ДИНАМИЧНО ДЕФОРМИРАНЕ НА ОБЛИЦОВКАТА И КОРПУСА НА КУМУЛАТИВНИ ЗАРЯДИ

Станчо Петков^{*}, Петко Петков и Аделина Тумбарска

*Институт по металознание, съоръжения и технологии
с Център по хидро- и аеродинамика „Акад. А. Балевски“,
Българска академия на науките,
бул. „Шипченски проход“ № 67, 1574 София, България,
e-mails: s_petkov63@abv.bg; petko_st_petkov@abv.bg;
y.toumbarski@ims.bas.bg*

Резюме. Процесите на динамично свиване на кумулативната облицовка и разрушаването на корпуса на кумулативен заряд, под действието на разширяващите се продукти на детонация, са от решаващо значение за определяне параметрите на формиращата се кумулативната струя. Разработен е математичен модел, описващ движението на елементите на кумулативната облицовка и корпуса до момента на динамично деформиране, като функция на времето с отчитане влиянието на екрана в конструкцията на кумулативния заряд. В рамките на този модел са определени скоростта и текущият ъгъл на динамично деформиране. Представените графично резултати от численото симулиране на динамичното деформиране на облицовката и корпуса за дадена конструкция кумулативен заряд дават представа за изменението на скоростта на формираната кумулативна струя в реално време. Направено е качествено сравнение между получените резултати и такива, получени по други методи за решаване на проблема.

Ключови думи: кумулативен заряд, корпус на кумулативния заряд, облицовка на кумулативния заряд, динамично деформиране, кумулативна струя.

1. УВОД

При решаване на редица приложни задачи, свързани с високоскоростното деформиране на цилиндрични кумулативни заряди, е необходимо определянето на кинематичните характеристики на този процес. Пример за това е изчисляването на действието на кумулативните заряди [1] и в частност моделирането на процеса на деформация на корпуса и кумулативната

^{*} Corresponding author.

DOI: 10.7546/EngSci.LVI.19.03.03

облицовка на кумулативния заряд, както и формирането на кумулативната струя под действието на разширяващите се продукти на детонация.

Целта на статията е да се разработи математичен модел, описващ движението на елементите на кумулативната облицовка и корпуса до момента на динамично деформиране като функция на времето, с отчитане влиянието на екрана в конструкцията на кумулативния заряд.

2. ИЗЧИСЛИТЕЛНА СХЕМА

Кумулативният заряд се състои от концентрично разположени корпус и кумулативна облицовка, като обемът между тях е зает от бризантно взривно вещество, *фиг. 1* [2].

Фиг. 1. Принципа схема на кумулативен заряд: 1 – корпус, 2 – кумулативна облицовка, 3 – взривно вещество, 4 – детонатор, 5 – екран

Fig. 1. Principle scheme of a cumulative charge: 1 – casing, 2 – liner, 3 – explosive, 4 – detonator, 5 – screen.

Инициирането на заряда се осъществява с помощта на детонатор 4. Съвременните конструкции включват също екран 5, който представлява инертно тяло, изменящо направлението на детонационния фронт.

В декартова координатна система YOZ , в общ вид, са дадени функциите $r(z)$, $\varphi(z)$, $\eta(z)$ и $\xi(z)$, *фиг. 2*, където $r(z)$ е функцията, описваща вътрешната образуваща на кумулативната облицовка; $\varphi(z)$ – външната образуваща на кумулативната облицовка; $\eta(z)$ – вътрешната образуваща на корпуса; $\xi(z)$ – външната образуваща на корпуса.

На разстояние z_0 от върха на кумулативната облицовка е разположен източникът на детонация – точка A , която в общия случай не лежи на

Фиг. 2. Схема за извършване на изчисленията
Fig. 2. Calculation scheme

оста на симетрия на кумулативния заряд. Ординатата на точка $A - y_a$, е равна на радиуса на екрана.

В участъка $z \in [z_0; z_0 + H]$, където H е височината на кумулативната облицовка, за образуващите функции са приети следните условия:

$$r(z) \geq 0; \quad \varphi(z) - r(z) \geq 0; \quad \eta(z) - \varphi(z) \geq 0; \quad \xi(z) - \eta(z) \geq 0.$$

При решаването на задачата са направени следните допускания [1, 3]:

1. Взривното вещество е еднородно и неговата плътност е еднаква във всички направления;
2. Корпусът и кумулативната облицовка, при тяхната деформация под действието на разширяващите се продукти на детонацията, се движат радиално.

В съответствие с второто допускане, с помощта на равнини, перпендикулярни на оста на симетрия, кумулативният заряд в участъка $z \in [z_0; z_0 + H]$ е разделен на N слоя с дебелина dz , като разстоянието от i -ия слой до върха на облицовката е равно на z_i , където $i = 1 \dots N$.

3. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СКОРОСТТА НА ДИНАМИЧНО ДЕФОРМИРАНЕ НА КУМУЛАТИВНАТА ОБЛИЦОВКА

Приемаме, че процесът на детонация, с източник в точка A , започва в момента от време $t = 0$, вследствие на което детонационната вълна се разпространява със скорост D към кумулативната облицовка, *фиг. 2*.

При достигане на детонационния фронт до левия край на i -ия елемент с координата z_i в момента от време $t_0(z)$, *фиг. 3*, взривното вещество мигновено се трансформира в продукти на детонация. Вследствие на разширяването на последните, в обема, заеман от взривното вещество, се създава налягане $P(z, t)$, деформиращо корпуса и облицовката на кумулативния заряд.

При достатъчно малко разстояние dz , в рамките на допусканията, образуващите на корпуса и кумулативната облицовка в разглеждания слой могат да се приемат като цилиндрични криви, а радиалните скорости – като скорости на центъра на тежестта на съответното сечение в равнината ZOY .

Числената стойност на $t_0(z)$ се определя в зависимост от геометричните особености на кумулативния заряд и текущата координата на разглеждания слой по формулата:

$$t_0(z) = S(z)/D, \quad (1)$$

където

$$S(z) = \sqrt{[\eta(z) - y_a]^2 \cdot H[\eta(z) - y_a] + [y_a - r(z)]^2 \cdot H[y_a - r(z)] + (z + z_0)^2}$$

е единична функция на Хевисайд и $H(\gamma) = 0$ при $\gamma < 0$; $H(\gamma) = 1$ при $\gamma \geq 0$.

Фиг. 3. Схема на движение на слоя от корпуса и облицовката
Fig. 3. Movement scheme of the casing and liner layer

Разгледан е един сектор от слоя, *фиг. 3*. Приемайки, че влиянието на напреженията на динамично деформиране (опън и натиск), възникващи съответно в материалите на корпуса и кумулативната облицовка при тяхното съвместно радиално движение, е пренебрежимо малко в сравнение с това на продуктите на детонация, са използвани уравненията за движение на корпуса и кумулативната облицовка от разглеждания слой (тук и по-нататък индексът „1“ се отнася за параметрите и характеристиките на корпуса, а индексът „2“ – за тези на кумулативната облицовка):

$$\begin{aligned} m_1(z) \frac{du_1(z,t)}{dt} &= P(z,t) \cdot S_1(z,t), \\ m_2(z) \frac{du_2(z,t)}{dt} &= -P(z,t) \cdot S_2(z,t), \\ \frac{d\eta(t)}{dt} &= u_1(z,t), \\ \frac{dr(t)}{dt} &= u_2(z,t), \end{aligned} \tag{2}$$

където $m_1(z)$ и $m_2(z)$ са съответно масите на елементите на корпуса и кумулативната облицовка за зададеното сечение

$$\begin{aligned} m_1(z) &= \left[\eta(z,t) + \frac{\delta_1(z,t)}{2} \right] \cdot d\varphi \cdot \delta_1(z,t) \cdot dz \cdot \rho_1, \\ m_2(z) &= \left[\eta(z,t) + \frac{\delta_2(z,t)}{2} \right] \cdot d\varphi \cdot \delta_2(z,t) \cdot dz \cdot \rho_2. \end{aligned} \tag{3}$$

$\delta_1(z,t)$ и $\delta_2(z,t)$ са текущите дебелини в процеса на движение на корпуса и кумулативната облицовка:

$$\begin{aligned} \delta_1(z,t) &= \eta(z,t) - r(z,t), \\ \delta_2(z,t) &= \eta(z,t) - \xi(z,t), \end{aligned}$$

$u_1(z,t)$ и $u_2(z,t)$ са съответно скоростите на движение на корпуса и кумулативната облицовка; $S_1(z,t) = \eta(z,t) \cdot d\varphi \cdot dz$ е текущата площ на вътрешната повърхнина на разглеждания елемент от корпуса; $S_2(z,t) = [r(z,t) + \delta(z,t)] \cdot d\varphi \cdot dz$ е текущата площ на външната повърхнина на разглеждания елемент от кумулативната облицовка; $P(z,t)$ е законът за изменение на налягането, създадено от продуктите на детонация.

При изменение на обема на продуктите на детонация, налягането:

$$P_0 = \frac{1}{8} \rho \cdot D^2,$$

което има максимална стойност на фронта на ударната вълна също се изменя по закона

$$P(z, t) = P_0 \left[\frac{W_0}{W} \right]^k, \quad (4)$$

където W_0 е началният обем на взривното вещество; W – текущият обем на продуктите на детонация; k – степенният показател на политропа или адиабата, който се определя от това, дали в процеса на деформация корпусът е разрушен или не.

Според хипотезата, че отсъства осово течение на материала при неговото радиално движение, от закона за съхранение на обемите следват геометрични съотношения за текущите дебелини на корпуса и кумулативната фуния в разглеждания слой:

$$\begin{aligned} \delta_1(z, t) &= \sqrt{\eta^2(z, t) + 2\eta(z, t_0) \cdot \delta_1(z, t_0) + \delta_1^2(z, t_0)} - \eta(z, t), \\ \delta_2(z, t) &= \sqrt{r^2(z, t) + 2r(z, t_0) \cdot \delta_2(z, t_0) + \delta_2^2(z, t_0)} - r(z, t). \end{aligned} \quad (5)$$

Чрез заместване на равенствата (3), (4) и (5) в уравнение (2) е получена система от четири обикновени диференциални уравнения от първи ред с четири неизвестни – $u_1(z, t)$, $u_2(z, t)$, $r(z, t)$ и $\eta(z, t)$, и четири допълнителни условия, а именно:

$$\begin{aligned} u_1(z, t_0) &= 0, \\ u_2(z, t_0) &= 0, \\ r(z, t_0) &= r_0(z), \\ \eta(z, t_0) &= \eta_0(z). \end{aligned} \quad (6)$$

По този начин, при различни значения за $z_i \in [z_0; z_0 + H]$ и съвместно числено решаване на задачата на Коши – уравнения (2), (3), (4), (5) и система (6), може да се опише радиалното движение на съответните елементи от корпуса и кумулативната облицовка на кумулативния заряд. Ограничаващият фактор за спиране на процеса за числено решаване на тази система е изпълнението на условието:

$$r(z_i, \tau_i) = 0, \quad (7)$$

където τ_i е времето, необходимо на елемента от кумулативната облицовка в i -ия слой да достигне до оста на симетрия на кумулативния заряд.

4. ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЪГЪЛА НА ДИНАМИЧНО ДЕФОРМИРАНЕ

Съвместното решаване на уравнения (2), (3), (4), (5) и система (6) се извършва в реално време, което позволява анализиране на „хронологията“ на процеса на динамично свиване на облицовката под действието на разширяващите се продукти на детонация. Следователно, в началния момент на динамичното деформиране на i -ия елемент на кумулативната облицовка, могат да се определят текущата координата на $(i + 1)$ -ия елемент и ъгълът на динамично деформиране $\alpha(z_i)$ по формулата:

$$\alpha(z_i) = \arctg \frac{r(z_{i+1}) - \int_{t(z_{i+1})}^{\tau_i} u_2(z_{i+1}, t) . dt}{z_{i+1} - z_i} = \arctg \frac{r(z_{i+1}, \tau_i)}{dz}. \quad (8)$$

5. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ЧИСЛЕНОТО РЕШЕНИЕ

Численото решаване на задачата е извършено за определена конструкция на кумулативен заряд (*fig. 1*) по изчислителната схема на *fig. 2* [1, 3, 4], като са използвани неявните методи на Рунге-Кута [5] с допълнително уточняване на времето τ_i , за което елементът от кумулативната облицовка в i -ия слой достига до оста на симетрия. Трябва да се отбележи, че във формулите, използвани в [1, 3–7], скоростта на динамично деформиране

Фиг. 4. Зависимост на скоростта на динамично деформиране от времето
Fig. 4. A dependence of the dynamic deformation velocity from the time

е представена или като константа, или в експоненциална зависимост от времето.

Получената зависимост за скоростта на динамично деформиране от времето, т.е. $u_1 = u_1(t)$, където u_1 е в m/s, а времето t – в микросекунди, е представена на *fig. 4*.

Резултатите от извършеното моделиране и числено симулиране потвърждават същността на физичния процес, а именно: радиалното движение на елементите от кумулативната облицовка започва от времето $u_1 = 0$ при достигане на детонационната вълна до елемента в момента от време t_0 и завършва след време τ_1 със скорост, зависеща от особеностите на дадената конструкция.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработеният математичен модел за определяне на скоростта на динамично деформиране (свиване) на кумулативната облицовка при функциониране на кумулативните заряди спомага за създаването на по-точна представа за протичащите физични процеси и тяхната зависимост от геометричните параметри на конструкцията.

Известните методики използват формули, представящи скоростта на динамично деформиране или като константа, или в експоненциална зависимост от времето, което внася допълнителни грешки при определяне на параметрите на кумулативната струя и нейната пробивна способност.

Анализът на получените зависимости за скоростта на движение на корпуса и облицовката от времето показва, че съществува определено повишаване на скоростта на динамично деформиране на елементите от върха на кумулативната облицовка в сравнение със скоростта, определена по енергетични модели, които не отчитат ускоряването на елемента в противоречие с физиката на процеса на динамично свиване.

REFERENCES

- [1] F. A. BAUM, K. P. STANJUKOVICH AND B. I. SHECHTER, *Physics of Explosion*, GOSISFISMAT, Moscow (1959) 800 (in Russian).
- [2] W. WALTERS, *Introduction to Shaped Charges*, Report No ARL-SR-150, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, USA (2007) 110.
- [3] S. P. ПЕТКОВ, *Theoretical and Experimental Proving the Possibility of Developing Small Low-gradient Cumulative Nodes*, Ph.D. Thesis, Tula, Russia (1997) 168 (in Russian).

- [4] V. L. BARANOV, S. P. PETKOV AND K. A. BOJADJIEV, *Development of shaped charges for firing pseudo-meteoric particles*, Aerospace Research in South Bulgaria, No 1, Bulgarian Academy of Sciences (1994) (in Bulgarian).
- [5] N. S. BACHVALOV, N. P. ZHIDKOV AND G. M. KABELKOV, *Numerical Methods*, Moscow, Nauka (1987) (in Russian).
- [6] F. CHOU, Recent Developments in Shaped Charge, Technology, Propellants, Explosive, Pyrotechnics (1986) **1** (4) 99–114, DOI: 10.1002/prop.19860110402
- [7] S. P. PETKOV, P. S. PETKOV, G. M. NIKOLOV AND A. D. TUMBARSKA, Mathematical model of the management of high-energy detonation processes through an energy generator (screen), *European Journal of Engineering Research and Science*, EUROPA Publishing (2018) **3** (5) 65–70, DOI:10.240818/ejers

DYNAMIC DEFORMATION OF THE CASING AND THE LINER OF CUMULATIVE CHARGES

STANCHO PETKOV, PETKO PETKOV AND ADELINA TUMBARSKA

*Institute of Metal Science, Equipment and Technologies
with Hydro-and Aerodynamics Centre „Acad. A. Balevski“,
Bulgarian Academy of Sciences,
67, Shipchenski Prohod Blvd, 1574 Sofia, Bulgaria,
e-mails: s_petkov63@abv.bg; petko_st_petkov@abv.bg;
y.toumbarski@ims.bas.bg*

Abstract. The processes of dynamic deformation of the casing and destruction of the cumulative charge liner under the action of expanding detonation products are critical for determining the parameters of cumulative jet forming. A mathematical model describing the movement of cumulative liner and casing elements up to the time of dynamic deformation is developed, as a function of time and taking into account the effect of a screen in the shaped charge configuration. The velocity and the current angle of dynamic deformation are determined within the framework of this model. The results presented graphically from the numerical simulation of dynamic deformation of the casing and the liner for the given construction cumulative charge show the change of velocity in real time. A qualitative comparison is made between the obtained results and ones obtained by other methods of solving the problem.

Keywords: cumulative charge, cumulative charge casing, cumulative charge liner, dynamic deformation, cumulative jet.

Received July 26, 2019