Българска академия на науките. Bulgarian Academy of Sciences
Аерокосмически изследвания в България. 11. Aerospace Research in Bulgaria
София. 1994. Sofia

Разработване на кумулативни заряди за изстрелване на псевдометеоритни частици

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

Тулски държавен технически университет, Тула, Русия
** Военно научно-изследователски проекто-конструкторски институт, София*
*** „ВМЗ" ЕООД, Сопот*

При разработването на корпуси на космически системи възниква въпросът за поведението на тяхната обшивка в работни условия. Единственият възможен начин за проверка на жизнеспособността на корпусната обшивка в лабораторни условия е обстрелването ѝ с псевдометеоритни частици. Предвид високата скорост на движение на метеоритните частици в работни за обшивката условия, в достъпни лабораторни условия е удобно такова движение да се имитира чрез формиране на кумулативна струя от кумулативен заряд.

Конструкцията и действието на кумулативния заряд може да се опише по следния начин. Взривно вещество с вдлъбнатина с определена форма е пресовано в корпус. Корпусът и вдлъбнатината са осовосиметрични. При осово иницииране на взривното вещество продуктите на взрива придобиват на повърхността на вдлъбнатината импулс, насочен под някакъв ъгъл към общата ос на кумулативния заряд. В резултат на това налягането, температурата, плътността и скоростта на газовия поток в областта на кумулацията се оказват значително по-високи, отколкото в разпръскващия се поток. При облицоване на кумулативната вдлъбнатина с метал от кумулативната облицовка се образува компактна кумулативна струя, насочена по оста на кумулативния заряд в посока, обратна от инициирането на взривното вещество [1, 2].

За да могат да изпълнят предназначението си в лабораторни условия, псевдометеоритните частици трябва да са компактни тела. Но с многочислени експерименти е доказано, че компактността на кумулативната струя се нарушава вследствие на градиента на скоростта по нейната дължина. Безградиентността на скоростта при формиране на кумулативната струя е фактор за запазване на нейната компактност на относително големи разстояния.

Целенасоченото формиране на безградиентна кумулативна струя изисква решаването на обратната задача на кумулацията [3, 4].

От авторите, използувайки методи на Станюкович и Орленко, е формулирана обратната задача на кумулацията при прието безградиентно формиране на кумулативната струя. Задачата е решена относно функциите $F(x)$, $\Phi(x)$, $\varphi(x)$, $f(x)$, описващи кривите на образуващите, съответно на външната и на вътрешната повърхност на корпуса и на външната и на вътрешната повърхност на кумулативната облицовка на кумулативния заряд. Геометрията на взривното вещество, разположено между корпуса и кумулативната облицовка, се описва от функциите $\Phi(x)$, и $\varphi(x)$.

При решаването на задачата са наложени ограничения на указаните функции, на първите и на вторите им производни относно непрекъснатостта им в участъка $x \geq 0$, като по x се задава височината на кумулативния заряд. Освен това: $F(x) - \Phi(x) \geq 0$, $\Phi(x) - \varphi(x) \geq 0$ и $\varphi(x) - f(x) \geq 0$. Зарядът от взривно вещество в целия си обем е изотропен [5].

Кумулативният заряд се разделя по неговата височина на n равни елементарни части с плоскости, перпендикулярни на общата ос Ox.

Нека в момент време $t=0$ детонационната вълна, разпространяваща се във взривното вещество, от точката на иницииране към кумулативната облицовка, достига върха на облицовката и при $t>0$ се разпространява към нейната основа със скоростта на детонация D на взривното вещество. За определяне на зависимостите, описващи деформацията на облицовката и формирането на кумулативната струя при наложените ограничения на функциите $F(x)$, $\Phi(x)$, $\varphi(x)$, $f(x)$, е използувана радиалната схема на деформация на кумулативната облицовка.

Разглежда се елементарна част от кумулативната облицовка с координата x и дължина dx. В момент време $t=x/D$ точка А (левият край) от разглежданата елементарна част започва движение към оста на симетрия на кумулативния заряд със скорост $W_0(x)$. За времето, докато детонационната вълна достигне точка В (десния край на елементарната част), т. е. за време $dt = dx/D$, точка А се премества по посока към оста Ox на разстояние dy, което се определя по формулата

$$dy = W_0(x)\, dt = W_0(x) \frac{dx}{D} \tag{1}$$

и се намира от оста Ox на разстояние

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

Нека скоростта $W_0(x)$ не зависи от времето и е функция само на координатата x. Тогава разстоянието R точка А ще измине за време T, определено от зависимостта

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

За това време точка В се премества по посока на оста OX със скорост $W_0(x) + dW_0(x)$ и изминава път

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

като се намира от оста OX на някакво разстояние L_2

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

Следователно ъгълът на схлопване α на елементарната част от облицовката се определя по формулата:

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

След преобразувания последното уравнение се записва във вида

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

Скоростта на деформиране $W_0(x)$ на елементарната част от облицовката с дължина dx е свързана със скоростта на движение на кумулативната струя в разглежданото сечение $W_1(x)$ чрез кинематичното съотношение

$$W_0(x)=W_1(x)\operatorname{tg}\frac{(\alpha x)}{2}=\frac{k_i D}{2}\sqrt{\beta(x)[2+\beta(x)]^{-1}}, \tag{8}$$

където k_i е коефициент, отчитащ преразпределението на импулса на взрива върху различни елементарни части на облицовката, вследствие движението на продуктите на детонацията по образуващата на кумулативната вдлъбнатина, $\beta(x)$ — функция на активната маса на заряда.

Тогава изразът за определяне на ъгъла на схлопване α на елементарната част от облицовката ще има следния вид:

$$\operatorname{tg}\alpha(x)=\frac{df(x)}{dx}-\frac{f(x)}{W_1(x)\,tg\frac{\alpha(x)}{2}}\left[\frac{dW_1(x)}{dx}\operatorname{tg}\frac{\alpha(x)}{2}+W_1(x)\frac{d\left(\frac{\operatorname{tg}\alpha(x)}{2}\right)}{dx}\right]+\frac{W_1(x)\,tg\frac{\alpha(x)}{2}}{D}. \tag{9}$$

Изисква се в последното уравнение $W_1(x)=\text{const}$. В такъв случай след извършване на преобразувания решението на уравнение (9) има вида

$$\operatorname{tg}\alpha(x)=\frac{df(x)}{dx}-f(x)\frac{1}{\sin\alpha(x)}\frac{d\alpha(x)}{dx}+\frac{W_1(x)}{D}\operatorname{tg}\frac{\alpha(x)}{2}. \tag{10}$$

В уравнение (10) функциите $\operatorname{tg}\alpha(x)$, $\sin\alpha(x)$, $\operatorname{tg}\frac{\alpha(x)}{2}$ и $\frac{d\alpha(x)}{dx}$ могат да бъдат представени чрез $W_1(x)$ и $\beta(x)$

$$\operatorname{tg}\alpha(x)=\operatorname{tg}\left\{2\operatorname{arctg}\frac{D}{2W_1(x)}\sqrt{\beta(x)[2+\beta(x)]^{-1}}\right\}=\operatorname{tg}[2\operatorname{arctg}\varepsilon(x)]=\frac{2\varepsilon(x)}{1-\varepsilon^2(x)}; \tag{11}$$

$$\sin\alpha(x)=\sin\left\{2\operatorname{arctg}\frac{D}{2W_1(x)}\sqrt{\beta(x)[2+\beta(x)]^{-1}}\right\}=\sin[2\operatorname{arctg}\varepsilon(x)]=\frac{2\varepsilon(x)}{1+\varepsilon^2(x)}; \tag{12}$$

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha(x)}{2}=\operatorname{tg}\left\{\operatorname{arctg}\frac{D}{2W_1(x)}\sqrt{\beta(x)[2+\beta(x)]^{-1}}\right\}=\operatorname{tg}[\operatorname{arctg}\varepsilon(x)]=\varepsilon(x); \tag{13}$$

$$\frac{d\alpha(x)}{dx}=\frac{d\left\{2\operatorname{arctg}\frac{D}{2W_1(x)}\sqrt{\beta(x)[2+\beta(x)]^{-1}}\right\}}{dx}=\frac{d[2\operatorname{arctg}\varepsilon(x)]}{dx}=2\frac{1}{1+\varepsilon^2(x)}\cdot\frac{d\varepsilon(x)}{dx}, \tag{14}$$

където

(15) $$\varepsilon(x)=\frac{D}{2W_1(x)}\sqrt{\beta(x)\,[2+\beta(x)]^{-1}}.$$

Но

(16) $$\frac{d\varepsilon(x)}{dx}=\frac{D}{2W_1(x)}\left\{\sqrt{\beta(x)\,[2+\beta(x)]^3}\right\}^{-1}\frac{d\beta(x)}{dx},$$

Тогава уравнение (10) приема следния вид;

(17) $$\frac{2\varepsilon(x)}{1-\varepsilon^2(x)}=f'(x)-\frac{f(x)D}{2\varepsilon(x)W_1(x)}\left\{\sqrt{\beta(x)\,[2+\beta(x)]^3}\right\}^{-1}\beta'(x)+\frac{W_1(x)\varepsilon(x)}{D}$$

Първата производна на сложната функция $\beta(x)$ описва изменението на активната маса на взривното вещество за елементарна част от облицовката с координата x и дължина dx

(18) $$\frac{d\beta(x)}{dx}=A(x)\,a(x)\frac{dF(x)}{dx}+[A(x)d(x)+C(x)\,c(x)]\frac{d\Phi(x)}{dx}$$
$$+[B(x)\,b(x)+C(x)g(x)]\frac{d\varphi(x)}{dx}+B(x)e(x)\frac{df(x)}{dx},$$

където $A(x)$, $B(x)$, $C(x)$, $a(x)$, $b(x)$, $c(x)$, $d(x)$, $e(x)$ и $g(x)$ са междинни функции, приети с цел опростяване на записа на уравнение (18), зависещи от поведението на функциите $F(x)$, $\Phi(x)$, $\varphi(x)$, $f(x)$.

След определяне на изменението на активната маса от заряда взривно вещество уравнение (17) се записва така:

(19) $$\frac{2\varepsilon(x)}{1-\varepsilon^2(x)}=\frac{df(x)}{dx}-\frac{f(x)D}{2\varepsilon(x)W_1(x)}\left\{\sqrt{\beta(x)\,[2+\beta(x)]^3}\right\}^{-1}$$
$$\times\left\{A(x)\,a(x)\frac{dF(x)}{dx}+[A(x)d(x)+C(x)c(x)]\frac{d\Phi(x)}{dx}\right.$$
$$\left.+[B(x)b(x)+C(x)g(x)]\frac{d\varphi(x)}{dx}+B(x)e(x)\frac{df(x)}{dx}\right\}+\frac{W_1(x)\varepsilon(x)}{D}.$$

Тогава

(20) $$\frac{df(x)}{dx}-E(x)\left\{A(x)\,a(x)\frac{dF(x)}{dx}+[A(x)d(x)+C(x)c(x)]\frac{d\Phi(x)}{dx}\right.$$
$$\left.+[B(x)b(x)+C(x)g(x)]\frac{d\varphi(x)}{dx}+B(x)e(x)\right\}\frac{df(x)}{dx}+\frac{W_1(x)\varepsilon(x)}{D}-\frac{2\varepsilon(x)}{1-\varepsilon^2(x)}=0,$$

или

(21) $$\frac{df(x)}{dx}-E(x)A(x)a(x)\frac{dF(x)}{dx}-E(x)\,[A(x)d(x)+C(x)c(x)]\frac{d\Phi(x)}{dx}$$
$$+E(x)[B(x)b(x)+C(x)g(x)]\frac{d\varphi(x)}{dx}+E(x)\,B(x)e(x)\frac{df(x)}{dx}$$
$$+\frac{W_1(x)\varepsilon(x)}{D}-\frac{2\varepsilon(x)}{1-\varepsilon^2(x)}=0,$$

където

(22) $$E(x)=\frac{f(x)D}{2\varepsilon(x)W_1(x)}\left\{\sqrt{\beta(x)[2+\beta(x)]^3}\right\}^{-1}$$

е сложна междинна функция, несъдържаща производни от функциите $F(x)$, $\Phi(x)$, $\varphi(x)$ и $f(x)$, което позволява тя да се представи като коефициент.

Уравнения (20) и (21) се явяват обикновени диференциални уравнения от първи ред относно една неизвестна от функциите $F(x)$, $\Phi(x)$, $\varphi(x)$ и $f(x)$ при зададени други три и начални условия за неизвестната функция. Същевременно тези уравнения се явяват изходни за формулирането на задачата на Коши за безградиентно формиране на кумулативна струя.

Получените зависимости позволяват целенасочено да се формира безградиентна кумулативна струя, използвана в качеството на псевдометеоритна частица. Задачата се решава в следните два основни случая:

1. При известен профил на корпуса на кумулативния елемент да се построи профилът на кумулативната облицовка, осигуряващ безградиентно формиране на кумулативната струя.

2. При известен профил на кумулативната облицовка да се построи профилът на корпуса на кумулативния елемент, осигуряващ безградиентно формиране на кумулативната струя.

В първия случай се получава следната зависимост за профила на кумулативната облицовка:

$$\frac{df(x)}{dx}=\Big\{\frac{2\varepsilon(x)}{1-\varepsilon^2(x)}-\frac{W_1(x)\varepsilon(x)}{D}+E(x)\Big\{A(x)a(x)\frac{dF(x)}{dx}+[A(x)d(x)+C(x)c(x)]\frac{d\Phi(x)}{dx}+[B(x)e(x)+C(x)g(x)]\frac{d\delta(x)}{dx}\Big\}\Big\}Q(x), \tag{23}$$

където

$$Q(x)=\{1-E(x)B[(x)b(x)+C(x)g(x)]\}^{-1}. \tag{24}$$

Анализът на резултатите от решаването на задачата на Коши за уравнение (23) показва, че образуващата на повърхността на кумулативната облицовка в повечето случаи има вид на ярко изразена парабола

$$f(x)=-ax^2+bx+f(0).$$

Във втория случай се получава следната зависимост за профила на корпуса на кумулативния заряд:

$$\frac{d\Phi(x)}{dx}=\Big\{\frac{W_1(x)\varepsilon(x)}{D}-\frac{2\varepsilon(x)}{1-\varepsilon^2(x)}+[1-E(x)B(x)e(x)]\frac{df(x)}{dx}-E(x)\Big\{A(x)d(x)\frac{d\Omega(x)}{dx}+[B(x)b(x)+C(x)g(x)]\frac{d\varphi(x)}{dx}\Big\}\Big\}\Gamma(x), \tag{25}$$

където

$$\Gamma(x)=\{E(x)[A(x)a(x)+C(x)c(x)]\}^{-1}. \tag{26}$$

Анализът на резултатите от решаването на задачата на Коши за уравнение (25) показва, че образуващата на повърхността на корпуса на кумулативния заряд в повечето случаи има вид на слабо изразена парабола

$$\Phi(x)=Ax^2+Bx+\Phi(0).$$

Получените теоретични резултати относно целенасоченото формиране на безградиентна кумулативна струя са проверени експериментално, като критерий за компактност и безградиентност на кумулативната струя е крайният ефект от проникването ѝ в хомогенна метална преграда със средна твърдост. При изменение на разстоянието между кумулативния заряд и преградата при изпитванията на отделните образци дълбочината на пробойната остана непроменена.

Литература

1. Баум, Ф. А., К. П. Станюкович, В. И. Шехтер. Физика взрыва. М., ФИЗМАТГИЗ, 1959.
2. Физика взрыва. Под ред. К. П. СТАНЮКОВИЧА. М., Наука, 1975.
3. Христов, Х. И. Оптимизация на конструктивните параметри на кумулативен заряд с конусна облицовка на вдлъбнатината. В. Търново, ЮНС, 1993.
4. Христов, 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", Тулски държавен технически университет, Тула, 1993.
5. Лаврентьев, М. А., Б. В. Шабат. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., Наука, 1977.

Постъпила на 14. I. 1994 г.

Pseudometeorite particles generated by shaped charges

Victor Baranov, Christo Christov, Stancho Petkov, Krasimir Boyadjiev

(Summary)

One method of testing the viability of lining of space vehicles in laboratories is by use of meteorite particles jet. As the meteorite particles have high speed in real operation of the space craft their motion can easily be simulated in laboratory by forming a null-gradient cumulative jet. Shaped charges forming null-gradient cumulative jet have been designed by the employment of the method of Stanukovitch and Orlenko. Direct relationship between null-gradient cumulative jet and geometry of the shaped charge has been formulated. The null-gradiency of the cumulative jet makes possible its use in the role of pseudometeorite particles.