

УДК 533.95

В. А. Шувалов, Н. А. Токмак, Н. П. Резниченко

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

ДЕГРАДАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработана процедура исследования деградации массовых и геометрических характеристик полимерных (полиимиды картон-Н, ПМ-1Э, тефлон FEP и полиэтилен) пленок — конструкционных материалов КА при длительном воздействии сверхзвуковых потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения. Определены пороговые значения отношения потока энергии ультрафиолетового излучения к потоку атомарного кислорода при возникновении синергетического эффекта потери массы полимерными пленками картон-Н, ПМ-1Э и полиэтилена, для тефлона FEP синергетический эффект не выявлен.

Ключевые слова: вакуумное ультрафиолетовое излучение, полимер, атомарный кислород, деградация, космический аппарат, синергетический эффект.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные материалы широко используются в качестве конструкционных материалов обшивок солнечных батарей (СБ) и компонентов экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ) — покрытий наружных поверхностей космических аппаратов (КА). Многослойная теплоизоляция ЭВТИ состоит, как правило, из нескольких слоев полимерных пленок (полиимид — картон-Н, ПМ-1Э, тефлон FEP и полиэтилен) толщиной 100—200 мкм с металлизацией поверхностей (серебро или алюминий). Металлизированный слой полимера служит для отражения солнечного излучения и охлаждения КА. Излучательная способность и величина коэффициента поглощения солнечного излучения материала зависит

от физической и химической структуры поверхности полимеров.

Околоспутниковая среда на высотах от 200 до 800 км агрессивна по отношению к полимерным пленкам и покрытиям КА. На околоземных орбитах факторами, определяющими изменение физических, химических, термооптических и механических свойств полимеров, являются потоки атомарного кислорода (ионы и нейтралы) с энергией около 5 эВ, термоциклирование в вакууме, электромагнитное излучение Солнца, проникающая радиация, потоки высокоэнергичных протонов и электронов.

Механизм разрушения материалов наружных поверхностей КА связан как минимум с двумя видами воздействия: физическим (кинетическим) распылением и химическим травлением при воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения.

© В. А. ШУВАЛОВ, Н. А. ТОКМАК, Н. П. РЕЗНИЧЕНКО, 2015

Следствия такого воздействия на материалы наружных поверхностей КА таковы:

- унос массы с поверхности материала;
- изменение термооптических свойств поверхности материалов (коэффициента поглощения солнечного излучения и интегральной излучательной способности);
- снижение электропроводимости металлических контактов солнечных батарей из-за окисления;
- изменение физико-механических свойств материалов в результате эрозии поверхности (снижение долговечности — длительной прочности полимеров).

Воздействие потоков атомарного кислорода приводит к окислительной деструкции полимерных материалов с образованием летучих оксидов CO , CO_2 и H_2O , что и обуславливает унос массы материалов. Атомарный кислород (АК) инициирует поверхностные реакции и модифицирует первый атомный слой (~1 нм). Вакуумный ультрафиолет (ВУФ) вызывает деструкцию ароматических групп ниже слоя поверхности, эродировавшего при бомбардировке АК. Нелетучие оксиды (Ag_2O , SiO_2 и др.) образуют слои и пленки, которые существенно изменяют термооптические свойства материалов и, как следствие, тепловой режим КА.

Экспозиция полиимидных пленок на МКС, орбитальной станции «Мир», КА «Спейс Шаттл» на высотах до 350 км [2, 10, 21, 32, 37] показала, что степень эрозии образцов полимерных материалов (унос массы, уменьшение толщины пленки) пропорциональна флюенсу АК (появился термин «полиимидный эквивалентный флюенс АК».) Стендовые исследования [19, 27, 28, 31, 38, 39, 41] свидетельствуют о том, что ВУФ усиливает действие АК, увеличивает эрозию полиимида в несколько раз. Вакуумный ультрафиолет индуцирует десорбцию молекул CO , CO_2 , H_2O и H_2 с поверхности полиимида: энергии ВУФ излучения солнечного спектра достаточно для разрыва связей С-С, С-О и функциональных групп. В том же время полиимид инертен к воздействию ВУФ в отсутствие АК [28, 31, 38].

Информация об изменении свойств материалов наружных поверхностей КА при длительной

эксплуатации в ионосфере из-за воздействия потоков АК и ВУФ может быть получена только экспериментально — по результатам летных или стендовых испытаний. Одним из путей решения задачи является физическое моделирование (или имитация) воздействия факторов космического пространства на материалы.

Цель данной работы:

- оценка потери массы полимерных пленок при воздействии потока АК ($U_\infty = 8$ км/с) и ВУФ-излучения, моделирующих внешние воздействия в ионосфере Земли;
- определение порогового значения отношения потоков энергии ВУФ к плотности потока АК, характеризующих синергетический эффект воздействия АК+ВУФ на унос массы полимерных пленок наружных покрытий КА.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛОВ КА С ПОТОКАМИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА

Физическое моделирование длительного воздействия факторов космического пространства на конструкционные материалы КА реализуется при проведении ускоренных ресурсных испытаний. Длительность испытаний сокращается за счет форсирования нагрузки. Форсирование нагрузки — сложная задача. При испытании технических систем, устройств, материалов ускоренными методами режим форсированных нагрузок должен быть организован таким образом, чтобы по заданному критерию он был эквивалентен эксплуатационному режиму. Выбор критерия эквивалентности эксплуатационного и форсированного режимов, обоснование числа ускоренных испытаний и их длительности — первостепенная задача. Для большинства конструкционных материалов это удается, когда определены параметры, по изменению которых можно судить о степени деградации и старения. Для режима длительной активной эксплуатации полимерных материалов в ионосфере определяющим параметром является изменение свойств полимеров при воздействии потока АК с энергией 5 эВ (скорость КА $U_\infty = 8$ км/с) и потока ВУФ излучения солнечного спектра.

Длительное воздействие потоков атомарного кислорода на материалы. Условием физического (стендового) моделирования и имитации воздействия потока АК с энергией 5 эВ на материалы наружных поверхностей КА является равенство скоростей и энергий

$$U_M = U_H, \quad (1)$$

$$M_{AK} U_M^2 / 2 = M_{AK} U_H^2 / 2$$

при идентичности сорта частиц, бомбардирующей поверхность, а также интегральных флюенсов

$$F_{AK}^{(M)} = F_{AK}^{(H)} \quad (2)$$

или плотностей потоков АК

$$\Phi_{AK}^{(M)} t_M = \Phi_{AK}^{(H)} t_H, \quad (3)$$

где индекс «М» характеризует условия физического (стендового) моделирования, «Н» — условия на орбите, ($U_H = 8$ км/с), $M_{AK} U_H^2 / 2 = 5$ эВ, M_{AK} — масса атома кислорода, $\Phi_{AK} = N_{AK} U_{AK}$, N_{AK} — концентрация атомов кислорода, t — время контакта газ — поверхность (время экспозиции).

Концентрация атомарного кислорода в атмосфере Земли днем при среднем уровне солнечной активности изменяется от $3 \cdot 10^9$ см⁻³ на высоте $h \approx 200$ км до $2 \cdot 10^6$ см⁻³ для $h \approx 800$ км [6].

Атомарный кислород в атмосфере Земли на высотах от 200 до 800 км ионизован, степень ионизации колеблется от 10^{-4} до 10^{-1} [6].

Выполнение условий (1), (2) при бесстолкновительном обтекании поверхностей твердого тела сверхзвуковым потоком частично ионизованного АК обеспечивает моделирование (или имитацию) процессов физико-химического взаимодействия материалов космических аппаратов с АК в атмосфере Земли. Моделирование условий длительной эксплуатации КА предполагает проведение ускоренных ресурсных (стендовых) испытаний с применением более интенсивных, чем на орбите, потоков частиц. Из выражения (3) следует

$$\Phi_{AK}^{(M)} = \Phi_{AK}^{(H)} \frac{t_H}{t_M} = \Phi_{AK}^{(H)} k_y, \quad (4)$$

где коэффициент ускорения $k_y = t_H / t_M > 1$ — отношение длительности эксплуатации КА на орбите к длительности испытаний в форсированном режиме.

С методологической точки зрения при реализации ускоренных испытаний полимерных материалов КА в режиме активной эксплуатации их в ионосфере наиболее эффективным является термодинамический энтропийный критерий эквивалентности [14]. В соответствии с термодинамическим энтропийным критерием эквивалентности два режима воздействия эквивалентны, если они вызывают в материалах одинаковые приращения необратимой составляющей энтропии.

Выполнение условий эквивалентности режимов испытаний на основе энтропийного критерия требует установления верхних значений параметров ускоренного режима, выше которых проводить испытания недопустимо. Главное условие выбора верхних (предельных) значений нагрузок состоит в том, чтобы ускоренные испытания не приводили бы к изменениям в механизмах взаимодействия частиц с поверхностью, возникновению новых (отличных от условий эксплуатации) физико-химических процессов в материалах, изменению механизмов накопления повреждений. Область допустимых нагрузок при форсированных модельных (стендовых) испытаниях может быть определена условием [10]

$$\Phi_{AK}^{(H)} \leq \Phi_{AK}^{(M)} \leq \Phi_{AK}^{(max)}. \quad (5)$$

Для взаимодействия потока АК с поверхностью КА это условие соответствует требованию, чтобы процессы на поверхности, инициированные одним соударением, не перекрывались во времени. Согласно оценкам [4] для концентрации и плотности потока АК такому требованию соответствуют соотношения

$$N_{AK}^{(M)} = 10^{12} \text{ см}^{-3}, \quad \Phi_{AK}^{(M)} = 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}. \quad (6)$$

Условия (5), (6) приемлемы для любого материала поверхности КА: для металлов $\Phi_{AK}^{(max)} \approx 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, для полимерных материалов и покрытий — $\Phi_{AK}^{(max)} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [4]. Таким образом, для реализации ускоренных испытаний материалов наружных поверхностей КА с целью определения их эрозионной стойкости к воздействию потока атомарного кислорода в атмосфере Земли необходимо обеспечить:

- наличие потока частично ионизованного АК с направленными скоростями, близкими

либо равными орбитальным скоростям КА в ионосфере;

- режим бесстолкновительного обтекания фрагментов элементов конструкций КА или образцов испытуемых материалов газовым потоком;
- выполнение для параметров АК в ионосфере и на стенде соотношений (1), (2), (4) и (6).

Перечисленные условия реализованы на плазгодинамическом стенде ИТМ [18].

Воздействие вакуумного ультрафиолета на материалы. Плотность потока энергии солнечного излучения — солнечная постоянная — составляет $1.4 \cdot 10^3$ Дж/(м²с). Примерно 0.03 % потока излучения (0.4 Дж/(м²с)) приходится на вакуумный ультрафиолет $\lambda_v = 10 \dots 225$ нм. Доля солнечного ультрафиолетового излучения в диапазоне от 10 до 400 нм составляет от 8 до 9 %, т. е. 126 Дж/(м²с) [3, 5, 7, 13, 27, 28].

Структуру спектра коротковолновой области солнечного излучения могут воспроизводить водородные и дейтериевые лампы, а также газоструйный имитатор ВУФ [3—5, 12, 17]. Эта область излучения ответственна за поверхностную деструкцию полимеров. Эффект длинноволновой области солнечного спектра воспроизводится в некоторой степени только дейтериевой лампой [39].

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования проводились на плазгодинамическом стенде ИТМ. Стенд генерирует высокоскоростные потоки разреженной плазмы с широким диапазоном рабочих параметров. Безмасляная откачивающая система производительностью по воздуху около 50 м³/с (вакуумный электроразрядный агрегат и система турбомолекулярных насосов), наличие криопанелей, охлаждаемых жидким азотом (LN₂), дают возможность реализовать в вакуумной камере — цилиндре диаметром 1.2 м и длиной 3.5 м — статическое разрежение 10^{-5} Па, а в рабочих условиях при натекании газа давление $10^{-4} \dots 10^{-3}$ Па.

Сверхзвуковой поток атомарного кислорода. В качестве источника сверхзвуковых потоков разреженного частично ионизованного газа используется газоразрядный ускоритель с ионизацией рабочего тела электронным ударом и ос-

цилляцией электронов во внешнем магнитном поле. Применение ускорителя с «саморазгоном» плазмы позволяет получать в рабочей части вакуумной камеры стенда сверхзвуковые потоки частично ионизованного атомарно-молекулярного кислорода [18].

Для измерения параметров плазменных потоков служит система электрических зондов и СВЧ-интерферометры, работающие в частотном диапазоне от 3 до 37.5 ГГц. Образцы испытуемых материалов, установленные на термостате, и диагностические средства размещены на подвижных платформах. Платформы обеспечивают продольное и поперечное перемещение термостата и диагностических средств в горизонтальной плоскости, перемещение в вертикальной плоскости и вращение вокруг вертикальной оси. Точность отсчета для линейных перемещений 0.5 мм, для угловых — 0.5°.

В ходе эксперимента образцы испытуемых материалов и диагностические зонды могут перемещаться практически в любую точку струи и объема вакуумной камеры. При измерениях параметров заряженных частиц использовались электрические зонды: цилиндрические (из вольфрама радиусом $r_p \approx 0.2$ мм, длиной $l_p \approx 2.0$ см и из молибдена $r_p \approx 0.045$ мм, $l_p \approx 4.5$ мм), а также сферический диаметром $2r_p \approx 4$ мм и плоский зонд из молибдена с рабочей поверхностью диаметром $2r_p \approx 3.5$ мм. Энергия направленного движения потока ионов контролировалась многоэлектродным зондом-анализатором радиусом $r_p \approx 1.75$ см. Для всех образцов материалов и зондов при рабочих давлениях в вакуумной камере стенда ниже 0.01 Па выполнялись условия бесстолкновительного обтекания. Измерение вольтамперных характеристик (ВАХ) и производных зондового тока проводилось в автоматическом режиме. Погрешность измерения индивидуальной ВАХ не превосходит ± 2 %.

Для контроля ориентации образцов-мишеней относительно вектора скорости набегающего потока использовался одиночный цилиндрический зонд радиусом $r_p \approx 0.2$ мм и длиной $l_p \approx 2$ см. Пик ионного тока, регистрируемый таким зондом при вращении вокруг вертикальной и горизонтальной осей, соответствует ориентации оси

зонда вдоль по потоку, а полуширина пика ионного тока пропорциональна степени неизотермичности разреженной плазмы. Для измерения параметров нейтрального компонента использовался зонд давления, угловая зависимость выходного сигнала датчика, формулы и процедуры обработки сигнала представлены в работе [17].

Для повышения точности определения концентрации заряженных частиц в потоке плазмы параллельно с зондовым использовался метод СВЧ-диагностики.

Осевое (а) и радиальное (б) распределения концентрации заряженных частиц в сверхзвуковом потоке плазмы атомарно-молекулярного кислорода приведены в работе [16].

Соответствие зондовых (электронная ветвь вольтамперной характеристики) и СВЧ-измерений концентрации заряженных частиц позволяет с использованием условия квазинейтральности плазмы оценить:

- долю (или 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, $N_e \approx N_{\Sigma}^+ = N_{ia}^+ + N_{im}^+$ (индекс «а» соответствует атомарным, «m» — молекулярным ионам кислорода).

Такой подход вполне оправдан, так как методы СВЧ-диагностики основаны на рассеянии электромагнитного излучения на свободных электронах ионизированной среды [17, 20].

Степень диссоциации потока плазмы атомарно-молекулярного кислорода ξ_d контролируется масс-спектрометром МХ7303, а непосредственно у поверхности испытываемых образцов — электрическими зондами. Если степень диссоциации плазмы атомарно-молекулярного кислорода представить в виде

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

то ионный ток насыщения I_{Σ} , ограниченный орбитальным движением частиц на цилиндрический зонд, ориентированный перпендикулярно к вектору скорости набегающего потока, запи-

шется в виде

$$I_{\Sigma} = (1 + 0.4\xi_d) \frac{A_p}{\pi} e N_{\Sigma} U_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\phi_W}{M_i U_{im}^2}}, \quad (8)$$

откуда степень диссоциации ионного компонента

$$\xi_d \approx 2.5 \left(\frac{I_{\Sigma}}{I_{oi} \sqrt{1 + 2e\phi_W / (M_i U_{im}^2)}} - 1 \right). \quad (9)$$

Здесь $I_{\Sigma} = I_{ia} + I_{im}$, I_{ia} — ионный ток насыщения атомарных ионов, I_{im} — ионный ток насыщения молекулярных ионов, A_p — площадь зонда, e — заряд электрона, U_{im} , M_i — скорость и масса молекулярных ионов, $\phi_W = \phi_p - \phi_0$ — потенциал зонда ϕ_p относительно потенциала плазмы ϕ_0 , $I_{oi} = (A_p/\pi) e N_{\Sigma} U_{im}$ — ионный ток на зонд при $\phi_W \approx 0$.

Измеренное электрическими зондами значение $0.58 \leq \xi_d \leq 0.65$ согласуется с оценкой, полученной с помощью масс-спектрометра МХ 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 с равномерным распределением концентрации ионов атомарно-молекулярного кислорода и степенью диссоциации $\xi_d \approx 0.6$, степенью ионизации $\zeta = N_{O^+ + O_2^+} / N_{O + O_2} \approx 0.1$, направленной скоростью ионов атомарного кислорода $U_{O^+} \approx 8.3 \pm 0.5$ км/с, концентрацией ионов атомарного кислорода $N_{O^+} \approx (2.0 \pm 0.3) \cdot 10^{10}$ см⁻³ и скоростным отношением $S_{O^+} = U_{O^+} / V_{O^+} \approx 3.4$ (V_{O^+} — тепловая скорость ионов АК).

Плотность потока ионов атомарного кислорода $\Phi_{O^+} \approx 1.7 \cdot 10^{16}$ см⁻²с⁻¹. 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. Годовой интегральный флюенс $F_{O^+} \approx 3 \cdot 10^{20}$ см⁻² достигается, например, при $t_M \approx 1.8 \cdot 10^4$ с. Нейтральные атомы в плазме движутся с дозвуковой скоростью $U_n \approx 0.45$ км/с. Флюенс АК F_O вычисляется по времени экспозиции и измеренным в месте расположения образцов значениям ξ_d , N_{Σ} , U_{O^+} , ζ , U_n :

$$F_o = F_{o^+} + F_n = \xi_d N_{i\bar{z}} U_{o^+} t + \xi_d \zeta^{-1} N_{i\bar{z}} U_n t =$$

$$= \xi_d N_{i\bar{z}} U_{o^+} t \left(1 + \frac{\zeta^{-1} U_n}{U_{o^+}} \right). \quad (10)$$

Вакуумный ультрафиолет. На плазмодинамическом стенде в качестве источника ВУФ-излучения использовались три низковольтные водородные лампы ВМФ-25, изготовленные в ФГУП НПК «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» (Санкт-Петербург). Угол падения фотонов (между осью пучка ВУФ и нормалью к облучаемой поверхности образца) не более 10° . Лампа ВМФ-25 создает на срезе поток ВУФ-излучения $J_{ov} \approx 80$ мВт в диапазоне длин волн от 113 до 165 нм с многолинейчатым спектром, а в диапазоне от 165 до 380 нм — поток излучения около 10 мВт со сплошным спектром [<http://www.npkgoii.ru>].

Материалы и средства измерения потери массы. В качестве испытуемых использовались образцы материалов трех групп: картон-Н и ПМ-1Э (коммерческая формула $C_{22}H_{10}N_2O_5$), полиэтилен $(C_2H_4)_n$ и тефлон FEP-100A $(C_2F_4)_n$.

Измерение и контроль температуры пленок осуществлялось миниатюрными термодарами (хромель-копель) диаметром около 0.1 мм.

При концентрации ионов потока АК от $5 \cdot 10^{13}$ до $2 \cdot 10^{16}$ м $^{-3}$ и скорости ионов, направленной по нормали к бомбардируемой поверхности $U_{AK} \approx 9.1$ км/с реализуются следующие значения интегрального флюенса $10^{15} < F_{AK}^{(M)} < 10^{21}$ см $^{-2}$. Образцы испытуемых материалов крепятся на фронтальной (относительно набегающего потока) поверхности термостата. Термостат выполнен в виде двух плоских соосных дисков, покрытых тонкой пленкой диэлектрика. Наружный диск — экран с окном размером 52×52 мм. На внутреннем диске, вращающемся вокруг горизонтальной оси, параллельной вектору скорости набегающего потока, расположены четыре образца испытуемых материалов, а также плоский зонд из молибдена диаметром $d_p \approx 3.5$ мм и цилиндрический зонд — молибденовая нить диаметром $d_p = 90$ мкм и длиной $l_p \approx 5$ мм. Поверхности обоих зондов ориентированы ортогонально вектору скорости U_{AK} . Зонды, расположенные

в одной плоскости с образцами, позволяют контролировать флуктуации параметров потока АК посредством мониторинга ионного тока насыщения при фиксированном потенциале зонда φ_p относительно потенциала плазмы φ_0 ($\varphi_w = \varphi_p - \varphi_0$). Геометрические размеры образцов контролировались инструментальным микроскопом с 100-кратным увеличением.

Для измерения весовых характеристик испытуемых образцов непосредственно в вакуумной камере в статических условиях использовались микровесы компенсационного типа с диапазоном измеряемых сил от 10^{-8} до 10^{-3} Н [18, 19]. Вне вакуумной камеры до и после экспонирования использовались микровесы с погрешностью измерения не более 10^{-4} г.

ПОТЕРИ МАССЫ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА

Исследования кинетики процесса взаимодействия плазмы атомарно-молекулярного кислорода с полиимидной пленкой картон-Н [8, 9] свидетельствует о том, что молекулярный кислород инертен и участия в химических реакциях не принимает. Химические реакции лимитирует реакция окисления с участием АК в качестве окислителя. При этом соотношение скоростей газовой выделенной продуктов химического травления — CO, CO $_2$, H $_2$ O и H $_2$ остается постоянным и не зависит от температуры полимерной 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 АК при соударении с поверхностью полимерных, диэлектрических и полупроводниковых материалов позволяет при количественных оценках потери массы испытуемых образцов полимерных пленок объединить в один ряд результаты исследований, выполненных в нейтральных потоках АК и в потоках плазмы атомарно-молекулярного кислорода [4, 38].

Воздействие атомарного кислорода на полиимидные пленки. Полиимидные пленки картон-Н, ПМ-1Э относятся к одному классу полимеров

группы Н, близки по химическому составу, сходны по структуре и плотности материала от 1.42 до 1.56 г/см³, широко применяются в космической технике. Это обстоятельство позволяет при оценке потерь массы под воздействием потоков АК объединить результаты исследований, выполненных для полиимидных пленок в наземных условиях и в космосе.

На рис. 1 представлены результаты, иллюстрирующие изменение толщины δx и потери массы $\Delta m = Y_{AK} F_{AK} = \rho Re F_{AK} = \rho \delta x$ полиимидных пленок картон-Н и ПМ-1Э — типовых материалов наружных поверхностей и обшивок солнечных батарей КА в потоке АК. Здесь $Y_{AK} = \rho Re$ — коэффициент эрозии, $Re \approx 3 \cdot 10^{-24}$ см³/атом — объемный коэффициент потери массы картон-Н (реакционная способность материала относительно АК), ρ — плотность полиимидной пленки.

Результаты измерений потери массы полиэтилена (C₂H₄)_n при воздействии сверхзвукового потока атомарного кислорода иллюстрирует рис. 2.

Зависимость $\Delta m = f(F_{AK})$ для тефлона FEP-100A (C₂F₄)_n представлена на рис. 3. Для объемного коэффициента потери массы полимеров $Re \cdot 10^{24}$, см³/атомО по результатам экспериментальных исследований в потоке АК на стенде ИТМ получены следующие значения: полиимиды картон-Н — 3.03, ПМ-1Э — 2.37, полиэтилен — 3.86, тефлон FEP-100A — 0.23.

Расчетные значения δx и Δm , представленные на рис. 1—3 прямыми, удовлетворительно согласуются с результатами физико-химического моделирования на стендах и натурных космических экспериментов.

Воздействие вакуумного ультрафиолета на полимерные пленки КА. Полиимидная пленка картон-Н практически инертна к воздействию ВУФ. Это установлено в работах [34, 38, 39, 45] при изменении угла облучения от 0 до $\pi/2$ образцов пленки в потоке ВУФ $\lambda_v \approx 172$ нм при $\Phi_v \approx 4.5$ мВт/см². Практически аналогичный результат для диапазона длин волн ВУФ λ_v от 115 до 200 нм получен в работе [28].

Исследования данной работы по влиянию ВУФ на деградацию полиимидных пленок картон-Н и ПМ-1Э проводились в статических ус-

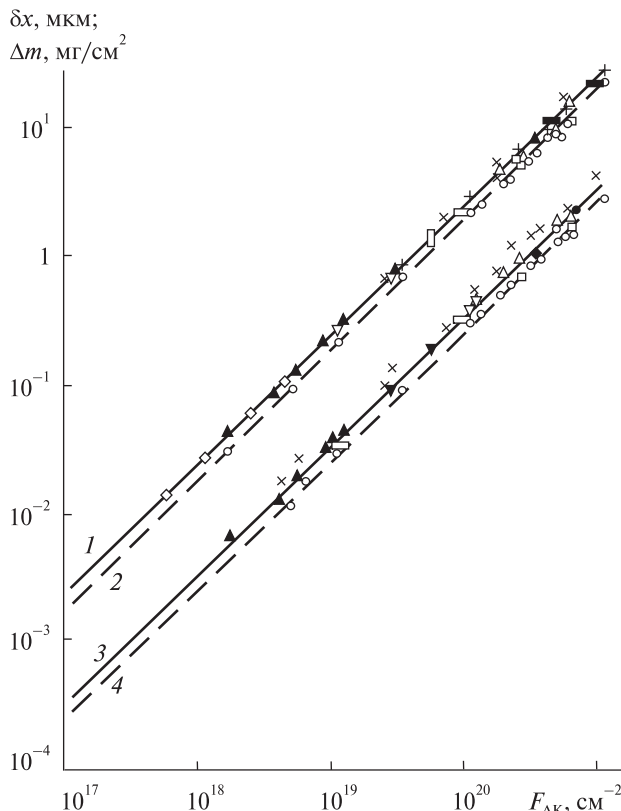


Рис. 1. Изменение толщины δx и потери массы Δm полиимидных пленок картон-Н и ПМ-1Э при воздействии сверхзвукового потока F_{AK} атомарного кислорода: точка — данные [36], косые крестики — наши измерения картон-Н, светлые треугольники — экспозиция на ОС «Мир» [10], светлые перевернутые треугольники — данные [1], звездочка — измерения КА STS-41 [13], светлые горизонтальные штрихи — измерения КА STS-85 [37], вертикальные штрихи — данные АТОМОХ [26], светлый ромбик — измерения в пучке АК [28], темные треугольники — RF-плазма [35, 42], темные перевернутые треугольники — [8], темный ромбик — данные КА STS-41g [12], кружки — наши измерения ПМ-1Э, квадратики — программа «Компласт» на ОС «Мир» [10], темные горизонтальные штрихи — [15], прямая линия 1 — расчетные значения δx картон-Н ($Re \approx 3 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО), 2 — расчет δx ПМ-1Э ($Re \approx 2.37 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО), 3 — Δm (картон-Н, расчет), 4 — расчет Δm для ПМ-1Э

ловиях при давлении в вакуумной камере стенда 10^{-5} Па. Облучение образцов полиимидных пленок производилось на расстоянии $z \approx 7$ см от среза ламп ВМФ-25. Плотность потока ВУФ $\Phi_v \approx 3.9$ мВт/см², время экспозиции $t_3 = 30 \dots 200$ мин. Температура поверхности образцов контролиро-

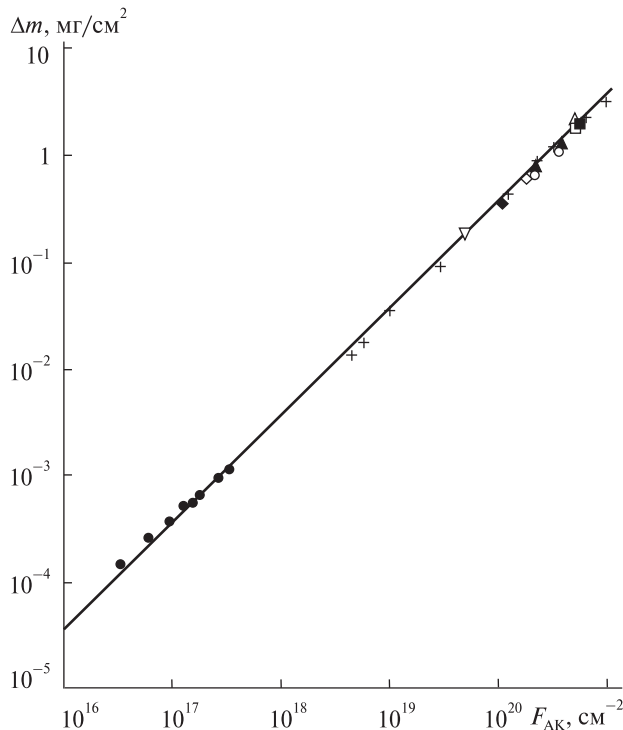


Рис. 2. Потери массы полиэтилена (C_2H_4) в сверхзвуковом потоке атомарного кислорода: темный квадрат — измерения [44], перевернутый треугольник — АТОМОХ [26], треугольник — данные [23, 29], темный ромб — измерения в ходе миссии STS-41 [13], светлый квадрат — данные LDEF [22], темные треугольники и кружки — МК-2007 [12], светлый ромб — STS-141 [29], точки — данные [30, 34], крестики — измерения авторов, прямая линия — расчет для $Re \approx 3.86 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО}$

валась по показаниям миниатюрных термопар с погрешностью не более 0.5 К. При экспозиции в потоке ВУФ температура поверхности образцов практически равна температуре массивной металлической подложки — внутреннего диска термостата ($T_w \approx 297 \text{ К}$).

Для полиимидов картон-Н, ПМ-1Э и полиэтилена потери массы оказались вне пределов чувствительности микровесов $\Delta m < 10^{-4} \text{ г}$. Зависимость потери массы образца тефлона FEP-100A от потока ВУФ трех водородных ламп ВМФ-25 $F_v = \Phi_v \cdot t$ иллюстрирует рис. 4.

Синергетический эффект при длительном воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета. Вакуумный ультрафиолет усиливает воздействие атомарного кисло-

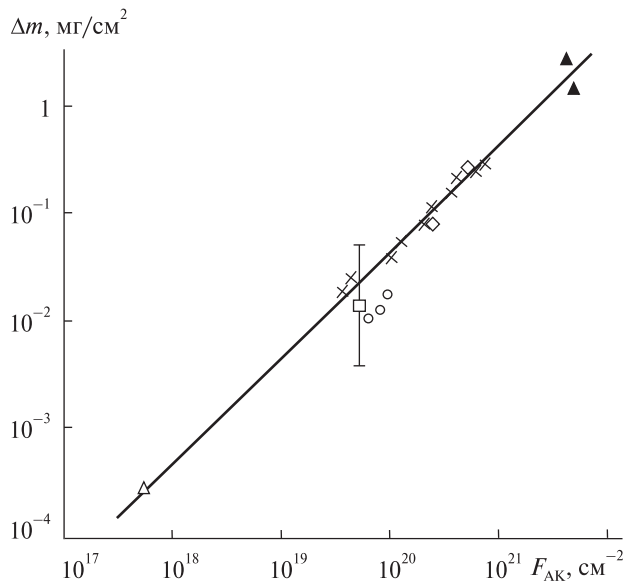


Рис. 3. Зависимость потери массы тефлона FEP-100A от флюенса атомарного кислорода сверхзвукового потока при $U_{AK} \approx 9.1 \text{ км/с}$: темные треугольники — данные LDEF для экспозиции в течение 105 дней [33, 40], ромбики — эксперимент «Компласт» на ОС «Мир» [10], кружки — измерения ЦАГИ [11], темный квадратик — АТОМОХ [26], светлый треугольник — [27], косые крестики — наши измерения, прямая линия — расчет при $Re \approx 3.86 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО}$

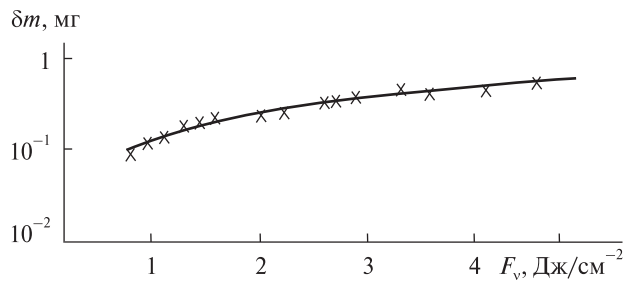


Рис. 4. Потери массы Δm образца тефлона FEP-100A в потоке ВУФ: крестики — наши измерения, кривая — среднее

рода. Рис. 5 иллюстрирует влияние АК+ВУФ при $\Phi_{AK} \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ с энергией 5 эВ и $\Phi_v \approx 1.6 \cdot 10^{16} \text{ фотон}/(\text{см}^{-2}\text{с}^{-1})$ в диапазоне длин волн $\lambda_v = 115 \dots 200 \text{ нм}$ на изменение толщины полиимидной пленки картон-Н для времени экспозиции $0 \leq t_3 \leq 80 \text{ мин}$ (данные [28], рис. 2). В отличие от данных [28, рис. 2] на рис. 5 приведены абсолютные, а не относительные зна-

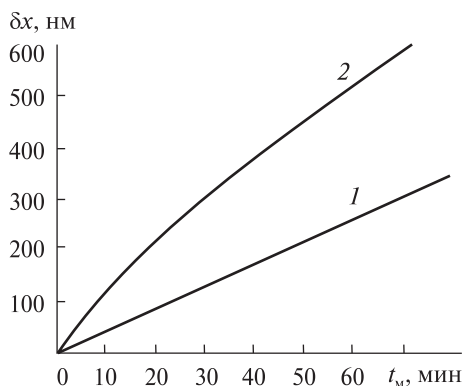


Рис. 5. Изменение толщины полиимидной пленки картон-Н от времени экспозиции $0 \leq t_3 \leq 80$ мин [28]: 1 — воздействие АК, 2 — воздействие АК+ВУФ

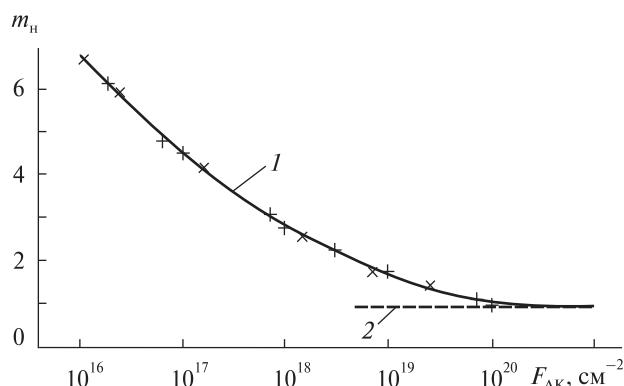


Рис. 6. Зависимость изменения нормированной массы $m_n = \Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK}$ образцов полиимидных пленок от флюенса АК (измерения авторов): прямые крестики — пленка картон-Н, косые крестики — пленка ПМ-1Э, кривая 1 — аппроксимация $\Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK} = 1.327\eta$, штриховая линия 2 — пороговое значение F_{AK}

Зависимость функции η от флюенса атомарного кислорода F_{AK}

$F_{AK}, \text{см}^{-2}$	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}	10^{21}
η	3.425	2.055	1.421	0.753	0.753

чения изменения δx толщины пленки: пересчет произведен для АК при $Re = 3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атомО}$ с экстраполяцией значений для АК+ВУФ. Для условий эксперимента работы [28] при $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ мДж/атомО}$ синергетический эффект (уменьшение толщины пленки) составил $\delta x_{AK+VUV}/\delta x_{AK} \approx 2.0$.

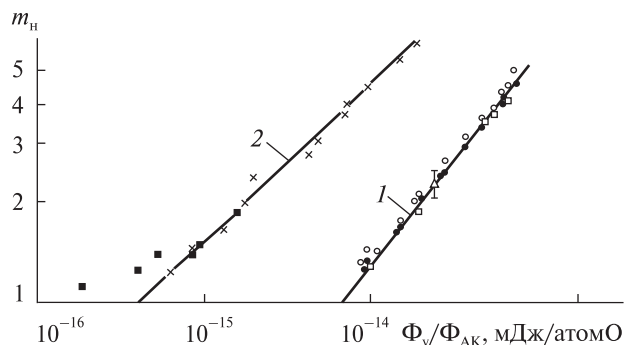


Рис. 7. Зависимость нормированной массы $m_n = \Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK}$ от отношения плотности потока ВУФ к плотности потока атомарного кислорода: полиимиды (точки — картон-Н, кружки — наши измерения ПМ-1Э, светлые квадратики — [39, 41], треугольник — пересчет авторов для пленки картон-Н на условия эксперимента [28], прямая линия 1 — аппроксимация $\Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK} = 9.891 \cdot 10^8 (\gamma \Phi_v/\Phi_{AK})^{0.635}$, полиэтилен (косые крестики — наши измерения, темные квадратики — данные [30, 34, 43], кривая 2 — аппроксимация $\Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK} = 1.216 \cdot 10^7 (\gamma \Phi_v/\Phi_{AK})^{0.461}$. (Здесь γ — 1 атомО/мДж)

Зависимость изменения нормированной массы образцов полиимидных пленок от флюенса атомарного кислорода F_{AK} показана на рис. 6. Она позволяет определить минимальное значение величины $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$, блокирующей реализацию синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ на потери массы пленками картон-Н и ПМ-1Э. С увеличением интегрального флюенса до $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$ роль АК возрастает: потеря массы из-за воздействия АК+ВУФ уменьшается вплоть до значений $\Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK} \approx 1$ (штриховая линия на рис. 6). На рис. 6 представлена зависимость $\Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK} = f(F_{AK})$: для наших измерений пленки картон-Н и ПМ-1Э, кривая 1 — зависимость $\Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK} = Y_{AK+VUV}/Y_{AK} = 1.327\eta$. Значения функции $\eta = f(F_{AK})$ приведены в таблице. Величина $F_{AK} > 10^{20} \text{ см}^{-2}$ соответствует условиям проведения измерений на КА «Спейс Шаттл» (миссии STS-4, STS-5, STS-6, STS-41) и ОС «Мир» на высотах $h \leq 350 \text{ км}$ [10, 21, 36, 37].

Зависимости изменения относительной потери массы $\Delta m_{AK+VUV}/\Delta m_{AK}$ образцов полиимидных пленок картон-Н и ПМ-1Э, а также полиэтилена, от отношения плотности Φ_v потока ВУФ к плотности потока кислорода Φ_{AK} показаны на рис. 7. Эти зависимости позволяют оценить пороговые

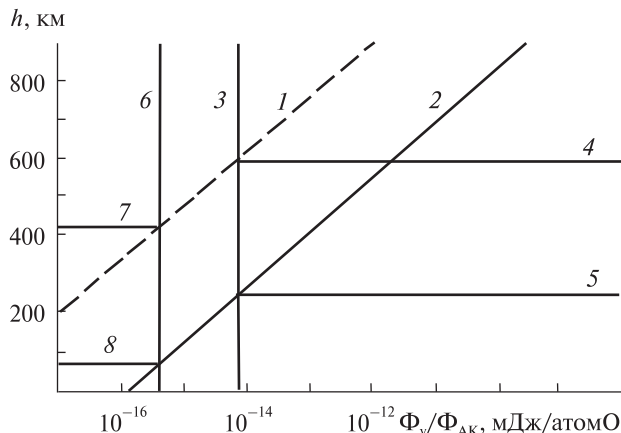


Рис. 8. Изменение Φ_v/Φ_{AK} с высотой h орбиты КА: 1 — ВУФ ($\lambda_v = 10...225$ нм), 2 — солнечное УФ-излучение ($\lambda_v = 10...400$ нм), 3 — пороговое значение $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 7.1 \cdot 10^{-15}$ мДж/атомО для полиимидов, 4, 5 — область синергетического эффекта при воздействии АК+ВУФ для $h \geq 590$ км и АК+УФ для $h \geq 250$ км (полиимидные пленки), 6 — пороговое значение $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 4.3 \cdot 10^{-16}$ мДж/атомО для полиэтилена, 7 — область $h \geq 410$ км для АК+ВУФ, 8 — $h \geq 70$ км для АК+УФ (полиэтилен)

значения Φ_v/Φ_{AK} для синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ на потери массы пленок картон-Н и ПМ-1Э (полиимиды) — $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 7.1 \cdot 10^{-15}$ мДж/атомО, а также полиэтилена — $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 4.3 \cdot 10^{-16}$ мДж/атомО. Для тефлона FEP-100А, как и в работах [11, 24, 25, 27, 33, 41], синергетический эффект не обнаружен.

На рис. 8 приведены зависимости Φ_v/Φ_{AK} от высоты h при среднем уровне солнечной активности [26]. Область синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ на полиимидные пленки расположена справа от граничной прямой 3 (значение $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 7.1 \cdot 10^{-15}$ мДж/атомО). Точки пересечения граничной прямой 3 с линиями 1, 2 определяют области синергетического эффекта АК+ВУФ $h > 590$ км (линия 4) и для АК+УФ $h < 250$ км (линия 5). Отсутствие синергетического эффекта по результатам экспериментов на МКС, ОС «Мир» и КА «Space Shuttle» свидетельствует, по-видимому, о преобладающем влиянии коротковолновой части спектра солнечного УФ-излучения на унос массы и изменение толщины полиимидных пленок. Оценки областей (высот) влияния АК+ВУФ для пороговых значений F_{AK} и Φ_v/Φ_{AK} практически совпадают. Значения

$\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 7.1 \cdot 10^{-15}$ мДж/атомО и $F_{AK} \leq 10^{20}$ см⁻² определяют условия, при которых имеет место синергетический эффект воздействия АК+ВУФ на полиимидные пленки картон-Н и ПМ-1Э, а значение $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 4.3 \cdot 10^{-16}$ мДж/атомО характеризует синергетический эффект для полиэтилена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы условия и требования для реализации ускоренных ресурсных испытаний на стойкость полимерных материалов КА к длительному воздействию сверхзвуковых потоков атомарного кислорода и ВУФ солнечного спектра на высотах от 300 до 1000 км.

Экспериментальные исследования потери массы проведены для полиимидных пленок картон-Н, ПМ-1Э, пленок полиэтилена и тефлона FEP-100 А — типовых материалов наружных покрытий КА. Получены зависимости уноса массы от флюенса АК, плотности потока ВУФ и воздействия АК+ВУФ. Определены значения объемного коэффициента потери массы материала при воздействии сверхзвукового потока АК: картон-Н $Re \approx 3.03 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО, ПМ-1 Э — $Re \approx 2.37 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО, полиэтилен — $Re \approx 3.86 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО, тефлон FEP-100А $Re \approx 0.23 \cdot 10^{-24}$ см³/атомО, а также пороговые значения отношения плотности потока ВУФ к потоку АК, характеризующие синергетический эффект длительного воздействия АК+ВУФ на потери массы полимерными пленками КА: для полиимидов $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 7.1 \cdot 10^{-15}$ мДж/атомО, для полиэтилена — $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 4.3 \cdot 10^{-16}$ мДж/атомО, для тефлона FEP-100А — синергетический эффект не обнаружен.

1. Акишин А. И., Гужова С. К. Взаимодействие ионосферной плазмы с материалами и оборудованием космических аппаратов // Физ. и хим. обработки материалов. — 1993. — № 3. — С. 40—47.
2. Ананьева О. А., Милинчук В. К., Загорский Д. Л. Исследование односторонне алюминированных полиимидных пленок, экспонированных на орбитальной космической станции «Мир» // Химия высок. энергий. — 2007. — 41, № 6. — С. 445.
3. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Тюленев Д. Г. Газоструйный имитатор ВУФ и УМР-излучения Солнца и его воздействие на материалы // Космічна наука і технологія. — 1998. — 4, № 2/3. — С. 102—109.

4. *Войцены В. С., Гужова С. К., Титов В. И.* Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 224 с.
5. *ГОСТ Р 25645.338-96.* Материалы полимерные для космической техники. Требования к испытаниям на стойкость к воздействию вакуумного ультрафиолетового излучения. — Введ. 03.12.96. — М.: Госстандарт России, 1996. — 16 с.
6. *Гуревич А. В., Шварцбург А. В.* Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. — М.: Наука, 1973. — 273 с.
7. *Джонсон Ф. С.* Солнечное излучение // Околосреднее космическое пространство / Под ред. Ф. С. Джонсона. — М.: Мир, 1962. — 192 с.
8. *Кувалдина Е. В., Любимов В. К., Максимов А. И. и др.* Исследование температурных зависимостей скоростей травления полиимидной пленки в плазме // Химия высок. энергий. — 1990. — **24**, № 5. — С. 471—474.
9. *Кувалдина Е. В., Любимов В. К., Рыбкин В. В.* Константа скорости и вероятность взаимодействия атомарного кислорода с полиимидной пленкой // Химия высок. энергий. — 1992. — **26**, № 5. — С. 475—478.
10. *Милинчук В. К., Клишипонт Э. Р., Шелухов И. П. и др.* Деградация полимерных материалов на орбитальной космической станции «Мир» // Изв. высш. учеб. заведений. Ядерная энергетика. — 2002. — № 2. — С. 108.
11. *Никифоров А. П., Терновой А. И., Самсонов П. В. и др.* Проблемы изучения механизма взаимодействия вакуумного УФ-излучения и гипертермического атомарного кислорода (5 эВ) с полимерными материалами космических летательных аппаратов // Хим. физика. — 2002. — **21**, № 5. — С. 73—82.
12. *Новиков Л. С.* Современное состояние и перспектива исследований взаимодействия космических аппаратов с окружающей средой // Модель космоса: Научно-информационное издание. В 2 т. — Т. 2 / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. — М.: КДУ, 2007. — С. 10—38.
13. *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.
14. *Переверзев Е. С.* Модели накопления повреждений в задачах долговечности. — Киев: Наук. думка, 1995. — 360 с.
15. *Черник В. Н., Наумов С. Ф., Демидов С. А. и др.* Исследования полиимидных пленок с защитными покрытиями для космических аппаратов // Перспективные матер. — 2000. — № 6. — С. 14—20.
16. *Шишацкая Л. П., Яковлев С. А., Волкова Г. А.* Газоразрядные лампы для вакуумной УФ-области спектра // Оптик. журн. — 1995. — № 7 — С. 72—74.
17. *Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др.* Контактная диагностика высокоскоростных потоков разреженной плазмы // Теплофиз. высоких температур. — 2005. — **43**, № 2. — С. 214—228.
18. *Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И. и др.* Изменение свойств материалов панелей солнечных батарей КА под воздействием атомарного кислорода // Космич. исслед. — 2007. — **45**, № 4. — С. 224—234.
19. *Шувалов В. А., Письменный Н. И., Кочубей Г. С., Токмак Н. А.* Потери массы полиимидных пленок космических аппаратов при воздействии атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолетового излучения // Космич. исслед. — 2014. — **52**, № 2. — С. 106—112.
20. *Шувалов В. А., Чурилов А. Е., Быстрицкий М. Г.* Диагностика потоков импульсной плазмы зондовыми, СВЧ- и фотометрическими методами // Теплофиз. высоких температур. — 2000. — **38**, № 6. — С. 877—885.
21. *Allegri G., Corradi S., Marchetti M., et al.* On the Degradation on Polymeric Thin Films in LEO Space Environment // Proc. 9th Int. Symp. on Materials in a Space Environment. — Noordwijk, 2003. — ESA SP-540. — P. 255—262.
22. *Banks B. S., Backus J. A., Manno M. V.* Prediction of atomic oxygen erosion yield for spacecraft polymers // J. Spacecraft and Rockets. — 2011. — **48**, N 1. — P. 14—22.
23. *Chernic V. N., Novikov L. S., Akishin A. I.* About adequacy of ground-based tests of polymers at higher atomic oxygen energy (20—30 eV) // Proc. 10th Int. Symp. on Materials in a Space Environment and 8th Int. Conf. on Protection of Materials and Structures in a Space Environment (Collioure, France, 2006). — Noordwijk: ESTEC, 2006. — P. 127—132.
24. *De Groh K.* Investigation of Teflon FEP embrittlement on spacecraft in low earth orbit // Proc. 7th Intern. Symp. on Materials in Environment. Toulouse, France, 1997. — Noordwijk: ESTEC, 1997. — P. 255—266.
25. *De Groh K., Smith D.* Analysis of metallized teflon thin-film materials performance on satellites // J. Spacecraft and Rockets. — 2004. — **41**, N 3. — P. 322—325.
26. *ECSS-E-10-04A.* Параметры космического пространства. — Действует с 21 января 2000 г. — Noordwijk: ESTEC, 2000. — 219 p.
27. *Grossman E., Gouzman I.* Space environment effects on polymers in low earth orbit // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. — 2003. — **B208**. — P. 48—57.
28. *Grossman E., Gouzman I., Lempert G., et al.* Assessment of atomic — oxygen flux in low — Earth orbit ground simulation facilities // J. Spacecraft and Rockets. — 2004. — **41**, N 3. — P. 356—368.
29. *Grossman E., Lifshits Y., Wolan J., et al.* In situ erosion study of kapton using novel hyperthermal oxygen atom source // J. Spacecraft and Rockets. — 1999. — **36**, N 1. — P. 75—86.
30. *Koontz S., King G., Dunnet A., Kirkendahl T.* Intelsat solar array coupon atomic oxygen flight experiment // J. Spacecraft and Rockets. — 1994. — **31**, N 3. — P. 475—481.
31. *Koontz S., Leger L., Albyn K., Cross J.* Vacuum ultraviolet radiation / Atomic oxygen synergism in materials reactivity // J. Spacecraft and Rockets. — 1990. — **27**, N 3. — P. 346—355.

32. Koontz S. L., Leger L. J., Rickman S. L., et al. Oxygen Interactions with material. III. Mission and induced environments // J. Spacecraft and Rockets. — 1995. — **32**, N 3. — P. 475—482.
33. Koontz S., Leger L., Visentine J. EOIM-III Mass spectrometry and polymer chemistry: STS-46, July — August 1992 // J. Spacecraft and Rockets. — 1995. — **32**, N 3. — P. 483—494.
34. Miller S., Banks B., Waters D. Investigation into the differences in atomic oxygen erosion yields of materials in ground based facilities compared to those in LEO // Proc. 10th Int. Symp. on Materials in a Space Environment and 8th Int. Conf. on Protection of Materials and Structures in a Space Environment (Collioure, France, 2006). — Noordwijk: ESTEC, 2006. — P. 120—126.
35. Naddaf M., Balasubramanian C., Alegaonkar P. S., et al. Surface interaction of polyimide with oxygen ECR plasma // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. — 2004. — **B222**. — P. 135—144.
36. Paillons A. Spacecraft surface exposure to atomic oxygen in LEO // Technol. Environment spatial. — Toulous: ESA, 1987. — P. 353—375.
37. Pippin H. G. Final report of analysis of Boeing specimens from on the effects of space environment on materials experiment. Appendix B. — Hampton: NASA Langley Research Center, 2008. — VA 23681—2199. — 10 p.
38. Shimamura A., Miyazaki E. Investigation into synergistic effects of atomic oxygen and vacuum ultraviolet // J. Spacecraft and Rockets. — 2009. — **46**, N 2. — P. 241—254.
39. Tagawa M. Atomic Oxygen — Induced polymer degradation phenomena in simulated LEO. space environments: How do polymers react in a complication space environment // Acta Astron. — 2008. — N 62. — P. 203—210.
40. Tagawa M., Yokota K., Ohmae N. Synergistic study on atomic oxygen-induced erosion of polyethylene with vacuum ultraviolet // J. Spacecraft and Rockets. — 2004. — **41**, N 3. — P. 345—349.
41. Yokota K., Ikeda K., Tagawa M., et al. Synergistic effect of vacuum ultraviolet on a atomic oxygen-induced erosion of fluorinated polymer // Proc. 10th Int. Symp. on Materials in a Space Environment Colloure and 8th Int. Conf. on Protection of Materials and Structures in a Space Environment. — Noordwijk: EST EC, 2006. — P. 127—132.
42. Yokota K., Seikyu S., Tagawa M., et al. A quantitative study in synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment // Proc. 9th Int. Symp. on Materials in a Space Environment. — Noordwijk: ESTEC, 2003. — P. 265—273.
43. Yokota K., Tagawa M. Comparison polyethylene and polyimide as a fluence monitor of atomic oxygen // J. Spacecraft and Rockets. — 2007. — **44**, N 2. — P. 434—439.
44. 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.
45. 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.

Стаття надійшла до редакції 10.03.15

В. О. Шувалов, М. А. Токмак, М. П. Резниченко

Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

ДЕГРАДАЦІЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ПРИ ТРИВАЛІЙ ДІЇ ПОТОКІВ АТОМАРНОГО КИСНЮ І ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Розроблено процедуру визначення деградації масових та геометричних характеристик полімерних (полііміди картон-Н, ПМ-1Е, тефлон FEP і поліетилен) плівок — конструкційних матеріалів КА — під час тривалої дії надзвучових потоків атомарного кисню та вакуумного ультрафіолетового випромінювання. Визначено порогові значення відношення потоку енергії ультрафіолетового випромінювання до потоку атомарного кисню при виникненні синергетичного ефекту втрати маси полімерними плівками картон-Н, ПМ-1Е і поліетилену, для тефлону FEP синергетичного ефекту не виявлено.

Ключові слова: вакуумне ультрафіолетове випромінювання, полімер, атомарний кисень, деградація, космічний апарат, синергетичний ефект.

V. A. Shuvalov, N. A. Tokmak, N. P. Reznichenko

Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Dnipropetrovsk

DEGRADATION OF SPACECRAFT POLYMER FILMS ON LONG EXPOSURE TO ATOMIC OXYGEN FLOWS AND VACUUM ULTRAVIOLET RADIATION

The technique is developed for determining degradation of mass and geometric characteristics of polymer (polyimides kapton-H, PM-1E, Teflon FEP and polyethylene) films that are being used as spacecraft structural elements on long exposure to supersonic flows of atomic oxygen and vacuum ultraviolet radiation. The threshold values of the relation between the energy flow of ultraviolet radiation and the atomic oxygen flow are established at generation of the synergetic effect of losses in masses of polymer films kapton-H, PM-1E and polyethylene. The synergetic effect is not found in Teflon FEP.

Key words: vacuum ultraviolet radiation, polymer, atomic oxygen, degradation, spacecraft, synergetic effect.