

УДК 533.2:533.27

В. А. Шувалов<sup>1</sup>, В. Г. Тихий<sup>2</sup>, А. И. Приймак<sup>1</sup>,  
И. А. Гусарова<sup>2</sup>, Н. И. Письменный<sup>1</sup>, Н. А. Токмак<sup>1</sup>,  
Н. П. Резниченко<sup>1</sup>, С. В. Носиков<sup>1</sup>, Г. С. Кочубей<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт технічної механіки НАНУ і НКАУ, Дніпропетровськ

<sup>2</sup>Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

**Деградация полимерных материалов  
обшивок солнечных батарей КА  
при длительном воздействии потоков  
атомарного кислорода**

*Надійшла до редакції 04.03.05*

Розроблено процедуру та технічне забезпечення фізико-хімічного моделювання, проведення приско- рених ресурсних випробувань деградації вагових, геометричних та термооптичних характеристик полімерних матеріалів КА під час тривалої дії надзвукових потоків атомарного кисню у іоносфері Землі. Отримано залежності характеристик поліімідних плівок та вуглепластику від інтегрального флюенсу атомарного кисню.

**ВВЕДЕНИЕ**

Проблема обеспечения длительного функционирования космических аппаратов (КА) на низких и средних орбитах тесно связана с проблемой обеспечения стойкости материалов и покрытий наружных поверхностей элементов конструкций к воздействию околоспутниковой среды. При орбитальной скорости  $U_{\infty} \approx 8$  км/с поверхности элементов конструкций КА испытывают воздействие потока частиц ионосферной разреженной плазмы. Кинетическая энергия частиц в зависимости от массы составляет от 0.3 до 10 эВ. Преобладающим химическим компонентом ионосферы Земли, оказывающим определяющее влияние на деградацию основных классов конструкционных материалов КА на высотах от 200 до 700 км, является атомарный кислород. Механизм разрушения материалов наружных поверхностей КА связан как минимум с двумя видами воздействия: физическим распылением и химическим травлением потоком атомарного

кислорода. Следствием его воздействия на материалы панелей солнечных батарей КА являются:

- унос массы с поверхности материалов;
- изменение термооптических свойств поверхности материалов (коэффициента поглощения солнечного излучения  $\alpha_s$  и интегральной излучательной способности  $\epsilon$ );
- снижение электропроводности металлических контактов из-за окисления;
- изменение физико-механических свойств материалов в результате эрозии поверхности.

Информация об изменении свойств материалов наружных поверхностей КА из-за воздействия потока атомарного кислорода может быть получена практически только экспериментально — по результатам летных или стендовых испытаний. Относительная сложность и высокая стоимость натурных испытаний не позволяют считать их приемлемым средством для детального изучения влияния кислорода на материалы. Поэтому при построении моделей взаимодействия КА с околоспутниковой

средой предпочтение отдается модельным стендовым экспериментам. Такие исследования позволяют из широкого спектра процессов, протекающих на орбите, выделить основные, изучить их природу, провести параметрический анализ и сформулировать уточненные модели [16].

Целью данной работы является моделирование длительного воздействия потока атомарного кислорода ионосферы на материалы наружных поверхностей КА и оценка деградации весовых и термооптических характеристик полимерных материалов обшивок панелей солнечных батарей из-за длительного воздействия высокоскоростного потока частично ионизованного кислорода.

**УСЛОВИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КА С АТОМАРНЫМ КИСЛОРОДОМ В ИОНОСФЕРЕ**

Стендовое (физико-химическое) моделирование и имитация воздействия потока кислорода на наружные поверхности КА на орбите определяется условиями равенства скоростей и энергий при идентичности сорта частиц, бомбардирующих поверхность:

$$U_M \approx U_N, \tag{1}$$

или

$$\frac{M_O U_M^2}{2} = \frac{M_O U_N^2}{2}, \tag{2}$$

и интегральных флюенсов

$$F_O^{(M)} = F_O^{(N)}, \tag{3}$$

или потоков кислорода

$$\Phi_O^{(M)} t_M = \Phi_O^{(N)} t_N, \tag{4}$$

где индексы  $\langle M \rangle$  и  $\langle N \rangle$  соответствуют условиям стендового моделирования и условиям на орбите,  $U_N \approx 8$  км/с,  $M_O U_N^2 / 2 \approx 5$  эВ,  $M_O$  — масса атома кислорода,  $\Phi_O^{(H)} = N_O^{(H)} \cdot U_N$  — плотность потока (флюенс) кислорода,  $N_O^{(H)}$  — концентрация атомов кислорода;  $t_N$  — время контакта газа с поверхностью.

Значения годового флюенса  $\Phi_O^{(H)}$  атомов кислорода, бомбардирующих поверхность КА, приведены на рис. 1 [4]. Кривая 1 соответствует номинальным (стандартным) условиям солнечной активности, 2 — максимуму солнечной активности, 3 — минимуму солнечной активности. Атомарный кислород в ионосфере Земли на высотах от 200 до 700 км ионизован. Кривые 4, 5 рис. 1 представляют зависимости степени ионизации кислорода  $\zeta = N_O^+ / N_O$

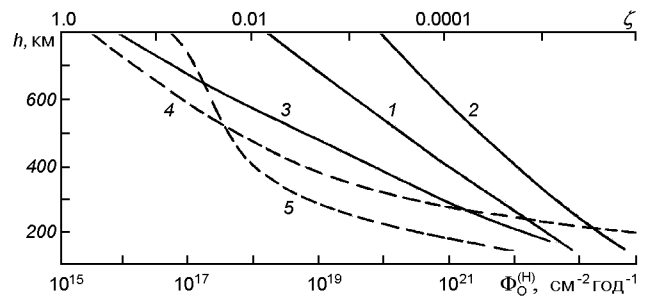


Рис. 1. Зависимость флюенса  $\Phi_O^{(H)}$  (сплошные кривые) и степени ионизации  $\zeta$  (штриховые) атомарного кислорода от высоты: 1 — номинальные, 2 — максимальные, 3 — минимальные условия солнечной активности; 4 и 5 — номинальные условия солнечной активности (ночь и день соответственно)

(4 — ночь, 5 — день) для номинальных условий солнечной активности. Степень ионизации кислорода на высотах от 200 до 700 км колеблется от  $10^{-4}$  до  $10^{-1}$  [4].

Физико-химическое воздействие кислорода на материалы и покрытия в ионосфере характеризуют взаимосвязанные процессы обмена энергией, массой и зарядом между частицами набегающего потока и поверхностью, включая химические реакции в адсорбированном и поверхностном слоях в условиях бесстолкновительного обтекания КА.

Положительные ионы кислорода с энергией от 5 до 10 эВ выполняют роль радиационно-химического активатора на поверхности материалов КА. Природа такого взаимодействия связана с нейтрализацией ионов, приводящей к возбуждению в полупроводниках и диэлектриках электронно-дырочных пар, достаточно долго сохраняющихся в поверхностном слое, толщиной не менее 10 атомных монослоев [1].

В условиях бесстолкновительного обтекания элементов конструкций КА потоком ионосферной разреженной плазмы с вероятностью, близкой к единице, непосредственно с поверхностью материалов КА взаимодействует нейтральный атом кислорода с энергией иона в момент нейтрализации [3, 9, 10, 14].

Близость процессов физико-химического взаимодействия в системах ион — твердое тело и нейтрал — твердое тело подтверждает близость значений коэффициентов аккомодации импульса и энергии и коэффициентов гетерогенной рекомбинации атомов и ионов кислорода и азота на бомбардируемых поверхностях [5, 14, 16].

Выполнение условий (1), (3) при бесстолкновительном обтекании поверхностей твердого тела сверхзвуковым потоком частично ионизованного кислорода обеспечивает моделирование и имита-

цию процессов физического (динамического) и химического взаимодействия материалов наружных поверхностей с кислородом в ионосфере Земли. Моделирование условий длительной эксплуатации КА на орбите предполагает проведение ускоренных ресурсных (стендовых) испытаний с применением более интенсивных, чем на орбите, потоков частиц. Из выражения (4) следует

$$\Phi_0^{(M)} = \Phi_0^{(H)} \frac{t_H}{t_M} = \Phi_0^{(H)} k_y. \quad (5)$$

Здесь  $k_y = t_H/t_M > 1$  — отношение длительности эксплуатации КА на орбите к длительности стендовых испытаний в форсированном режиме в соответствии с термодинамическим критерием эквивалентности испытаний [13] (коэффициент ускорения) характеризует условия приведения материала в одно и то же состояние накопленных повреждений.

Энтропийный критерий эквивалентности режимов эксплуатации и испытаний предполагает наличие верхних (предельных) значений нагрузок (концентраций и флюенса кислорода) для ускоренного режима. Главное условие выбора верхних (предельных) значений нагрузок состоит в том, чтобы ускоренные испытания не приводили к изменениям в механизмах взаимодействия частиц с поверхностью, возникновению новых (отличных от условий эксплуатации) физико-химических процессов в материалах, изменению механизмов старения или накопления повреждений. Область допустимых нагрузок при форсированных модельных (стендовых) испытаниях может быть определена условием

$$\Phi_0^{(H)} \leq \Phi_0^{(M)} < \Phi_{0\max}^{(M)}.$$

Для взаимодействия потока кислорода с поверхностью КА это условие соответствует требованию, чтобы процессы на поверхности, инициированные одним соударением, не перекрывались во времени. Согласно оценкам работы [3] для концентрации и флюенса кислорода такому требованию соответствуют соотношения

$$N_{0\max}^{(M)} \approx 10^{12} \text{ см}^{-3} \text{ и } \Phi_{0\max}^{(M)} \approx 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}. \quad (6)$$

Таким образом, для реализации ускоренных модельных испытаний материалов наружных поверхностей КА с целью определения их эрозийной стойкости к воздействию атомарного кислорода в ионосфере необходимо обеспечить:

- наличие потока частично ионизованного кислорода с направленными скоростями частиц, близкими либо равными орбитальным скоростям в ионосфере;
- режим бесстолкновительного обтекания фраг-

- ментов элементов конструкций КА или образцов испытуемых материалов газовым потоком;
- выполнение для параметров кислорода в ионосфере и на стенде условий и соотношений (1), (3), (5) и (6).

Перечисленные условия реализованы на плазгодинамическом стенде Института технической механики НАНУ и НКАУ [14, 16].

#### ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

*Стенд, средства измерения и контроля параметров потока.* Стенд относится к классу плазменных газодинамических труб и позволяет создавать высокоскоростные потоки разреженной плазмы с широким диапазоном рабочих параметров. Схема стенда приведена на рис. 2. Безмасляная откачивающая система производительностью по воздуху около  $50 \text{ м}^3/\text{с}$  (вакуумный электроразрядный агрегат и система турбомолекулярных насосов), наличие криопанелей, охлаждаемых жидким азотом ( $\text{LN}_2$ ), дают возможность реализовать в вакуумной камере — цилиндре диаметром 1.2 м и длиной 3.5 м — статическое разряжение  $10^{-5}$  Па, а в рабочих условиях при натекании газа давление ( $10^{-4} \dots 10^{-3}$ ) Па.

В качестве источника сверхзвуковых потоков разреженного частично ионизованного газа используется газоразрядный ускоритель с ионизацией рабочего тела электронным ударом и осциллирующей электронов во внешнем магнитном поле. Стенки разрядной камеры и элементы катодного узла охлаждаются проточной водой. Разряд «горит» между ленточным катодом и цилиндрическим анодом в кварцевой трубке (внутренний диаметр 60 мм, длина 200 мм, толщина стенки 4.0 мм). В вакуум-

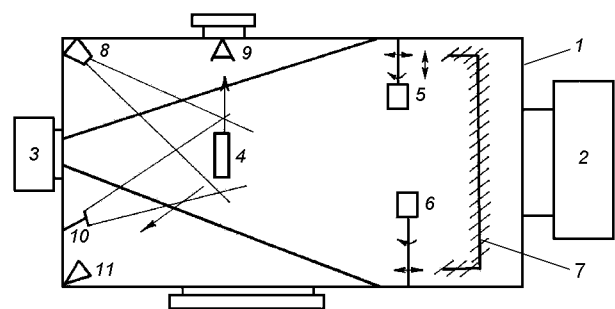


Рис. 2. Схема плазмодинамического стенда ИТМ: 1 — вакуумная камера; 2 — система откачки; 3 — генератор сверхзвуковых плазменных потоков; 4 — образец, модель космического аппарата; 5, 6 — системы диагностики; 7 — криопанели ( $\text{LN}_2$ ); 8 — электронная пушка; 9, 11 — антенны систем сверхвысоких частот; 10 — источник ультрафиолетового излучения

ной камере плазменная струя до термостата с испытуемыми образцами распространяется в кварцевой трубке с внутренним диаметром 160 мм и длиной 260 мм. Ресурс ленточного катода из фольги тантала с ниобием толщиной 0.2 мм и рабочей частью  $22 \times 22$  мм в кислороде  $t_p \approx 60$  мин. Смена катода осуществляется без разгерметизации вакуумной камеры при давлении в рабочей части  $10^{-5}$  Па. Разрядный ток  $I_p \approx 7.5$  А. Через катод пропускается ток до 400 А. Применение ускорителя с «саморазгоном» плазмы позволяет получать в рабочей части вакуумной камеры стенда высокоскоростные потоки частично ионизованного атомарно-молекулярного кислорода. Стенд снабжен электронной пушкой с энергией частиц от 0.1 до 30 кэВ и плотностью потока высокоэнергичных электронов от 0.01 до 100 нА/см<sup>2</sup>, источником электромагнитного излучения солнечного спектра в диапазоне длин волн от 115 до 400 нм [17].

Для измерения параметров плазменных потоков служит система электрических зондов и СВЧ-интерферометры, работающие в частотном диапазоне от 3 до 3.75 ГГц. Образцы испытуемых материалов, установленные на термостате, и диагностические средства размещены на подвижных платформах верхнего и нижнего координатников с четырьмя степенями свободы каждый, обеспечивающих продольное и поперечное перемещение в горизонтальной плоскости, перемещение в вертикальной плоскости и вращение вокруг вертикальной оси. Точность отсчета для линейных перемещений 0.5 мм, для угловых — 0.5°. При измерениях параметров заряженных частиц использовались электрические зонды: цилиндрические (из вольфрама радиусом  $r_p \approx 2 \cdot 10^{-2}$  см, длиной  $l_p \approx 2.0$  см и из молибдена  $r_p \approx 4.5 \cdot 10^{-3}$  см,  $l_p \approx 0.45$  см), а также сферический диаметром  $2r_p \approx 0.40$  см и плоский зонд из молибдена с рабочей поверхностью диаметром  $2r_p \approx 0.35$  см. Энергия направленного движения потока ионов контролировалась многоэлектродным зондом-анализатором радиусом  $r_p \approx 1.75$  см. При измерениях параметров нейтрального компонента применялся зонд давления и соотношения работы [18]. Для всех зондов при рабочих давлениях в вакуумной камере стенда ниже 0.01 Па выполнялись условия бесстолкновительного обтекания. Осевое (а) и радиальное (б) распределения концентрации заряженных частиц в высокоскоростном потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода показаны на рис. 3. Точки 1 — измерения концентрации заряженных частиц  $N_{O^+ + O_2^+}$  цилиндрическими зондами, 2 — сферическим, 3 — СВЧ-диагностика.

Соответствие зондовых (электронная ветвь

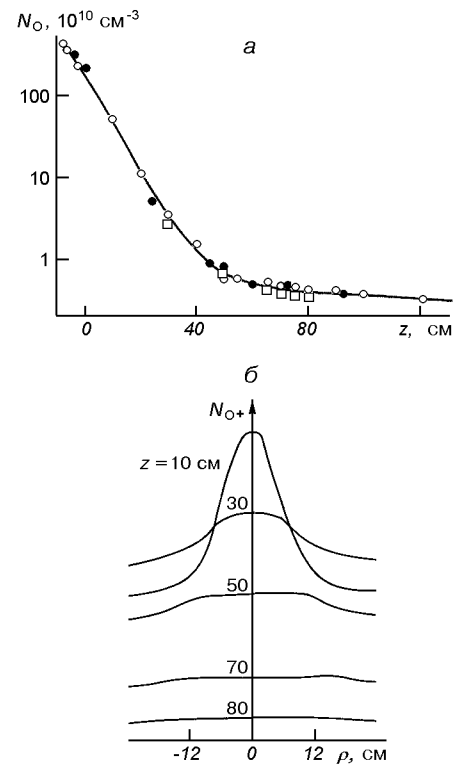


Рис. 3. Распределение концентрации ионов атомарно-молекулярного кислорода  $O^+ + O_2^+$ : а — осевое (кружки и точки — электрические зонды, квадратики — СВЧ-диагностика); б — радиальное ( $z$  — продольная координата от среза источника плазмы,  $\rho$  — радиальная координата от оси симметрии потока плазмы)

вольт-амперной характеристики) и СВЧ-измерений концентрации заряженных частиц позволяет с использованием условия квазинейтральности плазмы оценить:

- долю (наличие) отрицательных ионов в потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода,  $(N_e + N_i^-)_{\text{зонд}} \approx N_{e\text{свч}}$ , где  $N_e$  — концентрация электронов,  $N_i^-$  — концентрация отрицательных ионов;
- суммарную концентрацию положительных атомарных и молекулярных ионов:  $N_e \approx N_{\Sigma}^+ = N_{ia}^+ + N_{im}^+$ .

Такой подход вполне оправдан, так как методы СВЧ-диагностики основаны на рассеянии электромагнитного излучения на свободных электронах ионизованной среды [14, 19].

Степень диссоциации потока плазмы атомарно-молекулярного кислорода  $\xi_d$  контролируется масс-спектрометром MX 7303 и непосредственно у поверхности испытываемых образцов — электрическими зондами. Если степень диссоциации плазмы

атомарно-молекулярного кислорода представить в виде

$$\frac{N_{ia}}{N_{i\Sigma}} = \frac{N_{ia}}{N_{ia} + N_{im}} = \xi_d, \quad (7)$$

то ионный ток насыщения, ограниченный орбитальным движением частиц, на цилиндрический зонд, ориентированный перпендикулярно к вектору скорости набегающего потока, запишется в виде

$$I_{i\Sigma} = I_{ia} + I_{im} = \frac{A_p}{\pi} e N_{im} V_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_w}{M_1 V_{im}^2}} + \frac{A_p}{\pi} e N_{ia} V_{ia} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_w}{m_1 V_{ia}^2}}, \quad (8)$$

где  $A_p$  — площадь зонда,  $M_1$ ,  $m_1$  — масса молекулярного и атомарного иона соответственно,  $\varphi_w = \varphi_p - \varphi_0$  — потенциал зонда  $\varphi_p$  относительно потенциала плазмы  $\varphi_0$ .

Из (8) для цилиндрического зонда следует

$$I_{i\Sigma} = (1 + 0.4\xi_d) \frac{A_p}{\pi} e N_{i\Sigma} U_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_w}{M_1 U_{im}^2}}, \quad (9)$$

откуда

$$\xi_d \approx 2.5 \left( \frac{I_{i\Sigma}}{I_{0i} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_w}{M_1 U_{im}^2}}} - 1 \right), \quad (10)$$

где  $I_{0i} = \frac{A_p}{\pi} e N_{i\Sigma} U_{im}$  — ионный ток на зонд при  $\varphi_w \approx 0$ . Аналогичные выражения могут быть использованы для сферического и плоского зондов. В сечении  $z \approx 30$  см с применением цилиндрических, сферического и плоских зондов получены значения степени диссоциации плазмы атомарно-молекулярного кислорода  $0.58 \leq \xi_d \leq 0.65$ . Измеренная электрическими зондами величина согласуется с измерениями  $\xi_d$  с помощью масс-спектрометра MX 7303 ( $\xi_d \approx 0.61$ ). Разброс полученных значений не превосходит  $\pm 7.5\%$ .

На расстоянии  $z \approx 30$  см от среза ускорителя есть область с линейным размером около 12 см. Здесь концентрация ионов атомарно-молекулярного кислорода распределена равномерно, степень диссоциации равна  $\xi_d \approx 0.6$ , степень ионизации  $\zeta = N_{O^+ + O_2^+} / N_{O + O_2} \geq 0.01$ , направленная скорость ионов кислорода  $U_{O^+} \approx (8.3 \pm 0.5)$  км/с, концентрация ионов атомарного кислорода  $N_{O^+} \approx (2.0 \pm 0.3) \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup> и отношение скоростей  $S_{O^+} = U_{O^+} / V_{O^+} \approx 3.7$  ( $V_{O^+}$  — тепловая скорость ионов кислорода), флюенс ионов атомарного кислорода  $\Phi_{O^+} \approx 1.7 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>. Годо-

вой интегральный флюенс  $F_{O^+} \approx 3 \cdot 10^{20}$  см<sup>-2</sup> достигается, например, при  $t_M \approx 1.8 \cdot 10^4$  с, т. е. коэффициент ускорения испытаний составляет  $k_y \approx 1800$ . В сечении струи плазмы атомарно-молекулярного кислорода  $z \approx 30$  см при давлениях  $P \leq 0.01$  Па для фрагмента образцов испытываемых материалов с характерным размером  $R \leq 12$  см реализуется режим сверхзвукового бесстолкновительного обтекания.

*Материалы, средства измерения потери массы и термооптических характеристик.* Материалами для обшивок отечественных панелей солнечных батарей (СБ) служат: полиимидная пленка ПМ-А (желтая) толщиной  $\delta \approx 0.040$  мм и углепластик ЭЛУР 008+ЭДТ-10 (черный блестящий) толщиной  $\delta \approx 1.07$  мм. Для полиимида использовались образцы трех видов: 1) концы пленки завернуты за фольгу из нержавеющей стали размером  $50 \times 50$  мм и толщиной  $\delta \approx 0.2$  мм; 2) пленка на двух боковых сторонах закреплена тонкой вольфрамовой нитью диаметром 0.02 мм; 3) по периметру полиимидная пленка прижата к фольге металлической рамкой шириной около 2 мм. Такое крепление пленки позволяет исключить влияние краевых эффектов. Измерение и контроль температуры полиимидной пленки осуществлялось двумя миниатюрными термомпарами (хромель-копель) диаметром 0.1 мм, размещенными между пленкой и фольгой. В образец углепластика размером  $50 \times 50$  мм термомпары вмонтированы с внутренней стороны (между углепластиком и фольгой). Геометрические размеры образцов контролируются инструментальным микроскопом с 80-кратным увеличением.

Образцы испытываемых материалов (четыре одновременно) крепятся на фронтальной (относительно набегающего потока) поверхности двухсекционного термостата, охлаждаемого проточной водой (как в нашем случае) или жидким азотом. Термостат размером  $115 \times 115$  мм размещен на подвижной платформе нижнего координатника. Термостат с образцами испытываемых материалов в потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода показан на рис. 4.

Контроль флюенса атомарного кислорода осуществляется посредством мониторинга ионного тока насыщения при фиксированном потенциале на плоский зонд, закрепленный в одной плоскости с образцами испытываемых материалов на фронтальной поверхности термостата.

Измерение весовых и термооптических характеристик образцов производилось вне вакуумной камеры до и после экспонирования в потоке кислорода. Измерение массы образцов испытываемых матери-



Рис. 4. Термостат с образцами испытуемых материалов в потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода

алов определялось взвешиванием на микровесах с точностью не хуже 0.1 мг.

Термооптические характеристики образцов в видимой части спектра (от 400 до 750 нм) определялись:  $\alpha_s$  с помощью спектрофотометра СФ-18 при источнике света с цветовой температурой 2856 К;  $\epsilon$  с применением совокупности традиционных методов с использованием государственного эталона единицы света [8, 11], а также терморadiометра ТРМ-И с погрешностью не более  $\pm 1\%$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования кинетики процесса взаимодействия плазмы атомарно-молекулярного кислорода с полиимидной пленкой [6, 7] свидетельствуют о том, что молекулярный кислород инертен. Все химические реакции лимитирует одна стадия — реакция с участием окислителя (атомарный кислород). При этом соотношение скоростей газовой выделенной продукции химического травления ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{H}_2$ ) остается постоянным и не зависит от температуры пленки в диапазоне от 290 до 400 К и параметров разряда. Последнее также служит подтверждением, что вид частиц, химически воздействующих на пленку, не изменяется. Это обстоятельство, а также высокая вероятность нейтрализации положительных ионов кислорода при соударении с поверхностью полимерных, диэлектрических и полупроводниковых материалов позволяет при количественных оценках потери массы испытуемых образцов объединить в один ряд результаты исследований, выполненных в нейтральных потоках кислорода и плазмы атомарно-молекулярного кислорода.

**Потери массы материалов.** Пленка *kapton-H*. За рубежом на КА широко используется полиимид-

ная пленка *kapton-H*, характеристики которой близки к параметрам отечественных полимеров. На рис. 5, а приведена зависимость потери массы пленки *kapton-H* от интегрального флюенса кислорода по данным: крестики — измерения в СВЧ-плазме кислорода на стенде Lockheed Missiles and Space Company [25] (энергия частиц 2.2 эВ;  $\Phi_0 \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , толщина пленки  $\delta \approx 0.025 \text{ мм}$ ); квадратик — спутниковые измерения на STS-41 (Space Shuttle Discovery) [21]; треугольники — стендовые измерения в пучке кислорода с энергией частиц 4.6 эВ и  $\Phi_0 \approx 1.86 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  из [23]; кружок — измерения в плазме положительного столба разряда постоянного тока в  $\text{O}_2$  [6, 7]; звездочки — измерения на орбитальной станции «Мир» (время экспозиции 28 и 42 мес, толщина пленки  $\delta \approx 0.026 \text{ мм}$ ) [20]; прямая линия — зависимость  $\Delta t = Y_0 F_0^{\beta_m}$ . Здесь  $Y_0 \approx 4.4 \cdot 10^{-24} \text{ г/атомО}$  — коэффициент эрозии; коэффициент  $\beta_m \approx 1.0$ .

Изменение толщины полиимидной пленки *kapton-H*  $\Delta x$  в зависимости от интегрального флюенса атомарного кислорода  $F_0$  иллюстрирует рис. 5, б: точка, кружок, квадратик, ромб — спутниковые измерения на STS-4, 5, 8 [1] и STS-416 [24]; треугольники, звездочки — расчетные значения  $\Delta x$  из [2] и [22]; вертикальный отрезок — программа ATOMOX ESA; крестики — эксперимент LDEF (Long Duration Exposure Facility, время экспозиции 10 и 70 мес); косые крестики — измерения на ОС «Мир» (28 и 42 мес); прямая линия — зависимость  $\Delta x = R_e \cdot F_0^{\beta_x}$ , где для пленки *kapton-H*  $\beta_x \approx 1.0$ ,  $R_e \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО}$  — объемный коэффициент потери материала.

**Пленка ПМ-А.** Зависимость изменения толщины полиимидной пленки ( $\delta \approx 0.040 \text{ мм}$ ) от интегрального флюенса кислорода, полученная нами, показана на рис. 6, а. Крестики соответствуют измерениям при облучении фронтальной поверхности пленки набегающим потоком со скоростью  $U_{O^+} \approx (8.3 \pm 0.5) \text{ км/с}$ . Точки характеризуют условия облучения пленки диффузно рассеянными частицами, проникающими на поверхность пленки, экранированную металлической рамкой, с тепловыми скоростями  $V_{O^+} \approx 2.24 \text{ км/с}$ ; кружки — измерения на ОС «Мир» (пленка ПМ-1Е,  $\delta \approx 0.040 \text{ мм}$ , время экспозиции 28 и 42 мес) [20]; прямая линия — зависимость  $\Delta x = R_e \cdot F_0^{\beta_x}$ . Для полиимидной пленки ПМ-А —  $\beta_x \approx 1.0$ ;  $R_e \approx 2.6 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО}$ . Представленная зависимость свидетельствует о преобладающем влиянии механизма химического травления пленки кислорода. Потери массы полиимидной пленки ПМ-А из-за воздействия потока

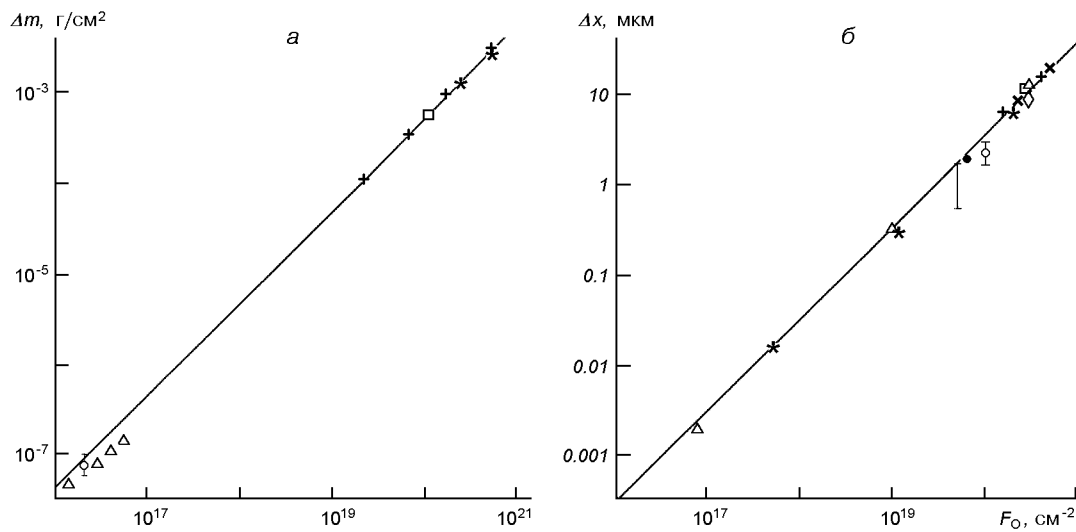


Рис. 5. Изменение массы (а) и толщины (б) полиимидной пленки картон-Н (детали см. в тексте)

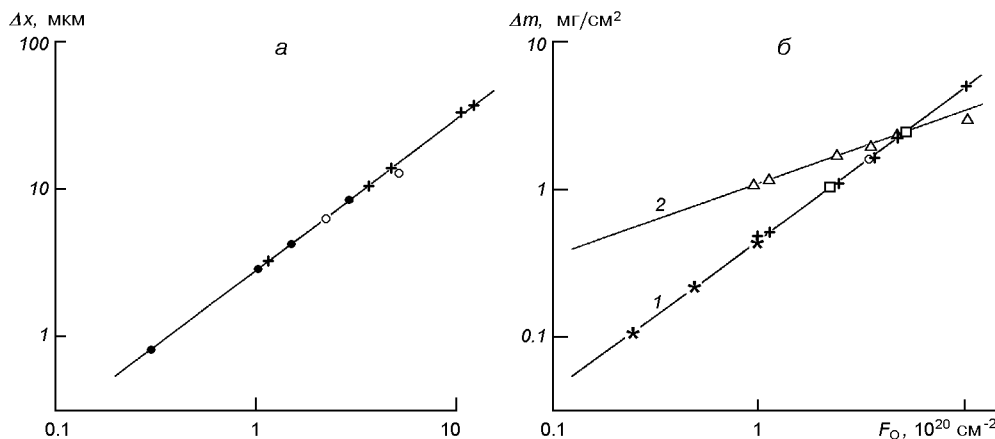


Рис. 6. а — изменение толщины полиимидной пленки ПМ-А; б — потеря массы полиимидной пленки (1) и углепластика (2) (детали см. в тексте)

атомарного кислорода иллюстрирует рис. 6, б. Крестики — наши измерения; кружок — ОС «Мир» (пленка толщиной  $\delta \approx 0.080$  мм, время экспозиции 1036 сут) [15]; квадратики — ОС «Мир» (пленка ПМ-1Е  $t_H \approx 28$  и 42 мес); звездочки — данные из работы [12]; прямая линия — зависимость  $\Delta m = Y_O F_O^{\beta_m}$ . Для полиимидной пленки ПМ-А  $\beta_m \approx 1.0$ ;  $Y_O \approx 4.2 \cdot 10^{-24}$  г/атомО. Сравнение показывает, что изменения  $\Delta x$  и  $\Delta m$  для ПМ-А (ПМ-1Е) ниже, чем для пленки картон-Н, т. е. эрозионная стойкость пленки ПМ-А к воздействию атомарного кислорода несколько выше, чем пленки картон-Н.

**Углепластик ЭЛУР.** Изменение (потери) массы углепластика ЭЛУР 0.08+ЭДТ-10, измеренные нами, представлены на рис. 6, б. Наши экспери-

ментальные данные (треугольники) аппроксимирует зависимость  $\Delta m = Y_O F_O^{\beta_y}$  (кривая 2). Для углепластика ЭЛУР  $Y_O \approx 4.45 \cdot 10^{-23}$  г/атомО;  $\beta_y \approx (1.45-1.045) \cdot 10^{-21} \eta F_O$ ,  $\eta = 1.0$  см<sup>2</sup>.

**Термооптические характеристики материалов.** Коэффициент поглощения солнечного излучения  $\alpha_s$ . Оптические характеристики полимерных пленок картон-Н, ПМ-1Е и ПМ-А близки. Это подтверждают начальные значения интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения  $\alpha_{0s}$  этих материалов, неэкспонированных в кислороде:  $\alpha_{0s} \approx 0.2$  для пленки картон-Н ( $\delta \approx 0.025$  мм) по данным [25];  $\alpha_{0s} \approx 0.221$  для пленки ПМ-1Е ( $\delta \approx 0.04$  мм) в спектральном диапазоне  $\lambda_v =$

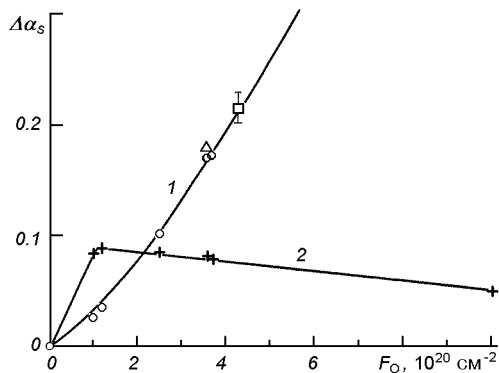


Рис. 7. Изменение коэффициента поглощения солнечного излучения для пленки ПМ-А (1) и углепластика ЭЛУР (2) (детали см. в тексте)

= 550...900 нм [20];  $\alpha_{0s} \approx 0.219$  для пленки ПМ-А ( $\delta \approx 0.04$  мм, наши измерения в диапазоне  $\lambda_v = 400...750$  нм). Под воздействием кислорода происходит химическое травление, химическая модификация, проявляющаяся в поверхностной эрозии, увеличении шероховатости поверхности полимерной пленки. Химическая модификация сопровождается уменьшением пропускательной способности пленки в видимой части спектра, пропорционально интегральному флюенсу кислорода. По данным [20] при  $F_0 \approx 4.52 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$  относительная пропускательная способность полиимидной пленки ПМ-1Е приближается к нулю: прозрачность уменьшается. С макроскопической точки зрения пленки, экспонированные в кислороде, являются непрозрачными по сравнению с неэкспонированными. Интегральный коэффициент поглощения видимого солнечного излучения увеличивается. Это подтверждают и данные рис. 7. Кружки — результаты наших стендовых испытаний для пленки ПМ-А ( $\delta \approx 0.04$  мм); треугольник — измерения на ОС «Мир» (1036 сут, пленка ПМ-А,  $\delta \approx 0.08$  мм) [15]; квадратик — данные спутниковых измерений [20] для полиимидной пленки ПМ-1Е ( $\delta \approx 0.040$  мм) с указанием максимальных и минимальных значений  $\alpha_s$ . Кривая — наша аппроксимация  $\Delta\alpha_s \approx 1 \cdot 10^{-27.5} F_0^{1.3}$ . Крестиками на рис. 7 представлены наши измерения для углепластика ЭЛУР  $\alpha_{0s} \approx 0.879$ . При воздействии потока атомарного кислорода наблюдается потеря блеска углепластика, экспонированная поверхность покрывается эмиттируемым углеродом (сажей), что приводит к увеличению интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения  $\alpha_s$ . Далее с увеличением интегрального флюенса кислорода  $F_0$  происходит оголение волокон наполнителя из-за разрушения и уноса материала поли-

Излучательная способность в ИК-диапазоне для полимерных материалов обшивок СБ

Материал	$F_0, 10^{20} \text{ см}^{-2}$	Коэффициент излучения $\epsilon$	
		до экспозиции	после экспозиции
Полиимидная пленка ПМ-А ( $\delta \approx 0.040$ мм)	1.16	0.550	0.550
	3.67	0.550	0.560
	4.9	0.550	0.560
Углепластик ЭЛУР	12.7	0.550	*
	1.16	0.900	0.900
	10.7	0.900	0.915

Примечание. \* — образец разрушился, время разрушения эквивалентно  $t_H \approx 3.8$  лет на орбите 700 км в условиях максимума солнечной активности

мерной матрицы и, как следствие, «посерение» облучаемой поверхности, приводящее к уменьшению  $\alpha_s$ .

**Коэффициент излучения  $\epsilon$ .** Результатом воздействия атомарного кислорода на поверхность экспонированных образцов является увеличение диффузной составляющей излучения (степени шероховатости пленки). Следствием таких изменений является слабое, но устойчиво регистрируемое увеличение интегральной излучательной способности материалов в ИК-диапазоне  $\epsilon$ . Начальное значение  $\epsilon_0$ , измеренное для полиимидной пленки ПМ-А в нашей работе, хорошо согласуется со значением  $\epsilon_0 \approx 0.52$  для пленки kapton-H из [25]. Измеренные значения  $\epsilon$  при различных флюенсах кислорода представлены в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана процедура и техническое обеспечение физико-химического моделирования, проведены ускоренные ресурсные испытания деградации весовых, геометрических и термооптических характеристик полимерных материалов обшивок панелей СБ при длительном воздействии сверхзвуковых потоков атомарного кислорода на орбите. Полученные зависимости характеристик деградации свойств материалов от интегрального флюенса кислорода соответствуют результатам натуральных спутниковых измерений на низко- и среднеорбитальных КА в ионосфере.

Изменение термооптических характеристик полиимидной пленки происходит вследствие химической модификации облучаемой поверхности и сопровождается уменьшением пропускательной способности пленки в видимой части спектра. Поверхно-



стная деградация углепластика проявляется в оголении волокон наполнителя из-за разрушения и уноса материала полимерной матрицы, сопровождается увеличением диффузной составляющей излучения.

Зависимости  $\Delta m(F_0)$  и  $\Delta x(F_0)$  для полиимидной пленки ПМ-А могут быть использованы как эталонные для оценки и контроля значений интегрального флюенса кислорода при проведении ускоренных ресурсных испытаний.

1. Акишин А. И., Гужова С. К. Взаимодействие ионосферной плазмы с материалами и оборудованием космических аппаратов // Физика и химия обработки материалов.—1993.—№ 3.—С. 40—47.
2. Акишин А. И., Теплов И. Б. Имитация воздействия космических излучений на материалы // Физика и химия обработки материалов.—1992.—№ 3.—С. 47—57.
3. Войцень В. С., Гужова С. К., Титов В. И. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. — М.: Энергоатомиздат, 1991.—224 с.
4. Гуревич А. В., Шварцбург А. В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973.—272 с.
5. Колесников А. Ф., Якушкин М. И. Об определении эффективных вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов азота и кислорода по тепловым потокам к поверхности // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. — М.: Наука, 1989.—С. 34—45.
6. Кувалдина Е. В., Любимов В. К., Максимов А. И. и др. Исследование температурных зависимостей скоростей травления полиимидной пленки в плазме // Химия высоких энергий.—1990.—24, № 5.—С. 471—474.
7. Кувалдина Е. В., Любимов В. К., Рыбкин В. В. Константа скорости и вероятность взаимодействия атомарного кислорода с полиимидной пленкой // Химия высоких энергий.—1992.—26, № 5.—С. 475—478.
8. Латышев Л. Н., Петров В. А., Чеховский В. Я., Шестаков Е. Н. Излучательные свойства твердых тел. — М.: Энергия, 1974.—472 с.
9. Мак-Даниэль И. Процессы столкновений в ионизованных газах. — М.: Мир, 1967.—832 с.
10. Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела. — М.: Мир, 1981.—488с.
11. Новицкий Л. А., Степанов Б. М. Оптические свойства материалов при низких температурах. Справочник. — М.: Машиностроение, 1980.—224 с.
12. Новые наукоемкие технологии в технике. Энциклопедия / Под. ред. К. С. Касаева. — М.: ЗАО НИИ «ЭНЦИТЕХ», 2000.—Т. 17В.—279 с.
13. Переверзев Е. С. Модели накопления повреждений в задачах долговечности. — Киев: Наук. думка, 1995.—360 с.
14. Резниченко Н. П., Шувалов В. А. Передача энергии атомарных ионов сверхзвукового потока частично диссоциированного газа поверхности твердого тела // Журн. прикладной механики и технической физики.—1989.—№ 6.—С. 11—19.

15. Черник В. Н., Наумов С. Ф., Демидов С.А и др. Исследования полиимидных пленок с защитными покрытиями для космических аппаратов // Перспективные материалы.—2000.—№ 6.—С. 14—20.
16. Шувалов В. А. Моделирование взаимодействия тел с ионосферой. — Киев: Наук. думка, 1995.—180 с.
17. Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др. Моделирование радиационной электризации подветренных поверхностей космических аппаратов на полярной орбите в ионосфере Земли // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 30—43.
18. Шувалов В. А., Приймак А. И., Резниченко Н. П. и др. Контактная диагностика ионосферной и лабораторной плазмы // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 2/3.—С. 3—15.
19. Шувалов В. А., Чурилов А. Е., Турчин В. В. Диагностика струи разреженной плазмы с применением зондового и СВЧ-методов // Теплофизика высоких температур.—1978.—16, № 1.—С.9—16.
20. Allegri G., Corradi S., Marchetti M., et al. On the degradation of polymeric thin films in LEO space environment // Proc. 9<sup>th</sup> Intern. Symp. on Materials in a Space environment. — Noordwijk, ESTEC, 2003.—P. 255—264.
21. Koontz S., King G., Dunnet A., et al. Intelsat solar array coupon atomic oxygen flight experiment // J. Spacecraft and Rockets.—1994.—31, N 3.—P. 475—481.
22. Paillous A. Spacecraft surface exposure to atomic oxygen in LEO // Technol. Environment spatial.—1987.—Toulouse.—P. 353—375.
23. Yokota K., Seikyn S., Tagava M., et al. A quantitative study in synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment // Proc. 9<sup>th</sup> Intern. Symp. on Materials in a Space environment. — Noordwijk, ESTEC, 2003.—P. 265—272.
24. Zimcik D. G., Maag C. R. Results of apparent atomic oxygen reactions with spacecraft materials during Shuttle flight STS-41G // J. Spacecraft and Rockets.—1988.—25, N 2.—P. 162—168.
25. Zimcik D. G., Wertheimer M. R., Balmain K. B., et al. Plasma-deposited protective coating for spacecraft applications // J. Spacecraft and Rockets.—1991.—28, N 6.—P. 652—657.

#### DEGRADATION OF POLYMERIC MATERIALS FOR COVERING SPACECRAFT SOLAR ARRAYS UNDER EXPOSURE TO ATOMIC OXYGEN FLOWS

V. A. Shuvalov, V. G. Tihiy, A. I. Priymak,  
I. A. Gusarova, N. I. Pismenny, N. A. Tokmak,  
N. P. Reznichenko, S. V. Nosikov, G. S. Kochubey

We developed a procedure and hard ware for physical and chemical modelling and conducting shortcut operational-life proof of degradation in weight, geometric and thermo-optical characteristics of polymers for spacecraft under prolonged exposure to supersonic fluxes of atomic oxygen in the Earth's ionosphere. Dependences of variation in the characteristics of polyimide films and carbon plastic materials on the integral fluence of atomic oxygen are derived.