A XIV-a Conferinţă internaţională – multidisciplinară,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti",
SEBEŞ, 2014

FENOMENE GAZODINAMICE CARE ÎNSOȚESC EXPLOZIILE ÎN MEDII LICHIDE

Maria-Costina AVĂDANEI, Constantin AVĂDANEI

GAZODINAMICS PHENOMENA ACCOMPANYING BURSTS INTO LIQUID MEDIUM

This work makes a major contribution to the interpretation of phenomena due dynamic phenomena in gases explosions which take place in gaseous environment. Theoretical and practical considerations provide a path to be followed for designers and constructor's explosive systems intended for the aquatic environment.

Keywords: explosion, the shock wave, the wave front, adiabatic exponent, viscosity, potential motion
Cuvinte cheie: explozie, undă de șoc, front de undă, exponent adiabatic, vâscozitate, mișcare potențială

1. Introducere

Fenomenul exploziv constă în reacția chimică care are loc în substanțe explozive solide, care se transformă instantaneu în gaze de ardere la temperaturi și presiuni foarte ridicate.

În general substanțele explozive sunt caracterizate prin: viteză de detonație, căldura degajată prin explozie, temperatură, presiunea gazelor de explozie și presiunea specifică de explozie, brizanță, sensibilitate, capacitate de lucru a explozivului [1], [2].

În cadrul prezentei lucrări se abordează fenomenele din punct de vedere al mecanicii fluidelor, în special deplasarea și intensitatea undei de șoc care se formează în urma exploziei în mediul acvatic..

2. Generarea exploziei și mecanismul de propagare în mediul lichid

Un caz specific este explozia în apă, când se formează în stadiul inițial o sferă gazoasă a cărei energie termică și mecanică se transmite lichidului sub forma undelor de șoc și a energiei cinetice.

Într-o primă fază sfera gazoasă își mărește volumul, iar lichidul din vecinătate capătă deplasări radiale importante. Prin destinderea mediului gazos presiunea devine mai mică decât presiunea hidrostatică locală. Urmează o fază de comprimare a gazelor până când presiunea acestora devine de câteva ori mai mare decât presiunea hidrostatică locală. Procesul se repetă într-o nouă destindere și apariția unei alte unde de șoc care se propagă în aceeași direcție ca și prima undă. Din experimente rezultă că o fază de destindere-comprimare durează 25 milisecunde și se produc 6-7 faze de acest tip [3], [4].

3. Relații între parametrii undei de șoc în mediul acvatic

Relațiile între parametrii undelor de șoc ce apar în urma exploziei sunt în funcție de puterea exploziei și adâncimea la care se efectuează [1], [4]. Indiferent de poziția undei de șoc la un moment dat, aceasta prezintă două zone, una de compresiune cu presiuni foarte ridicate și a doua zonă de destindere cu presiune mai mică decât presiunea hidrostatică p_h (figura 1, a).

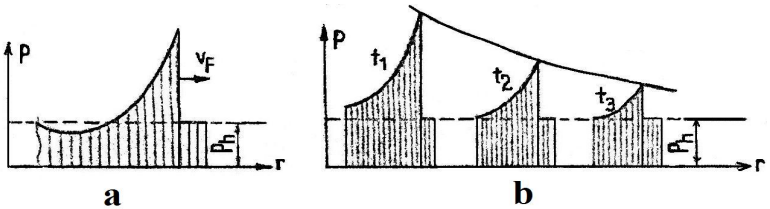

Fig.1 Parametrii undei de șoc

Frontul de undă, dispus pe sferă se deplasează pe direcția radială (r) cu viteză supersonică îndepărtându-se de centrul exploziei. Energia mecanică și termică a sferei gazoase se transmite unei mase de lichid din ce în ce mai mare, astfel că în timp viteza frontului de undă și presiunea se micșorează (figura 1, b).

În spatele undei de șoc se produce o mișcare de lichid în sensul deplasării undei. Viteza și presiunea lichidului se micșorează către centrul de inițiere a exploziei. Această mișcare complexă a

lichidului, ca urmare a pulsațiilor sferei gazoase este denumită de specialiștii în domeniu drept *mișcare explozivă*.

Când undele de șoc ajung la suprafața liberă a lichidului ele se reflectă sub forma undelor de destindere. O parte a energiei undei de șoc se transferă atmosferei printr-o undă de refracție. Sfera gazoasă este evacuată la suprafața lichidului sub forma unui jet de lichid, vapori de apă, picături. Simultan la suprafața lichidului apar două unde inelare care se propagă radial. Prima undă inelară apare ca urmare a acțiunii forțelor de frecare dintre aer și suprafața laterală a jetului aruncat. Simultan la baza jetului are loc o coborâre locală a suprafeței libere a lichidului. Acestea sunt cauzele apariției celei de a doua unde inelare care este de tip gravitațional.

La adâncimi mari fenomenele de suprafață sunt diminuate în intensitate iar pulsațiile sferei gazoase se intensifică.

În cazul exploziilor în incinte finite, are loc fenomenul de interferență a undelor însoțit de creșterea amplitudinilor.

4. Ecuațiile în sfera gazoasă a mișcării explozive

Prezintă importanță ecuațiile mișcării în sfera gazoasă ($r \le r_1$) și în domeniul dintre sfera gazoasă și unda de șoc(US) ($r_1 \le r \le r_2$) [1], [4] – figura 2.

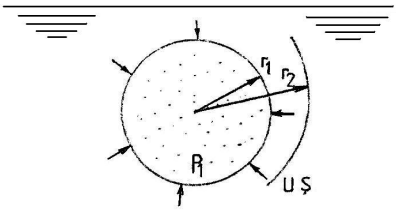

Fig. 2 Sfera gazoasă și unda de șoc (US)

Mișcarea fluidului de la suprafața sferei este radială, evoluția gazelor din interiorul sferei se consideră adiabatică. Exponentul adiabatic corespunde mediu lui gazos la care se adaugă v

apori de apă formați ca urmare a temperaturii de explozie.

Aplicând ecuațiile de continuitate și ecuațiile Navier-Stokes și neglijând forțele masice și de vâscozitate, rezultă sistemul de ecuații [4]:

$$\begin{cases} \rho_1 \dfrac{\partial v_{r_1}}{\partial t} + \rho_1 v_{r_1} \dfrac{\partial v_{r_1}}{\partial r} + \dfrac{\partial p_1}{\partial r} = 0 \\ \dfrac{\partial \rho_1}{\partial t} + \dfrac{1}{r^2} \dfrac{\partial}{\partial r}\left(\rho_1 v_{r_1} r^2\right) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

la care se atașează ecuația evoluției adiabatice,

$$p_1 / \rho_1^{\gamma} = const. \tag{2}$$

Pentru rezolvarea sistemului se impun și condiții la limită pentru domeniul $r_1 \le r \le r_2$.

Între suprafața sferei gazoase și frontul de undă, parametrii mișcării explozive sunt moderați. Lipsesc suprafețele de discontinuitate, presiunea este aceeași în tot domeniul considerat, iar viteza este maximă la suprafața sferei, aceasta reprezentând discontinuitate numai pentru densitatea lichidului. Cu aproximație se poate considera lichidul incompresibil ($\rho_2 = const.$) [3].

În ipoteza că mișcarea sferică a lichidului se consideră numai radială și neglijând forțele masice și de vâscozitate, la momentul t_2 se poate scrie[4]:

$$\frac{\partial v_{r_2}}{\partial t} + v_{r_2} \frac{\partial v_{r_2}}{\partial r} + \frac{1}{\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial r} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2 v_{r_2}\right) = 0 \tag{4}$$

unde p_2 este suprapresiunea (în raport cu presiunea hidrostatică locală). Mișcarea se poate considera potențială și prin integrarea ecuațiilor (3), (4) se obțin expresiile:

$$p_2 + \rho_2 v_{r_2}^2 / 2 = -\rho_2 \partial \varphi_2 / \partial t - C_1(t) \tag{5}$$

$$r^2 v_{r_2} = C_2(t) \tag{6}$$

unde funcția de potențial are forma:

$$\varphi_2 = -C_2(t)/r + C_3(t) \tag{7}$$

Constantele de integrare $C_1(t)$, $C_2(t)$, $C_3(t)$ se determină din condițiile la limită [4]:

$$v_{r_1} = v_{r_2} \quad ; \quad p_1 = p_2 \tag{8}$$

Se poate considera că în afara sferei gazoase, de rază r_s, mișcarea lichidului este potențială, generată de o sursă punctiformă de debit Q,

$$\varphi = -\frac{Q}{4\pi r}\,;\, v = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{Q}{4\pi R^2} \tag{9}$$

din care rezultă

$$Q = 4\pi r_s^2 v_s = 4\pi r^2 v \tag{10}$$

$$\varphi = -\frac{r_s^2 v_s}{r} \tag{11}$$

Pentru a descrie legea de variație a razei sferei gazoase și a vitezei de deplasare a acesteia se utilizează ecuația Lagrange-Cauchy în domeniul lichid [3], [4]:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right) + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = F(t) \tag{12}$$

exprimată pentru $r = r_s$ și $r \to \infty\,;\, \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0\,,\; p = p_h\,,\; v \to 0$ (13)

și care devine de forma:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_s + \frac{p_s}{\rho} + \frac{v_s^2}{2} = 0 \tag{14}$$

Ținând seama de relația (11) și de $v_s = {dr_s}/{dt}$, (15)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{1}{r}\left(2 r_s v_s^2 + r_s^2 \frac{dv_s}{dt}\right) \tag{16}$$

Deoarece raza r_s definește și volumul de gaz aflat într-o evoluție dată de

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = const.\,, \tag{17}$$

rezultă că există condiția:

$$p_s r_s^{3\gamma} = const. = p_0 r_0^{3\gamma} \tag{18}$$

iar relația (14) capătă forma:

$$\frac{d}{dt}\left(r_s^3 v_s^2\right) = 2\left(\frac{p_0}{\rho}\right)^2 \frac{r_0^{3\gamma}}{r_s^{3\gamma} - 2} v_s \tag{19}$$

la care se atașează condiția inițială: $t = 0; r = r_0\,;\, v_s = 0$ (20)

Soluția ecuației (19) , pentru $\gamma = {4}/{3}$, este de forma:

$$v_s = \sqrt{2}\,\frac{p_0}{\rho}\left(\frac{r_0}{r_s}\right)^{3/2} \sqrt{1 - \frac{r_0}{r_s}} \tag{21}$$

Dacă se notează $p_0 / \rho = M(const.), \quad r_s = r_0(1+x)$ (22)

din relația (21) se obține:

$$\sqrt{2}\, r_0 \left(1 + \frac{2}{3}x + \frac{1}{5}x^2\right)\sqrt{x} = M\,t \tag{23}$$

relație ce exprimă legea de variație a razei sferei gazoase și a vitezei de deplasare a acestuia, denumită formula Milne-Thomson [4].

Câmpul de viteze și presiuni se obține cu ajutorul relațiilor (9) și (12) [4]:

$$v = Q / (4\pi r^2) = \left(r_s / r\right)^2 v_s \tag{24}$$

$$p = -\rho\left(\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{v^2}{2}\right) = \frac{\rho}{r}\left(2 r_s v_s^2 + r_s^2 \frac{dv_s}{dt}\right) - \rho\frac{v^2}{2} \tag{25}$$

5. Concluzii

■ Studiul exploziilor în mediul acvatic permite îmbunătățirea randamentelor în utilizarea explozivilor, atât în domeniul civil cât și militar.

■ Demersurile teoretice și rezultatele obținute prin testări specifice completează algoritmul de calcul pentru proiectanți și constructori în vederea elaborării de noi tehnologii pentru protecția navelor de război și a forței vii, precum și pentru perfecționarea armelor cu destinație navală.

BIBLIOGRAFIE

[1] Avădanei, C., *Contribuţii în studiul optimizării fenomenelor gazodinamice din dispozitivele armamentului de calibru redus*, Teză de doctorat, Academia Tehnică Militară, Bucureşti, 1999.

[2] Bodin, C., *Fizica explozivilor*, Editura Academiei Tehnice Militare, Bucureşti, 1972.

[3] Carafoli, E., Constantinescu, V.N., *Dinamica fluidelor compresibile ,* Editura Academiei Române, București, 1984.

[4] Ştefan, S., *Ecuațiile mecanicii fluidelor*, Editura Academiei Tehnice Militare, Bucureşti, 1996.

Informatician Maria-Costina AVĂDANEI, SUA
Lector Univ. Dr.ing. Constantin AVĂDANEI
membru AGIR, E-mail: costi_av_2003@yahoo.com