

<https://doi.org/10.15407/knit2021.04.054>
УДК 533.95

В. О. ШУВАЛОВ, зав. відділу, д-р техн. наук, проф., лауреат Державної премії України, лауреат премії ім. М. К. Янгеля НАН України

E-mail: vashuvalov@ukr.net

С. М. КУЛАГІН, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

E-mail: kulagin@vash.dp.ua

Д. М. ЛАЗУЧЕНКОВ, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: lazuch@ukr.net

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України
вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

ПРИСКОРЕННЯ РЕСУРСНИХ ВИПРОБУВАНЬ ПОЛІМЕРІВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ НА СТІЙКІСТЬ ДО ТРИВАЛОЇ ДІЇ АТОМАРНОГО КИСНЮ В ІОНОСФЕРІ ЗЕМЛІ

Розроблено процедуру прискорених ресурсних випробувань полімерних конструкційних матеріалів космічних апаратів (КА) на їхню стійкість до тривалої дії потоків атомарного кисню (АК) в іоносфері Землі на висотах від 200 до 700 км. Процедура включає: опромінювання полімерів високоенергійними іонами атомарного кисню потоку розрідженої плазми і використання полііміду картоп-Н як еталонний матеріал. Умовою еквівалентності режимів взаємодії «АК — полімер» в іоносфері Землі і на спеціалізованому стенді є рівність втрат маси тестованого матеріалу. Базою для обґрунтування процедури прискорених випробувань є отриманий висновок, згідно з яким при опромінюванні полімеру картоп-Н високоенергійними іонами атомарного кисню в діапазоні енергій від 30 до 800 eV деградацію полііміду визначає процес хімічного травлення матеріалу. Для обґрунтування процедури прискорення ресурсних випробувань полімерних конструкційних матеріалів космічних апаратів на стійкість до тривалої дії потоків атомарного кисню отримано залежності втрати маси та об'ємного коефіцієнта втрати маси (реакційної спроможності) полііміду картоп-Н та тефлону FEP-100A від флюенса і енергії іонів атомарного кисню. Показано, що при опромінюванні полііміду картоп-Н іонами атомарного кисню з енергією від 30 до 80 eV втрата маси матеріалу через хімічне травлення практично на порядок більша, ніж втрата маси, зумовлена кінетичним розпиленням. При опромінюванні полімеру картоп-Н високоенергійними іонами атомарного кисню потоку розрідженої плазми коефіцієнт прискорення ресурсних випробувань та флюенс атомарного кисню практично на два порядки більший, ніж коефіцієнт прискорення при опромінюванні полімеру іонами атомарного кисню з енергією 5 eV.

Ключові слова: космічний апарат, полімерні конструкційні матеріали, іоносферна плазма, потоки атомарного кисню, прискорення випробувань.

ВСТУП

Навколосупутникове середовище на висотах 200...700 км є агресивним до полімерних матеріалів КА. Експозиція полімерів на орбітальних станціях МКС, «Мир», на КА «Space Shuttle» [10,

21, 26] показала, що коефіцієнти ерозії матеріалів (втрати маси, зменшення товщини плівок) пропорційні флюенсу атомарного кисню (АК). За результатами досліджень на КА з'явився термін «поліімідний еквівалентний флюенс АК». За

Цитування: Шувалов В. О., Кулагін С. М., Лазученков Д. М. Прискорення ресурсних випробувань полімерів космічних апаратів на стійкість до тривалої дії атомарного кисню в іоносфері Землі. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 4 (131). С. 54—64. <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.054>

еталонний полімер до дії АК прийнято поліімід картоп-Н. Атомарний кисень на висотах 200...700 км іонізований, ступінь іонізації 10^{-4} ... 10^{-1} [3]. Натурні дослідження свідчать, що деградація полімерів триває протягом всього терміну експлуатації матеріалів на орбіті [17, 21].

Інформацію про зміни властивостей полімерних матеріалів зовнішніх поверхонь КА під впливом АК при тривалій експлуатації в іоносфері Землі можна отримати тільки експериментально — за результатами супутникових або стендових випробувань. Одним із напрямків вирішення задачі є фізичне моделювання або імітація дії потоків АК на матеріали у спеціалізованих стендах.

Умовам експозиції полімерів у іоносфері Землі на висотах 200...700 км при середньому рівні сонячної активності відповідають такі значення параметрів АК [3, 16]:

– енергія атомів кисню $E_{AK} \approx 4.7...5.0$ еВ (на круговій орбіті швидкість КА $U_{KA} \approx 7.5...7.8$ км/с),

– концентрація атомів кисню $N_{AK} \approx 10^6...4 \cdot 10^9$ см $^{-3}$,

– щільність потоку атомів кисню $\Phi_{AK} = N_{AK} \times U_{KA} \approx 8 \cdot 10^{11}...3 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$,

– річний флюенс атомів кисню $F_{AK} = \Phi_{AK} \cdot t \approx 2.5 \cdot 10^{19}...9 \cdot 10^{22}$ см $^{-2}$, де t — час експозиції.

На спеціалізованих стендах, як правило, використовують імпульсні і стаціонарні потоки АК з енергією $E_{AK} \approx 5...10$ еВ і $\Phi_{AK} \approx 10^{15}...10^{16}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ [3, 4, 25].

Стенові дослідження деградації полімерів при тривалій дії АК повинні відповідати часу експозиції і орбітальним флюенсам АК. Для імітації на стенді умов тривалої експлуатації полімерів (дії АК з високими флюенсами на матеріали КА в іоносфері Землі) можна використовувати потоки іонів плазми атомарно-молекулярного кисню з підвищеною концентрацією ($N_{iAK} \approx 10^9...10^{10}$ см $^{-3}$) при енергіях $E_{iAK} \approx 5$ еВ або потоки плазми з енергією іонів атомарного кисню $E_{iAK} \approx 30...80$ еВ і $\Phi_{iAK} \geq 10^{16}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$. Реалізувати на спеціалізованих стендах опромінювання полімерів потоками з високими флюенсами АК при енергіях $E_{AK} \approx 5$ еВ дуже важко.

Метою даної роботи є розроблення процедури прискорених ресурсних випробувань полімерів

на стійкість до дії АК в іоносфері в умовах тривалої експлуатації матеріалів на орбіті шляхом опромінювання їх на стенді високоенергійними іонами потоків розрідженої плазми атомарно-молекулярного кисню ($E_{iAK} \approx 5...80$ еВ) і використання поліімиду картоп-Н як еталонний полімерний матеріал.

УМОВИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВАЛОЇ ДІЇ ПОТОКІВ АТОМАРНОГО КИСНЮ НА ПОЛІМЕРИ КА

Ключовим параметром, що характеризує ступінь деградації полімеру при дії АК в іоносфері Землі і на стенді, є втрата маси матеріалу. За критерій еквівалентності при стендовому відтворенні тривалої дії потоків АК прийнято рівність втрати маси ΔM_W (або зменшення товщини δx_W полімерної плівки) при експозиції її в іоносфері Землі і на спеціалізованому стенді:

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

де індекс « N » відповідає натурним умовам в іоносфері Землі; « M » — умовам стендових ресурсних випробувань; $\Delta M_W = \rho_W R_e F_{AK} = \rho_W \delta x_W$, ρ_W і R_e — густина і об'ємний коефіцієнт втрати маси матеріалу (реакційна спроможність [3]). З рівностей (1) випливає зв'язок між параметрами, які характеризують умови експлуатації матеріалів в іоносфері Землі, з їхніми значеннями при тестуванні зразка матеріалу на стенді:

$$F_{AK}^{(N)}(E_{AK}^{(N)}) = F_{AK}^{(M)}(E_{iAK}^{(M)}) \cdot R_e(E_{iAK}^{(M)}) / R_e(E_{AK}^{(N)}), \quad (2)$$

де $E_{AK}^{(N)} = 5$ еВ, $E_{iAK}^{(M)}$ — енергія іонів АК у потоці плазми.

З виразу (2) отримаємо умови для коефіцієнта прискорення випробувань на стенді:

$$k_y = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = \frac{N_{iAK}^{(M)}}{N_{AK}^{(N)}} \cdot \left(\frac{E_{iAK}^{(M)}}{E_{AK}^{(N)}} \right)^{0.5} \frac{R_e(E_{iAK}^{(M)})}{R_e(E_{AK}^{(N)})}. \quad (3)$$

Прискорені ресурсні випробування можуть бути реалізовані у двох режимах:

$$1. E_{iAK}^{(M)} = E_{AK}^{(N)} = 5 \text{ еВ}, N_{iAK}^{(M)} > N_{AK}^{(N)}$$

і

$$R_e(E_{iAK}^{(M)}) = R_e(E_{AK}^{(N)}),$$

тоді

$$k_{1y} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = \frac{N_{iAK}^{(M)}}{N_{AK}^{(N)}} > 1. \quad (4)$$

$$2. E_{iAK}^{(M)} > E_{iAK}^{(N)}, N_{iAK}^{(M)} > N_{iAK}^{(N)}$$

і

$$R_e(E_{iAK}^{(M)}) > R_e(E_{iAK}^{(N)}),$$

тоді

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

де

$$\xi = \left(\frac{E_{iAK}^{(M)}}{E_{iAK}^{(N)}} \right) \cdot \frac{R_e(E_{iAK}^{(M)})}{R_e(E_{iAK}^{(N)})} \gg 1.$$

З виразів (4), (5) маємо $k_{2y} \gg k_{1y}$, тобто процес випробувань у режимі 2 відносно режиму 1 «прискорюється» пропорційно ξ . При стендових випробуваннях полімерного матеріалу за результатами вимірювань втрати маси $\Delta M_W(E_{iAK}^{(M)})$ і (або) зменшення товщини плівки $\delta x_W(E_{iAK}^{(M)})$ для параметрів $F_{iAK}^{(M)}, E_{iAK}^{(M)}, t^{(M)}$, що характеризують умови тестування, обчислюється об'ємний коефіцієнт втрати маси полімеру:

$$R_{eW}(E_{iAK}^{(M)}) = \frac{\Delta M_W^{(M)}}{\rho_W F_{iAK}^{(M)}} = \frac{\delta x_W}{F_{iAK}^{(M)}}. \quad (6)$$

Для оцінки параметрів $F_{iAK}(E_{iAK}^{(N)})$ і $R_e(E_{iAK}^{(N)})$, що характеризують умови експлуатації матеріалу в іоносфері, у співвідношенні (2) як еталонний матеріал можна використати поліілід kapton-H. Із співвідношення

$$\begin{aligned} \Delta M_W / \Delta M_k &= \rho_W R_{eW} F_W / \rho_k R_{ek} F_k = \\ &= \rho_W \delta x_W / \rho_k \delta x_k \end{aligned}$$

маємо

$$R_{eW}(E_{iAK}) = R_{ek}(E_{iAK}) = \frac{\delta x_W(E_{iAK})}{\delta x_k(E_{iAK})} \cdot \frac{F_k(E_{iAK})}{F_W(E_{iAK})}, \quad (7)$$

де індекс «W» позначає матеріал, що тестується; індекс «k» — поліілід kapton-H.

Для фіксованих значень флюенса АК співвідношення (7) можна подати у вигляді

$$R_{eW}(E_{iAK}^{(N)}) = R_{ek}(E_{iAK}^{(N)}) \frac{\delta x_W(E_{iAK})}{\delta x_k(E_{iAK})}. \quad (8)$$

Флюенс $F_{iAK}(E_{iAK}^{(N)})$ для умов експлуатації полімеру в іоносфері Землі, які відповідають умовам стендових випробувань, визначиться з виразу (2) після підстановки $R_e(E_{iAK})$ і $R_e(E_{iAK}^{(N)})$ з (6), (8).

Діапазон припустимих навантажень при прискорених випробуваннях визначають умови для

потоків АК: $\Phi_{iAK}^{(N)} \leq \Phi_{iAK}^{(M)} \leq \Phi_{iAK}^{(\max)}$ [2]. При стендових випробуваннях в умовах тривалої дії АК на матеріали КА цьому діапазону відповідає умова, згідно з якою процеси на поверхні матеріалу, ініційовані одним зіткненням, не повинні перебиватися у часі. На стенді повинні виконуватися умови: $N_{iAK}^{(M)} \leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$ і $\Phi_{iAK}^{(M)} \leq 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Ці умови прийнятні для більшості матеріалів КА: для полімерів $\Phi_{iAK}^{(\max)} \leq 10^{20} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, для металів — $\Phi_{iAK}^{(\max)} \leq 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [2].

ТЕХНІКА ПРИСКОРЕНИХ ВИПРОБУВАНЬ

Експериментальні дослідження проводилися на стенді Інституту технічної механіки НАН України і Державного космічного агентства України. Стенд відноситься до класу плазмових труб. Система відкачування продуктивністю для повітря до $50 \text{ м}^3/\text{с}$ (вакуумний електророзрядний агрегат і система турбомолекулярних насосів), наявність криопанелей, охолоджуваних рідким азотом, дають можливість створювати у вакуумній камері стенда — циліндрі діаметром 1.2 м і довжиною 3.5 м — статичне розрідження порядку 10^{-5} Па , а при натіканні газу — 10^{-3} Па .

Зразки матеріалів і діагностичні засоби стенда розміщено на рухомих платформах (верхній і нижній) із чотирма ступенями свободи кожна. Платформи забезпечують кутові і поперечні переміщення в горизонтальній площині, переміщення у вертикальній площині і обертання навколо вертикальної осі. Точність відліку для лінійних переміщень — 0.5 мм, для кутових — 0.5°. В ході експерименту зразки матеріалів і діагностичні зонди можуть переміщатися практично в будь-яку точку в потоці плазми і в об'ємі вакуумної камери стенда.

Як матеріали КА використовувалися полімерні плівки товщиною $x_W \approx 50.7 \text{ мкм}$: поліілід kapton-H ($\text{C}_2\text{H}_{10}\text{O}_5\text{N}_2$, об'ємна щільність $\rho_W \approx 1.42 \text{ г/см}^3$) і тефлон FEP-100A ($(\text{C}_2\text{F}_4)_n$; $\rho_W \approx 2.15 \text{ г/см}^3$). Зразки виготовлено у вигляді дисків діаметром 50 мм; діаметр поверхні плівки, що опромінюється, дорівнює 45 мм. Зразки матеріалів розміщено на підкладці — диску із алюміній-магнієвого сплаву АМг-6М товщиною 3 мм, який виконує роль термостата. Вимірювання і контроль температури плівки і підкладки здійснювалися

мініатюрними термопарами діаметром 0.1 мм. При опромінюванні зразків в ході експериментів температура плівок не перевищувала 350 К.

Для вимірювання вагових характеристик матеріалів зовні вакуумної камери за 1 год до і 1 год після експозиції у потоці плазми використовувалися аналітичні ваги з похибкою до 0.1 мг. Зважування зовні вакуумної камери з інтервалом 1 год до і після вакуумування і опромінювання плазмою забезпечує ідентичні умови визначення маси $\delta M_W = M_1 - M_2$, де M_1 та M_2 — маса зразка полімеру до і після експонування у потоці плазми і у вакуумі. Внесок адсорбованих газів δM_a у повітрі при атмосферному тиску до і після вакуумування і опромінювання потоком плазми визначається таким чином:

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

Як джерело високоенергійних іонів плазми атомарно-молекулярного кисню ($O^+ + O_2^+$) використано газорозрядний прискорювач із «саморозгоном» плазми (з іонізацією робочого тіла O_2 електронним ударом і осциляцією електронів у зовнішньому магнітному полі). Застосування прискорювача плазми дозволяє отримувати в робочій частині вакуумної камери стенда (області з рівномірним розподілом щільності, швидкості іонів і індукції зовнішнього магнітного поля) потоки АК з концентрацією іонів $N_{iAK} = 10^8 \dots 10^{10} \text{ см}^{-3}$ і енергією $E_{iAK} = 5 \dots 100 \text{ eV}$ [8, 9].

Для діагностики потоку розрідженої плазми на стенді служить мікрохвильовий інтерферометр, який працює на частоті 5.45 ГГц, і система електричних зондів [7–9]: циліндричний зонд з вольфраму радіусом $r_p = 0.2$ мм, довжиною $l_p = 2$ см; з молібдену — циліндричний $r_p = 45$ мкм та $l_p = 4.5$ мм, сферичний — діаметром $2r_p = 4$ мм, плоский — діаметром $2r_p = 1$ см і циліндр Фарадея діаметром $2r_p = 1$ см і висотою $l_p = 1$ см.

Енергія іонів E_{iAK} контролюється багатоелектродним зондом енергоаналізатором діаметром 1.75 см. Розкид значень E_{iAK} не перевищує ± 4.5 %.

Реєстрація вольтамперних характеристик (ВАХ) здійснювалась в автоматичному режимі. Похибка вимірювання зондового струму не пе-

ревищує ± 2 %. Потенціал плазми вимірюється в точці розбіжності характеристик холодного і нагрітого термозонда. Розкид значень потенціалу плазми не перевищує ± 4 %. Для контролю орієнтації зразків-мішеней відносно вектора швидкості потоку АК використовувався одиночний циліндричний зонд радіусом $r_p = 0.2$ мм, довжиною $l_p = 2$ см. Пік іонного струму насичення, що реєструється зондом при обертанні в горизонтальній площині (навколо вертикальної осі), відповідає орієнтації осі зонда вздовж по потоку, а півширина піку іонного струму насичення пропорційна ступеню неізотермічності T_i/T_e розрідженої плазми (T_i, T_e — температури іонів, електронів). Склад залишкового газу у вакуумній камері стенда контролює мас-спектрометр MX 7307 [7].

Паралельно з електричними зондами для визначення концентрації заряджених частинок у потоці плазми використовувався метод НВЧ-діагностики (інтерферометр). Відповідність зондових і НВЧ-вимірювань концентрації заряджених часток дозволяє, з використанням умови квазінейтральності $N_e \approx N_i$, оцінити:

- наявність негативних іонів у потоці плазми атомарно-молекулярного кисню, $(N_e + N_i^-)_{\text{зонд}} \approx N_{e\text{НВЧ}}$, де N_e — концентрації електронів, N_i^- — концентрація негативних іонів;

- сумарну концентрацію позитивних атомарних і молекулярних іонів $N_e \approx N_{i\Sigma} = N_{ia} + N_{im}$ (індекс «a» відповідає атомарним, «m» — молекулярним іонам кисню).

Методи НВЧ-діагностики засновано на розсіюванні електромагнітного випромінювання на електронах іонізованого середовища [6].

Осьовий (вздовж осі z) і радіальний (вздовж осі ρ) розподіли концентрації заряджених частинок у потоці плазми атомарно-молекулярного $N_e \approx N_{O^+ + O_2^+}$ кисню показано на рис. 1.

Ступінь дисоціації іонного компонента потоку плазми атомарно-молекулярного кисню ξ_{d_i} безпосередньо в робочій частині струменя біля поверхні зразків матеріалу контролюється електричними зондами. Ступінь дисоціації іонного компонента плазми атомарно-молекулярного кисню можна представити у вигляді

$$\xi_{d_i} = \frac{N_{ia}}{N_{i\Sigma}} = \frac{N_{ia}}{N_{ia} + N_{im}},$$

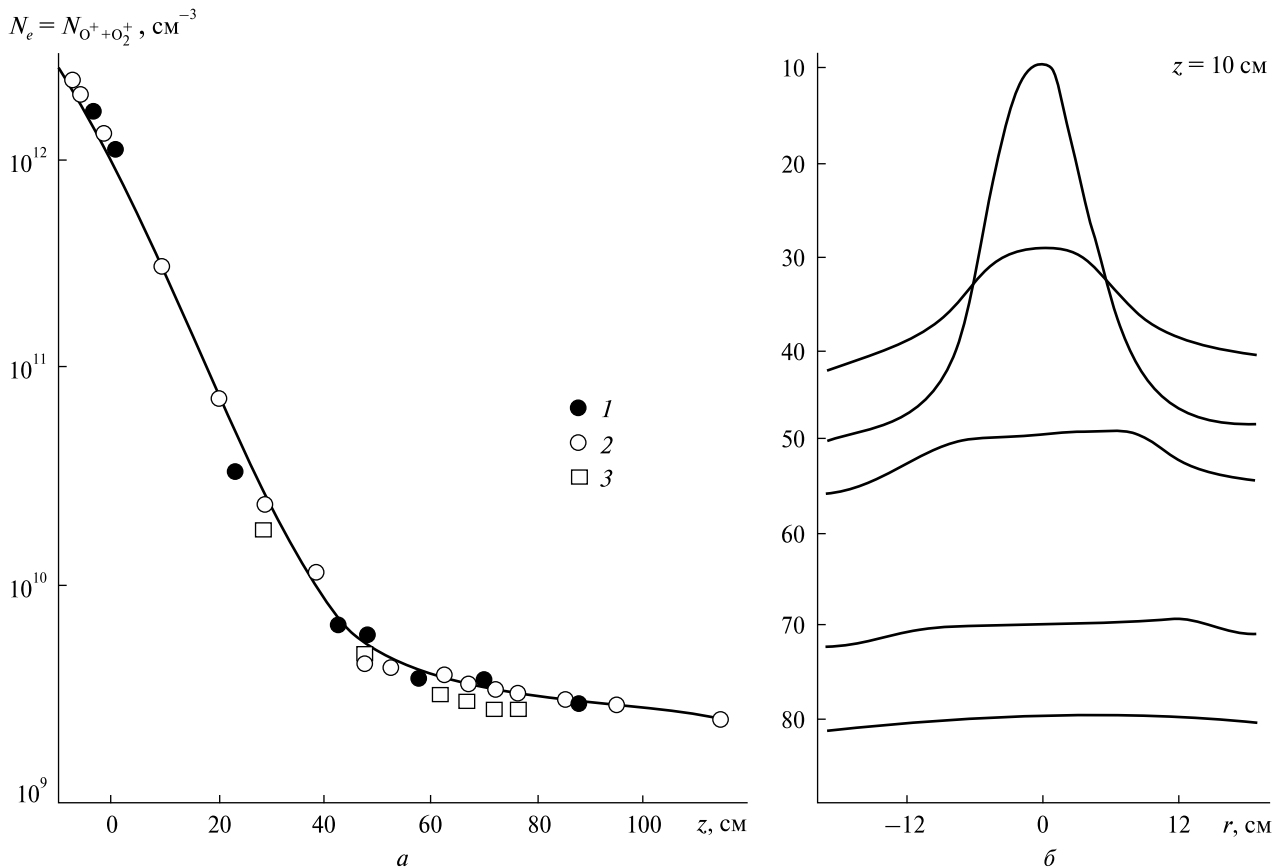


Рис. 1. Осьові (а) та радіальні (б) розподіли концентрації заряджених частинок у потоці плазми атомарно-молекулярного кисню $N_e \approx N_{O^+ + O_2^+}$: 1, 2 — циліндричний і плоский електричні зонди, 3 — НВЧ-інтерферометр

а іонний струм насичення на циліндричний зонд, орієнтований перпендикулярно до вектора швидкості потоку плазми, матиме вигляд

$$I_{i\Sigma} = I_{ia} + I_{im} = \frac{(1 + 0.4\xi_{d_i})A_p}{\pi} e N_{i\Sigma} U_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\phi_W}{M_i U_{im}^2}},$$

тоді ступінь дисоціації іонного компонента дорівнює

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

де I_{ia} , I_{im} — іонний струм насичення атомарних і молекулярних іонів, $A = 2\pi r_p l_p$ — площа поверхні зонда, e — заряд електрона, U_{im} , M_i — швидкість і маса молекулярних іонів, $\phi_W = \phi_p - \phi_0$ — потенціал зонда ϕ_p відносно потенціалу плазми ϕ_0 , $I_{0i} = (A_p / \pi) \cdot N_{i\Sigma} U_{im}$ — іонний струм на зонд при $\phi_W = 0$.

За результатами мас-спектрометричного аналізу при статичному тиску $2 \cdot 10^{-5}$ Па в залишковому газі у вакуумній камері стенда переважають молекули $CO + N_2$ і H_2 з концентрацією нейтральних молекул $N_n \approx 4.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. У плазмовому струмені при робочому тиску 5 мПа основними компонентами є швидкі іони O^+ і O_2^+ . У камері іонізації і на зрізі прискорювача плазма практично повністю іонізована $N_{O^+ + O_2^+} \approx N_e$. В робочому перерізі струменя концентрація заряджених частинок $N_e \approx N_{i\Sigma} \approx 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, при ступені дисоціації іонного компонента $\xi_{d_i} \approx 0.7$ концентрація іонів O^+ атомарного кисню $N_{O^+} \approx 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, а іонів O_2^+ молекулярного кисню — $N_{O_2^+} \approx 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Поверхня полімеру у потоці розрідженої плазми набуває рівноважного негативного потенціалу $\phi_f \sim -(kT_e / e) \ln(j_e / j_i)$, де $j_{e,i}$ — щіль-

ність електронного та іонного струму, k — стала Больцмана. У шарі просторового заряду іони АК прискорюються. Кінетична енергія іонів біля поверхні полімеру збільшується на величину $e(\phi_f - \phi_0) \approx 1...2$ еВ. Флюенс АК біля поверхні полімерів можна представити у вигляді

$$F_{AK} \approx F_{O^+} + F_O = N_{O^+} U_{O^+} t + N_O U_O t \approx \approx \xi_{d_i} N_{i\Sigma} U_{O^+} t \left(1 + \frac{N_O U_O}{N_{O^+} U_{O^+}} \right). \quad (9)$$

де N_O та U_O — концентрація і швидкість швидких нейтральних атомів кисню.

Нейтральні атоми кисню ($U_O \approx U_{O^+}$) у потоці розрідженої плазми утворюються:

– у процесі радіаційної і ударно-радіаційної рекомбінації при захопленні електронів швидкими O^+ іонами АК ($O^+ + e^- \rightarrow O + h\nu$, $h\nu$ — електромагнітне випромінювання фотона);

– в результаті дисоціативної рекомбінації електронів плазми з молекулярними O_2^+ іонами ($O_2^+ + e^- \rightarrow O + O$);

– при іонно-молекулярних обмінних реакціях (перезарядження іонів O^+ при зіткненнях з нейтральними молекулами O_2 залишкового газу $O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$).

Наближено $N_O/N_{O^+} \leq N_{i\Sigma}/N_{O^+ + O_2^+} \approx 10^{-3}$, де $N_{i\Sigma}$ і $N_{O^+ + O_2^+}$ — концентрація іонів у робочому перерізі струменя і на зрізі плазмового прискорювача.

Таким чином, при $U_O \leq U_{O^+}$ маємо

$$N_O U_O / N_{O^+} U_{O^+} \ll 1,$$

і (9) матиме вигляд

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

При опромінюванні зразків полімерів потоком плазми атомарно-молекулярного кисню визначальним є вплив іонів АК.

ВТРАТИ МАСИ ПОЛІМЕРАМИ ПРИ ОПРОМІНЮВАННІ ВИСОКОЕНЕРГІЙНИМИ ІОНАМИ

На рис. 2 представлено залежності втрати маси ΔM_w полііміду kapton-H від флюенса F_i високоенергійних іонів кисню $O^+ + O_2^+$ азоту $N^+ + N_2^+$ і неону Ne^+ . При опромінюванні полііміду kapton-H високоенергійними іонами $O^+ + O_2^+$

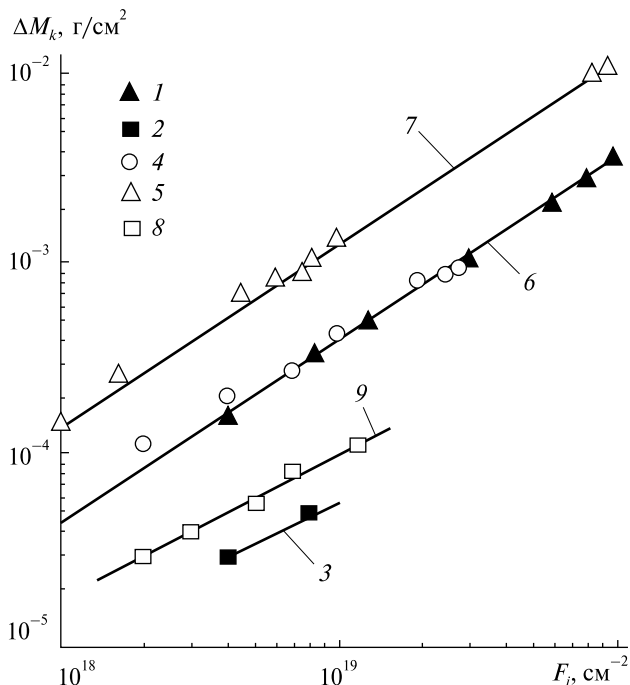


Рис. 2. Залежності втрати маси полііміду kapton-H від флюенса високоенергійних іонів $O^+ + O_2^+$, Ne^+ та $N^+ + N_2^+$: 1, 2 — дані роботи [4] (1 — опромінювання іонами АК з енергією $E_{iAK} = 30$ еВ; 2 — іони Ne^+ , $E_{Ne^+} = 30$ еВ); 3 — усереднена крива при опромінюванні полііміду іонами Ne^+ ($E_{Ne^+} = 30$ еВ); 4, 5 — вимірювання авторів при $E_{iAK} \approx 31.6$ і 80 еВ; 6, 7 — розрахункові значення $R_{ek} = 0.4(\alpha_i; E_{iAK})^{1.268} \cdot 10^{-24}$ см³/атомО для $E_{iAK} \approx 31.6$ і 80 еВ; 8 — вимірювання авторів у потоці іонів $N^+ + N_2^+$ з енергією $E_i \approx 80$ еВ; 9 — усереднена залежність для ΔM_k у потоці $N^+ + N_2^+$

деградацію, втрату маси матеріалу визначають два механізми: кінетичне розпилення та хімічне травлення ($\Delta M_k^{O^+ + O_2^+} = \Delta M_{kin} + \Delta M_{chem}$). При опромінюванні полімеру високоенергійними іонами Ne^+ та $N^+ + N_2^+$ втрату маси визначає тільки кінетичне розпилення. Для ступеня дисоціації іонів атомарно-молекулярного кисню $\xi_{d_i} \approx 0.7$ та іонів атомарно-молекулярного азоту $\xi_{d_i} \approx 0.63$ їхня середня молекулярна маса становить: $\Delta M_{O^+ + O_2^+} \approx 20.8$ а.о.м., $\Delta M_{N^+ + N_2^+} \approx 19.2$ а.о.м., а для іонів неону — $\Delta M_{Ne^+} = 20.0$ а.о.м.

При опромінюванні полімеру високоенергійними іонами (з практично однаковими молекулярними масами і енергіями) втрати маси полііміду kapton-H, зумовлені кінетичним роз-

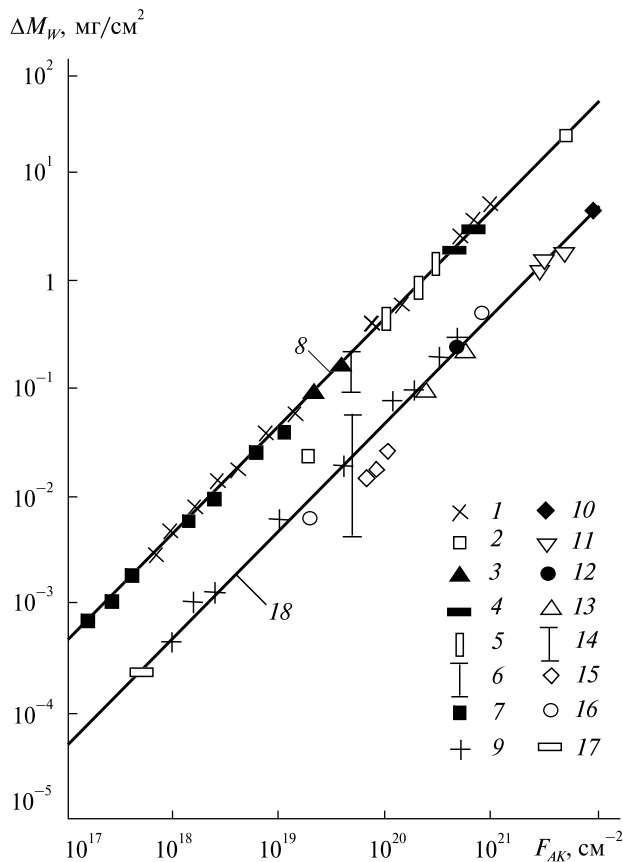


Рис. 3. Залежності втрати маси ΔM_W полімерів kapton-H і тефлон FEP-100A від флюенса F_{AK} при енергії частинок 5 еВ (1..8 — для поліміду kapton-H, 9..18 — для тефлону FEP-100A): 1 — вимірювання авторів; 2 — КА «Space Shuttle», місія STS-41G [26]; 3 — дані роботи [23]; 4 — вимірювання на орбітальній станції «Мир» [1, 10]; 5 — робота [21]; 6 — розрахунки за програмою АТОМОХ [16]; 7 — вимірювання [18]; 8 — розрахунки авторів для $R_{ek} = 3.07 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО; 9 — вимірювання авторів; 10 — дані [11]; 11 — Lockheed FEP [15]; 12 — дані [20]; 13 — експеримент на ОС «Мир» [10]; 14 — розрахунки за програмою АТОМОХ [16]; 15 — вимірювання [5]; 16 — дані [22]; 17 — стендові вимірювання [19]; 18 — розрахунки авторів для $R_{ek} = 0.23 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО

пиленням $\Delta M_{kin}^{O^+ + O_2^+} \approx \Delta M_{kin}^{Ne^+}$ ($E_i \approx 30$ кеВ) і $\Delta M_{kin}^{O^+ + O_2^+} \approx \Delta M_{kin}^{N^+ + N_2^+}$ ($E_i \approx 80$ кеВ). Наведені на рис. 2 дані (точки 1, 5 ($O^+ + O_2^+$) і 2 (Ne^+) при $E_i \approx 30$ кеВ, а також точки 7 ($O^+ + O_2^+$) і 8 ($N^+ + N_2^+$) при $E_i \approx 80$ кеВ) свідчать, що при фіксованих значеннях флюенсів іонів $\Delta M_k^{O^+ + O_2^+} / \Delta M_{kin} \approx$

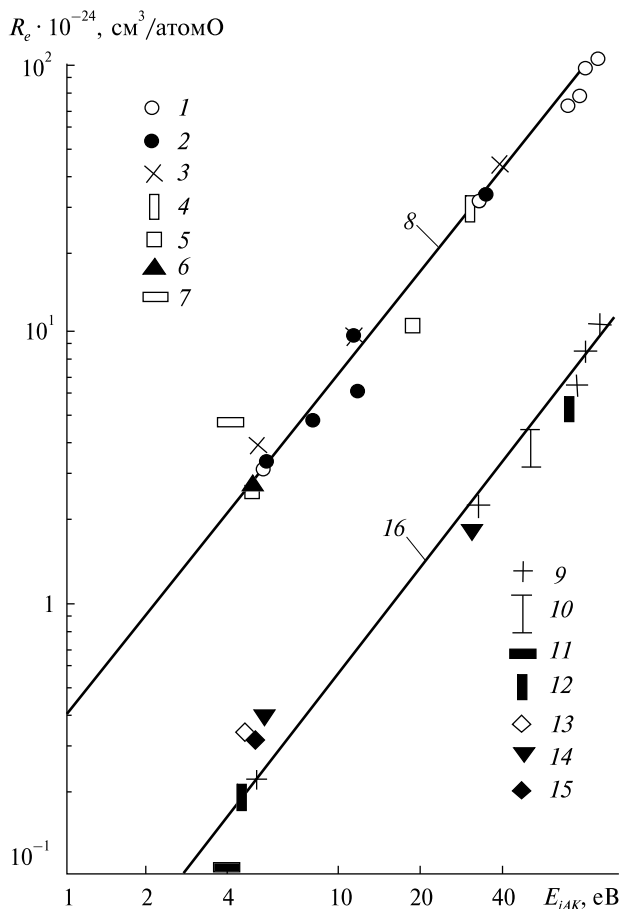


Рис. 4. Залежності від енергії іонів АК об'ємного коефіцієнта R_e втрати маси полімерів полімід kapton-H (1..8) і тефлон FEP-100A (9..16): 1 — вимірювання авторів у потоках іонів АК з енергіями $E_{iAK} \approx 5, 31.6, 70, 75, 80$ і 90 еВ; 2, 3, 5 — дані роботи [3]; 4 — [4], $E_{iAK} \approx 30$ еВ; 6 — ОС «Мир» [1, 10]; 7 — [5]; 8 — апроксимація авторів $R_{ek} = 0.4(\alpha_i; E_{iAK})^{1.268} \cdot 10^{-24}$ см³/атомО, де $\alpha_i \approx 1$ еВ⁻¹; 9 — вимірювання авторів; 10 — дані [18]; 11 — дані ЦАГІ [5]; 12 — [24]; 13 — [13]; 14 — ОС «Мир» [10]; 15 — вимірювання [24]; 16 — апроксимація авторів $R_{eFEP} \approx 0.3(\alpha_i; E_{iAK})^{1.268} \cdot 10^{-25}$ см³/атомО

$\approx 1 + (\Delta M_{chem}^{O^+ + O_2^+} / \Delta M_{kin}) > 10$. Втрати маси поліміду kapton-H за рахунок хімічного травлення АК практично на порядок вищі, ніж ΔM_{kin} , зумовлені кінетичним розпиленням.

На рис. 3 приведено залежності втрати маси полімерами kapton-H і тефлон FEP-100A від флюенса F_{AK} при енергії частинок $E_{AK} \approx 5$ еВ. При фіксованих значеннях флюенса F_{AK} для

втрати маси та товщини плівок мають місце співвідношення $\Delta M_{FEP} / \Delta M_k \approx \text{const}$ і $\delta x_{FEP} / \delta x_k \approx \text{const}$ (індекс «FEP» відповідає тефлону). Подібні співвідношення притаманні також іншим полімерним плівкам, які експлуатуються на КА, — ПМ-1Е, ПМ-А, поліетилен [3, 9].

Залежності об'ємного коефіцієнта втрати маси R_e поліміду картон-Н і тефлону FEP-100А від енергії іонів АК представлено на рис. 4. Для фіксованих значень флюенса F_{iAK} і енергії іонів АК мають місце співвідношення $\Delta R_{eFEP} / \Delta R_{ek} \approx \text{const}$ і $\Delta M_k / \Delta M_{FEP} \approx \text{const}$. Аналогічні дані при $E_{AK} \approx 5$ еВ (спутникові випробування) і $E_{iAK} \approx 20$ еВ (стендові випробування) для широкого ряду полімерів наведено в роботі [14]. Тобто, для фіксованих значень F_{iAK} і E_{iAK} поліміду картон-Н та інших полімерів мають місце співвідношення $\delta x_W(E_{iAK}) / \delta x_k(E_{iAK}) \approx \delta x_W(5\text{eV}) / \delta x_k(5\text{eV})$. Це дозволяє визначити величину об'ємного коефіцієнта втрати маси тестованого полімеру:

$$R_{eW}(5\text{eV}) = R_{ek}(5\text{eV}) \delta x_W(E_{iAK}) / \delta x_k(E_{iAK}) = R_{ek}(5\text{eV}) \Delta M_{WPk} / \Delta M_{kPW}.$$

Прискорені ресурсні випробування полімерних конструкційних матеріалів КА при опромінюванні високоенергійними іонами АК характеризуються параметрами: об'ємний коефіцієнт втрати маси R_{eW} і флюенс $F_{AK}^{(N)}$ для умов тривалої експлуатації полімеру в іоносфері Землі при енергіях атомів кисню $F_{AK}^{(N)} \approx 5$ еВ.

Процедура визначення $R_{eW}(E_{AK}^{(N)} \approx 5\text{eV})$ і $F_{AK}^{(N)}(E_{AK}^{(N)})$ включає декілька послідовних операцій:

1) за результатами вимірювань на стенді у потоці іонів АК з енергією E_{iAK} і флюенсом $F_{iAK}(E_{iAK})$ визначається частка втрати маси $\Delta M_W(E_{iAK}, F_{iAK})$ полімеру або відповідне зменшення товщини плівки $\delta x_W(E_{iAK}, F_{iAK})$;

2) величина об'ємного коефіцієнта втрати маси полімеру обчислюється за формулою

$$R_{eW}(E_{iAK}) = \delta x_W(E_{iAK}) / F_{iAK}(E_{iAK});$$

3) для об'ємного коефіцієнта втрати маси еталонного полімеру картон-Н використовується співвідношення

$$R_{ek}(E_{iAK}) = 0.4(\alpha_i E_{iAK})^{1.268} \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО};$$

4) при фіксованому F_{iAK} флюенсі

$$(\delta x_W(E_{iAK}) / \delta x_k(E_{iAK})) = R_{eW}(E_{iAK}) / R_{ek}(E_{iAK}) = \text{const}$$

величина об'ємного коефіцієнта втрати маси визначиться з формули

$$R_{eW}(5\text{eV}) = R_{ek}(E_{AK}^{(N)} = 5\text{eV}) R_{eW}(E_{iAK}) / R_{ek}(E_{iAK}),$$

а флюенс АК — із співвідношення

$$F_{AK}^{(N)}(E_{AK}^{(N)}) = (R_{ek}(E_{iAK}) / R_{ek}(E_{AK}^{(N)})) \cdot F_{iAK}(E_{iAK}).$$

При стендових випробуваннях $E_{iAK} = 80$ еВ, $N_{iAK} \approx 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$, час експозиції полімеру у потоці плазми АК $t_M^{(M)} \approx 3$ год = $1.08 \cdot 10^4$ с, флюенс $F_{AK}^{(M)}(E_{AK}^{(M)}) = 1.34 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$, маємо

$$R_{ek}(E_{AK}^{(M)}) \approx 1.04 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3/\text{атомО},$$

$$F_{AK}^{(N)}(E_{AK}^{(N)}) \approx 4.5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}.$$

В іоносфері при $E_{AK}^{(N)} = 5$ еВ і середньому рівні сонячної активності флюенс $F_{AK}^{(N)} = 4.5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ відповідає річній експозиції полімеру на висоті $h \approx 380$ км (МКС). Коефіцієнт прискорення при проведенні стендових випробувань поліміду картон-Н в режимі «2» становить $k_{2y} \approx 3000$, а при опромінюванні полімеру потоком АК з енергією іонів $E_{iAK} = 5$ еВ в режимі «1» — $k_{1y} \approx 20$.

ВИСНОВКИ

Розроблено процедуру прискорених ресурсних випробувань полімерних матеріалів КА на стійкість до тривалої дії атомарного кисню при їхній експлуатації в іоносфері Землі. Процедuru можна реалізувати у двох режимах: перший включає опромінювання полімерних плівок іонами АК з енергією 5 еВ при концентрації іонів, більшій, ніж концентрація АК в іоносфері; другий — при опромінюванні полімерів високоенергійними (30...80 еВ) іонами АК і використанні поліміду картон-Н як еталонний матеріал. Показано, що коефіцієнт прискорення ресурсних випробувань при опромінюванні поліміду картон-Н іонами АК з енергіями 30...80 еВ на два порядки більший, ніж коефіцієнт прискорення при

опромінюванні полімеру іонами АК з енергією 5 еВ. Умовою еквівалентності експлуатації полімерних матеріалів КА в іоносфері і прискорених випробувань на стенді прийнято вимогу рівності втрати маси полімеру. Для обґрунтуван-

ня процедури прискорення ресурсних випробувань використовуються залежності втрати маси і об'ємного коефіцієнта втрати маси від флюенса та енергії іонів АК полімерів картон-Н і тефлон FEP-100А.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ананьева О. А., Милинчук В. Н., Загорский В. К. Исследование односторонних алюминированных полиимидных пленок, экспонированных на орбитальной космической станции «Мир». *Химия высоких энергий*. 2007. **41**, № 6. С. 445—452.
2. Войценья В. С., Гужова С. К., Титов В. И. *Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы*. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 224 с.
3. Гужова С. К., Новиков Л. С., Черник В. Н., Скурат В. Е. *Модель космоса: Научно-информационное издание*: В 2 т. Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. Москва: КДУ, 2007. Том 2. С. 171.
4. *Наукоемкие технологии в технике: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов*. В 24 т. Под. ред. К. С. Касаева. Москва: ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ, 2000. Том 17.
5. Никифоров А. П., Терновой А. Н., Самсонов П. В., Скурат В. Е. Проблемы изучения механизма взаимодействия вакуумного УФ-излучения и гипертермического атомарного кислорода (5 эВ) материалами космических летательных аппаратов. *Хим. физика*. 2002. **21**, № 5. С. 73—82.
6. Хилд М., Уортон С. *Микроволновая диагностика плазмы*. Москва: Атомиздат, 1968. 392 с.
7. Шувалов В. А., Горев Н. Б., Токмак Н. А., Письменный Н. И., Осинский Г. А. Динамическое воздействие плазменной струи на объект «космического мусора». *Космічна наука і технологія*. 2017. **23**, № 1. С. 36—49.
8. Шувалов В. А., Письменный Н. И., Приймак А. И., Кочубей Г. С. Зондовая диагностика высокоскоростных потоков разреженной частично диссоциированной плазмы. *Приборы и техн. эксперимента*. 2007. **50**, № 3. С. 92—100.
9. Шувалов В. А., Токмак Н. А., Резниченко Н. П. Деградація полімерних плінок КА при довготривалому впливі потоків атомарного кисню та вакуумного ультрафіолетового випромінювання. *Космічна наука і технологія*. 2015. **21**, № 5. С. 56—68.
10. Allegri G, Corradi S., Marchetti M., Milinchuk V.K. On the degradation of Polymeric Thin Films in LEO. *Proc. 9th ISMSE, ESA, SP-540*. Netherlands: Noordwijk, 2003. P. 255.
11. Banks V. A., Backus J. A., Manno M. V., Waters D. L., Cameron K. C., De Groh K. K. Prediction of atomic oxygen erosion yield for spacecraft polym. *J. Spacecraft and Rockets*. 2011. **48**, № 1. P. 14—22.
12. Banks V. A., Waters D. L., Thorson S. F., De Groh K. K., Snyder A. Miller S. *Comparison of atomic oxygen erosion yields of materials at various energies and impact angles*. Proc. 10th ISMSE and 8th ICPMSE. 2006. Colliure. France. ESA. SP-616. 7 p.
13. Cazaubon B., Paillous A., Siffre J., Thomas R. Mass spectrometric analysis of reaction products of fast oxygen atom. *J. Spacecraft and Rockets*. 1998. **35**, № 6. P. 797—803.
14. Chernik V. N., Novikov L. S., Akiskin A. I. *About adequacy of ground-based tests of polymers at higher atomic oxygen energy (20—30eV)*. Proc. 10th ISMSE and 8th ICPMSE. Collionre. France. 2006. P. 127—131.
15. De Groh K., Smith D. C. *Investigation FEP embrittlement on spacecraft in low orbit*. Proc. 7th intern. Symp on Materials in Environment ESA. SP-390. Toulouse. Proc. 7th ISME ESA. SP-390. Toulouse, France. 1997. Noordwijk: ESTEC, 1997. **2997**. P. 255—266.
16. *ECSS-E-10-04A*. Space Engineering: Space Environment. Noordwijk: ESTRC, 2000.
17. Gonzalez R. I., Tomczac S. J., Milton T. K., Garton D. G. *Synthesis and atomic oxygen erosion testing of space-subvivable pass (polyhedral oligometric silsesquioxane)*. Proc. 9th ISMSE. Noordwijk: ESTEC, 2003. P. 113—117.
18. Grossman E., Gouzman I. Space environment effects on polymers in low Earth orbit. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.* 2003. **B208**. P. 48—57.
19. Grossman E., Gouzman I., Lempert G., Noter Y., Lifshitz Y. Assessment of atomic oxygen flux in low Earth orbit ground simulation facilities. *J. Spacecraft and Rockets*. 2004. **41**, № 3. P. 356—368.
20. Miller S., Banks V., Waters D. *Investigation into the differences in atomic oxygen erosion yields of materials in ground based facilities compared to those in LEO*. Proc. 10th ISMSE and 8th ICPMSE. Colliure. France. Noordwijk: ESTEC, 2006. P. 120—126.

21. Pippin H. G. *Final report of analysis of Boeing specimens from on the effects of space environment on materials experiment*. Appendix B. Hampton: NASA Langley Research Center. VA 23681–2199, 2008.
22. Reddy M. R. Review effect on Low Earth orbit atomic oxygen on spacecraft materials. *J. Mater. Sci.*, 1995. **2**. P. 281–307.
23. Tagawa M., Yokota K. Atomic oxygen-induced polymer degradation phenomena in simulated LEO space environment: How do polymers react in a complication space environment. *Acta Astronautica*. 2008. **62**, № 2-3. P. 203–210.
24. Vered R., Lempert G.D., Grossman E., Haruvy Y., Marom G., Singer G. et. al. *Atomic oxygen erosion of teflon FEP and kapton-H by oxygen from different sources: atomic force microscopy and complementary studies*. Proc. 6th ISMSE. ESA. Noordwijk, Netherlands, 1994. P. 175–181.
25. Yokota K., Tagawa M. Comparison polyethylene and polyimides as a fluency monitor of atomic oxygen. *J. Spacecraft and Rockets*. 2007. **4**, № 2. P. 434–435.
26. Zimcik D. G., Maag C. R. Result of apparent atomic reactions with spacecraft material during Space Shuttle flight STS-416. *J. Spacecraft and Rockets*. 1988. **25**, № 2. P. 162–168.

Стаття надійшла до редакції 14.09.2020

REFERENCES

1. Anan'eva O. A., Milinchuk V. K., Zagorskii D. L. (2007). Study of one-side aluminized polyimide films exposed on the Mir orbital space station. *High Energy Chemistry*, **41**(6), 389–395.
2. Voitsenya V. S., Guzhova S. K., Titov V. I. (1991). *Influence of low-temperature plasma and electromagnetic radiation on materials*. Moscow: Energoatomizdat, 224 p.
3. Guzhova S. K., Novikov L. S., Chernik V. N., Skurat V. E. (2007). *Model of Space: Scientific information publication*. Ed. by M. I. Panasyuk, L. S. Novikov. Moscow: KDU. Vol. 2. 171 p.
4. *Science-intensive technologies in technics: The impact of the space environment on the materials and equipment of spacecraft*. (2000). Ed. by K. S. Kasaev. Moscow: CJSC NII ENCITEH. Vol. 17
5. Nikiforov A. P., Ternovoy A. N., Samsonov P. V., Skurat V. E. (2002). Problems of studying the mechanism of interaction between vacuum UV radiation and hyperthermic atomic oxygen (5 eV) with spacecraft materials. *Khimicheskaya fizika*, **21**(5), 73–82.
6. Heald M. A., Wharton C. B. (1966). *Plasma diagnostics with microwaves*. N.Y., London, Sydney: John Wiley and Sons Inc., 452 p.
7. Shuvalov V. A., Gorev N. B., Tokmak N. A., Pismennyi N. I., Osinovy G. G. (2017). Dynamic effect of a plasma beam on a space debris object. *Space Science and Technology*, **23**(1), 36–49.
8. Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Priimak A. I., Kochubey G. S. (2007). A probe diagnostics for high-speed flows of rarefied partially dissociated plasma. *Instrum. and Experimental Techniques*, **50**(3), 370–378.
9. Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Reznichenko N. P. (2015). Degradation of spacecraft polymer films on long exposure to atomic oxygen flows and vacuum ultraviolet radiation. *Space Science and Technology*, **21**(5), 56–68.
10. Allegri G., Corradi S., Marchetti M., Milinchuk V. K. (2003). *On the degradation of Polymeric Thin Films in LEO*. Proc. 9th ISMSE, ESA, SP-540. Netherlands. Noordwijk.
11. Banks B. A., Backus J. A., Manno M. V., Waters D. L., Cameron K. C., De Groh K. K. (2011). Prediction of atomic oxygen erosion yield for spacecraft polym. *J. Spacecraft and Rockets*, **48**(1), 14–22.
12. Banks B. A., Waters D. L., Thorson S. F., De Groh K. K., Snyder A. Miller S. (2006). *Comparison of atomic oxygen erosion yields of materials at various energies and impact angles*. Proc. 10th Intern. Symp. on Materials in Environment ESA and 8th ICPMSE, SP-616.
13. Cazanbon B., Paillous A., Siffre J., Thomas R. (1998). Mass spectrometric analysis of reaction products of fast oxygen atom. *J. Spacecraft and Rockets*, **35**(6), 797–803.
14. Chernik V. N., Novikov L. S., Akiskin A. I. (2006). *About adequacy of ground-based tests of polymers at higher atomic oxygen energy (20–30 eV)*. Proc. 10th Intern. Symp. on Materials in Environment ESA and 8th ICPMSE, 127–131.
15. De Groh K., Smith D. C. (1997). *Investigation FEP embrittlement on spacecraft in low orbit*. Proc. 7th Intern. Symp. on Materials in Environment ESA, SP-390, **2997**, 255–266.
16. *ECSS-E-10-04A*. (2000). Space Engineering: Space Environment, Noordwijk. ESTRC.
17. Gonzalez R. I., Tomczac S. J., Milton T. K., Garton D. G. (2003). *Synthesis and atomic oxygen erosion testing of space-subvivable pass (polyhedral oligometric silsesquioxane)*. Proc. 9th Intern. Symp. on Materials in Environment ESA, 113–117
18. Grossman E., Gouzman I. (2003). Space environment effects on polymers in low Earth orbit. *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.*, **B208**, 48–57.
19. Grossman E., Gouzman I., Lempert G., Noter Y., Lifshitz Y. (2004). Assessment of atomic oxygen flux in low Earth orbit ground simulation facilities. *J. Spacecraft and Rockets*, **41**(3), 356–368.

20. Miller S., Banks B., Waters D. (2006). *Investigation into the differences in atomic oxygen erosion yields of materials in ground based facilities compared to those in LEO*. Proc. 10th ISMSE and 8th ICPMSE. Collioure. France. Noordwijk: ESTEC, 120—126.
21. Pippin H. G. (2008). Final report of analysis of Boeing specimens from on the effects of space environment on materials experiment. Appendix B. Hampton: NASA Langley Research Center. VA 23681—2199.
22. Reddy M. R. (1995). Review effect on Low Earth orbit atomic oxygen on spacecraft materials. *J. Mater. Sci.*, **2**, 281—307.
23. Tagawa M., Yokota K. (2008). Atomic oxygen-induced polymer degradation phenomena in simulated LEO space environment: How do polymers react in a complication space environment. *Acta Astronautica*, **62**(2-3), 203—210.
24. Vered R., Lempert G. D., Grossman E., Haruvy Y., Marom G., Singer G., et. al. (1994). *Atomic oxygen erosion of teflon FEP and kapton-H by oxygen from different sources: atomic force microscopy and complementary studies*. Proc. 6th ISMSE. ESA, 175—181.
25. Yokota K., Tagawa M. (2007). Comparison polyethylene and polyimides as a fluency monitor of atomic oxygen. *J. Spacecraft and Rockets*, **4**(2), 434—435.
26. Zimcik D. G., Maag C. R. (1988). Result of apparent atomic reactions with spacecraft material during Space Shuttle flight STS-416. *J. Spacecraft and Rockets*, **25**(2), 162—168.

Received 14.09.2020

V. A. Shuvalov, Head of Department, Dr.Sci. in Tech., Prof.,
Winner of State Awards of Ukraine, Winner of M. K. Yangel Awards of NAS of Ukraine
E-mail: vashuvalov@ukr.net
S. N. Kulagin, Senior Researcher, Ph.D. in Tech.
E-mail: kulagin@vash.dp.ua
D. N. Lazuchenkov, Senior Researcher, Ph.D. in Phys.&Math.
E-mail: lazuch@ukr.net

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine
and the State Space Agency of Ukraine
15 Leshko-Popelya Str., Dnipro, 49005 Ukraine

ACCELERATION OF RESOURCE TESTS OF SPACECRAFT POLYMERS FOR RESISTANCE TO LONG-TERM INFLUENCE OF ATOMIC OXYGEN IN THE EARTH'S IONOSPHERE

The procedure of accelerated resource tests of spacecraft polymers for their resistance to the long-term influence of atomic oxygen (AO) in the Earth's ionosphere at altitudes from 200 to 700 km has been developed. The procedure involves irradiation of polymers with high-energy ions of atomic oxygen and the use of a kapton-H polyimide as reference material. The condition of equivalence of the “atomic oxygen — polymer” interaction in the ionosphere and on the laboratory set is the equality of tested material mass loss. The basis for substantiating the procedure of accelerated tests is the result: when irradiating the kapton-H polymer with high-energy atomic oxygen ions in the energy range from 30 to 80 eV, the degradation of polyimide is determined by the process of chemical etching of the material. To substantiate the procedure of accelerating resource tests of polymeric structural materials of spacecraft for resistance to long-term action of atomic oxygen flows, the dependences of mass loss and volumetric mass loss factor (reactivity) of kapton-H polyimide and Teflon FEP-100A on fluence and energy of the atomic oxygen ions have been obtained. It is shown that when irradiating kapton-H polyimide with atomic oxygen ions with the energy of 30 to 80 eV, the material mass loss due to chemical etching is about an order of magnitude greater than the mass loss due to kinetic sputtering. When the kapton-H polymer is irradiated with high-energy atomic oxygen ions, the coefficient of acceleration of the resource tests and the fluence of atomic oxygen are about two orders of magnitude greater than the coefficient of acceleration obtained using atomic oxygen ions with an energy of 5 eV.

Keywords: spacecraft, polymeric structural materials, ionospheric plasma, atomic oxygen flow, accelerated test.