

Изследване на формирането на псевдометеоритен поток от частици

Виктор Баранов, Христо Христов,
Красимир Бояджиев**, Станчо Петков***

Тулски държавен университет, Тула, Русия

** Поделение 42660 – Министерство на отбраната, София*

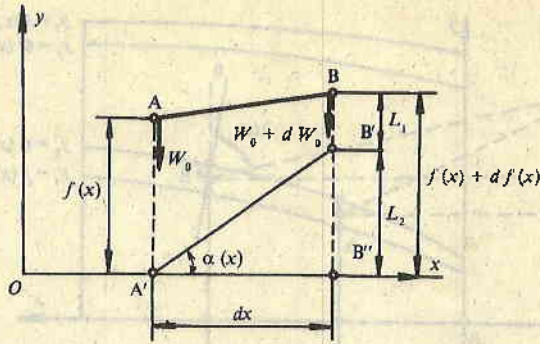
*** „Вазовски машиностроителни заводи“, Сопот*

Определена опасност за космическите апарати през времето на полета им представляват метеоритни частици с различна скорост и големина, предизвикващи ерозия и местни разрушения на конструкцията и обшивката на апарата.

Метеоритите (метеорите) се делят на два класа: метеоритни потоци и единични метеорити [1]. Докато орбитите и параметрите на движение на някои от тях са известни и позволяват прогнозиране, срещата с други е случайна и по тази причина опасна за елементите и функционирането на космическия апарат. Диапазонът на скоростите на движение на метеоритните тела е в рамките на 11–73 km/s, техните маси се движат в границите на 10^{-11} – 10^2 g [1, 2]. Датчици, поставени на космически апарати, са регистрирали удари на тела с маса 10^{-7} – 10^{-11} g [2].

По състав метеоритните тела са каменни и железни. Плътноста на каменните метеорити е $0,5$ – 3 g/cm³, на железните – $0,5$ – $7,8$ g/cm³. Числото на метеоритните тела в поток се увеличава с намаляването на тяхната маса m – примерно обратно пропорционално на m^2 [1].

Лабораторната проверка на жизнеспособността на елементите на космическия апарат е възложена чрез обстрелване с единични или с поток от псевдометеоритни частици. Този процес може теоретично да се опише и експериментално да се възпроизведе при формирането на кумулативна струя. Възможността за целенасочено формиране на компактни кумулативни елементи, имитиращи единични метеоритни частици, е разгледана в [3, 4]. Определен интерес представлява теоретичното описание на формирането на поток от псевдометеоритни частици със зададени скоростни характеристики на началото и края на потока. В лабораторни условия такова движение може да се имитира



$$(2) \quad R = f(x) - dy = f(x) - W_0(x) \frac{dx}{D}.$$

Приема се, че скоростта не зависи от времето и се явява функция само на координатата x . Тогава разстоянието R точка A ще измине за време T

$$(3) \quad T = \frac{R}{W_0(x)} = \frac{1}{W_0(x)} \left[f(x) - W_0(x) \frac{dx}{D} \right].$$

За това време точка B се премества към оста Ox със скорост $W_0(x) + dW_0(x)$, изминавайки път

$$(4) \quad L_1 = T[W_0(x) + dW_0(x)] = \left[f(x) - W_0(x) \frac{dx}{D} \right] \frac{W_0(x) + dW_0(x)}{W_0(x)},$$

и се намира на разстояние L_2 от оста Ox

$$(5) \quad L_2 = [f(x) + df(x)] - L_1.$$

Следователно за ъгъла на сглопване α на елемента dx може да се запише

$$(6) \quad \operatorname{tg} \alpha(x) = \frac{L_2}{dx} = \frac{f(x) + df(x) - \frac{1}{W_0(x)} \left[f(x) - W_0(x) \frac{dx}{D} \right] [W_0(x) + dW_0(x)]}{dx}.$$

След преобразувания последното уравнение добива следния вид:

$$(7) \quad \operatorname{tg} \alpha(x) = \frac{df(x)}{dx} - \frac{f(x)}{W_0(x)} \frac{dW_0(x)}{dx} + \frac{W_0(x)}{D},$$

в което скоростта на радиална деформация на елементарната част от кумулативната облицовка $W_0(x)$ е свързана със скоростта на образуващата се елементарна част от кумулативната струя със съотношението

$$(8) \quad W_0(x) = W_1(x) \operatorname{tg} \frac{\alpha(x)}{2} = \frac{K_1 D}{2} \sqrt{\frac{\beta(x)}{2 + \beta(x)}} [1 - a_1 \sin \lambda(x)],$$

където K_1 е коефициент на сходимост; a_1 — коефициент на взаимодействие: детонационна вълна — облицовка;

$$(9) \quad \beta(x) = \frac{m(x)}{2M(x)} \left(1 + \frac{M_H(x) - M(x)}{M_H(x) + M(x) + m(x)} \right),$$

$\lambda(x)$ — ъгъл на подхода на детонационната вълна към образуващата външната повърхност на кумулативната облицовка:

$$(10) \quad \lambda(x) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{d\varphi(x)}{dx} - \operatorname{arctg} \left(\frac{r_\pi - \varphi(x)}{a_0 + x} \right).$$

Тогава изразът за определяне на ъгъла на схлопване приема вида

$$(11) \quad \operatorname{tg} \alpha(x) = \frac{df(x)}{dx} - \frac{f(x)}{W_1 \operatorname{tg} \frac{\alpha(x)}{2}} \left[\frac{dW_1(x)}{dx} \operatorname{tg} \frac{\alpha(x)}{2} + W_1(x) \frac{d \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha(x)}{2} \right)}{dx} \right] + \frac{W_1(x) \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha(x)}{2} \right)}{D}.$$

Полагаме

$$(12) \quad \varepsilon(x) = \frac{D}{2W_1(x)} \sqrt{\frac{\beta(x)}{2 + \beta(x)}} \quad \text{и} \quad \eta(x) = 1 - a_1 \sin \lambda(x)$$

и отчитайки, че $a_1 < 0,248$, изразяваме тангенса на ъгъла и тангенса на половината на ъгъла на схлопване чрез формула (8). Тогава изразът (11) може да се запише в следния вид:

$$(13) \quad \frac{2\varepsilon(x)\eta(x)}{1 - \varepsilon^2(x)\eta^2(x)} = \frac{df(x)}{dx} - \frac{f(x)}{\varepsilon(x)W_1(x)\eta(x)} \times \left[\frac{dW_1(x)}{dx} \varepsilon(x)\eta(x) + W_1(x) \frac{d(\varepsilon(x)\eta(x))}{dx} \right] + \frac{W_1(x)}{D} \varepsilon(x)\eta(x),$$

където

$$(14) \quad \frac{d(\varepsilon(x)\eta(x))}{dx} (W_1(x), \beta(x), \lambda(x)) = \frac{\partial(\varepsilon\eta)}{\partial W_1(x)} \frac{dW_1(x)}{dx} + \frac{\partial(\varepsilon\eta)}{\partial \beta(x)} \frac{d\beta(x)}{dx} + \frac{\partial(\varepsilon\eta)}{\partial \lambda(x)} \frac{d\lambda(x)}{dx}.$$

За опростяване на израза (14) полагаме

$$(15) \quad E(x) = \frac{1}{\beta(x)(2 + \beta(x))},$$

$$S(x) = (a_0 + x)^2 + (r_n - \varphi(x))^2 = kB^2$$

и записваме формула (14) в следния вид:

$$(16) \quad \frac{d(\varepsilon(x)\eta(x))}{dx} = \varepsilon(x)\eta(x)E(x)\frac{d\beta(x)}{dx} - \frac{\varepsilon(x)\eta(x)}{W_1(x)}\frac{dW_1(x)}{dx} + \frac{\varepsilon(x)a_1(r_n - \varphi(x))}{\sqrt{S(x)}\sqrt{1 + \left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}}\frac{d\varphi^2(x)}{dx^2} - \frac{\varepsilon(x)a_1(r_n - \varphi(x))(a_0 + x)^2}{S(x)\sqrt{S(x)}\sqrt{1 + \left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}} \times \frac{d\varphi(x)}{dx} + \frac{\varepsilon(x)a_1(a_0 + x)}{\sqrt{S(x)}\sqrt{1 + \left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}}\frac{d\varphi^2(x)}{dx^2}\frac{d\varphi(x)}{dx} - \frac{\varepsilon(x)a_1(a_0 + x)^3}{S(x)\sqrt{S(x)}\sqrt{1 + \left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}}\left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2.$$

Функцията на активната маса на взривното вещество се изразява по следния начин [3]:

$$(17) \quad \frac{d\beta(x)}{dx} = A(x)a(x)\frac{dF(x)}{dx} + (A(x)d(x) + C(x)c(x))\frac{d\varphi(x)}{dx} + (B(x)b(x) + C(x)g(x))\frac{d\varphi(x)}{dx} + B(x)e(x)\frac{d\varphi(x)}{dx},$$

където $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$, $a(x)$, $b(x)$, $c(x)$, $d(x)$, $e(x)$, $g(x)$ са сложни функции, които не съдържат производни от функциите, описващи геометрията на кумулативния заряд. Поставяме уравнение (16) и (17) в (13) и след известна обработка се получава следното уравнение:

$$(18) \quad [f(x)E(x)B(x)e(x) - 1]\frac{df(x)}{dx} + \frac{f(x)}{\eta(x)}\left\{[\eta(x)E(x) \times (B(x)b(x) + C(x)g(x))] + \frac{a_1(r_n - \varphi(x))(a_0 + x)^2}{S(x)\sqrt{S(x)}\sqrt{1 + \left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}}\frac{d\varphi(x)}{dx}\right\}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{a_1(a_0+x)^3}{S(x)\sqrt{S(x)}\sqrt{1+\left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}} \left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2 - \frac{\varepsilon(x)a_1(r_\pi - \varphi(x))}{\sqrt{S(x)}\sqrt{1+\left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}} \\
& \times \left. \frac{d\varphi^2(x)}{dx^2} - \frac{a_1(a_0+x)}{\sqrt{S(x)}\sqrt{1+\left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2}} \frac{d\varphi^2(x)}{dx^2} \frac{d\varphi(x)}{dx} \right\} \\
& + f(x)E(x) \left[A(x)d(x) + C(x)c(x) \right] \frac{d\varphi(x)}{dx} + f(x)E(x)A(x)d(x) \\
& \times \frac{dF(x)}{dx} - \frac{w_1(x)}{D} \varepsilon(x)\eta(x) + \frac{2\varepsilon(x)\eta(x)}{1-\varepsilon^2(x)\eta^2(x)} = 0.
\end{aligned}$$

Уравнението и неговото решение се усложняват от наличието на втора производна от функцията, описваща външната повърхност на кумулативната облицовка. Поради често срещания случай в практиката на конична кумулативна облицовка, което е технологично изгодно, е удобно зануляването на втората производна. За високоскоростни струи $\sqrt{1+\left(\frac{d\varphi(x)}{dx}\right)^2} \approx 1$. Тогава след обработка се получава

$$\begin{aligned}
(19) \quad & \left[f(x)E(x)B(x)e(x) - 1 \right] \frac{d\varphi(x)}{dx} + \frac{f(x)}{\eta(x)} \left\{ \left[\eta(x)E(x) \right. \right. \\
& \times \left. \left. (B(x)b(x) + C(x)g(x)) + \frac{a_1(r_\pi - \varphi(x))(a_0+x)^2}{S(x)\sqrt{S(x)}} \right] \frac{d\varphi(x)}{dx} \right. \\
& \left. + \frac{a_1(a_0+x)^3}{S(x)\sqrt{S(x)}} \left(\frac{d\varphi(x)}{dx} \right)^2 \right\} + f(x)E(x) \left[A(x)d(x) + C(x)c(x) \right] \frac{d\varphi(x)}{dx} \\
& + f(x)E(x)A(x)d(x) \frac{dF(x)}{dx} - \frac{w_1(x)}{D} \varepsilon(x)\eta(x) + \frac{2\varepsilon(x)\eta(x)}{1-\varepsilon^2(x)\eta^2(x)} = 0.
\end{aligned}$$

Уравнение (19) е диференциално уравнение от първи ред и изразява връзката между скоростта на кумулативната струя и геометричните характеристики на кумулативния заряд, от който тя се формира, а именно: образуващите на външната и вътрешната повърхност на корпуса на кумулативния заряд и на външната и вътрешната повърхност на кумулативната облицовка. При известни начални условия и ограничения уравнението е изходно за решаване на задачата на Коши за комментирания случай.

Решавайки уравнение (19), относно скоростта се получава изходно уравнение за определяне на градиента на скоростта

$$(20) \quad D \left(\xi(x) - \frac{\eta(x)}{2} \sqrt{\frac{\beta(x)}{2+\beta(x)}} \right) W_1^2(x) + \eta(x) D^2 \sqrt{\frac{\beta(x)}{2+\beta(x)}} W_1(x) + \frac{\eta^2(x) D^3}{8} \frac{\beta(x)}{2+\beta(x)} \left(\eta(x) \sqrt{\frac{\beta(x)}{2+\beta(x)}} - \xi(x) \right) = 0,$$

където $\xi(x)$ е функция на геометрията на заряда, не включваща скоростта като параметър.

Задаването на висок градиент (граничен за еластичните свойства на материала на облицовката) на кумулативната струя по цялата ѝ дължина или само на определени участъци, при решаването на задачата в един от петте ѝ варианта — относно градиента, позволява целенасочено нахъсване на струята на елементарни частици с различни скорости и маси. Последното в резултат формира поток от псевдометеоритни частици с известни начални условия на движение на частиците от потока.

Решението на уравнението в другите четири варианта — относно образуващите на геометричните повърхности, позволява изследване на влиянието на геометрията на заряда и градиента на формирания от него поток от псевдометеоритни частици и действието им върху елементи от космическите апарати в лабораторни условия.

Л и т е р а т у р а

1. Инженерный справочник по космической технике. (Под ред. А. В. Солодова.) М., ВИ Министерство обороны СССР, 1977, с. 430.
2. Большая советская энциклопедия. (Под ред. А. М. Прохорова.) Т. 16. М., Советская энциклопедия, 1974, с. 616.
3. Х р и с т о в, Х. И. Обоснование возможности повышения эффективности кумулятивных элементов для кассетных боеприпасов путем формирования безградиентной струи. Дисертация за получаване на научна степен „Кандидат на техническите науки“, Тульский государственный университет, Тула, 1993. 146 с.
4. Б а р а н о в, В., Х. Х р и с т о в, С. П е т к о в, К. Б о я д ж и е в. Разработване на кумулативни заряди за изследване на псевдометеоритни частици. — Аерокосмически изследвания в България, 1994, № 11, 97–102.
5. Физика взрыва (Под ред, К. П. Станюковича.) М., Наука, 1975, с. 704.

Постъпила на 1. XII. 1994 г.

A study on the formation of a stream of pseudometeorite particles

*Victor Baranov, Christo Christov,
Krasimir Boyadjiev, Stancho Petkov*

(S u m m a r y)

There is a definite danger for the spacecrafts during their operation in space from meteorite particles of various dimensions. These particles cause erosion and local damages in the spacecraft construction and covering. The laboratory test of the spacecraft components viability is possible by means of fire with a stream of pseudometeorite particles. This stream can be defined theoretically and replayed experimentally at the formation of a splitting high-gradient cumulative jet.

For the study on the process of formation of a stream of pseudometeorite particles, based on the Orlenko model, there has been obtained an equation, linking the gradiency of the jet and the geometric parameters of the cumulative charge which forms it. The equation is a basis for solving the task of Koshi for the above described case. The solution enables the design of cumulative charges, forming a stream of pseudometeorite particles and the study on their influence over the spacecrafts components.