

УДК 533.27:533.2

**В. А. Шувалов, Н. А. Токмак, Н. И. Письменный, Г. С. Кочубей**

Институт технічної механіки Національної академії наук України  
та Державного космічного агентства України, Дніпропетровськ

## **СИНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА НА ПОЛИИМИДНЫЕ ПЛЕНКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

---

*Визначено порогові значення річного флюенсу атомарного кисню, а також відношення густини потоку вакуумного ультрафіолетового випромінювання сонячного спектру до густини надзвукового потоку атомарного кисню, які характеризують наявність синергетичного ефекту на втрату маси поліімідними плівками — конструкційними матеріалами КА.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Полимерные пленки, в частности полиимиды kapton-H, ПМ-А, ПМ-1Э, благодаря хорошим механическим, термооптическим, электрофизическим свойствам и химической стойкости широко используются в космической технике в качестве конструкционных материалов для покрытия наружных поверхностей космических аппаратов (КА), обшивки солнечных батарей, экранно-вакуумной теплоизоляции и т. д.

Околоспутниковая среда на высотах 200—800 км агрессивна по отношению к материалам наружных поверхностей КА, особенно полимерам. На околоземных орбитах (200—800 км) факторами, определяющими деградацию химических, термооптических и механических свойств полимеров, являются высокоскоростные потоки атомарного кислорода (ионы и нейтралы с энергией около 5 эВ), термоциклирование в вакууме и электромагнитное излучение Солнца, в частности вакуумный ультрафиолет (ВУФ) в диапазоне длин волн  $\lambda_v \approx 10 \dots 200$  нм.

Воздействие высокоскоростных потоков атомарного кислорода (АК) приводит к эффективной окислительной деструкции полимерных

материалов с образованием летучих оксидов CO, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O, что и обуславливает унос массы материалов. Атомарный кислород инициирует поверхностные реакции, при этом модифицируется первый атомный слой (около 1 нм). Вакуумный ультрафиолет вызывает деструкцию ароматических групп ниже слоя поверхности, эродировавшего при бомбардировке АК. Нелетучие оксиды (Ag<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub> и др.) образуют оксидные покрытия (слои, пленки), которые существенно изменяют термооптические свойства материалов и, как следствие, тепловой режим КА.

Экспозиция полиимидных пленок на МКС, орбитальной станции «Мир», при экспериментах на КА «Space Shuttle» на высотах 350 км и ниже [2, 10, 21, 26, 29] показала, что степень эрозии образцов полимерных материалов (унос массы, уменьшение толщины пленки) пропорциональна флюенсу АК (появился термин «полиимидный эквивалентный флюенс АК»). Стендовые исследования [23—25, 30—32] свидетельствуют о том, что ВУФ усиливает действие АК, увеличивает эрозию полиимида в несколько раз. Вакуумный ультрафиолет содействует десорбции молекул CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и H<sub>2</sub> с поверхности полиимида: энергии ВУФ-излучения достаточно для разрыва связей C—C, C—O и функциональных групп. Полиимид инертен к воздействию ВУФ в отсутствие АК [23, 24, 31].

---

© В. А. ШУВАЛОВ, Н. А. ТОКМАК, Н. И. ПИСЬМЕННЫЙ,  
Г. С. КОЧУБЕЙ, 2012

Соотношение потоков ВУФ/АК — ключ к количественному описанию синергетического эффекта при воздействии потоков атомарного кислорода и вакуумного ультрафиолета (АК+ВУФ) на высотах более 500 км, к процедуре отбора полимерных пленок — конструкционных материалов КА.

Цель данной работы — определить пороговую величину отношения ВУФ/АК, а также зависимость эрозии (уноса массы) полиимидных пленок от этой величины и спроецировать полученные результаты на условия эксплуатации пленок на высотах 200—800 км.

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКОВ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ВУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

**Атомарный кислород.** Условием физического (стендового) моделирования и имитации воздействия высокоскоростного потока АК на материалы наружных поверхностей космического аппарата является равенство скоростей

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

и энергий при идентичности сорта частиц, бомбардирующих поверхность:

$$\frac{M_{AK} U_M^2}{2} = \frac{M_{AK} U_H^2}{2}, \quad (2)$$

а также интегральных флюенсов:

$$F_{AK}^{(M)} = F_{AK}^{(H)}, \quad (3)$$

или

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

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,  $\Phi_{AK} = N_{AK} U$  — плотность потока АК,  $N_{AK}$  — концентрация атомов кислорода,  $t$  — время контакта газ — поверхность (время экспозиции).

Атомарный кислород в атмосфере Земли на высотах от 200 до 800 км ионизован, степень ионизации изменяется от 0.0001 до 0.1 [6].

Физико-химическое воздействие АК на материалы и покрытия КА в атмосфере Земли ха-

рактеризуют взаимосвязанные процессы обмена энергией, массой и зарядом между частицами окружающей среды и поверхностью, включая химические реакции в адсорбированном и поверхностном слоях при бесстолкновительном обтекании КА.

Положительные ионы АК с энергией от 5 до 10 эВ выполняют роль радиационно-химического активатора поверхности материала 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 КА потоком частично ионизованного диссоциированного кислорода в атмосфере Земли с вероятностью, близкой к единице, непосредственно с поверхностью материалов КА взаимодействует нейтральный атом кислорода с кинетической энергией иона в момент нейтрализации [15, 17]. Нейтрализация положительных ионов происходит на расстоянии нескольких диаметров иона от поверхности твердого тела. Во время нейтрализации положительных ионов происходит выделение энергии. Большая часть (2/3) энергии нейтрализации иона, согласно оценкам [17], переходит в тепловую энергию тела, 1/3 энергии нейтрализации иона расходуется на возбуждение электронов и образование дырочных структур твердого тела. Близость процессов физико-химического взаимодействия в системах «ион — твердое тело» и «нейтрал — твердое тело» подтверждается близостью значений коэффициентов аккомодации импульса и энергии, коэффициентов гетерогенной рекомбинации атомов и атомарных ионов кислорода, азота и водорода на бомбардируемых поверхностях [15, 27].

Выполнение условий (1), (3) 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

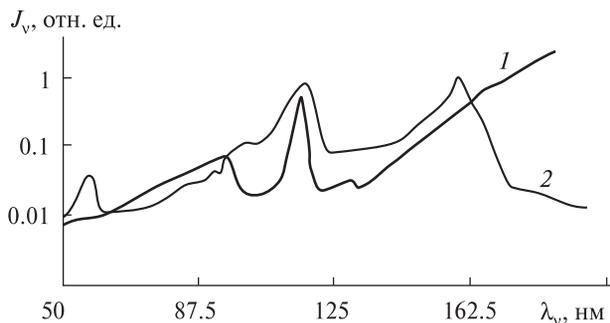


Рис. 1. Спектральное распределение вакуумного ультрафиолетового излучения [5]: 1 — солнечное излучение, 2 — излучение водородной лампы

проведение ускоренных ресурсных (стендовых) испытаний с применением более интенсивных, чем на орбите, потоков частиц. Из (4) следует

$$\Phi_{\text{AK}}^{(M)} = \Phi_{\text{AK}}^{(H)} \frac{t_H}{t_M} = \Phi_{\text{AK}}^{(H)} K_y, \quad (5)$$

где коэффициент ускорения  $K_y = t_H/t_M > 1$  — отношение длительности эксплуатации КА на орбите к длительности испытаний в форсированном режиме (в соответствии с термодинамическим критерием эквивалентности испытаний [14]), который характеризует условия приведения материала в одно и тоже состояние в части накопленных повреждений.

Энтропийный критерий эквивалентности режимов эксплуатации и испытаний предполагает наличие верхних (предельных) значений нагрузок (флюенса АК) 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 накопления повреждений. Область допустимых нагрузок при форсированных модельных (стендовых) испытаниях может быть определена условием  $\Phi_{\text{AK}}^{(H)} \leq \Phi_{\text{AK}}^{(M)} \leq \Phi_{\text{AK}}^{(\text{max})}$ . Для взаимодействия потока АК с поверхностью космического аппарата это условие соответствует требованию: процессы на поверхности, инициированные одним соударением, не должны перекрываться во

времени. Согласно оценкам работы [4] для концентрации и плотности потока АК такому требованию соответствуют соотношения

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

Эти условия приемлемы для любого материала поверхности КА: для металлов  $\Phi_{\text{AK}}^{(\text{max})} \approx 10^{27} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ , для полимерных материалов и покрытий —  $\Phi_{\text{AK}}^{(\text{max})} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  [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 испытываемых материалов газовым потоком; выполнение для параметров АК в ионосфере и на стенде соотношений (1), (3), (5) и (6). Перечисленные условия реализованы на плазмодинамическом стенде ИТМ [20].

**Вакуумный ультрафиолет.** Плотность потока энергии солнечного излучения — солнечная постоянная — составляет  $1.4 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Примерно 0.03 % потока излучения ( $0.4 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$ ) приходится на вакуумный ультрафиолет ( $\lambda_v = 10 \dots 225 \text{ нм}$ ). Доля солнечного ультрафиолетового излучения в диапазоне  $\lambda = 10 \dots 400 \text{ нм}$  составляет 8—9 %, т. е.  $126 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$  [11, 22, 23].

Эффекты коротковолновой области солнечного излучения удовлетворительно могут воспроизводить водородные и дейтериевые лампы, а также газоструйный имитатор ВУФ [5, 11, 19]. Эта область излучения ответственна за поверхностную деструкцию полимеров. На рис. 1 показано спектральное распределение излучений [5]. Эффект длинноволновой области солнечного спектра воспроизводится в некоторой степени только дейтериевой лампой [19].

**Техника эксперимента.** Экспериментальные исследования проводились на плазмодинамическом стенде ИТМ. Вакуумная камера стенда показана на рис. 2. Для генерирования сверхзвуковых потоков ионов атомарно-молекулярно-

го кислорода ( $O^+ + O_2^+$ ) использовался газоразрядный ускоритель с ионизацией рабочего тела электронным ударом и осцилляцией электронов во внешнем магнитном поле. Детали постановки и проведения исследований по деградации полимерных и композитных материалов под воздействием потоков АК на стенде приведены в [20]. В статических условиях (при отсутствии потока АК) давление в вакуумной камере стенда равно 0.01 мПа, при натекании газа — около 1 мПа, т. е. условия бесстолкновительного обтекания образцов испытываемых материалов размером  $50 \times 50$  мм выполняются. Изменение тока разряда плазменного ускорителя от 0.7 до 5 А позволяет получать потоки ионов АК со скоростью  $U_M \approx 7.6$  км/с и концентрацией от  $5 \cdot 10^{13}$  до  $2 \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup>. Поверхность твердого тела, помещенного в поток разреженной плазмы, приобретает равновесный отрицательный потенциал:  $\varphi_W = (-kT_e/e) \ln(V_e/2\sqrt{\pi}U_i)$ , где  $V_e = \sqrt{2kT_e/m_e}$  — тепловая скорость,  $T_e$ ,  $m_e$  — температура и масса электронов плазмы. Кинетическая энергия взаимодействия в системе «АК — полимерная пленка»  $E_{AK} \approx 9.1$  эВ, а направленная по нормали к бомбардируемой поверхности скорость иона  $U_{AK} \approx 9.3$  км/с. Приведенные условия позволяют при измерениях реализовать значения интегрального флюенса  $10^{15} < F_{AK}^{(M)} < 10^{21}$  см<sup>-2</sup>. Образцы испытываемых 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  $52 \times 52$  мм. На внутреннем диске, вращающемся вокруг горизонтальной оси, параллельной вектору скорости набегающего потока, расположены четыре образца испытываемых материалов, а также плоский молибденовый зонд 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 к вектору скорости  $U_{AK}$ . Зонды расположены в одной плоскости с образцами, позволяют контролировать флуктуации параметров потока АК посредством мониторинга ионного тока насыщения при фиксированном

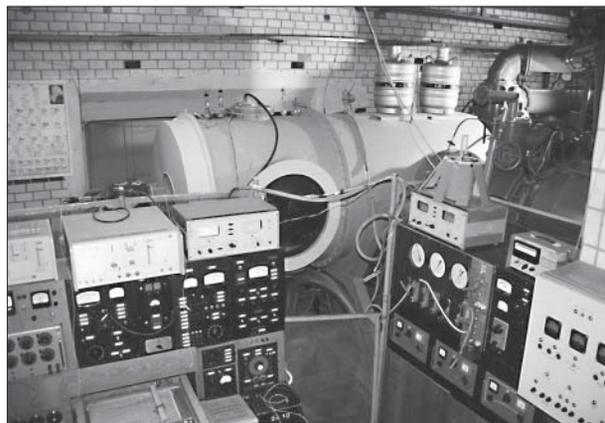


Рис. 2. Вакуумная камера плазмодинамического стенда ИТМ

потенциале зонда  $\varphi_p$  относительно потенциала плазмы  $\varphi_0$  ( $\varphi_W = \varphi_p - \varphi_0$ ). Для плоского зонда ионный ток насыщения  $I_{i\Sigma} = eA_p(1 + 0.4\xi_{d_i})N_{i\Sigma}U_{im}$ , где  $e$  — заряд электрона,  $A_p = \pi d_p^2/4$  — площадь зонда,  $\xi_{d_i}$  — степень диссоциации потока плазмы  $\xi_{d_i} = N_{ia}/N_{i\Sigma} = N_{ia}/(N_{ia} + N_{im})$ , индекс «a» соответствует атомарным, «m» — молекулярным ионам кислорода,  $U_{im}$  — скорость молекулярных ионов.

Для цилиндрического зонда ионный ток насыщения равен [20]

$$I_{i\Sigma} = (1 + 0.4\xi_{d_i}) \frac{A_p}{\pi} e N_{i\Sigma} U_{im} \sqrt{1 + \frac{2e\varphi_W}{m_{im}U_{im}^2}}$$

Параметры нейтральных и заряженных частиц потока разреженной плазмы контролировались с помощью подвижных электрических зондов, СВЧ-интерферометров, работающих на частотах 37.5 и 5.45 ГГц, зондов давления, масс-спектрометра МХ 7307 и многоэлектродного зонда-анализатора.

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 поверхности образца) не более  $10^\circ$ . Лампа ВМФ-25 создает на срезе поток ВУФ-излучения  $J_{ov} \approx 80$  мВт в диапазоне длин волн от 135 до 165 нм

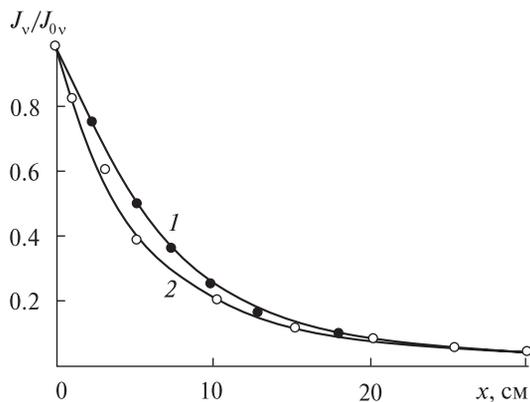


Рис. 3. Изменение потока ВУФ-излучения с расстоянием от среза: 1 — лампа ВМФ-25 (измерения ГОИ им. Вавилова), 2 — дейтериевая лампа (измерения работы [30])

с многолинейчатым спектром, а в диапазоне длин волн от 165 до 380 нм — поток излучения 10 мВт со сплошным спектром [16]. Изменение потока ВУФ-излучения  $J_v(x)/J_{0v}$  с расстоянием  $x$  от среза лампы иллюстрирует рис. 3. Для сравнения на рис. 3 приведено изменение потока излучения и дейтериевой лампы из [30].

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 [7]. Вне вакуумной камеры до и после экспонирования использовались микровесы с погрешностью измерения не более  $1 \cdot 10^{-4}$  г.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

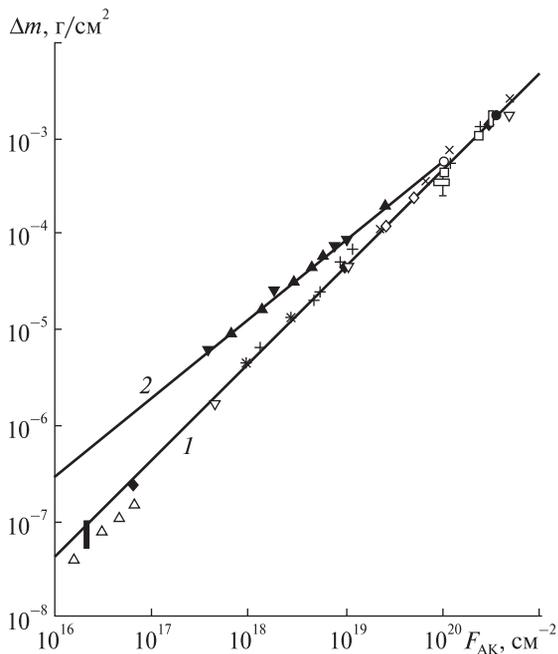
Исследования кинетики процесса взаимодействия плазмы атомарно — молекулярного кислорода с полиимидной пленкой kapton-H [8, 9] свидетельствует о том, что молекулярный кислород инертен и участия в химических реакциях не принимает. Химические реакции лимитирует реакция окисления с участием окислителя АК. При этом соотношение скоростей газовой выделенной продуктов химического травления —  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{H}_2$  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 полиимидных пленок объединить в один ряд результаты исследований, выполненных в нейтральных потоках АК и в потоках плазмы атомарно-молекулярного кислорода.

**Воздействие атомарного кислорода на полиимидные пленки.** Полиимидные пленки kapton-H, ПМ-А и ПМ-1Э относятся к одному классу полимеров группы Н, близки по химическому составу, сходны по структуре и плотности материала  $\rho \approx 1.42 \dots 1.56$  г/см<sup>3</sup> и широко применяются в космической технике. Это обстоятельство позволяет при оценке потерь массы под воздействием потоков АК объединить результаты исследований, выполненных для этих трех полиимидных пленок в наземных условиях и в космосе. На рис. 4 приведена зависимость потери массы  $\Delta m$  полиимидных пленок kapton-H, ПМ-А и ПМ-1Э от интегрального флюенса  $F_{\text{АК}}$  атомарного кислорода. Приведены не только данные измерений уноса массы  $\Delta m = Y_{\text{АК}} F_{\text{АК}}$ , но и результаты пересчета  $\Delta m$  по измерениям изменения толщины пленки  $\Delta x = R_e F_{\text{АК}}$ , где  $Y_{\text{АК}} = \rho R_e$  — коэффициент эрозии,  $R_e = 3 \times 10^{-24}$  см<sup>3</sup>/атом — объемный коэффициент потери массы kapton-H,  $\rho$  — плотность полиимидной пленки. Измеренные и пересчитанные значения  $\Delta m$  для полиимидных пленок хорошо согласуются между собой.

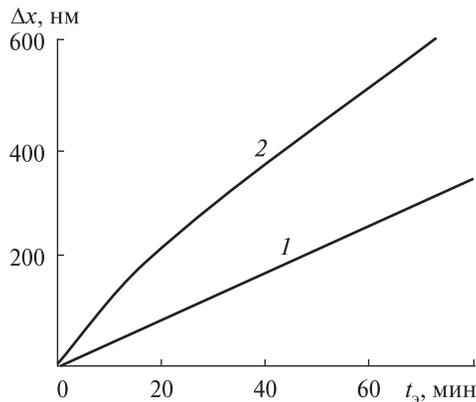
**Воздействие вакуумного ультрафиолета на полиимидные пленки.** Полиимидная пленка kapton-H инертна к воздействию ВУФ. Это установлено в работах [30—33] при изменении угла облучения образцов пленки от 0 до  $\pi/2$  вакуумным ультрафиолетом с длиной волны  $\lambda_v \approx 172$  нм при плотности потока излучения  $\Phi_v \approx 4.5$  мВт/см<sup>2</sup>. Практически аналогичный результат для пленки kapton-H при облучении ВУФ в диапазоне длин волн 115—200 нм получен и в работе [24].

Исследования данной работы по влиянию ВУФ на деградацию полиимидных пленок ПМ-А



**Рис. 4.** Зависимость потери массы  $\Delta m$  полиимидных пленок от интегрального флюенса  $F_{AK}$  атомарного кислорода. *Воздействие потока атомарного кислорода:* крестики, звездочки, темные ромбики — измерения на стенде ИТМ для пленок ПМ-А, ПМ-1Э и картон-Н соответственно; *измерения для пленки картон-Н:* косые крестики — данные работы [34], треугольники — стендовые измерения в пучке атомарного кислорода [33], вертикальный отрезок — расчет по программе АТОМОХ ESA [22], темный вертикальный прямоугольник — измерения [9] в плазме, перевернутый треугольник — расчетные значения [28], ромбик — данные [13], темный квадрат и точка — измерения после экспозиции 28 и 42 месяца на орбитальной станции «Мир» [2, 10, 18, 21], квадратик, горизонтальный прямоугольник, вертикальный прямоугольник, кружок — измерения на КА «Space Shuttle» (миссии STS-4, STS-5, STS-6, STS-41 соответственно) [21, 29, 32], *1* — зависимость  $\Delta m_{AK} = Y_{AK} \cdot F_{AK}$ , где  $Y_{AK} \approx 4.4 \cdot 10^{-24}$  г/атом; *воздействие АК+ВУФ:* темные прямые и перевернутые треугольники — измерения ИТМ на пленках ПМ-А и ПМ-1Э соответственно, кривая *2* — зависимость  $\Delta m_{\Sigma} = Y_{\Sigma} \cdot F_{AK}$ , где  $Y_{\Sigma} = Y_0(\eta F_{AK})^{\xi}$ ;  $Y_0 = 5,843 \cdot 10^{-20}$  г/атом,  $\eta = 1$  см<sup>2</sup>,  $\xi = -0.206$

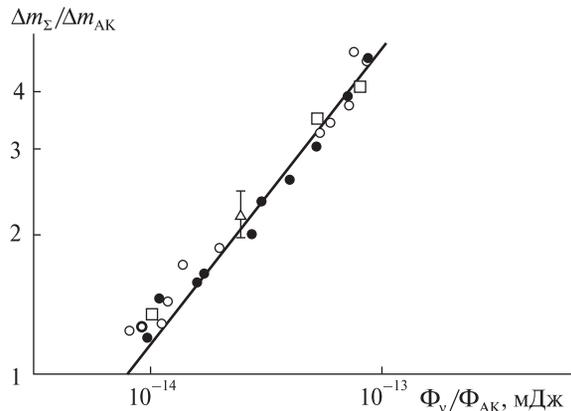
и ПМ-1Э проводились в статических условиях при давлении в вакуумной камере стенда  $10^{-5}$  Па. Изменение массы образцов при воздействии ВУФ-излучения от трех водородных ламп ВМФ-25 контролировалось непосредственно в вакууме с применением микровесов компенсацион-



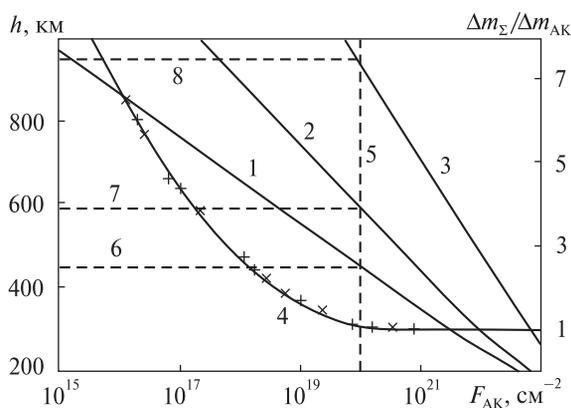
**Рис. 5.** Изменение толщины полиимидной пленки картон-Н при времени экспозиции  $0 \leq t_3 \leq 80$  мин [24]: *1* — воздействие АК, *2* — воздействие АК+ВУФ

ного типа, а также при атмосферном давлении до и после воздействия ВУФ с помощью микровесов с погрешностью не более  $10^{-4}$  г. Облучение образцов полиимидных пленок ПМ-А и ПМ-1Э производилось на расстоянии  $x \approx 7$  см от среза ламп ВМФ-25. Плотность потока ВУФ-излучения  $\Phi_v \approx 3.9$  мВт/см<sup>2</sup>, время экспозиции  $t_3$  от 30 до 120 мин. Температура поверхности образцов контролировалась по показаниям миниатюрных термодатчиков с погрешностью не более  $0.5$  °С. При экспозиции в потоке ВУФ-излучения температура поверхности образцов практически равна температуре массивной металлической подложки — внутреннего диска термостата ( $T_w \approx 297$  К). По результатам экспериментов изменения  $\Delta m$  образцов полиимидных пленок ПМ-А и ПМ-1Э в пределах погрешности измерений практически не обнаружено: полиимидные пленки ПМ-А и ПМ-1Э, как и картон-Н, инертны к воздействию ВУФ-излучения.

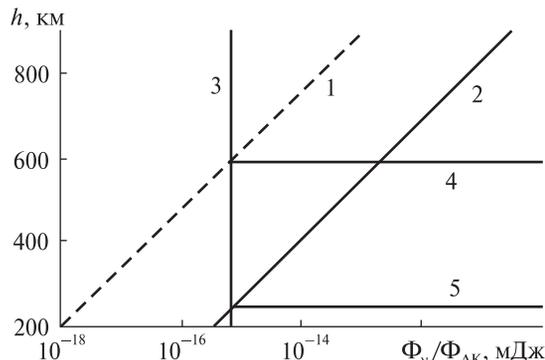
**Синергетический эффект воздействия высокоскоростного потока атомарного кислорода и ВУФ-излучения на потерю массы полиимидных пленок.** Вакуумный ультрафиолет усиливает воздействие АК. На рис. 5 приведены результаты, иллюстрирующие влияние потока АК с энергией 5 эВ и  $\Phi_{AK} \approx 5 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> и потоков АК+ВУФ в диапазоне длин волн  $\lambda_v \approx 115...200$  нм при  $\Phi_v \approx 1.6 \cdot 10^{16}$  фотон/см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> на изменение толщины полиимидной пленки картон-Н при времени экспозиции  $0 \leq t_3 \leq 80$  мин (данные [24], рис. 2).



**Рис. 6.** Зависимость изменения массы  $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK}$  образцов полиимидных пленок от отношения плотности потока ВУФ-излучения к плотности потока АК: точки — пленка ПМ-А, светлые кружки — пленка ПМ-1Э (измерения авторов), треугольники — данные [24] (пересчет авторов для  $\Delta x_{\Sigma}/\Delta x_{AK}$  пленки картон-Н; штрихами показан диапазон изменения  $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK}$  для временного интервала от 0 до 80 мин), квадратики — измерения [33] для пленки картон-Н



**Рис. 7.** Изменение уноса массы (коэффициента эрозии) полиимидных пленок в зависимости от годового флюенса АК на освещенных участках орбиты на высотах 200—1000 км при минимальном, среднем и максимальном уровнях солнечной активности: прямые и косые крестики — изменение  $\Delta m_{\Sigma}(F_{AK})/\Delta m_{AK}$  для пленок ПМ-А и ПМ-1Э (измерения авторов), линии 1, 2, 3 — годовой флюенс АК при минимальном, среднем и максимальном уровнях солнечной активности соответственно [22], 4 — усредненные значения зависимости  $\Delta m_{\Sigma}(F_{AK})/\Delta m_{AK}$ , штриховая линия 5 — граничное значение  $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$ , штриховые линии 6, 7, 8 — области синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ при минимальном, среднем и максимальном уровнях солнечной активности



**Рис. 8.** Зависимость изменения отношения  $\Phi_v/\Phi_{AK}(h)$ : линия 1 — для ВУФ ( $\lambda_v \approx 10 \dots 225 \text{ нм}$ ), линия 2 — для солнечного УФ-излучения ( $\lambda_v \approx 10 \dots 400 \text{ нм}$ ) при среднем уровне солнечной активности, 3 — граничное значение  $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 8 \cdot 10^{-15} \text{ МДж}$ , линии 4 и 5 — определяют область синергетического эффекта для АК+ВУФ ( $h > 590 \text{ км}$ ) и АК+УФ ( $h > 250 \text{ км}$ )

В отличие от данных [24] (рис. 2) на рис. 5 приведены абсолютные, а не относительные изменения  $\Delta x$  толщины пленки. Пересчет произведен для АК при  $R_e \approx 3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3/\text{атом}$  с экстраполяцией значений для АК+ВУФ. Для условий эксперимента в [24]  $\Delta x_{\Sigma}/\Delta x_{AK} \approx 2.0$  при  $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 2.5 \cdot 10^{-14} \text{ МДж}$ .

Зависимость изменения массы  $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK}$  (индекс  $\Sigma = \text{АК} + \text{ВУФ}$ ) образцов полиимидных пленок от отношения плотностей потока ВУФ-излучения к плотности потока атомарного кислорода  $\Phi_v/\Phi_{AK}$  показана на рис. 6. Температура поверхности пленки ПМ-А и ПМ-1Э толщиной  $\delta \approx 0.04 \text{ мм}$  при измерениях в потоках АК+ВУФ изменялась от 297 до 304 К. Приведенная на рис. 6 зависимость позволяет определить пороговое значение величины  $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 8 \cdot 10^{-15} \text{ МДж}$  для синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ на потери массы полиимидными пленками картон-Н, ПМ-А и ПМ-1Э.

Результаты измерений потери массы образцов  $\Delta m_{\Sigma}$  для полиимидных пленок ПМ-А и ПМ-1Э при воздействии (АК+ВУФ) во временном диапазоне экспозиции от 60 до 600 мин в зависимости от интегрального флюенса АК приведены на рис. 4. При воздействии только АК коэффициент эрозии пленок  $Y_{AK} \approx 4.4 \cdot 10^{-24} \text{ г/атом}$ . С увеличением величины интегрального флю-

енса величина  $\Delta m_{\Sigma}$  уменьшается вплоть до значений  $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK} \approx 1$  при  $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . Это соответствует условиям проведения измерений на КА «Space Shuttle» (миссии STS — 4, 5, 6, 41) и ОС «Мир» на высотах  $h < 350 \text{ км}$  [2, 10, 18, 21, 29, 32].

Зависимость изменения отношения  $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK} = Y_{\Sigma}/Y_{AK}$  от годового флюенса  $F_{AK}$  на освещенных участках круговой орбиты на высотах от 200 до 1000 км иллюстрирует рис. 7. Для порогового значения интегрального флюенса  $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$  область синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ расположена слева от прямой линии 5. Для минимального уровня солнечной активности эта область соответствует высотам  $h > 450 \text{ км}$  (выше линии 6), для среднего уровня солнечной активности —  $h > 590 \text{ км}$  — стандартная атмосфера (выше линии 7), при максимуме солнечной активности —  $h > 950 \text{ км}$  (выше линии 8) [22]. На высоте  $h = 800 \text{ км}$  отношение коэффициентов эрозии  $Y_{\Sigma}/Y_{AK} \approx 5$  — для минимума солнечной активности и  $Y_{\Sigma}/Y_{AK} \approx 2$  — при среднем уровне солнечной активности.

При измерениях на МКС, ОС «Мир» и в ходе миссий КА «Space Shuttle» значения интегрального флюенса АК на освещенных участках орбиты превосходили пороговую величину  $F_{AK} \approx 10^{20} \text{ см}^{-2}$ . По этой причине в ходе летных испытаний на МКС, ОС «Мир» и КА «Space Shuttle» изменения коэффициента эрозии образцов (потери массы) полиимидных пленок от воздействия АК и УФ-излучения не обнаружено: изменение  $\Delta m$  пропорционально флюенсу АК [2, 10, 21, 26, 29].

Данные рис. 7 характеризуют минимальные значения изменения  $\Delta m_{\Sigma}/\Delta m_{AK}$ , так как соответствуют только коротковолновой части спектра ( $\lambda_v = 10...225 \text{ нм}$ ) солнечного УФ-излучения.

На рис. 8 приведены зависимости  $\Phi_v/\Phi_{AK}(h)$  для диапазонов  $\lambda_v = 10...225 \text{ нм}$  (кривая 1,  $\Phi_v = 0.4 \text{ Вт/м}^2$ ) и  $\lambda_v = 10...400 \text{ нм}$  (кривая 2,  $\Phi_v = 126 \text{ Вт/м}^2$ ) [12] при среднем уровне солнечной активности [22]. Область синергетического эффекта воздействия АК+ВУФ на полиимидные пленки расположена справа от граничной прямой 3, соответствующей значению  $\Phi_v/\Phi_{AK} \approx 8 \cdot 10^{-15} \text{ мДж}$ . Точки пересечения граничной прямой 3 с лини-

ями 1, 2 определяют области синергетического эффекта: для ВУФ —  $h > 590 \text{ км}$  (линия 4) и для УФ-излучения в диапазоне  $\lambda_v = 10...400 \text{ нм}$  —  $h > 250 \text{ км}$  (линия 5). Отсутствие синергетического эффекта в ходе 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 ВУФ для пороговых значений  $F_{AK}$  и  $\Phi_v/\Phi_{AK}$  практически совпадают. Величины  $\Phi_v/\Phi_{AK} \geq 8 \cdot 10^{-15} \text{ мДж}$  и  $F_{AK} \leq 10^{20} \text{ см}^{-2}$  определяют условия, при которых имеет место синергетический эффект воздействия высокоскоростного потока АК и вакуумного ультрафиолетового излучения солнечного спектра на полиимидные пленки kapton-H, ПМ-А и ПМ-1Э.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что полиимидные пленки kapton-H, ПМ-А и ПМ-1Э инертны к воздействию вакуумного ультрафиолетового излучения.

Определены пороговые значения отношения плотности потока ВУФ к потоку АК и годового флюенса АК, характеризующие наличие синергетического эффекта воздействия (АК+ВУФ) на унос массы полиимидных пленок — конструкционных материалов КА.

Показано, что в условиях годовой эксплуатации на освещенных участках круговой орбиты на высотах  $h \leq 350 \text{ км}$  синергетический эффект воздействия (АК+ВУФ) отсутствует; на высоте  $h \approx 800 \text{ км}$  при минимальном и среднем уровнях солнечной активности синергетический эффект воздействия (АК+ВУФ) может увеличивать коэффициенты эрозии полиимидных пленок в несколько раз.

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. 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—451.

3. *Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Телпнев В. Д.* Газоструйный имитатор ВУФ- и УМР-излучения Солнца и воздействие его излучения 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. 12.03.1996. — 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. *Корн В. З., Шувалов В. А.* Зондовая диагностика потока частиц, десорбируемых с поверхности твердого тела струей разреженной плазмы // *Прикладная механика и техническая физика*. — 1993. — № 5. — С. 144—150.
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.* Дegradация полимерных материалов на орбитальной космической станции «Мир» // *Изв. вузов. Ядерная энергетика*. — 2002. — № 2. — С. 108—118.
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: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова*. — М.: КДУ, 2007. — Т. 2. — С. 10—38.
13. *Новые наукоемкие технологии в технике: В 24 т. — М.: ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ, 2000. — Т. 17.* Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Под ред. К. С. Касаева. — 280 с.
14. *Переверзев Е. С.* Модели накопления повреждений в задачах долговечности. — Киев: Наук. думка, 1995. — 360 с.
15. *Резниченко Н. П., Шувалов В. А.* Передача энергии атомарных ионов сверхзвукового потока частично диссоциированного газа поверхности твердого тела // *Журн. прикл. мех. и технической физики*. — 1989. — № 6. — С. 11—19.
16. Сайт ФГУП НПК «Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова». Режим доступа к сайту : <http://soi.szv.pu.ru>.
17. *Филиппов Б. В.* Взаимодействие газовых ионов с поверхностью тела // *Аэродинамика разреженных газов*. — 1967. — № 3. — С. 110—117Т.
18. *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.
19. *Шишацкая Л. П., Яковлев С. А., Волкова Г. А.* Газоразрядные лампы для вакуумной УФ-области спектра // *Оптический журн.* — 1995. — № 7 — С. 72—74.
20. *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. — 224 с.
21. *Allegri G., Corradi S., Marchetti M., et. al.* On the Degradation on Polymeric Thin Films in LEO Space Environment // *Proc. 9th Intern. Symp. on Materials in a Space Environment, Noordwijk, June 2003 (ESA SP-540)*. — Noordwijk: ESTEC, 2003. — P. 255—264.
22. *ECSS-E-10-04A.* Параметры космического пространства. — Введ. 21.01.2000. — Noordwijk: ESTEC, 2000. — 219 с.
23. *Grossman E., Gouzman I.* Space environment effects on polymers in low Earth Orbit // *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res.* — 2003. — В. 208. — P. 48—57.
24. *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—359.
25. *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—348.
26. *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—495.
27. *Krech R. H., Ganthir M. G., Caledonia G. E.* High velocity atomic Oxygen / Surface Accommodation Studies // *J. Spacecraft and Rockets*. — 1993. — 30, N 4. — P. 509—514.
28. *Paillous A.* Spacecraft surface exposure to atomic oxygen in LEO // *Tecnol. Environment spatial*. — Toulous : ESA, 1987. — P. 353—375.
29. *Pippin H. G.* Final report of analysis of Boeing specimens from on the effects of space environment on materials ex-

- periment. Appendix B. VA 23681 — 2199. — Hampton: NASA Langley Research Center, 2008. — P. 10—109.
30. Shimamura A., Miyazaki E. Investigation into synergistic effects of atomic Oxygen and vacuum ultraviolet // J. Spacecraft and Rockets. — 2009. — **46**, N 2. — P. 241—247.
31. Tagawa M. Atomic Oxygen-induced polymer degradation phenomena in simulated LEO. Space environments: How do polymers react in a complication space environment // Acta Astronautica. — 2008. — N 62. — P. 203—211.
32. Yokota K., Ikeda K., Tagawa M. A. Okamoto. Synergistic effect of vacuum ultraviolet on a atomic oxygen-induced erosion of fluorinated polymer // Proc. 10-th International Symp. on Materials in a Space Environment. 8th International Conf. on Protection of Materials and Structures in a Space Environment, Collioure, 2006, Noordwijk. — Noordwijk: ESTEC, 2006. — P. 127—132.
33. Yokota K., Seikyu S., Tagawa M., Ohmae N. A quantitative study in synergistic effects of atomic Oxygen and ultraviolet regarding polymer erosion in LEO space environment // Pzoc. 9th Intern. Symp. on Materials in a Space Environment, Noordwijk, June 2003 (ESA SP — 540). — Noordwijk: ESTEC, 2003. — P. 265—272.
34. 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.

Надійшла до редакції 21.11.11

V. A. Shuvalov, N. A. Tokmak, N. I. Pismenny,  
G. S. Kochubey

#### SYNERGETIC EFFECT OF ATOMIC OXYGEN FLOW AND VACUUM ULTRAVIOLET FLUX ON SPACECRAFT POLYIMIDE FILMS

We determined threshold values for the annual fluence of atomic oxygen and the ratio of the density of a solar ultraviolet vacuum flux to the density of a supersonic flow of atomic oxygen. The values characterize the synergetic effect on mass losses for polyimide films which are spacecraft structural materials.