

ния отказоустойчивости термопреобразующего датчика // Системный анализ, управление и информационные технологии. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сб. науч. тр., вып. 71. - Харьков: ХДПУ, 1999. - С.49-56.

3. Златкин Ю.М., Игнатьев В.Г., Калногус Н.В. та ін. Стан розробки та тенденцій розвитку авіаційних безкарданних інерціальних навігаційних систем. // Механіка гіроскопического тела. Межведомственный научно-технический сборник – К.: “Либідь”, 1997. - С. 112-119.
- 4 Гордин А.Г., Комков А.В. Актуальные задачи использования информационных технологий при построении бесплатформенных инерциальных навигационных систем для малогабаритных БПЛА// Авіаційно-космічна техніка і технологія: Сб.наук.тр., вып. 8.- Харьков:ХАИ,2000.-С.49-53.

УДК 629.7017.1(075)

Куренков В.И.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ПОВРЕЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕТЕОРНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ЧАСТИЦ

В настоящее время расчет метеоро-техногенной опасности полета космических аппаратов (КА) в основном проводится на основе оценок работоспособного состояния элементов КА по критерию пробоя [1,2]. Оптические же элементы КА могут отказать по критерию потери оптических свойств вследствие эрозионного воздействия метеорных и техногенных частиц. Вероятность отказа оптических элементов зависит от относительной площади повреждения поверхности элемента. В данной работе предлагаются математические модели для оценки площади повреждения оптических элементов КА при воздействии метеорных и техногенных частиц в реальном космическом полете.

Основная трудность при разработке таких моделей заключается в одновременном учете повреждений от относительно малых и относительно больших частиц. Дело в том, что малые частицы наносят меньшее повреждение поверхности оптики по сравнению с большими

частицами. Однако вероятность попадания малых частиц на поверхность оптических элементов КА значительно больше, чем вероятность попадания крупных частиц.

При разработке математических моделей для оценки повреждающего действия метеорных и техногенных частиц, воздействующих на оптические элементы КА, примем следующие допущения.

1. Вероятностная площадь повреждения поверхности оптического элемента от одной частицы массой m пропорциональна вероятности попадания такой частицы на рассматриваемый элемент, то есть

$$F_{\Pi}(m) = P(m) F_p(m), \quad (1)$$

где $P(m)$ - вероятность попадания частицы массой m на поверхность элемента; $F_p(m)$ - площадь разрушения поверхности оптического элемента от частицы массой m при условии попадания частицы в рассматриваемый элемент с вероятностью, равной единице.

2. Площадь повреждения поверхности оптического элемента от частиц различной массы равна сумме площадей повреждения от отдельных частиц

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n F_{\Pi_i} = \sum_{i=1}^n P(m_i) \cdot F_p(m_i), \quad (2)$$

где n - количество участков разбиения частиц по массам, которые принимаются за средние массы m_i в i -том диапазоне масс ($i = \overline{1, n}$).

3. Вероятность попадания частицы массой m на поверхность оптического элемента оценивается по известной формуле [1]

$$P(m) = 1 - e^{-F \cdot N(m) T}, \quad (3)$$

где F - площадь рассматриваемого элемента; $N(m)$ - количество частиц массой больше, чем масса m , приходящих на плоский элемент единичной поверхности в единицу времени со стороны одной плоскости элемента (2π стерадиан); T - время экспонирования рассматриваемого элемента в открытом космическом пространстве.

4. Количество частиц $N(m)$ для техногенных частиц и метеорных частиц находится по известным зависимостям [1,2]. В частности, зависимость для оценки количества N спорадических метеорных частиц в околоземном космическом пространстве, приходящих на плоскую площадку площадью в 1 м^2 за 1 сутки со стороны полупространства рассматриваемой площадки (2π стерадиан) в зависимости от массы метеорных частиц (не менее m), имеет вид

$$N = a_M m^{b_M}, \quad (4)$$

где a_M и b_M – параметры, определяемые из следующих зависимостей.

$$\ln a_M = \begin{cases} -5,5 & \text{при } \lg m \leq 5,75 \\ -10,1 & \text{при } \lg m > 5,75 \end{cases}; \quad b_M = \begin{cases} 0,4 & \text{при } \lg m \leq 5,75 \\ 1,2 & \text{при } \lg m > 5,75 \end{cases}. \quad (5)$$

В этих зависимостях масса выражается в граммах.

5. Диаметр разрушения D_p поверхности оптического элемента принимается пропорциональным диаметру частицы d и слабо зависит от скорости соударения в диапазоне 8-16 км/с, то есть

$$D_p = k \cdot d, \quad (6)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Это допущение принято на основе экспериментальных данных, изложенных в работе [3]. Диаметр площади повреждения элементов из кварца и хрома, согласно данным этой работы, превышает диаметр частицы (верхняя граница оценки) в 30 раз, то есть $k = 30$

6. Форма частицы – шар. Это допущение принято на основании экспериментальных исследований, которые показывают незначительное влияние формы частицы на ее разрушающее действие.

7. На открытые оптические элементы КА попадает осредненное количество метеорных и техногенных частиц, воздействующих равновероятно со всех пространственных направлений. Это допущение принято на основе анализа работы КА за все время полета.

На основе приведенных допущений строятся частные математические модели для оценки отдельных параметров, необходимых для расчета вероятностной площади повреждения оптического элемента КА. Эти частные модели приведены ниже.

Площадь F_p разрушения поверхности оптического элемента на основе допущения 5, можно рассчитать по следующей формуле:

$$F_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4} = \frac{\pi \cdot k^2 d^2}{4}. \quad (7)$$

Вероятностная площадь повреждения поверхности оптического элемента частицей массой m на основе допущений 1 - 3, составляет

$$F_{II} = P(m) \cdot F_p = (1 - e^{-P \cdot N(m) T}) \cdot \frac{\pi \cdot k^2 d^2}{4}. \quad (8)$$

Диаметр частицы можно определить, исходя из формы шара и плотности материала частицы, по следующей очевидной зависимости:

$$d = \sqrt{\frac{36m \cdot 10^{-3}}{\pi \rho}}, \quad (9)$$

где ρ - плотность материала частиц (в среднем принимается, как у алюминия).

В этой зависимости дополнительно введен коэффициент 10^{-3} для учета того, что масса m измеряется в г, как это принято при оценке метеорной опасности космического полета.

С учетом (9) выражение (8) преобразуется к виду

$$F_{\Pi} = (1 - e^{-F N(m)T}) \cdot \frac{\pi \cdot k^2 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot \sqrt{\frac{36m^2}{\pi^2 \rho^2}}, \quad (10)$$

а суммарная вероятностная площадь повреждения поверхности оптического элемента частицами различной массы составляет

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (1 - e^{-F N(m_i)T}) \cdot A \cdot m_i^{3/2}, \quad (11)$$

где коэффициент A определяется следующим выражением

$$A = \frac{\pi \cdot k^2}{4} \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{36}{\pi^2 \rho^2}}. \quad (12)$$

Остается решить вопрос о количестве интервалов n разбиения групп частиц по массам.

Для техногенных частиц такое разбиение на группы уже существует и приведено в соответствующих стандартах. С метеорными же частицами для приближенных расчетов предлагается поступить следующим образом. Примем за средние массы частиц m_i массы, отличающиеся примерно на порядок, например, 0,1; 0,01; 0,001 г и т.д. Количество частиц $N(m_i)$ с массой равной или большей m_i , также будет отличаться друг от друга примерно на порядок, из-за специфики распределения частиц ((4) и (5)). Поэтому ошибка при расчете количества частиц при таком подходе не превысит 11%.

На рис. 1 приведены результаты расчета по приведенным математическим моделям вероятностной площади повреждения одного из оптических элементов КА в зависимости от массы (равной и более, чем рассматриваемая) техногенных частиц. Для расчетов была выбрана наиболее опасная с точки зрения воздействия техногенных частиц орбита высотой 900 км. Видно, что с уменьшением массы частиц вероятностная площадь повреждения уменьшается и, по-видимому, стремится к некоторому пределу, что не противоречит данным, полученным в результате эксплуатации оптических элементов на КА длительного функционирования.

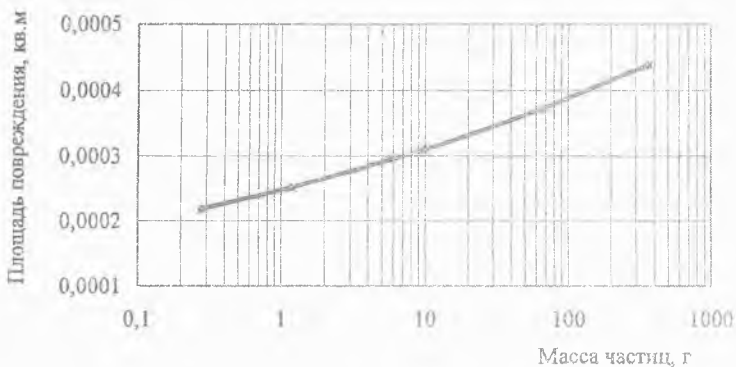


Рис. 1. Зависимость вероятностной площади повреждения оптического элемента от массы техногенных частиц

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по безопасности космических полетов / Г.Т. Береговой, В.И. Ярополов, И.И. Баранецкий и др. - М. Машиностроение, 1989.
2. Степанов С.Л., Тимшин В.Т., Юмашев Л.П. Космическая среда и условия пребывания в ней летательных аппаратов. Куйбышев, КУАИ, 1986.
3. Драчев Н.М., Морозкин В.И., Потапов И.Н. Исследование проникания малых высокоскоростных частиц в различные материалы. Инженерно-физический журнал Март 1972, Том XXII, № 3. С. 499-504.