

Физическая аппаратура

УДК 767.378

Использование открытых элементов космического аппарата в качестве датчиков микрометеоритов и космического мусора

Н. Д. Семкин, А. М. Телегин, М. В. Изюмов

Рассмотрена возможность построения системы контроля поверхности космического аппарата (КА) при ударных воздействиях метеороидов и частиц космического мусора. Приведены аналитические расчеты, численное моделирование, а также экспериментальные данные.

PACS: 07.87.+v

Ключевые слова: метеорит, космический мусор, система контроля, ионы.

Введение

В настоящее время КА проектируются с учетом длительного пребывания их в космическом пространстве. Элементы конструкций таких аппаратов в полете подвергаются влиянию факторов космического пространства, в частности, воздействию частиц космического мусора, что может привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования (солнечные батареи, антенны, радиаторы и т. д.) [1]. В данной работе предложена система для контроля состояния поверхности аппарата.

Чтобы разработать такую систему необходимо решить задачу, связанную с воздействием частиц космического мусора на большую поверхность летательного аппарата (ЛА) и включающую в себя вопросы ионообразования при высокоскоростном ударе, разлет ионов в электростатическом поле, а также обработки полученной информации [2, 3].

Для регистрации ударов частиц космического мусора можно использовать элементы конструкции КА, где в роли мишени выступает поверхность аппарата, а приемник ионов установлен над поверхностью аппарата, причем между мишенью и приемником создана разность потенциалов. Для контроля состояния поверхностей КА применяется преобразователь на основе использования элементов конструкции. На рис. 1 изображена схема установки приемника ионов над элементом конструкции КА, например солнечной батареи.

Над элементом конструкции 1—2 находится вторично-электронный умножитель (ВЭУ), космический аппарат установлен на расстоянии L от

приемника ионов. В процессе разлета ионов, инициируемых ударом частицы, их траектории будут направлены к приемнику, так как между ним и мишенью приложена разность потенциалов. При таком построении преобразователя возникает зависимость параметров ионного импульса (амплитуды, длительности) от параметров частицы.

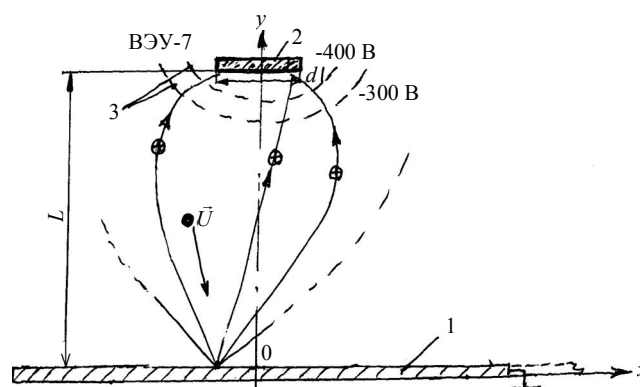


Рис. 1. Схема установки приемника ионов над элементом конструкции КА

Для увеличения сбора ионов, образованных в результате высокоскоростного удара, перед приемником 2 установлена электростатическая линза 3.

Физическая модель преобразователей параметров частиц космического мусора

При ударе космического мусора массой m и со скоростью V происходит образование ионов. Суммарный заряд ионов Q при высокоскоростном соударении твердых тел определяется известным параметрическим выражением [3, 4]

$$Q = cm^\alpha V^\beta,$$

где c — коэффициент пропорциональности; α, β — коэффициенты, полученные экспериментальным путем.

Семкин Николай Дмитриевич, профессор.
Телегин Алексей Михайлович, аспирант.
Изюмов Михаил Владимирович, аспирант.
Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева.
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.
Тел.: 846-267-44-52; 846-267-48-39.
E-mail: talex85@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2009 г.

Рассмотрим модель разлета и сбора иона для случая мишени и приемника ионов в виде плоских пластин.

На рис. 2 схематично представлен вид преобразователя плоской конструкции.

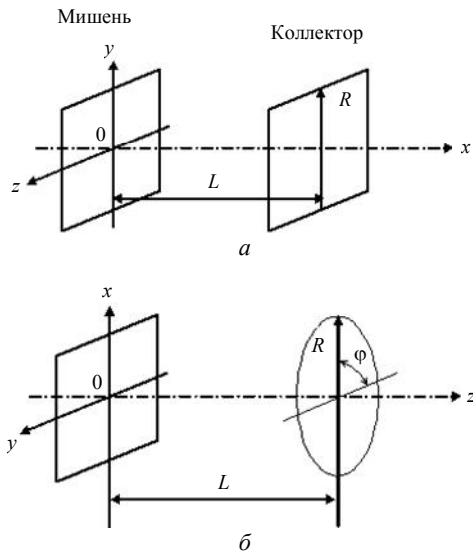


Рис. 2. Схематическое изображение преобразователя с приемником в виде: а — квадрата; б — круга

Приемник ионов представляет собой сплошную плоскость, имеющую форму квадрата (см. рис. 2, а).

Рассмотрим случай попадания частицы в центр мишени. Относительное число вторичных частиц, заключенных в элементарном объеме пространства конфигураций и скоростей, будет равно

$$dN = N_0 f(\vec{v}) dv_x dv_y dv_z, \quad (1)$$

где $f(\vec{v})$ — функция распределения частиц в элементарном объеме скоростей;

N_0 — общее число заряженных частиц в момент $t = t_3$.

С учетом предположения максвелловского распределения частиц по скоростям выражение (1) перепишем как

$$dN = \frac{N_0}{\pi^{3/2}} e^{-(x_c^2 + y_c^2 + z_c^2)} dx_c dy_c dz_c, \quad (2)$$

где $x_c = v_x/v_H$; $y_c = v_y/v_H$; $z_c = v_z/v_H$; v_H — наиболее вероятная скорость частиц.

Дважды проинтегрируем (1) по y_c, z_c , учитывая, что $-x_c P \leq y_c \leq x_c P$; $-x_c P \leq z_c \leq x_c P$, где $P = R/L$; R — размер коллектора; L — расстояние между мишенью и коллектором.

Получим

$$\begin{aligned} dN &= \frac{N_0}{\pi^{3/2}} \left(e^{-x_c^2} \int_{-Px_c}^{Px_c} e^{-y_c^2} dy_c \int_{-Px_c}^{Px_c} e^{-z_c^2} dz_c \right) dx_c = \\ &= \frac{N_0}{\sqrt{\pi}} e^{-x_c^2} \operatorname{erf}^2 Px_c dx_c \end{aligned} \quad (3)$$

или

$$dN = \frac{N_0}{\sqrt{\pi} \cdot T^2} e^{-\frac{1}{T^2}} \cdot \operatorname{erf}^2 \left(\frac{P}{T} \right) dt, \quad (4)$$

где $T = 1/x_c$ — безразмерное время.

Безразмерный ток будет

$$I = \frac{1}{N_0} \frac{dN}{dT}. \quad (5)$$

После подстановки (4) в (5) получим

$$I = \frac{1}{\sqrt{\pi} \cdot T^2} \operatorname{erf}^2 \left(\frac{P}{T} \right) e^{-\frac{1}{T^2}}.$$

Рассмотрим случай произвольного по месту попадания частицы (см. рис. 2, а):

$$P_y = \frac{R \pm y_0}{L} = P \left(1 + \frac{y_0}{R} \right); \quad P_z = P \left(1 \pm \frac{z_0}{R} \right). \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3) и переходя к безразмерной форме записи тока, получим

$$\begin{aligned} I &= \frac{e \cdot T^{-1/2}}{4\sqrt{\pi} \cdot T^2} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{P}{T} \left(1 - \frac{y_0}{R} \right) \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{P}{T} \left(1 + \frac{y_0}{R} \right) \right] \right\} \times \\ &\times \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{P}{T} \left(1 - \frac{z_0}{R} \right) \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{P}{T} \left(1 + \frac{z_0}{R} \right) \right] \right\}. \end{aligned}$$

Для преобразователя, коллектор которого имеет форму круга (см. рис. 2, б), расчет проведен в цилиндрической системе координат. Для частного случая, когда частицы ударяются в центр мишени, число частиц в элементарном объеме скоростей будет

$$dN = \frac{N_0}{\pi^{3/2} v_H^3} e^{-\frac{v_x^2 + v_r^2}{v_H^2}} v_r dv_r dv_z d\varphi,$$

где v_r — радиальная составляющая скорости.

При переходе к безразмерной скорости имеем

$$dN = \frac{N_0}{\pi^{3/2}} e^{-z_c^2 - r_c^2} r_c dr_c dz_c d\varphi. \quad (7)$$

Интегрируя по d_c выражение (7), будем иметь

$$dN = \frac{N_0}{2\pi^{3/2}} e^{-z_c^2} dz_c d\varphi (1 - e^{-P^2 z_c^2}). \quad (8)$$

Проинтегрируем по $d\varphi$ выражение (8) от 0 до 2π

$$dN = \frac{N_0}{\sqrt{\pi}} e^{-z_c^2} dz_c (1 - e^{-P^2 z_c^2}). \quad (9)$$

Выражение (9) с учетом безразмерного времени и выражения (3) можно записать в виде

$$I = \frac{e - \frac{1}{T^2}}{\sqrt{\pi} \cdot T^2} \left(1 - e^{-\frac{P^2}{T^2}}\right).$$

На рис. 3, а, б показаны зависимости, соответственно, амплитуды импульса тока и длительности фронта от места попадания частицы в различные места мишени.

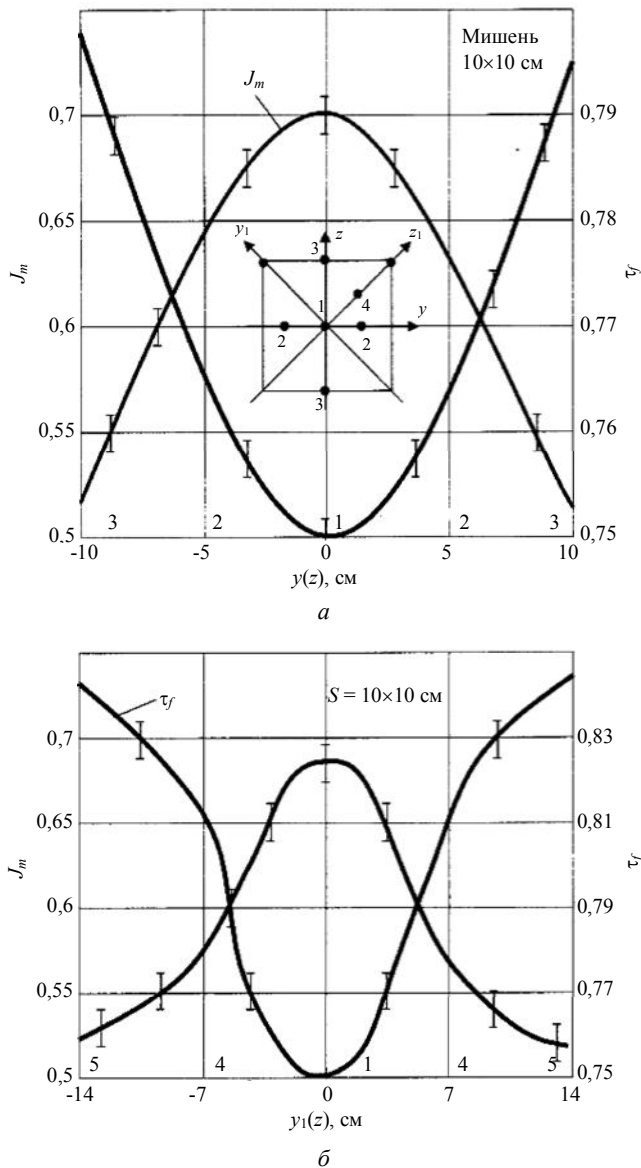


Рис. 3. Зависимости амплитуды и длительности импульса тока от места попадания: а — $y(z)$; б — $y_1(z)$

На рис. 3, а квадрат — мишень, на которой цифра 1—5 — места удара.

Цифры над осями $y(z)$ и $y_1(z)$ взаимосвязаны с цифрами в квадрате для наглядности зависимости попадания частиц от места удара.

Таким образом, информация об амплитуде и длительности импульса тока в плоской конструкции преобразователя зависит от места попадания частицы в мишень.

В данной задаче не вводилось электростатическое поле, которое эквивалентно увеличению площади приемника ионов. Тогда получаем $P = R_{ef} / L$, а $R_{ef} > R$.

Модель распределения электрического поля в системе плоскость — сферический электрод

Поверхность КА представляет собой сложную форму, поэтому проведение символического расчета для каждой конкретной задачи является затруднительным по временным и математическим затратам. В связи с этим расчет электростатического поля проводится численными методами с использованием специализированной программы. В качестве примера для расчета была взята мишень в форме круга радиусом 1 м, над которой на высоте 1 м располагался приемник ионов радиусом 10 см. Результаты расчета приведены на рис. 4.



Рис. 4. Эквипотенциальные поверхности электростатического поля, образованного между мишенью и приемником

Ионы, образовавшиеся после удара, находятся под действием электростатического поля, при этом часть их, обладающая большой энергией, не собирается на приемнике. На рис. 5 представлены графики максимальных скоростей разлета ионов в зависимости от угла этого разлета при различных точках соударения с поверхностью КА. При этом предполагается, что скорость частицы после удара находится в пределах от 10^3 до $30 \cdot 10^3$ м/с, а угол разлета — в пределах от -45° до $+45^\circ$.

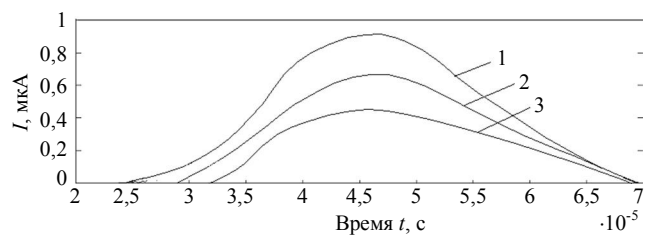


Рис. 5. Сигнал на входе приемника ионов при ударе в мишень в точке: 1 — $y = 0$; 2 — $y = 0,5$ м; 3 — $y = 1$ м

Движение ионов описывается уравнениями [5]:

$$y(t) = \frac{Q}{m} \cdot \int \left[\int E_y(z, y, t) dt \right] dt + C_{1y} \cdot t + C_{2y},$$

$$z(t) = \frac{Q}{m} \cdot \int \left[\int E_z(z, y, t) dt \right] dt + C_{1z} \cdot t + C_{2z},$$

где $y(t), z(t)$ — координаты иона в момент времени t ;

$C_{1y}, C_{2y}, C_{1z}, C_{2z}$ — постоянные интегрирования.

Предполагается, что разлет частиц происходит в плоскости ZOY , поэтому координата $x = 0$.

Сигнал на входе приемника показан на рис. 5, площадь под данным импульсом пропорциональна Q и длительности переднего фронта скорости разлета ионов.

Поле соберутся только те частицы, которые обладают определенным направлением и энергией, не превышающей работу внешнего электростатического поля. Поэтому построим семейство характеристик, показывающих максимальные скорости, которыми может обладать ион при заданном угле и начальной точке разлета, чтобы быть собранным приемником ионов (рис. 6).

Как видно из рис. 6, при удалении места удара в сторону от центра мишени число ионов, достигших приемника, уменьшается, при этом их скорость будет меньше скорости ионов, образованных при ударе в непосредственной близости от точки, над которой установлен приемник. Сигнал, полученный в результате сбора ионов, образовавшихся при ударе в место мишени, удаленное от ее центра, будет обладать меньшей энергией по сравнению с сигналом, полученным в результате сбора ионов, образовавшихся при ударе в место мишени, над которым расположен приемник.

Итак, возникает неоднозначность определения параметров космического мусора. Судя по форме сигнала возможно только различить удар частиц космического мусора по данной площади мишени.

Из рис. 6 также следует, что уменьшение напряжения, подаваемого на приемник ионов, а также размеров приемника приводит к сокращению числа собранных ионов. При приближении приемника ионов к мишени увеличивается число последних, собираемых приемником, но при этом уменьшается эффективная площадь сбора их с мишени.

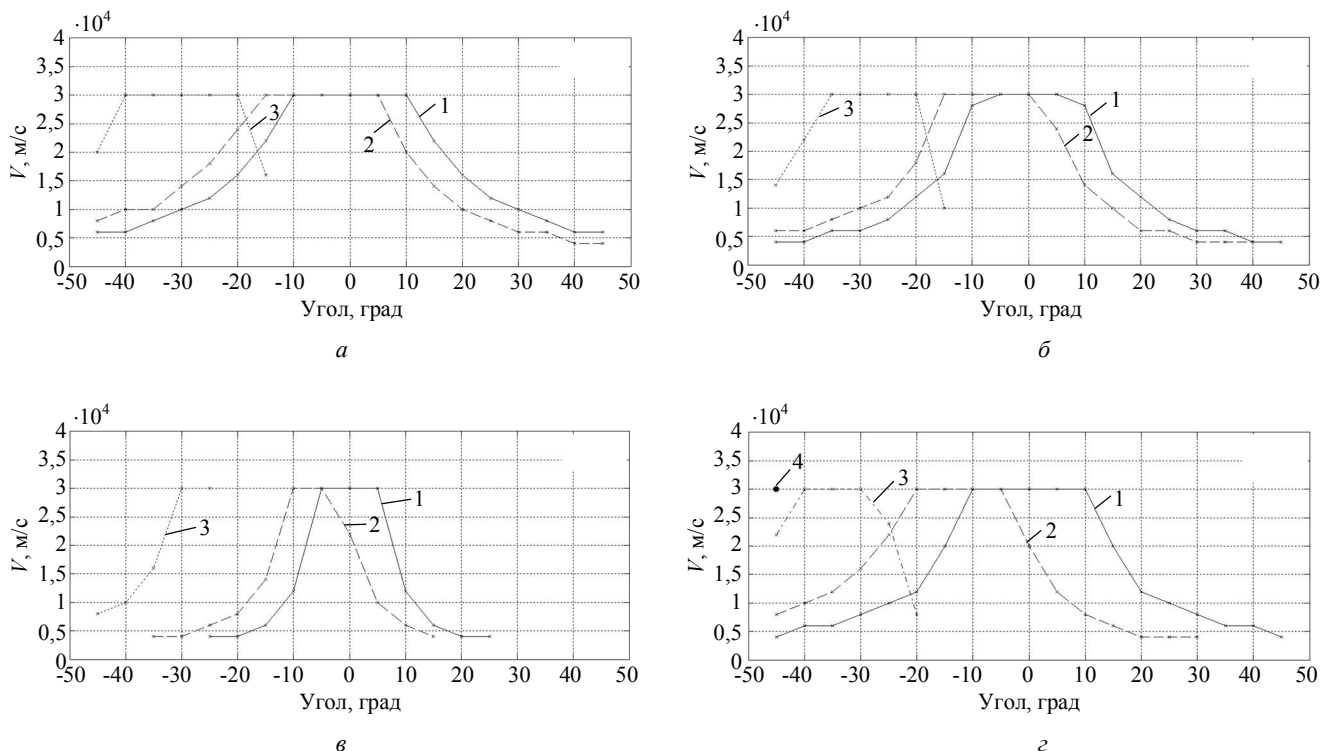


Рис. 6. Графики зависимостей максимальной скорости иона от угла, под которым этот ион летит в зависимости от места удара:

- a* — напряжение, прикладываемое к приемнику $U = -300$ В, радиус приемника $R = 10$ см, расстояние между приемником и мишенью $d = 1$ м: 1 — $y_0 = 0$ м, 2 — $y_0 = 1$ м, 3 — $y_0 = 0,5$ м;
б — $U = -150$ В, $R = 10$ см, $d = 1$ м: 1 — $y_0 = 0$ м, 2 — $y_0 = 1$ м, 3 — $y_0 = 0,5$ м;
в — $U = -150$ В, $R = 5$ см, $d = 1$ м: 1 — $y_0 = 0$ м, 2 — $y_0 = 0,1$ м, 3 — $y_0 = 0,5$ м;
з — $U = -150$ В, $R = 5$ см, $d = 0,5$ м: 1 — $y_0 = 0$ м, 2 — $y_0 = 0,1$ м, 3 — $y_0 = 0,3$ м, 4 — $y_0 = 0,5$ м

На рис. 7, а, б изображены сигналы на входе приемника ионов в зависимости от места удара и скорости ударника. Видно, что при увеличении скорости ударника передний фронт импульса уменьшается, и, согласно формуле (1), энергия сигнала на входе приемника должна увеличиваться, но в связи с тем, что при большой скорости увеличиваются потери ионов при их сборе приемником, энергия сигнала на входе приемника начинает убывать. Можно заметить при этом, что сигналы, полученные при $y = 0$ и $y = 1$ м, имеют один и тот же характер при изменении скорости частицы.

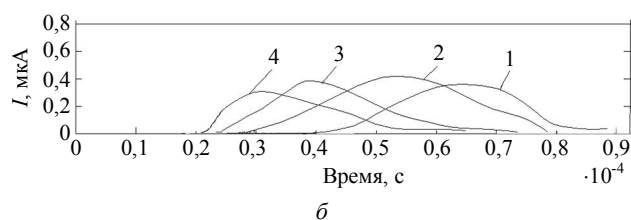
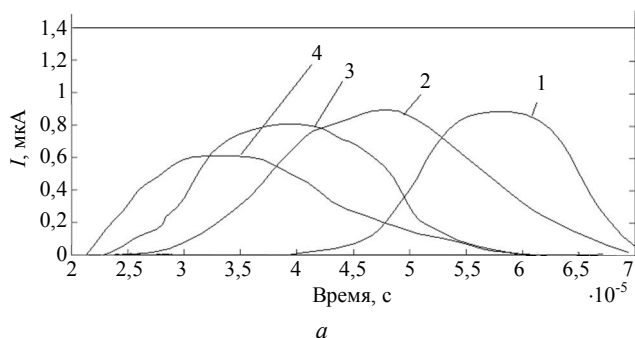


Рис. 7. Сигнал на входе приемника ионов при ударе в мишень в точке, где $y = 0$ м (а) и $y = 1$ м (б) при скоростях ударника:
 1 — $V = 5$ км/с; 2 — $V = 10$ км/с; 3 — $V = 15$ км/с;
 4 — $V = 20$ км/с

Результаты экспериментов

Эксперименты, подтверждающие приведенные расчеты, были выполнены с помощью лазера типа ЛТИПЧ-8. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 8. В данной установке лазер формирует одиночный импульс длительностью $\tau \approx 8-10$ нс. Луч лазера фокусируется оптической системой, при вращении которой изменяется точка удара лазера в мишень. Чем дальше место соударения частицы от оси y (рис. 9), тем меньше амплитуда импульса и больше длительность его переднего фронта при постоянных параметрах частицы. На рис. 9 приведен график временной зависимости параметров импульса тока преобразователя от места воздействия импульсного лазера ЛТИПЧ-8. На вставке показана мишень и места воздействий импульсов лазера (точки 1—5).

Размеры мишени составляли 20×20 см. Как видно из графиков, амплитуда импульсов тока с приемника может изменяться более, чем на 35—40 %, а длительность переднего фронта — 10—15 %.

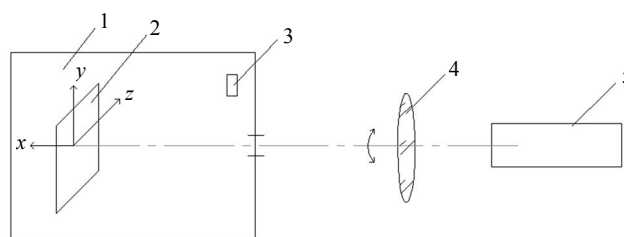


Рис. 8. Схема экспериментальной установки:
 1 — вакуумная камера; 2 — мишень; 3 — приемник ионов;
 4 — оптическая система фокусировки; 5 — лазер

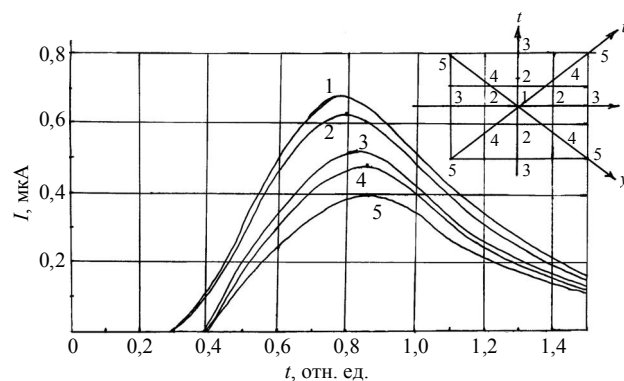


Рис. 9. Графики временной зависимости параметров импульса тока преобразователя от места воздействия импульсов лазера (точки 1—5)

С помощью электростатического ускорителя в соответствии с методикой [6] выполнены ударные эксперименты.

Результаты эксперимента на электростатическом ускорителе приведены на рис. 10. Экспериментальные характеристики подтверждают характеристики, полученные расчетным путем.

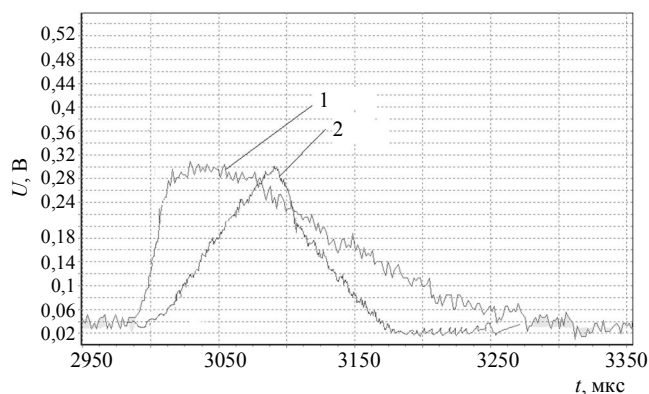


Рис. 10. Сигналы на входе приемника ионов при разных скоростях ударника:
 1 — $V = 8$ км/с; 2 — 4 км/с

Заключение

Информация об амплитуде и длительности импульса тока в плоской конструкции преобразователя зависит от места попадания частицы в мишень. Следует отметить, что в этом случае

производится не только регистрация мелких частиц (1—100 мкм) на большой площади, но и становится возможным осуществление контроля повреждаемости соответствующего элемента конструкции КА. Вопрос о достоверности информации также является важным, и необходима статистическая обработка с учетом шумовых характеристик.

Таким образом, используя поверхность КА, можно получать информацию о частицах космического мусора и микрометеоритах и контролировать работоспособность отдельных элементов конструкции КА при ударных воздействиях. Поверхности контроля КА данным методом ограничены уменьшением электрического поля и угла разлета ионов, собираемых приемником ионов при удалении точки удара от места расположения приемника (см. рис. 6). Вывод точной формулы, ограничивающей поверхность контроля, затруднителен, так как необходимо проводить расчет для каждой конструкции отдельно и на основе уже

полученных зависимостей выводить приближенное аналитическое выражение

Л и т е р а т у р а

1. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Новиков Л. С. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях. — г. Самара, 2005. — 470 с.
2. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Пияков И. В. Регистрация космической пыли искусственного и естественного происхождения// Прикладная физика. 2009. № 1. С. 86—102.
3. Dietzel H., Eichhorn G., Fechtig H., Grün E., Hofman H., Kissel I. The Neos 2 and Helios micrometeoroid experiments. — Research papers. 1972. P. 209—217.
4. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Новиков Л. С., Богоявленский Н. Л. Ударно-сжатые структуры металл—диэлектрик—металл при высокоскоростном соударении микрометеороидных и техногенных частиц// ПТЭ. 2005. № 1. С. 1—7.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 ч. Т. II. Теория поля. 7-е изд. испр. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 512 с.
6. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Пияков И. В., Пияков А. В. Имитация микрометеороидов с помощью электродинамического ускорителя// ПТЭ. 2009. № 4. С. 159—165.

Use of open elements of a space vehicle as gauges of micrometeorites and space dust

N. D. Semkin, A. M. Telegin, M. V. Izjumov

The Samara State Aerospace University of name of the academician S. P. Korolev,
34 Moscow highway, Samara, 443086, Russia
E-mail: talex85@mail.ru

In article possibility of construction of the monitoring system of a surface of a space vehicle is considered at shock influences meteoroids and particles of space dust. Analytical calculations, numerical modelling, and as experimental data are resulted.

PACS: 07.87.+v

Keywords: a meteorite, space dust, the monitoring system, ions.

Bibliography — 6 references.

Received 29 October 2009