I_{bit}(1 \text{ кВ})$ при такой конфигурации более чем на 10% превосходит аналогичный показатель для прочих диаметров, а значение плотности удельной энергии E/S является локальным минимумом, что подтверждает предположение о достижении максимального значения импульса силы при диаметре 15 мм в следствии более эффективного ускорения плазмы поперомоторными силами, а не увеличенного испарения массы диэлектрика.

Благодарность

Работа выполнена на уникальной научной установке (УНУ) «Пучок-М» МГТУ им. Н.Э. Баумана, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSFN-2024-0007.

5. Список использованных источников

- [1] A.V. Pavlov, T.S. Shchepanyuk, A.S. Skriabin, V.D. Telekh, Gas Dynamics Processes above the Polymers Surface under Irradiation with Broadband High-Brightness Radiation in the Vacuum Ultraviolet Spectrum Region, *Polymers*, vol. **14**, 3940, 2022; doi: 10.3390/polym14193940
- [2] A.V. Pavlov, Y.Y. Protasov, T.S. Shchepanyuk, et al., Features of Surface Ablation under Exposure to High-Brightness VUV Radiation from Pulsed High-Current Discharges, *High Energy Chem.*, vol. **57**, 145, 2023; doi: 10.1134/S0018143923070317
- [3] A. I. Shumeiko, V. D. Telekh, and V. I. Mayorova, Development of a novel wave plasma propulsion module with six-directional thrust vectoring capability, *Acta Astronautica*, vol. **191**, 431, 2022; doi: 10.1016/j.actaastro.2021.11.028
- [4] A.I. Shumeiko, J.S. Firas, S.S. Sean, Advanced wave plasma thruster with multiple thrust vectoring capability, *AIAA SCITECH 2022 Forum*, San Diego, 2022; doi: 10.2514/6.2022-2190
- [5] A. D. Pashaev, A. I. Shumeiko, V. D. Telekh, Determination of the minimum size of a small spacecraft of the cubesat standard for the possibility of using modern propulsion systems, *AIP Conference Proceedings*, Moscow, Russian Federation, vol. **2549**, 050002-1, 2023; doi: 10.1063/5.0107879
- [6] E.D. Egoshin, D.K. Fedorova, A.V. Pavlov, V.D. Telekh, Numerical modeling of dielectric ablation in microsecond pulsed discharge, *XLVII Akademicheskkiye chteniya po kosmonavtike*, Moscow, Russian Federation, 232, 2023; doi: 10.1007/s41614-019-0027-z
- [7] D. O'Reilly, G. Herdrich, D.F. Kavanagh, Electric Propulsion Methods for Small Satellites: A Review, *Aerospace*, vol. **8**, 22, 2021; doi: 10.3390/aerospace8010022