УДК 533.9

В. А. ШУВАЛОВ, С. Н. КУЛАГИН, А. Г. ЦОКУР, Ю. П. КУЧУГУРНЫЙ, Н. П. РЕЗНИЧЕНКО, С. В. НОСИКОВ

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: yu.kuchugurnyi@gmail.com

Дан короткий аналіз результатів досліджень, виконаних у відділі механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, з проблем фізичного моделювання взаємодії космічних апаратів (КА) з ионосферной плазмою і впливу на КА комплексу факторів космічного простору (ФКП). Фізичне моделювання є ефективним засобом для відтворення спектру основних процесів і явищ, супроводжуючих експлуатацію КА на орбіті і ініційованих впливом комплексу ФКП, особливо впливом гіперзвукових потоків розрідженої плазми, атомарного кисню і ультрафіолетового сонячного випромінювання. Для моделювання умов функционування КА в іоносфері Землі на висотах від 150 км до 40000 км розроблено і створено плазмоелектродинамічний стенд, що поєднує властивості плазмової аеродинамічної труби і вакуумної безлунної камери. На стенді проведено дослідження в рамках виконання наукових програм і робіт по створенню і експлуатації ряду виробів ракетно-космічної техніки. Досліджено спотворення радіовідбиттів від елементів конструкцій КА штучнимими плазмовими утвореннями. Вивчені процеси радіаційної електризації елементів конструкції КА. Розроблено методики проведення прискорених ресурсних випробовувань полімерних і композитних матеріалів при дії потоків атомарного кисню і вакуумного ультрафіолетового випромінення. Проведено моделювання дії комплексу факторів навколосупутникового середовища на сонячні батареї, внаслідок якої відбувається втрата електричної потужності і скорочення ресурсу батарей. Фізичне моделювання на основі прискорених ресурсних випробувань дозволяє відтворювати умови тривалої експлуатації КА: процеси деградації, зміни електрофізичних, термо-оптичних, енергетичних і масогабаритних характеристик матеріалів і покриттів елементів конструкції КА. Отримані в результаті моделювання залежності темпів деградації властивостей матеріалів і робочих систем КА від часу впливу ФКП на орбіті дозволяють прогнозувати стан матеріалів та елементів конструкцій, технічних систем КА в будь-який момент часу експлуатації і можуть бути використані на етапі проектування КА.

Дан краткий анализ результатов исследований, выполненных в отделе механики ионизированных сред Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, по проблемам физического моделирования взаимодействия космических аппаратов (КА) с ионосферной плазмой и воздействия на КА комплекса факторов космического пространства (ФКП). Физическое моделирование является эффективным средством для воспроизведения спектра основных процессов и явлений, сопровождающих эксплуатацию КА на орбите и инициированных воздействием комплекса ФКП, особенно воздействием гиперзвуковых потоков разреженной плазмы, атомарного кислорода и ультрафиолетового солнечного излучения. Для моделирования условий функционирования КА в ионосфере Земли на высотах от 150 км до 40000 км разработан и создан плазмоэлектродинамический стенд, совмещающий свойства плазменной аэродинамической трубы и вакуумной безэховой камеры. На стенде проведены исследования в рамках выполнения научных программ и работ по созданию и эксплуатации ряда изделий ракетно-космической техники. Исследовано искажение радиоотражений от элементов конструкций КА искусственными плазменными образованиями. Изучены процессы радиационной электризации элементов конструкции КА. Разработаны методики проведения ускоренных ресурсных испытаний полимерных и композитных материалов при воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения. Проведено моделирование воздействия комплекса факторов околоспутниковой среды на солнечные батареи, вследствие чего происходит потеря электрической мощности и сокращение ресурса батарей. Физическое моделирование на основе ускоренных ресурсных испытаний позволяет воспроизводить условия длительной эксплуатации КА: процессы деградации, изменения электрофизических, термо-оптических, энергетических и массогабаритных характеристик материалов и покрытий элементов конструкции КА. Полученные в результате моделирования зависимости темпов деградации свойств материалов и рабочих систем КА от времени воздействия ФКП на орбите позволяют прогнозировать состояние материалов и элементов конструкций, технических систем КА в любой момент времени эксплуатации и могут быть использованы на этапе проектирования КА.

This paper briefly overviews the results of the investigations into problems of physical simulation of space-craft – ionospheric plasma interaction and spacecraft exposure to a complex of space factors conducted at the Department of Ionized Media Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space

Agency of Ukraine. Physical simulation is an efficient means to reproduce the spectrum of the basic processes and phenomena that accompany the spacecraft operation in orbit and are initiated by exposure to the complex of space factors, especially to hypersonic rarefied plasma and atomic oxygen flows and solar ultraviolet radiation. To simulate the spacecraft operation conditions in the ionosphere at altitudes of 150 km to 40,000 km, a plasmaelectrodynamic setup was developed and made. The setup combines the properties of a plasma wind tunnel and a vacuum anechoic chamber. The setup served to conduct investigations as part of scientific programs and the development and operation of a number of space hardware products. The distortion of radio reflections from spacecraft structural elements by artificial plasma formations was studied. Processes of radiative electrization of spacecraft structural components were studied. Techniques were developed for accelerated life tests of polymer and composite materials under exposure to atomic oxygen flows and vacuum ultraviolet radiation. Physical simulation based on accelerated life tests allows one to reproduce the conditions of a long-term spacecraft operation: the behavior and degradation of the electrophysical, thermooptical, energy, and mass-and-dimension characteristics of spacecraft structural materials and coatings. Solar battery exposure to the complex of near-satellite environment factors, which results in power loss and a shorter life, was simulated. The resulting spacecraft material property and system operation degradation rate vs. space factor exposure time relationships allow one to predict the spacecraft material, structural component, and technical system state at any time during the spacecraft operation and may be used at the spacecraft design stage.

Ключевые слова: *космический аппарат, ионосфера, плазма, физическое моделирование, плазмоэлектродинамический стенд.*

Введение. Взаимодействие космических аппаратов (КА) с околоспутниковой средой в ионосфере Земли характеризует гамма процессов и явлений, обусловленных длительным воздействием комплекса факторов космического пространства (ФКП) на элементы конструкции, материалы, аппаратуру космической платформы. Следствием такого воздействия является сокращение срока активной эксплуатации рабочих систем, ускоренная деградация материалов, элементов конструкции космических аппаратов. Обеспечение безаварийной эксплуатации с заданным сроком ресурса космического аппарата – одна из основных задач на этапе проектирования рабочих систем. При решении такой задачи нередко используют элементы прогнозирования темпов деградации материалов и систем КА, обусловленных воздействием комплекса ФКП. В основе такого прогнозирования, как правило, лежат результаты ускоренных ресурсных испытаний, физического моделирования взаимодействия КА, их рабочих систем с ионосферой на специальных стендах и установках.

В Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) для физического моделирования взаимодействия КА с ионосферой Земли разработан и создан плазмоэлектродинамический стенд (рис. 1), который совмещает свойства плазменной аэродинамической трубы и вакуумной безэховой камеры. Стенд позволяет моделировать и имитировать условия работы космических аппаратов в ионосфере и магнитосфере Земли на высотах от 150 км до 40000 км на низких, высокоэллиптических, геостационарных, геополярных орбитах. На стенде моделируются условия длительной эксплуатации космических аппаратов, их режим движения, аэродинамика и теплообмен,

Рис. 1 – Плазмоэлектродинамический стенд ИТМ НАНУ и ГКАУ эффекты взаимодействия искусственных тел и космических аппаратов с потоками плазмы, заряженными частицами, электрическими и магнитными полями, электромагнитным излучением солнечного спектра и радиолокационного диапазона частот в ионосфере и магнитосфере.

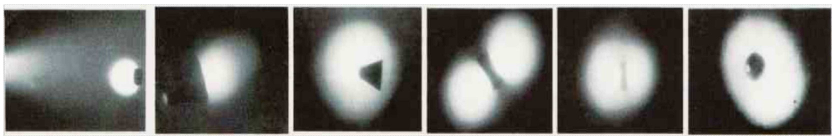
Плазмоэлектродинамический стенд ИТМ НАНУ и ГКАУ Кабинетом министров Украины включен в Государственный реестр уникальных объектов космической деятельности и имеет статус научного объекта, являющегося национальным достоянием Украины.

На стенде проведены исследования в рамках выполнения научных программ и работ по созданию и эксплуатации изделий ракетно-космической техники (модулей «Квант-1» и «Квант-2», «Кристалл» для орбитальной станции «Мир», орбитальной станции «Алмаз», космического корабля «Буран», спутников серии «Космос», «Метеор», «Природа», «Экспресс» и др.). В рамках выполнения Национальных космических программ Украины выполнены исследования по проектам «Попередження», «Либідь», «Січ-2», «Крона», РН «Дніпро», «Іоносфера-Варіант» и др. На стенде проведены отработка и комплексные испытания комплекса научной аппаратуры «Потенциал» для КА «Січ-2». В комплекс «Потенциал» вошли приборы для диагностики нейтрального и заряженных компонентов ионосферной плазмы, разработанные в ИТМ НАНУ и ГКАУ. Получены принципиально важные результаты по проблемам плазмоэлектродинамики КА, магнитной гидродинамики, диагностики плазмы, стойкости конструкционных материалов и элементов солнечных батарей к длительному воздействию факторов космического пространства, поглощения и рассеяния электромагнитных волн неоднородными плазменными структурами, плазменному противодействию радиолокационному обнаружению и распознаванию космических аппаратов и изделий ракетно-космической техники.

Искажение радиоотражений от элементов конструкций КА искусственными плазменными образованиями [1]. Сформированы условия, критерии подобия, определены масштабные коэффициенты моделирования плазмогазодинамического и электродинамического взаимодействия КА с ионосферой, рассеяния и дифракции электромагнитных волн сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов на КА и моделях КА.

Показано что присутствие у поверхности элемента конструкции КА искусственных плазменных образований (ИПО) при соотношении круговых частот $\mu_p < \mu$ (где μ_p – плазменная частота, μ – частота зондирующего излучения) уменьшает амплитуду отраженного сигнала в широком диапазоне углов облучения; ослабление отраженных радиосигналов достигает 20 дБ. Ослабление радиосигнала при $\mu_p < \mu$ из-за дифракционной расходимости электромагнитных волн практически не зависит от формы ИПО и структуры распределения концентрации электронов в ИПО. При приближении плазменной частоты μ_p к частоте облучающей волны μ на диаграмме обратного рассеяния (ДОР) – зависимости отношения мощностей радиоволн принятого и излученного сигналов, $P_{пр}/P_{изл}$, от угла наблюдения – проявляется интерференционная модуляция отраженного сигнала, обусловленная дифракцией электромагнитных волн на двух телах – КА и ИПО. Плазменное образование с ядром критической плазмы при соотношении частот $\mu_p \leq \mu$ рассеивает электромагнитное излучение как твердое тело с одной или несколькими отражающими точками. Число отражающих точек определяется формой и размерами ядра критической плазмы в ИПО.

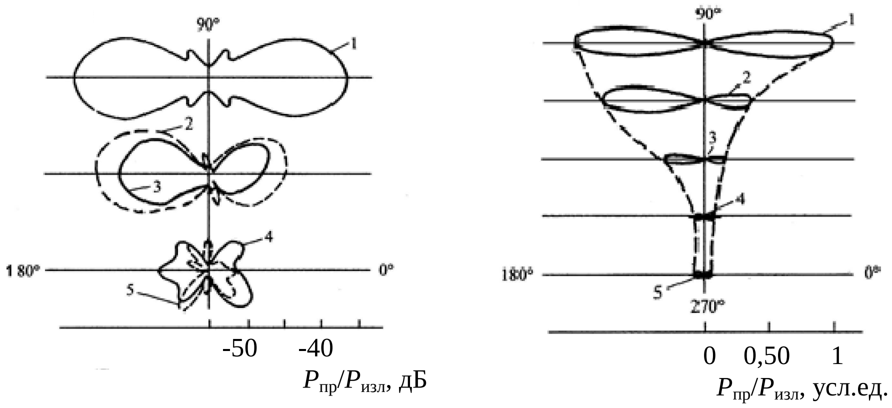
На рис. 2 показаны структуры ИПО у поверхности моделей КА различной геометрической формы.



а) б) в) г) д) е)

Рис. 2 – ИПО у поверхности моделей КА

Рис. 3 иллюстрирует изменение ДОР короткого цилиндра (шайбы) в случае $\mu_p < \mu$ для зондирующего излучения с длиной волны ª $=$ 5,5 см и ª $= 3$ см. На рис. 3, а) показаны диаграммы для длины волны 5,5 см: диаграмма 1 представляет ДОР модели элемента конструкции КА в отсутствие ИПО у ее поверхности; диаграмма 2 – ДОР модели в присутствии у ее поверхности ИПО, показанного на рис. 2, а); диаграмма 3 соответствует ИПО, показанному на рис. 2, г); диаграмма 4 – эллипсоидальному плазменному образованию, показанному на рис. 2, д), с моделью в центре; диаграмма 5 – для ИПО рис. 2, е). Соответствующие диаграммы для длины волны 3 см показаны на рис. 3, б). ИПО, полностью окутывающее облучаемую модель, показанное на рис. 2, е), искажает ДОР (диаграмма 5) и снижает уровень отраженной мощности на 22 дБ для ª $=$ 5,5 см и на 18 дБ для ª $=$ 3 см, т. о., существенно ослабляет радиосигнал и уменьшает радиолокационную заметность облучаемого тела.



а) б)

Рис. 3 – Искажение ДОР модели искусственным плазменным образованием

Влияние плотности и распределения заряженных частиц в ИПО у поверхности тела на структуру диаграммы начинает сказываться при приближении плазменной частоты к частоте облучающей волны. Наглядно это иллюстрируют ДОР металлической сферы в присутствии у ее поверхности ИПО с $\mu_p \geq \mu$ и $\mu_p < \mu$, показанные на рис. 4 (радиус сферы $R_1 = 28$ мм, длина волны ª $=$ 5,5 см). На рис. 4 диаграмма 1 – ДОР металлической сферы в сверхзвуковом потоке разреженной плазмы, моделирующем обтекание КА в ионосфере. Диаграмма 2 характеризует рассеяние электромагнитных волн при наличии у поверхности сферы плазменного образования с ядром критической плотности (критическая плотность электронов $N_{e\max} \approx 3{,}6 \cdot 10^{17}$ м$^{-3}$). Диаграмме 3 соответствует ИПО с квазисферическим ядром сверхкритической плазмы ($N_e > N_{e\max}$). При этом радиус ИПО R_2 с плотностью электронов $N_e \geq 5 \cdot 10^{17}$ м$^{-3}$ практически равен радиусу металлической сферы R_1. Структура диаграмм 2 и 3 определяется формой и размерами ядра критической плазмы. Влияние поглощения, обусловленного линейной трансформацией волн, на диаграммах 2 и 3 минимально. На ДОР наблюдается появление интерференционной модуляции отраженного сигнала в системе «плазменное образование – модель КА», обусловленной вращением модели и характеризующей дифракцию электромагнитных волн на двух телах: вторым телом является двумерно-неоднородное ИПО с квазисферическим ядром критической плазмы, окруженным оболочкой с размытой границей.

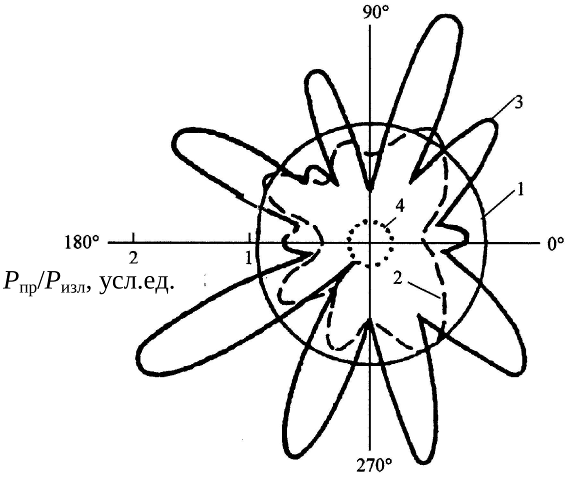
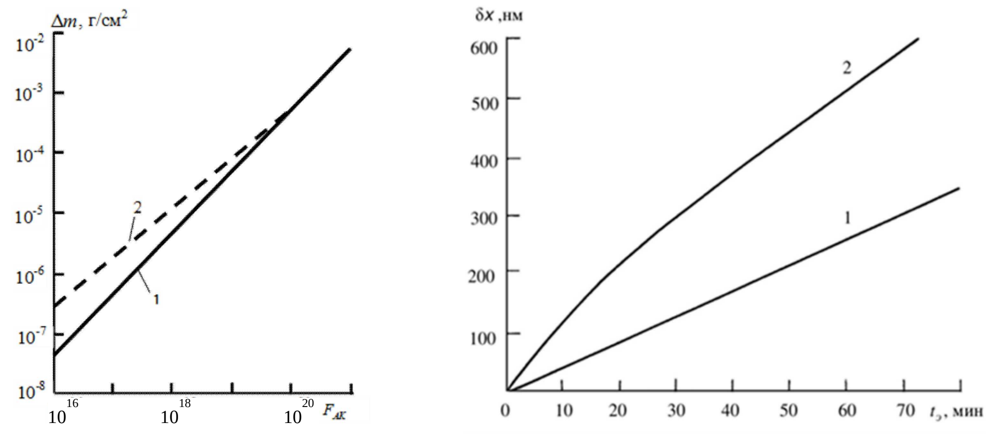


Рис. 4 – Искажение ДОР сферы искусственным плазменным образованием

Деградация полимерных и композитных материалов при воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения. Полимерные материалы широко используются в качестве конструкционных материалов покрытий наружных поверхностей КА, обшивок солнечных батарей (СБ), компонентов экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) и др. Околоспутниковая среда на высотах (200 – 800) км агрессивна по отношению к полимерным пленкам и покрытиям. Проблема обеспечения длительной эксплуатации КА на орбите в значительной степени связана с проблемой обеспечения стойкости конструкционных материалов к воздействию околоспутниковой среды и, в частности, к воздействию потоков атомарного кислорода (АК) с энергией частиц 5 эВ. Информация об изменении свойств материала наружных поверхностей КА под воздействием потоков АК и вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ) при длительной эксплуатации в ионосфере может быть получена только экспериментально – по результатам летных или стендовых испытаний. Одним из путей решения задачи является физическое моделирование, проведение ускоренных ресурсных испытаний. Условием физико-химического моделирования воздействия высокоскоростного потока АК на материалы наружных поверхностей КА является равенство скоростей и энергий частиц ($U_M = U_H$, $M_{AK} U_M^2 / 2 = M_{AK} U_H^2 / 2$, величины с индексами М и Н относятся к условиям моделирования и натурным условиям) при идентичности сорта частиц, бомбардирующих поверхность, а также равенство интегральных флюенсов $F_{AM}^{(M)} = F_{AM}^{(H)}$ в модельном и натурном экспериментах. Условием стендового моделирования воздействия ВУФ на конструкционные материалы КА в ионосфере является равенство поверхностной плотности энергии электромагнитного излучения $с_{¬M} t_{м} = с_{¬H} t_H$, где $с_{¬M}$ – плотность потока энергии в модельном и $с_{¬H}$ – натурном экспериментах, $t_{M,H}$ – время экспозиции [2 – 4].

При проведении исследований ускоренной деградации полимеров на плазмоэлектродинамическом стенде определены зависимости деградации полимерных пленок – уноса массы, изменения геометрических размеров, структуры поверхности – от флюенса АК, позволяющие прогнозировать изменение характеристик полимеров за время всего периода совместного воздействия потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета (АК+ВУФ). Определены пороговые значения отношения плотности потока ВУФ к потоку АК, характеризующие влияние синергетического эффекта на деградацию полимеров, содержащих в составе мономер группы CH_n (полиимиды, материалы марок «kapton-H», «ПМ-1Э»), и полиэтилена.

На рис. 5, а), б) приведены измеренные зависимости изменения (уноса) массы Δm и толщины $¢x$ пленок из полиимидных материалов от флюенса АК F_{AK} и от времени экспозиции $t_Э$ при воздействии АК (кривая 1) и АК+ВУФ (кривая 2). Показаны усредненные зависимости: кривая 1 – при воздействии АК унос массы $\Delta m_{AK} = Y_{AK} \cdot F_{AK}$ с коэффициентом эрозии $Y_{AK} = 4,4 \cdot 10^{-24}$ г/атом; кривая 2 – при совместном действии АК+ВУФ унос массы $\Delta m_{\Sigma} = Y_{\Sigma} \cdot F_{AK}$ с коэффициентом эрозии $Y_{\Sigma} = Y_0 [¦ F_{AK}]^{¶}$, где $Y_0 = 5,843 \cdot 10^{-20}$ г/атом, $¦ = 1$ см^2, $¶ = -0,206$.



а) б)

Рис. 5 – Воздействие АК и АК+ВУФ на полиимид kapton-H

Потери электрической мощности солнечных батарей. Воздействие на солнечные батареи комплекса факторов околоспутниковой среды интенсифицирует деградационные процессы в материалах и элементах конструкций батарей, ухудшает их эксплуатационные характеристики, приводит к потерям электрической мощности, сокращению ресурса и, как следствие, к уменьшению срока активного существования КА. Изменение электрической мощности СБ – результат интегрального воздействия комплекса факторов околоспутниковой среды, присущих условиям эксплуатации КА на орбите. Интегральную характеристику спада нормированной электрической мощности солнечной батареи ΔP_{Σ} относительно начального значения мощности P_0 аппроксимирует соотношение [5, 6] $\Delta P_{\Sigma}(t)/P_0 = \sum_{i=1}^{m} k_i \, \Delta P_i(t)/P_0$, где t – время эксплуатации на орбите; $\Delta P_i(t)/P_0 = (1 - \Delta P_i(t)/P_0)$ – изменение мощности, обусловленное воздействием i-го фактора околоспутниковой среды; k_i – коэффициент пропорциональности, учитывающий влияние отдельных факторов и эффекты суперпозиции (наложения); m – количество факторов.

По результатам физического и численного моделирования воздействия отдельных факторов и комплекса факторов околоспутниковой среды получены расчетно-экспериментальные зависимости спада электрической мощности кремниевых батарей от времени эксплуатации СБ на орбите.

На рис. 6 приведены прогнозные оценки уменьшения электрической мощности кремниевых СБ космических аппаратов из-за воздействия околоспутниковой среды при длительной эксплуатации на круговых орбитах в полярной ионосфере и в магнитосфере Земли [7].

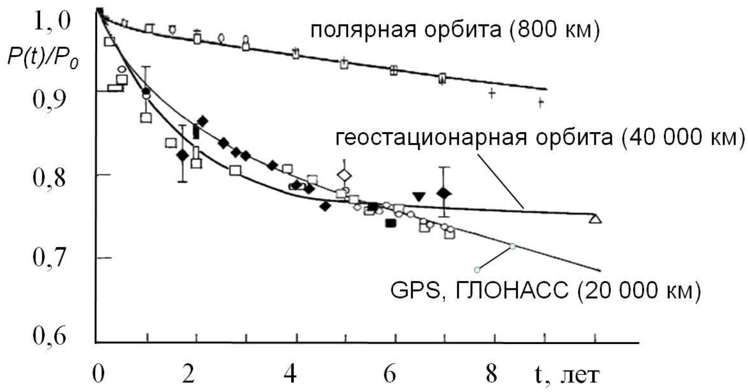


Рис. 6 – Спад электрической мощности кремниевых солнечных батарей КА

Радиационная электризация элементов конструкции КА. Электрорадиационное взаимодействие КА с полярной ионосферой в тени Земли является суперпозицией двух видов воздействия: облучения быстрыми авроральными электронами и обтекания «холодной» разреженной плазмой.

Плазмодинамический эффект моделирования электрорадиационного воздействия околоспутниковой среды на КА основан на подобии взаимодействия в системе «КА – плазма» в ионосфере и на стенде. Электрофизический эффект основан на подобии электрических и магнитных полей при воздействии частиц «горячей» плазмы на диэлектрические материалы. Шесть параметров подобия плазмодинамического взаимодействия [8], параметр геометрического подобия и пять параметров электрофизического подобия [9, 10] определяют требования к точности и чистоте модельного эксперимента, позволяют установить связь между параметрами электрорадиационного взаимодействия КА с околоспутниковой средой в полярной ионосфере и в модельном эксперименте.

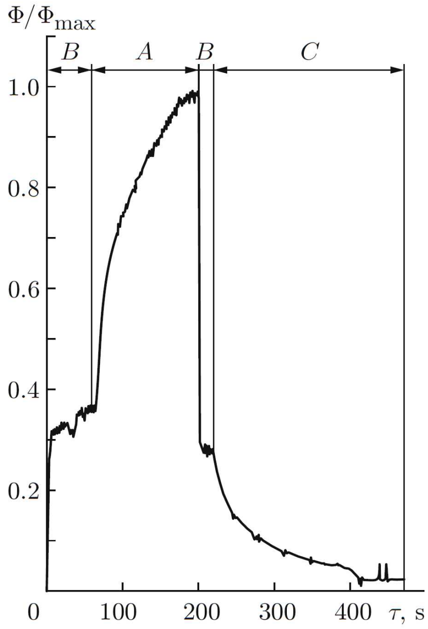


Рис. 7 – Циклограмма процесса заряжения твердого тела

На рис. 7 приведена циклограмма процесса заряжения твердого тела высокоэнергетичными электронами в сверхзвуковом потоке разреженной плазмы, моделирующем обтекание тела полярной ионосферной плазмой. По оси абсцисс отложено время воздействия потока τ, с, по оси ординат – безразмерный потенциал поверхности $\Phi = \left(\varphi_0 - \varphi_P\right)/k_B T_e$, отнесенный к его максимальному значению, где φ_0 и φ_P – электрические потенциалы поверхности тела и плазмы, T_e – температура электронов, k_B – постоянная Больцмана. На графике выделены области: А – воздействие потока высокоэнергетичных электронов, В – совместное воздействие потоков высокоэнергетичных электронов и «холодной» плазмы, С – нейтрализация заряда потоком «холодной» плазмы.

На рис. 8 представлена зависимость равновесного потенциала $-\Phi_W$ подветренной поверхности твердого тела от отношения концентраций быстрых электронов и положительных ионов на подветренной поверхности N_{eh}/N_{iW}.

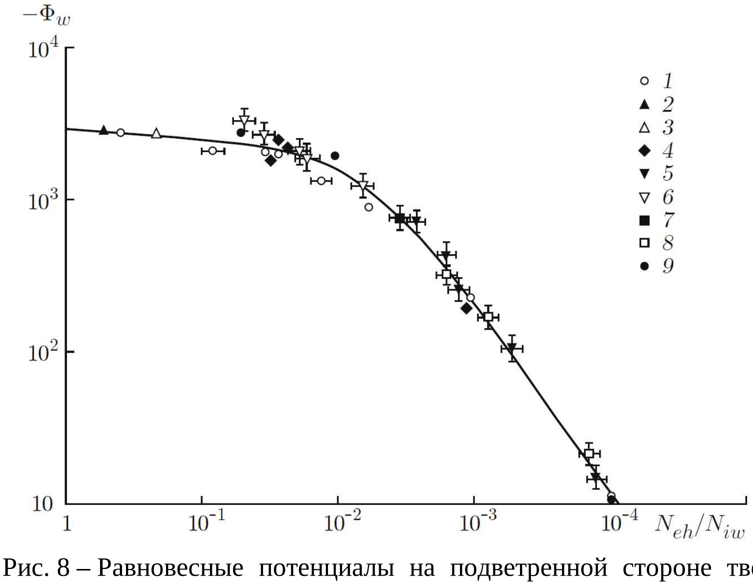


Рис. 8 – Равновесные потенциалы на подветренной стороне твердого тела в зависимости от отношения концентраций N_{eh}/N_{iW}

Маркерами на графике обозначены: 1 – 3 – результаты ионосферных измерений на спутниках Defense Meteorological Satellite Program; 4 – 8 – результаты экспериментов ИТМ НАНУ и ГКАУ при воздействии потока электронов с энергией W_{eh} от 5 кэВ до 15 кэВ; 9 – расчетные значения для энергии электронов 5 кэВ. Предельное значение $N_{eh}/N_{iW} \approx 10^{-4}$ соответствует численным оценкам уровня заряжения микроспутника в следе за плоским телом в полярной плазме для ряда значений энергии быстрых электронов.

Выводы. В статье приведены результаты исследований, выполненных в рамках научных программ по созданию и эксплуатации изделий ракетно-космической техники, а именно: воздействия гиперзвуковых потоков разреженной плазмы, атомарного кислорода и ультрафиолетового солнечного излучения на устройства и материалы космических аппаратов. Исследования были направлены на определение искажений искусственными плазменными образованиями зондирующих радиосигналов, отраженных от элементов конструкций КА; изучение процессов радиационной электризации элементов конструкции КА; разработку методик проведения ускоренных ресурсных испытаний полимерных и композитных материалов при воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения; моделирование воздействия околоспутниковой среды на солнечные батареи, вследствие чего происходит потеря электрической мощности и сокращается ресурс батарей. Разработанные методы физического моделирования взаимодействия космических аппаратов с ионосферной плазмой позволяют воспроизводить основные процессы и явления, составляющие сложный комплекс факторов космического пространства, воздействующих на космические аппараты, а полученные экспериментальные данные могут быть использованы на этапе проектирования КА.

1. *Shuvalov V. A., Churilov A. E., Bystritskii M. G.* Distortion radio reflections from spacecraft construction elements by plasma jets and structures: Physical Modeling. Cosmic Research. 2004. V. 42, No. 3. P. 228–237.
2. *Shuvalov V. A., Pis'mennyi N. I., Kochubei G. S., Tokmak N. A.* The mass loss of spacecraft polyimide films under the action of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation. Cosmic Research. 2014. V. 52. No. 2. P. 99–105. doi: 10.1134/S0010952514020063.
3. *Shuvalov V. A., Tokmak N. A., Reznichenko N. P.* Phisical simulation of the action of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation on polymer materials in the Earth's ionosphere. Instruments and Experimental Techniques. 2016. V. 59. No. 3. P. 442–450. doi: 10.1134/S0020441216020263.
4. *Shuvalov V. A., Reznichenko N. P., Tsokur N. P., Nosikov S. V.* Synergetic effects of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation on polymer materials in the Earth's ionosphere. High Energy Chemistry. 2016. V. 50, No. 3. P. 171–176. doi: 10.1134/S0018143916030140.
5. *Shuvalov V. A., Kochubei G. S., Gubin V. V., Tokmak N. A.* Power losses of solar arrays under the action of an environment in a geosynchronous orbit. Cosmic Research. 2005. V. 45, No. 4. P. 259–267.
6. *Shuvalov V. A., Kochubei G. S., Priimak A. I., Pis'mennyi N. I., Tokmak N. A.* Changes of properties of the materials of spacecraft solar arrays under the action of atomic oxygen. Cosmic Research. 2007. V. 45. No. 4. P. 294–394. doi:10.1134/S001095250704003X.
7. *Шувалов В. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С., Носиков С. В.* Потери мощности солнечных батарей космического аппарата в полярной ионосфере и в магнитосфере Земли. Космічна наука і технологія. 2011. Т. 17. № 3. С. 5–15. doi: 10.15407/knit2011.03.005.
8. *Shuvalov V. A., Priimak A. I., Gubin V. V.* Radioactive electrization of spacecraft construction elements: physical modeling of charge accumulation and neutralization. Cosmic Research. 2001. V.39, No. 1, P. 15–22. doi: 10.1023/A:1002879626515.
9. *Shuvalov V. A., Kochubei G. S., Priimak A. I., Gubin V. V., Tokmak N. A.* Radioactive elektrization of spacecraft leeward surfaces by aurora electrons in the ionosphere. Cosmic Research. 2003. V. 41, No. 4. P. 413–423. doi: 10.1023/A:1025018029138.
10. *Shuvalov V. A., Priimak A. I., Bandel K. A., Kochubei G. S.* Charge transfer by high-energy electrons onto the leeward surfaces of a solid in a supersonic rarefied plasma flow. Journal Applied Mechanics and Technical Physics. 2008. V. 49, No. 1. P. 9–17. doi: 10.1007/s10808-008-0002-x.

11. Авторское свидетельство на изобретение (СССР) № 845672 (Для сл. польз.). Многоэлектродный электрический зонд. *Шувалов В. А., Губин В. В., Резниченко Н. П.*; опубл. 06.03.1981.
12. Авторское свидетельство на изобретение (СССР) № 299889. Многоэлектродный преобразователь плотности потока частиц. *Гадион В. Н., Гужва Е. Г., Никитский В. П., Шувалов В. А., Донской Л. А., Пылев В. П.*; опубл. 01.08.1989.
13. *Shuvalov V. A., Priimak A. I., Churilov L. E., and Reznichenko N. P.* Inverse-Magnetron Converter for the Diagnostics of a Partially Ionized Gas Flow. Instruments and Experimental Techniques. 2001. V.44. N.2. P. 229–231. doi: 10.1023/A:10175755322138.
14. *Shuvalov V. A., Priimak A. I., Gubin V. V., Lazuchenkov N. M., Tokmak N. A.* A Gas-Discharge Plasma Source for the Modification of the Potential on Surface of an Insulator. Instruments and Experimental Techniques. 2002. V.45. N.2. P. 277–280. doi: 10.1023/A:1015337206427.
15. Патент Российской Федерации. № 2022053. Устройство для ионно-плазменной очистки диэлектрических поверхностей. *Антипов А. Т., Медников Б. А., Григорьев Ю. И., Шувалов В. А., Лавренюк С. Л., Хохлов Г. Г.*; опубл. 1994, бюл. № 20.
16. Патент України на винахід №103452. Пристрій для вимірювання параметрів потоків розрідженого газу. *Шувалов В.О., Кулагін С. М., Письменний М. І., Семенов Л. П., Скорік О. Д., Авдєєв А. М.* ; опубл. 10.10.2013.
17. *Shuvalov V. A, Lazuchenkov D. N., Gorev V B., Kochubei G. S.* 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. No. 61. P. 355–366. doi: 10.1016/j.asr.2017.08.001.

Получено 07.08.2018,
в окончательном варианте 01.10.2018