

<https://doi.org/10.15407/knit2024.02.054>  
УДК 533.95

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

ORCID: 0000-0002-6640-6041

E-mail: vashuvalov@ukr.net, Shuvalov.V.O@nas.gov.ua

**М. І. ПИСЬМЕННИЙ**, наук. співроб.

ORCID: 0000-0002-3287-8745

E-mail: pismennnyi.m.i@nas.gov.ua

**М. А. ТОКМАК**, наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-9525-4545

E-mail: Tokmak.m.a@nas.gov.ua

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

ORCID: 0000-0002-2862-5809

E-mail: Kulahin.S.M@nas.gov.ua

**М. П. РІЗНИЧЕНКО**, мол. наук. співроб.

ORCID: 0000-0001-6151-4089

E-mail: Riznychenko.M.P@nas.gov.ua

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

## МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІМЕРІВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ З АТОМАРНИМ КИСНЕМ НА НИЗЬКИХ НАВКОЛОЗЕМНИХ ОРБИТАХ

---

*Розроблено процедури моделювання взаємодії полімерів — конструкційних матеріалів космічних апаратів — з гіпертепловими потоками атомарного кисню (АК) на дуже низьких орбітах із застосуванням потоків високоенергетичних іонів розрідженої плазми. За результатами стендових і супутникових експериментів (орбітальна станція «Мир», МКС, КА «Spot-1, -2, -4», «Space Shuttle») визначено параметри, які характеризують фізико-хімічну та динамічну взаємодію потоків атомарного кисню з конструкційними полімерами космічних апаратів, такі як коефіцієнти ерозії, поглинання сонячного випромінювання, акомодатії імпульсу і енергії, а також глибина ерозії і шорсткість поверхні полімерної плівки. Отримано залежності параметрів взаємодії в системі «АК — полімер» від енергії і флюенсу іонів АК. Показано, що застосування потоків іонів АК з енергіями 30...100 еВ дозволяє моделювати взаємодію гіпертеплових потоків АК з полімерами на висотах 170...300 км при високих флюенсах АК в атмосфері Землі.*

**Ключові слова:** полімер, флюенс, глибина ерозії, шорсткість, потік атомарного кисню, коефіцієнти передачі імпульсу та енергії.

---

Цитування: Шувалов В. О., Письменний М. І., Токмак М. А., Кулагін С. М., Різниченко М. П. Моделювання взаємодії полімерів космічних апаратів з атомарним киснем на низьких навколоземних орбітах. *Космічна наука і технологія*. 2024. 30, № 2 (147). С. 54—68. <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.054>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Полімери широко використовуються як конструкційні матеріали космічних апаратів (КА): для покриття зовнішніх поверхонь, обшивки сонячних батарей, як компоненти екранно-вакуумної теплоізоляції тощо. Навколосупутникове середовище на висотах 200...700 км є агресивним до полімерів КА. На навколосеземних орбітах зміна фізичних, хімічних, термооптичних і механічних властивостей матеріалів зумовлена впливом частково іонізованої плазми атомарно-молекулярного кисню. Експозиція полімерних матеріалів на орбітальних станціях МКС, «Мир», КА «Space Shuttle», «Spot-1», «Spot-2», «Spot-4» та ін. [1, 18, 20, 32] показала, що коефіцієнти розпилення матеріалу та глибина ерозії пропорційні флюенсу АК. З'явився термін «поліімідний еквівалентний флюенс АК», як еталон прийнято поліімід картоп-Н.

На висотах 200...700 км АК ступінь іонізації змінюється від  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  [16]. Фізико-хімічний вплив АК на полімери в атмосфері Землі характеризують взаємозалежні процеси обміну енергією та зарядом між частками навколишнього середовища і поверхнею матеріалу, зокрема хімічні реакції в адсорбованому і поверхневому шарах. Позитивні іони АК з енергією 5...10 еВ виконують роль радіаційного хімічного активатора поверхні полімерного матеріалу. Природа такого впливу пов'язана з нейтралізацією іонів, що призводить до порушень електронно-дірочних пар у напівпровідниках і діелектриках, які зберігаються досить довго у поверхневому шарі товщиною порядку 10 атомарних моношарів.

Дослідження кінетики процесу взаємодії плазми атомарно-молекулярного кисню з поліімідом картоп-Н [16] свідчать про те, що молекулярний кисень інертний, і участі у хімічних реакціях не бере. Визначальним є процес окисної деструкції полімерів за участю АК. Співвідношення швидкостей газовиділення продуктів хімічного травлення CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O і H<sub>2</sub> залишається постійним, і в діапазоні 290...400 К не залежить від температури матеріалу і параметрів плазми: склад частинок, які хімічно взаємодіють із полімерною плівкою, не змінюється. Механізм руйнування полімерів КА пов'язаний, як мінімум, із двома видами впливу: фізичним розпиленням і хімічним трав-

ленням. Наслідком впливу АК на полімер є: розпилення матеріалу, зміна рельєфу, термооптичних і фізико-механічних властивостей поверхні. Зміни рельєфу, ступеня шорсткості поверхні полімеру впливають і на процеси передачі імпульсу та енергії газових компонентів атмосфери Землі матеріалам зовнішніх поверхонь і покриттів КА.

Проблема забезпечення тривалої експлуатації КА безпосередньо пов'язана із проблемою забезпечення стійкості полімерів до впливу потоків АК з енергією порядку 5 еВ в атмосфері Землі. Інформацію про зміну властивостей полімерів КА при тривалій експлуатації в атмосфері Землі можна отримати тільки експериментально — за результатами льотних або стендових випробувань. Одним із шляхів розв'язання задачі прогнозування деградації полімерів КА при впливі АК в атмосфері Землі є фізичне моделювання або імітація взаємодії потоків АК з полімерними матеріалами на спеціалізованих стендах. При розробці захисних покриттів, які зміцнюють полімери КА, при тестуванні і відборі максимально стійких до впливу гіпертеплових потоків АК полімерів (в яких енергія спрямованого руху часток перевершує теплову складову енергії; для атомарного кисню в атмосфері Землі теплова енергія становить 0.12 еВ, енергія спрямованого руху атомарного кисню відносно космічних апаратів — 4.5 еВ) як еталонний матеріал використовується поліімід картоп-Н та його аналоги. Точність інтерпретації льотних і стендових випробувань полімерів КА значною мірою залежить від повноти інформації про деградацію властивостей еталонного поліімиду при впливі потоків АК, а для умов дуже низьких орбіт (VLEO) — при високих флюенсах АК.

Умовам експлуатації полімерів на висотах 200...700 км при середньому рівні сонячної активності відповідають такі значення параметрів АК [9, 20]:

- енергія напрямленого руху частинок  $E_{AK} = 4.7...5.0$  еВ (на круговій орбіті швидкість КА  $U_{KA} = 7.5...7.8$  км/с);
- теплова енергія атомів кисню 0.12 еВ;
- концентрація атомів  $N_{AK} = 10^6...4 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>;
- потік частинок  $\Phi_{AK} = N_{AK} \times U_{KA} = 8 \cdot 10^{11}...3 \cdot 10^{15}$  атомівО/(см<sup>2</sup>с);

• флюенс  $F_{AK} = N_{AK} \cdot U_{KA} \cdot t = 2.5 \cdot 10^{19} \dots 9 \cdot 10^{22}$  атомівО/см<sup>2</sup> ( $t = 1$  рік — час експлуатації КА).

На спеціалізованих стендах генератори АК (лазерна детонація, електронно-циклотронний резонанс, високочастотний розряд тощо) синтезують імпульсні і стаціонарні потоки атомів з енергією частинок  $E_{AK} = 5 \dots 10$  еВ і  $\Phi_{AK} = 10^{15} \dots 10^{16}$  атомівО/(см<sup>2</sup>с) [14, 22, 26, 30]. Натурні дослідження [1, 10, 12, 15, 18, 20, 32] показали, що хімічна деструкція полімерів триває протягом усього часу перебування КА на орбіті. Швидкість деградації носить нелінійний характер.

Стендові дослідження деградації полімерів при тривалій взаємодії з АК повинні відповідати часу експлуатації і високим флюенсам АК, наприклад, на дуже низьких орбітах (VLEO)  $F_{AK} = 10^{21} \dots 10^{23}$  атомівО/см<sup>2</sup>. Реалізація таких умов в імпульсних і стаціонарних потоках АК при  $E_{AK} \approx 5$  еВ на спеціалізованих стендах стикається з ускладненнями. Для розв'язання задачі фізичного моделювання тривалої взаємодії полімерів з АК в атмосфері Землі і прискорення стендових ресурсних випробувань полімерних матеріалів КА автори вивчили особливості застосування режимів опромінювання полімерів потоками плазми атомарно-молекулярного кисню із концентрацією  $N_{iAK} = 10^9 \dots 10^{10}$  іонО/см<sup>3</sup> при енергіях  $E_{iAK} \approx 5$  еВ і потоками плазми з енергією  $E_{iAK} = 30 \dots 80$  еВ і  $\Phi_{iAK} \geq 10^{16}$  іонО/см<sup>2</sup>с, а також полііміду kapton-Н як еталонний матеріал.

Опромінювання полііміду kapton-Н високоенергійними іонами АК вимагає дослідження залежності коефіцієнта ерозії полііміду  $R_e(E_{iAK})$  від енергії іонів АК, а також внеску кінетичної і хімічної складових впливу іонів АК на руйнування полімеру. Згідно з даними [2, 5] при опроміненні вуглецю і вуглецьвмісних полімерів (наприклад, полііміду kapton-Н  $C_{22}H_{10}O_5N_2$  і його аналогів) іонами АК з енергією  $E_{iAK} \leq 200$  еВ домінує механізм хімічного травлення, що формує структуру поверхні матеріалу. Цей механізм і визначає вибір відомих і широко застосовуваних параметрів, які характеризують деградацію полімерів КА під впливом АК в атмосфері Землі: глибина ерозії  $\Delta x_w$ , об'ємний коефіцієнт ерозії (реакційна ефективність)  $R_e$  і флюенс  $F_{iAK}$ .

Застосування полііміду kapton-Н як еталонного матеріалу, в свою чергу, зумовило необхідність визначення більш повного, ніж дотепер, комплексу параметрів, які характеризують деградацію масогабаритних і термооптичних властивостей полііміду, а також параметрів, що характеризують аеродинамічну взаємодію в системі «АК — поліілід», зокрема коефіцієнтів передачі імпульсу та енергії іонів АК поверхні полімеру і їхньої залежності від флюенсу АК, орієнтації елемента поверхні відносно вектора швидкості потоку, що набігає.

## 2. УМОВИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВАЛОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ КА З ГІПЕРТЕПЛОВИМИ ПОТОКАМИ АТОМАРНОГО КИСНЮ

За критерій еквівалентності при фізичному моделюванні тривалого впливу високошвидкісних потоків АК прийнято умову рівності втрати маси  $\Delta M_w$  або зміни глибини  $\Delta x_w$  ерозії полімерної плівки при експозиції її в атмосфері Землі та на спеціалізованому стенді:

$$\Delta M_w^{(N)} = \Delta M_w^{(M)} \text{ або } \Delta x_w^{(N)} = \Delta x_w^{(M)}. \quad (1)$$

Тут індекс « $N$ » відповідає натурним умовам в атмосфері Землі, « $M$ » — умовам стендових випробувань, « $W$ » — полімер, який підлягає тестуванню. Через те що  $\Delta M_w = \rho_w R_e F_{AK} = \rho_w \Delta x_w$  ( $\rho_w$  і  $R_e$  — щільність і коефіцієнт ерозії тестованого матеріалу), то з виразу (1) випливає вираз для зв'язку між параметрами, що характеризують умови експлуатації матеріалів у атмосфері Землі, з їхніми значеннями при тестуванні зразка матеріалу на стенді:

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

де  $E_{AK}^{(N)}$  — енергія АК в атмосфері Землі,  $E_{iAK}^{(M)}$  — енергія іонів АК у потоці плазми атомарно-молекулярного кисню на стенді.

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

$$K_{\text{прс}} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = \frac{N_{iAK}^{(M)}}{N_{iAK}^{(N)}} \cdot \left( \frac{E_{iAK}^{(M)}}{E_{iAK}^{(N)}} \right)^{0.5} \cdot \frac{R_{ew}(E_{iAK}^{(M)})}{R_{ew}(E_{iAK}^{(N)})}. \quad (3)$$

При фізичному моделюванні взаємодії в системі «АК — полімер» можна реалізувати два режими випробувань:

1.  $E_{iAK}^{(M)} = E_{AK}^{(N)} = 5 \text{ eV}$  і  $R_{eW}(E_{iAK}^{(M)}) = R_{eW}(E_{AK}^{(N)})$ ,  
тоді

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

2.  $E_{iAK}^{(M)} > E_{AK}^{(N)}$  і  $R_{eW}(E_{iAK}^{(M)}) > R_{eW}(E_{AK}^{(N)})$ ,  
тоді

$$K_{\text{прс}}^{(2)} = \frac{t^{(N)}}{t^{(M)}} = K_{\text{прс}}^{(1)} \cdot \xi, \quad (5)$$

де

$$\xi = \left( \frac{E_{iAK}^{(M)}}{E_{AK}^{(N)}} \right)^{0.5} \cdot \frac{R_{eW}(E_{iAK}^{(M)})}{R_{eW}(E_{AK}^{(N)})} \gg 1.$$

З виразів (4), (5) випливає  $K_{\text{прс}}^{(2)} \gg K_{\text{прс}}^{(1)}$ , тобто процес випробувань «прискорюється» пропорційно множнику  $\xi$ . При стендових випробуваннях полімерного матеріалу за результатами вимірювань втрати маси  $\Delta M_w(E_{iAK}^{(M)})$  і (або) глибини ерозії  $\Delta x_w(E_{iAK}^{(M)})$  для відомих значень параметрів, які характеризують умови тестування  $F_{iAK}^{(M)}$ ,  $E_{iAK}^{(M)}$ ,  $t^{(M)}$ , обчислюється коефіцієнт ерозії 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 значень параметрів  $F_{AK}(E_{AK}^{(N)})$  і  $R_{ek}(E_{AK}^{(N)})$ , що характеризують умови експлуатації матеріалу в атмосфері, використовується поліілід картоп-Н як еталонний матеріал. З відношення  $\Delta M_w / \Delta M_k = \rho_w R_{eW} F_w / \rho_k R_{ek} F_k = \rho_w \Delta x_w / \rho_k \Delta x_k$  випливає

$$R_{eW}(E_{iAK}^{(M)}) = R_{ek}(E_{iAK}^{(M)}) \cdot \frac{\Delta x_w(E_{iAK}^{(M)})}{\Delta x_k(E_{iAK}^{(M)})} \cdot \frac{F_w(E_{iAK}^{(M)})}{F_k(E_{iAK}^{(M)})}, \quad (7)$$

де індекс « $k$ » — поліілід картоп-Н.

Для фіксованих значень флюенсу АК співвідношення (7) запишеться у вигляді

$$R_{eW}(E_{AK}^{(N)}) = R_{ek}(E_{AK}^{(N)}) \cdot \frac{\Delta x_w(E_{iAK}^{(M)})}{\Delta x_k(E_{iAK}^{(M)})}. \quad (8)$$

Величина флюенсу  $F_{AK}(E_{AK}^{(N)})$  для умов експлуатації полімеру, що тестується в атмосфері, відповідно до умов стендових випробувань, визначиться після підстановки  $R_{eW}(E_{iAK}^{(M)})$  і  $R_{ek}(E_{AK}^{(N)})$  з (6), (8) у вираз (2).

Область припустимих навантажень при прискорених випробуваннях визначається з умов  $\Phi_{AK}^{(N)} \leq \Phi_{AK}^{(M)} \leq \Phi_{AK}^{(\max)}$  для щільності потоку АК. При фізичному моделюванні тривалої взаємодії

потоку АК з матеріалами КА ця умова відповідає вимозі, щоб процеси на поверхні тестованого матеріалу ініціювалися лише одним співударенням частинок і не перекривалися в часі. На стенді для концентрації частинок і щільності потоку повинні виконуватися умови  $N_{AK}^{(M)} \leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$  і  $\Phi_{AK}^{(M)} \leq 10^{18} \text{ атомО/см}^2\text{с}$ . Ці умови є прийнятними для більшості матеріалів КА: для полімерів  $\Phi_{AK}^{(\max)} \leq 10^{20} \text{ атомО/см}^2\text{с}$ ; для металів —  $\Phi_{AK}^{(\max)} \leq 10^{27} \text{ атомО/см}^2\text{с}$ .

### 3. ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

**3.1. Стенд. Зразки матеріалів.** Експериментальні дослідження провадилися на плазмоелектродинамічному стенді Інституту технічної механіки НАН України, що має статус «науковий об'єкт — національне надбання України». Стенд належить до класу плазмових газодинамічних труб. Безмасляна система відкачування продуктивністю за повітрям до  $50 \text{ м}^3/\text{с}$  (вакуумний електроорзрядний агрегат і система турбомолекулярних насосів), наявність кріопанелей, які охолоджуються рідким азотом, дають можливість створювати у вакуумній камері стенда — циліндрі діаметром 1.2 м і довжиною 3.5 м — статичне розрідження  $10^{-5} \text{ Па}$ , а при натіканні газу —  $10^{-3} \text{ Па}$ .

Зразки тестових матеріалів і діагностичні засоби стенда розміщено на рухливих платформах (верхній та нижній) із чотирма ступенями свободи кожна. Платформи забезпечують кутові і поздовжні переміщення в горизонтальній площині, переміщення у вертикальній площині та обертання навколо вертикальної осі. Точність відліку для лінійних переміщень становить 0.5 мм, для кутових — 0.5°. Під час експерименту зразки матеріалів, які тестуються, і діагностичні зонди можуть переміщатися практично у будь-яку точку потоку плазми і об'єму вакуумної камери стенда. Як зразки матеріалів використовувалися полімерні плівки полііміду картоп-Н ( $\text{C}_{22}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{N}_2$ , об'ємна щільність  $\rho_w \approx 1.42 \text{ г/см}^3$ ) товщиною  $x_w \approx 50.7 \text{ мкм}$ . Зразки виготовлено у вигляді дисків діаметром 50 мм; діаметр поверхні плівки, що опромінюється, становить 45 мм. Зразки полімерів розміщено на підкладці з алюміній-магнієвого сплаву АМг-6М товщиною 3 мм, який виконує роль термостата. Діаметр



робочої зони струменя на відстані 60 см від зрізу джерела плазми дорівнює 20 см. Робоча зона струменя плазми — область із рівномірним розподілом концентрації, швидкості АК і зовнішнього магнітного поля. Вимірювання і контроль температури плівки і підкладки здійснювалися мініатюрними термopарами діаметром 0.1 мм і пірометром GM1500 у діапазоні температур  $243 \leq T_w \leq 1773$  К з похибкою 1.5 %. У ході експериментів температура плівки при нормальних кутах опромінювання ( $\theta \approx 0 \dots 10^\circ$ ) іонами плазми не перевищувала 340 К, а при ковзних кутах опромінювання ( $\theta \geq 60^\circ$ ) — 315 К, де  $\theta$  — кут між вектором швидкості частинки і нормаллю до поверхні зразка. Для вимірювання вагових характеристик зразків матеріалів використовувалися аналітичні ваги з похибкою порядку  $10^{-5}$  г. Втрачена маса — різниця показань ваг за 1 год до експозиції та через 1 год після експозиції у потоці плазми. Таке зважування поза вакуумною камерою з інтервалом 1 год до і після вакуумування і опромінювання плазмою забезпечує ідентичні умови визначення маси зразка-мішені. Частка адсорбованого газу при експозиції зразка у повітрі при атмосферному тиску становить 10...15 % від втрати маси поліімиду картон-Н при опромінюванні його протягом 1 год іонами АК з енергією  $E_{iAK} \approx 5$  еВ. Втрата маси плівки  $\delta M_w = M_1 - M_2$ , де  $M_1, M_2$  — маси зразка плівки до і після експонування у потоці плазми та у вакуумі. Внесок адсорбованих газів  $\delta M_{адс}$  у повітрі при атмосферному тиску до і після вакуумування і опромінювання потоком плазми враховувався таким чином:

$$\delta M_w \approx (M_1 + \delta M_{адс}) - (M_2 + \delta M_{адс}).$$

Як джерело високоенергійних іонів потоків плазми атомарно-молекулярного кисню ( $O^+ + O_2^+$ ) використовувався газорозрядний прискорювач з «саморозгоном» плазми (з іонізацією робочого тіла  $O_2$  електронним ударом і осциляцією електронів у зовнішньому магнітному полі). Застосування прискорювача плазми дозволяє одержувати в робочій зоні струменя потоки АК з концентрацією іонів  $N_{iAK} = 10^8 \dots 10^{10}$  см $^{-3}$  і енергією  $E_{iAK} = 5 \dots 100$  еВ. Енергія спрямованого руху потоку іонів  $E_{iAK}$  контролю-

ється багатоелектродним зондом. Розкид значень  $E_{iAK}$ , що вимірюються, не перевищує  $\pm 4.5$  %.

На зразки впливають атомарні іони і швидкі нейтральні атоми кисню. Сумарний флюенс АК у місці розташування зразків полімерних матеріалів можна представити у вигляді суми флюенса іонів  $F_{O^+}$  і флюенсу  $F_O$  швидких нейтральних атомів:

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

де  $U_O$  і  $N_O$  — швидкість і концентрація швидких нейтральних атомів кисню,  $\xi_{di}$  — ступінь дисоціації іонів плазми,  $N_{i\Sigma}$  — сумарна концентрація іонів кисню.

**3.2. Іони атомарного кисню.** Для визначення концентрації іонів у потоці плазми на стенді використовуються: мікрохвильовий інтерферометр, який працює на частоті 5.45 ГГц; система електричних зондів (циліндричний, плоский і багатоелектродний зонд-аналізатор) і циліндр Фарадея. Реєстрація вольтамперних характеристик (ВАХ) провадиться в автоматичному режимі. Похибка вимірювань зондового струму не перевищує  $\pm 2$  %. Потенціал плазми вимірюється по точці розбіжності характеристик холодного і нагрітого термозонда. Розкид значень потенціалу плазми не перевищує  $\pm 4$  %. Пік іонного струму насичення, який реєструється зондом при обертанні в горизонтальній площині (навколо вертикальної осі), відповідає орієнтації осі зонда вздовж по потоку, а півширина піка іонного струму насичення пропорційна ступеню неізотермічності розрідженої плазми — відношенню температури іонів до температури електронів  $T_i/T_e$ . Електричний циліндричний зонд використовується і для визначення ступеня дисоціації  $\xi_{di}$  іонного компонента потоку плазми атомарно-молекулярного кисню безпосередньо в робочій зоні струменя біля поверхні зразків. Ступінь дисоціації іонного компонента плазми атомарно-молекулярного кисню можна записати у вигляді

$$\xi_{di} = \frac{N_{ia}}{N_{i\Sigma}} = \frac{N_{ia}}{N_{ia} + N_{i\Sigma}}.$$

Іонний струм насичення  $I_{i\Sigma}$  на циліндричний зонд, орієнтований перпендикулярно до вектора швидкості потоку плазми, дорівнює

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

а ступінь дисоціації іонного компонента визначиться з формули

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

де  $N_{i\Sigma} = N_{ia} + N_{im}$  — концентрація іонів  $O^+ + O_2^+$ , індекс «а» відповідає атомарним, «m» — молекулярним іонам кисню,  $I_{ia}$ ,  $I_{im}$  — іонний струм насичення атомарних і молекулярних іонів,  $A_p$  — площа поверхні зонда,  $e$  — заряд електрона,  $U_{im}$ ,  $M_i$  — швидкість і маса молекулярних іонів,  $\phi_w = \phi_p - \phi_0$  — потенціал зонда  $\phi_p$  відносно потенціалу плазми  $\phi_0$ ,  $I_{oi} = (A_p / \pi) N_{i\Sigma} U_{im}$  — іонний струм на зонд при  $\phi_w = 0$ .

Паралельно з електричними зондами для визначення концентрації заряджених частинок у потоці плазми служить мікрохвильовий інтерферометр. За результатами зондових і мікрохвильових вимірювань з використанням умови квазінейтральності плазми можна оцінити:

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

— сумарну концентрацію позитивних атомарних і молекулярних іонів  $N_e + N_i^- \approx N_{i\Sigma} = N_{ia} + N_{im}$ .

Такий підхід є виправданим — мікрохвильова діагностика заснована на розсіюванні електро-

магнітного випромінювання на вільних електронах іонізованого середовища.

Склад залишкового газу у вакуумній камері стенда контролюється мас-спектрометром MX7307. За результатами мас-спектроскопічного аналізу при статичному тиску  $2 \cdot 10^{-5}$  Па в залишковому газі у вакуумній камері стенда переважають  $CO + N_2$  і  $H_2$  із концентрацією нейтральних молекул  $N_n \approx 2.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ . При робочому тиску  $5 \cdot 10^{-3}$  Па у плазмовому струмені основними компонентами є швидкі іони  $O^+$  та  $O_2^+$ . У камері іонізації і на зрізі прискорювача плазма практично повністю іонізована. У робочому перетині струменя сумарна концентрація іонів  $N_{i\Sigma} \approx 8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Концентрація іонів  $O^+$  атомарного кисню при  $\xi_{d_i} \approx 0.79$  дорівнює  $N_{iAK} \approx 6.3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ , а іонів  $O_2^+$  молекулярного кисню —  $N_{O_2^+} \approx 1.7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ .

**3.3. Швидкі нейтральні атоми у потоці плазми.** Концентрація  $N_O$  швидких ( $U_O \approx U_{O^+}$ ) нейтральних атомів АК, що виникли при зіткненнях частинок, пропорційна коефіцієнтам:

— радіаційної і ударно-радіаційної рекомбінації  $\beta_r$  при захопленні вільних електронів швидкими іонами АК ( $O^+ + e^- \rightarrow O + hv$ ,  $hv$  — електромагнітне випромінювання);

— рекомбінація дисоціації  $\beta_{di}$  електронів плазми при зіткненні з молекулярними іонами ( $O_2^+ + e^- \rightarrow O + O$ );

— іонно-молекулярних обмінних реакцій  $\beta_{im}$  (перезарядження іонів  $O^+$  при зіткненнях з нейтральними молекулами залишкового газу і кисню).

У табл. 1 наведено значення коефіцієнтів рекомбінації у потоці розрідженої плазми на стенді.

Частина швидких атомів O, які утворилися в результаті реакцій рекомбінації при зіткненнях заряджених часток плазми з молекулами залиш-

Таблиця 1. Параметри, які характеризують утворення швидких нейтральних атомів АК при реакціях під час зіткнення частинок у потоці плазми атомарно-молекулярного кисню

Реакції	Коефіцієнти рекомбінації, $10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$	Кількість актів рекомбінації, $10^6 \text{ см}^{-3}\text{с}^{-1}$	Концентрація швидких нейтральних атомів кисню, $10^3 \text{ см}^{-3}$
Радіаційна та ударно-радіаційна рекомбінація	0.22	5.3	0.17
Рекомбінація дисоціації	40...400	56...560	1...10
Іонно-молекулярні обмінні реакції	3...4	24...320	16000...240

Таблиця 2. Середні значення коефіцієнтів рекомбінації  $\beta_{am}$  при зіткненнях атомів АК з молекулами залишкового газу

Компонент	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO
$\beta_{am}, \text{см}^3\text{с}^{-1}$	$6 \cdot 10^{-16} \dots 2 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-17} \dots 6 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-14} \dots 7 \cdot 10^{-11}$

кового газу CO, N<sub>2</sub> і H<sub>2</sub>, зникає з об'єму. Концентрація нейтральних частинок залишкових газів (без витрати газу)  $N_n \approx 2.8 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Максимальні значення коефіцієнтів рекомбінації атомів O з молекулами CO, N<sub>2</sub> і H<sub>2</sub> при теплових швидкостях не перевершують константи швидкості пружного (газокінетичного) зіткнення  $\beta_{am} \leq 10^{-10} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ . При високих енергіях константа швидкості рекомбінації наближається до газокінетичних значень. Середні значення коефіцієнтів рекомбінації при зіткненнях атомів АК з молекулами залишкового газу на стенді наведено у табл. 2.

З використанням даних табл. 1, 2 для концентрації швидких нейтральних атомів, які утворюються в результаті обмінно-зіткнувальних реакцій на стенді, маємо:

- радіаційна і ударно-радіаційна рекомбінація  $N'_O / N_{O^+} \approx 4 \cdot 10^{-8}$ ;
- рекомбінація дисоціації  $N_O^d / N_{O^+} \approx 2.5 \cdot 10^{-7} \dots 2.5 \cdot 10^{-6}$ ;
- іонно-обмінні зіткнення  $N_O^{im} / N_{O^+} \approx 6 \cdot 10^{-5} \dots 4 \cdot 10^{-3}$ ;
- зіткнення із залишковими газами  $N_O^{am} / N_{O^+} \approx 10^{-1} \dots 10^{-5}$ .

Таким чином, з урахуванням реакцій зіткнення для швидких атомів АК і іонів АК з високою точністю виконується умова  $N_O U_O / N_{O^+} U_{O^+} \ll 1$ .

При опроміюванні зразків матеріалу потоком плазми атомарно-молекулярного кисню визначальним є вплив іонів АК, і формулу (9) можна представити у вигляді

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

#### 4. ДЕГРАДАЦІЯ ПОЛІМІДУ ПРИ ОПРОМІНЮВАННІ ВИСОКОШВИДКІСНИМИ ІОНАМИ АТОМАРНОГО КИСНЮ

**4.1. Коефіцієнт ерозії.** При впливі на полімер потоків АК деградація матеріалу зумовлена проце-

сом фізичного розпилення, посиленого хімічними реакціями (хімічним травленням) [5].

На рис. 1 приведено залежність об'ємного коефіцієнта ерозії (реакційної ефективності) поліміду картон-Н від енергії іонів АК, які бомбардують поверхню: 1 — дані вимірювань авторів при енергіях іонів  $E_{iAK} \approx 5.0, 31.6, 70, 75, 80$  і  $90$  еВ; 2, 3, 5, 6 — дані [1, 20]; 4 — [3]; 7 — [4]; 8 — апроксимація авторів (11)

$$R_{ek} \approx 0.4(\alpha_i E_{iAK})^{1.268} \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомO}, \quad (11)$$

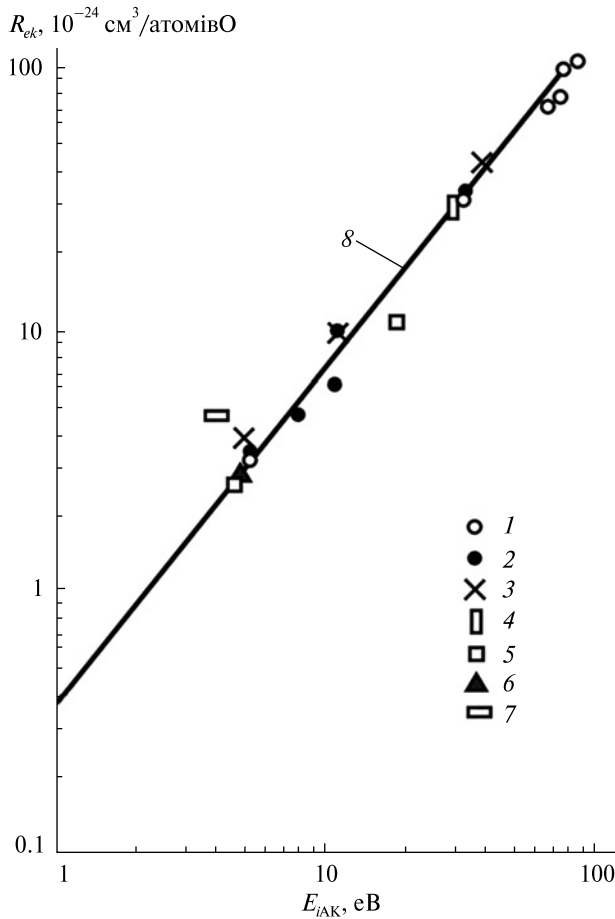
де  $\alpha_i = 1 \text{ еВ}^{-1}$ .

Розраховані при  $E_{iAK} \approx 4.5 \text{ еВ}$  ( $U_{iAK} \approx 7.5 \text{ км/с}$ ) значення  $R_{ek} \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{іонO}$  узгоджуються зі значеннями  $R_{ek}$ , отриманими за результатами випробувань поліміду картон-Н на МКС [4, 18].

Поліімід картон-Н інертний до впливу вакуумного ультрафіолету (ВУФ) у верхній атмосфері Землі. Вплив АК призводить до окисної деструкції полімеру з утворенням летких оксидів CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O і OH. Вакуумний ультрафіолет посилює дію АК на полімери та ініціює десорбцію молекул CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, OH і H<sub>2</sub> з поверхні, збільшує ерозію полімеру в декілька разів [10, 22, 26, 29, 30].

Критерієм оцінки синергетичного ефекту впливу АК+ВУФ на деградацію полімерів у верхній атмосфері Землі може служити відношення потоків ВУФ і АК. Визначити критерій для синергетичного ефекту впливу АК+ВУФ на полімери можна тільки експериментально. Умовою стендового моделювання впливу ВУФ на полімери в атмосфері Землі є рівність  $\Phi_{vN} t_{vN} \approx \Phi_{vM} t_{vM}$  ( $\Phi_v$  — щільність потоків енергії випромінювання, індекс  $N$  — атмосфера, індекс  $M$  — стенд), звідки  $\Phi_{vM} = \Phi_{vN} t_{vN} / t_{vM} = \Phi_{vN} K_{прс}^{BY\Phi}$ , де  $K_{прс}^{BY\Phi}$  — коефіцієнт прискорення стендових випробувань. Максимум щільності потоку ВУФ у атмосфері Землі в діапазоні довжин хвиль  $\lambda_n = 10 \dots 165 \text{ нм}$  припадає на випромінювання в  $\alpha$ -лінії Лаймана для атома водню при  $\lambda_n = 121.51 \text{ нм}$ .

Авторами за даними [10, 22, 26, 29] і результатами випробувань на стенді ІТМ при опромінюванні зразка поліміду картон-Н іонами АК з енергією  $E_{iAK} \approx 6.9 \text{ еВ}$  і потоком енергії випромінювання ВУФ, яке генерують водневі лампи



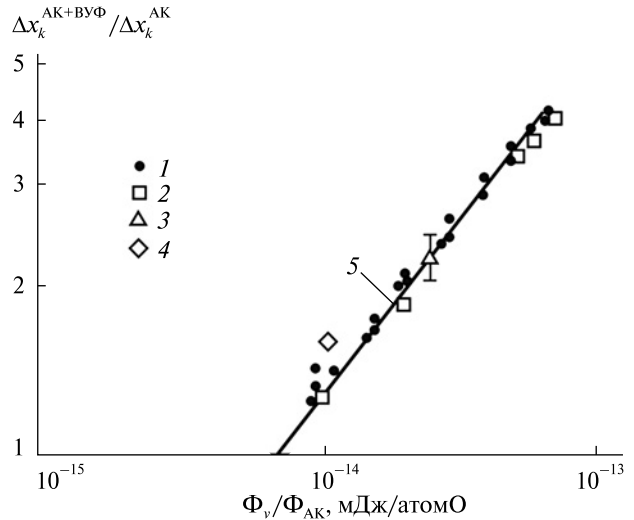
**Рис. 1.** Залежність об'ємного коефіцієнта ерозії  $R_{ek}$  полімеру картон-Н від енергії іонів АК  $E_{iAK}$ : 1 — виміри авторів у потоках іонів АК з енергіями  $E_{iAK} \approx 6.9, 31.6, 70, 75, 80$  і  $90$  eВ, 2, 3, 5, 6 — дані [1, 20], 4 — дані [3] при  $E_{iAK} \approx 30$  eВ, 7 — дані [4], 8 — апроксимація (11)

ВМФ-25, у роботі [24] отримано залежність зміни глибини ерозії  $\Delta x_k^{AK+BY\Phi}$ , нормованої на  $\Delta x_k^{AK}$  (див. рис. 2): 1 — вимірювання авторів, 2 — дані [25], 3 — вимірювання [22], 4 — КА «Spot-1» (висота 830 км) [20], 5 — апроксимація авторів (12):

$$\Delta x_k^{AK+BY\Phi} / \Delta x_k^{AK} \approx 9.893 \cdot 10^8 (\alpha_v \Phi_v / \Phi_{AK})^{0.636}, \quad (12)$$

де  $\alpha_v = 1$  (мДж/атомО)<sup>-1</sup>.

Граничним значенням відношення  $\Phi_v / \Phi_{AK}$ , яке характеризує синергетичний ефект впливу АК+ВУФ на глибину ерозії або втрату маси полііміду картон-Н, є значення  $\Phi_v / \Phi_{AK} \approx 7.1 \cdot 10^{15}$  мДж/атомО [24].

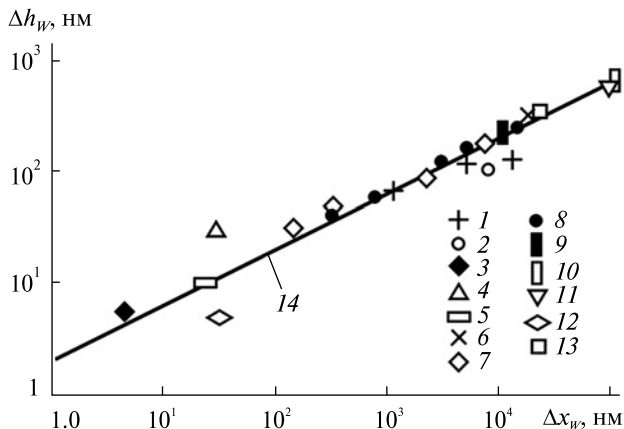


**Рис. 2.** Залежність зміни глибини ерозії полііміду  $\Delta x_k^{AK+BY\Phi}$  під впливом АК+ВУФ, нормованої на  $\Delta x_k^{AK}$ , від відношення щільності потоку енергії випромінювання ВУФ до щільності потоку АК: 1 — вимірювання авторів, 2 — вимірювання [25], 3 — дані [22], 4 — дані КА «Spot-1» (висота 830 км) [20], 5 — апроксимація (12)

**4.2. Деструкція поверхні. Термооптичні характеристики полііміду.** Наслідком розпилення поверхні при опромінюванні полііміду гіпертепловим потоком АК є деструкція («розпушення») поверхні, зміна рельєфу, ступеня шорсткості. На поверхні полімеру під впливом АК формуються, як правило, cone-like (конусоподібна), або saget-like (килимоподібна, ворсиста) структури [14, 27, 28]. Змінюються також і термооптичні характеристики поверхні полімеру: інтегральний коефіцієнт поглинання сонячного випромінювання  $A_s$  та інтегральний коефіцієнт  $\varepsilon_N$  випромінювання в ІЧ-діапазоні (ступінь чорноти). Як і в роботах [27, 28], в ролі ступеня шорсткості поверхні полімеру використовуємо параметр вертикальної шорсткості:  $\Delta h_W = h_W - h_{0W}$ , де  $h_W$  — висота конуса структури cone-like,  $h_{0W}$  — висота початкової (технологічної) неоднорідності поверхні матеріалу. Параметри, які характеризують стан поверхні зразків полііміду, які тестуються на стенді ІТМ, визначалися із застосуванням:

— профілографа моделі 201 і мікроскопа МІМ-8,





**Рис. 3.** Залежність параметра шорсткості  $\Delta h_w$  від глибини ерозії плівки полііміду  $\Delta x_w$ : 1 – [27], 2 – вимірювання [13], 3 – [19], 4 – [26], 5 – [30], 6 – [8], 7 – стендові вимірювання [14], 8 – результати експозиції полііміду на ОС «Мир» у верхній атмосфері Землі [1], 9 – [17], 10 – [26], 11 – [28], 12 – виміри авторів при  $F_{iAK} = 6.7 \cdot 10^{18}$  іонО/см<sup>2</sup>,  $F_{iAK} = 1.2 \cdot 10^{20}$  іонО/см<sup>2</sup>,  $F_{iAK} = 10^{21}$  іонО/см<sup>2</sup> і  $E_{iAK} = 6.9, 30, 80$  еВ, 13 – [6], 14 – апроксимація (13)

— спектрофотометра СФ-18 (коефіцієнти пропускання  $\tau_s$  і відбиття  $\rho_s$  випромінювання для обчислення  $A_s$ ),

— терморадіометра ТРМ «І» (інтегральний коефіцієнт випромінювання  $\epsilon_N$  в ІЧ-діапазоні).

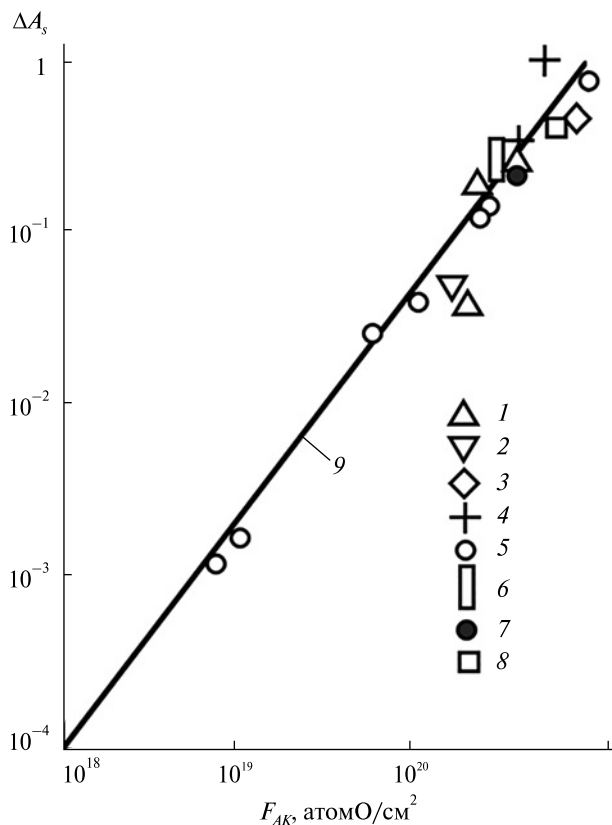
Для контролю температури поверхні полімеру використовувався пірметр GM 1500. Початкові значення параметрів зразків тестованого полііміду:  $h_{0W} \approx 3.07 \pm 0.01$  нм,  $A_{0s} \approx 0.219 \pm 0.01$ ,  $\epsilon_{0N} \approx 0.52 \pm 0.01$ . Початкові значення параметрів, отриманих при тестуванні полііміду, узгоджуються з аналогічними даними [22, 32, 33].

Дані рис. 3 ілюструють залежність параметра шорсткості  $\Delta h_w$  від глибини ерозії плівки полііміду  $\Delta x_w$  при опромінуванні полііміду потоком АК з енергіями частинок  $E_{AK} \approx 5 \dots 267$  еВ. Залежність 14 на рис. 3 – апроксимація авторів

$$\Delta h_w \approx \beta_2 \Delta x_w^{0.5} \text{ нм}, \quad (13)$$

де  $\beta_2 = 2.07 \text{ нм}^{0.5}$ . При  $E_{AK} \approx 4.6 \dots 7.5$  еВ залежність  $\Delta h_w$  від флюенсу АК можна представити апроксимацією авторів:  $\Delta h_w \approx \beta_2^* F_w^{0.5}$  нм, де  $\beta_2^* = 0.103 \text{ нм}^2$ .

Наслідком деструкції («розпушення») поверхні полімеру при опромінуванні гіпертепловим потоком АК є зміна інтегрального коефіцієн-



**Рис. 4.** Залежність зміни інтегрального коефіцієнта поглинання сонячного випромінювання  $\Delta A_s$  від флюенсу АК: 1 – ОС «Мир» [1] при  $F_{AK} = (1.9 \dots 2.3) \cdot 10^{20}$  атомО/см<sup>2</sup> і  $3.6 \cdot 10^{20}$  атомО/см<sup>2</sup>, 2 – [22], 3 – [25], 4 – КА «Spot-1», «Spot-2», «Spot-4», «Space Shuttle» і стендових випробувань, залежність 9 – апроксимація авторів

та поглинання сонячного випромінювання  $A_s$ . На рис. 4 наведено залежність  $\Delta A_s = A_s - A_{0s}$  від флюенсу АК по даних супутникових (ОС «Мир», КА «Spot-1», «Spot-2», «Spot-4», «Space Shuttle») і стендових випробувань, залежність 9 – апроксимація авторів

$$\Delta A_s = 4.467 \cdot 10^{-28} (\beta_3 F_{AK})^{1/3}, \quad (14)$$

де  $\beta_3 = 1 \text{ см}^2/\text{атомО}$ . Залежність  $\Delta A_s$  від параметра шорсткості поверхні  $\Delta h_w$  полііміду апроксимує залежність авторів  $\Delta A_s = 2.85 \cdot 10^{-7} (\beta_4 \Delta h_w)^{2.572}$ , де  $\beta_4 = 1 \text{ нм}^{-1}$ .

За результатами випробувань авторів у потоці іонів АК при  $E_{iAK} \approx 6.9$  еВ і  $1.16 \cdot 10^{20} \leq F_{iAK} \leq 1.27 \cdot 10^{21}$  іонО/см<sup>2</sup> зміна інтегрального

коефіцієнта випромінювання полііміду kapton-H в ГЧ-діапазоні довжин хвиль  $\Delta\varepsilon_N \approx \varepsilon_N - \varepsilon_{0N} \leq 0.05$  ( $\varepsilon_N = 0.52...0.55$ ) не перевищує  $\pm 10\%$ .

### 5. ДИНАМІЧНИЙ ВПЛИВ ГІПЕРТЕПЛООВОГО ПОТОКУ АТОМАРНОГО КИСНЮ НА ПОЛІІМІД. КОЕФІЦІЄНТИ ПЕРЕДАЧІ ІМПУЛЬСУ ТА ЕНЕРГІЇ АК

Динамічну взаємодію твердого тіла з потоком розрідженого частково іонізованого газу значною мірою характеризують коефіцієнти передачі імпульсу та енергії. Коефіцієнти передачі (акомодації) імпульсу та енергії використовуються для визначення конвективних теплових потоків і аеродинамічних характеристик тіл при вільно-молекулярному обтіканні їх газом незалежно від прийнятої схеми взаємодії газових атомів з поверхнею тіла. Специфіку взаємодії потоків АК з полімерними конструкційними матеріалами КА вивчено слабо. У літературі відсутня у необхідному об'ємі інформація про розрахункові і експериментальні значення коефіцієнтів акомодації АК для практично важливого в аеродинаміці діапазону енергії частинок 5...10 eV ( $U_{AK} = 8...10$  км/с), про вплив шорсткості поверхні полімерів на зміну аеродинамічних характеристик тіл протягом усього терміну експлуатації в атмосфері Землі. Інформація про особливості динамічної взаємодії потоків АК з полімерами на дуже низьких орбітах (VLEO), і зокрема з поліімідом kapton-H, важлива для практичного застосування.

Потоки імпульсу та енергії, які переносять атомарні іони і атоми кисню на поверхню полімеру в розрідженому середовищі, характеризуються коефіцієнтами акомодації нормального  $\alpha_n$ , тангенціального  $\alpha_t$  імпульсу та енергії  $\alpha_e$ .

Силовий вплив потоку частково іонізованого газу низької щільності на полімер при «плаваючому» (рівноважному) потенціалі  $\phi_{wf}$  на його поверхні на стенді визначається бомбардуванням електронами, іонами, швидкими і тепловими атомами кисню, які утворюються в результаті перезарядження іонів АК на залишковому газі, метастабілями тощо:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma f} &= P_{ef} + P_{if} + P_{AK} + P_{0n} + P_m + P_c + \dots = \\ &= P_{ef}(\phi_{wf}) + P_{if}(\phi_{wf}) + \Delta P, \end{aligned}$$

де  $P_{ef}$  — силовий тиск, зумовлений бомбардуванням полімеру електронами,  $P_{if}$  — силовий тиск іонів плазми,  $P_{AK}$  — внесок швидких атомів кисню,  $P_{0n}$  — силовий тиск теплових атомів кисню,  $P_m$  — силовий вплив метастабілей,  $P_c$  — сила кулонівської взаємодії,  $\Delta P$  — сумарний вплив нейтральних частинок, що не залежить від потенціалу поверхні полімеру. Враховуючи той факт, що сила тиску, зумовлена бомбардуванням електронами, набагато менша від силового впливу інших компонентів потоку розрідженого частково іонізованого газу, внеском  $P_c(\phi_{wf})$  можна знехотити. У потоці частково іонізованого газу низької щільності значення потенціалу  $\phi_p$  на лицьовій поверхні полімеру, як правило, близьке до значення потенціалу плазми  $\phi_0$  ( $\phi_{wf} = \phi_p - \phi_0 \approx 0$ ). На стенді ІТМ контроль потенціалу на поверхні полііміду  $\phi_p$  здійснювався за допомогою бортової апаратури «Зонд-Заряд» безконтактного вимірювання напруженості електричного поля давачем «Зонд», які працюють у режимі динамічного конденсатора. Давач «Зонд» калібрувався за допомогою вимірювань та контролю потенціалу мідної пластини [23] електростатичним вольтметром С50 з похибкою вимірювань  $\phi_p = \pm 1\%$ . Як і в роботі [23], для оцінки величини  $\Delta P$  використовувалася додаткова мішень — диск діаметром 50 мм із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. При позитивних потенціалах на поверхні сталевого диска, що відповідають області насичення електронного струму

$$P_{\Sigma \text{нас}}(\phi_{W\text{нас}}) \approx P_{ef}(\phi_{W\text{нас}}) + \Delta P \approx \Delta P,$$

а при «плаваючому» потенціалі на поверхні сталевого диска

$$P_{\Sigma f}(\phi_{wf}) \approx P_{if}(\phi_{wf}) + P_{ef}(\phi_{wf}) + \Delta P \approx P_{if}(\phi_{wf}) + \Delta P.$$

При оцінці внеску  $\Delta P$  у силовий вплив плазми атомарно-молекулярного кисню прийнято, що для мішені з нержавіючої сталі і для мішені з полііміду kapton-H величини  $P_{\Sigma f} / P_{\Sigma \text{нас}} \approx 1 + P_{if} / \Delta P \approx \text{const}$  і практично рівні. З урахуванням оцінки складу гіпертеплового потоку АК на стенді  $\Delta P \ll P_{if}$  і  $P_{\Sigma} \approx P_{iAK}$ . При дослідженні динамічної взаємодії іонів АК зі зразками полііміду kapton-H (мішень — диск  $\varnothing \approx 50$  мм) використовувалися співвідношення для коефіцієнтів пе-

редачі нормального ( $\alpha_n$ ) і тангенціального ( $\alpha_t$ ) імпульсу [23]

$$\alpha_n = \frac{2 - [e(P_x + P_y \operatorname{tg}\theta) / \sqrt{M_{iAK} E_{iAK} I_i (1 + \eta^2 / \cos^2 \theta)^{1/2}}]}{1 - \sqrt{\frac{\pi k T_W}{4 E_{iAK}} \cdot \frac{1 + \eta^2}{\cos^2 \theta + \eta^2}}}$$

i

$$\alpha_t = \frac{e(P_x - P_y \operatorname{ctg}\theta)}{\sqrt{2 M_{iAK} E_{iAK} I_i}}, \quad (16)$$

де  $P_x$  — сила лобового опору мішені,  $P_y$  — підйомна сила мішені,  $\theta$  — кут атаки,  $A_W$  — площа поверхні, що опромінюється,  $I_i = I_{0i} \cos \theta$ ,  $I_{0i} = e N_{iAK} U_{iAK} A_W$  — іонний струм на поверхню мішені при  $\theta = 0$ ,  $k$  — стала Больцмана,  $T_W$  — температура поверхні мішені,  $\eta^2 = (e |\phi_W| + \chi) / E_{iAK}$ ,

$$\chi = \frac{3.6}{d(\text{Å})} \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1}, \text{ eV}$$

— енергія, яку здобуває іон при впливі сил зображення [31],  $\varepsilon = 3.4$  — діелектрична проникність полііміду картон-Н;  $d$  (Å) — відстань від поверхні мішені, на якій відбувається нейтралізація позитивного іона. Приблизно, з похибкою не більш  $\pm 10\%$ ,  $d$  визначається як півсума діаметра газового іона та параметра решітки матеріалу (параметр кубічної решітки полііміду картон-Н  $r_0 \approx 5.8636 \text{ Å}$  [7]). Отже, для пари «іон АК — поліілід картон-н»  $d \geq 4 \text{ Å}$ , і при  $E_{iAK} = 6.9 \text{ eV}$  на стенді ІТМ  $\eta^2 \leq 0.1$ . З іншого боку, співвідношення (15) і (16) можна подати у вигляді

$$\alpha_n = \frac{2 - 0.5(c_x + c_y \operatorname{tg}\theta) / (\cos^2 \theta + \eta^2)^{1/2}}{1 - \frac{\sqrt{\pi}}{2 S_W} \left( \frac{1 + \eta^2}{\cos^2 \theta + \eta^2} \right)^{1/2}}$$

i

$$\alpha_t = \frac{c_x \sin \theta - c_y \cos \theta}{\sin 2\theta}, \quad (18)$$

де  $S_W = U_{iAK} / \sqrt{2 k T_W / M_{iAK}}$  — швидкісне відношення відбитих від поверхні полімеру іонів АК,  $c_x = P_x / 2 \rho_i U_{iAK}^2 A_W$  і  $c_y = P_y / 2 \rho_i U_{iAK}^2 A_W$  — коефіцієнти сили опору та підйомної сили відповідно.

Для вимірювання підйомної сили  $P_y$  і сили опору мішені  $P_x$  на стенді ІТМ використовувалися мікроваги компенсаційного типу [23],

виготовлені на основі стандартної магнітоелектричної системи мікроамперметра постійного струму. Для відстеження вимірювань застосовувався фотодіодний блок підсилювача постійного струму, який працює в комплекті з мікроамперметром. Компенсаційний струм, який протікає через рамку мікроамперметра магнітоелектричної системи, прямо пропорційний прикладеному до рамки механічному моменту. Для усунення можливого впливу вібрацій ваги встановлено на підставці, закріпленій на нижній рухливій платформі. Для підвищення чутливості мікроваг і зменшення внеску  $\Delta P$  у баланс сил державку мішені поміщено в діелектричну трубку із внутрішнім діаметром 1.8 см. Із цією метою бокова та тіньова сторони мішені захищені від впливу частинок потоку, що набігає, екраном під потенціалом, рівним потенціалу мішені  $\phi_p$ . Діапазон сил, які вимірюються на плечі довжиною 45 см, охоплює від  $5 \cdot 10^{-7}$  до 0.01 Н. Похибка вимірювань сили опору мішені в розглянутому діапазоні не перевищує  $\pm 4.5\%$ .

На рис. 5 представлено залежності коефіцієнтів акомодатії нормального ( $\alpha_n$ ) та тангенціального ( $\alpha_t$ ) імпульсу, коефіцієнта енергії  $\alpha_e$  при  $E_{iAK} = 6.9 \text{ eV}$  ( $U_{iAK} \approx 9.1 \text{ км/с}$ ),  $F_{iAK} \approx 6.7 \times 10^{18} \text{ іонО/см}^2$  і  $\Delta h_W \approx 23.7 \text{ нм}$ . Крива 2 на рис. 5 — апроксимація авторів:

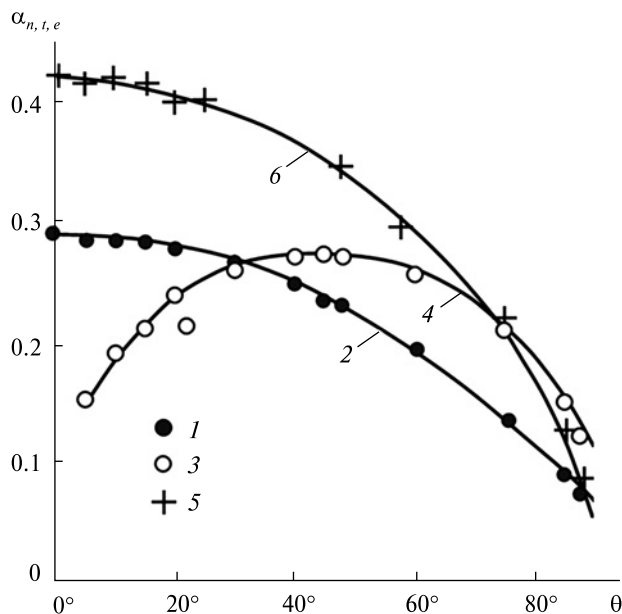
$$\alpha_n(\theta) = \alpha_{0n} \left[ \cos \theta + 1.033 \left( 1 + \frac{1}{\alpha_{0n}} \right)^{-1} \sin^2 \theta \right]. \quad (19)$$

Значення коефіцієнта акомодатії енергії  $\alpha_e(\theta)$  (точки 5) отримано з використанням моделей квазідзеркального і дифузного («косинусного») розсіювання частинок потоку, що набігає, на поверхню твердого тіла [11]

$$\alpha_e(\theta) = 1 - \zeta (1 - 0.5 c_x(\theta))^2, \quad (20)$$

де  $\zeta = 1 / (\cos 2\theta)^2$  — дзеркальне відбиття для кутів, близьких до нормального падіння частинок, а для ковзних кутів  $\zeta = 1 / 0.444 (\cos \theta)^2$  — дифузійне розсіювання [11].

Залежності коефіцієнта акомодатії нормального імпульсу  $\alpha_n(\theta)$ , виміряні авторами для двох режимів опромінювання полііміду при  $E_{iAK} = 6.9 \text{ eV}$ ,  $F_{iAK} \approx 6.7 \cdot 10^{18} \text{ іонО/см}^2$  і параметра шорсткості поверхні  $\Delta h_W \approx 23.7 \text{ нм}$ , а також при

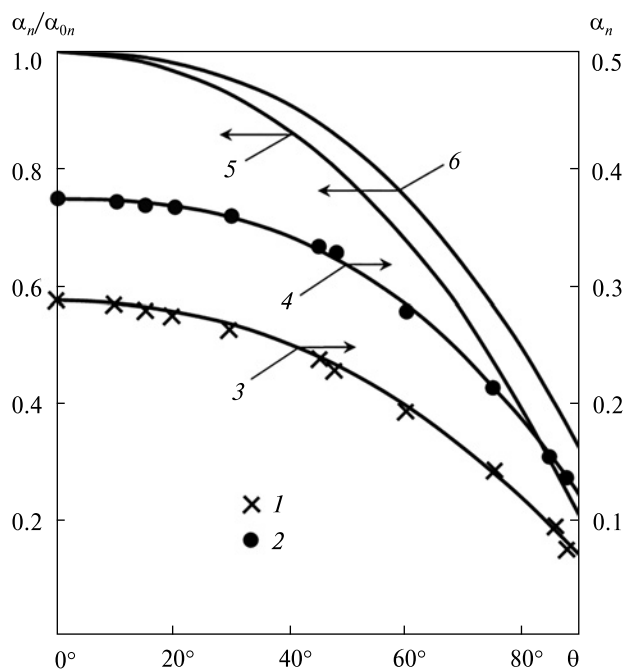


**Рис. 5.** Залежності коефіцієнтів передачі імпульсу і енергії іонів АК від кута атаки  $\theta$  елемента поверхні полііміду: 1, 3 — значення  $\alpha_n$  і  $\alpha_t$ , розраховані за (15) і (16) з використанням вимірних значень  $P_x$  і  $P_y$ , 2 — апроксимація (19), 4 —  $\alpha_t(\theta) = \alpha_{t45} [\sin 2\theta + 0.394(\cos 2\theta)^2]$ , значення  $\alpha_{0n}$ ,  $\alpha_{0e}$  відповідають куту  $\theta = 0$ ,  $\alpha_{t45}$  — куту  $\theta = 45^\circ$ , 5 —  $\alpha_e$ , розраховані за (20) і вимірними значеннями  $c_x(P_x)$ , 6 — апроксимація  $\alpha_e(\theta) = \alpha_{0e} [\cos^{0.7}\theta + 1.364 \times (1 + 1/\alpha_{0e})^{-2} \sin^{2.5}\theta]$

$E_{iAK} = 6.9$  eВ;  $F_{iAK} \approx 1.16 \cdot 10^{20}$  іонО/см<sup>2</sup>,  $\Delta h_w \approx 110$  нм наведено на рис. 6. Відповідні залежності  $\alpha_e(\theta)$  можуть бути отримані за допомогою апроксимації авторів

$$\alpha_e(\theta) = 0.845[1 - (\alpha_n(\theta))^2].$$

За ступенем дисоціації іонів плазми атомарно-молекулярного кисню  $\xi_{d_i}$  умови опромінювання мішені полііміду на стенді при вимірюванні коефіцієнтів акомодатії імпульсу та енергії  $\alpha_{n,t,e}(\theta)$  близькі до умов для нейтрального кисню на VLEO (170...300 км) [9]. Отримані для елемента поверхні полііміду картон-Н значення та залежності коефіцієнтів акомодатії імпульсу і енергії (рис. 5, 6) можуть використовуватися при розрахунках аеродинамічних характеристик тіл будь-якої геометричної форми, незалежно від прийнятої схеми (моделі) динамічної взаємодії в системі «АК — поліімід».



**Рис. 6.** Кутові залежності коефіцієнта акомодатії нормального імпульсу, виміряні для двох режимів опромінювання полііміду: 1 —  $E_{iAK} = 6.9$  км/с,  $F_{iAK} \approx 6.7 \cdot 10^{18}$  іонО/см<sup>2</sup>,  $\Delta h_w \approx 23.7$  нм (режим 1), 2 —  $E_{iAK} = 6.9$  км/с,  $F_{iAK} \approx 1.2 \cdot 10^{20}$  іонО/см<sup>2</sup>,  $\Delta h_w \approx 110$  нм (режим 2), 3, 4 — апроксимація (19), 5, 6 — нормовані кутові залежності  $\alpha_n(\theta)/\alpha_{0n}$  для режиму 1 і 2 відповідно

## 6. ЕКВІВАЛЕНТНІСТЬ РЕЖИМІВ ВЗАЄМОДІЇ «АТОМАРНИЙ КИСЕНЬ — ПОЛІМЕР» В АТМОСФЕРІ ЗЕМЛІ І НА СТЕНДІ

Умову еквівалентності режимів взаємодії «АК — полімер» на орбіті в атмосфері Землі і на стенді можна отримати на основі термодинамічного (ентропійного) критерію еквівалентності навантаження матеріалів при прискорених ресурсних випробуваннях. Відповідно до критерію еквівалентності два режими навантаження є еквівалентними, якщо вони викликають у матеріалі однакові збільшення необоротної складової ентропії. Для процесу розпилення полімерів частинками АК в атмосфері і на стенді такою умовою може бути рівність значень втрати маси з одиниці площі поверхні або глибини ерозії плівки полімеру (1). Зв'язок між параметрами, що характеризують умови експлуатації полімеру в атмосфері Землі і їхніми значеннями при



тестуванні матеріалів на стенді визначає співвідношення (2). При використанні полііміду kapton-H у ролі еталонного полііміду при відомих  $E_{iAK}$  і  $F_{iAK}$  співвідношення (7) можна представити у вигляді (8). Після підстановки значень  $R_{eW}(E_{iAK}^{(M)})$ ,  $R_{eW}(E_{iAK}^{(N)})$  і  $R_{eW}(E_{iAK}^{(N)})$  в (8) з (2) визначиться величина  $F_{AK}^{(N)}$  флюенсу АК для умов експлуатації полімеру, який підлягає тестуванню, в атмосфері Землі на VLEO.

При випробуваннях полііміду на стенді ІТМ у високошвидкісному потоці іонів АК з енергією  $E_{iAK}^{(M)} \approx 80$  еВ;  $R_{ek} \approx 1.035 \cdot 10^{-22}$  см<sup>3</sup>/іонО і концентрацією частинок  $N_{iAK}^{(M)} \approx 6.3 \cdot 10^9$  іонО/см<sup>3</sup> у порівнянні з режимом взаємодії «АК — поліімід» на VLEO (~250 км) при середньому рівні сонячної активності [9] ( $E_{AK}^{(N)} \approx 4.5$  еВ;  $R_{ek} \approx 3 \cdot 10^{-24}$  см<sup>3</sup>/атомО і  $N_{AK}^{(N)} \approx 10^9$  атом/см<sup>3</sup>) коефіцієнт прискорення дорівнює  $K_{прс} \approx 917$ . Річний цикл взаємодії «АК — поліімід» на VLEO відтворюються на стенді за  $t^{(M)} \approx 9.6$  год. При цьому флюенс іонів АК дорівнює  $F_{iAK}^{(M)} \approx 6.8 \cdot 10^{20}$  іонО/см<sup>2</sup>. Тобто, режим на стенді при  $F_{iAK}^{(M)} \approx 6.8 \cdot 10^{20}$  іонО/см<sup>2</sup> еквівалентний режиму взаємодії «АК — поліімід» на висоті 250 км при флюенсі  $F_{AK}^{(N)} \approx 2.34 \cdot 10^{22}$  атом/см<sup>2</sup>. Ця величина узгоджується із значенням річного флюенсу АК на висоті 250 км [9], який обчислено за формулою:  $F_{AK}^{(N)} = N_{AK} \cdot U_{AK} \cdot t = 2.37 \cdot 10^{22}$  атомО/см<sup>2</sup>.

## 7. ВИСНОВКИ

Розроблено процедури прискорення стендових ресурсних випробувань полімерних матеріалів

КА на стійкість до тривалого впливу гіпертеплого атомарного кисню в атмосфері Землі у потоках розрідженої плазми атомарних іонів з енергіями 30...100 еВ з використанням полііміду kapton-H (або його аналогів) як еталонний матеріал.

За результатами аналізу льотних випробувань на ОС «Мир», МКС, КА «Space Shuttle», «Spot-1», «Spot-2», «Spot-4» та ін., а також стендових випробувань, зокрема стендових випробувань авторів, отримано значення комплексу параметрів, які характеризують взаємодію полііміду kapton-H з потоками швидких атомарних іонів кисню з енергією  $E_{iAK} > 4.5$  еВ. Визначено залежності комплексу параметрів від флюенсу АК:

- шорсткості,
- коефіцієнта поглинання сонячного випромінювання,
- коефіцієнта випромінювання полімеру (ступінь чорноти) в ІЧ-діапазоні,
- коефіцієнтів передачі нормального, тангенціального імпульсу і енергії АК при зіткненні частинок з поверхнею від кута опромінювання елемента поверхні полімеру kapton-H.

Залежності дозволяють прогнозувати зміну комплексу параметрів полііміду при тривалій експлуатації на висотах 150...800 км, а також можуть використовуватися як еталонні значення при тестових випробуваннях полімерних конструкційних матеріалів на їхню стійкість до тривалого впливу АК.

## REFERENCES

1. Allegri G., Corradi S., Marchetti M., Milinchuk K. (2003). On degradation of polymeric thin films in LEO Space Environment. *Proc. 9th Int. Symp. Materials*, 255—264.
2. Balmain K. G., Dubois G. R. (1979). Surface discharges on Teflon, Mylar and kapton. *IEEE Trans. Nuclear Sci.*, **NS-26**, № 6, 5146—5151.
3. Banks V. 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 polymers. *J. Spacecraft and Rockets*, **48**, № 1, 14—22. doi: 10.2514/1.48849.
4. Banks V. A., Waters D. L., Thorson S. D., de Groh K. K., Snyder A., Miller S. K. (2006). Comparison of atomic oxygen erosion yields of materials at various energy and impact angles. *NASA/TM—2006-214363*, 7 p.
5. Behrisch R. (1983). *Sputtering by practical bombardment II*. Berlin-Heidelberg-New York-Tokio: Springer Verlag, 410 p.
6. Bitetti G., Marchetti M., Mileti S., Valente F., Scaglione S. (2007). Degradation of the surfaces exposed to the space environment. *Acta Astronautica*, **60**, № 3, 166—174. doi: 10.1016/j.actaastro.2006.07.019
7. Chen L., Lee C. H. (2006). Interaction potential between atomic oxygen and polymer surface in low Earth orbit. *J. Spacecraft and Rockets*, **43**, № 3, 487—496. doi: 10.2514/1.13373
8. Duo S., Li M., Zhou Y. (2006). Effect of ion implantation upon erosion resistance of polyimide films in space environment. *Trans. Nonferrous Metals Soc. China*, **16**, № 2, s661—s664. doi: 10.1016/S1003-6326(06)60273-2
9. *ECSS-10-04 A*. (2009). Space Environment. ESA-ESTEC. 219 p.

10. Gonzalez R. I., Tomczak S. J., Minton T. K., Brunsvold A. L., Hoflund G. B. (2003). Synthesis and atomic oxygen erosion testing of space survivable POSS (polyhedral oligomeric silsesquioxane) polyimides. *Proc. 9th Int. Symp. Materials in a Space Environment*, 113–120.
11. Goodman F. O., Wachman H. Y. (1976). *Dynamics of gas-surface scattering*. New-York, San Francisco, London: Academic Press, 342 p.
12. Goto A., Imeda K., Yukumatsu K., Kimoto Y. (2021). Property changes in materials due to atomic oxygen in the low Earth orbit. *CEAS Space J.*, **13**, № 3, 415–432. doi: 10.1007/s12567-021-00376-2
13. Grossman E., Gouzman I. (2003). Space environment effects on polymers in low Earth orbit, Nuclear. *Instruments and Methods in Phys. Res.*, **B.208**, 48–57. doi: 10.1016/S0168-583X(03)00640-2
14. Grossman E., Gouzman I., Lemper G., Noter Y., Lifshitz Y. (2004). Assessment of atomic oxygen flux in Low-Earth-Orbit ground simulation facilities. *J. Spacecraft and Rockets*, **41**, № 3, 356–359. doi: 10.2514/1.10890.
15. Koontz S. L., Leger L.J., Rickman S.L. (1995). Oxygen interaction with material III-mission and induced environment. *J. Spacecraft and Rockets*, **32**, № 3, 475–495. doi: 10.2514/3.26640.
16. Kuvaldina E. V., Lyubimov V. K., Rybkin V. V. (1992). Velocity constant and probability of interaction of atomic oxygen with polyimide films. *High Energy Chemistry*, **26**, 475–478.
17. Lian R., Lei X., Xue S., Chen Y., Zhang Q. (2021). Janus polyimide films with outstanding AO resistance, good optical transparency and high mechanics strength. *Appl. Surface Sci.*, **535**, 147654. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147654
18. Miller S. K., Dever J. A. (2011). Materials International Space Station experiment 5 polymers films thermal control experiment. *J. Spacecraft and Rockets*, **48**, № 2, 240–245. doi: 10.2514/1.49482.
19. Naddaf M., Balasubramanin C., Alegaonkar P. S., Bhoraskar V. N., Mandel A. B., Ganeshan V., Bhoraskar S. V. (2004). Surface interaction of polyimide with oxygen ECR plasma. *Nucl. Instruments and Meth. Phys. Res.*, **B222**, № 1-2, 135–144. doi: 10.1016/j.nimb.2003.12.087
20. Paillons A. (1987). Spacecraft surface exposure to atomic oxygen in LEO. *Technol. Environment Spatial*. Toulouse: ESA, 353–375.
21. Roussel J. F., Alet I., Fage D., Pereira A. (2004). Effect of space environment on spacecraft surfaces in sun-synchronous environment. *J. Spacecraft and Rockets*. **41**, № 5, 812–820. doi: 10.2514/1.1211
22. Shimamura H., Miyazaki E. (2009). Investigation into synergistic effects of atomic oxygen and vacuum ultraviolet. *J. Spacecraft and Rockets*, **62**, № 2, 241–247. doi: 10.2514/1.31815
23. Shuvalov V. A., Gorev N. A., Tokmak N. A., Kochubei G. S. (2017). Physical simulation of the long-term dynamic action of a plasma beam on a space debris object. *Acta Astronautica*, **132**, 97–102. doi: 10.1016/j.actaastro.2016.11.039
24. Shuvalov V. A., Reznichenko N. P., Tsokur A. G., Nosikov S. V. (2016). Synergetic effects of the action of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation on polymers in the Earth's ionosphere. *High Energy Chemistry*. **50**, 171–176. doi: 10.1134/S0018143916030140
25. Tagawa M., Doi H., Yokota K. (2009). Atomic oxygen concentrators for material exposure acceleration test in low Earth orbit. *J. Spacecraft and Rockets*, **46**, № 2, 226–229. doi: 10.2514/1.30866
26. 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, 203–211. doi: 10.1016/j.actaastro.2006.12.043
27. Vezker R., Grossman E., Gouzman I., Eliaz N. (2007). Residual stress effects on degradation of polyimide under simulated hypervelocity space debris and atomic oxygen. *Polimer*, **18**, № 1, 19–24. doi: 10.1016/j.polymer.2006.10.035
28. Waters D. L., Banks B. A., Thorson S. D., de Groh K. K., Miller S. K. (2007). Comparison of the atomic oxygen erosion depth and cone height of various materials at hyperthermal energy. *NASA/TM-2007-214374*, 6 p.
29. Yokota K., Seikyu S., Tagawa M., Ohmae N. (2003). A quantitative study in synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment. *Proc. 9th Int. Symp. on Materials*, 265–272.
30. Yokota K., Tagawa M. (2007). Comparison polyethylene and polyimide as a fluence monitor of atomic oxygen. *J. Spacecraft and Rockets*, **44**, № 2, 434–439. doi: 10.2514/1.15038
31. Zangwill A. (1988). *Physics at surface*. Cambridge, New-York: Cambridge University Press, 454 p.
32. Zimcik D. G., Maag C. R. (1988). Results of apparent oxygen reactions with spacecraft materials during Shuttle Flight STS-41 G. *J. Spacecraft and Rockets*, **25**, № 2, 162–168. doi: 10.2514/3.25965
33. Zimcik D. G., Wertheimer M. R., Balmain K. B., Tennyson R. C. (1991). Plasma-deposited protective coating for spacecraft applications. *J. Spacecraft and Rockets*, **28**, № 6, 652–637. doi: 10.2514/3.26295

Стаття надійшла до редакції 13.07.2023

Після доопрацювання 31.01.2024

Прийнято до друку 31.01.2024

Received 13.07.2023

Revised 31.01.2024

Accepted 31.01.2024

*V. O. Shuvalov*, Head of the Department, Dr. Sci. in Tech., the Winner of State Awards of Ukraine, the Laureate of the M. K. Yangel Prize of the Presidium of the NAS of Ukraine

ORCID: 0000-0002-6640-6041

E-mail: vashuvalov@ukr.net

*M. I. Pismennyi*, Researcher

ORCID: 0000-0002-3287-8745

E-mail: pismennnyi.m.i@nas.gov.ua

*M. A. Tokmak*, Researcher

ORCID: 0000-0001-9525-4545

E-mail: Tokmak.m.a@nas.gov.ua

*S. M. Kulagin*, Senior Researcher, Ph. D. in Tech., Senior Research Officer

ORCID: 0000-0002-2862-5809

E-mail: Kulahin.S.M@nas.gov.ua

*M. P. Reznichenko*, Junior Researcher

ORCID: 0000-0001-6151-4089

E-mail: Riznychenko.M.P@nas.gov.ua

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

#### **SIMULATION SPACECRAFT POLYMERS — ATOMIC OXYGEN INTERACTION AT LOW ORBIT IN THE EARTH'S ATMOSPHERE**

The paper represents procedures developed for the simulation of the interaction of polymers, which are the spacecraft structure materials, with the flows of hyperthermal atomic oxygen (AO) at very low-Earth orbits (VLEOs) by use of high-energy ions of a rarefied plasma. The development is based on laboratory and space test data (the Mir orbital station, the ISS, the Space Shuttle, and Spot 1, 2, 4). The parameters that characterize the physicochemical and dynamic interaction of atomic oxygen flow with the spacecraft structure's polymers are determined, such as erosion yield, solar absorptance, momentum and energy accommodation coefficients, and also erosion depth and surface roughness polymer film. The parameters of the «AO — polymer» interaction are reported as a function of energy and AO fluence. The use of AO ion flows for energies 30...100 eV allows one to simulate an interaction of «AO — polymers» at altitudes 170...300 km (VLEOs) in the Earth's atmosphere.

**Keywords:** polymer, fluence, erosion depth, surface roughness, atomic oxygen, momentum and energy transport coefficients.