

UDK: 662.215.2(047) = 861  
COSATI: 19-04

## Teorijsko-eksperimentalna metoda određivanja parametara detonacionog talasa u punjenju sa hemisferičnim devijatorom

Dr Marinko Ugrčić, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Dr Milorad Blagojević, dipl.inž.<sup>2)</sup>

Izložen je metod eksperimentalno-numeričkog ispitivanja realnih parametara evolucije detonacionog talasa u eksplozivnom punjenju primenom metoda numeričke obrade slike. Realni oblik i stvarna brzina detonacionog talasa određeni su na bazi eksperimentalnih podataka dobijenih tehnikom kontinualnog snimanja korišćenjem ultrabrze kamere i njihovom obradom na personalnom računaru. Prikazani su rezultati eksperimentalnog istraživanja transformacije oblika i brzine detonacionog talasa u kumulativnom punjenju sa hemisferičnim pasivnim i aktivnim devijatorom.

*Ključne reči:* Detonacija, detonacioni talas, detonaciona brzina, kumulativno punjenje, devijator.

### Korišćene oznake i skraćenice

$D$	- brzina detonacije,
$D_a$	- prividna brzina detonacije,
$\overline{D}_a$	- srednja vrednost prividne brzine detonacije,
$f$	- vremenska osa na STREAK zapisu,
$h$	- rastojanje poprečnog preseka eksplozivnog punjenja od devijatora,
$i$	- redni broj tačke na profilu detonacionog talasa,
$j$	- redni broj poprečnog preseka punjenja,
$r$	- radijus loptastog devijatora,
$R$	- radijus eksplozivnog punjenja,
$t$	- relativno vreme,
$V_r$	- brzina zapisa,
$x$	- ukupna visina eksplozivnog punjenja,
$y$	- rastojanje tačke na detonacionom talasu od ose simetrije eksplozivnog punjenja,
$X$	- apscisa posmatrane tačke na detonacionom talasu,
$Y$	- ordinata posmatrane tačke na detonacionom talasu,
$\alpha$	- ugao nagiba tangente u posmatranoj tački detonacionog talasa,
$\beta$	- ugao između pravca stvarne i pravca prividne brzine detonacije u posmatranoj tački detonacionog talasa,
$\Delta$	- debljina,
$\varepsilon$	- korak,
$\rho$	- gustina,
$\tau$	- apsolutno vreme,
AD	- analogno-digitalni,
CCD	- CCD kamera (charge coupled device),
DT	- detonacioni talas,
FFA	- fenolformaldehid,
FO-3S	- flegmatizovani oktogen sa 3% svit voska,

PC	- personalni računar (personal computer),
TNT	- trotil,
TV	- televizijski,
UB	- ultrabrzi.

### Uvod

TEORIJSKO-eksperimentalno istraživanje *termohemijskih* i *termodinamičkih* parametara detonacionog talasa u oblasti fizike eksplozije ima opšti, fundamentalni naučni značaj [1-5]. Na drugoj strani, izučavanje *kinematičkih* parametara DT (brzina, oblik i promena brzine i oblika) interesantnija su s aspekta primenjenih istraživanja, naročito u sistemima eksplozivne propulzije.

Kod praktičnih sistema eksplozivne propulzije, kakvo je i kumulativno punjenje, često se nameće zahtev za optimizaciju napred navedenih parametara detonacionog talasa [6-17].

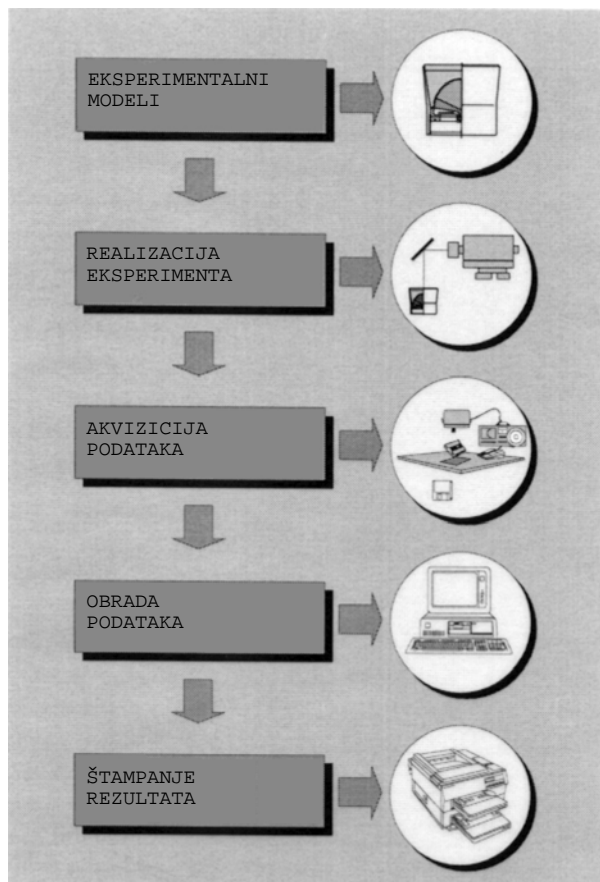
U cilju potvrde rezultata teorijskog istraživanja detonacionog procesa, tačnije kinematičkih parametara DT u eksplozivnom punjenju uopšte, razvijeno je više eksperimentalnih metoda [1,2,7-9,18,19]. Jedna od najčešćih u primeni zasnovana je na korišćenju UB kamere, a realizuje se tehnikom kontinualnog snimanja (STREAK tehnika).

Procesom akvizicije i obrade podataka sa fotozapisa, dobijenog tehnikom kontinualnog snimanja, omogućeno je dobijanje niza korisnih informacija o DT, kao što su realan oblik (profil DT u meridijanom preseku eksplozivnog punjenja) detonacionog talasa, prividna i stvarna brzina detonacije po profilu DT itd. Naravno, dobijanje krajnjih informacija o pomenutim parametrima detonacionog talasa pretpostavlja i izvođenje adekvatnog matematičkog modela i realizaciju programskog softvera za obradu ulaznih podataka.

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

<sup>2)</sup> Tehnološko-metalurški fakultet, 11000 Beograd, Karnegijeva 4

Šematski prikaz toka eksperimentalno-numeričkog metoda za određivanje realnog oblika i stvarne brzine detonacionog talasa pod nazivom REALDT, prikazan je na sl.1.



Slika 1. Šematski prikaz faza eksperimentalno-numeričkog metoda REALDT

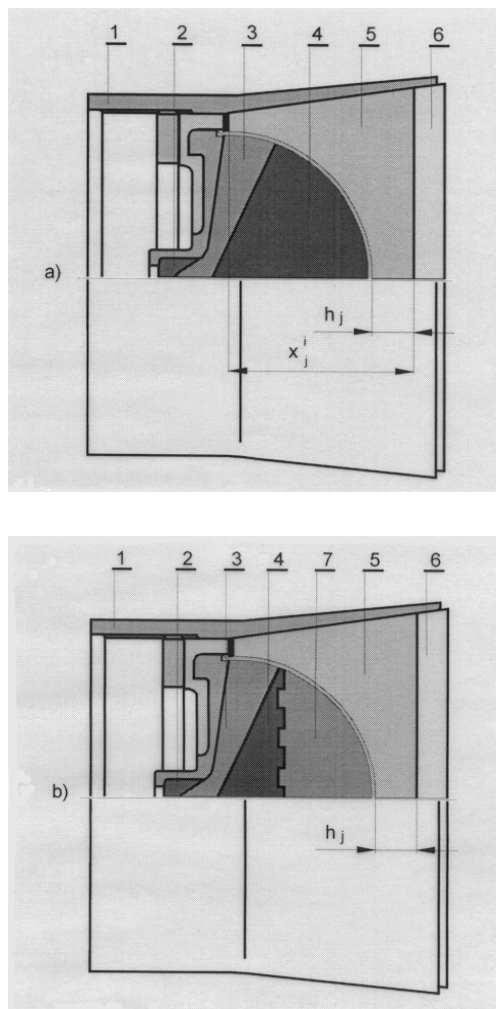
### Eksperimentalni modeli

Ugradnjom devijatora u kumulativno punjenje omogućeno je preoblikovanje DT u povoljniju formu, čime se ostvaruje veća efikasnost punjenja [6-8]. Određivanje realnih parametara detonacionog talasa u punjenju sa devijatorom izvršeno je za punjenje prečnika 116 mm sa optimiziranim varijantama hemisferičnog pasivnog i aktivnog devijatora radijusa 40 mm. Postupak optimizacije konstrukcijskih i strukturnih parametara ovih devijatora detaljno je izložen u [6]. Eksperimentalni modeli punjenja sa pomenutim tipovima devijatora su prikazani na sl.2.

Inertni delovi oba tipa devijatora su izrađeni od fenol-formaldehidne presovane plastične mase velike gustine, koja se odlikuje visokom akustičkom impedansom i mehaničkom čvrstoćom. Eksplozivno punjenje od flegmatizovanog oktogena je dobijeno postupkom presovanja. Za iniciranje eksplozivnog punjenja je korišćen samocentrirajući inicijalni sklop (pozicija 2 na sl.2) [6].

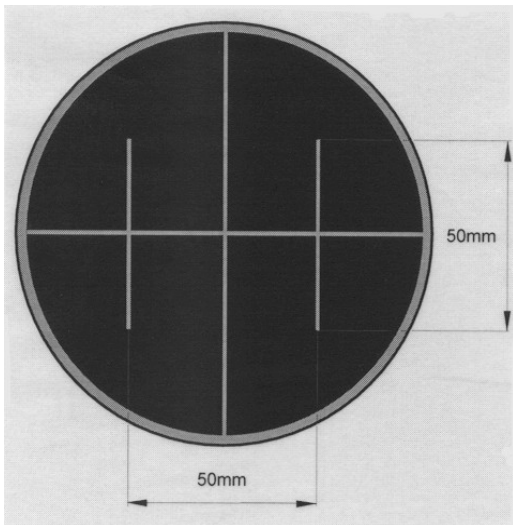
Pri snimanju tehnikom kontinualnog fotozapisa korišćene su maske od pleksiglasa sa ugraviranom krstastom končanicom, prikazanom na sl.3. Dubina i širina urezanog žleba je 0,5 mm. Pre urezivanja končanice, na površinu maske oslonjene uz slobodnu površinu eksplozivnog punjenja, naneta je crna boja [8,9].

Registrowanje izbijanja detonacionog talasa za oba tipa modela vršeno je u tri poprečna preseka i to na rastojanjima:  $h_1 = 4$  mm,  $h_2 = 24$  mm, i  $h_3 = 44$  mm iza devijatora (sl.2).



Slika 2. Eksperimentalni modeli eksplozivnog punjenja sa hemisferičnim: a) pasivnim i b) aktivnim devijatorom

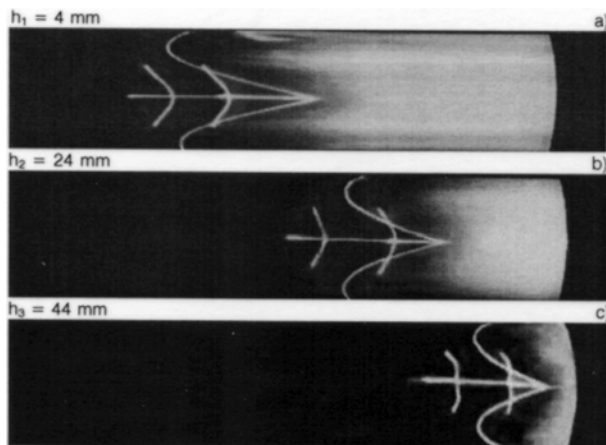
1- obloga (duraluminijum,  $\Delta=2$  mm); 2- inicijator (pentrit,  $\rho=1.72$  g/cm<sup>3</sup>); 3- detonator (FO-3S,  $\rho=1.78$  g/cm<sup>3</sup>), 4- devijator (FFA,  $\rho=1.32$  g/cm<sup>3</sup>,  $r=40$  mm), 5- eksplozivno punjenje (FO-3S,  $\rho=1.75$  g/cm<sup>3</sup>,  $R_{max}=58$  mm), 6- staklena maska, 7- eksplozivno punjenje devijatora (TNT,  $\rho=1.62$  g/cm<sup>3</sup>).



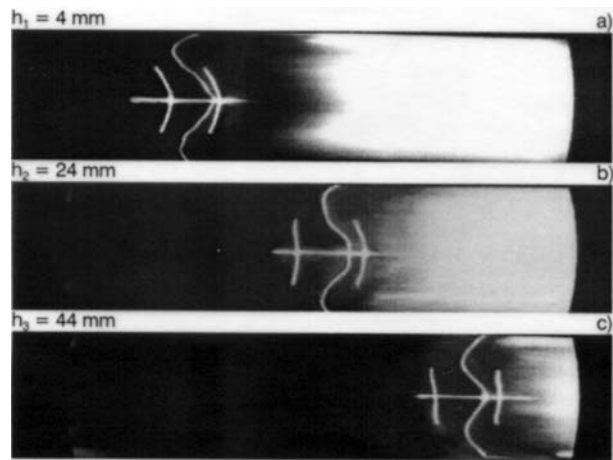
Slika 3. Staklena maska sa ugraviranim končanicom

### Eksperimentalno ispitivanje

Eksperimentalno ispitivanje je realizovano STREAK tehnikom, čiji su osnovni principi detaljno izloženi u većem broju radova [7-9,18,19]. Fotografski snimci svetlosnog traga izbijanja detonacionog talasa na slobodnoj površini eksplozivnog punjenja za modele sa pasivnim hemisferičnim i aktivnim hemisferičnim devijatorom u preseccima  $h_j$  ( $j=1,2,3$ ), prikazani su na slikama 4 i 5, respektivno.



Slika 4. Svetlosni tragovi izbijanja DT na slobodnoj površini eksplozivnog punjenja sa pasivnim hemisferičnim devijatorom

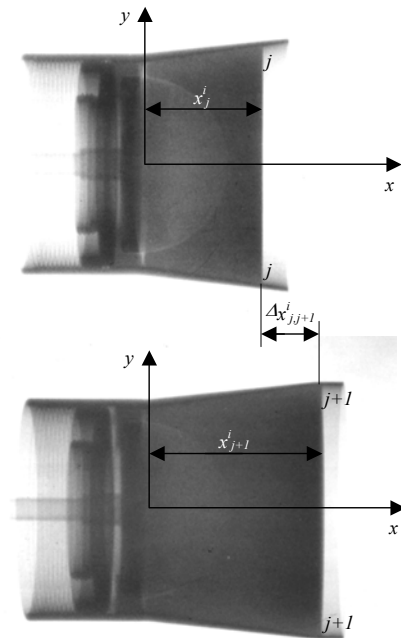


Slika 5. Svetlosni tragovi izbijanja DT na slobodnoj površini eksplozivnog punjenja sa aktivnim hemisferičnim devijatorom

Registrowanje je vršeno UB kamerom *IMACON 2000* pri brzini zapisa  $V_r = 10 \text{ mm}/\mu\text{s}$ .

Za egzaktno očitavanje debljine eksplozivnog sloja  $x_j^i$  korišćeni su rendgenski snimci eksperimentalnih modela (sl.6), urađeni za svaki model pojedinačno. Za snimanje je korišćena rendgenska oprema Scaniflash 600kV.

Pomoću opreme za akviziciju podataka sa slika 4 i 5 očitavana su rastojanja  $f_j^i$  duž vremenske ose  $f$  (osa simetrije svetlosnih tragova DT na fotozapisu na sl.7). Deo tih podataka za ordinate  $y_j^i$  ( $i = 0,1,2,3,\dots,11$ ), prikazan je u kolonama 6, 7 i 8 u tabelama 1 i 2. Relevantne vrednosti rastojanja, odnosno debljina eksplozivnog sloja  $x_j^i$  duž ordinate  $y_j^i$  merene na svakom pojedinom modelu prikazane su u kolonama 3, 4 i 5 pomenutih tabela.



Slika 6. Rendgenski snimci eksplozivnog punjenja

### Akvizicija podataka

Konverzija kontinualnih, analognih fotografskih zapisa

DT (slike 4 i 5) u digitalni zapis je izvršena primenom sistema za akviziciju podataka. Sistem za akviziciju podataka je sastavljen od radnog stola sa CCD kamerom i TV monitorom, vezanim preko AD konvertora za PC računar. Digitalizovani podaci o diskretizovanim parovima koordinata svetlosnih tragova DT ( $y_j^i, f_j^i$ ) za svaki od preseka ( $j = 1,2,3$ ) na modelima sa oba tipa devijatora ostaju zabeleženi u izlaznim datotekama.

Na isti način određene su i srednje vrednosti debljine eksplozivnog sloja  $x_j^i$  izmerene u 12 tačaka duž ordinate  $y_j^i (i = 0,1,2,3, \dots, 11)$  za svaki presek modela ( $j = 1,2,3$ ) sa obe strane ose simetrije za hemisferični pasivni i hemisferični aktivni devijator i prikazane u tabelama 1 i 2 (kolone 1, 2 i 3), respektivno.

Tabela 1. Pasivni hemisferični devijator

	$y_j^i$ (mm)		$x_j^i$ (mm)			$f_j^i$ (mm)		
	1	2	3	4	5	6	7	8
i\j	1,2,3		1	2	3	1	2	3
0	0.00	41.30	60.10	82.90	41.00	58.30	80.00	
1	5.00	41.30	60.10	82.80	37.00	56.25	79.30	
2	10.00	41.30	60.10	82.80	33.00	53.25	77.25	
3	15.00	41.35	60.10	82.70	28.25	50.25	75.40	
4	20.00	41.35	60.10	82.65	24.95	47.50	73.90	
5	25.00	41.30	60.10	82.55	22.15	45.75	72.75	
6	30.00	41.30	60.10	82.40	19.90	44.50	71.85	
7	35.00	41.30	60.10	82.20	18.90	43.75	71.25	
8	40.00	41.25	60.10	82.00	18.65	44.25	71.40	
9	45.00	41.30	60.10	81.70	19.80	45.15	72.25	
10	50.00	41.25	60.10	81.20	20.50	46.75	73.05	
11	55.00	.....	60.10	80.80	.....	48.10	74.40	

Tabela 2. Aktivni hemisferični devijator

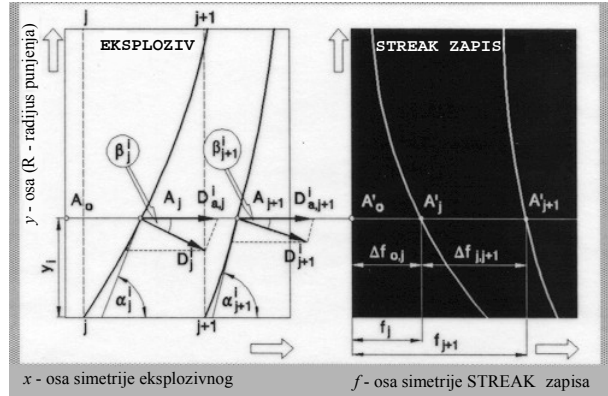
	$y_j^i$ (mm)		$x_j^i$ (mm)			$f_j^i$ (mm)		
	1	2	3	4	5	6	7	8
i\j	1,2,3		1	2	3	1	2	3
0	0.00	41.20	59.30	81.90	23.30	43.80	69.30	
1	5.00	41.20	59.30	81.90	22.90	43.65	68.90	
2	10.00	41.20	59.30	81.90	22.25	43.15	68.40	
3	15.00	41.20	59.25	81.80	21.75	42.15	67.65	
4	20.00	41.25	59.25	81.70	20.75	41.15	67.15	
5	25.00	41.30	59.25	81.60	19.00	40.50	66.65	
6	30.00	41.25	59.20	81.40	18.55	40.05	66.30	
7	35.00	41.30	59.20	81.15	18.25	39.80	66.45	
8	40.00	41.30	59.20	80.85	18.40	39.85	66.90	
9	45.00	41.35	59.20	80.55	20.15	40.40	67.55	
10	50.00	41.35	59.15	80.15	22.25	42.00	68.50	
11	55.00	.....	59.20	79.75	.....	44.00	69.85	

Akvizicija podataka je realizovana u stanici za numeričku obradu slike koju, pored pomenutog sistema za akviziciju, čini i sistem za obradu podataka.

### Obrada podataka

Digitalizovani podaci podležu daljem procesu numeričke obrade pomoću PC računara sa instalisanim softverskim paketom specijalno razvijenim za tu svrhu.

Softverski paket je zasnovan na ravanskom modelu prostiranja detonacije kojim je aproksimiran uzdužni presek realnog osnosimetričnog modela eksplozivnog punjenja. U postavljanju sistema jednačina iskorišćen je i Hajgensov princip talasnog kretanja, prema kome je vektor brzine detonacionog talasa  $D$  upravan na tangentu izvodnice u posmatranoj tački profila detonacionog talasa. U ovom radu su prikazane konačne jednačine navedenog sistema u integralnom obliku, dobijene rešavanjem osnovnih diferencijalnih jednačina ravanskog kretanja.



Slika 7. Šematski prikaz evolucije DT i njegovog svetlosnog traga na filmu

Koristeći šematski prikaz evolucije detonacionog talasa i njegovog traga na fotozapisu (sl.7), srednje vrednosti prividne brzine detonacije  $\bar{D}_{a,j,j+1}^i$  između posmatranih poprečnih preseka punjenja  $j$  i  $j+1$  za proizvoljnu ordinatu  $y_j^i (y_j^i \in [0, R])$  mogu se odrediti pomoću sledećih jednačina:

- vremenska razlika između nailaska DT na površinu  $j+1$  i površinu  $j$  (kolone 5 i 6 u tabelama 3 i 4):

$$\Delta t_{j,j+1}^i = t_{j+1}^i - t_j^i = \frac{\Delta f_{j,j+1}^i}{V_r} \quad (1)$$

- putna razlika u pravcu vektora prividne brzine detonacije (kolone 3 i 4 u tabelama 3 i 4):

$$\Delta x_{j,j+1}^i |_{y_i = \text{const}} = x_{j+1}^i - x_j^i \quad (2)$$

- srednja vrednost intenziteta vektora prividne brzine detonacije  $\bar{D}_{a,j,j+1}^i$  (kolone 7 i 8 u tabelama 3 i 4):

$$\bar{D}_{a,j,j+1}^i = \frac{\Delta x_{j,j+1}^i}{\Delta t_{j,j+1}^i} \quad (3)$$

Tabela 3. Pasivni hemisferični devijator

	$y_j^i$ (mm)		$\Delta x_{j,j+1}^i$ (mm)		$\Delta t_{j,j+1}^i$ ( $\mu s$ )		$\bar{D}_{j,j+1}^i$ (mm/ $\mu s$ )	
	1	2	3	4	5	6	7	8
i\j	1,2,3		1,2	2,3	1,2	2,3	1,2	2,3
0	0.00	1.880	2.280	1.730	2.170	10.867	10.507	
1	5.50	1.880	2.270	1.930	2.305	9.741	9.848	
2	10.00	1.880	2.270	2.030	2.400	9.261	9.458	
3	15.00	1.875	2.260	2.200	2.515	8.523	8.986	

4	20.00	1.875	2.255	2.280	2.640	8.224	8.542
5	25.00	1.880	2.245	2.360	2.690	7.966	8.346
6	30.00	1.880	2.230	2.460	2.735	7.642	8.154
7	35.00	1.880	2.210	2.490	2.750	7.550	8.036
8	40.00	1.885	2.190	2.560	2.715	7.363	8.066
9	45.00	1.880	2.160	2.560	2.710	7.344	7.970
10	50.00	1.885	2.090	2.650	2.630	7.113	7.947
11	55.00	.....	2.060	.....	2.630	.....	7.833

Tabela 4. Aktivni hemisferični devijator

	$y_j^i$ (mm)	$\Delta x_{j,j+1}^i$ (mm)	$\Delta t_{j,j+1}^i$ ( $\mu s$ )	$\bar{D}_{j,j+1}^i$ (mm/ $\mu s$ )			
	2	3	4	5	6	7	8
i\j	1,2,3	1,2	2,3	1,2	2,3	1,2	2,3
0	0.00	1.810	2.260	2.050	2.550	8.829	8.863
1	5.00	1.810	2.260	2.075	2.250	8.723	8.968
2	10.00	1.810	2.260	2.090	2.525	8.660	8.950
3	15.00	1.805	2.255	2.060	2.550	8.762	8.844
4	20.00	1.800	2.245	2.040	2.600	8.824	8.635
5	25.00	1.795	2.235	2.150	2.615	8.349	8.547
6	30.00	1.795	2.220	2.150	2.625	8.348	8.457
7	35.00	1.790	2.195	2.155	2.665	8.306	8.236
8	40.00	1.790	2.165	2.145	2.705	8.345	8.004
9	45.00	1.785	2.135	2.025	2.715	8.815	7.864
10	50.00	1.780	2.100	1.975	2.650	9.073	7.925
11	55.00	.....	2.055	.....	2.585	.....	7.950

Koordinate  $(X_i, Y_i)$  realnog profila DT u trenutku  $\tau_{j,j+1}$ , koji približno odgovara položaju DT na polovini rastojanja između posmatranih preseka  $j$  i  $j+1$ , određuju se, poznavajući vrednosti prividne brzine detonacije  $\bar{D}_{a,j,j+1}^i$ , pomoću jednačina:

- apsolutno vreme  $\tau_{j,j+1}$  u odnosu na referentni koordinatni sistem  $X, Y$  (položaj osa  $X$  i  $Y$  je identičan položaju osa  $x$  i  $y$  na sl.6):

$$\tau_{j,j+1} = \tau_k + \frac{1}{2} \Delta t_{j,j+1}^0 \quad (i=0) \quad (4)$$

Vreme kašnjenja  $\tau_k$  predstavlja vreme koje protekne od trenutka starta UB kamere (trenutak odgovara vrednosti  $X=0$ ) do pojave svetlosnog traga DT duž simetrale punjenja (tačka na osi simetrije profila DT). Drugi član u jednačini predstavlja vreme potrebno da tačka DT na osi simetrije punjenja ( $i=0$ ) iz položaja  $j$  stigne do polovine rastojanja između položaja, tj. preseka  $j$  i  $j+1$  krećući se brzinom  $\bar{D}_{a,j,j+1}^i$ .

- $Y$ - koordinata za vrednost koraka  $\varepsilon=0,05$  mm ( $N = R/\varepsilon$ ):

$$Y_i(\tau) = \varepsilon i \quad (i = 0,1,2,3,\dots, N) \quad (5)$$

- vrednosti  $X$ -koordinate:

$$X_i(\tau) = x_j^o + \left[ \frac{f_j^o - f_j^i}{V_r} + \frac{1}{2} t_{j,j+1}^o \right] \cdot \bar{D}_{a,j,j+1}^i \quad (6)$$

Aproksimiranje diskretnog skupa tačaka  $(X_i, Y_i)$  realnog profila DT glatkom krivom trećeg reda (kubni splajn) omogućava izračunavanje sledećih parametara realnog profila DT u posmatranoj tački:

- ugla nagiba tangente:

$$\alpha_{j,j+1}^i = \arctan \left( \frac{\Delta Y_i}{\Delta X_i} \right)_{\tau=\text{const}} \quad (7)$$

- ugla između vektora prividne i stvarne brzine detonacije:

$$\beta_{j,j+1}^i = 90^\circ - \alpha_{j,j+1}^i \quad (8)$$

- i stvarne vrednosti brzine detonacije:

$$D_{j,j+1}^i = \bar{D}_{a,j,j+1}^i \cos(\beta_{j,j+1}^i) \quad (9)$$

Vrednosti izračunatih parametara  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $\alpha_{j,j+1}^i$ ,  $\beta_{j,j+1}^i$ ,  $\bar{D}_{a,j,j+1}^i$ ,  $D_{j,j+1}^i$  prikazane su u tabelama 5 i 6.

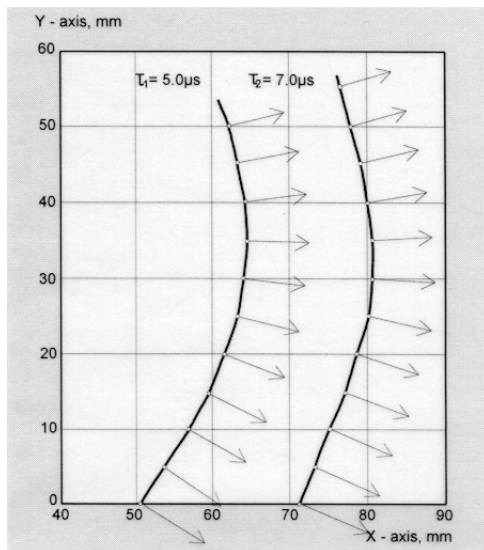
Tabela 5. Pasivni hemisferični devijator

		$\tau_1 = 5.0$ ( $\mu s$ )				$\tau_1 = 7.0$ ( $\mu s$ )				
$Y_j$	$X_i(\tau)$	$\alpha_{j,j+1}^i$	$\beta_{j,j+1}^i$	$\bar{D}_{a,j,j+1}^i$	$D_{j,j+1}^i$	$X_j(\tau)$	$\alpha_{j,j+1}^i$	$\beta_{j,j+1}^i$	$\bar{D}_{a,j,j+1}^i$	$D_{j,j+1}^i$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	50.70	64.5	25.5	10.867	9.808	71.50	71.5	18.5	10.507	9.964
5	53.62	62.1	27.9	9.741	8.609	72.80	71.7	18.3	9.848	9.350
10	56.72	64.9	25.1	9.261	8.386	75.14	71.5	18.5	9.458	8.969
15	59.54	69.0	21.0	8.523	7.957	77.08	74.1	15.9	8.986	8.642
20	61.61	73.5	16.5	8.224	7.885	78.59	78.0	12.0	8.542	8.355
25	63.21	78.0	12.0	7.966	7.821	80.09	78.5	11.5	8.346	8.178
30	64.03	84.8	5.2	7.642	7.610	80.20	89.8	0.2	8.154	8.154
35	64.52	89.0	1.0	7.550	7.549	80.51	92.3	-2.3	8.036	8.030
40	64.13	95.1	-5.1	7.363	7.344	80.18	96.2	-6.2	8.066	8.019
45	63.22	99.8	-9.8	7.344	7.227	79.23	100.3	-10.3	7.970	7.842
50	60.23	100.9	-10.9	7.113	6.985	77.90	103.2	-13.2	7.947	7.737
55	.....	.....	.....	.....	.....	76.59	103.9	-13.9	7.833	7.604

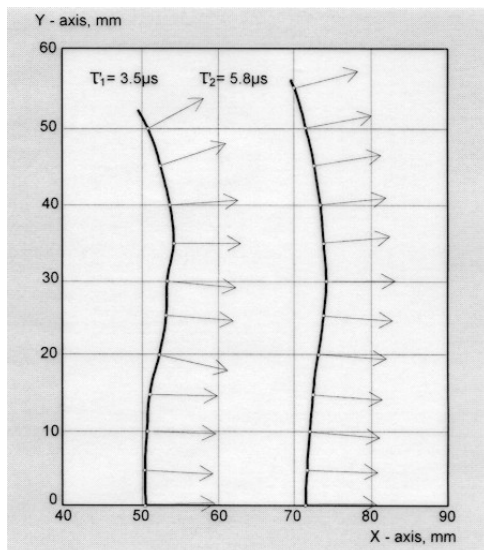
Tabela 6. Aktivni hemisferični devijator

		$\tau_1 = 3.5$ ( $\mu s$ )				$\tau_1 = 5.8$ ( $\mu s$ )				
$Y_j$	$X_i(\tau)$	$\alpha_{j,j+1}^i$	$\beta_{j,j+1}^i$	$\bar{D}_{a,j,j+1}^i$	$D_{j,j+1}^i$	$X_j(\tau)$	$\alpha_{j,j+1}^i$	$\beta_{j,j+1}^i$	$\bar{D}_{a,j,j+1}^i$	$D_{j,j+1}^i$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	50.25	90.1	-0.1	8.829	8.829	71.50	90.3	-0.3	8.863	8.863
5	50.49	87.5	2.5	8.723	8.715	71.78	88.2	1.8	8.969	8.964
10	50.99	88.2	1.8	8.660	8.656	72.20	85.4	4.6	8.950	8.921
15	51.54	88.9	1.1	8.762	8.760	72.93	86.3	3.7	8.843	8.825
20	52.49	81.2	8.8	8.824	8.720	73.47	85.9	4.1	8.635	8.613
25	53.35	86.6	3.4	8.349	8.334	73.89	86.2	3.8	8.547	8.528
30	53.72	88.4	1.6	8.348	8.345	74.11	90.4	-0.4	8.457	8.457
35	53.91	89.9	0.1	8.306	8.306	73.93	94.6	-4.6	8.236	8.209
40	53.84	93.8	-3.8	8.345	8.327	73.48	95.5	-5.5	8.004	7.967
45	53.01	108.5	-18.5	8.815	8.359	72.80	99.0	-9.0	7.864	7.767
50	51.45	119.6	-29.6	9.073	7.889	71.64	100.9	-10.9	7.925	7.782
55	.....	.....	.....	.....	.....	70.08	104.8	-14.8	7.950	7.686

Na osnovu podataka iz tabela 5 i 6 moguće je rekonstruisati dijagram realnog profila i stvarne brzine DT u eksplozivnom punjenju sa hemisferičnim pasivnim i aktivnim devijatorom (slike 8 i 9).



Slika 8. Realni profil i brzine DT u punjenju sa pasivnim hemisferičnim devijatorom (gornji polupresek eksplozivnog punjenja)



Slika 9. Realni profil i brzine DT u punjenju sa aktivnim hemisferičnim devijatorom (gornji polupresek eksplozivnog punjenja)

Na slikama 8 i 9 prikazani su dijagrami realnog profila i brzine DT po profilu koji odgovaraju gornjem polupresecu eksplozivnog punjenja za vremena  $\tau_1 = 5,0 \mu s$ ,  $\tau_2 = 7,0 \mu s$ , odnosno  $\tau'_1 = 3,5 \mu s$ ,  $\tau'_2 = 5,8 \mu s$ .

Kada je u pitanju devijator, kao sklop koji u kumulativnom punjenju ima ulogu korektora DT, kroz istraživanja čiji su rezultati objavljeni u [3,6-11], utvrđene su sledeće činjenice:

- prisustvo devijatora u osnosimetričnom eksplozivnom punjenju, u zoni iza devijatora stvara uslove za interakciju delova nastalog osnosimetričnog DT,
- interakcija delova osnosimetričnog DT uvek je prisutna dok god važi uslov  $\alpha < 90^\circ$  bilo u kojoj tački DT na gornjem polupresecu eksplozivnog punjenja (smatra se da se do tada DT nalazi u zoni uticaja devijatora ili u zoni "senke" devijatora prema [7,12]) i
- interakcija delova osnosimetričnog DT prestaje onog momenta kada se u svim tačkama na profilu DT (gornji polupresek eksplozivnog punjenja) ispuni uslov  $\alpha \geq 90^\circ$ .

Od tog trenutka DT napušta zonu uticaja devijatora i zadržava stabilan oblik.

Pored potvrde napred iznetih činjenica, na osnovu slika 8 i 9, koje su dobijene ispitivanjem devijatora hemisferičnog oblika, može se konstatovati sledeće:

- Pri interakciji delova osnosimetričnog DT u zoni iza devijatora kod punjenja sa pasivnim hemisferičnim devijatorom, nema pojave ravnog Mahovog talasa (sl. 4a,b,c);
- Pri interakciji delova osnosimetričnog DT u zoni neposredno iza devijatora kod punjenja sa aktivnim hemisferičnim devijatorom prisutna je pojava ravnog Mahovog talasa (sl. 5a,b,c);
- DT u osnosimetričnom eksplozivnom punjenju (zona iza devijatora) sa aktivnim hemisferičnim devijatorom kreće se brže u odnosu na identično punjenje sa pasivnim hemisferičnim devijatorom (sl. 8 i 9). Ova konstatacija govori o tome da je DT u punjenju sa aktivnim devijatorom, u zoni iza devijatora, okarakterisan parametrima većeg intenziteta (pritisak i brzina DT) u odnosu na pasivni hemisferični devijator;
- Vrednosti detonacione brzine su nešto veće od brzine idealne detonacije eksplozivnog punjenja od FO-3S gustine  $\rho = 1.75 \text{ g/cm}^3$ . Proračunska i eksperimentalno određena vrednost idealne brzine detonacije za eksplozivno punjenje od FO-3S ove gustine jednaka je  $D_{1.75} = 8.400 - 8.450 \text{ mm}/\mu s$  [20,21]. Ova razlika je i očekivana, jer u zoni eksplozivnog punjenja neposredno iza devijatora dolazi do interakcije delova DT, što izaziva lokalno povećanje vrednosti parametara detonacije. Na slici 8, može se videti da u slučaju eksplozivnog punjenja koje sadrži pasivni hemisferični devijator, na profilu DT, tj. na osi simetrije punjenja ( $Y=0$ ), postoji singularitet (sl.8). Nagib tangente na profilu DT u ovim tačkama nema jednoznačnu vrednost. Vrednosti ovih parametara DT, prikazanih u tabeli 5 ( $i=0$ ) i grafički na sl.8, određene su blisko singularitetu, tj. na osi simetrije punjenja u tački sa ordinatom ( $Y=0^{+e}=0,05\text{mm}$ ).

## Zaključak

Kroz obavljeno istraživanje verifikovan je eksperimentalno-numerički metod za određivanje realnih parametara evolucije DT u eksplozivnom punjenju. Izloženi metod omogućava dovoljno tačno izračunavanje realnog profila DT i stvarnih vrednosti brzine detonacije u posmatranim tačkama duž profila.

Uz to, navedeni metod daje kompletniji uvid u evoluciju DT u eksplozivnom punjenju i pruža mogućnost za potpunije sagledavanje procesa koji se zbivaju u punjenju neposredno iza devijatora i posledica su procesa tranzijencije i interakcije DT sa devijatorom, odnosno interakcije delova samog DT u ovoj zoni.

Uporedna ispitivanja evolucije DT u eksplozivnim punjenjima sa ugrađenim hemisferičnim pasivnim, odnosno aktivnim devijatorom, pokazala su da u punjenju sa aktivnim hemisferičnim devijatorom nastaje DT sa parametrima detonacije većeg intenziteta što ima za posledicu pojavu ravnog Mahovog detonacionog talasa. Dobijanje Mahovog DT u ovoj zoni punjenja je od velikog praktičnog značaja, jer se na ovaj način u punjenju ostvaruje oblik DT najbliži optimalnom obliku, posmatrano sa stanovišta zahteva za maksimalnu efikasnost kumulativnih punjenja.

## Literatura

- [1] THEVENIN, M. *Theorique Detonique*. Ecole Nationale Superieure de Techniques Avancees, Paris, 1981.
- [2] STANJUKOVIĆ, K.P., at all. *Fizika vzryva*. Second Edition, Moskva, 1974.
- [3] STAMATOVIĆ, A. *Fizika eksplozije*. Ivexy, Beograd, 1996.
- [4] CHAISE, F., VILLACHOUX, M. L'onde de detonation permanente de revolution. Analyse de l'ecoulement axial. *Revue Scientifique et Technique de la Defense*, 1990, 2<sup>e</sup> trimestre, p.41-56.
- [5] BLAGOJEVIĆ, M., UGRČIĆ, D.M., PETROVIĆ, S. Proračun parametara detonacije livenih kompozitnih eksploziva na bazi oktogena. *Chemical Industry*, Beograd, 1996, vol. 50, no.3, p.103-112.
- [6] UGRČIĆ, M. *Aktivni devijatori kao korektori detonacionog talasa u savremenim konstrukcijama kumulativnih punjenja*. magistarska teza, Mašinski fakultet, Beograd, 1991.
- [7] MURGAŠKI, S., SKENDERIJA, N. *Izveštaj o određivanju uticaja oblika detonacionog talasa na parametre kumulativog mlaza*. int. dok. VTI-KoV, TI-02, Beograd, 1979.
- [8] UGRČIĆ, M. *Ispitivanje transformacije oblika detonacionog talasa u kumulativom punjenju*. int. dok. VTI-KoV, 02-24-475, Beograd, 1985.
- [9] UGRČIĆ, M. *Istraživanje mogućnosti oblikovanja detonacionog talasa u kumulativom punjenju*. int. dok. VTI-KoV, 02-24-475, Beograd, 1990.
- [10] STAMATOVIĆ, A. *Konstruisanje projektila*. Ivexy, Beograd, 1995.
- [11] PEZZICA, G., PAZIENZA, G. Calculation of the Wave-Shaper Effects on Detonation Wave in Shaped Charge. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1987, no.12, p.125-129.
- [12] MURGAŠKI, S., SKENDERIJA, N. *Poboljšanje kumulativnog dejstva projektila na cilj*. int. dok. VTI-KoV, 02-28-195, Beograd, 1993, vol.XLIII, no.1, p.3-11.
- [13] UGRČIĆ, M. Regularnost procesa formiranja kumulativnog mlaza i optimizacija oblika detonacionog talasa. *Naučnotehnički pregled*, 1993, vol.XLIII, no.1, p.3-11.
- [14] MAKSIMOVIĆ, P. V. *Tehnologija eksplozivnih materija*. Beograd, 1972.
- [15] AZDEJKOVIĆ, M. *Proračun termohemijskih i eksplozivnih karakteristika heksotola i oktola*. 14. simpozijum JKEM, Čačak, SRJ, 27--29.maj, 1982.
- [16] ŽAKULA, B., ... *Studija generisanja ravnog detonacionog talasa u dvodelnom eksplozivnom punjenju*. XVII simpozijum o eksplozivnim materijama, Lučani, SRJ, 1988.
- [17] ANASTASIJEVIĆ, S., JANEV, J. *Dobijanje ravnog detonacionog i udarnog talasa*. XVI simpozijum o eksplozivnim materijama, Užice, SRJ, 1984.
- [18] HELD, M. *Streak Techniques as a Diagnosis Method in Detonics*. 1 st Int. Symposium on Ballistics, Orlando-FL, 1974, Proc., pp.177-210.
- [19] HELD, M. *Technique in Detonation Diagnostics*, 2. Int. Symposium on Ballistics, Orlando USA, 1979.
- [20] MADER, CH. L. *Detonation properties of condensed explosives computed using the Becker-Kistiakowsky-Wilson equation of state*. Report L.A., 2900 (1963).
- [21] LUKIĆ, M., BLAGOJEVIĆ, M. *Flegmatizacija oktogena sa 3% svit voska*, 13. simpozijum JKEM, maj, Vitez, SRJ, 1980.

Rad primljen: 6.4.2000.god.