

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.01.036>

УДК 533.95

В. А. Шувалов¹, Н. Б. Горев¹, Н. А. Токмак¹, Н. И. Письменный¹, Г. Г. Осиновый²

¹ Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепро

² Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепро

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ НА ОБЪЕКТ «КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА»

Разработана методология физического (стендового) моделирования длительного воздействия высокоэнергичных (≥ 100 эВ) ионов потока разреженной плазмы на материал внешнего покрытия объекта «космического мусора», а именно III ступени РН «Циклон-3», применительно к процессам распыления материала и передачи импульса ионов объекту в проекте Европейского космического агентства LEOSWEEP. Методология основана на применении процедуры ускоренных ресурсных испытаний и критерия эквивалентности для двух режимов воздействия: в ионосфере Земли и на стенде.

Ключевые слова: космический мусор, плазменная струя, динамическое взаимодействие, распыление, сила.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы обострилось внимание к проблеме безопасной эксплуатации космических аппаратов (КА) на околоземных орбитах. Это обусловлено «загрязнением» околоземного пространства фрагментами изделий ракетно-космической техники: последних ступеней ракет-носителей (РН), топливных баков, отработавших ресурс КА и т. п. — объектами «космического мусора». Появилось значительное число проектов, предусматривающих очистку околоземного пространства путём увода (сталкивания) объектов «космического мусора» на более низкие орбиты для последующего сгорания их в плотных слоях атмосферы Земли. В частности, рассматривается торможение и увод объекта на более низкую орбиту при воздействии на него плазменной струи, генерируемой электрореактивным двигателем, размещенным на другом КА (проект ЕКА «Improving Low Earth Orbit Security With Enhanced

Electric Propulsion» — LEOSWEEP). Цель проекта LEOSWEEP состоит в том, чтобы оценить технологические возможности и эффективность миссии по удалению крупногабаритных объектов «космического мусора» посредством воздействия на него плазменной струи. Схему реализации такого проекта иллюстрирует рис. 1 [21 — 23]. В качестве возможного объекта рассматривается третья ступень украинской РН «Циклон-3». Эффективность реализации такого проекта в значительной степени определяется процессами передачи импульса ионов Xe^+ с энергией $E_i \approx 3.5$ кэВ материалу внешнего покрытия объекта «космического мусора».

Динамическое взаимодействие высокоэнергичных ионов Xe^+ с поверхностью твёрдого тела характеризуется:

- столкновениями первичных ионов с поверхностью (передача импульса и энергии);
- распылением (выбиванием атомов) бомбардируемого материала;
- рассеянием первичных частиц.

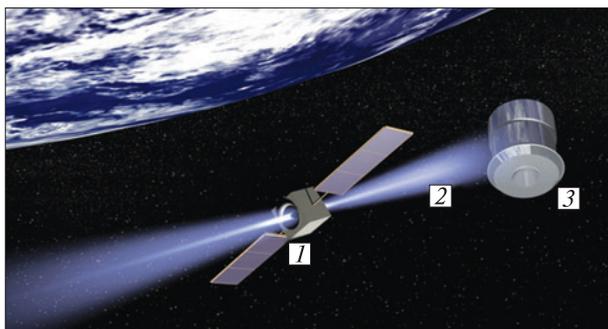


Рис. 1. Схема проекта LEOSWEEP в ионосфере Земли: 1 — КА LEOSWEEP, 2 — плазменная струя, 3 — объект «космического мусора»

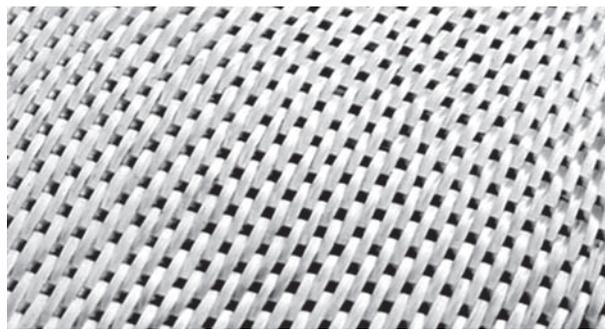


Рис. 2. Структура стеклоткани Э2-62 (размер нити стеклоткани 0.25 мм)

Вклад рассеянных частиц учитывается введением коэффициентов передачи импульса и энергии (коэффициентов аккомодации).

Определяющими для динамического взаимодействия высокоскоростных ионов потока плазмы с поверхностью твердого тела являются процессы распыления и силового воздействия (передача импульса).

Составляющими материала внешнего покрытия III ступени РН «Циклон-3» являются:

- экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), состоящая из 10 слоёв перфорированной алюминизированной полимерной плёнки ПЭТ толщиной 5 мкм;

- слои плёнки ПЭТ, проложенные (сдублированные) стекловолокнистым холстом ХСВН-7, предохраняющим слои плёнки от слипания;

- мат ЭВТИ, помещённый в конверт-чехол из стеклоткани Э2-62 (алюмоборосиликатное непрерывное волокно) толщиной 0.25 мм.

Покрытие нанесено на металлическую подложку из алюминий-магниевого сплава АМг-6М толщиной до 1.0 см.

По предварительным оценкам для увода объекта «космического мусора» с высоты около 650 км на орбиту 300 км длительность воздействия плазменной струи, генерируемой электрореактивным двигателем [23], на III ступень РН «Циклон-3» должна быть не менее 100 сут.

Поэтому при исследовании особенностей длительного динамического воздействия высокоэнергичных ($E > 1$ кэВ) ионов Xe^+ плазменной струи на материал внешнего покрытия III ступе-

ни РН «Циклон-3» должны быть использованы процедуры физического (стендового) моделирования.

Целью данной работы является разработка методологии физического (стендового) моделирования длительного динамического взаимодействия в системе «высокоэнергичные ионы плазменной струи — материал внешнего покрытия объекта «космического мусора» в ионосфере Земли», в части распыления и передачи импульса.

РАСПЫЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА ВНЕШНЕГО ПОКРЫТИЯ III СТУПЕНИ РН «ЦИКЛОН-3»

Техника эксперимента. Экспериментальные исследования проводились на плазмодинамическом стенде ИТМ. Стенд относится к классу плазменных газодинамических труб и предназначен для исследования взаимодействия КА с ионосферой Земли путём моделирования и имитации:

- передачи импульса и энергии потоков разреженной плазмы поверхностям и системам КА (аэродинамика и теплообмен) [15, 20];

- электрорадиационного дифференциального заряжения и нейтрализации КА на геостационарных орбитах и в полярной ионосфере [14, 17];

- физико-химической деградации конструкционных материалов наружных поверхностей КА [16, 18].

Вакуумная камера стенда (цилиндр диаметром 1.2 м и длиной 3.5 м) изготовлена из немагнитной нержавеющей стали. Система вакуумирования стенда

(механические насосы производительностью до $2.5 \text{ м}^3/\text{с}$; диффузионные насосы со скоростью откачки около $50 \text{ м}^3/\text{с}$; безмасляная откачка производительностью по воздуху около $50 \text{ м}^3/\text{с}$: вакуумный электроразрядный агрегат и турбомолекулярный насос), наличие в вакуумной камере криопанелей, охлаждаемых жидким азотом LN_2 , обеспечивают статическое разрежение 10^{-5} Н/м^2 , а при натекании газа — давление 1 мН/м^2 .

Образцы испытываемых материалов, модели КА, фрагменты элементов конструкций и приборы КА, диагностические средства размещаются на подвижных платформах (верхней и нижней) с четырьмя степенями свободы каждая, обеспечивающих продольное и поперечное перемещение в горизонтальной плоскости, перемещение в вертикальной плоскости и вращение вокруг вертикальной оси. Точность отсчета для линейных перемещений 0.5 мм , для угловых — 0.5° . В ходе эксперимента образцы испытываемых материалов, модели КА и диагностические зонды могут перемещаться практически в любую точку струи плазмы и объема вакуумной камеры.

Для измерения параметров плазменных потоков служит микроволновой интерферометр, работающий на частоте 5.45 ГГц , и система электрических зондов:

— цилиндрические зонды из вольфрама радиусом $r_p = 0.1 \text{ мм}$, длиной $l_p \approx 10 \text{ мм}$ и из молибдена $r_p = 45 \text{ мкм}$, $l_p = 4.5 \text{ мм}$,

— сферический зонд диаметром $2 r_p = 4 \text{ мм}$,
 — плоский зонд из молибдена диаметром $2 r_p \approx 10 \text{ мм}$,
 — цилиндр Фарадея из молибдена диаметром $r_p \approx 10 \text{ мм}$ и высотой $l_p \approx 10 \text{ мм}$.

Энергия направленного движения потока ионов контролируется многоэлектродным зондом — энергоанализатором.

В качестве источников сверхзвуковых потоков разреженной плазмы использовались газоразрядный ускоритель с ионизацией рабочего газа электронным ударом и осциллирующей электронов во внешнем магнитном поле и стационарный плазменный двигатель холловского типа (СПД-70).

Плазменный газоразрядный ускоритель позволяет генерировать сверхзвуковые потоки разреженной плазмы с использованием рабочих газов H_2 , He , Ne , N_2 , O_2 , Ar , Kr и Xe . Ускоритель оснащен многоэлектродной системой доускорения ионов потока плазмы во внешнем магнитном поле, которая позволяет получать потоки ионов Xe^+ с энергиями от 0.75 до 1.8 кэВ . Двигатель СПД-70 — источник потока плазмы с энергиями ионов Xe^+ от 200 до 300 эВ . Регистрация вольтамперных характеристик (ВАХ) производится в автоматическом режиме с погрешностью не более $\pm 2 \%$. Потенциал плазмы измерялся по точке расхождения характеристик холодного и нагретого термозонда; разброс значений составлял не более $\pm 4 \%$. Энергия направленного дви-

Таблица 1. Химический состав для получения алюмоборосиликатного непрерывного волокна

Тип волокна алюмоборосиликатного	Состав, масс. %												
	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	ZnO	TiO_2	ZrO_2	Na_2O	K_2O	Li_2O	Fe_2O_3	F_2
Молярная масса входящих веществ, г/моль	60.08	69.62	101.96	56.08	40.03	81.39	79.90	123.22	61.98	94.20	29.88	159.69	38.00
Состав (с бором) по мин., масс. %	52.0	4.0	12.0	21.0	0.4	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
Состав (с бором) по макс., масс. %	56.0	6.0	15.0	24.0	4.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.2	0.0	0.5	0.7

жения ионов E_i определялась с помощью многоэлектродного зонда. При обработке ВАХ многоэлектродного зонда (интегральных энергетических спектров) использовалась максвелловская функция распределения ионов по скоростям. Разброс значений E_i не превосходит $\pm 4.5\%$. Состав остаточного газа в вакуумной камере стенда контролировался с помощью масс-спектрометра MX 7307.

Внешнее покрытие III ступени РН «Циклон-3» — стеклоткань Э2-62, сетка. Структура стеклоткани показана на рис. 2. Объемная плотность волокна стеклоткани Э2-62 $\rho_w = 2.54 \text{ г/см}^3$. Химический состав волокна приведен в табл. 1 (средняя молекулярная масса волокна $m_w = 65.5 \text{ а. е. м.}$).

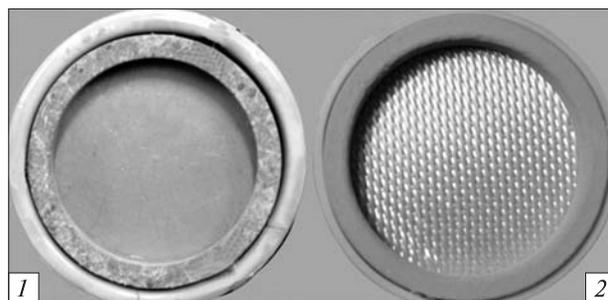
Постановка эксперимента. При значениях энергии бомбардирующих ионов $E_i \gg 100 \text{ эВ}$ унос массы вещества определяется в основном рассеянием первичных частиц и вызываемым ими распылением бомбардируемого материала. Внедрившиеся в материал образца ионы потока плазмы не оказывают существенного влияния на распыление вещества, так как их концентрация в приповерхностном слое на несколько порядков меньше плотности материала [4, 6—8, 10, 11].

При постановке эксперимента по распылению материала внешнего покрытия III ступени РН «Циклон-3» (образец Ц-3) в рамках проекта учитывались два обстоятельства:

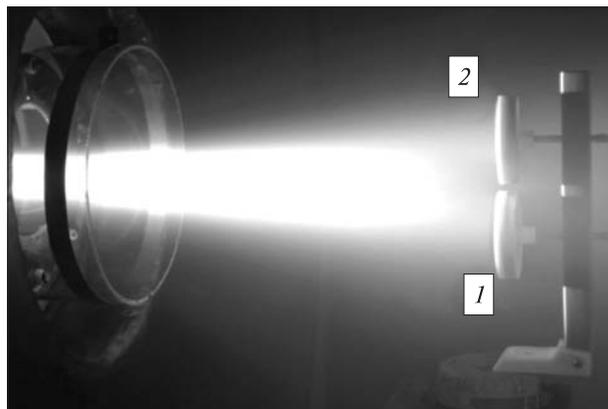
- образец имеет сложную структуру материала и рельеф поверхности;
- исследования особенностей динамического взаимодействия высокоэнергичных ионов Xe^+ с энергиями $E_i \gg 100 \text{ эВ}$ с материалом внешнего покрытия III ступени РН «Циклон-3» до сих пор не проводились.

Поэтому для контроля достоверности и корректности результатов испытаний материала образца Ц-3 в потоке ионов Xe^+ с $E_i \gg 100 \text{ эВ}$ использовался эталонный образец из нержавеющей стали марки 12X18H10T (с равной по размерам площадью облучаемой поверхности образца Ц-3) с объемной плотностью $\rho_w \approx 7.9 \text{ г/см}^3$. Химический состав стали (образец СТАЛЬ) приведен в табл. 2.

Образцы Ц-3 и СТАЛЬ установлены на нижней подвижной платформе с четырьмя степеня-



a



б

Рис. 3. Образцы испытываемых материалов: 1 — образец СТАЛЬ; 2 — образец Ц-3 (а) и образцы в потоке разреженной плазмы Xe^+ , генерируемой газоразрядным ускорителем (б)

Таблица 2. Химический состав стали 12X18H10T

C	Cr	Fe	Mn
$\leq 0.12\%$	17...19.0 %	$\sim 68\%$	$\leq 2.0\%$
Ni	P	S	Si
9...11.0 %	$\leq 0.035\%$	$\leq 0.020\%$	$\leq 0.8\%$

ми свободы в потоках плазмы с энергией ионов Xe^+ от 0.2 до 1.8 кэВ (рис. 3).

Использование двух ускорителей плазмы позволило получить потоки плазмы с концентрацией от 10^8 до 10^{10} см^{-3} при энергиях электронов от 2.5 до 3.0 эВ и ионов от 0.4 до 0.7 эВ. Испытания проводились в потоках плазмы Xe^+ с концентрацией ионов $n_i \approx 3.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Общее время экспозиции образцов на стенде $t = 2 \text{ сут}$.

В экспериментах использовались образцы, изготовленные в виде круглых дисков с внешним диаметром $D = 41 \text{ мм}$ и диаметром облучаемой поверхности $d = 33.5 \text{ мм}$.

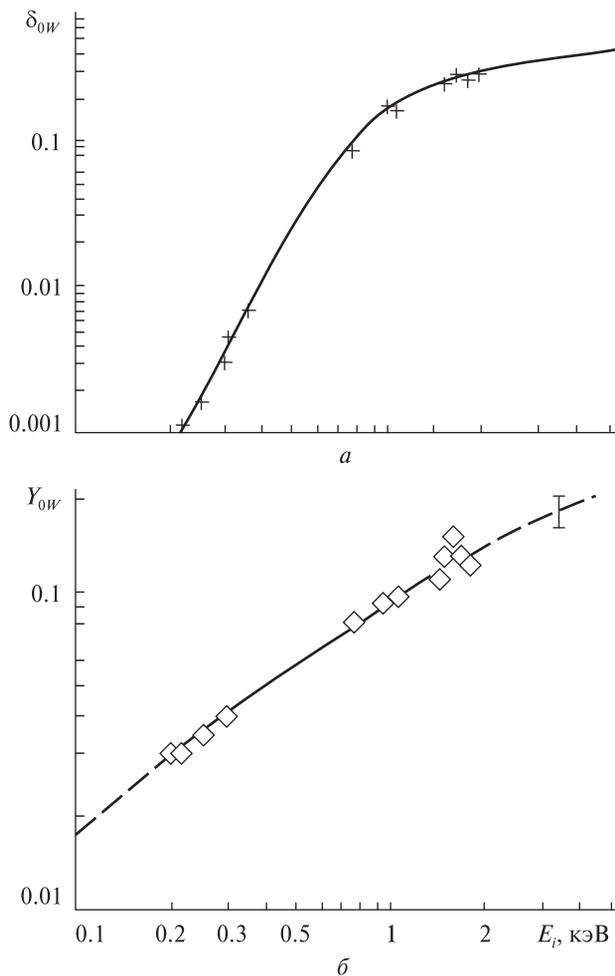


Рис. 4. Зависимости, полученные в эксперименте по испытанию образца Ц-3 в потоке ионов Xe^+ с энергией E_i при нормальном падении ($\theta = 0^\circ$): *a* — зависимость коэффициента прозрачности δ_{0W} стеклоткани Э2-62 (крестики — измерения авторов), *б* — зависимость коэффициента Y_{0W} распыления образца Ц-3 (ромбики — измерения ИТМ, штриховая линия — аппроксимация $Y_{0W_2} \approx Y_{0W_1} (E_{i2}/E_{i1})^{0.5}$ для $1 \leq E_{i2} \leq 5$ кэВ)

Для измерения весовых характеристик тестируемых образцов вне вакуумной камеры примерно за 1 ч до и через 1 ч после экспозиции в плазме использовались аналитические микровесы с погрешностью измерения не более 0.1 мг. Такое взвешивание обеспечивает идентичные условия определения массы облучаемого материала образца. Потеря массы равна $\delta M_W = M_1 - M_2$,

где M_1 и M_2 — масса образца до и после экспонирования в потоке плазмы и в вакууме. Вклад адсорбированных газов δM_a в воздухе при атмосферном давлении до и после вакуумирования и облучения потоком плазмы учитывался следующим образом:

$$\delta M_W \approx (M_1 + \delta M_a) - (M_2 + \delta M_a).$$

При интерпретации результатов испытаний образца Ц-3, который относится к классу мишеней с сильно шероховатой поверхностью, учитывались следующие результаты исследований процессов распыления материалов при бомбардировке их ионами потоков разреженной плазмы [3, 4, 6–8, 10, 11].

1. Для шероховатых поверхностей значение коэффициента распыления меньше, чем для гладких, что обусловлено улавливанием частиц соседними микронеровностями.

2. Вид энергетического спектра распыленных частиц слабо зависит от энергии бомбардирующих ионов и при $E_i \geq 1$ кэВ остаётся практически неизменным. Средняя энергия распылённых частиц E_s имеет значение порядка десятков электрон-вольт. Около 95...99 % распыленных частиц имеют энергии $E_s \approx 20$ эВ [11]. Плотность потока распыленных частиц составляет $10^{10} \dots 10^{11}$ атом/см² с [4].

3. Для поликристаллов, конструкционных композитных материалов и сплавов угловое распределение распыленных частиц при нормальном падении бомбардирующих ионов с энергией E_i от 1 до 10 кэВ в первом приближении соответствует «закону косинуса» [7, 10]. Для шероховатых поверхностей такое распределение практически не зависит от угла падения [10].

4. При $0.7 < E_i < 70$ кэВ и $M_i > m_W$ (M_i — масса иона, m_W — масса частицы распыляемого материала) величина коэффициента распыления Y_W пропорциональна $E_i^{0.5}$. При скоростях бомбардирующих ионов до 150 км/с имеет место линейная зависимость коэффициента Y_W и скорости распыления материалов от скорости потока ионов U_i [4, 6, 8].

Наружная поверхность образца Ц-3 — проникаемая стеклоткань Э2-62. Зависимость коэффициента прозрачности стеклоткани δ_{0W} (от-

ношение плотности ионного тока на проводящую подложку j_{0i} к плотности ионного тока на облучаемую поверхность j_i от энергии E_i при нормальном падении ионов Xe^+ ($\theta = 0^\circ$) показана на рис. 4, а.

Нормированная зависимость $\delta W(\theta)/\delta_{0W}$ от угла падения ионов θ близка к «косинусному» распределению: $\delta W/\delta_{0W} \approx \cos\theta - 0.027$. С увеличением энергии бомбардирующих ионов Xe^+ коэффициент прозрачности стеклоткани образца Ц-3 увеличивается: возрастает поток ионов Xe^+ на первый слой алюминизированной плёнки ПЭТ.

Коэффициент распыления Y_W образцов при бомбардировке ионами потока разреженной плазмы определялся по формуле

$$Y_W = \frac{e \cdot \delta M_W}{m_W \cdot I_{0i} \cdot t}, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, $\delta M_W = M_1 - M_2$ — разность масс образца до и после экспозиции в потоке плазмы, m_W — масса частицы распыляемого материала, I_{0i} — ионный ток на поверхность образца при нормальном падении, t — время экспозиции.

Скорость распыления

$$\bar{V}_W = \frac{Y_W \cdot m_W \cdot I_{0i}}{e \cdot \rho_W \cdot A_W} = \frac{\delta M_W}{\rho_W \cdot A_W \cdot t},$$

где ρ_W — плотность распыляемого материала, A_W — площадь облучаемой поверхности.

В потоке плазмы при облучении образца Ц-3 ионами Xe^+ с энергией $E_i = 1.8$ кэВ для $m_W = 65.5$ а. е. м.; $A_W = 8.81$ см²; $I_{0i} = 2.24$ мА; $n_i = 3.1 \cdot 10^8$ см⁻³; $\rho_W = 2.54$ г/см³ и $t = 7.2 \cdot 10^3$ с и $\delta M_W = 1.43$ мг для нормального падения ионов ($\theta = 0^\circ$) из (1) следуют значения $Y_W(\theta = 0) = Y_{0W} = 0.127 \pm 0.013$ и скорость уноса массы $\delta M_W/t = 2 \cdot 10^{-7}$ г/с.

Зависимость коэффициента распыления Y_{0W} материала образца Ц-3 при нормальном падении ионов Xe^+ от их энергии E_i иллюстрирует рис. 4, б. Штриховая линия на рис. 4, б — экстраполяция $Y_{0W} \propto E_i^{0.5}$ для $E_i \geq 1.8$ кэВ.

При $E_i = 1.5$ кэВ унос массы стеклоткани Э2-62 составляет $\delta M_W \approx 11.3$ мг, а унос массы алюминизированной плёнки ПЭТ (первый слой под стеклотканью) — $\delta M_W \approx 0.85$ мг, т. е. $\delta M_W(\text{Э2-62}) \gg \delta M_W(\text{ПЭТ})$. Унос массы алю-

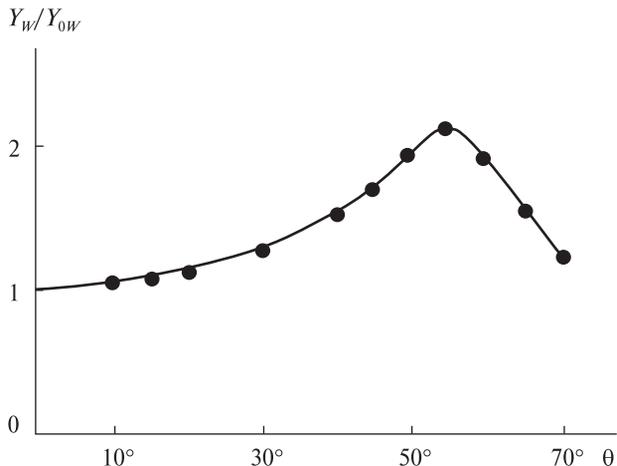


Рис. 5. Нормированная угловая зависимость коэффициента распыления образца Ц-3 при $E_i \approx 1.5$ кэВ (точки — измерения ИТМ, сплошная линия — усредняющая зависимость)

минизированной плёнки ПЭТ пренебрежимо мал по сравнению с уносом массы стеклоткани Э2-62: распыляется в основном стеклоткань Э2-62.

Скорость распыления образца Ц-3 (стеклоткани Э2-62) при $E_i = 1.8$ кэВ составляет: $\bar{V}_W \approx 0.89$ пм/с, а объемная концентрация распыленных частиц [10]

$$n_W = \frac{e \cdot \delta M_W \cdot n_i}{m_W \cdot Y_{0W} \cdot t} \approx 4.02 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}.$$

Нормированная зависимость коэффициента распыления образца Y_W/Y_{0W} от угла θ падения ионов при $E_i \approx 1.5$ кэВ показана на рис. 5. Видно, что для диапазона углов облучения $\theta = \pm 15^\circ$ коэффициент распыления образца Ц-3 практически не зависит от угла падения ионов Xe^+ ($Y_W(\theta)/Y_{0W} \approx 1$).

Для подтверждения корректности и достоверности испытаний синхронно с образцом Ц-3 в потоке разреженной плазмы Xe^+ экспонировался эталонный образец СТАЛЬ. На рис. 6 представлена зависимость коэффициента распыления образца СТАЛЬ от энергии ионов Xe^+ и Kг^+ при $\theta = 0^\circ$ (данные [1, 3, 8, 10]), а также данные измерений ИТМ. Как и для образца Ц-3, для нержавеющей стали 12Х18Н10Т при $E_i \geq 1$ кэВ имеет место зависимость $Y_{0W} \propto E_i^{0.5}$. Измеренные в ИТМ коэффициенты распыления для

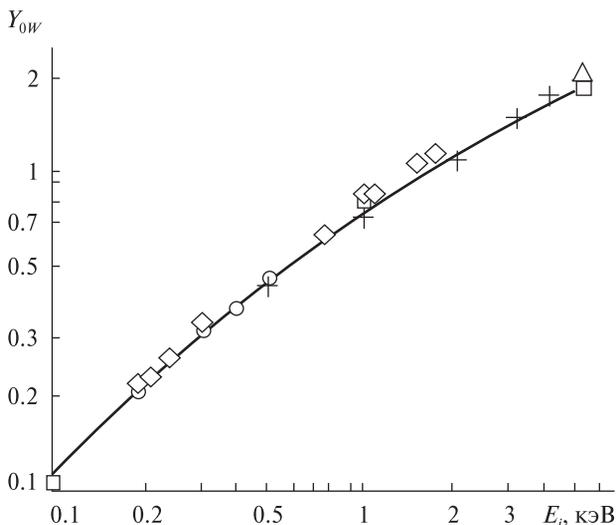


Рис. 6. Зависимость коэффициента распыления Y_{0W} образца СТАЛЬ от энергии ионов при нормальном падении (кружки — данные для Xe^+ [3], крестики — Xe^+ на нержавеющей стали [8], квадратики — K^+ на нержавеющей стали [1], треугольники — K^+ на нержавеющей стали [10], ромбики — измерения ИТМ)

нержавеющей стали в пределах погрешности $\pm 10\%$ согласуются с данными [1, 3, 8, 10].

Испытуемые образцы Ц-3 и СТАЛЬ на стенде ИТМ синхронно облучались потоком разреженной плазмы Xe^+ (находились в одних и тех же условиях). Для анализа, обработки и интерпретации измерений использовались одна и та же процедура. Соответствие измеренных в ИТМ для эталонного образца СТАЛЬ значений коэффициента распыления Y_{0W} данным [3–5, 12] может служить косвенным подтверждением достоверности результатов измерений Y_{0W} и для образца Ц-3.

Эквивалентность режимов распыления в ионосфере и на стенде. Общее время экспозиции образцов в ходе испытаний на стенде в потоке ионов Xe^+ с энергией $E_i = 1.8$ кэВ и концентрацией $n_i = 3.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ составило $t = 2$ сут. Условие эквивалентности стендовых испытаний условиям эксплуатации в ионосфере может быть получено на основе термодинамического (энтропийного) критерия эквивалентности нагружения материалов при ускоренных ресурсных испытаниях [16, 19]. В соответствии с энтропийным критерием

эквивалентности два режима воздействия (нагружения) являются эквивалентными, если они вызывают в материале одинаковые приращения необратимой составляющей энтропии. Условием эквивалентности стендовых и натуральных воздействий потоков плазмы на материалы при идентичности сорта частиц, бомбардирующей поверхность, является равенство интегральных флюенсов ионов $F_{iM} = F_{iH}$, где индекс «М» соответствует условиям стендовых испытаний, «Н» — натурным условиям эксплуатации в ионосфере.

Равенство интегральных флюенсов по сути является условием эквивалентности двух режимов нагружения материала и позволяет определить длительность t_H воздействия плазменной струи в ионосфере на РН «Циклон-3», эквивалентного длительности t_M стендовых испытаний:

$$t_H = \frac{n_{iM} U_{iM}}{n_{iH} U_{iH}} t_M = \frac{n_{iM} \sqrt{E_{iM}}}{n_{iH} \sqrt{E_{iH}}} t_M. \quad (2)$$

С другой стороны, для процесса распыления материала при бомбардировке ионами потока плазмы условием эквивалентности двух режимов воздействия ионов может служить равенство значений уноса массы с единицы площади облучаемой поверхности

$$\frac{\delta_{Mw}}{m_w} = \frac{Y_{0W} \cdot j_{0i} \cdot t}{e} = Y_{0W} \cdot n_i \cdot U_i \cdot t, \quad (3)$$

где $j_{0i} = en_i U_i$ — плотность ионного тока на единичную площадку облучаемой поверхности при $\theta = 0^\circ$. Тогда

$$t_H = \frac{Y_{0M} n_{iM} U_{iM}}{Y_{0H} n_{iH} U_{iH}} t_M = \frac{Y_{0M} n_{iM}}{Y_{0H} n_{iH}} \sqrt{\frac{E_{iM}}{E_{iH}}} t_M.$$

Учитывая, что для $1 \leq E_i \leq 5$ кэВ выполняется условие $Y_{02} \approx Y_{01} (U_2/U_1)$, из (3) следует

$$t_H = \frac{n_{iM} E_{iM}}{n_{iH} E_{iH}} t_M. \quad (4)$$

При $E_{iM} = E_{iH}$ условия (2) и (4) эквивалентны. Для плазменной струи на расстоянии около 7 м от среза двигателя, по оценкам [21, 23], в ионосфере ($E_{iH} = 3.5$ кэВ и $n_{iH} = 3.3 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$) и на стенде ИТМ ($E_{iM} = 3.5$ кэВ, $n_{iM} = 3.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ и

$t_M = 2$ сут) из выражения (3) получим оценку $t_H = 188$ сут. При $E_{iH} = 3.5$ кэВ, $n_{iH} = 3.3 \cdot 10^6$ см⁻³ в ионосфере и $E_{iM} = 1.8$ кэВ, $n_{iM} = 3.1 \cdot 10^8$ см⁻³, $t_M = 2$ сут на стенде ИТМ из (4) получим $t_H = 97$ сут, а из (2) — $t_H = 135$ сут.

Следует отметить, что соотношение (2) характеризует условие эквивалентности режимов облучения материала ионами плазмы в ионосфере и на стенде, а соотношение (4) — условие эквивалентности процессов распыления (уноса массы) при облучении материала ионами потока плазмы в ионосфере и на стенде.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНОВ ПОТОКА РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЫ НА МАТЕРИАЛ ВНЕШНЕГО ПОКРЫТИЯ III СТУПЕНИ РН «ЦИКЛОН-3»

Эффективность увода объекта «космического мусора» на более низкую орбиту в проекте LEOSWEEP в значительной степени определяется процессами передачи импульса ионов Хе⁺ материалу поверхности III ступени РН «Циклон-3». Для оценки силового воздействия плазменной струи на поверхность твердого тела, определения аэродинамических характеристик тел в потоке газа и плазмы используются коэффициенты передачи импульса и энергии (коэффициенты аккомодации). Коэффициенты аккомодации используются в расчетных соотношениях независимо от принятой схемы взаимодействия газовых ионов с поверхностью твердого тела.

В настоящее время наиболее полно изучен процесс взаимодействия газовых атомов и ионов с поверхностью твердого тела в диапазоне энергии частиц от 1 до 100 эВ. Для энергий $E_i \gg 100$ эВ изучены механизмы взаимодействия газовых ионов только с кристаллическими структурами. На практике мишени с идеальной монокристаллической структурой используются крайне редко. Большинство конструкционных материалов КА — сплавы, композиты, полимеры со сложной структурой и рельефом поверхности. Таким является и материал поверхности III ступени РН «Циклон-3».

Влияние шероховатости поверхности при столкновении частиц с твердым телом для углов

атаки, близких к нормальному падению ($\theta \leq 30^\circ$), проявляется в уменьшении коэффициентов передачи импульса и энергии и, как следствие, в увеличении силы сопротивления [2, 5].

Силовое воздействие сверхзвукового потока разреженной плазмы на непроводящую диэлектрическую поверхность (при «плавающем» потенциале последней) определяется бомбардировкой ионами и электронами, распыленными частицами и кулоновским взаимодействием.

Давление потока плазмы на элемент поверхности твердого тела определяется суммарным воздействием [12]

$$F_\Sigma = F_i + F_e + F_s + F_c, \quad (5)$$

где F_i — давление ионов сверхзвукового потока плазмы на единицу поверхности твердого тела, F_e — давление электронов потока плазмы, F_s — реактивная сила, обусловленная распылением поверхности, F_c — сила кулоновского взаимодействия.

При исследовании динамического взаимодействия ионов Хе⁺ с материалом образца Ц-3 на стенде ИТМ использовались методика и процедуры [12] и соотношения (6) и (7) для коэффициентов передачи нормального σ_n и тангенциального σ_τ импульсов:

$$\sigma_n = \frac{1 + [1 - e(F_x + F_y \operatorname{tg} \theta / \sqrt{2M_i E_i I_i})] / \sqrt{1 + \eta^2 / \cos^2 \theta}}{1 - \sqrt{\pi k T_w (1 + \eta^2) / 4 E_i (\cos^2 \theta + \eta^2)}}, \quad (6)$$

$$\sigma_\tau = \frac{e(F_x - F_y \operatorname{ctg} \theta)}{\sqrt{2M_i E_i I_i}}, \quad (7)$$

где F_x — сила сопротивления образца, F_y — подъемная сила образца в потоке ионов, θ — угол атаки образца, M_i и E_i — масса и энергия ионов, I_i — ионный ток на поверхность образца, $\eta^2 = e\phi_w / E_i$, $\phi_w = \phi_p - \phi_0$ — потенциал поверхности образца ϕ_p относительно потенциала плазмы ϕ_0 , k — коэффициент Больцмана, T_w — температура поверхности образца.

Техника эксперимента. Для исследований в качестве образца Ц-3 использовалась плоская пластина (мишень). Образец Ц-3 устанавливался на микровесы компенсационного типа, изготов-



Рис. 7. Аэродинамические весы с образцом в потоке плазмы на стенде ИТМ

ленные на основе стандартной магнитоэлектрической системы микроамперметра постоянного тока. В качестве следящей системы использовался фотодиодный блок усилителя постоянного тока, работающий в комплекте с микроамперметром. Компенсационный ток, протекающий через рамку микроамперметра магнитоэлектрической системы, прямо пропорционален приложенному к рамке механическому моменту. Схема микровесов приведена в работе [13]. Для устранения возможного влияния вибраций весы установлены на амортизирующей подставке, закрепленной на нижней подвижной платформе. Диапазон измеряемых сил на плече длиной 45 см составляет $5 \cdot 10^{-7} - 0.01$ Н. Погрешность измерения силы сопротивления пластины в рассматриваемом диапазоне не превышает $\pm 4.5\%$.

Кроме того, для измерения силы давления потока разреженной плазмы на образец Ц-3 использовались микровесы с повышенной помехозащищенностью к воздействию внешних электрических и магнитных полей [20]. Чувствительным элементом этих микровесов служил тензометрический датчик. Сигнал тензометрического датчика пропорционален деформации плеча, вызванной воздействием внешней силы. Погрешность измерения силы — не более $\pm 3\%$. Диапазон измеряемых сил: $10^{-6} - 0.1$ Н. Аэродинамические весы с мишенью (пластина) в потоке плазмы на стенде ИТМ показаны на рис. 7.

Коэффициенты передачи импульса ионов потока плазмы мишени. Результаты исследований ди-

намического (силового) взаимодействия ионов Xe^+ с энергиями от 0.2 до 1.8 кэВ с поверхностью образца Ц-3 приведены на рис. 8. Зависимость коэффициента передачи нормального импульса σ_{0n} от скорости U_i ионов Xe^+ для ЭВТИ иллюстрирует рис. 8, а, где ромбики — результаты измерений ИТМ и расчеты по формуле (6), квадратики — данные [12], сплошная линия — усредняющая зависимость, штриховая линия — экстраполяция для $E_i > 1.8$ кэВ. На рис. 8, б приведена нормированная угловая зависимость коэффициента передачи нормального импульса $\sigma_n(\theta)/\sigma_{0n}$ ионов Xe^+ при $E_i = 1.8$ кэВ на поверхности образца Ц-3: кружки — измерения ИТМ, треугольники — расчетные данные ИТМ по результатам численного моделирования взаимодействия Xe^+ поверхностью шероховатой стеклоткани [23], линия — аппроксимация

$$\sigma_n(\theta)/\sigma_{0n} \approx \cos^{3/2}\theta + 0.835(1 + 1/\sigma_{0n})^{-1} \sin^2\theta. \quad (8)$$

Вертикальными штрихами на рис. 8, б показан разброс значений $\sigma_n(\theta)/\sigma_{0n}$ для аппроксимации (8).

Угловая зависимость коэффициента accommodation тангенциального импульса $\sigma_t(\theta)$ ионов Xe^+ при $E_i = 1.8$ кэВ на поверхности образца Ц-3 приведена на рис. 8, в: треугольники — измерения и расчет ИТМ по формуле (7), сплошная линия — усредняющая кривая, штриховая линия — расчетные значения ИТМ $\sigma_t(\theta)$ по результатам численного моделирования [9] взаимодействия ионов Xe^+ с шероховатой стеклотканью; для шероховатой стеклоткани в [9] использовалась модель алмазной решетки.

Зависимости на рис. 8 представляют схему динамического (силового) взаимодействия ионов Xe^+ потока разреженной плазмы с поверхностью покрытия III ступени РН «Циклон-3».

Максимум силы сопротивления плоской пластины в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы соответствует условиям нормального падения ионов Xe^+ . Интегральная сила сопротивления F_Σ (5) пластины при $\theta = 0^\circ$ включает несколько составляющих [2, 9]. Давление потока ионов на поверхность твердого тела

$$F_i = (\rho_i U_i^2 / 2) A_W [2(2 - \sigma_{0n})(1 + 1/2 S_i^2) + \sigma_{0n}(\sqrt{\pi}/S_W)] , \quad (9)$$

где ρ_i , U_i — плотность и скорость ионов потока плазмы, $S_i = U_i/V_i$ — скоростное отношение ионов потока плазмы, $V_i = \sqrt{2kT_i/M_i}$, T_i — температура ионов, $S_W = U_i/V_{T_W}$ — скоростное отношение отраженных частиц, $V_{T_W} = \sqrt{2kT_W/M_i}$, T_W — температура поверхности твердого тела, A_W — площадь облучаемой поверхности твердого тела.

Сила давления электронов потока разреженной плазмы на мишень равна $F_e = n_e k T_e A_W$, где n_e , T_e — концентрация, температура электронов потока плазмы.

Сила кулоновского взаимодействия плоской пластины с гиперзвуковым потоком разреженной плазмы при $r_W/\lambda_d \geq 50$ равна [12]

$$F_c = (\rho_i U_i^2 / 2) A_W [1 - \exp(-\Phi_f^{0.5} / 0.3(r_W/\lambda_d))] \times (\sqrt{1 + \eta^2} - 1) ,$$

где r_W — характерный размер тела, λ_d — дебаевский радиус, $\Phi_f = |e\phi_f|/kT_e$ — безразмерный «плавающий» (равновесный) потенциал твердого тела в потоке плазмы; $\phi_f = \phi_p - \phi_0 = -(kT_e/e) \times \ln(\bar{V}_e/U_i)$ — «плавающий» потенциал поверхности тела ϕ_p относительно потенциала плазмы, $\bar{V}_e = \sqrt{8kT_e/\pi m_e}$ — средняя скорость электронов, m_e — масса электрона.

Давление распыленных частиц на облучаемую поверхность может быть представлено в виде $F_s = (\rho_s U_s^2 / 2) A_W [2(1 + 1/2 S_s^2)]$, где ρ_s , U_s — плотность и скорость распыленных частиц; $S_s = U_s/\sqrt{2kT_W/m_W}$ — скоростное отношение.

При проведении испытаний в ИТМ реализованы следующие значения параметров потока разреженной плазмы Xe^+ :

ионы $E_i = 1.8 \text{ кэВ}$, $U_i = 5.13 \cdot 10^6 \text{ см/с}$, $V_i = 9.4 \cdot 10^4 \text{ см/с}$, $T_W \approx 500 \text{ К}$, $T_i \approx 7000 \text{ К}$, $V_{T_W} = 2.51 \cdot 10^4 \text{ см/с}$, $S_i = U_i/V_i = 54.6$, $S_W = U_i/V_{T_W} = 204$, $\sigma_{0n} = 0.92$, $A_W \approx 36 \text{ см}^2$;

электроны $E_e = 3 \text{ эВ}$, $n_e \approx n_i \approx 3.1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, $\Phi_f \approx 10$, $\lambda_d \approx 0.733 \text{ мм}$, $\eta^2 = e\phi_f/E_i \approx 0.016$, $r_W/\lambda_d \approx 81.9$;

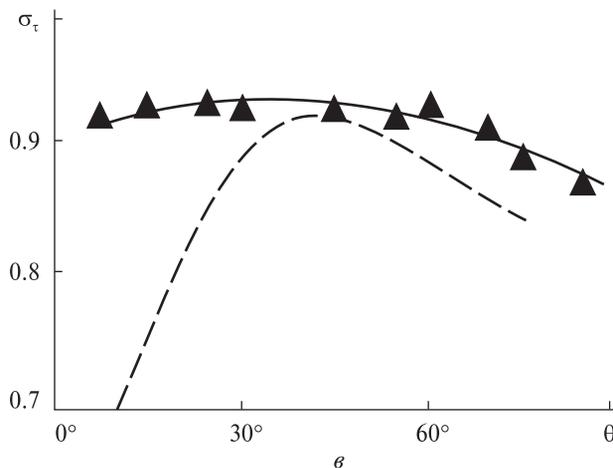
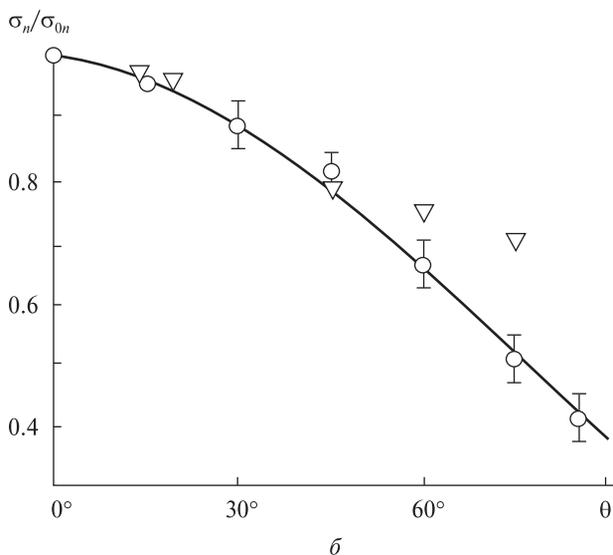
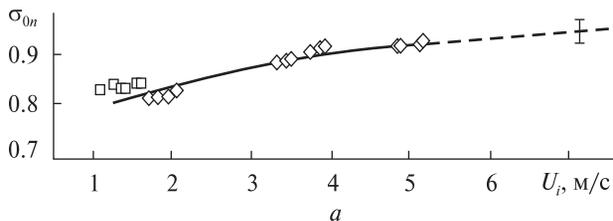


Рис. 8. Коэффициенты передачи импульса ионов поверхности образца Ц-3: *a* — зависимость коэффициента Xe^+ аккомодации нормального импульса от скорости ионов Xe^+ при $\theta = 0^\circ$ (ромбики — измерения ИТМ и расчеты по формуле (6), квадратики — данные [13], штриховая линия — экстраполяция для 1.8 кэВ); *b* — нормированная угловая зависимость коэффициента аккомодации нормального импульса (кружки — измерения ИТМ, обратные треугольники — расчеты по данным [9], линия — аппроксимация ИТМ); *v* — угловая зависимость коэффициента аккомодации тангенциального импульса ионов на поверхности образца Ц-3 (темные треугольники — измерения ИТМ, сплошная линия — усредняющая кривая, штриховая линия — расчетные значения $\sigma_\tau(\theta)$ ИТМ по данным [9])

распыленные частицы: $Y_{0W} \approx 0.13$, $E_s \approx 20$ эВ,
 $U_s = 7.65 \cdot 10^5$ см/с, $S_s \approx 30.5$.

В результате получены следующие оценки составляющих силы сопротивления пластины при концентрации ионов $n_i = 3.1 \cdot 10^8$ см⁻³:

$$\begin{aligned} F_i &= 0.695 \text{ мН}, F_e = 5.40 \text{ мкН}, \\ F_s &= 0.334 \text{ мкН}, F_c = 0.95 \text{ мкН}. \end{aligned}$$

Видно, что доминирующим является воздействие ионов Хе⁺, бомбардирующих поверхность образца Ц-3; вкладом остальных составляющих можно пренебречь.

Эквивалентность режимов динамического воздействия ионов потока плазмы на твердое тело в ионосфере и на стенде. При нормальном падении ионов гиперзвукового $S_i \gg 1$ потока разреженной плазмы из (6) и (9) коэффициент c_x силы сопротивления F_x плоской пластины определяется соотношением

$$c_x = \frac{F_x}{I_i U_i} \left(\frac{2e}{M_i} \right) = 2(2 - \sigma_{0n}).$$

Значение коэффициента c_x и силы сопротивления F_x плоской пластины в гиперзвуковом ($S_i \gg 1$) потоке разреженной плазмы при $\theta = 0^\circ$

$$F_x = 2(2 - \sigma_{E_i}) n_i E_i A_W = (2 - \sigma_{E_i}) I_i U_i / e$$

может служить критерием эквивалентности — условием, связывающим режим 1 динамического взаимодействия материала поверхности III ступени РН «Циклон-3» с ионами Хе⁺ в ионосфере с режимом 2 облучения «образца Ц-3» потоком ионов Хе⁺ на стенде. Для двух режимов взаимодействия «материал — поток ионов плазмы»

$$\begin{aligned} F_{x1} &= F_{x2} \left(\frac{2 - \sigma_1}{2 - \sigma_2} \right) \frac{n_{i1} E_{i1} A_{W1}}{n_{i2} E_{i2} A_{W2}} = \\ &= F_{x2} \left(\frac{2 - \sigma_1}{2 - \sigma_2} \right) \frac{I_{i1} U_{i1}}{I_{i2} U_{i2}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где индекс «1» соответствует условиям динамического взаимодействия в ионосфере Земли; индекс «2» — условиям взаимодействия на стенде; $\sigma_{1,2}$ соответствует условиям нормального облучения: $\sigma_{1,2} = \sigma_{0n}(E_{i1,2})$ (рис. 8, а) или $\sigma_{1,2} = \sigma_{0n}(U_{i1,2})$.

По данным численного моделирования [3] истечения плазменной струи в ионосферу в про-

екте LEOSWEEP суммарный ток на срезе электрореактивного двигателя $I_\Sigma = 330$ мА при энергии ионов $E_{i1} = 3.5$ кэВ. Средняя концентрация ионов Хе⁺ на расстоянии 7 м от среза двигателя для облучаемой площади поверхности III ступени РН «Циклон-3» $A_{W1} = 4.15 \cdot 10^4$ см² равна $n_1 = I_\Sigma / e U_1 A_{W1} \approx 6.94 \cdot 10^6$ см⁻³. Согласно (10) для образца Ц-3 по результатам стендовых испытаний в ИТМ при $n_{i2} = 3.1 \cdot 10^8$ см⁻³; $E_{i2} = 1.8$ кэВ; $\sigma_2 = 0.92$; $A_{W2} = 36$ см²; $F_{x2} \approx 0.7$ мН и $\sigma_1 = 0.94$ сила воздействия потока плазмы на объект «космического мусора» в ионосфере $F_{x1} \approx 35$ мН. Для полностью диффузной схемы динамического взаимодействия ионов Хе⁺ с материалом мишени ($\sigma_1 = \sigma_2 = 1.0$) из (10) при $F_{x2} \approx 0.64$ мН следует $F_{x1} \approx 32$ мН. По результатам численного моделирования для бесструктурной схемы взаимодействия в системе «ионы Хе⁺ — поверхность твердого тела» $F_{x1} \approx 31$ мН, погрешность — не более 3.5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны процедуры, техническое обеспечение экспериментальных исследований, физического (стендового) моделирования длительного воздействия высокоэнергичных ($E_i \gg 100$ эВ) ионов потока разреженной плазмы, генерируемого бортовым электрореактивным двигателем, на материал внешнего покрытия объекта «космического мусора» применительно к процессам распыления материала и передачи импульса ионов. Экспериментально определены зависимости коэффициентов распыления материала внешнего покрытия III ступени РН «Циклон-3» и коэффициентов аккомодации импульса высокоэнергичных ионов Хе⁺ на поверхности объекта от энергии бомбардирующих частиц. Получены критериальные соотношения для определения эквивалентности процессов динамического воздействия плазменной струи на объект «космического мусора» в ионосфере Земли и процессов передачи импульса и распыления материала внешнего покрытия объекта плазменной струей на стенде ИТМ. Приведены оценки соответствия условий стендовых испытаний условиям

длительного воздействия плазменных струй, генерируемых электрореактивными двигателями КА, на объект «космического мусора» в ионосфере Земли.

Работа финансово поддержана партнерским проектом Украинского научно-технического центра Р627.

1. Арифов У. А. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твёрдого тела. — М.: Наука, 1968. — 371 с.
2. Баранцев Р. Г. Взаимодействие разреженных газов с обтекаемыми поверхностями. — М.: Наука, 1975. — 344 с.
3. Белан Н. В., Ким В. П., Оранский А. И., Тихонов В. Б. Стационарные плазменные двигатели. — Харьков: Хар. авиац. ин-т., 1989. — 284 с.
4. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения плёнок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 328 с.
5. Ерофеев А. И. О влиянии шероховатости на взаимодействие потока газа с поверхностью твердого тела // Механика жидкостей и газа. — 1967. — № 6. — С. 82—89.
6. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. — М.: Радио и связь, 1986. — 284 с.
7. Каминский М. Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. — М.: Мир, 1967. — 506 с.
8. Плевшицев Н. В. Катодное распыление. — М.: Атомиздат, 1968. — 347 с.
9. Парнипу А. А. Модель взаимодействия разреженного газа с поверхностью твердого тела // Тр. IV Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов и молекулярной газовой динамике. — М.: Центр. аэродогинодин. ин-т, 1977. — С. 464—469.
10. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. М. Бериша. — М.: Мир, 1986. — Т. II. — 485 с.
11. Рыжов Ю. А. Взаимодействие разреженного потока большой скорости с поверхностью твердого тела // Проблемы механики и теплообмена в космической технике / Под ред. О. М. Белоцерковского. — М.: Машиностроение, 1982. — С. 99—114.
12. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой. — Киев: Наук. думка, 1995. — 180 с.
13. Шувалов В. А., Бандель К. А., Приймак А. И., Кочубей Г. С. Магнитогинодинамическое торможение «намагниченных» планет в потоке плазмы солнечного ветра // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 6. — С. 3—13.
14. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др. Моделирование радиационной электризации подветренных поверхностей космических аппаратов на полярной орбите в ионосфере Земли // Космічна наука і технологія. — 2001. — 7, № 5/6. — С. 30—43.
15. Шувалов В. А., Кулагин С. Н., Кочубей Г. С., Токмак Н. А. Моделирование эффектов МГД-взаимодействия тел с атмосферой Земли в потоке разреженной плазмы // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 5. — С. 29—39.
16. Шувалов В. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С., Носиков С. В. Потери мощности солнечных батарей космического аппарата в полярной ионосфере и магнитосфере Земли // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 3. — С. 5—15.
17. Шувалов В. А., Приймак А. И., Губин В. В. Радиационная электризация элементов конструкций космических аппаратов. Физическое моделирование, накопление и нейтрализация заряда // Космич. исслед. — 2001. — 39, № 1. — С. 18—28.
18. Шувалов В. А., Токмак Н. А., Резниченко Н. П. Деградация полимерных пленок космических аппаратов при длительном воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения // Космічна наука і технологія. — 2015. — 21, № 5. — С. 56—68.
19. Шувалов В. А., Токмак Н. А., Резниченко Н. П. Физическое моделирование воздействия атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета на полимеры в ионосфере Земли // Приборы и техника эксперимента. — 2016. — 59, № 3. — С. 114—122. — DOI: 10.7868/S0032816216020269.
20. Шувалов В. А., Токмак Н. А., Цокур А. Г., Кочубей Г. С. Динамическое взаимодействие космического аппарата с разреженной плазмой при движении под «магнитным парусом» // Космічна наука і технологія. — 2014. — 20, № 3. — С. 14—21.
21. Bombardelli C., Pela'ez J. Ion beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal // J. Guidance and Dynamics. — 2011. — 34, N 3. — P. 916—920.
22. Kitamuza S., Hayakawa Y., Kawamoto S. A Reorbiter for GEO Large Space Debris Using Ion Beam Irradiation // The 32-nd Intern. Electric Propulsion Conference. — Wiesbaden, Germany. IEPC — 2011 — 087, September 11—15, 2011. — 10 p.
23. Merino M., Ahedo E., Bombardelli C., Urrutxua H., Pela'ez J. Hypersonic plasma plume expansion in space // The 32-nd Intern. Electric Propulsion Conference. — Wiesbaden, Germany. IEPC — 2011 — 086. September 11—15. 2011. — 14 p.

Стаття надійшла до редакції 23.05.16

REFERENCES

1. Arifov U. A. Interaction of Atomic Particles with a Solid Surface, 371 p. (Nauka, Moscow, 1968) [in Russian].
2. Barantsev R. G. Interaction of Rarefied Gases with Strimlined Surfaces, 344 p. (Nauka, Moscow, 1975) [in Russian].
3. Belan N. V., Kim V. P., Oransky A. I., Tikhonov V. B. Stationary Plasma Thrusters, 284 p. (Kharkov Aviation Institute, Kharkov, 1989) [in Russian].
4. Danilin B. S. Application of Low-Temperature Plasma to Film Deposition, 328 p. (Energoatomizdat, Moscow, 1989) [in Russian].
5. Erofeev A. I. On the effect of roughness on gas flow – solid surface interaction. *Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, N 6, 82–89 (1967).
6. Ivanovsky G. F., Petrov V. I. Ion-Plasma Material Treatment, 284 p. (Radio i Svyaz', Moscow, 1986) [in Russian].
7. Kaminsky M. Atomic and Ion Impact Phenomena on Metal Surfaces, 507 p. (Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg – New York, 1965).
8. Pleshivtsev N. V. Cathode Sputtering, 347 p. (Atomizdat, Moscow, 1968) [in Russian].
9. Pyaripuu A. A. Rarefied gas – solid surface interaction model, Proceedings of the 4th All-Union Conference on Rarefied Gas Dynamics and Molecular Gas Dynamics, 464–469 (Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, 1977) [in Russian].
10. Sputtering by Particle Bombardment II / Ed. by R. Behrisch, 394 p. (Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg: 1983).
11. Ryzhov Yu. A. Interaction of a high-velocity rarefied stream with a solid surface, Problems of Mechanics and Heat Exchange in Space Engineering / Ed. by O. M. Belotserkovsky, 99–114 (Mashinostroenie, Moscow, 1982).
12. Shuvalov V. A. Simulation of Body–Ionosphere Interaction, 180 p. (Naukova Dumka, Kyiv, 1995).
13. Shuvalov V. A., Bandel K. A., Priimak A. I., Kochubei G. S. Magnetohydrodynamic braking of “magnetized” planets in the solar wind plasma flow. *Kosm. nauka tehnol.*, 15 (6), 3–13 (2009) [in Russian].
14. Shuvalov V. A., Kochubei G. S., Priimak A. I., Gubin V. V., Resnichenko N. P. Simulation of the radiation electrization of spacecraft leeward surfaces in a polar orbit in the Earth’s ionosphere. *Kosm. nauka tehnol.*, 7 (5/6), 30–43 (2001) [in Russian].
15. Shuvalov V. A., Kulagin S. N., Kochubei G. S., Tokmak N. A. Simulation of body – Earth’s ionosphere magnetohydrodynamic interaction in a rarefied plasma flow. *Kosm. nauka tehnol.*, 17 (5), 29–39 (2011) [in Russian].
16. Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Kochubei G. S., Nosikov S. V. Spacecraft solar battery power loss in the Earth’s ular ionosphere and magnetosphere. *Kosm. nauka tehnol.*, 17 (3), 5–15 (2011) [in Russian].
17. Shuvalov V. A., Priimak A. I., Gubin V. V. Radiative electrization of spacecraft construction elements: physical modeling of charge accumulation and neutralization. *Cosmic Res.*, 39 (1), 15–22 (2001) [in Russian].
18. Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Reznichenko N. P. Spacecraft polymer film degradation under long-term exposure to atomic oxygen flows and vacuum ultraviolet radiation. *Kosm. nauka tehnol.*, 21 (5), 56–68 (2015) [in Russian].
19. Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Reznichenko N. P. Physical simulation of the action of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation on polymer materials in the earth’s ionosphere. *Instruments and Experimental Techniques*, 59 (3), 442–450 (2016).
20. Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Tsokur A. G., Kochubei G. S. Dynamic interaction of a spacecraft moving under a “magnetic sail” with a rarefied plasma. *Kosm. nauka tehnol.*, 20 (3), 14–21 (2014) [in Russian].
21. Bombardelli C., Pela'ez J. Ion beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal. *J. Guidance and Dynamics*, 34 (3), 916–920 (2011).
22. Kitamuza S., Hayakawa Y., Kawamoto S. A Reorbiter for GEO Large Space Debris Using Ion Beam Irradiation. The 32-nd Int. Electric Propulsion Conference, 10 p. (Wiesbaden, Germany, 2011).
23. Merino M., Ahedo E., Bombardelli C., Urrutxua H., Pela'ez J. Hypersonic plasma plume expansion in space. The 32-nd Int. Electric Propulsion Conference, 14 p. (Wiesbaden, Germany, 2011).

В. О. Шувалов¹, М. Б. Горев¹, М. А. Токмак¹,
М. И. Письменный¹, Г. Г. Осиновый²

¹Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпро

²Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро

ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ НА ОБЪЕКТ «КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА»

Розроблено методологію фізичного (стендового) моделювання тривалого впливу високоенергійних ($E_i \gg 100$ eV) іонів потоку розрідженої плазми на матеріал зовнішнього покриття об'єкта «космічного сміття», а саме III-го ступеня

РН «Циклон-3», стосовно до процесів розпилення матеріалу і передачі імпульсу іонів на об'єкт у проекті Європейського космічного агентства (ЄКА) LEOSWEEP. Методологія заснована на застосуванні процедури прискорених ресурсних випробувань і критерію еквівалентності для двох режимів дії: в іоносфері Землі і на стенді.

Ключові слова: космічне сміття, плазмовий струмінь, динамічна взаємодія, розпилення, сила.

*V. A. Shuvalov¹, N. B. Gorev¹, N. A. Tokmak¹,
N. I. Pis'mennyi¹, G. G. Osinovy²*

¹Institute of Technical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Dnipro

²Yangel Yuzhnoye State Design Office, Dnipro

DYNAMIC EFFECT OF A PLASMA BEAM ON A SPACE DEBRIS OBJECT

We propose a methodology of the physical (bench) simulation of a long-term exposure of a space debris object coating (in

particular, the Cyclone-3 last stage coating material) to rarefied plasma jet of high-energy ($E_i \gg 100$ eV) ions. It concerns material sputtering and ion-to-object momentum transfer in ESA LEOSWEEP project. The methodology is based on an accelerated life test procedure and a criterion of the equivalence of two exposure regimes: in the Earth ionosphere and in laboratory conditions.

Key words: space debris, plasma beam, dynamic effect, sputtering, simulation of exposure.