

ВЛИЯНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КА «ЭЛЕКТРО-М» И КА «ЭЛЕКТРО-М1»

В. П. Ходненко

Проведены оценки по определению степени влияния стационарных плазменных двигателей (СПД) на работоспособность солнечных батарей (СБ) при частичном попадании на неё истекающей из двигателя плазменной струи. Для оценки эрозионного воздействия были использованы экспериментальные данные по измерению структуры, энергетических характеристик и теплового излучения модели СПД, имеющей параметры, подобные выбранному в эскизном проекте двигателю мощность ~ 400 Вт (напряжение разряда ~ 160 В, ток разряда ~ 2,5 А). Оценки показали, что работа СПД гарантированно не должна оказывать влияние на функционирование СБ. Определена степень загрязняющего воздействия на КА в части солнечных батарей. Выбор в качестве мишени СБ является обоснованным, так как панели солнечных батарей имеют протяжённые размеры и могут в большей степени подвергаться загрязняющему воздействию. Оценки показали, что скорость очистки должна быть больше или, по крайней мере, равна скорости напыления, и число эрозирующих молекул больше числа напыленных молекул.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, солнечные батареи, плазменная струя, эрозионные воздействия, загрязняющее воздействие, плотность ионного тока, эрозия, напыление.

Оценка степени влияния СПД на работоспособность СБ

Как показал предварительный анализ, при существующей компоновке стационарного плазменного двигателя (СПД) на космических аппаратах (КА) «Электро-М» и «Электро-М1» возможно частичное попадание истекающей из двигателя плазменной струи на панели солнечных батарей (СБ).

В связи с этим необходимо провести оценки по определению степени влияния струи плазмы на работоспособность СБ.

Панели СБ на КА могут поворачиваться вокруг оси в пределах $\pm 90^\circ$ от плоскости осей XOZ . Схема взаимного расположения двигателя СПД-1 и одной из панелей СБ показана на рис. 1. Осевое направление истечения струи плазмы показано стрелкой.

Для оценки были использованы экспериментальные данные по измерению структуры, энергетических характеристик и теплового излучения модели СПД, имеющей параметры, подобные выбранному в эскизном проекте двигателю СПД-50: мощность ~ 400 Вт (напряжение разряда ~ 160 В, ток разряда ~ 2,5 А) [1].

Применительно к взаимному расположению СПД и СБ, представленному на рисунке, средняя плотность ионного тока на поверхности СБ должна составлять $\sim 10^{-5}$ А/см².

Плотность тока представляет собой максимальную величину для самого неблагоприятного взаимного расположения струи и СБ, когда панель солнечной батареи находится в плоскости ZOX .

Для того чтобы получить верхнюю оценку по степени влияния, полный ресурс двигательной установки (ДУ) должен быть отнесён к работе одного СПД и составлять ~ 700 ч. В этом случае при плотности ионного тока плазмы $j_i = 10^{-5}$ А/см² и ресурс двигателя $t = 700$ ч флюенс составляет $Q = 25$ кул/см².

В лабораторном эксперименте суммарное время воздействия струи СПД на СБ составило ~ 50 ч, а средний уровень флюенса потока ионов ~ 54 кул/см² при плотности тока ионов на поверхности панели СБ $(1 - 5) \cdot 10^{-4}$ А/см².

Для этого случая было получено незначительное (в пределах ошибок измерений) изменение вольтамперных характеристик СБ.

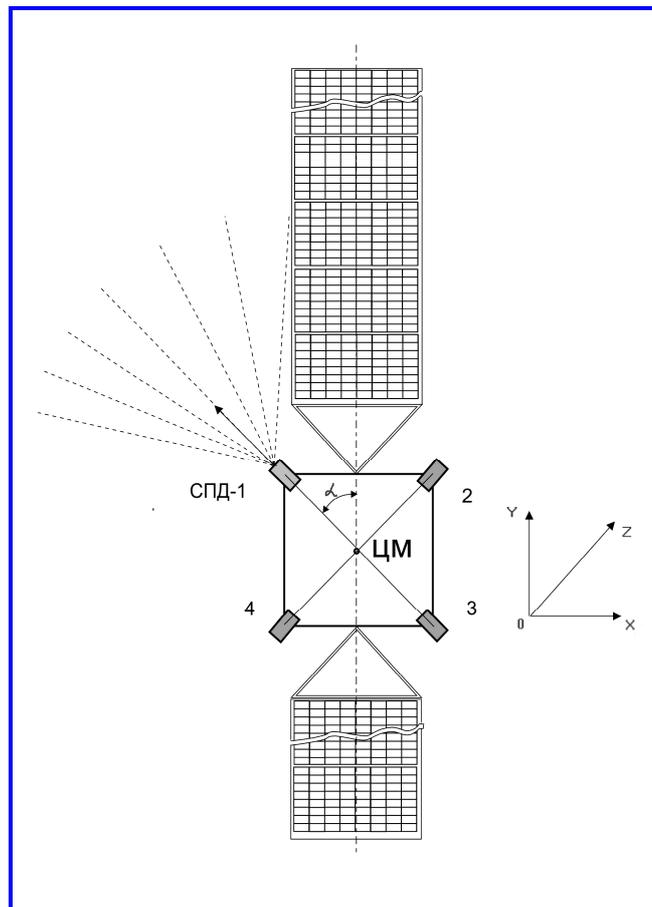


Схема взаимного расположения СПД-1 и панелей СБ

Необходимо отметить, что результаты лабораторных исследований хорошо согласуются с результатами ранее проведённых на КА «Метеор-Природа» № 1 натуральных экспериментов, которые показали, что влияние работы СПД на СБ при среднем значении флюенса ~ 27 кул/см² соизмеримо со скоростью её естественного старения (деградации).

Таким образом, в нашем случае (флюенс ~ 25 кул/см²) и работа СПД гарантированно не должна оказывать влияние на функционирование БС. Полученные оценки хорошо согласуются также с результатами исследований, проведёнными рядом авторов [2].

Ниже приведём оценки по степени загрязнения поверхности СБ продуктами истечения СПД.

По результатам наземных исследований коэффициентов распыления известно, что при энергии ионов ~ 100 эВ, характерной для нашего случая, коэффициент распыления материала ускорительного канала (АВН) составляет $\xi = 0,02$ мол/ион.

Коэффициент ионизации рабочего тела – ксенона в СПД составляет $\xi = 0,9 - 0,95$. Поэтому при секундном расходе ксенона через анод двигателя $\dot{m} = 2$ мг/с скорость распыления молекул с какой-либо поверхности должна быть пропорциональна $\chi \xi \cdot \dot{m}/M_{xe}$, где $M_{xe} = 2,1 \cdot 10^{-22}$ – масса ксенона. Скорость же распыления этой поверхности молекулами и частицами эрозии изолятора АВН с расходом $\dot{m} = 3 \cdot 10^{-3}$ мг/с при равномерной структуре струи и коэффициенте аккомодации Ψ должна быть пропорциональна $\Psi \cdot m_a/M_a$, где M_a – средняя масса молекул В, ВN и частиц АВН. При средней массе $M_a = 12$ атомных единиц скорости распыления и осаждения молекул должны сравняться.

При $M_a > 12$ и коэффициенте аккомодации меньше единицы, число эрозирующих молекул больше числа напыляемых молекул. Учитывая, что коэффициенты χ и Ψ зависят от угла попадания и энергии частиц, естественно ожидать такого соотношения, когда скорость очистки должна быть больше или, по крайней мере, равна скорости напыления.

Выше приведённые оценки были выполнены, как говорилось выше, применительно к СПД.

Степень загрязняющего воздействия СПД на КА

При использовании СПД могут возникнуть проблемы, связанные с загрязнением КА продуктами распыления элементов конструкции двигателя, а также с эрозионным воздействием на системы и аппарат в целом.

Поскольку в связи с выбранной компоновкой СПД на КА «Электро-М» и «Электро-М1» (наличие

свободных зон истекающей струи) последний факт не является актуальным, то ниже приведены оценки только по степени загрязнения поверхности СБ продуктами истечения двигателя. Выбор в качестве мишени СБ является обоснованным, так как панели солнечной батареи имеют протяжённые размеры и могут в большей степени подвергаться указанному воздействию.

В начале приведены общие оценки по распылению диэлектрических стенок ускорительного канала СПД под влиянием потока ионов. В СПД доля ионного тока, поступающего на стенки ускорительного канала, может достигать 20 – 50 %. При этом ионы, бомбардирующие стенки выходной части канала, обладают энергией, составляющей $\sim 60\%$ от приложенной разности потенциалов. Если плотность ионного тока, поступающего на диэлектрические стенки, составляет ~ 50 мА/см², а энергия ионов ~ 100 эВ, характерная для нашего случая, то для типичных значений коэффициента распыления диэлектрика $\sim 0,1$ см³/кул значение скорости износа стенок составит примерно 10^{-3} см/ч.

Именно такая скорость разрушения стенок – порядка сантиметра за тысячу часов работы – наблюдается в экспериментах и при стендовой отработке СПД на ресурс.

Что касается загрязнения продуктами истечения СПД, то для характерной энергии ионов, указанной выше, коэффициент распыления материала ускорительного канала двигателей коррекции и разгрузки (СПД-60) – АВН (алюмонитрид бора) составляет $\xi = 0,02$ мол/ион.

Коэффициент ионизации рабочего тела – ксенона в СПД-60 составляет $\chi = 0,9 - 0,95$. Поэтому при секундном расходе ксенона через анод двигателя $\dot{m} = 2$ мг/с скорость распыления молекул с какой-либо поверхности должна быть пропорциональна $\chi \xi \cdot \dot{m}/M_{xe}$, где $M_{xe} = 2,1 \cdot 10^{-22}$ г. – масса ксенона. Скорость распыления этой поверхности молекулами и частицами эрозии изолятора АВН с расходом $M_a \approx 3 \cdot 10^{-3}$ мг/с (исходя из общего количества унесённого материала, указанного выше) при равномерной структуре и коэффициенте аккомодации Ψ должна быть пропорциональна $\Psi \cdot m_a/M_a$, где M_a – средняя масса молекул ВВN и частиц АВН.

При средней массе $M_a > 12$ и коэффициенте аккомодации меньше единицы число эрозирующих молекул больше числа напыляемых молекул. Учитывая, что коэффициенты ξ и Ψ зависят от угла падения и энергии частиц, естественно ожидать такого соотношения, когда скорость очистки должна быть больше или, по крайней

мере, равна скорости напыления.

Таким образом, процессы очистки должны пре-
валировать над процессами загрязнения, и ожидать
заметного влияния работы СПД на характеристики
СБ маловероятно.

Литература

1. Космические исследования : [журнал] / Российская академия наук. – М. : Наука, 1988. – Т. 26. – Вып. 5.
2. Космические исследования : [журнал] / Российская академия наук. – М. : Наука, 1994. – Т. 34. – Вып. 4 – 5.

Поступила в редакцию 02.03.2018

*Владимир Павлович Ходненко, доктор технических наук, главный научный сотрудник, т. (495) 624-94-98.
E-mail: vniiem@orc.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

IMPACT OF STATIONARY PLASMA THRUSTERS ON «ELECTRO-M» AND «ELECTRO-M1» SATELLITES OPERABILITY

V. P. Khodnenko

The assessment of stationary plasma thrusters impact on the operability of solar arrays (SA) partially subjected to plasma jet emitted by thruster has been performed. The erosive effect was assessed on the basis of experimental measurements of the structure, energy characteristics and thermal dissipation of a stationary plasma thruster with performance specifications similar to those of the thruster selected for preliminary design (power: ~ 400 W, discharge voltage: ~ 160 V, discharge current: ~ 2.5 A). The assessment has shown that the stationary plasma thruster operation shall not affect the SA functioning. The level of impact in terms of satellite SA contamination was determined. The selection of SA as a target is quite reasonable, since the solar array panels have large dimensions and may be exposed to contamination to a great extent. The assessment has shown that the speed of cleaning shall be higher or at least equal to the speed of sputtering, and that the number of erosive molecules shall be greater than the number of sputtered molecules.

Key words: stationary plasma thruster, solar arrays, plasma jet, erosive impact, contamination, ion flux density, erosion, sputtering.

References

1. Cosmic Research: [periodical] / Russian Academy of Sciences. – М. : Nauka publishers, 1988. – V. 26. – Issue 5.
2. Cosmic Research: [periodical] / Russian Academy of Sciences. – М. : Nauka publishers, 1994. – V. 34. – Issues 4 – 5.

*Vladimir Pavlovich Khodnenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Chief Researcher, tel.: +7 (495) 624-94-98.
E-mail: vniiem@orc.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*