УДК 533.95

В. А. ШУВАЛОВ, Г. С. КОЧУБЕЙ, Д. Н. ЛАЗУЧЕНКОВ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Дан краткий анализ результатов исследований, выполненных в отделе механики ионизованных сред Института технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины за период 2011 – 2015 г.г. по трем направлениям, характеризующим взаимодействие "намагниченных" космических аппаратов с ионосферной плазмой, конструкционных материалов со сверхзвуковыми потоками атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения в атмосфере Земли, научной аппаратуры ИТМ на спутнике "Сич-2" с окружающей средой.

Дано короткий аналіз результатів досліджень, отриманих у відділі механіки іонізованих середовищ Інституту технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України за період 2011 – 2015 р.р. за трьома напрямками, які характеризують взаємодію "намагнічених" космічних апаратів з іоносферною плазмою, конструкційних матеріалів з надзвуковими потоками атомарного кисню і вакуумного ультрафіолетового випромінювання в атмосфері Землі, наукової апаратури ІТМ на супутнику "Січ-2" з навколишнім середовищем.

A brief analysis of the results of studies conducted at the Department of Mechanics of Ionized Media of the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State of Space Agency of Ukraine in the period of 2011 – 2015 is presented. These studies were focused on the three lines characterizing interactions of magnetized spacecraft with the ionospheric plasma; structural materials with supersonic flows of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation in the Earth atmosphere; the ITM's scientific equipment for the Sich-2 satellite with the environment.

Ключевые слова: *"намагниченное" твердое тело, магнитогидродинамическое взаимодействие, тепловые потоки, атомарный кислород, ультрафиолетовое излучение, диагностика ионосферной плазмы.*

Введение. Технологии создания сильных магнитных полей (≥ 1 Тл) на основе сверхпроводящих материалов сделали идею магнитогидродинамического (МГД) управления движением летательных аппаратов (воздушно-космические самолеты, спускаемые аппараты (СА) в атмосфере Земли и планет земной группы, космические аппараты (КА) в ионосфере, магнитосфере Земли и в межпланетном пространстве) вполне реальной и стимулировали выполнение международных проектов "OREX" (Япония), "AJAX" (Россия, Европа), "Mariach" (США) и др. Для МГД-взаимодействия "плазма – "намагниченное" (с собственным магнитным полем) тело" характерны общие эффекты и закономерности. Актуальность проблемы обусловливает новый этап развития аэрокосмической техники: создание летательных аппаратов нового поколения с МГД-управлением и магнитоплазмохимическими двигателями. Определение общих закономерностей переноса потоков тепла, действия сил, обусловленных взаимодействием в системе "намагниченное тело – плазма", имеет фундаментальный и прикладной характер, позволит разработать системы эффективной электромагнитной теплозащиты, управления движением летательных аппаратов для разных условий эксплуатации: в межпланетном пространстве, в ионосфере и в атмосфере Земли.

Проблема увеличения срока эксплуатации летательных аппаратов в верхней атмосфере Земли связана с задачей создания максимально стойких к воздействию потоков плазмы и электромагнитного излучения конструкционных материалов. Длительное и синхронное воздействие потоков атомарного кислорода (АК) и электромагнитного солнечного излучения на полимерные и

© В. А. Шувалов, Г. А. Кочубей, Д. Н. Лазученков, 2015

композитные материалы вызывает синергетический эффект накопления повреждений и, как следствие, увеличение скорости деградации свойств материалов. Определение пороговых значений величины отношения потока энергии ультрафиолетового излучения к потоку атомарного кислорода позволяет прогнозировать возникновение синергетического эффекта для разных орбит КА, темпы деградации, накопления повреждений и срок активной безаварийной эксплуатации КА.

Актуальность диагностики и мониторинга кинетических параметров ионосферы Земли связана с проблемой идентификации природных и техногенных источников возмущений ионосферной плазмы, таких как торнадо, ураганы, цунами, извержения вулканов, землетрясения, мощные взрывы и др. Разработка методов и средств мониторинга состояния ионосферы и идентификации источников возмущения ионосферной плазмы по результатам диагностики околоспутниковой среды – актуальная задача фундаментального, прикладного и социально-экономического значения.

Исследования в Институте технической механики (ИТМ) Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины включают три аспекта проблемы взаимодействия:

– "намагниченных" КА с плазмой, образующейся за ударной волной у поверхности затупленного тела при спуске в плотных слоях атмосфер планет, с разреженной плазмой в ионосфере Земли и плазмой солнечного ветра в межпланетном пространстве;

– материалов КА (полимеров) со сверхзвуковыми потоками атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ) солнечного спектра при длительной эксплуатации в ионосфере Земли на высотах 300 – 1000 км;

– научной аппаратуры ИТМ на КА "Сич-2" с околоспутниковой средой при проведении космического эксперимента "Потенциал" по диагностике ионосферной плазмы на высотах ~ 700 км.

Взаимодействие "намагниченных" КА с потоками плазмы. Разработана методика физического моделирования магнитогидродинамического взаимодействия "намагниченных" тел с потоками разреженной плазмы в плотных слоях атмосферы Земли и планет земной группы, в ионосфере и в межпланетном пространстве.

В основу методики положено равенство приращений (с точностью до постоянного множителя) конвективных тепловых потоков и коэффициентов силы сопротивления в бесстолкновительном потоке разреженной плазмы и при континуумном обтекании плазмой за ударной волной перед затупленным "намагниченным" телом и использование локальных параметров подобия: магнитного числа Рейнольдса и параметра МГД-взаимодействия (числа Стюарта Q_B). Выполнение этих условий позволяет реализовать концепцию исследования не интегральных составляющих тепловых потоков и сил сопротивления, а их приращений – "магнитных" составляющих, обусловленных влиянием собственного магнитного поля тела [1, 2].

Для спускаемых аппаратов, движущихся в плотных слоях атмосферы, электродинамический эффект взаимодействия собственного магнитного поля СА с плазмой за ударной волной у поверхности затупленного тела проявляется в уменьшении конвективных тепловых потоков на поверхности тела и в увеличении силы лобового сопротивления тела [3]. Изменение теплового по-

тока $\Delta q_W = (1 - q_{BW}/q_{0W})$ на поверхности затупленного "намагниченного" конуса при $\vec{B}_W \uparrow\downarrow \vec{U}_i$ иллюстрирует рис. 1 (q_{0W} – конвективный тепловой поток на поверхность "намагниченного" тела в отсутствие собственного магнитного поля $B_W = 0$; q_{BW} – тепловой поток при $B_W \neq 0$, $\vec{B}_W$ – вектор индукции собственного магнитного поля тела, $\vec{U}_i$ – вектор скорости ионов набегающего потока плазмы, r/R_W – безразмерная координата поверхности тела). Кривая 1 – сферическое затупление [4] ($Q_B = 27$); 2 – измерения ИТМ при $Q_B = 23$; 3 – расчет для СА "OREX" при $Q_B \approx 20{,}5$ из [5].

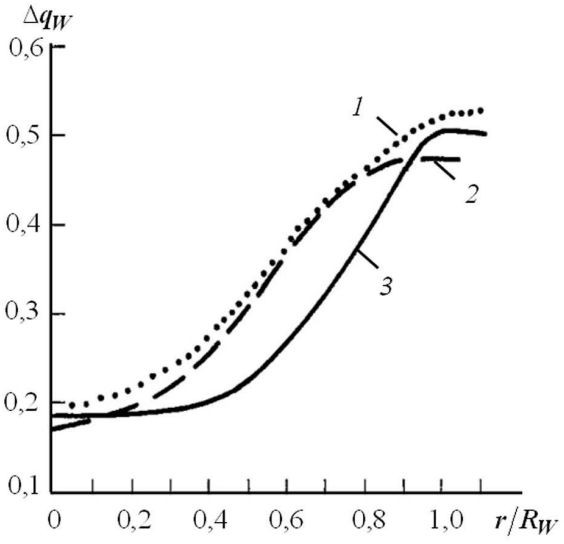

Рис. 1

Электродинамический эффект МГД-взаимодействия в системе "плазма – "намагниченное" тело" позволяет реализовать электромагнитную теплозащиту и эффективное торможение тел при входе в атмосферы планет для широкого диапазона чисел Стюарта $1 < Q_B < 10^3$ (для Земли в диапазоне высот от 80 до 45 км), реализовать эффективное МГД-управление движением СА.

На рис. 2 показаны зависимости измеренных и вычисленных значений коэффициентов силы лобового сопротивления c_x/c_{0x} и подъемной силы c_y/c_{0y} от числа Стюарта при $\vec{B}_W \uparrow\downarrow \vec{U}_i$. Точки 1 – расчетные значения $c_x/c_{0x} = 1 + c_{Bx}/c_{0x}$ для затупленного конуса СА ″OREX″ при U_i =7,2 км/с на высоте h =75,3 км [6]; 2 – измерения ИТМ c_x/c_{0x}; 3 – значения c_x/c_{0x} острого "намагниченного" конуса, измеренные в работе [7]; 4 – результаты измерений ИТМ коэффициента подъемной силы "намагниченного" конуса c_y/c_{0y}; кривые 5, 6 – осредненные значения измерения коэффициентов c_x/c_{0x} и

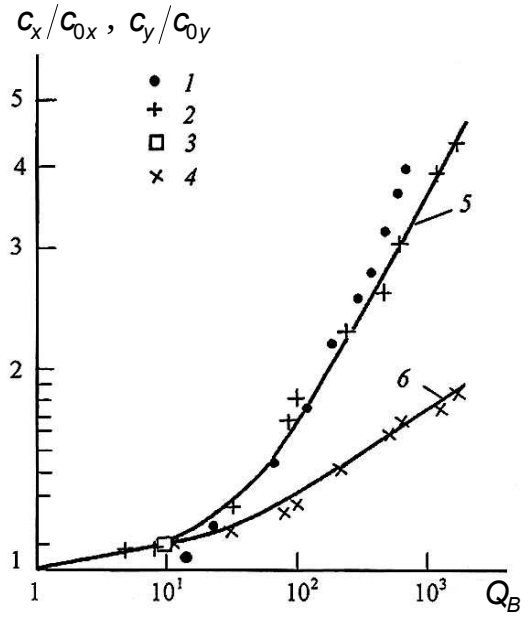

Рис. 2

c_y/c_{0y} соответственно; c_{0x}, c_{0y} – коэффициенты силы лобового сопротивления и подъемной силы в отсутствие собственного магнитного поля ($B_W = 0$); c_{Bx}, c_{By} – коэффициенты силы лобового сопротивления и подъемной силы при $B_W \neq 0$.

На рис. 3 показана зависимость изменения теплового потока $\Delta q_W = 1 - q_{BW}/q_{0W}$ от числа Стюарта Q_B для лобовой точки "намагниченного" тела со сферическим затуплением при осесимметричном обтекании.

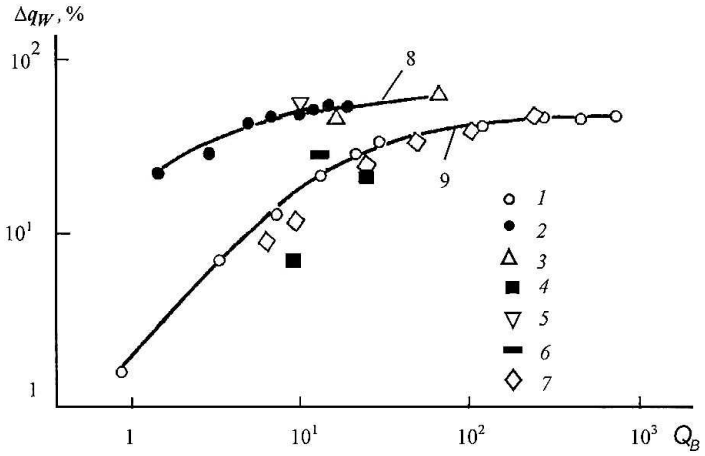

Рис. 3

Точки 1 – расчетные значения Δq_W для СА "OREX" на высотах $h = 60$ и 75,3 км [5, 6]; 2 – расчеты для затупленного конуса из [8]; 3 – расчетные данные для полусферы с цилиндрической юбкой при Q_B=17 и 70; 4 – при Q_B=9,6 и 24,6 из [9]; 5 – измерения Δq_W для полусферы с цилиндрической юбкой при Q_B=8,1 [9]; 6 – расчеты [10] для полусферы с цилиндрической юбкой (численное моделирование методом Монте-Карло); 7 – измерения ИТМ для затупленного конуса в гиперзвуковом потоке разреженной плазмы; линии 8, 9 ограничивают разброс расчетных и измеренных значений.

Для КА и "намагниченных" тел, движущихся в атмосфере Земли и в межпланетном пространстве, установлено, что изменение ориентации вектора индукции собственного магнитного поля тела относительно вектора скорости полета КА является эффективным средством МГД-управления динамическим взаимодействием осесимметричного тела с набегающим гиперзвуковым потоком разреженной плазмы, позволяет реализовать режим движения "намагниченного" КА при ненулевых значениях аэродинамического качества (торможение или ускорение) в ионосфере и в потоке плазмы солнечного ветра в межпланетном пространстве [11]. На рис. 4 показаны зависимости

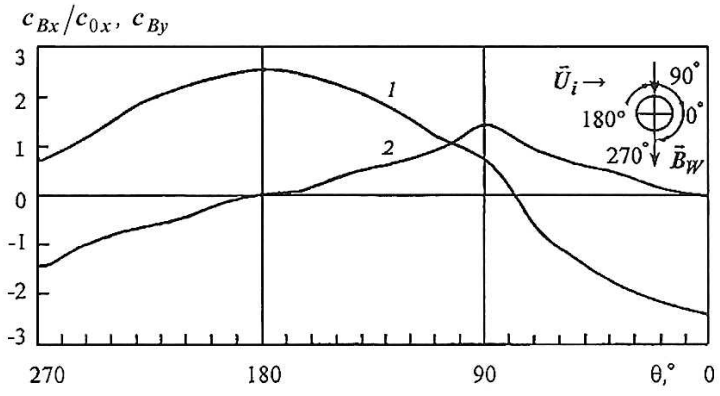

Рис. 4

"магнитных" составляющих коэффициентов силы сопротивления c_{Bx}/c_{0x} (кривая 1) и подъемной силы c_{By} (кривая 2) "намагниченной" сферы от угла θ между векторами $\vec{B}_W$ и $\vec{U}_i$ при $P_{B_W}/P_d \approx 3\cdot 10^4$ (P_{B_W} – магнитное давление, P_d – скоростной напор набегающего потока плазмы).

Взаимодействие КА с потоками атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения. Разработана методика физико-химического моделирования и прогнозирования деградации полимерных материалов КА при длительном их взаимодействии со сверхзвуковыми потоками атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения солнечного спектра в ионосфере Земли. Методика основана на применении термодинамического (энтропийного) критерия эквивалентности нагружения твердого тела и процедуре ускоренных ресурсных испытаний материалов [12, 13].

Экспериментально на плазмодинамическом стенде ИТМ получены зависимости потерь массы, изменения толщины и коэффициенты эрозии из-за деградации группы полимерных конструкционных материалов КА (полиимидов kapton-H (США), ПМ-1Э (Россия), полиэтилена (Украина) и тефлона FEP-100 Å (США)) от флюенса АК, плотности потока ВУФ и воздействия АК+ВУФ. На рис. 5 показаны изменения толщины δx и потери массы Δm полиимидных пленок kapton-H и ПМ-1Э при воздействии сверхзвукового потока атомарного кислорода ($F_{\text{АК}}$ – флюенс АК). Здесь 1 – данные [14]; 2 – измерения в плазме [15]; 3 – экспозиция на орбитальной станции "Мир" [16]; 4 – данные [17]; 5 – измерения КА STS-41 [18]; 6 – измерения КА STS-85 [19]; 7 – данные АТОМОХ [20]; 8 – измерения в пучке АК [21]; 9 – RF-плазма [15, 22]; 10 – [23]; 11 – данные КА STS-41g [24]; 12 – измерения ИТМ; 13 – программа "Компласт" на орбитальной станции "Мир" [25]; 14 – данные [26]; 15 – измерения ИТМ; 16 – расчетные значения δx kapton-H (объемный коэффициент потери массы $Re \approx 3\cdot 10^{-24}$ см^3/атомО); 17 – расчет для δx ПМ-1Э ($Re \approx 2{,}37\cdot 10^{-24}$ см^3/атомО); 18 – Δm (kapton-HN, расчет); 19 – расчет Δm для ПМ-1Э.

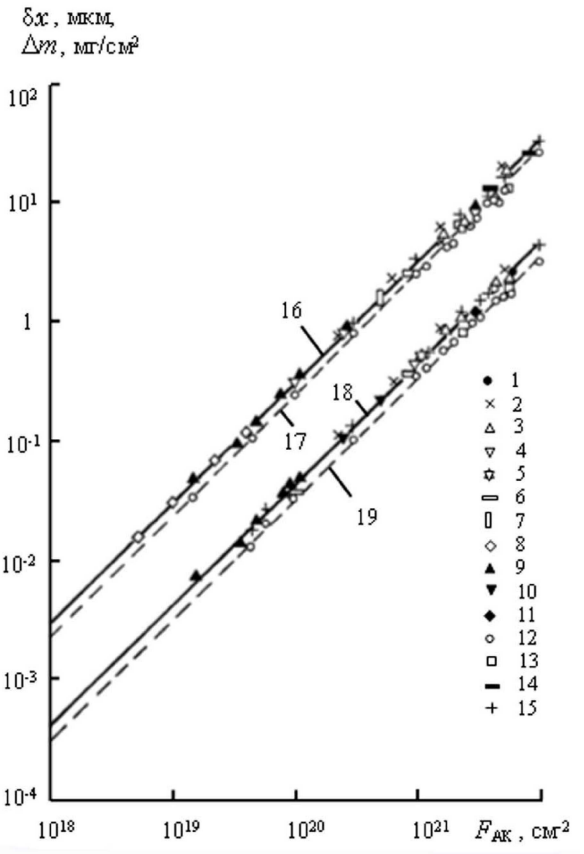

Рис. 5

Достоверность полученных зависимостей подтверждена соответствием стендовых (ИТМ) и спутниковых измерений (США, Россия, Япония и др.). Установлено, что на высотах выше ~ 400 км в ионосфере Земли при среднем уровне солнечной активности имеет место синергетический эффект ускоренной деградации полимеров, содержащих в составе мономер группы $(C_xH_y)_n$ (при длительном (более 2-х лет) воздействии АК+ВУФ в ионосфере коэффициент эрозии увеличивается в несколько раз). Определены пороговые значения флюенса АК и отношения плотности потока ВУФ $\Phi_{ВУФ}$ к потоку АК $\Phi_{АК}$ – параметров, характеризующих синергетический эффект воздействия АК+ВУФ для полиимидов $C_{22}H_{10}N_2O_5$ и полиэтилена $(C_2H_4)_n$. Для тефлона FEP-100 Å $(C_2F_4)_n$ синергетический эффект при длительном воздействии АК+ВУФ не обнаружен.

На рис. 6 показана зависимость $\Delta m_{АК+ВУФ}/\Delta m_{АК}$ от отношения плотности потока ВУФ-излучения к плотности потока атомарного кислорода $\Phi_\nu/\Phi_{АК}$ для полиимидов (данные 1 – 5) и полиэтилена (данные 6 – 8). Точ-

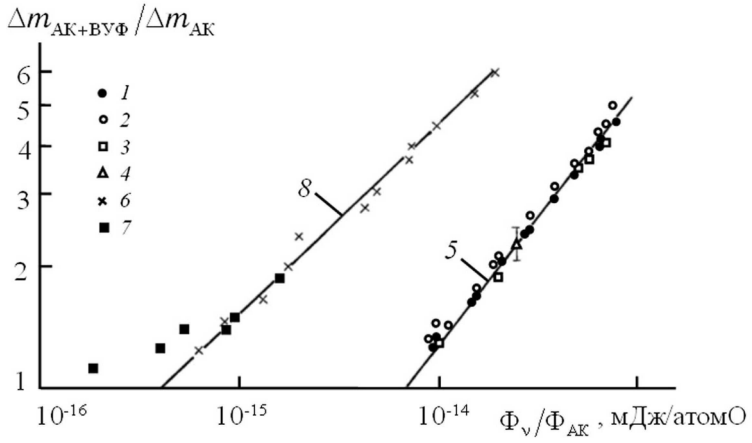

Рис. 6

ки 1 – kapton-H; 2 – ПМ-1Э (измерения ИТМ); 3 – данные [27, 28]; 4 – данные [21], пересчет ИТМ для пленки kapton-H; 5 – аппроксимация ИТМ для полиимидов $\Delta m_\Sigma/\Delta m_{АК} = 9{,}893 \cdot 10^8 (\Phi_\nu/\Phi_{АК})^{0{,}6358}$; 6 – измерения ИТМ (полиэтилен); 7 – данные [29, 30]; 8 – аппроксимация ИТМ для полиэтилена $\Delta m_\Sigma/\Delta m_{АК} = 1{,}216 \cdot 10^7 (\Phi_\nu/\Phi_{АК})^{0{,}46}$.

Диагностика потоков ионосферной плазмы. Разработана теория, методология и аппаратура контактной (зондовой) диагностики потоков неравновесной лабораторной и ионосферной разреженной плазмы [31, 32]. При проведении научного космического эксперимента "Потенциал" на борту КА "Сич-2" применение методологии и аппаратуры, разработанных в ИТМ, позволило определить полный комплекс локальных значений кинетических параметров нейтральных и заряженных частиц потоков неравновесной разреженной плазмы, таких как температуры электронов T_e, ионов T_i и нейтралов T_n, концентрации ионов и электронов $N_{i,e}$, нейтральных частиц N_n, степе-

ни ионизации, неизотермичности и потенциал плазмы. Точность измерений кинетических параметров ионосферной разреженной плазмы подтверждена модельными стендовыми измерениями ИТМ и расчетными значениями параметров в рамках модели International Reference Ionosphere – 2007.

На рис. 7 приведены пространственно-временные зависимости концентрации ионов и электронов ионосферной плазмы, измеренные на борту КА "Сич-2" 23.11.2011 г. (h =700 км). Рис. 7, а – концентрации заряженных частиц $N_{e,i}$, пересчитанные по измерениям датчика электронного компонента плазмы; рис. 7, б – подспутниковая трасса – штриховая линия, сплошная линия – магнитный экватор; 1, 2 – локализация экваториальной магнитной аномалии; 3, 4 – локализация авроральных (полярных) пиков; UT – универсальное время; LT – локальное время.

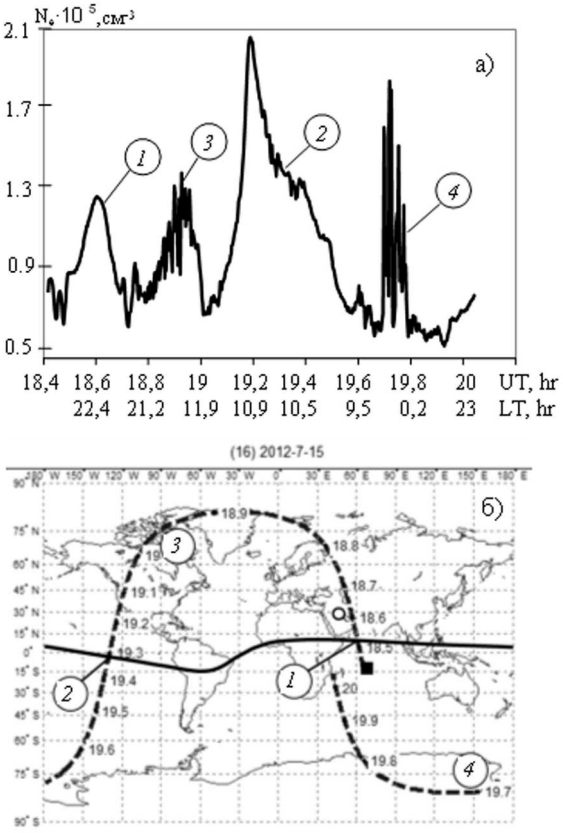

Рис. 7

Измеренные на КА "Сич-2" и расчетные пространственно-временные распределения основных кинетических параметров ионосферной плазмы с применением разработанной в ИТМ процедуры позволяют идентифицировать локализацию источников возмущений ионосферной плазмы: полярных пиков в F2-области в северном и южном полушариях, магнитных аномалий с отрицательной поляризацией, экваториальной ионизационной и сезонной аномалий, а также эпицентров землетрясений, зарождающихся на подспутниковой трассе в момент пролета КА [32].

Заключение. Выявлены эффекты и закономерности, характеризующие взаимодействие "намагниченных" твердых тел (летательных аппаратов), полимерных конструкционных материалов КА с потоками разреженной плазмы в атмосфере и магнитосфере Земли. Полученные результаты могут быть использованы для экспериментально-теоретического обоснования эффективности МГД-управления аэродинамикой и теплообменом спускаемых аппаратов в плотных слоях атмосферы Земли и планет земной группы, движением (ускорением, торможением), взаимодействием КА с ионосферной плазмой и плазмой солнечного ветра, а также для прогнозирования деградации полимерных материалов во времени при длительной эксплуатации на орбите, идентификации природных и техногенных источников возмущений плазмы в

ионосфере Земли на подспутниковой трассе.

1. Heat exchange and deceleration of a magnetized body in a rarefied plasma flow / *V. A. Shuvalov*, *A. I. Priimak*, *K. A. Bandel'*, *G. S. Kochubei* and *N. A. Tokmak* // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2011. – V. 52, № 2. – P. 1 – 8.
2. Physical simulation of the interaction of "magnetized" bodies and the Earth's atmosphere in the hypersonic rarefied plasma flow / *V. A. Shuvalov*, *S. N. Kulagin*, *G. S. Kochubey*, *N. A. Tokmak* // High Temperature. – 2012. – V. 50, № 3. – P. 315 – 322; DOI: 10.1134/S0018151X12030182.
3. Dynamic Interaction of a "Magnetized" Cone with a Hypersonic Flow of Rarefied Plasma / *V. A. Shuvalov*, *N. A. Tokmak*, *S. N. Kulagin*, and *G. S. Kochubei* // High Temperature. – 2013. – V. 51, №. 6. – P. 725 – 732; DOI: 10.1134/S0018151X13050192.
4. Control over Heat Exchange and Decleration of a "Magnetized" Body in a Rarefied Plasma Flow / *V. A. Shuvalov*, *A. I. Priimak*, *K. A. Bandel'*, *G. S. Kochubey* and *N. A. Tokmak* // High Temperature. – 2011. – V. 49, N. 3. – P. 335–343; DOI: 10.1134/S0018151X11030187.
5. Influences of Electrical Conductivity of Wall on Magnetohydrodynamic Control of Aerodynamic Heating / *T. Fujino*, *H. Sugita*, *M. Mizuno*, *I. Funaki*, *M. UIshikava* // J. Spacecraft and Rockets. – 2006. – V. 43, № 1. – P. 63 – 70.
6. *Fujino T.* Numerical Analysis of Reentry Trajectory Coupled with Magnetohydrodynamic Flow Control / *T. Fujino*, *T. Yoshino*, *M. Ishikawa* // J. Spacecraft and Rockets. – 2008. – V. 45, № 5. – P. 911 – 920.
7. Magnetohydrodynamics Interaction Over an Axysymmetric Body in a Hypersonic Flow / *A. Cristifolini*, *C. A. Borghi*, *G. Neretti*, *A. Passaro*, *G. Fantoni*, *F. Paganucci* // J. Spacecraft and Rockets. – 2008. – V. 45, № 3. – P. 438 – 444.
8. *Битюрин В. А.* Магнитогидродинамическое взаимодействие при обтекании затупленного тела гиперзвуковым воздушным потоком / *В. А. Битюрин*, *А. Н. Бочаров* // Изв. РАН, МЖГ. – 2006. – №5. – С. 188 – 203.
9. *Битюрин В. А.* О наземных МГД-экспериментах в гиперзвуковых потоках / *В. А. Битюрин*, *А. Н. Бочаров* // ТВТ. – 2010. – Т. 48, № 6. – С. 916 – 923.
10. Kinetic and Continuum Simulations of Electromagnetic Control of a Simulated Reentry Flow / *H. Katsurayama*, *M. Kawamura*, *A. Matsuda*, *T. Abe*. // J. Spacecraft and Rockets. – 2008. – V. 45, № 2 – P. 248 – 254.
11. Control of the Dynamic Interaction of a "Magnetized" Sphere with a Hypersonic Flow of Rarefied Plasma / *V. A. Shuvalov*, *N. A. Tokmak*, *N. I. Pis'mennyi*, and *G. S. Kochubei* // High Temperature. – 2015. – V. 53, №. 4. – P. 463 – 469; DOI: 10.1134/S0018151X15030177.
12. Синергетический эффект воздействия потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета на полиимидные пленки космических аппаратов / *В. А. Шувалов*, *Н. А. Токмак*, *Н. И. Письменный*, *Г. С. Кочубей* // Космічна наука і технологія. – 2012. – № 3. – С. 27 – 36.
13. The Mass Loss of Spacecraft Polyimide Films under the Action of Atomic Oxygen and Vacuum Ultraviolet Radiation / *V. A. Shuvalov*, *N. I. Pis'mennyi*, *G. S. Kochubei*, *N. A. Tokmak* // Cosmic Research. – 2014. – V. 52, №. 2. – P. 99 – 105; DOI: 10.1134/S0010952514020063.
14. *Paillons A.* Spacecraft surface exposure to atomic oxygen in LEO / *A. Paillons* // Technol. Environment spatial. – Toulous : ESA, 1987. – P. 353 – 375.
15. *Shimamura A.* Investigation into Synergistic Effects of Atomic Oxygen and Vacuum Ultraviolet / *A. Shimamura*, *E. Miyazaki* // J. Spacecraft and Rockets. – 2009. – V. 46, № 2. – P. 241 – 254.
16. Деградация полимерных материалов на орбитальной космической станции ″Мир″ / *В. К. Милинчук*, *Э. Р. Клиншпонт*, *И. П. Шелухов* и др. // Изв. Вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 2. – С. 108.
17. *Акишин А. И.* Взаимодействие ионосферной плазмы с материалами и оборудованием космических аппаратов / *А. И. Акишин*, *С. К. Гужова* // Физика и химия обработки материалов. – 1993. – № 3. – С. 40 – 47.
18. Новые наукоемкие технологии в технике. В 24 т. Т. 17. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. *К. С. Касаева*. – М : ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ, 2000. – 280 с.
19. *Pippin H. G.* Final Report of Analysis of Boeing Specimens from on the Effects of Space Environment on Materials Experiment. Appendix B. / *H. G. Pippin* // NASA Langley Research Center, Hampton. – 2008. – VA 23681 – 2199. – 10 p.
20. ECSS – E – 10 – 04A. Параметры космического пространства. – Действует с 21 января 2000 г. – Noordwijk : ESTEC, 2000. – 219 с.
21. Assessment of Atomic – Oxygen Flux in Low – Earth Orbit Ground Simulation Facilities / *E. Grossman*, *I. Gouzman*, *G. Lempert* et. al. // J. Spacecraft and Rockets. – 2004. – V. 41, № 3. – P. 356 – 368.
22. A quantitative study in synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment / *K. Yokota*, *K. Ikeda*, *M. Tagawa*, *M. Okato* // Proc. 10th Intern. Symp. on Materials in a Space Environment and 8th Intern. Conf. On Protection of Materials and Structures in a Space Environment. Collioure, France, 2006. – Noordwijk : ESTEC, 2006. – P. 127 – 132.
23. Исследование температурных зависимостей скоростей травления полиимидной пленки в плазме / *Е. В. Кувалдина*, *В. К. Любимов*, *А. И. Максимов* и др. // Химия высоких энергий. – 1990. – Т. 24, № 5. – С. 471 – 474.

24. Surface interaction of polyimide with oxygen ECR plasma / *M. Naddaf, C. Balasubramanian, P. S. Alegaonkar, V. N. Bhoraskar* et. al. // Nuclear instrument and methods in physics research. – 2004. – B222. – P. 135 – 144.
25. Деградация полимерных материалов на орбитальной космической станции ″Мир″ / *В. К. Милинчук, Э. Р. Клиншонт, И. П. Шелухов* и др. // Изв. Вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – № 2. – С. 108.
26. Исследования полиимидных пленок с защитными покрытиями для космических аппаратов / *В. Н. Черник, С. Ф. Наумов, С. А. Демидов* и др. // Перспективные материалы. – 2000. – № 6. – С. 14 – 20.
27. A quantitative study in synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment / *K. Yokota, S. Seikyu, M. Tagawa, N. Ohmae* // Proc. 9th Intern. Symp. on Materials in a Space Environment. – Noordwijk : ESTEC, 2003. – P. 265 – 276.
28. *Tagawa M.* Atomic Oxygen – Induced Polymer Degradation Phenomena in Simulated LEO. Space Environments : How do Polymers React in a Complication Space Environment / *M. Tagawa* // Acta Astronautica. – 2008. – № 62. – P. 203 – 210.
29. *Miller S.* Investigation into the differences in atomic oxygen erosion yields of materials in ground based facilities compared to those in LEO / *S. Miller, B. Banks, D. Waters* // Proc. 10th Intern. Symp. on Materials in a Space Environment and 8th Intern. Conf. On Protection of Materials and Structures in a Space Environment. Collioure, France, 2006. – Noordwijk : ESTEC, 2006. – P. 120 – 126.
30. Intelsat solar array coupon atomic oxygen flight experiment / *S. Koontz, G. King, A. Dunnet, T. Kirkendahl* // J. Spacecraft and Rockets. – 1994. – V. 31, № 3. – P. 475 – 481.
31. Probe Diagnostics of Laboratory and Ionospheric Rarefied Plasma Flows / *V. A. Shuvalov, N. I. Pis'mennyi, D. N. Lazuchenkov* and *G. S. Kochubey* // Instruments and Experimental Techniques. – 2013. – V. 56, №. 4. – P. 459 – 467; DOI: 10.1134/S0018151X11010044.
32. Идентификация землетрясений по зондовым измерениям возмущений параметров ионосферной плазмы на КА "Сич-2" / *В. А. Шувалов, Д. Н. Лазученков, С. В. Носиков, Г. С. Кочубей* // Космічна наука і технологія. – 2013. – Т. 19, № 5. – С. 26 – 36.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 22.10.2015,
в окончательном варианте 23.10.2015
.