

Uticaj prečnika i gustine punjenja na detonacione karakteristike malodimnih baruta

Mr Radenko Dimitrijević, dipl.inž.¹⁾
Dr Radun Jeremić, dipl.inž.¹⁾

Za više vrsta baruta tipa balistita, koji se razlikuju po dimenzijama pločica, ispitivana je zavisnost brzine detonacije od prečnika i gustine punjenja. Utvrđeno je da u ispitivanom rasponu brzina detonacije ne zavisi od gustine za sitnozrnaste barute, a kod krupnozrnastih baruta zavisi. Izvršena je regresiona analiza rezultata zavisnosti brzine detonacije od prečnika i uvršćena vrednost kritičnog prečnika s nultom brzinom detonacije. Vrednosti širine zone hemijskih reakcija i idealne brzine detonacije, koje su dobijene iz jednačina ove zavisnosti bitno su, drugačije od ranije utvrđenih.

Ključne reči: brzina detonacije, malodimni baruti, kritični prečnik.

Uvod

OBJAVLJENO je vrlo malo podataka o detonacionim karakteristikama baruta. Kod nas su objavljeni rezultati istraživanja s osnovnim podacima o detonacionim karakteristikama i nekim aspektima mehanizama njihove detonacije [1-3].

Proučavanje detonacije baruta važno je iz više razloga. Poznavanje njihovih detonacionih karakteristika omogućuje ekonomičnije i bezbednije skladištenje ubojnih sredstava, budući da baruti učestvuju s preko 50% u ukupnoj masi eksplozivnih materija laborisanih u ubojnim sredstvima. Detaljniji i precizniji podaci o osetljivosti na detonaciju, prenosu detonacije, rušućem dejstvu na okolinu itd. stvorili bi uslove za povećanje ukupne bezbednost tokom procesa proizvodnje.

Danas se velike količine rashodovanih baruta spaljuju, jer je njihova ponovna prerada u barute povezana s velikim teškoćama. Saznanja o procesu njihove detonacije bi omogućila relativno lakšu preradu u privredne eksplozive, ili čak njihovu direktnu primenu za razna rušenja.

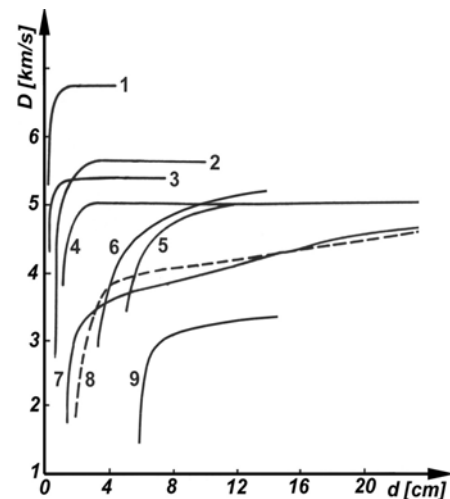
Dosadašnja saznanja ukazuju na to da je detonacija pojedinih, najviše pločastih baruta u mnogo čemu specifična. Dalje proučavanje ove problematike daće opšta saznanja o procesu detonacije koja će biti korisna i sa teorijskog stanovišta.

Zavisnost brzine detonacije eksplozivnih materija od prečnika i gustine punjenja

Uticaj prečnika punjenja na brzinu detonacije brizantnih eksploziva je detaljno proučen [4], i na osnovu tih rezultata konstatovano je:

- da postoji minimalni prečnik eksplozivnog punjenja (d_{kr}) ispod koga detonacija bez obzira na način i jačinu inicijacije nije moguća,

- da s povećanjem prečnika brzina detonacije raste i
 - da brzina detonacije raste sve dok na određenom graničnom prečniku (d_{gr}) ne dostigne maksimalnu vrednost – idealnu brzinu detonacije (D_{id}). Dalje povećanje prečnika ne dovodi do povećanja brzine detonacije.
- Zavisnost brzine detonacije od prečnika punjenja za



Slika 1. Zavisnost brzine detonacije od prečnika punjenja za neke brizantne eksplozive i barute: 1. Heksogen ($0,15 \leq \delta \leq 0,20$), $\rho_0 = 1,20$; 2. EDNA ($0,30 \leq \delta \leq 0,42$), $\rho_0 = 1,0$; 3. TEN ($0,30 \leq \delta \leq 0,42$), $\rho_0 = 0,95$; 4. TNT ($0,15 \leq \delta \leq 0,20$), $\rho_0 = 1,0$; 5. TNT ($4 \leq \delta \leq 6$), $\rho_0 = 1,0$; 6. NGB-081, $\rho_0 = 0,957$; 7. Amatol 50/50, amonijum-nitrat ($0,8 \leq \delta \leq 0,6$), $\rho_0 = 1,0$; 8. TNT – natrijum-nitrat (50/50), ($0,29 \leq \delta \leq 0,58$), $\rho_0 = 1,15$; 9. NGB-231, $\rho_0 = 0,808$. Gustina ρ je izražena u g/cm^3 , a granulacija δ u mm

nekoliko brizantnih eksploziva [4] i neke barute [2] prikazana je na sl.1.

¹⁾ Vojna akademija VJ, 11000 Beograd, Ratka Resanovića 1

Do sada je objavljeno više radova koji daju matematički opis ove zavisnosti. Za regresionu analizu najpogodnije su hiperbole Ejringa [5]:

$$D = D_{id} - \frac{D_{id} \cdot a}{d} \quad (1)$$

i Kempbela [6]:

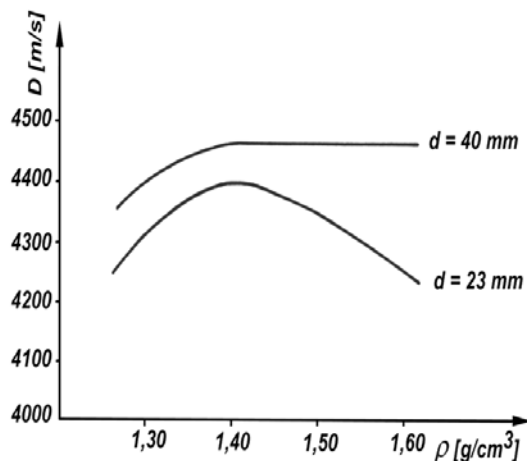
$$D = D_{id} - \frac{D_{id} \cdot a}{d - d_{kr}} \quad (2)$$

gde je a – širina zone hemijskih reakcija u detonacionom talasu.

Kada je prečnik eksplozivnog punjenja veći od graničnog prečnika, na brzinu detonacije utiču samo toplota eksplozije Q i gustina punjenja ρ . Mnogobrojni eksperimentalni rezultati pokazuju da brzina detonacije raste s povećanjem gustine. Za eksplozive tipa $C_a-H_b-O_c-N_d$, kao i njihove smeše, ta zavisnost je uglavnom linearna [4]. Ta linearnost se može opisati jednačinom:

$$D = A + B\rho \quad (3)$$

gde su A i B numerički koeficijenti.



Slika 2. Zavisnost brzine detonacije od gustine na dva prečnika punjenja (amatol 90/10)

Kod izvesnih eksplozivnih materija, brzina detonacije ne raste monotono u celom dijapazonu mogućih gustina punjenja. Porastom gustine pogoršavaju se uslovi za odvijanje hemijskih reakcija, pa funkcija $D=f(\rho)$ dobija drugačiji karakter. Za eksplozivne smeše na bazi amonijum-nitrata i slične kompozicije u početnom delu krive brzina detonacije raste sa gustinom i za neku vrednost gustine dostiže maksimum. S daljim porastom gustine dolazi do prekida detonacionog procesa, ili brzina naglo pada da bi opet kod neke gustine ρ_{kr} došlo do prekida. Na sl.2 je prikazana slična zavisnost za eksploziv na bazi amonijum-nitrata za dva prečnika punjenja [4]. Ovaj oblik zavisnosti važi samo za punjenja dovoljno malog prečnika. Za ostale eksplozivne materije, u području gustina koje se mogu tehnološki ostvariti, zavisnost je uglavnom linearna.

Eksperimentalni rezultati

Ispitivano je pet pločastih baruta balistitnog tipa različitih dimenzija. Procentualni odnos njihovih komponenta i dimenzije su prikazani u tabelama 1 i 2.

Za merenje brzine detonacije, formirana su tipska cilindrična punjenja s oblogom od papira dužine 600 mm.

Za aktiviranje je korišćen podsticajni metak od plastifikovanog pentrita mase 75 g. Ovako velika masa podsticajnog metka obezbeđuje sigurnu inicijaciju i presabijen režim detonacije na početnom delu punjenja. Posle toga dela presabijena detonacija prelazi u stacionarnu. Na ovaj način je obezbeđena sigurna stabilizacija detonacionog talasa do mernog mesta. Merenje je vršeno na dužini od 200 mm korišćenjem instrumenta *Explomet-Fo* sa optičkim vlaknima.

Dobijeni su rezultati određivanja zavisnosti brzine detonacije od prečnika punjenja dati u tabeli 3. U tabeli je, kao punovažan rezultat, prikazana vrednost kritičnog prečnika i njemu odgovarajuće brzine detonacije koja je jednaka nuli.

Tabela 1. Opšti hemijski sastav ispitivanih baruta

Vrsta baruta	NC [%] (%N)	NGI (%)	CI (%)	Vazelin (%)	DEF (%)
NGB-061	57,5 12,75	40,5	1,7	0,3	
NGB-081	57,5 12,75	40,5	1,7	0,3	
NGB-213	52,2 13,25	43	1,5	0,3	3,0
NGB-261	57,5 12,75	40,5	1,7	0,3	
NGB-231	57,5 12,75	40,5	1,7	0,3	

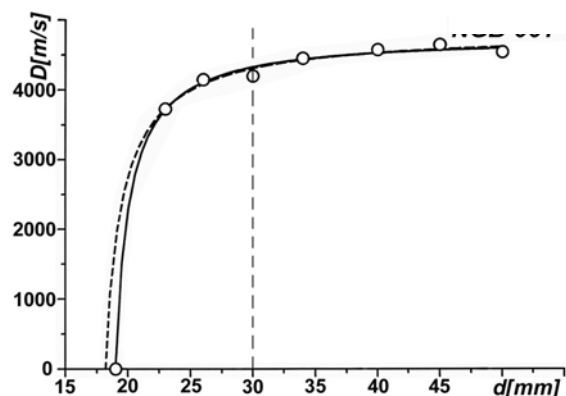
Tabela 2. Dimenzije ispitivanih baruta

Vrsta baruta	Oblik	Debljina W_a [mm]	Širina a [mm]	Dužina L [mm]
NGB-061	Pločica	0,20	1,5	1,5
NGB-081	Pločica	0,55	3,0	3,0
NGB-213	Pločica	0,58	3,0	3,0
NGB-261	Pločica	0,52	5,0	5,0
NGB-231	Pločica	0,90	10,0	10,0

Rezultati određivanja zavisnosti brzine detonacije od gustine punjenja su dati u tabeli 4.

Analiza i diskusija rezultata

Izvršena je nelinearna regresiona analiza eksperimentalnih podataka po hiperboli (2). Dobijeni su grafici zavisnosti brzine detonacije D od prečnika punjenja d i prikazani na slikama 3-7. Punom linijom je prikazana ova zavisnost uključujući vrednosti $D=0$ na $d=d_{kr}$, a isprekidanom linijom bez ove tačke. Vertikalnom



Slika 3. Zavisnost brzine detonacije D od prečnika punjenja d za NGB-061

isprekidanom linijom je obeležen prečnik punjenja na kome je vršeno ispitivanje zavisnosti brzine detonacije D od

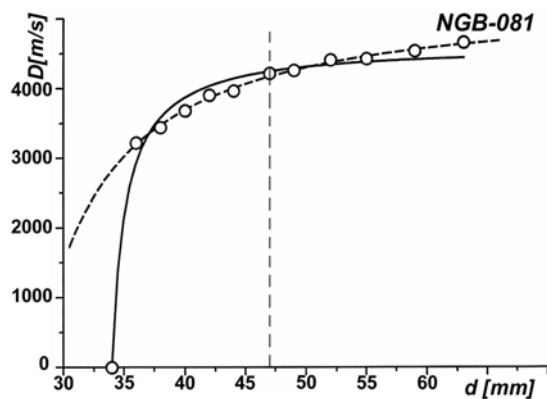
Tabela 3. Rezultati određivanja zavisnosti brzine detonacije D od prečnika punjenja d

NGB-061	ρ [g/cm ³]	0,911	0,903	0,911	0,936	0,932	0,905	0,911	0,911	0,879			
	d [mm]	19	23	23	26	30	34	40	45	50			
	D [m/s]	0	3731	3731	4149	4201	4454	4576	4651	4545			
NGB-081	ρ [g/cm ³]	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,909	0,953	0,952	0,963	0,950
	d [mm]	34	36	40	47	38	52	59	44	49	55	63	42
	D [m/s]	0	3220	3683	4219	3442	4415	4545	3968	4264	4434	4672	3906
NGB-213	ρ [g/cm ³]	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,948	0,957	0,957				
	d [mm]	35	36	39	42	45	48	50	55				
	D [m/s]	0	3021	3466	3418	4048	3898	4201	4376				
NGB-261	ρ [g/cm ³]	0,845	0,845	0,845	0,845	0,845	0,845	0,845	0,845				
	d [mm]	42	45	45	48	48	51	54	57				
	D [m/s]	0	2721	2906	3034	2475	3194	3656	3759				
NGB-231	ρ [g/cm ³]	0,825	0,810	0,825	0,836	0,794	0,808						
	d [mm]	63	64	69	69	71	75						
	D [m/s]	0	1550	2395	2873	2919	3179						

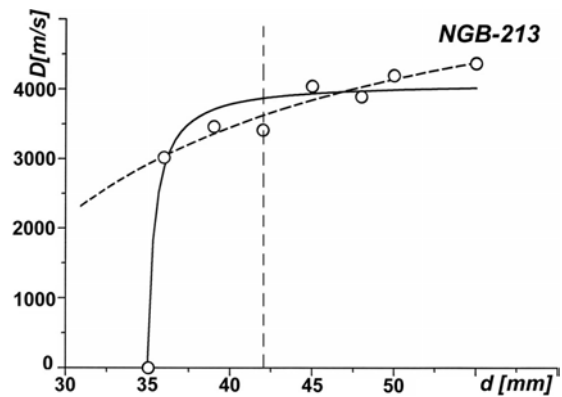
Tabela 4. Rezultati određivanja zavisnosti brzine detonacije D od gustine punjenja ρ

NGB-061 mereno na $d=30$ mm	ρ [g/cm ³]	0,840	0,850	0,863	0,875	0,888	0,900	0,913	0,913	0,927	0,932	0,940	0,954
	D [m/s]	4301	4237	4264	4338	4264	4415	4081	4366	4474	4201	4264	4291
NGB-081 mereno na $d=42$ mm	ρ [g/cm ³]	0,900	0,900	0,913	0,925	0,938	0,950	0,963	0,975	0,988	0,933	1,000	1,025
	D [m/s]	0	2192	3868	3875	3696	3906	3802	3731	3883	3891	3898	3773
NGB-213 mereno na $d=42$ mm	ρ [g/cm ³]	0,900	0,900	0,900	0,925	0,950	0,957	0,964	0,975	1,000	1,008		
	D [m/s]	3590	3367	3676	3636	3603	3418	3367	3683	3472	3539		
NGB-261 mereno na $d=51$ mm	ρ [g/cm ³]	0,760	0,800	0,800	0,850	0,900	0,900	0,904					
	D [m/s]	2331	2849	3442	3546	3424	3262	3338					
NGB-231 mereno na $d=64$ mm	ρ [g/cm ³]	0,790	0,800	0,800	0,808	0,813	0,825	0,850	0,875	0,880	0,900		
	D [m/s]	1554	1751	1849	1531	1310	2244	1626	931	1192	754		

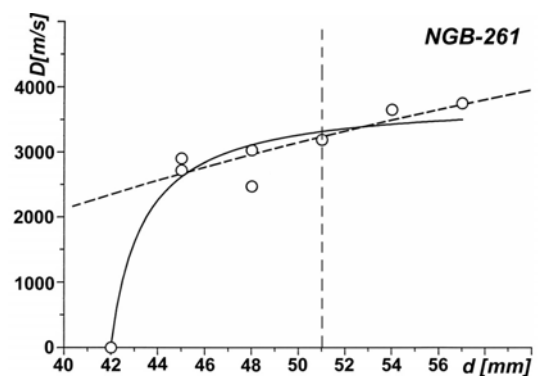
gustine punjenja ρ .

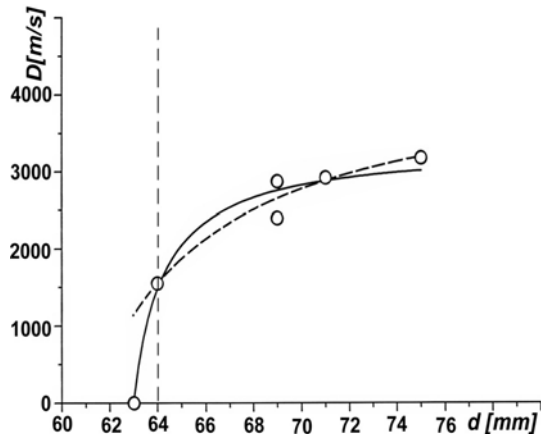


Slika 4. Zavisnost brzine detonacije D od prečnika punjenja d za NGB-081



Slika 5. Zavisnost brzine detonacije D od prečnika punjenja d za NGB-213



Slika 6. Zavisnost brzine detonacije D od prečnika punjenja d za NGB-261Slika 7. Zavisnost brzine detonacije D od prečnika punjenja d za NGB-231

U tabelama 5 i 6 su dati detonacioni parametri – širine zone hemijskih reakcija a , kritični prečnici d_{kr} i idealne brzine detonacije D_{id} , izračunati iz dobijenih jednačina zavisnosti, a prema opštoj jednačini (2).

Tabela 5. Izračunati detonacioni parametri ispitivanih baruta sa vrednošću $D=0$ za $d=d_{kr}$

Vrsta baruta	a (mm)	d_{kr} (mm)	D_{id} (m/s)
NGB-061	1,1	17,9	4771
NGB-081	1,2	32,8	4631
NGB-213	0,4	34,6	4113
NGB-261	1,4	40,6	3830
NGB-231	1,3	61,8	3334

Tabela 6. Izračunati detonacioni parametri ispitivanih baruta bez vrednosti $D=0$ za $d=d_{kr}$

Vrsta baruta	a (mm)	d_{kr} (mm)	D_{id} (m/s)
NGB-061	1,4	16,7	4825
NGB-081	5,5	22,4	5386
NGB-213	15,1	7,2	6408
NGB-261	167,5	-147,0	21016
NGB-231	5,0	56,3	4350

U regresionu analizu je uvršćena i eksperimentalna vrednost d_{kr} sa $D=0$. Ovaj rezultat je punovažan sa ostalim rezultatima. Uvršćivanjem ove vrednosti povećava se zakrivljenost grafika. Nelinearna regresiona analiza ovakvog grafika po jednačini (2) tada je preciznija. Kao što se moglo i očekivati, izračunate vrednosti d_{kr} su približne eksperimentalnim vrednostima. Takođe su i izračunate vrednosti D_{id} manje i približne vrednostima koje se mogu očekivati s tim gustinama punjenja. Sve vrednosti širine zone hemijskih reakcija a su približno iste i znatno manje od vrednosti dobijenih u ranijim radovima [1]. To je takođe posledica uvođenja $D=0$ za d_{kr} , jer se tako povećava zakrivljenost grafika, odnosno smanjuje se proizvod $D_{id} \cdot a$ u jednačini (2). Izuzetak je barut NGB-213 koji ima dosta nižu vrednost. Kako je ovaj barut istih dimenzija kao NGB-081, ova razlika može biti posledica drugačijeg hemijskog sastava.

S druge strane, regresiona analiza eksperimentalnih podataka bez vrednosti $D=0$ za $d=d_{kr}$ daje potpuno drugačije vrednosti ovih parametara. Dobijeni su veoma malo slažu s eksperimentalnim. Neke vrednosti, kao što su za NGB-261, su potpuno nerealne. Ovim se opravdava uvršćivanje vrednosti $D=0$ za $d=d_{kr}$.

Linearnom regresionom analizom (jednačina $D=A+B\rho$) eksperimentalnih podataka za barute NGB-061, NGB-081 i NGB-213 dobijeni su grafici prikazani na slikama 8, 9 i 10. Regresionom analizom po polinomu drugog stepena (jednačina $D=A+B\rho+B_1\rho^2$) za barute NGB-261 i NGB-231 dobijeni su grafici prikazani na slikama 11 i 12.

Iz jednačina zavisnosti dobijeni su koeficijenti A , B i B_1 . Njihove vrednosti su prikazane u tabeli 7.

Na osnovu rezultata regresione analize (slike 8, 9 i 10 i tabela 7) kod sitnozrnastih baruta (NGB-061, 081 i 213), praktično ne postoji zavisnost brzine detonacije D od gustine punjenja ρ u ispitivanom rasponu gustina. Nagib prava dobijenih regresionom analizom je praktično zanemarljiv. Izuzetak je kod baruta NGB-081, gde se kod minimalnih gustina primećuje nagli porast brzine i čak gašenje detonacije. Radi se o donjoj granici kritičnih gustina koje se teško održavaju jer dolazi do delimičnog sleganja usled manipulacije. Kod brizantnih eksploziva je poznato da je detonacija izrazito nestabilna u graničnim uslovima, što verovatno važi i za ovaj slučaj.

Kod krupnozrnastih baruta NGB-261 i NGB-231 (slike 11 i 12, tabela 7) postoji nelinearna zavisnost brzine detonacije D od gustine punjenja ρ . Regresiona analiza po polinomu drugog stepena je dala određene koeficijente, ali oni nisu od većeg značaja. Tačno matematičko opisivanje i teoretsko objašnjenje ove zavisnosti zahteva daleko preciznija i brojnija merenja.

Tabela 7. Rezultati regresione analize zavisnosti brzine detonacije D od gustine punjenja ρ

Vrsta baruta	A	B	B_1	
--------------	-----	-----	-------	--

NGB-061	4202	99,4	–	
NGB-081	3865	–34,1	–	Bez prva dva rezultata
NGB-213	3939	– 426	–	
NGB-261	–89598	217001	–126354	
NGB-231	–112014	277491	–169222	

Primitno je preveliko rasturanje rezultata kod baruta NGB-231. Na sl.7 se vidi da je prečnik punjenja na kojem je vršeno ispitivanje veoma blizak kritičnom prečniku. U tim oblastima prečnika moguće su nestacionarnosti u procesu detonacije pa je veoma teško dobiti zadovoljavajuću tačnost. Verovatno se i ovde radi o sličnom uzroku.

Sva merenja su vršena u rasponu gustina $\Delta\rho = 0,110-0,144$ g/cm³. Ovoliki raspon nasipnih gustina se i mogao ostvariti ručnim stresanjem formiranih punjenja. Može se reći da se u tim rasponima gustina i nisu mogle očekivati značajnije promene brzine detonacije. Ipak, postignute gustine su one gustine koje realno postoje u barutnim punjenjima ubojnih sredstava, pa je praktična primenljivost rezultata nesumnjiva. Radi potpunijeg izučavanja ove zavisnosti, nužno je proširiti merenja na veće gustine.

Zaključak

Rezultati merenja i analiza pokazuju da presudan uticaj na detonacione karakteristike malodimnih baruta imaju dimenzije barutnih pločica. To se odnosi prvenstveno na kritične prečnike i idealne brzine detonacije. Hemijski sastav ne utiče bitno na ove veličine, ali utiče na veličinu širine zone hemijskih reakcija.

Uvrščivanje vrednosti kritičnog prečnika d_{kr} i njemu

odgovarajuće brzine detonacije $D=0$, kao punovažnih s ostalim rezultatima merenja zavisnosti $D=f(d)$, doprinosi pouzdanosti nelinearne regresione analize. Za još kvalitetniju analizu su potrebna merenja na prečnicima punjenja u okolini d_{kr} . Zbog nestacionarnosti procesa detonacije u ovoj oblasti, kao i minimalnih promena prečnika punjenja, ovakva merenja je vrlo teško sprovesti.

Kod sitnozrnastih baruta nema bitne promene brzine detonacije D sa promenom gustine ρ . To se prvenstveno odnosi na gustine koje realno postoje u konkretnim bojevim sredstvima. Eksperimentalni rezultati potvrđuju ovaj zaključak. Kod krupnozrnastih baruta zavisnost $D=f(\rho)$ nije linearna. Zavisnost brzine detonacije od nasipne gustine je utoliko izraženija ukoliko je prečnik punjenja na kome se vrše merenja bliži kritičnom prečniku. Istovremeno, zbog nestacionarnosti detonacije u blizini kritičnog prečnika, dolazi do povećanog rasturanja rezultata merenja.

Literatura

- [1] DIMITRIJEVIĆ,R., JEREMIĆ,R. Ispitivanje nekih detonacionih osobina malodimnih baruta, *Vojnotehnički glasnik*, 1997, no.1, pp.37-47.
- [2] DIMITRIJEVIĆ,R., JEREMIĆ,R. *Uticaj prečnika punjenja na brzinu detonacije malodimnih baruta*. XX simpozijum JKEM – a, Beograd, 1997.
- [3] DIMITRIJEVIĆ,R., JEREMIĆ,R. Ispitivanje brzine detonacije malodimnih baruta. *Vojnotehnički glasnik*, 1998, no.1, pp.15-22.
- [4] STANJUKOVIĆ,K.P. (urednik). *Fizika vzriva*. Nauka, Moskva, 1975.
- [5] EYRING,H., POWELL,R.E., DUFFEY,G.H., PARLIN,R.B. The Stability of Detonation, *Chem. Rev.*, 1949, vol.45, pp.69.74.
- [6] CAMPBELL,A.W., ENGELKE,R. *The Diameter Effect in High Density Heterogeneous Explosives*. Proc. Sixth Symposium (International) of Detonation, ACR-221, 1976, 642-652.

Rad primljen: 24.5.2002.god.

