

Взрывной генератор высокоскоростных твердых частиц

Н.Д. Семкин, А.М. Телегин

Самарский университет
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

В статье рассмотрен космический эксперимент по исследованию воздействия потоков частиц на космический аппарат. Показана модель взрывного источника потоков пылевых частиц.

Ключевые слова: модель, ракета, околоземное пространство, эксперимент.

Последние десятилетия характеризуются увеличением концентрации техногенных загрязнений околоземного космического пространства, которые негативно влияют на работоспособность элементов конструкций летательных аппаратов.

С целью исследования влияния техногенных частиц на характеристики элементов конструкций космических аппаратов (КА) создаются различные типы ускорителей (электростатических, электромагнитных, взрывных и т. д.).

Наиболее эффективным инструментарием таких исследований является использование метеорологических ракет с установлением на их головных частях научной аппаратуры регистрации потоков высокоскоростных твердых частиц, инициируемых ускорителем взрывного типа [1–4].

Схема такого эксперимента показана на рис. 1 и включает доставку взрывного генератора частиц и средств диагностики на заданную высоту, отделение и удаление генератора от диагностического отсека ракеты, срабатывание генератора, работу измерительных средств и аппаратуру передачи данных результатов измерений по телеметрическому каналу на Землю.

Указанный метод воздействия потоков частиц на космический аппарат требует изучения характеристик взрывного генератора (распределение частиц в потоке по скоростям и размерам). Исследование характеристик таких генераторов в лабораторных условиях требует использования вакуумной камеры больших размеров специальной конструкции [1].

Из числа возможных способов генерации потоков мелкодисперсных частиц для ракетных экспериментов был выбран наиболее простой взрывной способ, который должен был обеспечивать потоки со скоростями 5–10 км/с, характерными для взаимодействия с КА [2]. Для имитации антропогенного загрязнения использован широко применяющийся дешевый порошок алюминия со средним размером частиц 5–10 мкм. Следует отметить, что алюминий, как и его соединения, в частности окислы, является одним из распространенных компонентов загрязнения околоземного пространства. Были разработаны два типа генераторов. В первом из них порошок замешивался в состав взрывчатого вещества. Скорость частиц, ускоряемых таким генератором, должна была составлять (по результатам лабораторных исследований) в среднем 3–5 км/с. Во втором типе генератора для

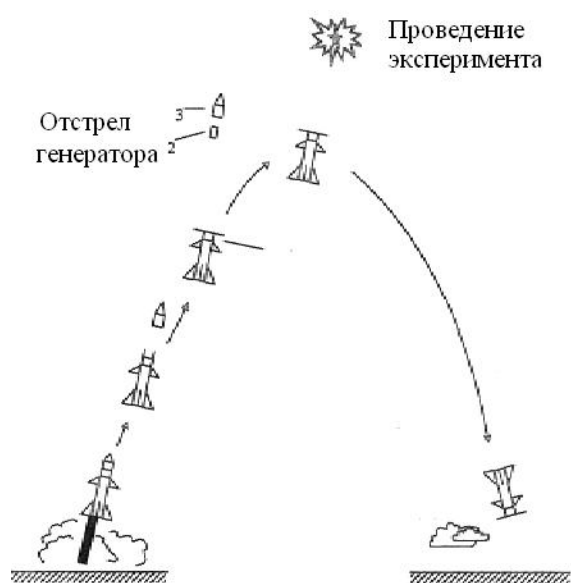


Рис. 1. Схема проведения ракетного эксперимента: 1 – приборный отсек с диагностической аппаратурой; 2 – генератор; 3 – отделяемый модуль

повышения скорости до ~ 10 км/с использовался принцип метания частиц, при котором упаковка частиц накладывалась на заряд чистого ВВ.

Рассмотрим модель взрывного источника потоков пылевых частиц. Не претендуя на строгую постановку, решим задачу ускорения пылевой частицы в процессе расширения образующегося при взрыве газа. Пусть в момент времени $t = t_0$ имеется сферически симметричный газовый сгусток с плотностью ρ , радиуса R_0 , граница которого движется со скоростью $U_0 = \text{const}$. Для простоты расчетов профиль плотности по сгустку берем постоянным; профиль скорости по сгустку – линейным. Плотность ρ газа падает по кубическому закону

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^3.$$

В момент $t = t_0$ частица находится на границе сгустка и имеет начальную радиальную скорость U_0 . Сила давления газа направлена по радиусу, так что частица ускоряется в строго радиальном направлении. Пылевая частица считается сферической. В соответствии с принятой моделью уравнение Ньютона запишется в виде

$$m_{\text{ч}} \frac{d^2 r}{dt^2} = \rho_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^3 \left(\frac{r}{t} - r \right)^2 \frac{\pi}{2} R_{\text{ч}}^2, \quad (1)$$

где t – текущее время; r – координата частицы; $m_{\text{ч}}$ – масса частицы; $R_{\text{ч}}$ – радиус частицы.

Начальные условия для уравнения (1) таковы: при $t = t_0$ $r(0) = r_0$, $\dot{r}(0) = V r_0$.

Введем переменные: $y = r / R_0$, $x = t / t_0$, где $R_0 = U_0 t_0$ – начальный радиус газового облака ВВ. Тогда уравнение (1) можно записать в виде

$$y'' = k \left(\frac{y}{x} - y' \right)^2 \frac{1}{x^3},$$

где

$$k = \frac{t_0^2}{R_0} \frac{\rho_0}{2m} \frac{R_0^2}{t_0^2} \pi R_{\text{ч}}^2.$$

Начальные условия: $x = 1$, $y = y_0$, $y'(1) = V_{\text{ч}0} / U_0$.

Если учесть, что $m = \frac{3}{4} \rho_{\text{ч}} R_{\text{ч}}^3$ ($\rho_{\text{ч}}$ – плотность частицы), то

$$K = \frac{3}{8} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{ч}}} \frac{R_0}{R_{\text{ч}}} = \frac{3}{8} \frac{m_0}{m_{\text{ч}}} \left(\frac{R_{\text{ч}}}{R_0} \right)^3.$$

Делая замену $y = x\eta\xi$, $\xi = \ln x$, получим уравнение

$$\eta'' - k e^{-2\xi} \eta^{12} + \eta' = 0 \quad (2)$$

с начальными условиями $\xi = 0$, $\eta(0) = y_0$,

$$\eta'(0) = -y_0 + \frac{V_{\text{ч}0}}{U_0}.$$

Обозначим $U = \eta$. Тогда уравнение (2) преобразуется к уравнению Бернулли относительно переменных U и ξ :

$$U' + U - k e^{-2\xi} = 0.$$

Начальные данные: $\xi = 0$, $U(0) = -y_0 + V_{\text{ч}0} / U_0$; делая замену $z = 1 / U$, получаем линейное уравнение 1-го порядка:

$$z' + z - k e^{-2\xi} = 0 \quad (3)$$

с начальными данными

$$\xi = 0, \quad z(0) = \frac{1}{-y_0 + \frac{V_{\text{ч}0}}{U_0}}.$$

Как известно, решение уравнения (3) имеет вид

$$z(\xi) = e^{-F} \left(\frac{1}{-y_0 + \frac{V_{\text{ч}0}}{U_0}} - k \int_0^{\xi} e^{-F} e^{-2\xi} d\xi \right),$$

где $F(\xi) = \int_0^{\xi} d\xi = \xi$. Таким образом,

$$z(\xi) = e^{\xi} \left(\frac{1}{-y_0 + \frac{V_{\text{ч}0}}{U_0}} - k \int_0^{\xi} e^{-3\xi} d\xi \right);$$

$$z(\xi) = e^{\xi} \left(\frac{1}{-y_0 + \frac{V_{\text{ч}0}}{U_0}} - k (1 - e^{-3}) \right).$$

Так как $\xi = \ln x$, то

$$z(\xi) = e^{\xi} \left(\frac{1}{-y_0 + \frac{V_{\text{ч}0}}{U_0}} - \frac{k}{3} \left(1 - \frac{1}{x^3} \right) \right);$$

$$U(x) = \frac{1}{x \left(\frac{1}{-y_0 + \frac{V_{\text{ч}0}}{U_0}} - \frac{k}{3} \left(1 - \frac{1}{x^3} \right) \right)}.$$

Так как $\frac{d\eta}{d\xi} = x \frac{d\eta}{dx}$, то

$$\eta(x) = \int_1^x \frac{x dx}{\frac{k}{3} - x^3 \left(\frac{k}{3} - \frac{1}{-y_0 + \frac{V_{\text{ч}0}}{U_0}} \right)}. \quad (4)$$

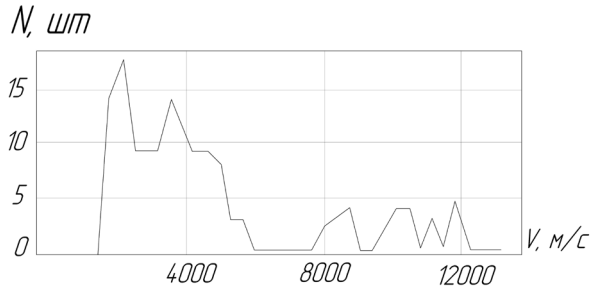


Рис. 2. Экспериментальное распределение скоростей частиц

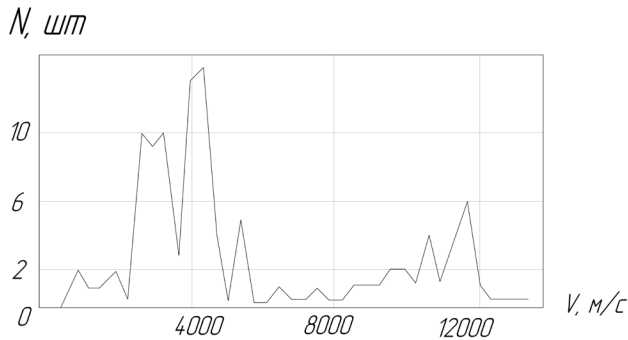


Рис. 3. Расчетное распределение скоростей частиц на расстоянии 30 м от источника

Обозначим

$$\frac{k}{3} = a^3, \quad \frac{k}{3} - \frac{1}{-y_0 + \frac{V_{ч0}}{U_0}} = c^3,$$

тогда (4) можно представить в виде

$$\eta(x) = \frac{1}{c^2} \int_c^x \frac{x dx}{a^3 - x^3} + y_0. \tag{5}$$

Используя таблицы интегралов, получим:

$$\eta(x) = \frac{1}{c^2} \left[\frac{1}{6a} \ln \left(\frac{a^2 + acx + (cx)^2}{a^2 + ac + c^2} \right) \frac{(a - c)^2}{(a - ac)^2} + \frac{1}{\sqrt{3}a} \left(\arctg \frac{U + a}{a\sqrt{3}} - \arctg \frac{2cx + a}{a\sqrt{3}} \right) \right] + y_0.$$

Таким образом, закон движения частицы имеет вид

$$y(x) = x \left[\frac{1}{c^2} \left[\frac{1}{6a} \ln \left(\frac{a^2 + acx + (cx)^2}{a^2 + ac + c^2} \right) \frac{(a - c)^2}{(a - ac)^2} + \frac{1}{\sqrt{3}a} \left(\arctg \frac{U + a}{a\sqrt{3}} - \arctg \frac{2cx + a}{a\sqrt{3}} \right) \right] + y_0 \right].$$

Скорость частицы определится из (5):

$$y'(x) = \frac{1}{c^2} \left[\frac{1}{6a} \ln \left(\frac{a^2 + acx + (cx)^2}{a^2 + ac + c^2} \right) \frac{(a - c)^2}{(a - ac)^2} + \frac{1}{\sqrt{3}a} \left(\arctg \frac{U + a}{a\sqrt{3}} - \arctg \frac{2cx + a}{a\sqrt{3}} \right) \right] + y_0 + \frac{1}{a^3 - x^3}.$$

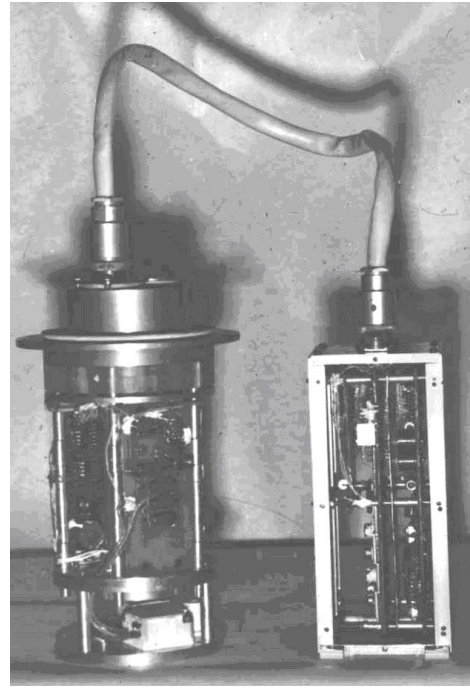


Рис. 4. Многопараметрический преобразователь потоков частиц

При $x \rightarrow \infty$ асимптотическое значение скорости пылевой частицы будет равно

$$y'_\infty = \frac{1}{c^2} \left[\frac{1}{6a} \ln \left(\frac{(a - c)^2}{a^2 + ac + c^2} \right) + \frac{1}{\sqrt{3}a} \left(\arctg \frac{2c + a}{a\sqrt{3}} - \frac{\pi}{2} \right) \right] + y_0. \tag{6}$$

Преобразуем выражение (6):

$$y'_\infty = y_0 - \frac{1}{3ac^2} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{(a + c)^2 - ac}}{c - a} \right) + \sqrt{3} \left(\frac{\pi}{2} - \arctg \frac{2c + a}{a\sqrt{3}} \right) \right]. \tag{7}$$

При $k \rightarrow \infty$ (масса пылинки $m_{ч} \rightarrow \infty$) параметры $a \rightarrow \infty$, $c \rightarrow \infty$. Вычисляя предел в (7), получим $y_\infty \rightarrow 1$. При $k \rightarrow 0$ (масса пылинки $m_{ч} \rightarrow \infty$), $a \rightarrow 0$, $c \rightarrow 0$, $y_\infty \rightarrow 0$. Таким образом, чем меньше масса, тем больше скорость частицы.

Если в стадии инерционного разлета газобразных продуктов взрывчатого вещества принять $R_0 = 1$ м, $\rho = 1$ кг / м³, то для пылинки радиуса $R_{ч} = 10^{-6}$ м, плотности $\rho = 1$ кг / м³ = 5, параметр $k = 375$. Тогда $a = (k / 3)^3 = 5$, $c = 5,018$ и скорость $y_\infty = 0,98$. Для частицы $R_{ч} = 10^{-5}$ м = 10 мкм скорость $y_\infty = 0,893$.

Таким образом, в рамках данной модели ускорения пылевых частиц с использованием ВВ

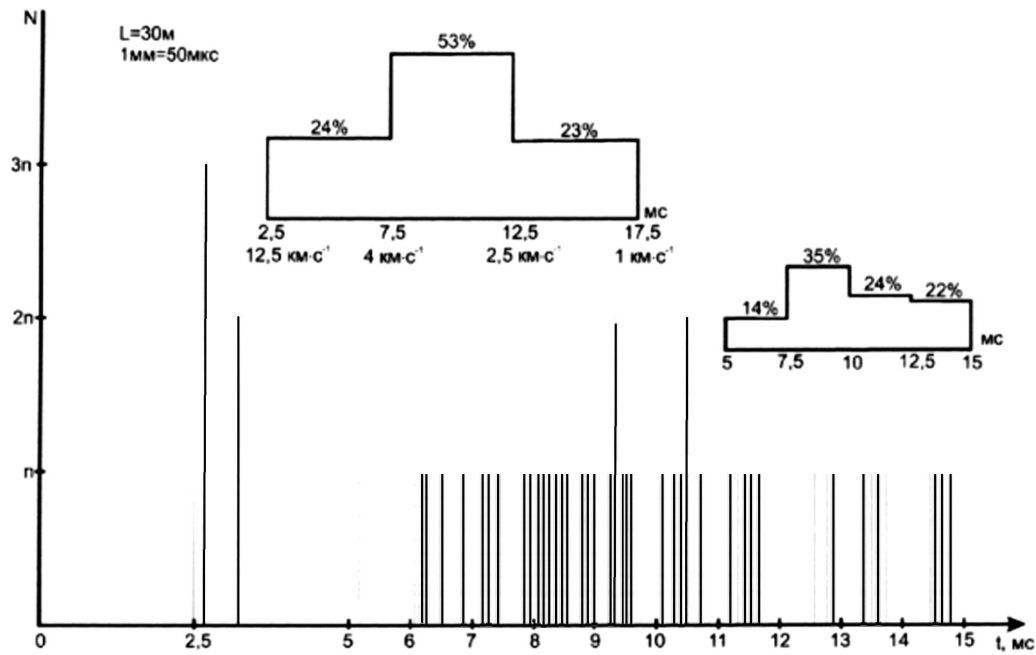


Рис. 5. Зависимость числа импульсов с ФЭУ от времени (прибор АПЧ)

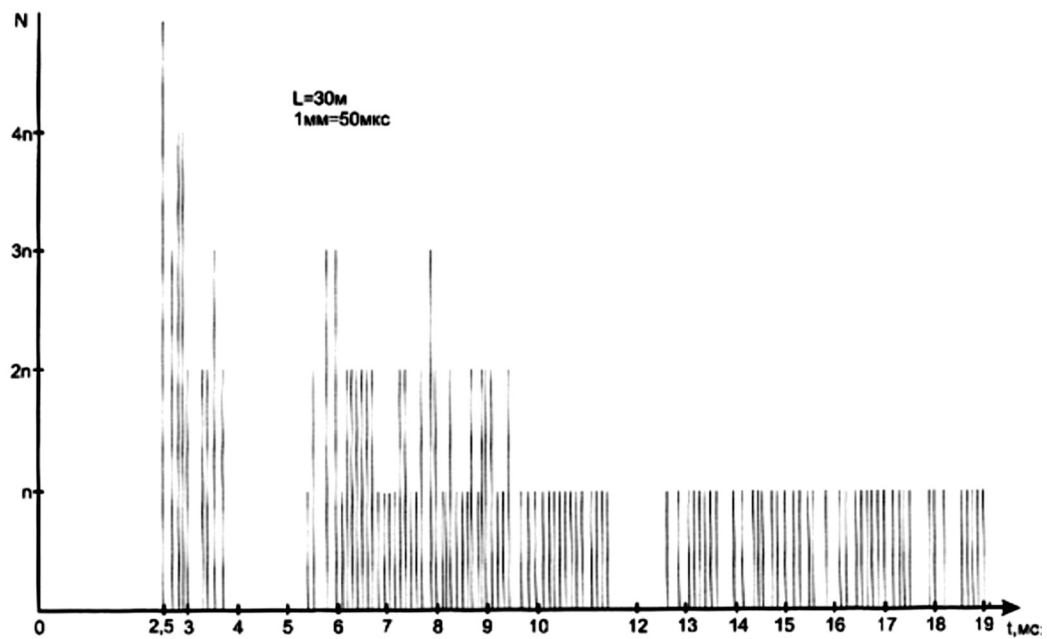


Рис. 6. Зависимость числа импульсов с ВЭУ от времени (прибор АПЧ)

Таблица

R , мкм	Ur_0	a	c	U_∞
1	0	5	5,013	0,98
	0,5	5	5,026	0,982
	0,9	5	5,130	0,987
10	0	2,32	2,38	0,87
	0,5	2,32	2,43	0,893
	0,9	2,32	2,82	0,946
100	0	1,077	1,31	0,46
	0,5	1,077	1,48	0,654
	0,9	1,077	2,24	0,91
1000	0	0,5	1,04	0,0847
	0,5	0,5	1,285	0,522
	0,9	0,5	2,163	0,9009

скорость пылинки слабо зависит от ее массы. В этом случае следует ожидать компактные потоки пылевых частиц с высокой плотностью потока. Однако скорость частиц сильно зависит от начальных условий при $t = t_0$, так как в общем случае в процессе образования взрывного облака частицы могут оказаться в любой точке расширяющегося газового облака. В таблице даны значения скоростей в зависимости от радиуса частицы при различных значениях величин a и c .

На рис. 2 и рис. 3 показаны соответственно расчетное и экспериментальное распределение потока частиц по скоростям. Эксперименты выполнены с помощью ракет, по схеме, показанной на рис. 1, а экспериментальные данные о характеристиках потока частиц получены с помощью разработанного нами многопараметрического прибора АПЧ-1 (рис. 4).

Из рис. 2 и 3 видно, что теоретическое и экспериментальное распределения на качественном уровне совпадают.

Аппаратура АПЧ-1 состояла из люминесцентного, ионизационного и фотоэлектрического датчиков и блока обработки информации [3; 4].

На рис. 5 и 6 соответственно приведены экспериментальные данные гистограмм с фотоэлектронного умножителя люминесцентного датчика и с ионизационного датчика. Из рисунков видно, какой процент частиц соответствует диапазону скоростей.

Потоки частиц получались с помощью специального разработанных генераторов взрывного типа [1], и создаваемые ими частицы воздействовали на элементы конструкций космических аппаратов, установленные на головной части ракеты [3].

Датчики позволяют измерить потоки частиц $10 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Быстродействие аппаратуры обработки информации обеспечивает работу датчиков в счетном режиме.

В реальном масштабе времени отложены частоты появления сигнальных импульсов. В соответствии с временной диаграммой прибор включался через 2,5 мс после светового сигнала, возникающего при подрыве заряда ВВ. Полученная плотность потока частиц соответствует максимальной частоте импульсов $1000 \text{ час} / (\text{см}^2 \cdot \text{с})$ для люминесцентного датчика и $10000 \text{ час} / (\text{см}^2 \cdot \text{с})$ для ионизационного датчика. Такой разброс результатов объясняется более высокой чувствительностью ионизационного датчика по сравнению с люминесцентным.

Наиболее вероятная скорость в исследуемом потоке лежит в интервале от 2,5 до 4 км/с, что соответствует ожидаемым скоростям при моделировании потоков с помощью ВВ. Плотность потока частиц, соответствующая максимальной частоте импульсов, не превышает $10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для люминесцентного датчика и $10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для ионизационного датчика.

Такой разброс результатов по двум датчикам, возможно, объясняется тем, что чувствительность ионизационного датчика на порядок превышает чувствительность люминесцентного, потому что площадь чувствительной поверхности ионизационного датчика в 10 раз меньше площади люминесцентного. Так как скорость пылевых частиц слабо зависит от массы, а импульс с люминесцентного датчика пропорционален кинетической энергии налетающей частицы, то, по-видимому, большая часть мелких пылевых частиц не регистрировалась люминесцентным датчиком. Таким образом, в качестве правдоподобной величины можно принять величину максимальной плотности потока порядка $10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Результаты проведенных исследований с помощью ракет показали, что к настоящему времени информация о взаимодействии потоков высокоскоростных пылевых частиц с веществом малочисленна. Большое количество работ посвящено взаимодействию одиночных частиц с веществом. Физические процессы одиночных частиц и потоков не всегда эквивалентны. В данной работе рассмотрен вопрос формулирования основных характеристик потока пылевых частиц и выведен критерий для величины плотности потоков, при которой неэквивалентность физических процессов носит не только интегральный, но и дифференциальный характер. Для моделирования таких потоков необходимо использование специальных средств. Наиболее эффективным устройством для создания таких потоков пылевых частиц является электромагнитный ускоритель для разгона контейнеров с пылевыми частицами.

Проведенный натурный эксперимент с использованием источников пылевых потоков взрывного типа показал, что разработанный прибор АПЧ-1 позволяет регистрировать потоки частиц в диапазоне $j = 10-10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $V = 0,5-15 \text{ км/с}$.

Проведенный эксперимент также показал, что плотность потока в максимуме распределения составила $j = 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, а скорость $V = 3 \text{ км/с}$.

Разработанная модель источника потоков пылевых частиц взрывного типа, а также информация, полученная с прибора АПЧ-1, позволят решить задачу перехода от характеристик потока к основным характеристикам источника.

Спроектированный прибор АПЧ-1 с совместным использованием различных эффектов дает возможность определить не только характеристики потоков, но и параметры одиночных частиц (массу, скорость) как в натуральных, так и лабораторных условиях.

Выбор и совмещение методов измерения характеристик потоков пылевых частиц являются результатом исследования известных перспективных методов измерения.

Список литературы

1. Семкин Н.Д. Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем КА // Труды всесоюзной научно-практической конференции. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 263.
2. Simulation of cosmic man-made dust effects on space vehicle elements in rocket and laboratory experiments / Yu.J. Portnyagin [et al.] // The XXIII wheeling of COSPAR. June-July, 1990. Hague, Netherlands. P. 10-13.
3. Семкин Н.Д., Воронов К.Е. Исследование пылевой компоненты верхних слоев атмосферы с помощью люминесцентного датчика // Всесоюзная научно-техническая конференция. Саратов. 10-13 сентября, 1991. С. 33-35.
4. Ракетные эксперименты по моделированию воздействия компонентов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на материалы и системы космических аппаратов / Ю.И. Портнягин [и др.] // Тр. всесоюз. науч.-практ. конференции. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 10-18.

Explosive generator high speed of solid particles

N.D. Semkin, A.M. Telegin

The article describes the space experiment to study the impact of particle fluxes to the spacecraft. A model of the explosive source streams of dust particles.

Keywords: model, rocket, near-Earth space, experiment.
