УДК 533.9 https://doi.org/10.15407/itm2021.02.036

В. О. ШУВАЛОВ, Ю. П. КУЧУГУРНИЙ, М. І. ПИСЬМЕННИЙ, С. М. КУЛАГІН

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ З ІОНОСФЕРНОЮ РОЗРІДЖЕНОЮ ПЛАЗМОЮ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: vashuvalov@ukr.net

Розроблено принципи моделювання фізико-хімічної і електромагнітної взаємодії космічного апарата (КА) з навколосупутниковим середовищем в іоносфері Землі та зондової діагностики потоків розрідженої плазми з борту КА. Сформульовано критерії еквівалентності взаємодії КА з навколосупутниковим середовищем і гіперзвуковими потоками розрідженої плазми на спеціалізованих стендах, зокрема, на плазмоелектродинамічному стенді Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, який має статус «науковий об'єкт – національне надбання України». Дослідження особливостей взаємодії КА з навколосупутниковим середовищем виконано за трьома напрямками:

– деградація матеріалів і функціональних характеристик елементів конструкцій КА при тривалій експлуатації на орбіті;

– магнітогідродинамічна взаємодія КА з гіперзвуковими потоками розрідженої плазми;

– зондова діагностика потоків розрідженої плазми на борту КА.

В рамках першого напрямку досліджень розроблено розрахунково-експериментальну процедуру оцінки спаду електричної потужності кремнієвих сонячних батарей космічного апарата при тривалій дії (~10 років) комплексу факторів космічного простору і навколосупутникового середовища на кругових орбітах. Розроблено принципи прискорених ресурсних випробувань на стійкість полімерних матеріалів КА до тривалої дії потоків атомарного кисню (АК) і вакуумного ультрафіолетового випромінювання (ВУФ). Синхронне опромінювання полімерів потоками АК+ВУФ створює синергетичний ефект втрати маси матеріалами, що містять в структурі мономер групи $(CH)_n$.

В рамках другого напрямку сформульовано моделі магнітогідродинамічної взаємодії в системі «намагніченого» КА з іоносферною плазмою. Показано, що при взаємодії власного магнітного поля КА (індукція ~(0,8 – 1,5) Тл) з іоносферною плазмою виникає електромагнітна сила, придатна для примусового гальмування КА, зокрема, об'єкта космічного сміття, відведення його на низьку орбіту для утилізації при згоранні в щільних шарах атмосфери Землі.

В рамках третього напрямку розроблено процедури зондової діагностики іоносферної плазми з використанням бортової наукової апаратури, яка включає взаємно ортогональні електричні циліндричні зонди і двоканальний детектор нейтральних частинок. Показано, що бортовий комплекс такої наукової апаратури з використанням алгоритмів і процедур інтерпретації вихідних сигналів (розроблених в інституті) дозволяє ідентифікувати локалізацію джерел просторово-часових збурень параметрів іоносферної плазми, обумовлених природними і техногенними катастрофічними явищами на підсупутниковій трасі.

Ключові слова: *космічний апарат, іоносферна плазма, моделювання, взаємодія, деградація, сила опору, діагностика.*

Principles of simulation of the physical-chemical and electromagnetic interaction of a spacecraft with the near-satellite environment and principles of probe diagnostics of rarefied plasma flows onboard a spacecraft are stated. Equivalence criteria are formulated for the interaction of a spacecraft with the near-satellite environment and hypersonic rarefied plasma flows on dedicated setups, in particular on the plasmaelectrodynamic setup of the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, which has the status of the National Patrimony of Ukraine. The features of spacecraft interaction with the near-satellite environment were studied along the following three lines:

– degradation of the materials and performance characteristics of spacecraft components in a long-term orbital service:

– magnetohydrodynamic interaction of a spacecraft with hypersonic rarefied plasma flows;

– probe diagnostic of rarefied plasma flows onboard a spacecraft.

Along the first line, a calculation-and-experiment procedure was developed to evaluate the power decrease of spacecraft silicon solar panels under long-term (~ 10 years) exposure to the space factors and the near-satellite environment in circular orbits. Principles of accelerated life tests for the resistance of spacecraft polymer materials to long-term exposure to atomic oxygen flows and vacuum ultraviolet radiation were developed. Simultaneous exposure of polymers to atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation results in the synergic effect of mass loss by materials that contain a monomer of the $(CH)_n$ group.

Along the second line, models were formulated for magnetohydrodynamic interaction in the magnetized spacecraft – ionospheric plasma system. It was shown that the interaction of a ~0,8 – 1.5 T magnetic field of a space debris object (in particular, a spent spacecraft) with the ionospheric plasma produces an electromagnetic drag force sufficient for removing it to a low orbit followed by its burn-up in the dense atmosphere.

Along the third line, procedures were developed for ionospheric plasma probe diagnostics using onboard in-

strumentation that includes mutually orthogonal cylindrical electrical probes and a two-channel neutral-particle detector. It was shown that this instrumentation with the use of proprietary output signal interpretation algorithms and procedures allows one to locate sources of space-time disturbances in inospheric plasma parameters caused by natural and technogeneous catastrophic phenomena on the subsatellite track.

Keywords: *spacecraft, ionospheric plasma, simulation, interaction, degradation, drag orce, diagnostics.*

Вступ. Фізичне (стендове) і числове моделювання взаємодії космічних апаратів (КА) з потоками розрідженої плазми в іоносфері Землі включає дослідження за трьома напрямками:

– стійкість матеріалів і елементів конструкцій до тривалого впливу факторів космічного простору (деградація фізичних, механічних, електрофізичних і термооптичних властивостей матеріалів);

– розробка методів, засобів і апаратурного забезпечення діагностики потоків нерівноважної розрідженої замагніченої плазми в іоносфері Землі та на спеціалізованих стендах;

– аеродинаміка і теплообмін КА, елементів конструкцій в гіперзвукових потоках іоносферної плазми (вплив зарядового стану; зовнішнього і власного магнітного полів; рельєфу поверхонь на аеродинамічні та теплофізичні характеристики КА).

Деградація функціональних характеристик матеріалів і елементів конструкцій КА при тривалій дії навколосупутникового середовища.

Одним з напрямків забезпечення тривалої експлуатації КА в іоносфері Землі є прогнозування деградації функціональних характеристик матеріалів і елементів конструкції через дію навколишнього середовища на орбіті. Фізичне моделювання тривалої дії комплексу факторів космічного простору на плазмоелектродинамічному стенді Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України (ІТМ НАНУ і ДКАУ) включає: високий вакуум ~ 10^{-5} Н/м^2; ультрафіолетове випромінювання (УФ) у діапазоні ~ 100 нм – 200 нм; термоциклювання ±100º С; надзвукові потоки плазми атомарного кисню (АК); потоки високоенергійних електронів ~ 35 еВ.

Спад електричної потужності кремнієвих панелей сонячних батарей

Умови фізичного (стендового) моделювання тривалого впливу факторів навколосупутникового середовища на панелі сонячних батарей (СБ) космічних апаратів представлено в таблиці.

Фактори навколосупутникового середовища	Умови фізичного моделювання
Іонізуюче випромінювання (високоенергійні протони H^+; електрони радіаційних полюсів Землі).	Рівність еквівалентних флюенсів F_{eh} електронів з енергією $E_{eh} \approx 1$ МеВ.
Термоциклювання ±100º С	Рівність кількості термоциклів N_T і розмахів термоциклів ΔT_W .
Радіаційна електризація.	Рівність енергій $3\text{кеВ} \le E_{eh} \le 20\text{кеВ}$ і флюенсів F_{eh} електронів.
Плазмові струмені електрореактивних двигунів КА.	Рівність питомих зарядів σ.
Забруднення захисного скла СБ.	Рівність коефіцієнтів поглинання сонячного випромінювання α_s .
Ультрафіолетове випромінювання сонячного спектру.	Рівність густини потоків УФ-випромінювання Φ_ν і довжини хвилі λ_ν .

Інтегральна характеристика спаду електричної потужності $\Delta P_{\Sigma}(t)$ сонячних батарей КА відносно початкової потужності P_0

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}(t)}{P_0} = \sum_{i=1}^{m} k_i \frac{\Delta P_i(t)}{P_0} = \sum_{i=1}^{m} k_i \left[1 - \frac{P_i(t)}{P_0}\right],$$

де m – кількість факторів навколосупутникового середовища; k_i – коефіцієнт впливу окремих факторів ($0 \le k_i \le 1$); t – термін експлуатації; $P_i(t)$ – залежність електричної потужності СБ від часу при дії i -го фактору.

На рис. 1 представлено розрахункові залежності спаду інтегральної електричної потужності $\Delta P_{\Sigma}(t)/P_0$ кремнієвих сонячних батарей КА на геостаціонарній орбіті при тривалій ($t \approx 10$ років) дії факторів навколоспутникового середовища. На рисунку суцільними лініями показано розрахункові значення $\Delta P_{\Sigma}(t)/P_0$ для факторів: 1 – термоциклювання; 2 – забруднення захисного скла; 3 – іонізуюче випромінювання; 4 – електризація; 5 – інтегральний вплив факторів. Значками показано дані супутникових вимірювань на геостаціонарній орбіті (40000 км): квадратики – штучний супутник Землі (ШСЗ) серії «Intelsat-II»; світлі кружки – ШСЗ IDSCS-II (за мінімумом струму короткого замикання); світлі ромбики – стендові вимірювання [1], хрестики — ШСЗ ATS-6 [7], темні ромбики – ШСЗ LES-6; темні кружки – оцінки [2]; темний трикутник – ATS-5; зірочка – ШСЗ «Intelsat-I» (штрихи відповідають граничним значенням для частини незахищеної поверхні СБ от 0,2 % до 5,6 %); світлі трикутники — оцінки НАСА.

Розроблена розрахунково-експериментальна процедура дозволяє прогнозувати спад електричної потужності кремнієвих СБ ($\Delta P_{\Sigma}(t)/P_0$) в кожний момент часу протягом терміну 10-ти річної експлуатації батарей на орбіті з урахуванням впливу кожного з факторів космічного простору та навколосупутникового середовища [3].

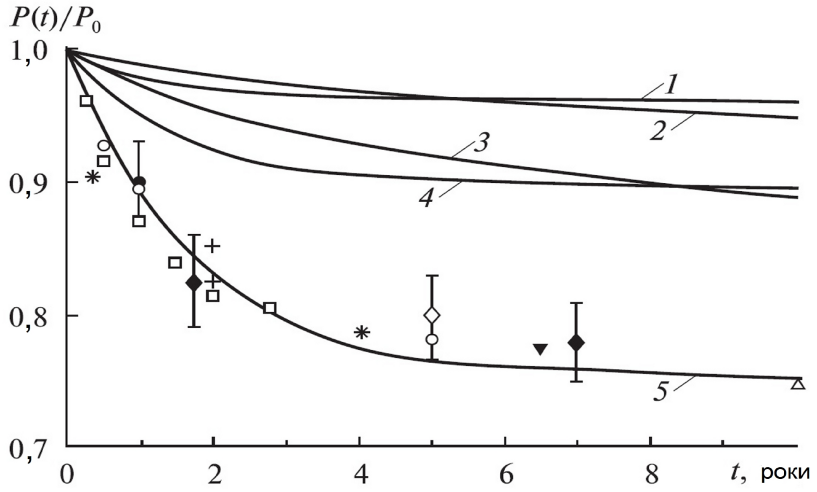


Рис. 1 – Спад інтегральної електричної потужності кремнієвих сонячних батарей на протязі 10 років на геостаціонарних орбітах

Деградація полімерних матеріалів КА при тривалій дії атомарного кисню в іоносфері Землі

Фізичне моделювання умов експлуатації полімерних матеріалів при тривалій дії потоків атомарного кисню в іоносфері Землі і на спеціалізованих стендах мають відповідати критеріям еквівалентності:

– рівність питомої втрати маси $\Delta M_w^{(N)} = \Delta M_w^{(M)}$;

– рівність флюенсів атомарного кисню $F_{AK}^{(N)} = F_{AK}^{(M)}$;

де індекси означають: «*N*» – умови експлуатації в іоносфері, «*M*» – умови в потоці плазми на стенді.

З урахуванням критеріїв еквівалентності, коефіцієнту реакційної здатності R_{ek} еталонного полімеру kapton-H для коефіцієнта прискорення ресурсних випробувань τ_y і коефіцієнта реакційної здатності R_{ew} полімеру, що випробовується, маємо

$$\tau_y = t^{(N)} / t^{(M)} = \frac{N_{iAK}^{(M)}}{N_{AK}^{(N)}} \left(\frac{E_{iAK}^{(M)}}{E_{AK}^{(N)}} \right)^{0,5} \frac{R_{ew}\left(E_{iAK}^{(M)}\right)}{R_{ek}\left(E_{AK}^{(N)}\right)},$$

$$R_{ew}\left(E_{AK}^{(N)}\right) = R_{ek}\left(E_{AK}^{(N)}\right) \frac{\delta x_w\left(E_{iAK}\right)}{\delta x_k\left(E_{iAK}\right)},$$

де N_{AK}, E_{AK} – концентрація і енергія атомів кисню; N_{iAK}, E_{iAK} – концентрація і енергія іонів АК; δx – зменшення товщини зразка матеріалу; t – термін експозиції; індекси: «*N*» характеризує умови експлуатації в іоносфері, «*M*» – в потоці плазми на стенді; «*w*» – матеріал, що випробовується; «*k*» – еталонний полімер kapton H.

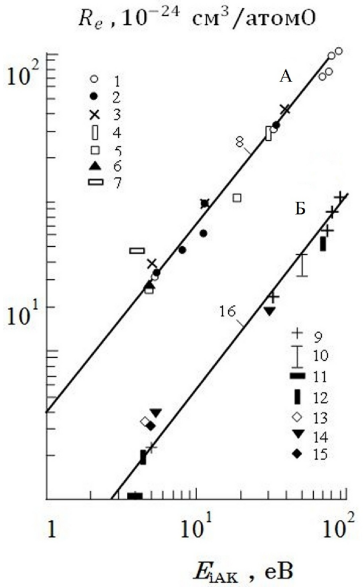


Рис. 2 – Вплив енергії іонів АК на реакційну здатність полімерів см^3/атомО

На рис. 2 представлено залежності коефіцієнтів реакційної здатності полімерів поліміду kapton-H і тефлону FEP-100A від енергії іонів АК.

Позначки на рисунку: лінія А – дані для поліміду kapton-H (хімічна формула $C_2H_{10}O_5N_2$): 1 – вимірювання авторів при енергії іонів E_{iAK} = 5 еВ; 31,6 еВ; 70 еВ; 75 еВ; 80 еВ; 90 еВ; 2, 3, 4, 5, 6, 7 – значення з [4]; 8 – апроксимація авторів $R_{ek} = 0{,}4(\alpha_i E_{iAK})^{1{,}68} \cdot 10^{-24}$ см^3/атомО ($\alpha_i = 1$ еВ$^{-1}$);

лінія Б – дані для тефлону FEP-100A (хімічна формула $(C_2F_4)_n$): 9 – вимірювання авторів; 10, 11, 12, 13, 14, 15 – значення з [4]; 16 – апроксимація авторів $R_{eFEP} \approx 0{,}3(\alpha_i E_{iAK})^{1{,}68} \cdot 10^{-25}$ см^3/атомО.

Розроблено процедуру прискорення ресурсних випробувань полімерних матеріалів КА на стійкість їх до тривалої дії атомарного кисню в іоносфері Землі. Процедура

включає два режими випробувань: перший – опромінювання полімерних плівок іонами АК з енергією 5 еВ при концентрації іонів більшій, ніж концентрація АК в іоносфері; другий – опромінювання полімерів високоенергійними (30 еВ – 100 еВ) іонами АК і використання поліміду kapton-H в якості еталонного матеріалу. Показано, що коефіцієнт прискорення ресурсних випробувань при опромінюванні поліміду kapton-H іонами АК з енергіями в діапазоні 30 еВ – 100 еВ на 2 порядки більший за коефіцієнт прискорення при опромінюванні полімеру іонами АК з енергією 5 еВ [4]. При стендових випробуваннях: $E_{iAK} = 80$ еВ, $N_{iAK} \sqcup 4\times10^{9}$ см$^{-3}$, $t^{(M)} \sqcup 3$ год $=1{,}08\times10^{4}$ с, флюенс $F_{AK}\left(E_{iAK}\right) = 1{,}34\times10^{20}$ см$^{-2}$; тоді $R_{ek}\left(E_{iAK}\right) \approx 1{,}04\times10^{-22}$ см^{3}/атомО і $F_{AK}^{(N)}\left(E_{AK}^{(N)}\right) \sqcup 4{,}5\times10^{21}$ см$^{-2}$. В іоносфері флюенс $F_{AK}^{(N)} = 4{,}5\times10^{21}$ см$^{-2}$ ($E_{AK}^{(N)} =$ 5 еВ) при середньому рівні сонячної активності відповідає річній експозиції полімеру на висоті $h \approx 380$ км (Міжнародна космічна станція), коефіцієнт прискорення стендових випробувань kapton-H для режиму «2» дорівнює $\tau_{2y} \approx 3\times10^{3}$, а при опромінюванні полімеру іонами $E_{iAK} = 5$ еВ коефіцієнт прискорення для режиму «1» – $\tau_{1y} \approx 2\times10^{1}$.

Синергетичний ефект впливу атомарного кисню і вакуумного ультрафіолету на полімери в іоносфері Землі

Виявлено синергетичний ефект при одночасній дії потоків атомарного кисню і вакуумного ультрафіолету (АК+ВУФ) на матеріали полімерних покриттів КА. Встановлено, що синергетичний ефект має місце при опромінюванні потоками АК+ВУФ полімерів, які мають в структурі мономери групи $(CH)_n$. Отримано граничні значення відносини Φ_ν потоку ВУФ до Φ_{AK} потоку АК, які характеризують синергетичний ефект впливу АК+ВУФ на втрату маси полімерами: для поліімідів $\Phi_\nu/\Phi_{AK} \geq 7{,}1\times10^{-15}$ мДж/атомО; для поліетилену – $\Phi_\nu/\Phi_{AK} \geq 4{,}3\times10^{-16}$ мДж/атомО. Для тефлону (FEP-100A), який має в структурі мономер $(CF)_n$, синергетичний ефект не виявлено. При середньому рівні сонячної активності області існування синергетичного ефекту впливу АК+ВУФ для поліімідів лежать вище ~600 км, для поліетилену – вище ~400 км [5].

На рис. 3 представлено залежність відносної втрати маси $\Delta m_{AK+ВУФ}/\Delta m_{AK}$ для поліміду kapton-H і поліетилену від співвідношення потоків Φ_ν/Φ_{AK}. На рисунку позначено: лінія А – поліміди: 1, 2 – вимірювання авторів (kapton-H, ПМ-1Е); 3, 4 – значення з [5], 5 – апроксимація авторів $\Delta m_{AK+ВУФ}/\Delta m_{AK} = 9{,}893\times10^{8}\,(\alpha\Phi_\nu/\Phi_{AK})^{0{,}636}$ ($\alpha = 1$ мДж$^{-1}$); лінія Б – поліетилен: 6 – вимірювання авторів; 7 – значення з [5]; 8 – апроксимація авторів $\Delta m_{AK+ВУФ}/\Delta m_{AK} = 1{,}216\times10^{7}\,(\alpha\Phi_\nu/\Phi_{AK})^{0{,}461}$.

Розроблено процедуру стендового моделювання фізико-хімічної взаємодії полімерів КА з потоками АК і вакуумного ультрафіолетового випромінювання в іоносфері Землі.

Моделювання магнітогідродинамічного гальмування КА в іоносфері Землі. Сформульовано моделі динамічної взаємодії намагніченого тіла с потоком іоносферної розрідженої плазми. Визначено залежності сили опору і

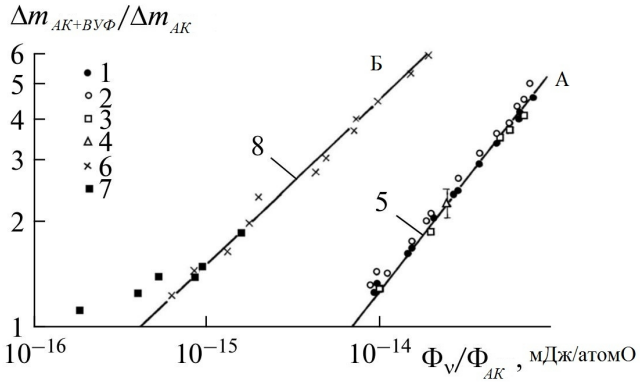


Рис. 3 – Втрати маси полімерів при впливі АК+ВУФ

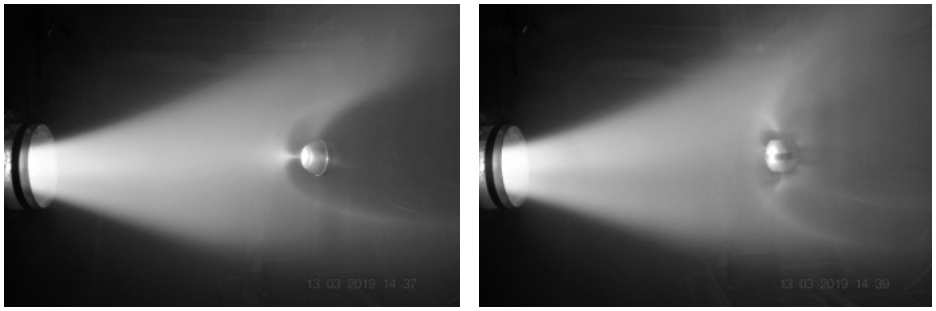
підйомної сили намагніченого тіла від взаємної орієнтації векторів $\vec{U}_\infty$ швидкості гіперзвукового потоку розрідженої плазми (польоту КА) та $\vec{B}_W$ індукції власного магнітного поля на поверхні КА в іоносфері Землі.

Розроблено процедури і схеми створення джерела власного магнітного поля КА, що створює поле з індукцією (0,8 – 1,5) Тл на поверхні КА, з використанням спеціально згрупованих міні-магнітів.

Встановлено:

1. Сфокусоване постійне магнітне поле намагніченого тіла формує в надзвуковому потоці розрідженої плазми зону збурення, структура якої відповідає моделі Чепмена–Ферраро (аналог – структура магнітосфери Землі в потоці плазми сонячного вітру). Структури зони збурення показано на рис. 4.

2. Суперпозиція декількох спеціально згрупованих міні-магнітів джерела власного магнітного поля збільшує величину магнітогідродинамічної сили опору КА в іоносфері Землі кратне кількості міні-магнітів (рис. 5) [6 – 8].



$\vec{U}_\infty \uparrow\downarrow \vec{B}_W$ $\qquad$ $\vec{U}_\infty \perp \vec{B}_W$

Рис. 4 – Обтікання намагніченої сфери гіперзвуковим потоком плазми

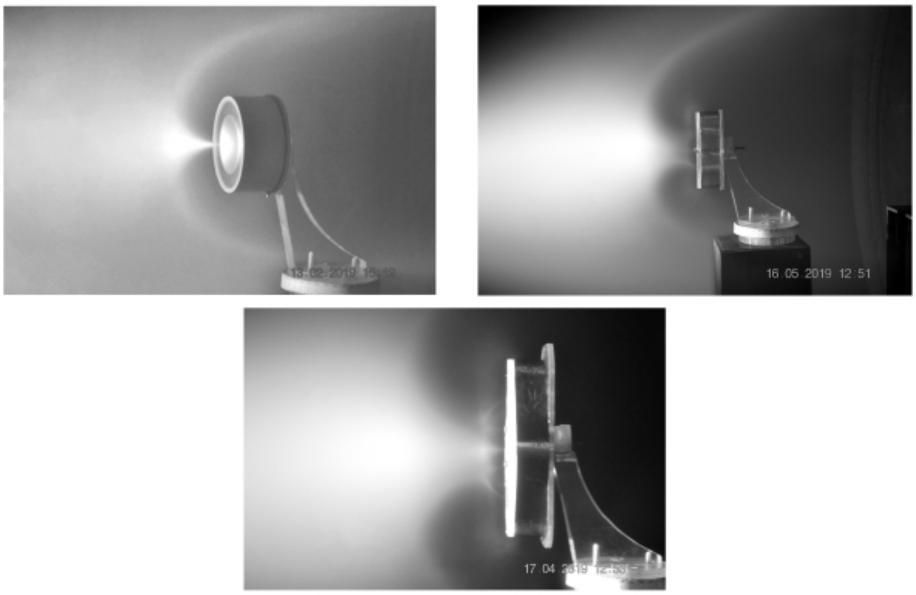


Рис. 5 – Джерела штучного магнітного поля з одним, двома та чотирма міні-магнітами в потоці плазми

3. Власне магнітне поле КА з індукцією (0,8 – 1,5) Тл здатне, при взаємодії з розрідженою іоносферною плазмою, генерувати магнітогідродинамічну силу, яка придатна для примусового гальмування об’єкта космічного сміття (ОКС), відведення його на низькі орбіти з утилізацією при згорянні в щільних шарах атмосфери Землі (очищення навколоземного простору від сміття).

Показано, що утилізацію об’єкта космічного сміття «Vespa» може бути здійснено шляхом примусового гальмування його магнітогідродинамічною силою опору (3,5 – 4) мН, яку здатний генерувати бортовий магніт з індукцією (0,8 – 1) Тл. З використанням магнітогідродинамічної сили утилізацію ОКС «Vespa» в щільних шарах атмосфери Землі може бути реалізовано за 100 діб при відведенні з висоти 800 км на висоту 150 км.

Діагностика і моніторинг параметрів навколосупутникової плазми. За результатами експлуатації бортової наукової апаратури відділу механіки іонізованих середовищ ІТМ НАНУ і ДКАУ на КА «Січ-2» розроблено процедури зондової діагностики іоносферної плазми та навколосупутникового середовища, інтерпретації вихідних сигналів приладів і алгоритми ідентифікації джерел просторово-часових збурень параметрів іоносферної плазми, обумовлених природними і техногенними катастрофічними явищами. Показано, що комплекс наукової апаратури, до якого входять детектори нейтральних DN і заряджених частинок DE, дозволять визначати комплекс кінетичних параметрів іоносферної розрідженої плазми, таких як: концентрація і температура електронів і нейтральних частинок. Комплекс кінетичних параметрів дозволяє ідентифікувати джерела збурення іоносферної плазми природного і техногенного походження.

Ефективність алгоритмів і процедур ідентифікації джерел збурень підтверджено визначенням закономірностей флуктуацій кінетичних параметрів, обумовлених впливом сонячної і геомагнітної активності, екваторіальної іонізаційної аномалії, магнітними бурами, сезонними флуктуаціями, аномалії в

морі Ведделла, авроральними овалами, а також сейсмічною активністю на підсупутниковій трасі (рис. 6) [9].

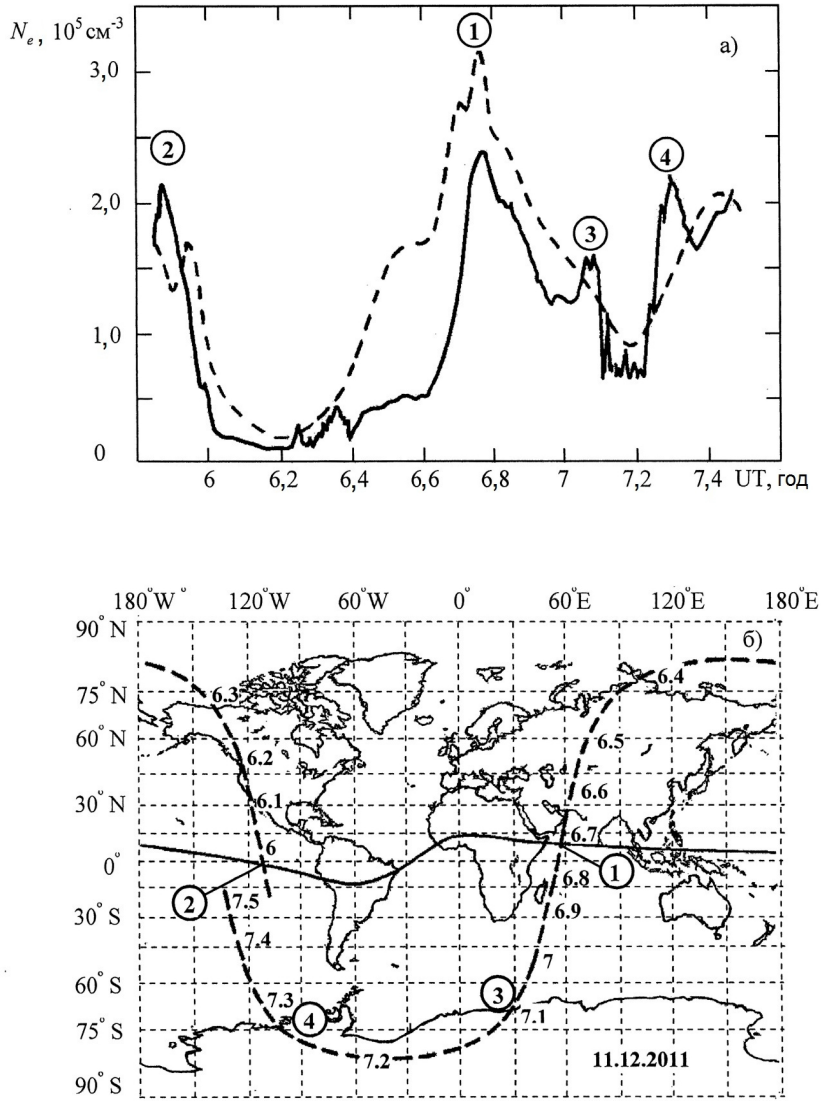
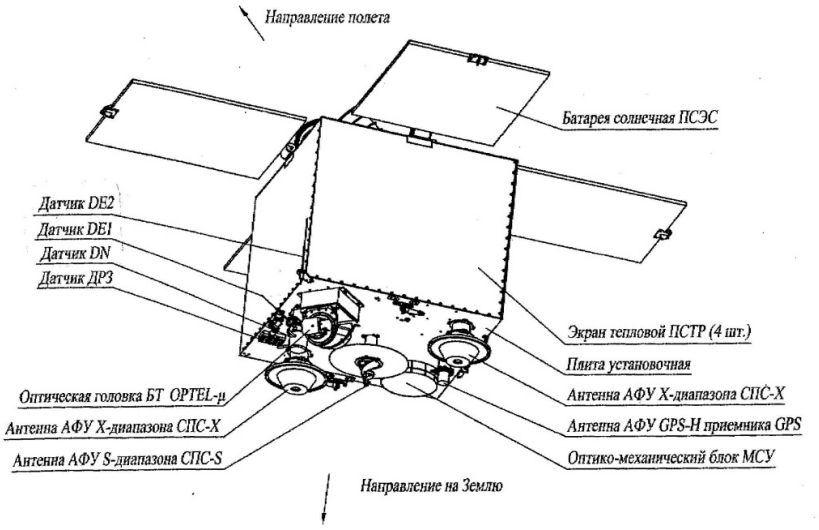


Рис. 6 – Реєстрація збурень концентрації електронів вдовж орбіти КА «Січ-2» апаратурою ІТМ НАНУ і ДКАУ

На рисунку 6, а) показано розподіл концентрації електронів N_e вздовж орбіти КА «Січ-2», маркерами 1, 2 – збурення, обумовлені впливом екваторіальної іонізаційної аномалії; 3, 4 – збурення, обумовленні аномалією моря Ведделла; суцільною лінією – вимірювання на КА «Січ-2» 11.12.2011; пунктирною лінією – розрахункові значення за міжнародною моделлю іоносфери IRI-2012. На рисунку 6, б) показано картографічну схему Землі, на якій пунктирною лінією означено підсупутникову трасу КА «Січ-2», вздовж якої маркерами 1, 2, 3, 4 – локалізацію джерел збурень N_e на підсупутниковій трасі; суцільною лінією показано магнітний екватор.

Розробка бортової наукової апаратури для КА і процедур зондової діагностики іоносферної плазми. Завдяки досвіду експлуатації комплексу наукової апаратури на «Січ-2» розроблено і виготовлено бортову наукову діагностичну апаратуру нового покоління DN-DE для дослідження кінетичних параметрів нейтральних та заряджених компонентів іоносферної плазми. Апаратуру інтегровано до космічного апарату «Січ-2-30».

Розміщення діагностичного блоку апаратури (комплексу DN-DE) на КА «Січ-2-30» – на плиті установочній – показано на рис. 7. На рис. 8 показано розроблений блок наукової апаратури нового покоління. На рисунках: DE – датчик заряджених частинок, DN – датчик нейтральних частинок, СЗНІ – система збору наукової інформації.



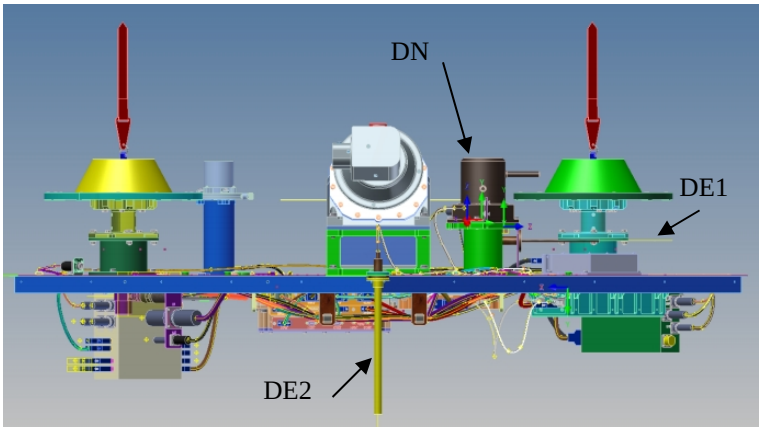


Рис. 7 – Розміщення діагностичного блоку апаратури на КА «Січ-2-30»

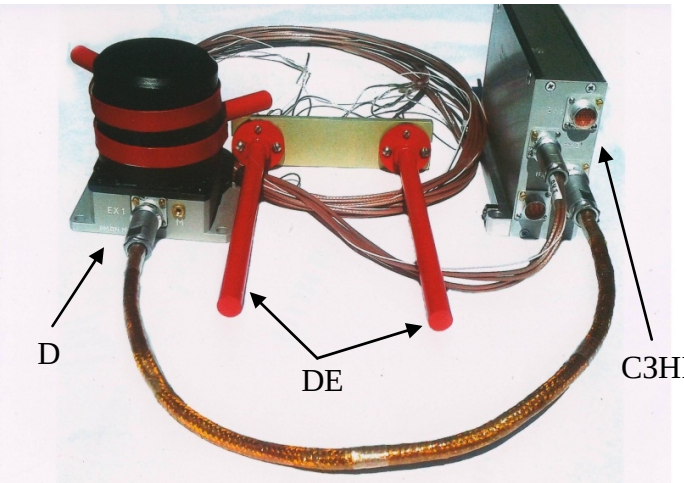


Рис. 8 – Блок наукової апаратури нового покоління для КА «Січ-2-30»

1. *Крейнин Л. Б., Григорьева Г. М.* Солнечные батареи в условиях воздействия космической радиации. Итоги науки и техники. Т. 13. Исследование космического пространства. М.: ВИНИТИ, 1979. 128 с.
2. *Раушенбах Г.* Справочник по проектированию солнечных батарей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
3. *Shuvalov V., Kuchugurnyi Yu., Lazuchenkov D.* Modeling the interaction of spacecraft with plasma flow, electromagnetic radiation, electric and magnetic fields in the Earth's ionosphere. Space research in Ukraine. 2018–2020 / Ed. by O. Fedorov. Kyiv: Akademperiodyka, 2021. P. 29–31.
4. *Shuvalov V. A., Pismennyi N. I., Reznichenko N. P., Kochubey G. S.* Simulation of the physicochemical effect of atomic oxygen of the Earth's ionosphere on polymers. High Energy Chemistry. 2021. V. 55, № 1. P. 52–58. https://doi.org/10.1134/S0018143921010124
5. *Shuvalov V. A., Reznichenko N. P., Tsokur A. G., Nosikov S. V.* Synergetic effect of the action of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation on polymers in the earth's ionosphere. High Energy Chemistry. 2016. V. 50, №. 3. P. 171–176. https://doi.org/10.1134/S0018143916030140
6. *Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Kuchugurnyi Yu. P., Reznichenko N. P.* Braking of a magnetized body at the interaction of its magnetic field with a rarified plasma flow. High Temperature. 2020. V. 58, № 2. P. 151–161. https://doi.org/10.1134/S0018151X20020182
7. *Shuvalov V. A., Gorev N. B., Tokmak N. A., Kuchugurnyi Y. P.* Drag on a spacecraft produced by the interaction of its magnetic field with the Earth's ionosphere. Physical modelling. Acta Astronautica. 2020. V. 166. P. 41–51. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.10.018
8. *Звіт про діяльність Національної академії наук України у 2020 році*. Київ: Академперіодика, 2021. 593 с.
9. *Shuvalov V., Lazuchenkov D., Gorev N., Kochubei G.* Identification of seismic activity sources on the subsatellite track by ionospheric plasma disturbances detected with the Sich-2 onboard probes. Advances in Space Research. 2018. № 61. P. 355–366. https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.001

Отримано .21.05.2021,
в остаточному варіанті 08.06.2021