———— РАДИАЦИОННАЯ ХИМИЯ ——

УДК 537.311:541.64

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ПОЛИМЕРЫ

© 2021 г. В. А. Шувалов<sup>а, \*</sup>, Н. И. Письменный<sup>а</sup>, Н. П. Резниченко<sup>а</sup>, Г. С. Кочубей<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт технической механики Национальной академии наук Украины, ул. Лешко-Попеля, 15, Днепропетровск, 49005 Украина \*E-mail: vashuvalov@ukr.net

> Поступила в редакцию 24.07.2020 г. После доработки 02.09.2020 г. Принята к публикации 03.09.2020 г.

Разработана процедура моделирования длительного воздействия атомарного кислорода (AK) ионосферы Земли на полимеры космических аппаратов в потоке разреженной плазмы с использованием полиимида kapton-H как эталонного материала. Условие эквивалентности воздействия AK на полимеры в ионосфере и на стенде — равенство потери массы. При облучении полиимида kapton-H ионами AK с энергиями 30–80 эВ потери массы, обусловленные химическим травлением, на два порядка выше, чем при кинетическом распылении, а флюенс AK и коэффициент ускорения испытаний на стенде на два порядка выше, чем в потоке AK с энергией 5 эВ.

*Ключевые слова:* полимеры, атомарный кислород, флюенс, ион, разреженная плазма **DOI:** 10.31857/S0023119321010125

Полимерные материалы широко используется как конструкционные материалы космических аппаратов (**KA**). Околоспутниковая среда на высотах 200–700 км агрессивна по отношению к полимерам КА. Экспозиция полимеров на орбитальных станциях МКС, "Мир", на КА "Space Shuttle" и др. [1–3], показала, что унос массы, уменьшение толщины пленок пропорциональны флюенсу АК. Появился термин "полиимидный эквивалентный флюенс АК". В качестве эталона принят полиимид карton-H.

На высотах 200-700 км АК ионизован [4]. Физико-химическое воздействие АК на полимеры в атмосфере Земли характеризуют взаимосвязанные процессы обмена энергией, массой и зарядом между частицами окружающей среды с поверхностью, включая химические реакции в адсорбированном и поверхностном слоях. Положительные ионы АК с энергией от 5 до 10 эВ выполняют роль радиационного-химического активатора поверхности [5–7]. Исследования кинетики процесса взаимодействия плазмы атомарно-молекулярного кислорода с полиамидом kapton-H [5, 8] свидетельствует о том, что молекулярный кислород инертен и участия в химических реакциях не принимает. Определяющим является процесс окислительной деструкции полимеров с участием АК [6]. Механизм разрушения полимеров связан, как минимум, с двумя видами воздействия: кинетическим распылением и химическим травлением. Следствием

воздействия AK на полимеры являются: унос массы, изменение термо-оптических и физикомеханических свойств.

Информация об изменениях свойств полимеров КА при длительной эксплуатации в ионосфере Земли может быть получена только экспериментально — по результатам летных или стендовых испытаний. Одним из путей решения задачи является физическое моделирование или имитация воздействия АК на материалы на специализированных стендах. Условия экспозиции полимеров на высотах 700–200 км при среднем уровне солнечной активности и скорости КА  $U_{KA} \approx 7.5$ –7.8 км/с характеризуют значения параметров АК [4, 9, 10]:

энергия частиц  $E_{AK} \approx 4.7 - 5.0$  эВ;

концентрация атомов  $N_{AK} \approx 1 \times 10^{6} - 4 \times 10^{9} \text{ см}^{-3}$ ; поток частиц  $\Phi_{AK} = N_{AK}U_{KA} \approx 8 \times 10^{11} - 3 \times 10^{15}$  атомO/см<sup>2</sup>с;

годовой флюенс  $F_{AK} = \Phi_{AK}t \approx 2.5 \times 10^{19} - 9 \times 10^{22}$  атомО/см<sup>2</sup>, *t* – время экспозиции.

На стендах генераторы АК синтезируют, как правило, импульсные и стационарные потоки с энергией частиц 5–10 эВ и  $\Phi_{AK} \approx 10^{15}-10^{16}$  атомО/см<sup>2</sup> с [7– 9]. Исследования на КА показали: деградация полимеров продолжается в течение всего времени эксплуатации [1, 2, 5, 7]. Время экспозиции при стендовых исследованиях воздействия АК должно соответствовать орбитальным флюенсам AK. Реализация таких условий при энергиях частиц  $E_{AK} \approx 5$  эВ на стендах затруднительна. Для решения задачи моделирования длительного воздействия AK на полимеры могут быть использованы ионы с концентрацией  $N_{iAK} \approx 10^9 - 10^{10}$  см<sup>-3</sup> и энергией  $E_{iAK} \approx 5$  эВ или ионы AK с энергией  $E_{iAK} \approx 30 - 80$  эВ и потоки частиц  $\Phi_{iAK} \ge 10^{16}$  атомО/см<sup>2</sup> с.

Цель данной работы — разработка процедуры моделирования длительного (при высоких флюенсах) воздействия АК ионосферы Земли на полимеры в высокоскоростных потоках разреженной плазмы

### КРИТЕРИАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЛИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АК НА ПОЛИМЕРЫ КА

При моделировании длительного воздействия AK на полимеры в качестве критерия эквивалентности экспозиции в ионосфере и на стенде принято равенство потери массы  $\Delta M_W$  (уменьшения толщины  $\delta x_W$ ) материала

$$\Delta M_W^{(N)} = \Delta M_W^{(M)} \quad \text{или} \quad \delta x_W^{(N)} = \delta x_W^{(M)}, \qquad (1)$$

где индекс *N* соответствует натурным условиям; *M* – испытаниям на стенде. Так как  $\Delta M_W = \rho_W R_e F_{AK} = \rho_W \delta x_W$ , из (1) следует соотношение, связывающее параметры, характеризующие условия эксплуатации материалов в ионосфере, с их значениями на стенде

$$F_{AK}^{(N)}\left(E_{AK}^{(N)}\right) = F_{AK}^{(M)}\left(E_{iAK}^{(M)}\right)R_{e}\left(E_{iAK}^{(M)}\right) / R_{e}\left(E_{AK}^{(N)}\right), \quad (2)$$

где  $\rho_W$ ,  $R_e$  — плотность, объемный коэффициент потери массы тестируемого материала;  $E_{AK}^{(N)} = 5$  эВ,  $E_{iAK}^{(M)}$  — энергия ионов АК на стенде. Из (2) следует условие для коэффициента ускорения испытаний на стенде

$$k_{y} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = \frac{N_{iAK}^{(M)}}{N_{AK}^{(N)}} \left(\frac{E_{iAK}^{(M)}}{E_{AK}^{(N)}}\right)^{0.5} \frac{R_{e}\left(E_{iAK}^{(M)}\right)}{R_{e}\left(E_{AK}^{(N)}\right)}.$$
 (3)

Если  $E_{iAK}^{(M)} = E_{AK}^{(N)} = 5$  эВ и  $R_e(E_{iAK}^{(M)}) = R_e(E_{AK}^{(N)}) -$ режим 1, то

$$k_{1y} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = \frac{N_{iAK}^{(M)}}{N_{4K}^{(N)}} \ge 1.$$
(4)

Когда  $E_{iAK}^{(M)} > E_{AK}^{(N)}$  и  $R_e\left(E_{iAK}^{(M)}\right) > R_e\left(E_{AK}^{(N)}\right)$  – режим 2, то

$$k_{2y} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = k_{1y}\xi,$$
(5)

где

$$\xi = \left( E_{iAK}^{(M)} \middle/ E_{AK}^{(N)} \right) \left( R_e \left( E_{iAK}^{(M)} \right) \middle/ R_e \left( E_{AK}^{(N)} \right) \right) \gg 1.$$

ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ том 55 № 1 2021

Из (4), (5) следует  $k_{2y} \gg k_{1y}$ , т.е. процесс испытаний в режиме 1 "ускоряется" пропорционально  $\xi$  [10–12]. По результатам стендовых измерений потери массы полимера  $\Delta M_W \left( E_{iAK}^{(M)} \right)$  и (или) уменьшения толщины  $\delta x_W \left( E_{iAK}^{(M)} \right)$  для известных значений параметров  $E_{AK}^{(M)}$ ,  $E_{iAK}^{(M)}$ ,  $t^{(M)}$ , характеризующих условия тестирования, вычисляется объемный коэффициент потери массы

$$R_{e_{W}}\left(E_{iAK}^{(M)}\right) = \frac{\Delta M_{W}^{(M)}}{\rho_{W}F_{iAK}^{(M)}} = \frac{\delta x_{W}}{F_{iAK}^{(M)}}.$$
(6)

Для оценки параметров  $F_{AK}(E_{AK}^{(N)})$  и  $R_e(E_{AK}^{(N)})$  в ионосфере для соотношения (2) в качестве эталонного материала может быть использован полимид kapton-H. Из отношения  $\Delta M_W / \Delta M_k = \rho_W R_{e_W} F_W / \rho_k R_{e_k} F_k = \rho_W \delta x_W / \rho_k \delta x_k$  для фиксированных значений флюенса АК следует

$$R_{e_{W}}\left(E_{AK}^{(N)}\right) = R_{e_{k}}\left(E_{AK}^{(N)}\right)\frac{\delta x_{W}\left(E_{iAK}\right)}{\delta x_{k}\left(E_{iAK}\right)},\tag{7}$$

где индекс W — тестируемый материал, k — полиимид kapton-H.

Величина флюенса  $F_{AK}(E_{AK}^{(N)})$  в ионосфере, соответствующая условиям стендовых испытаний, определится из (2) после подстановки  $R_e(E_{iAK})$  и  $R_e(E_{AK}^{(N)})$  из (6), (7). Область допустимых нагрузок при стендовых испытаниях определяется условием  $\Phi_{AK}^{(N)} \leq \Phi_{AK}^{(M)} \leq \Phi_{AK}^{(max)}$  [13]. Это соответствует требованию: процессы на поверхности материала, инициированные одним соударением, не должны перекрываться во времени. Должны выполняться условиям стемдовых полимеры  $\Phi_{AK}^{(max)} \leq 10^{20}$  атомО/см<sup>2</sup> с; металлы —  $\Phi_{AK}^{(max)} \leq 10^{27}$  атомО/см<sup>2</sup> с [13].

## ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились на стенде Института технической механики НАН Украины. Детали проведения экспериментов приведены в [11]. В качестве испытуемых материалов использовались пленки толщиной  $x_W \approx$ ≈ 50.7 мкм: полиамид kapton-Н (объемная плотность  $\rho_W \approx 1.42 \text{ г/см}^3$ ) и тефлон FEP-100A  $(\rho_W \approx 2.15 \ r/cm^3)$ . Образцы — диски с диаметром облучаемой поверхности 45 мм — размещены на подложке из сплава АМг-6М толщиной  $3 \times 10^{-1}$  см. Подложка служила термостатом. Измерение и контроль температуры пленки и подложки осуществлялись термопарами диаметром 0.1 мм. При облучении образцов АК температура пленок не превышала ~350 К. Весовые характеристики материалов вне вакуумной камеры за 1 ч до и 1 ч после экспозиции в плазме измерялись на аналитических весах с погрешностью не более  $1 \times 10^{-4}$  г.



Рис. 1. Потери массы полиимида kapton-H и тефлона FEP-100А. Полиимид kapton-H: 1 -измерения авторов при  $E_{iAK} = 5$  эВ; 2 -KA "Space Shuttle" [1]; 3 -[15]; 4 -OC "Мир" [2, 7]; 5 -[3]; 6 -программа "ATOMOX" ESA [4]; 7 -[16]; 8 -расчет авторов для  $R_{e_k} = 3.08 \times 10^{-24}$  см<sup>3</sup>/атомО. Тефлон FEP-100A: 9 -измерение авторов при  $E_{iAK} \approx 5$  эВ; 10 -[17]; 11 -измерения Lockhed FEP [18]; 12 -[19]; 13 -OC "МИР" [2, 7]; 14 -программа "ATOMOX" [4]; 15 -[20]; 16 -данные [21]; 17 -стендовые измерения [16]; 18 -расчет авторов для  $R_{e_{FEP}} = 0.23 \times 10^{-24}$  см<sup>3</sup>/атомО.

Взвешивание вне вакуумной камеры с интервалом 1 ч до и после вакуумирования и облучения плазмой обеспечивает идентичные условия определения массы  $\delta M_W = M_1 - M_2$ , где  $M_1$ ,  $M_2$  – масса образца до и после экспонирования в плазме и в вакууме. Вклад адсорбированных газов  $\delta M_a$  в воздухе при атмосферном давлении до и после вакуумирования и облучения плазмой определяется по формуле  $\delta M_W = (M_1 + \delta M_a) - (M_2 + \delta M_a)$ .

В качестве источника высокоскоростных ионов потоков плазмы атомарно-молекулярного кислорода  $\left(O^++O_2^+\right)$  использовался газоразряд-

ной ускоритель с "саморазгоном" плазмы [10, 11]. В струе с равномерным распределением параметров получены потоки:  $N_{iAK} \approx 10^8 - 10^{10}$  см<sup>-3</sup> и  $E_{iAK} \approx 5 - 100$  эВ. Для диагностики разреженной плазмы служит СВЧ-интерферометр, работающий на частоте 5.45 ГГц, и система электрических зондов. Состав остаточного газа в вакуумной камере стенда контролируется масс-спектрометром МХ 7307 [12]. Соответствие зондовых и СВЧ-измерений концентрации ионов  $N_i$  и электронов  $N_e$  позволяет при условии квазинейтральности  $N_e \approx N_i$  оценить наличие отрицательных ионов  $N_i^-$  в



Рис. 2. Объемный коэффициент потери массы kapton-H и FEP-100А. Полиимид kapton-H: *1* – измерения авторов при  $E_{iAK} \approx 5$ ; 31.6; 70; 75; 80; 90 эВ; 2, 3, 5 – [7]; 4 – [22]  $E_{iAK} \approx 30$  эВ; 6 – [2, 3]; 7 – [20]; 8 – аппроксимация авторов  $R_{e_k} = 0.4(\alpha_i E_{iAK})^{1.268} \times 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомO}$ , где  $\alpha_i = 1$  эВ<sup>-1</sup>. Тефлон FEP-100А: 9 – измерения авторов; *10* – [23]; *11* – [20]; *12* – [24]; *13* – [25]; *14* – [2]; *15* – данные [26]; *16* – аппроксимация авторов  $R_{e_{\text{FEP}}} \approx 0.3(\alpha_i E_{i_{AK}})^{1.268} \times 10^{-25} \text{ см}^3/\text{атомO}$ .

плазме  $(N_e + N_i^-)_{_{3OHA}} \approx N_{eCBY}$  и суммарную концентрацию  $N_e \approx N_{i\Sigma} = N_{ia} + N_{im}$  атомарных  $N_{ia}$  и молекулярных  $N_{im}$  ионов.

Степень диссоциации ионного компонента потока плазмы кислорода  $\xi_{d_i}$  контролируется электрическими зондами [12]

$$\xi_{d_i} \approx 2.5 \left[ I_{i\Sigma} / \left( I_{0i} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_W}{M_i U_{im}^2}} \right) - 1 \right], \qquad (8)$$

где  $I_{i\Sigma}$  – ионный ток насыщения; e – заряд электрона;  $U_{im}$  и  $M_i$  – скорость и масса молекулярных ионов;  $\varphi_W = \varphi_p - \varphi_0$  – потенциал зонда  $\varphi_p$  относи-

ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ том 55 № 1 2021

тельно потенциала плазмы  $\phi_0$ ;  $I_{0i} = (A_p/\pi) N_{i\Sigma} U_{im}$  – ионный ток на зонд при  $\phi_W = 0$ ;  $A_p$  – площадь поверхности цилиндрического зонда.

Остаточное давление в вакуумной камере стенда  $1 \times 10^{-5}$  Па. При натекании рабочего газа — кислорода высшей очистки  $5 \times 10^{-3}$  Па. Основными компонентами в плазменной струе являются быстрые ионы O<sup>+</sup> и O<sub>2</sub><sup>+</sup>. В камере ионизации и на срезе ускорителя плазма практически полностью ионизована. В рабочем сечении струи размером ~0.3 м  $N_e \approx N_{i\Sigma} \approx 6 \times 10^9$  см<sup>-3</sup>, степень диссоциа-



**Рис. 3.** Потери массы kapton-H при облучении O<sup>+</sup>, Ne<sup>+</sup>, Xe<sup>+</sup> и N<sup>+</sup>+N<sub>2</sub><sup>+</sup>. *I*, *2*, *3* – данные [22] (*1* – ионы O<sup>+</sup> при  $E_i = 30$  эB;  $2 - \text{Ne}^+$ ,  $E_i = 30$  эB;  $3 - \text{Xe}^+$ ,  $E_i = 150$  эB); *4* – усредняющая кривая Ne<sup>+</sup>( $E_i = 30$  эB) и Xe<sup>+</sup>( $E_i = 150$  эB); *5*, *6* – измерения авторов при  $E_{i_{AK}} \approx 31.6$  эB и 80 эB; 7 и 8 – расчет авторов для  $E_{i_{AK}} \approx 31.6$  эB и  $E_{i_{AK}} \approx 80$  эB; 9 – измерения авторов в потоке N<sup>+</sup>+N<sup>+</sup><sub>2</sub> при  $E_i \approx 80$  эB и  $\xi_{d_i} \approx 0.63$ ; *10* – усредняющая зависимость  $\Delta M_k$  в потоке N<sup>+</sup> + N<sup>+</sup><sub>2</sub>.

ции  $\xi_{d_i} \approx 0.7$ , концентрация ионов:  $N_{O^+} \approx 4 \times 10^9 \,\mathrm{cm^{-3}}$ и  $N_{O^+_{2}} \approx 2 \times 10^9 \,\mathrm{cm^{-3}}$ .

Поверхность полимера в плазме приобретает равновесный отрицательный потенциал  $\varphi_f \sim -(kT_e/e)\ln(j_e/j_i)$ , где  $j_{e,i}$  — плотность электронного (*e*) и ионного (*i*) тока; *k* — постоянная Больцмана. В слое пространственного заряда ионы АК ускоряются. Кинетическая энергия ионов, направленная по нормали к поверхности, увеличивается:  $e(\varphi_f - \varphi_0) \approx 1-2$  эВ. Флюенс АК запишется

$$F_{AK} \approx F_{O^{+}} + F_{O} = N_{O^{+}}U_{O^{+}}t + N_{O}U_{O}t \approx$$
$$\approx \xi_{d_{i}}N_{i\Sigma}U_{O^{+}}t\left(1 + \frac{N_{O}U_{O}}{N_{O^{+}}U_{O^{+}}}\right), \tag{9}$$

где  $N_0$  и  $U_0$  – концентрация и скорость быстрых нейтральных атомов О. Быстрые ( $U_0 \approx U_{0^+}$ ) нейтральные атомы О в плазме атомарно-молекулярного кислорода образуются при захвате электронов быстрыми ионами АК (ударно-радиационная рекомбинация); при диссоциативной рекомбинации электрона с молекулярным O<sub>2</sub><sup>+</sup> ионом; и при ионно-молекулярных обменных реакциях ионов O<sup>+</sup> с молекулами остаточного газа и O<sub>2</sub> [14]. Приближенно  $N_0/N_{0^+} \le N_{i\Sigma}/N_{0^++O_2^+}$ , где  $N_{0^++O_2^+} \approx 1 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$  – концентрация ионов на срезе ускорителя, а  $N_{i\Sigma} \approx 6 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ , т.е.  $N_0/N_{0^+} \ll 1$  и (10) запишется в виде

$$F_{AK} \approx F_{O^+} \approx \xi_{d_i} N_{i\Sigma} U_{O^+} t.$$
<sup>(10)</sup>

# ПОТЕРЯ МАССЫ ПОЛИМЕРАМИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ АК

На рис. 1 приведены зависимости потери массы  $\Delta M_W$  от флюенса  $F_{AK}$  ( $E_{AK} \approx 5$  эВ) для полиимида kapton-H и тефлона FEP-100A. Зависимости объемного коэффициента потери массы  $R_e$  полимеров от энергии ионов АК представлены на рис. 2. Для фиксированных значений  $E_{iAK}$  и  $F_{AK}$ из зависимостей  $\Delta M_W (F_{iAK})$  и  $R_e (E_{iAK})$ , приведенных на рис. 1, 2, следует  $\Delta M_W / \Delta M_k$  = const и  $R_{e_W} / R_{e_k}$  = const. Аналогичные данные при  $E_{AK}$  = = 5 эВ (спутниковые измерения) и  $E_{iAK}$  = 20 эВ (стендовые испытания) для широкого ряда полимеров  $\Delta M_W / \Delta M_k \approx \text{const}$  и  $\rho_W R_{e_W} / \rho_k R_{e_k}$  = const приведены в [27].

На рис. 3 приведены зависимости потери массы kapton-H от флюенса высокоэнергичных ионов O<sup>+</sup>,  $Ne^+$ ,  $Xe^+$  и  $N^+ + N_2^+$ . Унос массы полимера при облучении ионами О<sup>+</sup>+ О<sub>2</sub><sup>+</sup> определяют кинетическое распыление и химическое травление. При облучении полимера ионами  $Ne^+$ ,  $Xe^+$  и  $N^+ + N_2^+$  унос массы обусловлен только кинетическим распылением. По данным рис. 3 унос массы полиимида kapton-H за счет кинетического распыления практически на порядок меньше  $\Delta M_k$  из-за химического травления O<sup>+</sup>. Измеренная величина  $\delta x_W$  полимера в потоке АК при фиксированных значениях Е<sub>іАК</sub>, F<sub>іАК</sub> и рассчитанные значения  $\delta x_W(E_{iAK})/\delta x_k(E_{iAK}) =$  $= \delta x_{W} (5 \Im B) / \delta x_{k} (5 \Im B)$  позволяют оценить величину объемного коэффициента уноса массы испытуемого полимера  $R_{e_W}(5 \ni B) = R_{e_k}(5 \ni B) \delta x_W / \delta x_k$  $= R_{e_{k}} (5 \Im B) \Delta M_{W} \rho_{k} / \Delta M_{k} \rho_{W}.$ 

Если при стендовых испытаниях:  $E_{iAK} = 80 \Rightarrow B$ ,  $N_{iAK} \approx 4 \times 10^9 \text{ см}^{-3}$ ,  $t^{(M)} \approx 3 = 1.08 \times 10^4 \text{ с}$ , флюенс  $F_{AK} (E_{iAK}) = 1.34 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ , то  $R_{e_k} (E_{iAK}) \approx 1.04 \times 10^{-22} \text{ см}^3$ /атомО и  $F_{AK}^{(N)} (E_{AK}^{(N)}) \approx 4.55 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$ . В ионосфере флюенс  $F_{AK}^{(N)} = 4.5 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$  ( $E_{AK}^{(N)} = 5 \Rightarrow B$ ) при среднем уровне солнечной активности соответствует годовой экспозиции полимера на высоте  $h \approx 380 \text{ км}$  (MKC), коэффициент ускорения стендовых испытаний карton-H равен  $k_{2y} \approx 3 \times 10^3$ , а при облучении полимера ионами  $E_{iAK} = 5 \Rightarrow B$  коэффициент ускорения –  $k_{1y} \approx 2 \times 10^1$ .

### выводы

Разработана процедура физического моделирования длительного, при высоких флюенсах, воздействия АК на полимеры в ионосфере Земли. При реализации процедуры используются: высокоэнергичные ионы АК потока разреженной плазмы и полиимид kapton-Н в качестве эталонного материала. Для оценки эквивалентности условий взаимодействия "АК-полимер" в ионосфере и на стенде принято условие равенства потери массы полимера. В обоснование процедуры получены зависимости уноса массы, объемного коэффициента потери массы полиимида kapton-H и тефлона FEP-100А от флюенса и энергии ионов АК. Показано, что при облучении полиимида kapton-Н ионами АК с энергией 30-80 эВ унос массы из-за химического травления практически на порядок больше, чем потери массы из-за кинетического распыления, флюенс АК и коэффици-

ХИМИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ том 55 № 1 2021

ент ускорения испытаний полиимида на два порядка больше, чем коэффициент ускорения в потоке ионов АК с энергией 5 эВ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zimcik D.G., Maag C.R. // J. Spacecraft and Rockets. 1988. V. 25. № 2. P. 162.
- Milinchuk V.K., Klinshpont E.R., Pasevich O.F. et al. // High Energy Chemistry. 2013. V. 47. № 6. P. 295.
- 3. *Pippin H.G.* // Final report NASA VA 23681 Langley Research Center. Hampton, 2008. 2199. 10 p.
- 4. Space environment. Earth upper atmosphere. ISO 14222:2013 (R).
- Gonzalez R.I., Tomczak S.J., Minton T.K. et al. // Proc. 9th ISMSE. Noordwijk: ESTEC, 2003. P. 113.
- 6. Kuvaldina E.V., Lubimov V.K., Rybkin V.V. // High Energy Chemistry. 1992. V. 26. № 5. P. 387.
- Гужова С.К., Новиков Л.С., Черник В.Н. и др. // Модель космоса. В 2 т. Т.2 / Под ред. М.И. Панасюка, Л.С. Новикова. М: КДУ, 2007. С. 171.
- Yokota K., Tagawa M. // J. Spacecraft and Rockets. 2007. V. 44. № 2. P. 434.
- 9. *Kleiman J., Iskanderova Z., Dudimenko Y. et al.* // Proc. of the 9th ISMSE. Noordwijk: ESTEC. 2003. P. 313.
- 10. Shuvalov V.A., Gorev N.B., Tokmak N.A. et al. // Acta Astronautica. 2017. №132. P. 97.
- 11. Shuvalov V.A., Reznichenko N.P., Tsokur A.G. et al. // High Energy Chemistry. 2016. V. 50. № 3. P. 171.
- Shuvalov V.A., Pis'mennyi N.I., Lazuchenkov D.N. et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2013. V. 56. № 4. P. 459.
- Войценя В.С., Гужова С.К., Титов В.И. Воздействие низкотемературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. М.: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.
- Mitcner M., Kruger Ch. H. Partially ionized gases. Wiley: N.Y., 1973. 518 p.
- Tagawa M., Yokota K. // Acta Astronautica. 2008. № 62. P. 203.
- Grossman E., Gouzman I., Lempert G. et al. // J. Spacecraft and Rockets. 2004. V. 41. № 3. P. 356.
- Skurat V.E. // High Energy Chemistry. 2016. V. 50.
   № 6. P. 478.
- Banks B.A., Backus J.A., Manno M.V. et al. // J. Spacecraft and Rockets. 2011. V. 48. № 1. P. 14.
- Miller S., Banks B.A., Waters D.L. // Proc. 10th ISMSE and 8 th ICPMSE. Collioure: France. 2006. Noordwijk. ESTEC. 2006. P. 120.
- 20. Никифоров А.П., Терновой А.И., Самсонов П.В. и др. // Химическая физика. 2002. Т. 21. № 5. С. 73.
- 21. Reddy M.R. // J. Materials Science. 1995. V. 3. P. 281.
- Новые наукоемкие технологии в технике. В 24 т. Т. 17. / Под ред. К.С. Касаева. М: ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ, 2000. 280 с.
- Grossman E., Gouzman I. // Nuclear instruments and methods in physical research. 2003. V. 208. № 1. P. 48.
- 24. Banks B., Waters D., Thorson S.D. et al. // NASA/TM 2006-214363. 7 p.
- Cazanbon B., Paillous A., Siffire J. et al. // J. Spacecraft and Rockets. 1998. V. 35. № 6. P. 797.
- Vered R., Lempert G.D., Grossman E. et al. // Proc. 6th ISMSE. Noordwijk: ESA, 1994. P. 175.
- Chernik V.N., Novikov L.S., Akishin A.I. // Proc. 10th ISMSE and 8 th ICPMSE. Collioure: France. 2006. Noordwijk. ESTEC. 2006. P. 127.