

MODELOVANJE DVOFAZNOG STRUJANJA U CEVIMA ORUĐA SA KOMBINOVANIM PUNJENJEM

Hristov P. *Nebojša*, Univerzitet odbrane, Vojna akademija,
Odeljenje za logistiku, Beograd,
Savić R. *Slobodan*, Univerzitet u Kragujevcu,
Mašinski fakultet, Kragujevac

OBLAST: mašinstvo (mehanika fluida)

Sažetak:

U članku se opisuju procesi unutar cevi oruđa sa kombinovanim punjenjem u toku opaljenja sa ciljem da se poboljša vatrena moć postojećih i projektovanje novih oruđa. Simulacije procesa opaljenja pružaju mogućnost optimizacije barutnog punjenja. Analizom dobijenih rezultata bira se najbolja kombinacija ulazno-izlaznih parametara radi postizanja što veće početne brzine projektila, a da maksimalni pritisci barutnih gasova budu što niži unutar cevil.

Key words: *kombinovana punjenja, dvofazno strujanje, simulacija.*

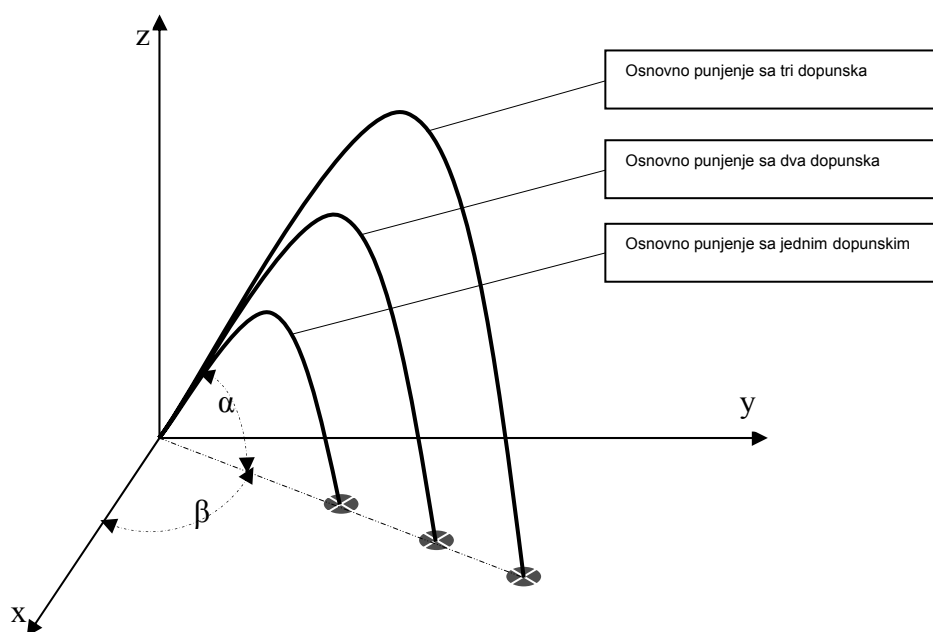
Specifičnosti oruža koja koriste kombinovana punjenja

Barutno punjenje, kao pogonski element projektila, predstavlja tačno određenu količinu baruta, propisanog hemijskog sastava, oblika i dimenzija. Po svom sastavu može biti stalno i kombinovano (promenljivo). Promenljivo barutno punjenje koristi se kod polusjedinjenog i dvodelnog metka. Ono je podeljeno na više celina iste ili različite mase, pa se može menjati u zavisnosti od daljine cilja i režima opterećenja cevi. Mali dometi ostvaruju se malim početnim brzinama, tj. malom masom baruta. Da bi ova mala masa brzo sagorela, barutna zrna moraju imati malu debljinu, tj. moraju biti sitna. Ova vrsta baruta ne može se koristiti za velike domete, jer bi sa povećanjem mase barutnog punjenja došlo do prekoračenja dozvoljenog maksimalnog pritiska. Ukoliko oruđe radi pod tim režimom usled velikih opterećenja dolazi do promene fizičko-hemijskih osobina materijala cevi, odnosno do raznih oblika deformacija (prslina, pukotina, naduvavanja cevi, proširenja kalibra i td.), što umanjuje taktičko-tehničke karakteristike i radni vek sredstva. Zbog toga se koriste, u kombinaciji sa tankim

barutom, i baruti većih debljina, koji obezbeđuju sagorevanje veće energije, a samim tim i veće početne brzine. Ove dve vrste baruta su obično istog ili sličnog hemijskog sastava i osobina, a razlikuju se, uglavnom, samo po dimenzijama. Kombinacijom baruta dobijaju se tražene taktičko-tehničke karakteristike i produžava eksploatacioni vek oruđa.

Kombinovana barutna punjenja sastoje se od više segmenata, koja su među sobom nezavisna. Osnovno punjenje sastoji se od određene količine sitnog baruta, a sva ostala punjenja su dopunska i uglavnom su od krupnijeg baruta. Postoji više dopunskih punjenja i ona ne moraju biti istih masa.

Haubice i minobacači su artljerijska sredstva koja koriste municiju sa kombinovanim barutnim punjenjem. Osnovne karakteristike ovih sredstava su da su namenjena za uništavanje zaklonjenih ciljeva koji se nalaze iza prepreka. Gađaju gornjom grupom uglova od 45° do 85° sa relativno malim početnim brzinama od 400 m/s do 600 m/s. Manevar vatre ostvaruje se promenom ugla elevacije ili promenom barutnog punjenja. Promenom barutnog punjenja omogućava se da se sa istim uglom elevacije dobiju različiti dometi, a samim tim i mogućnost da se gađa preko različitih prepreka (sl. 1).



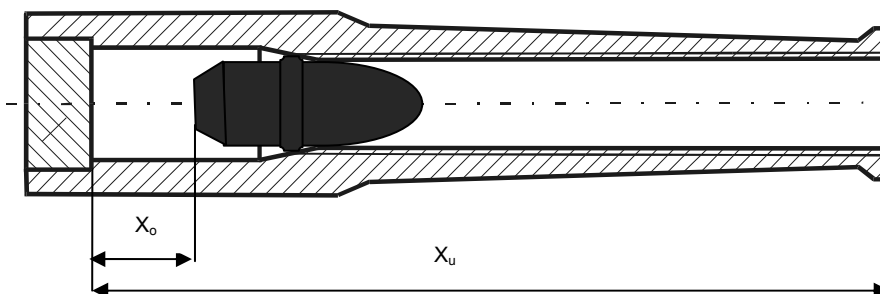
Slika 1 – Gađanje preko različitih prepreka
 Figure 1 – Firing over different obstacles

Istovremeno sa manevrom vatre produžava se vek trajanja cevi jer se ne gađa uvek sa najvećim barutnim punjenjem, tj. ne postižu se uvek maksimalni pritisci.

Matematički model dvofaznog strujanja za oruđa sa kombinovanim punjenjem

Pri izradi matematičkog modela dvofaznog strujanja za oruđa sa kombinovanim punjenjem, posmatra se proizvoljan trenutak u toku sagorevanja. Iza pokretnog projektila dolazi do strujanja dve komponente: čvrste – nesagorela barutna zrna i gasovite – smeša barutnih gasova. U literaturi se ove dve komponente nazivaju faze, a sam proces dvofazno strujanje. Može se napomenuti da se čvrsta faza sastoji od dve komponente – sitnija i krupnija barutna zrna. U prvom periodu sagorevanja sagorevaju obe komponente (krupnija i sitnija barutna zrna), a karakteristike za obe komponente zamenjuju se karakteristikom smeše. Nakon završetka sagorevanja sitnijeg baruta nastavlja se sagorevanje krupnijeg, tako da samo on predstavlja čvrstu fazu u tom periodu, a samim tim i njegove karakteristike predstavljaju karakteristike čvrste faze.

Za izvođenje jednačina strujanja u procesu opaljenja posmatra se cev oruđa, koja je zatvorena zatvaračem sa zadnje strane. Na odstojanju X_0 od dna cevi nalazi se projektil mase m (sl. 2).



Slika 2 – Cev oruđa sa projektilom
Figure 2 – Weapon barrel with a projectile

Da se proces opaljenja reši u matematičkom smislu, odnosno da se postavi sistem jednačina, usvajaju se sledeće pretpostavke:

1. U zapremini elementarne dužine dx i jediničnog poprečnog preseka $S=1$ važi geometrijski zakon sagorevanja.
2. Pre opaljenja smeša barutnih zrna je ravnomerno raspoređena duž barutne komore.

3. Pre pokretanja projektila smeša barutnih gasova i barutnih zrna je nepokrena i ravnomerno raspoređena duž barutne komore.
4. U momentu pokretanja projektila, pritisak u svim tačkama barutne komore je isti (p_0).
5. Zanimaruje se kretanje cevi, već se samo posmatra relativno kretanje projektila u odnosu na cev.
6. Smatra se da je cev konstantnog poprečnog preseka po celoj dužini, tj. zanemaruje se postojanje prelaznog konusa.
7. Zanimaruje se otpor vazduha u cevi ispred projektila.
8. Zanimaruje se gubitak energije usled zagrevanja cevi.
9. Barutna zrna i gasovi se kreću različitim brzinama.
10. Koordinatni sistem se vezuje za dno cevi.
11. Početak rešavanja problema je moment pokretanja projektila, a početni uslovi se određuju na osnovu rešenja klasične teorije.

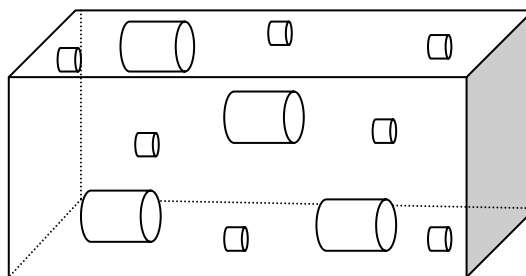
Osnovne jednačine strujanja

Za izvođenje jednačina posmatra se kontrolna zapremina (sl. 3), koja je dovoljno velika da primi mnogo barutnih zrna, ali je mala u poređenju sa ukupnim dimanzijama struje [1]. Barutna zrna zauzimaju zapreminu W_b , a barutni gasovi W_g , tako da je:

$$W = W_b + W_g \quad (1)$$

$$W_b = W_{b1} + W_{b2} \quad (2)$$

gde su: W_{b1} – zapremina krupnijeg baruta, a W_{b2} – zapremina sitnijeg baruta.



Slika 3 – Kontrolna zapremina
Figure 3 – Control volume

Na osnovu prethodnih pretpostavki i zakona o održanju mase, količine kretanja i energije i primenom transformacije Gaus-Ostrogratskog u toku izvođenja može se doći nekoliko jednačina. To su:

– jednačina kontinuiteta za barutne gasove:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon\rho u) = (1-\varepsilon)\rho_b^2 \frac{u_z S_z}{m_z} \quad (3)$$

– jednačina kontinuiteta za barutna zrna:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}[u_b - (1-c)] = \rho_b u_b (1-\varepsilon) \frac{u_z S_z}{m_z} \quad (4)$$

– jednačina kretanja za barutne gasove:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon\rho u^2) + \varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} = \rho_b^2 u_b (1-\varepsilon) \frac{u_z S_z}{m_z} - f \quad (5)$$

– jednačina kretanja za barutna zrna:

$$\rho_b \frac{\partial}{\partial t}[u_b(1-\varepsilon)] + \rho_b \frac{\partial}{\partial x}[u_b^2(1-\varepsilon)] + (1-\varepsilon) \frac{\partial p}{\partial x} + \rho_b^2 u_b (1-\varepsilon) \frac{u_z S_z}{m_z} = f \quad (6)$$

– jednačina energije za barutne gasove:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\varepsilon \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon \rho u \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) \right] + p \frac{\partial}{\partial t} + \rho_b (1-\varepsilon) \frac{u_z S_z}{m_z} = \\ & = (1-\varepsilon) \rho_b^2 \frac{u_z S_z}{m_z} \left(e_b + \frac{p}{\rho_b} + \frac{u_b^2}{2} \right) - f u_b \end{aligned} \quad (7)$$

U prvom periodu, dok traje sagorevanje, važe navedene jednačine, gde je $\varepsilon < 1$ i $f > 0$, a za drugi period, gde je $\varepsilon = 1$ i $f = 0$, samo preostale jednačine. Treba napomenuti da, u matematičkom smislu, kraj sagorevanja ne mora da bude u istom momentu u svim tačkama cevi iza projektila.

Dopunske jednačine sistema

U matematički model dvofaznog strujanja [2] uvedene su dopunske jednačine po modelu Opokova koji opisuju smešu baruta. To su :

– ukupna masa baruta:

$$m_b = m_b' + m_b'' \quad (8)$$

gde se veličine sa oznakom ' odnose na sitniji, a sa oznakom '' na krupniji barut.

– odnosi masa:

$$i' = \frac{m_b'}{m_b} \quad i'' = \frac{m_b''}{m_b} \quad (9)$$

– gustina punjenja:

$$\Delta = \frac{m_b}{W_0} \quad (10)$$

– zapreminska masa smeše:

$$\rho_b = \frac{\rho_b' + \rho_b''}{i' \rho_b' + i'' \rho_b''} \quad (11)$$

– kovolumen barutnih gasova:

$$\alpha = i' \alpha' + i'' \alpha'' \quad (12)$$

– energija baruta:

$$e_b = i' e_b' + i'' e_b'' \quad (13)$$

– ukupni impulsi:

$$I_k = \frac{r_0'}{u_{zo}'} \quad I_k'' = \frac{r_0''}{u_{zo}''} \quad I_k = \frac{I_k'}{I_k''} \quad (14)$$

– koeficijenti oblika:

$$k_1 = \frac{i' k_1'}{I_k} + i'' k_1'' \quad \lambda_1 = \frac{1}{k_1} \left(\frac{i' k_1' \lambda_1'}{I_k^2} + i'' k_1'' \lambda_1'' \right) \quad (15)$$

Ako sa r označimo dubinu prodiranja plamena u barutno zrno u jednom smeru, onda je:

$$\frac{\partial r}{\partial t} = u_z \quad (16)$$

Pomoću puta plamena r_z definiše se takozvana relativna sagorela debljina barutnog zrna (za deblje barutno zrno):

$$y'' = \frac{r''}{r_0''} \quad (17)$$

– definiše se i vrednost:

$$y_{2k} = \frac{r_0'}{r_0''} \quad (18)$$

kada sagorevaju i deblji i tanji barut onda je $y < y_{2k}$, a kad sagoreva samo krupniji barut $y_{2k} < y < 1$.

Ako sa y_0'' označimo debljinu koja je sagorela u prethodnom periodu (pre početka kretanja projektila), a sa y trenutnu sagorelu debljinu, uvodi se nova promenljiva:

$$x = y - y_0'' \quad (19)$$

koja se kreće u granicama od 0 do $x_k = 1 - y_0''$.

U prethodnom periodu, kada je poznat pritisak forsiranja p_0 , uz uslove $X=V=0$, mogu da se odrede sledeće vrednosti:

$$y_0'' = \frac{\sigma_{0-1}}{2\lambda_1} \quad \psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_b}}{\frac{f_b}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\rho_b}} \quad \sigma_0 = \sqrt{1 + \frac{\lambda_1 \psi_0}{k_1}}$$

Relativna sagorela masa baruta:

Za $y < y_{2k}$ važi sledeća relacija:

$$\psi = \psi_0 + k_1 x + k_1 \lambda_1 x^2 \quad (20)$$

a za $y_{2k} \leq y \leq 1$:

$$\psi = \psi_{02} + i'' k_1'' x + i'' \kappa_1'' \lambda_1'' x^2 \quad (21)$$

gde su:

$$k_1 = \kappa_1 \sigma_0 \quad \psi_{02} = i' + i'' \psi_0''$$

$$\sigma_0 = 1 + 2\lambda_1 y_0'' \quad \psi_0'' = \kappa_1'' y_0'' (1 + \lambda_1'' y_0'')$$

Relativna sagorevajuća površna barutnog zrna:

Za $y < y_{2k}$ važi sledeća relacija:

$$\sigma = 1 + 2\lambda_1 x \quad (22)$$

a za $y_{2k} < y < 1$:

$$\sigma = 1 + 2\lambda_1'' x \quad (23)$$

Nesagorela masa barutnog zrna (m_z)

$$m_z = m_{z0} (1 - \psi) \quad (24)$$

Površina nesagorelog barutnog zrna (S_z)

$$S_z = \sigma S_{z0} \quad (25)$$

Početni i granični uslovi

Proces opaljenja posmatra se od momenta pokretanja projektila, a početni uslovi se određuju na osnovu klasične teorije, na osnovu izraza za pritisak u prostoru konstantne zapremine za proizvoljan trenutak:

$$p = \frac{f_b m_b \psi}{W_0 - \frac{m_b}{\rho_b} (1 - \psi) - \alpha m_b \psi} \quad \psi_0 = \frac{m_b \rho_b}{\frac{f_b}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\rho_b}}$$

Početna vrednost za σ_0 :

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1 \psi_0}{\kappa_1}}$$

Početna vrednost za y_0 :

$$y_0 = \frac{\sigma_0 - 1}{2\lambda_1}$$

Pošto barutni gasovi popunjavaju prostor koji se dobije kada se od zapremine barutne komore odzme zapremina nesagorelog baruta, to je:

– početna gustina barutnih gasova:

$$\rho_0 = \frac{m_b \psi_0}{W_0 - \frac{m_b}{\rho_b} (1 - \psi_0)}$$

– početna vrednost poroznosti:

$$\varepsilon_0 = \frac{m_b \psi_0}{\rho_0 W_0}$$

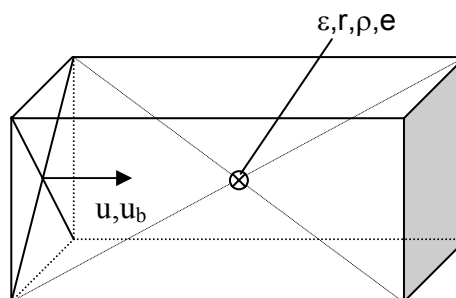
– početna vrednost jedinične unutrašnje energije:

$$e_0 = \frac{p_0 (1 - \alpha \rho_0)}{\rho_0 (k - 1)}$$

Izbor metode za rešenje matematičkog modela

Zbog složenosti matematičkog modela primenjuje se numerička metoda konačnih razlika. Kod ove metode izvodi se zamenjuju konačnim razlikama, dobija se šema koja kroz bilo koju matematičku transformaciju prenosi fizička svojstva jednačina strujanja. Pošto su obe faze promenljive, koriste se diskretne jednačine, a u samom procesu rešavanja smaknuta numerička šema. Veličine kao što su poroznost, pritisak, gustina i energija određuju se u tačkama, koje se nalaze u centrima kontrolnih zapremina. Nasuprot tome, brzine se sračunavaju u tačkama strana kontrolnih zapremina, koje su normalne na njih (sl. 4).

Ova mreža nastala je, pre svega, kao potreba ispravnog tretiranja gradijenta pritiska u jednačinama održanja količine kretanja.



Slika 4 – Sračunavanje brzina u tačkama strana kontrolnih zapremina
 Figure 4 – Calculation of velocities at the points of control volume surfaces

Programsko rešenje i rezultati proračuna

Na osnovu matematičkog modela razvijeno je programsko rešenje za UB proračun. Osnovni cilj programskog rešenja je bio da se kroz metodu dvofaznog strujanja ugradi matematički model Opokova za smešu barutnih zrna i prikaže mogućnost UB proračuna dvofaznim strujanjem [3] za oruđa koja koriste kombinovana punjenja. Programsko rešenje sastoji se od:

1. glavnog programa,
2. datoteke ulaznih podataka i
3. izlaznih rezultata kao proizvoda glavnog programa.

Glavni program je organizovan tako da se proračun izvodi po fazama u zavisnosti od vremena i puta. Na početku se vrši učitavanje polaznih podataka iz datoteke ulaznih podataka, zatim definicija početnih, graničnih i dopunskih uslova, kao i izračunavanje potrebnih podataka. Za rešavanje sistema diferencijalnih jednačina za prvi period, dok traje sagorevanje barutnih zrna, nezavisna promenljiva je put plamena x (od 0 do y_0), a za drugi period, pošto je završeno sagorevanje baruta, nezavisna promenljiva je put X , koji treba da pređe projektil od kraja sagorevanja barutnih zrna do napuštanja usta cevi.

Za testiranje programskog rešenja odabrana je haubica 155 mm A1, kao klasični primer oruđa koje koristi kombinovano punjenje kod dvodelnog metka. Simulacija je vršena sa podacima za barute domaće proizvodnje [4] prikazane u tabeli 1.

Tabela 1

Karakteristike baruta

Table 1

Gunpowder characteristics

model	s_z	m_z	r_0	e_b	alfa	u_{z0}	kapa	lamda
NC-121/1	1,62E-02	1,36E-02	0,000587	960665,6	0,00098	8,40E-10	1,0017	-0,0017
NC-123/1	1,61E-02	1,48E-02	0,00059	952136,8	0,001	8,00E-10	1,0017	-0,0017
NC-18/1	7,27E-02	1,17E-02	0,000992	937840,7	0,00102	7,20E-10	1,0064	-0,0064
NC-24/1	2,23E-05	2,06E-05	0,000325	987876,9	0,00094	9,90E-10	1,0867	-0,0798
NC-31/1	1,72E-05	3,36E-04	0,00043	963996	0,00098	8,60E-10	1,0983	-0,0895
NC-33/7	3,03E-04	3,20E-04	0,000435	977642,3	0,00096	9,30E-10	1,0725	-0,0676
NC-34/7	3,89E-04	5,11E-04	0,0006	987876,9	0,00094	9,90E-10	1,096	-0,0876
NC-371/7	3,90E-04	4,56E-04	0,000525	960665,5	0,00098	8,40E-10	1,0875	-0,0805
NC-43/7	5,63E-04	7,72E-04	0,0006	967488,8	0,00097	8,80E-10	1,0828	-0,0764
NCD-11/1	3,15E-05	1,01E-05	0,0002	913066,3	0,00106	5,90E-10	1,0571	-0,0541
NCD-13/1	3,41E-05	1,21E-05	0,000235	918183,6	0,00105	6,20E-10	1,0671	-0,0629
NCD-21/7	1,55E-04	1,01E-04	0,000335	914122,3	0,00106	6,00E-10	1,0893	-0,082
NCD-25/7	3,79E-04	4,36E-04	0,0005	919889,4	0,00105	6,90E-10	1,08	-0,0741
NCD-27/7	3,12E-04	3,12E-04	0,00044	918833,4	0,00105	6,20E-10	1,0677	-0,0634
NCD-28/7	7,07E-04	1,01E-03	0,00065	926631,3	0,00104	6,70E-10	1,0743	-0,0691
NCD-31/7	8,00E-04	1,23E-03	0,0007	919889,4	0,00105	6,30E-10	1,08	-0,0741

Izvršeno je testiranje za sve moguće kombinacije baruta. Osnovni kriterijumi pri izboru optimalne kombinacije bili su maksimalni pritisak u cevi < 3100 bara i početna brzina projektila od 400 do 600 m/s. Cilj je da se ostvari veća početna brzina sa što nižim maksimalnim pritiskom.

Testirane su različite kombinacija baruta (krupniji–sitniji) sa istim masenim udelom, a na osnovu izlaznih parametara odabrane su optimalne kombinacije. Najbolje rezultate u pogledu početne brzine i maksimalnog pritiska [5] dale su kombinacije kod kojih je osnovno punjenje od baruta NC 18. Nakon toga analizirani su rezultati izlaznih parametara za sve moguće kombinacije dopunskih punjenja od sitnijih barutnih zrna domaće proizvodnje (prikazani u tabeli 2).

Tabela 2
Table 2

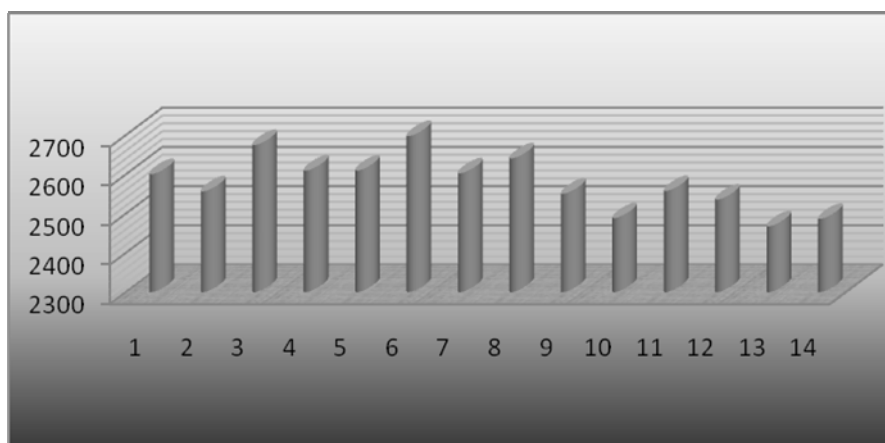
Kombinacije barutnih punjenja
Combinations of gunpowder charges

Broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Kombinacija baruta	NC121/NC18	NC123/NC18	NC24/NC18	NC31/NC18	NC33/NC18	NC34/NC18	NC371/NC18	NC43/NC18	NCD11/NC18	NCD13/NC18	NCD21/NC1 ₈	NCD25/NC1 ₈	NCD28/NC1 ₈	NCD31/NC1 ₈

Na dijagramu 1 prikazane su vrednosti pritiska u barima za različite vrste kombinacija baruta.

Dijagram 1
Diagram 1

Maksimalni pritisak u cevi oruđa za kombinacije baruta
Maximum pressure in the weapon barrel for gunpowder combinations

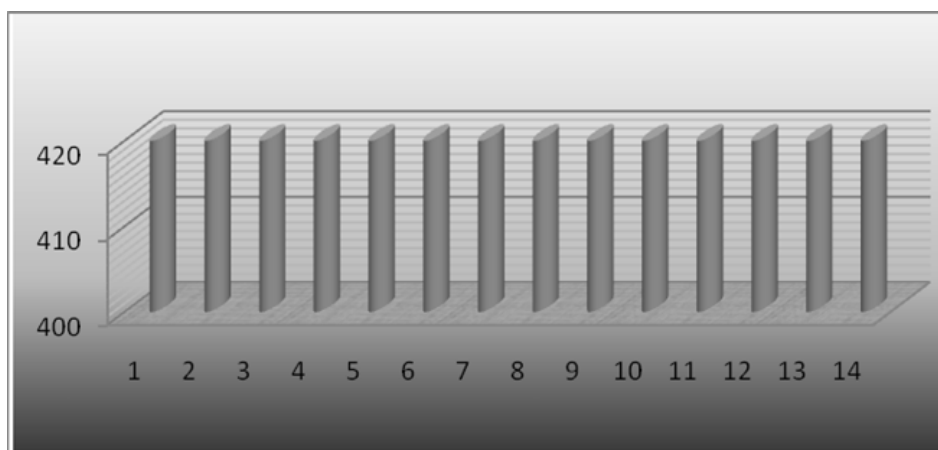


Na dijagramu 2 prikazane su vrednosti početne brzine u m/s za različite vrste kombinacija baruta.

Dijagram 2

Diagram 2

Početna brzina projektila za kombinacije baruta
Projectile muzzle velocity for gunpowder combinations



Na osnovu tabelarnih veličina odabira se najpovoljnija kombinacija baruta NC-18/NCD-28. Variranjem masa krupnijeg i sitnijeg baruta dobija se optimalna masa barutnog punjenja za standardni projektil kojim se postiže maksimalni domet. Pri variranju masa gustina barutnog punjenja mora da bude niža od dozvoljene (za haubice i minobacače 800 kg/m^3). Za proračunate optimalne mase, kojima se postiže maksimalni domet, gustina barutnog punjenja iznosi 720 kg/m^3 , što je u granicama dozvoljenog. Karakteristike takvog metka [6] prikazane su u tabeli 3:

Tabela 3

Table 3

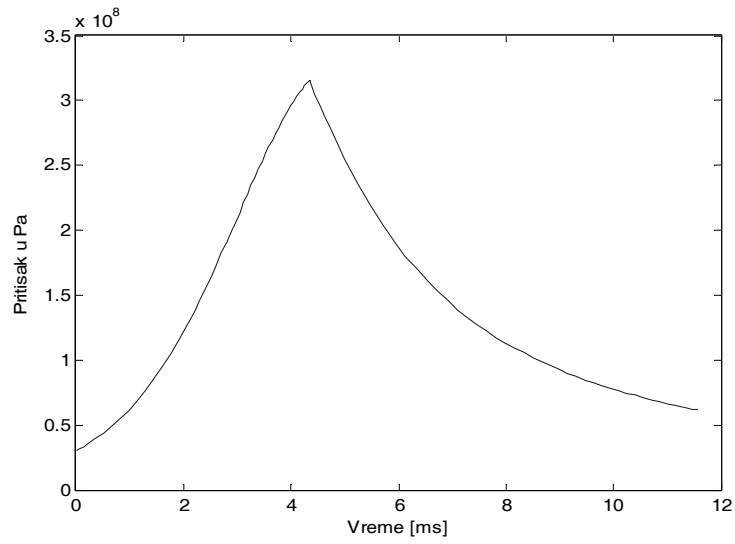
Karakteristike metka 155 mm
Characteristics of the 155mm projectile

Masa metka	Masa barutnog punjenja	Masa osnovnog punjenja	Masa dopunskog punjenja	Masa projektila	Početna brzina
47,2 kg	5,2 kg	4,0 kg	1,2 kg	42 kg	523 m/s

Simulacije procesa opaljenja prikazane su na dijagramima zavisnosti pritiska i brzine od puta i vremena.

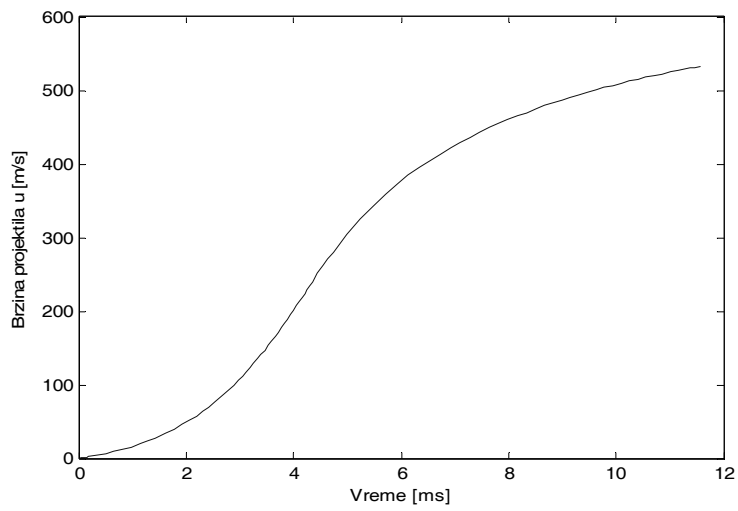
Dijagram 3
Diagram 3

Zavisnost pritiska od vremena
Pressure dependence on the time



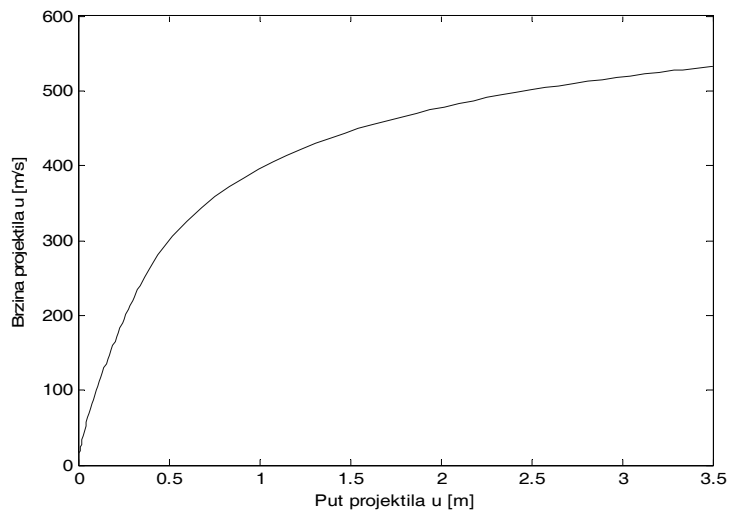
Dijagram 4
Diagram 4

Zavisnost brzine od vremena
Velocity dependence on the time



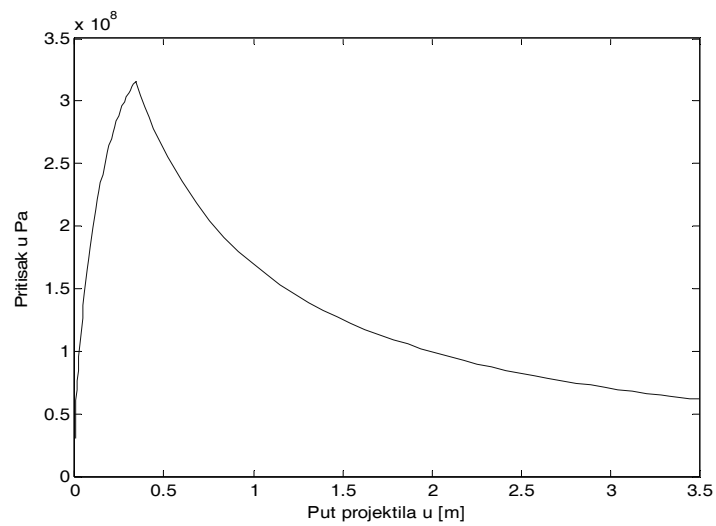
Zavisnost brzine od puta
Velocity dependence on the path

Dijagram 5
Diagram 5



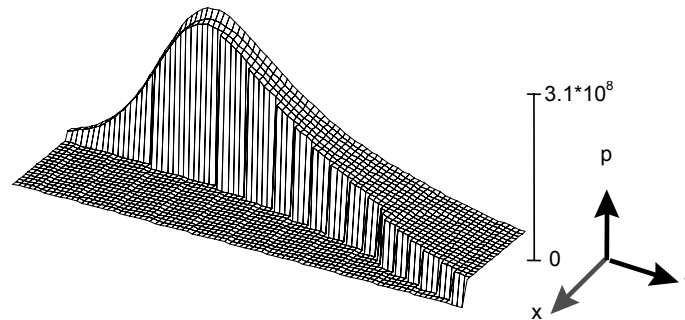
Zavisnost pritiska od puta
Pressure dependence on the path

Dijagram 6
Diagram 6



Dijagram 7
Diagram 7

Zavisnost pritiska od puta i vremena
Pressure dependence on the path and the time



Zaključak

Primarni zadatak ovog rada bio je modelovanje dvofaznog strujanja za oruđa koja koriste kombinovana punjenja. Matematički model dvofaznog strujanja je modifikovan i prilagođen za sredstva koja koriste kombinovana punjenja uvođenjem modela Opokova za smešu baruta. Rezultati simulacija su realni i približni su tabličnim vrednostima. Teorijske rezultate je potrebno proveriti u praksi, tako što bi se sa adekvatnim barutnim punjenjem izvršilo opitno gađanje i pri tome izmerili odgovarajući parametri, kao što su početna brzina projektila i maksimalni pritisak barutnih gasova.

Matematički model i programsko rešenje mogu se primeniti na bilo kom sredstvu, pa čak i za sredstva koja koriste jednu vrstu baruta i analizirati kakve bi izlazne rezultate davale određene kombinacije baruta koje bi se kao smeša primenjivale za barutno punjenje.

Treba razmotriti mogućnost projektovanja novih tipova baruta, kako sa stanovišta geometrije, tako i u pogledu fizičko-hemijskih i balističkih karakteristika. Pruža se mogućnost projektovanja nove municije variranjem mase projektila, mase barutnog punjenja, gustine punjenja, pritiska forsiranja i drugih parametara.

Matematički model koji je prikazan, nakon praktične provere izlaznih rezultata, pretrpeo bi određene modifikacije, a zatim bi mogao da posluži kao dobra osnova za modifikaciju postojećih i projektovanje novih sredstava naoružanja.

Literatura

- [1] Cvetković, M.: *Unutrašnja balistika*, CVTŠ, Zagreb, 1985.
- [2] Cvetković, M.: *Unutrašnja balistika*, SŠONID-VTA VJ, Beograd, 1998.
- [3] Tančić, Lj.: *Zbirka zadataka iz unutrašnje balistike*, SŠONID-VTA VJ, Beograd, 1998.
- [4] *Baruti Jugoslovenske proizvodnje*, VTI, Beograd, 1981.
- [5] Čabarkapa, O., Tančić, Lj.: „Korekcija teorijskih i eksperimentalnih rezultata jedinačne brzine sagorevanja baruta u cevi oružja”, *Vojnotehnički glasnik (Military Technical Courier)*, Vol. 49, No. 6, pp 571-579, ISSN 0042-8469, UDC 623+355/359, Beograd 2001.
- [6] *Municija*, knjiga 1 (2. deo), TU SSNO, Beograd, 1974.

MODELING TWO-PHASE FLOW IN BARRELS OF WEAPONS WITH COMBINED CHARGES

FIELD: Mechanical Engineering (Fluid mechanics – Hydraulics & Pneumatics)

Summary:

The processes occurring during the firing within barrels of weapons with combined charges are described aiming at the improvement of fire power of existing weapons and the design of new ones. The firing process simulation enables the optimization of gunpowders. The analysis of the obtained results helps in choosing the best combination of input-output parameters for the highest muzzle velocity possible while keeping powder gas maximum pressures inside the barrel at the lowest possible level.

Characteristics of weapons with combined charges

Gunpowder charges can be of constant or variable/combined-formulations. Combined gunpowder charges consist of several parts of the same or different weight loading and usually of two types of gunpowder grains of varied geometrics and shapes.

Howitzers and mortars use the ammunition with combined gunpowder charges. Firing maneuver (Fig. 1.) is realised with the change of either elevation angles or gunpowder charges. Life cycles of weapon barrels increase with firing maneuvers because a maximum pressure value is never gained.

Mathematical model for a two phase flow in weapon barrels with combined charges

The processes occurring in the model barrel behind a fired projectile are described. The flow is in two phases: hard - unburnt gunpowder grains and gaseous - mixture of gunpowder gases. The hard phase consists of two components: small and large gunpowder grains. Additi-

onal equations of the Opokov model are introduced into the mathematical model. These additional equations describe the gunpowder mixture. The numerical FEM is used on account of the mathematical model complexity. The derivatives are replaced by finite differences and the obtained scheme transfers the physical characteristics of flow equations through any mathematical transformation. Since both phases are variable, discrete equations are used as well as the removed numerical scheme. Porosity, pressure, density and energy are determined in the centers of control volumes. Velocities are determined at the points of control volume surfaces (Fig. 4.).

Software solution and the calculation results

A program for internal ballistic estimate is developed on the basis of the mathematical model. The estimate is executed in phases depending on time and path. Being a classical example of an artillery weapon with a combined gunpowder charge, a 155 mm howitzer A1 has been chosen for testing. Data of nationally produced gun powders have been used in the simulation. The basic criteria for choosing an optimal combination have been a maximum barrel pressure value lower than 3100 bar and a maximum muzzle velocity from 400 to 600 m/s. The best results of output parameters have been obtained by the NC18/NCD28 powder combination, where the muzzle velocity is 523 m/s and the charge density is 720 kg/m³.

Conclusion

The primary objective of this study was two-phase flow modeling in weapons with combined charges. A mathematical model for a two-phase flow was modified and adapted for artillery weapons with combined charges introducing the Opokov model for the gun powder mixture. The simulation results are realistic and very close to tabular values. After the verification of the output results in practice, the model could be modified in order to serve as a good basis for modifying existing and designing new weapons.

Key words: combined charge, two-phase flow, simulation.

Datum prijema članka: 25. 01. 2011.

Datum dostavljanja ispravki rukopisa: 04. 02. 2011.

Datum konačnog prihvatanja članka za objavljivanje: 06. 02. 2011.