

Устройство для контроля толщины покрытий на поверхности космического аппарата

М.П. Калаев, Д.М. Рязанов

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

В статье рассмотрена математическая и физическая модель прибора для определения малых изменений толщины пленок на основе кварцевых микровесов. Продемонстрирован унос массы каптона с поверхности кварцевой пластины под действием атомарного кислорода и ультрафиолета.

Ключевые слова: атомарный кислород, кварцевые микровесы, ультрафиолет, унос массы, каптон, уравнение Зауэрбрея.

Введение

В настоящее время большое число спутников запускается на низкую околоземную орбиту (НОО) с высотами от 200 до 800 км. На космический аппарат (КА) влияет обширный комплекс факторов космического пространства, в результате воздействия которых в материалах и элементах бортового оборудования протекают разнообразные физико-химические процессы, приводящие к ухудшению эксплуатационных параметров КА. Одним из таких факторов является набегающий поток атомарного кислорода [1].

Атомарный кислород (АК) является доминирующим компонентом атмосферы Земли на высотах 200–700 км (рис. 1). Несмотря на то, что атомы кислорода имеют малую плотность (порядка 10^8 атом/см³) и энергию (0,5 эВ), их столкновения с внешними поверхностями КА, двигающихся по орбите со скоростью порядка 8 км/с, приводят к соударению, эквивалентному энергии в 5 эВ и потоку в 10^{14} – 10^{15} атом/(см²·с) [2].

Для оценки воздействия потока АК на различные материалы проводятся лабораторные испытания с использованием различных установок. Однако часто по результатам этих экспериментов можно лишь косвенно судить о деградации материалов в условиях космической среды вследствие сложности воспроизводства характеристик реальных потоков АК, а также их воздействия в совокупности с другими факторами. Измерение характеристик материалов в натуральных экспериментах является прямым методом

изучения влияния потоков АК на их функционирование. По этой причине целесообразно создание малогабаритной автоматической аппаратуры для исследования показателей деградации материалов, включающей в себя исследуемые образцы покрытий и средства контроля изменения их параметров.

Для решения поставленной задачи необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований по воздействию потоков АК на материалы, по результатам которых можно выдвинуть требования к основным параметрам разрабатываемого устройства.

1. Лабораторные эксперименты по воздействию атомарного кислорода на полимерные материалы

Эрозия полимеров при воздействии АК приводит к уменьшению толщины материалов, уносу массы, изменению физико-химических свойств материалов.

Для количественной характеристики изменения толщины материала под действием атомарного кислорода применяют коэффициент эрозии R , который определяется по формуле [3]:

$$R = \frac{\Delta h \pi r^2}{\phi t A}, \quad (1)$$

где Δh – изменение толщины, см; r – радиус кварцевой пластины, см; ϕ – поток частиц атомарного кислорода, атом/(см²·с); t – время облучения, с; A – облучаемая зона поверхности, см².

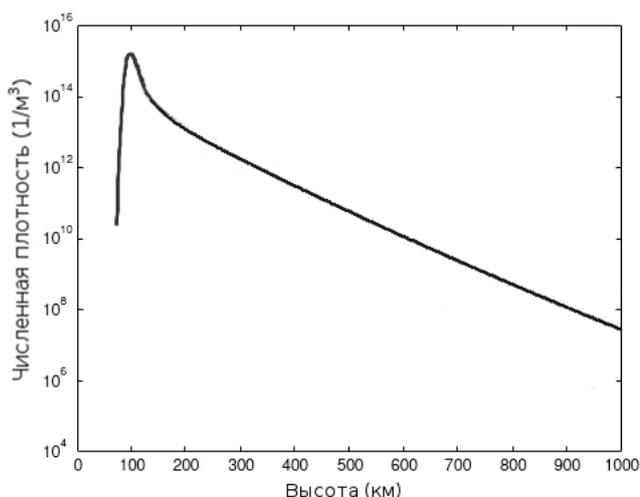


Рис. 1. Зависимость плотности потока атомарного кислорода от высоты орбиты

Зависимость изменения в течение года толщины каптона, напыленного на пластину, представлена на рис. 2

В настоящее время для моделирования воздействия потока АК используются различные лабораторные установки, например магнитоплазодинамический ускоритель (НИИЯФ МГУ) [4].

Ниже в табл. 1 приведены значения коэффициента эрозии для некоторых материалов, полученные в наземных экспериментах [3].

Ряд экспериментов показывает, что в условиях реального космического полета коэффициент эрозии покрытий увеличивается по сравнению с лабораторными испытаниями. Одной из причин этого является воздействие солнечного излучения. С освещенных участков поверхности КА происходит фотоэлектронная эмиссия – испускание электронов под действием солнечного электромагнитного излучения (преимущественно ультрафиолетового). Плотность тока фотоэлектронной эмиссии с поверхности КА составляет $(1-5) \cdot 10^{-5} \text{ А / м}^2$.

В табл. 2 ниже [5] приведены сравнительные данные по воздействию атомарного кислорода на каптон в совокупности с ультрафиолетом и без него.

Как видно из табл. 2, воздействие ультрафиолета увеличивает изменение толщины покрытий на 20–30 %.

По этой причине является целесообразным проведение соответствующих экспериментов.

2. Аппаратура для проведения эксперимента на борту космического аппарата

Для подтверждения расчетных и экспериментальных данных по эрозии покрытий предлагается проведение космического эксперимента с использованием устройства, описанного ниже. Носителем такого устройства может являться любой малый КА. Кроме того, возможна доработка устройства с целью миниатюризации для установки на микроспутник.

В устройстве используется универсальный частотный метод, отличающийся простотой устройства и эксплуатации преобразователя (кварцевые микровесы). В качестве преобразователя используется кварцевый элемент, включенный в контур генератора частоты. Принцип действия кварцевого преобразователя основан на зависимости частоты генерируемых сигналов от изменения массы материала, напыленного на кварцевую пластину.

Регистрирующий кристалл (РК) принимает на себя поток частиц, и поэтому масса его покрытия становится меньше, в то время как контрольный кристалл (КК) изолирован от окружающей среды. Каждый кристалл имеет свой собственный генератор (генератор регистриру-

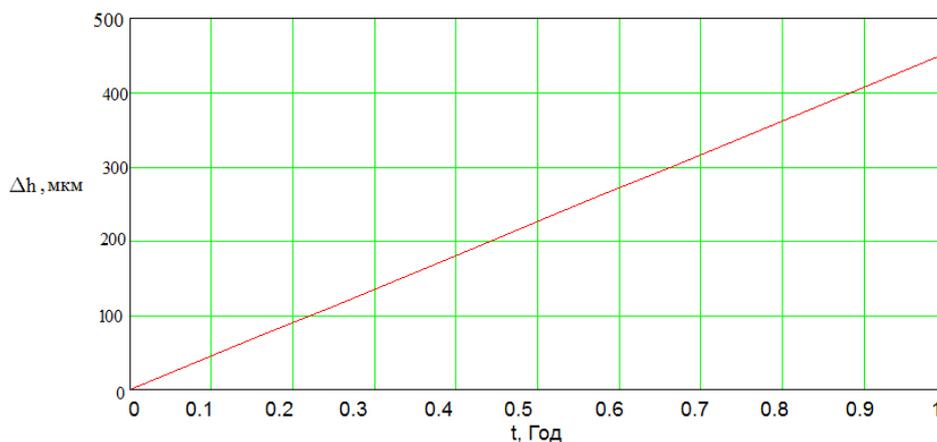


Рис. 2. Изменение толщины напыленного каптона в течение года

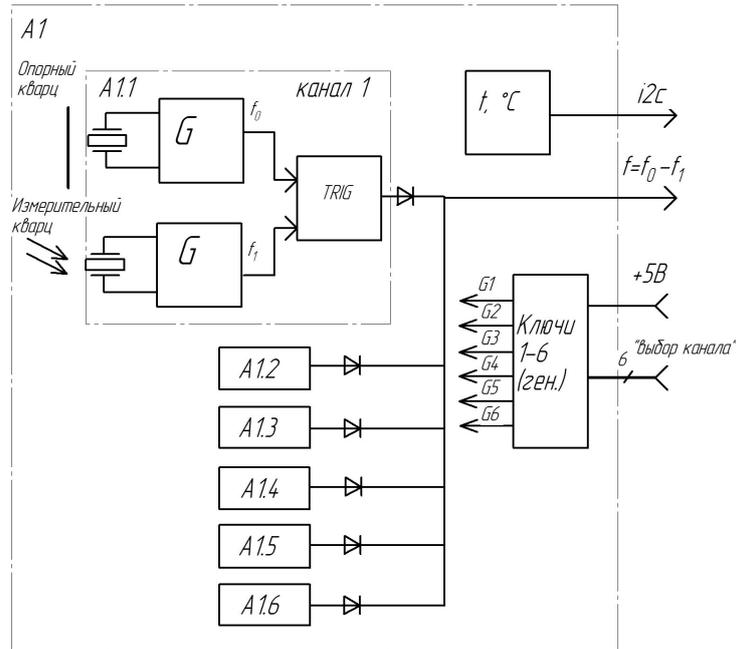


Рис. 3. Структурная схема кварцевых весов

ющего кристалла – ГРК и генератор контрольного кристалла – ГКК). С выходов генераторов сигналы поступают на смеситель (СМ), на выходе которого образуется разностная частота. Поскольку контрольный кристалл изолирован от окружающей среды, то изменение частоты сигнала на выходе смесителя может быть вызвано исключительно изменением массы материала на регистрирующем кристалле. Частота сигнала со смесителя лежит в килогерцовом диапазоне и ее легче передать, чем частоту кристаллов (2–25 МГц). Применение контрольного кристалла и смесителя минимизирует влияние температурных изменений. Дальнейшее снижение температурных влияний возможно путем выбора генератора и смесителя, которые имеют низкочастотные температурные коэффициенты в диапазоне рабочих температур. Разностная частота с выхода смесителя поступает на формирователь импульсов (ФИ), преобразующий синусоидальный сигнал в последовательность импульсов той же частоты следования.

Структурная схема кварцевых весов приведена на рис. 3.

Зависимость частоты круглого кварцевого резонатора вместе с нанесенным на пластину веществом (рассматривается случай равномерного распределения вещества по кварцевому резонатору) количественно выражается через уравнение Зауэрбрея [6]:

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{B\sqrt{\rho_q\mu_q}} \Delta h \rho_m \pi r^2, \quad (4)$$

где Δf – изменение частоты, МГц; f_0 – резонансная частота, МГц; Δh – изменение толщины исследуемого материала, см; B – активная колебательная зона, см²; μ_q – модуль сдвига кварца, г/(см·с²); ρ_q – плотность кварца, г/см³; ρ_m – плотность материала, г/см³; r – радиус кварцевой пластины, см.

Уравнение (4) применимо только к системе, для которой выполняются условия: осажденный материал должен быть твердым, равномерно распределенным по пластине и $\Delta f / f_0 \leq 0.02$. Если изменение частоты больше 0,02, то есть $\Delta f / f_0 > 0.02$, то необходимо использовать другой метод (Z-метод) [7]:

$$\Delta h = \frac{BN_q \rho_q}{\rho_k \pi r^2 \pi Z f_l} \arctan \left[Z \tan \left(\pi \frac{f_0 - f_l}{f_0} \right) \right], \quad (5)$$

где N_q – постоянная среза кварца, Гц; f_l – частота напыленной кварцевой пластины, МГц;

$$Z = \sqrt{\frac{\rho_q \mu_q}{\rho_f \mu_f}};$$

μ_f – модуль сдвига напыленного материала, г/(см·с²); ρ_f – плотность напыленного материала, г/см³.

Расчеты проводились для четырех наиболее используемых типов кварцевых резонаторов (табл. 3).

В связи с тем, что для каждого из кварцевых резонаторов выполняется отношение $\Delta f / f_0 > 0.02$, то необходимо применять Z-метод. Результаты расчетов по формуле (5) представлены на рис. 4.

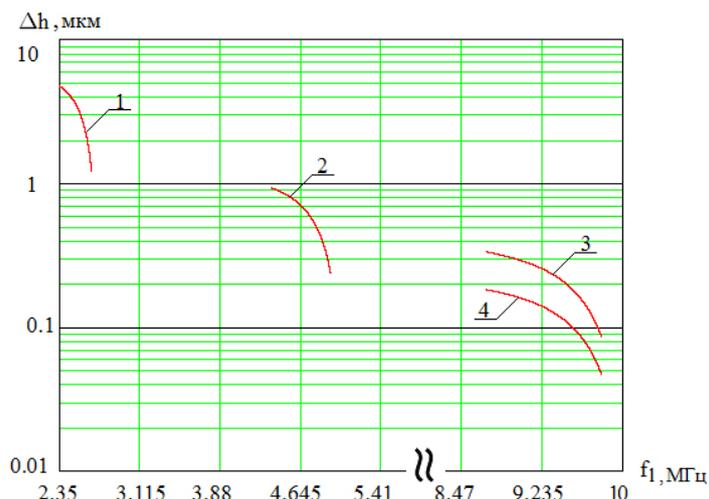


Рис. 4. Зависимость частоты кварцевого резонатора от толщины напыленного материала: 1 – кварцевый резонатор РК-171; 2 – кварцевый резонатор АХQСМ496; 3 – кварцевый резонатор НС-51/У; 4 – кварцевый резонатор РК-171

Из рис. 4 следует, что микровесы на основе кварцевых резонаторов имеют различный диапазон измеряемых толщин в зависимости от их конструкции и резонансной частоты f_0 . Для измерения толщин тонких пленок в диапазоне 0,07–0,2 мкм, следует использовать кварцевый резонатор с высокой частотой f_0 и малой площадью активной зоны, например РК-171 с $f_0 = 10$ МГц. Применение более высокочастотных кварцевых резонаторов ограничено, так как в этом случае возникает ряд сложностей с аппаратной реализацией генераторов и линии связи, входящей в состав аппаратуры. Для измерения относительно больших изменений толщин пленок (1,2–5 мкм) подходят кварцевые резонаторы с малой f_0 , например РК-171 с $f_0 = 2,7$ МГц.

Заключение

Проделанные расчеты показали, что кварцевый резонатор с резонансной частотой 10 МГц и уменьшенной активной колебательной зоной наиболее точно измеряет изменения напыленного на поверхность кварцевого резонатора материала. Однако для исследования новых материалов с большим прогнозируемым коэффициентом эрозии целесообразно выбрать кварцевый резонатор с частотой 2,7 МГц, поскольку он имеет больший диапазон измеряемых толщин. Малые габариты устройства и измерения толщины пленки за малый промежуток времени обуславливают возможность применения данного устройства в краткосрочных космических экспериментах на малых КА.

Таблица 1
Коэффициент эрозии

Материал	Коэффициент эрозии $R, \times 10^{-24} \text{ см}^3 / \text{атом}$	Материал	Коэффициент эрозии $R, \times 10^{-24} \text{ см}^3 / \text{атом}$
Эпоксид	1,7	Al_2O_3	< 0,025
Карбон	0,5–1,3	Каптон	1,4–3,0
Тефлон	< 0,05	Графит	1,0
Полиэтилен	3,7	Алмаз	0,02

Таблица 2
Влияние АК на каптон в совокупности с ультрафиолетом (УФ) и без него

№	Образец	Облучение	Среднее значение начальной толщины, мкм	Среднее значение конечной толщины, мкм	Среднее значение изменения толщины, мкм
1	КАРТОН 500HN	АК+УФ	120 ± 0.027	105 ± 0.054	$7,9 \pm 0.081$
2	КАРТОН 500HN	АК	90 ± 0.027	85 ± 0.054	$6,8 \pm 0.081$

Таблица 2 (продолжение)

№	Образец	Облучение	Среднее значение начальной толщины, мкм	Среднее значение конечной толщины, мкм	Среднее значение изменения толщины, мкм
3	КАРТОН 500HN	АК	110 ± 0.027	100 ± 0.027	$6,2 \pm 0.054$
Поток АК			ASTM E2089	$1.1 \pm 0.02 \times 10^{21}$ атом \cdot см ⁻²	
			MISSE 2	$1.1 \pm 0.03 \times 10^{21}$ атом \cdot см ⁻²	

Таблица 3

Характеристики кварцевых резонаторов

Наименование	Резонансная частота, f_0 , МГц	Радиус, см	Радиус активной колебательной зоны, см
РК-171	2,7	0,65	0,35
АХQСМ496	4,96	0,7	0,3
НС-51/U	10	0,685	0,2555
РК-171	10	0,65	0,2

Список литературы

- Новиков Л.С. Перспективы применения наноматериалов в космической технике. М.: Университетская книга, 2008. 188 с.
- Verker R. Residual stress effect on degradation of polyimide under simulated hypervelocity space debris and atomic oxygen // Polymer. 2007. № 48. С. 19–24.
- Silverman E.M. Space environment effects on spacecraft: LEO materials selection guide // NASA Contractor report 4661. 1995. 502 p.
- Вернигоров К.Б. Исследование воздействия атомарного кислорода на полимерные материалы // X межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». 2009. С. 253–259.
- Doan L.A. Synergistic effects of atomic oxygen and ultraviolet radiation exposure on various spacecraft materials // Requirement for the degree of bachelor of science. 2013. 25 p.
- Kurtz O. Quartz crystal microbalance used to characterize electrochemical metal deposition // JEPT. 2010. № 5. P. 52–69.
- Bousser E. In situ, real-time solid particle erosion testing methodology for hard protective coatings // Surface & Coating, Technology. 2013. № 237. P. 313–319.

A device for control the coating thickness on the surface of the space vehicle

M.P. Kalaev, D.M. Ryzanov

This article presents mathematical and physical models of a device based on the technique of a piezoelectric quartz crystal microbalance which find the low change of films. The ablation under the fluence of atomic oxygen and ultraviolet of Kapton deposited on the quartz plate was simulated.

Keywords: atomic oxygen, quartz crystal microbalance, ultraviolet, ablation, Kapton, Sauerbray equation.