

Usaglašavanje rezultata modela i eksperimenata dvofaznog strujanja u cevi oružja Boks-Vilsonovom metodom

Dr Ljubiša Tančić dipl.inž.¹⁾
Dr Miloje Cvetković dipl.inž.²⁾
Obrad Čabarkapa dipl.inž.²⁾

Razmatra se unutrašnjebalistički problem procesa opaljenja u cevi oružja. Koristi se matematički model tzv. dvofaznog strujanja, koji se opisuje sistemom gasodinamičkih parcijalnih diferencijalnih jednačina. Sistem jednačina rešava se numerički korišćenjem teorije konačnih razlika. Vršiti se faktorska analiza uticaja polaznih parametara i odabiru se parametri koji dominantno utiču na izlazne karakteristike procesa strujanja. Rezultati proračuna upoređuju se sa eksperimentalnim rezultatima i daje se jedan od mogućih načina korekcije rezultata modela eksperimentalnim modeliranjem putem postupnih približenja rezultata Boks-Vilsonovom metodom. Dobra međusobna usaglašenost rezultata potvrđuje korektnost postavljenog modela dvofaznog strujanja.

Ključne reči: Unutrašnja balistika, dvofazno strujanje, faktorska analiza, disperziona i regresiona analiza, Boks-Vilsonova metoda.

Uvod

PROCES opaljenja u cevi streljačkog oružja je gasodinamički proces koji je u prostoru između nepokretnog dna cevi i pokretnog projektila okarakterisan strujanjem dve faze: čvrste - sagorevajućih barutnih zrna i gasovite - barutnih gasova kao produkata sagorevanja. Matematički model se razvija za proizvoljan momenat vremena u procesu sagorevanja baruta. Proces opaljenja se posmatra od momenta kada se sagorevanjem baruta iza projektila stvori dovoljan pritisak pri kojem će se košuljica projektila urezati u žljebove cevi i doći do pokretanja projektila. Pretpostavlja se da su u tom momentu poznati svi početni i granični uslovi. Posle završetka sagorevanja baruta, dvofazno strujanje prelazi u jednofazno, tj. u strujanje samo barutnih gasova. Postavljeni matematički model tada prelazi u klasičan gasodinamički model.

Sistem jednačina u Lagranžovim koordinatama

Sistem jednačina izvodi se u Ojlerovim koordinatama t (vreme) i x (proizvoljan položaj u cevi od čela zatvarača do dna projektila), a zatim se transformiše u sistem sa Lagranžovim koordinatama t i s (smeša baruta i barutnih gasova u pojedinim tačkama iza projektila). Polazne pretpostavke i potpuno izvođenje jednačina dato je u [1], a na ovom mestu se daje samo konačan oblik jednačina:

Jednačina kontinuiteta za barut:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \rho \varepsilon (u - u_b) \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} - a_2 (1 - \varepsilon) \frac{\partial u_b}{\partial s} = b \quad (1)$$

Jednačina kontinuiteta za barutne gasove:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + a_1 \frac{\partial \rho}{\partial s} + a_2 \frac{\rho (u - u_b)}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \rho a_2 \frac{\partial u}{\partial s} + \\ + \rho a_2 \frac{(1 - \varepsilon) \partial u_b}{\varepsilon \partial s} = \frac{b (\rho_b - \rho)}{\varepsilon} \end{aligned} \quad (2)$$

Jednačina kretanja barutnih gasova:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a_1 \frac{\partial u}{\partial s} + a_2 \frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)} \frac{\partial e}{\partial s} + a_2 \frac{e}{\rho} \frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2} \frac{\partial \rho}{\partial s} = f_1 \quad (3)$$

Jednačina kretanja barutnih zrna:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_b}{\partial t} - a_1 \frac{\rho}{\rho_b} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \frac{\partial u_b}{\partial s} + a_2 \frac{\rho}{\rho_b} \frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)} \frac{\partial e}{\partial s} + \\ + a_2 \frac{e}{\rho_b} \frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2} \frac{\partial \rho}{\partial s} = \frac{f}{\rho_b (1-\varepsilon)} \end{aligned} \quad (4)$$

Jednačina energije:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + a_1 \frac{\partial e}{\partial s} + a_3 \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \frac{\rho a_2}{\rho} \frac{\partial u}{\partial s} + a_4 \frac{\partial u_b}{\partial s} = f_3 - \frac{pb}{\varepsilon \rho} \quad (5)$$

Iz definicije Lagranžove koordinate "s" dobija se:

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{1}{a_2} \quad (6)$$

gde su parametri strujanja: ε - poroznost; ρ - gustina barutnih gasova; u - brzina barutnih gasova; u_b - brzina barutnih zrna; p - pritisak barutnih gasova; e - jedinična unutrašnja energija barutnih gasova; x - proizvoljan položaj u cevi od čela zatvarača do dna projektila.

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

²⁾ Uprava za naučnu i izdavačku delatnost, 11000 Beograd, Neznanoj junaka 38

Koeficijenti od a_1 do a_4 , b , f , f_1 , f_2 i f_3 su funkcije parametara strujanja. Sistem jednačina (1-6) povezuje sve parametre strujanja osim pritiska barutnih gasova koji se definiše jednačinom stanja barutnih gasova.

Navedeni sistem jednačina važi dok traje sagorevanje barutnih zrna. Za slučaj kada je završeno sagorevanje, važe sledeći uslovi:

$$\varepsilon = 1, u_b = 0, b = 0, f_1 = f_2 = f_3 = 0, \\ a_1 = 0, a_2 = \rho \text{ i } q = 0$$

pa se sistem jednačina (1-6) transformiše u sistem koji važi do izletanja projektila iz cevi. Dopunske jednačine, početni i granični uslovi, dati su u [2].

Dati sistem jednačina rešava se numerički primenom teorije konačnih razlika. Izvodi se uslov stabilnosti i konvergencije numeričke šeme [3] i sastavlja program za personalni računar koji se koristi za analizu uticaja polaznih parametara.

Faktorski plan eksperimenta 2ⁿ sa disperznom i regresionom analizom

Programsko rešenje teorijsko-numeričkog modela može da se testira različitim vrednostima polaznih podataka koji imaju različit uticaj na izlazne rezultate. Svi polazni podaci moraju da zadovolje *Propis o kvaliteti proizvoda (PKP)* [4] ili *Propis Internacionalne permanentne komisije - Commission Internationale Permanente (CIP)* [5] koji definišu dozvoljene tolerancije za pojedine parametre. Međutim, kao dozvoljena vrednost pojedinih parametara se može, sa istom pouzdanosću, uzeti kako gornja vrednost tako i donja vrednost parametra.

Da se oceni uticaj polaznih podataka na izlazne rezultate matematičkog modela i izvrši rangiranje realizuje se faktorski plan eksperimenta 2ⁿ na osnovu [6]. Rezultati faktorskog plana 2ⁿ pokazuju da:

- Postoje parametri koji dominantno utiču na izlazne parametre bilo samostalno bilo u kombinaciji sa ostalim polaznim parametrima, a to su: početna masa barutnog zrna (m_{z0}), početna površina barutnog zrna, (S_{z0}), masa projektila (m), masa barutnog punjenja (m_{bo}), kovolumen barutnih gasova (α), poprečni presek cevi (S_c) i jedinična brzina sagorevanja baruta (u_{z0}).

Tabela 1. Uticaj ulaznih parametara na izlazne rezultate

Parametar	Srednja vrednost	Odstupanje od sr. vred.	Rang ulaza	$P_{max} = 3145 \text{ bar}$ $P_{max}, \%$	$V_{br} = 727 \text{ m/s}$ $V_0, \%$	Rang izlaza
u_{z0} , m/sPa	7,767 E-10	± 1,2 %	5	± 2,45	± 1,19	1
m_{z0} , kg	4,127 E-7	± 1,3 %	3	± 2,35	± 0,84	4
m_{bo} , kg	0,00162	± 1,54 %	2	± 1,65	± 1,15	2
m , kg	0,0079	± 1,56 %	1	± 1,56	± 0,01	7
α , m ³ /kg	0,000914	± 0,33 %	6	± 0,19	± 0,07	5
S_{z0} , m ²	2,905 E-6	± 1,3 %	4	± 2,35	± 0,86	3
S_c , m ²	4,68 E-5	± 0,05 %	7	± 0,13	± 0,04	6

U tabeli 1 se daju dozvoljene tolerancije od nazivne mere u procentima, za parametre od prvorazrednog uticaja

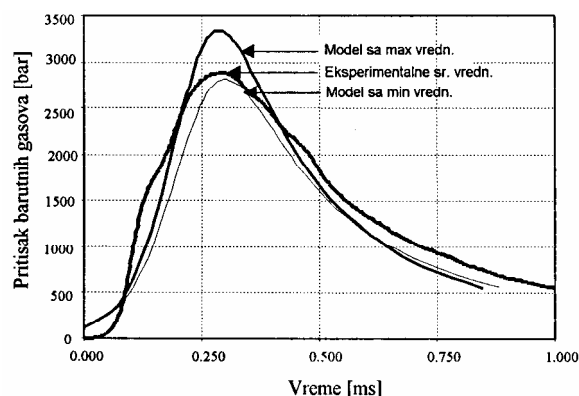
na izlazne rezultate za automatsku pušku 7.62mm i municiju koju ona koristi na osnovu PKP-a i CIP-a. Rang uticaja parametara na izlazne rezultate dobija se realizacijom programskog rešenja za faktorski plan eksperimenta 2ⁿ u kome je definisan kriterijum o relativnom odnosu ulaznog i izlaznog uticaja parametara.

Iz tabele 1 se vidi procentualni iznos promene maksimalnog pritiska barutnih gasova i početne brzine projektila od vlastitih srednjih vrednosti, pri promeni parametara u dozvoljenim granicama odstupanja.

Očigledno je da parametri imaju različiti gradijent udela na izlazne rezultate. Tako npr. jedinična brzina baruta u_{z0} na ulazu ima skoro najmanji procenat promene, a izlazne parametre najviše promeni, dok je suprotno sa masom projektila.

Posle izvršene selekcije uticajnih parametara uzimaju se svi polazni parametri koji povećavaju izlazne rezultate da se dobije jedna granica izlaznih rezultata. Polazni parametri su po PKP-u sa dozvoljenim plusom i sa dozvoljenim minusom. Zatim se uzimaju svi polazni parametri koji smanjuju izlazne rezultate i tako se dobija druga granica izlaznih rezultata.

Izvođenjem programa sa graničnim vrednostima ulaznih parametara dobijaju se najniže i najviše strujne karakteristike. Od svih strujnih karakteristika u radu se prikazuje i analizira samo pritisak barutnih gasova (sl.1). Ako je matematički model dobro postavljen, unutar ovih graničnih proračunskih rezultata ili u neposrednoj njihovoj blizini, trebalo bi da se dobiju i eksperimentalni rezultati, što je i potvrđeno.



Slika 1. Dijagrami $p(t)$ minimalnih i maksimalnih vrednosti modela i srednjih vrednosti eksperimenata

Najkvalitetnije informacije o posmatranom procesu u obradi rezultata eksperimenta daje matematičko-statistički aparat sa velikim brojem analiza, od kojih su na ovom mestu korišćene dve, disperziona i regresiona analiza [6].

Na osnovu izračunatih veličina u [7], izvodi se disperziona analiza za maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila.

Najveći uticaj na veličinu maksimalnog pritiska barutnih gasova ima jedinična brzina sagorevanja baruta, dok podjednak uticaj imaju početna masa barutnog zrna i početna površina barutnog zrna i na kraju početna masa baruta. Takođe je pokazano da i međudejstva faktora imaju uticaj na maksimalni pritisak, ali u znatno manjoj meri od samostalnog dejstva faktora.

Najveći uticaj na veličinu početne brzine projektila ima jedinična brzina sagorevanja baruta, zatim početna masa baruta, pa početna masa barutnog zrna i početna površina

barutnog zrna. Disperziona analiza, za sve veličine, pokazuje da su uticaji međudejstva faktora zanemarivi.

Posle disperzione analize izvodi se i regresiona analiza rezultata eksperimenta.

Ako se u regresioni polinom [7] uvrste vrednosti regresionih koeficijenata, dobija se izraz za maksimalni pritisak:

$$p_m = 3146,5625 + 73,6875m_{z0} + 76,5625u_{z0} + \\ + 51,1875m_{b0} + 73,6875S_{z0} + 1,6875m_{z0}u_{z0} + \\ + 1,3125m_{z0}m_{b0} + 1,4375u_{z0}m_{b0} + \\ + 1,5625m_{z0}S_{z0} + 1,6875u_{z0}S_{z0} + 1,3125m_{b0}S_{z0}$$

i na osnovu njega vrednosti:

$$p_m = 3430,6875; \text{ kada su faktori na gornjem nivou}$$

$$p_m = 2862,4375; \text{ kada su faktori na donjem nivou}$$

U odnosu na srednju vrednost maksimalnog pritiska dobija se odstupanje od $\pm 284,125$ bara, što ukazuje da ovi parametri bitno utiču na maksimalni pritisak barutnih gasova, pošto ga promene za 9% od svoje srednje vrednosti.

Slično je za početnu brzinu projektila:

$$V_0 = 726,875 + 6,125m_{z0} + 8,5u_{z0} + 8,375m_{b0} + 6,125S_{z0}$$

$$V_0 = 756 \text{ m/s}; \text{ kada su faktori na gornjem nivou}$$

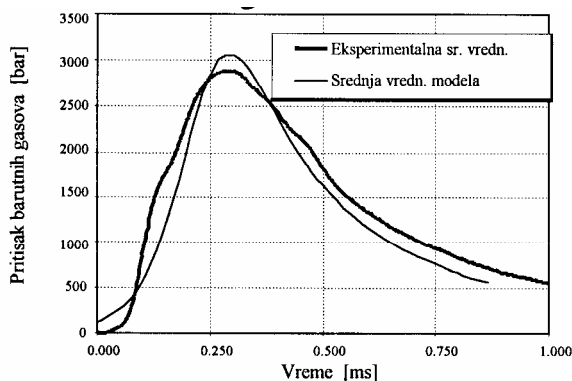
$$V_0 = 697,75 \text{ m/s}; \text{ kada su faktori na donjem nivou}$$

U odnosu na srednju vrednost početne brzine zrna, dobija se odstupanje od $\pm 29,125$ m/s, što ukazuje da ovi parametri bitno utiču na početnu brzinu projektila, pošto je promene za 4% od svoje srednje vrednosti.

Komparativna analiza rezultata proračuna i eksperimenata

Eksperimentalna istraživanja su realizovana u cilju dobijanja stvarnih podataka u cevi za vreme opaljenja i radi upoređenja sa proračunskim podacima. Eksperimentima su registrovane krive razvoja pritiska barutnih gasova u funkciji vremena. Merno mesto registruje pritisak barutnih gasova u čauri metka. Eksperiment je ponavljan najmanje 30 puta. Kompletni rezultati su prezentirani u [2], a ovde se koriste samo eksperimentalni rezultati jednog mernog mesta za automatsku pušku 7.62mm.

Za uporednu analizu i korekciju modela koriste se dijagrami "srednjih" vrednosti modela i eksperimenata (sl.2).



Slika 2. Dijagrami $p(t)$ srednjih vrednosti modela i eksperimenata

Dijagram na sl.2 pokazuje da rezultati $p(t)$ modela i eksperimenata imaju vrlo dobru saglasnost i podudarnost, tako da odstupanja na većem delu ne prelaze 10%. Nešto veća odstupanja su u početnom delu krivih, prvenstveno

zbog različitih pretpostavki pri proračunu po modelu i bliže ustima cevi kao posledica inercije mernih pretvarača pritisaka.

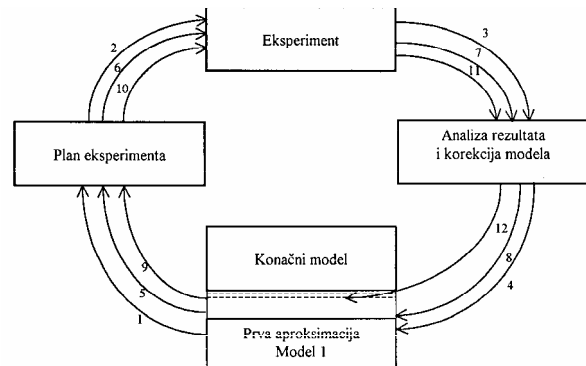
Korekcija rezultata proračuna

Za usaglašavanje rezultata proračuna i eksperimenata postoje dva načina: korekcija rezultata eksperimenata i korekcija modela. S obzirom da u eksperimentalnoj cevi vladaju drugačiji uslovi opaljenja od bojeve cevi, izvršena je korekcija matematičkog modela i programskog rešenja prema uslovima za eksperimentalnu cev i sa takvim programom su izvršeni proračuni.

Kod korekcije rezultata proračuna po modelu, logično je da treba uticati na one polazne parametre za koje je faktorskom analizom utvrđeno da najviše utiču na izlazne rezultate proračuna. Kako je kod svih provedenih faktorskih analiza utvrđeno da je jedinična brzina sagorevanja baruta (u_{z0})-parametar koji najviše utiče na promenu izlaznih karakteristika, upravo promenom ovog parametra treba vršiti korekciju rezultata modela i tim putem njegovo usaglašavanje sa rezultatima eksperimenata. Drugi parametar po uticaju je početna masa barutnog zrna, odnosno početna površina barutnog zrna. Na ovaj parametar može da se utiče u toku procesa proizvodnje, laboracijom baruta, tj. da se strogo vodi računa da ovi parametri budu u dozvoljenim granicama odstupanja.

Korekcija rezultata proračuna po modelu putem variranja jedinične brzine sagorevanja flegmatizovanog baruta vrši se primenom postupka Boks-Vilsonove metode [8]. Boks-Vilsonova metoda sadrži postupna približenja kod eksperimentalnog modeliranja koja se prikazuju u obliku spiralnog dijagrama (sl.3).

Postupna približenja se ponavljaju sve dotle dok se ne ostvari zadovoljavajuća saglasnost rezultata modela sa rezultatima eksperimenata. Kada se dobije zadovoljavajuća saglasnost modela i eksperimenata onda se teorijsko-numerički model može da koristi kao simulator potpunog procesa opaljenja.



Slika 3. Spiralni dijagram Boks-Vilsonove metode

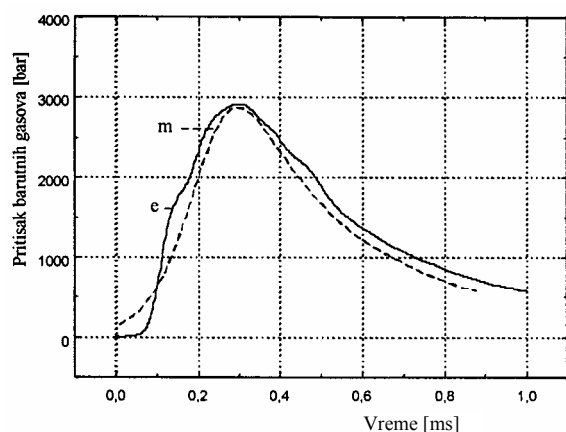
U tabeli 2 daje se pregled dobijenih vrednosti maksimalnog pritiska barutnih gasova i početne brzine projektila sa flegmatizovanim barutom i uz primenu metode postupnog približenja rezultata proračuna.

Upoređujući rezultate iz tabele sa srednjim rezultatima eksperimenata za merno mesto broj 1, najbolja usaglašenost se postiže primenom flegmatizovanog baruta kod kojeg je flegmatizator prodro do jedne trećine debljine barutnog zrna i sa početnom jediničnom brzinom sagorevanja 7,5 m/s. Kada sagori debljina barutnog zrna do koje je prodro

flegmatizator, preostali deo barutnog zrna sagoreva jediničnom brzinom sagorevanja 7,767m/s, tj. srednjom vrednošću koja je razmatrana kod proračuna u faktorskoj analizi. Ovim barutom se postiže usaglašenost maksimalnog pritiska i početne brzine ispod 1%.

Tabela 2. Uticaj flegmatizatora na izlazne rezultate

Jedinična brzina sagorevanja, u_{z0}	Dubina prodora flegmatizatora u barutno zrno, m	Maksimalni pritisak, bar	Početna brzina, m/s
7,5 E-10	1/2	2933	718,68
	1/3	2960	722,13
	1/4	2985	724,06
	1/5	3002	725,35
7,0 E-10	1/2	2638	690,12
	1/3	2709	700,99
	1/4	2778	707,71
	1/5	2829	712,19



Slika 4. Dijagrami $p(t)$ korigovanog modela i srednjih vrednosti eksperimenata

Ceo tok eksperimentalne i proračunske krive na sl.4 se dosta dobro poklapaju čime se potvrđuje ispravnost postavljene teorije. Rezultati eksperimenata potvrđuju karakter razvoja pritiska u cevi oružja kao funkcije vremena i položaja u cevi.

Da se postigne još bolja podudarnost i saglasnost srednjih krivih $p(t)$ modela i eksperimenata neophodno je

izvršiti korekciju modela za "povećani" deo zapremine zbog "bušenja" cevi za postavljanje nosača mernih pretvarača pritiska.

Na osnovu komparativne analize rezultata proračuna sa srednjim rezultatima eksperimenata, može se zaključiti da je teorijski model korektan i u tolerantnim granicama tačan.

Zaključak

Data je teorijsko - eksperimentalna analiza procesa opaljenja u cevi oružja na osnovu eksperimentalnih istraživanja i numeričkog modeliranja na računaru. Analizom se došlo do saznanja koji uslovi proračuna daju optimalne ulazno-izlazne parametre i prihvatljive rezultate proračuna za konkretno oružje. Komparativnom analizom je obuhvaćen pritisak barutnih gasova u cevi oružja u funkciji vremena. Upoređenjem eksperimentalnih i proračunskih rezultata pritiska barutnih gasova uočava se njihova dobra međusobna usaglašenost.

Faktorska analiza je izvršena za određeni vremenski trenutak, tj. trenutak postizanja maksimalnog pritiska i brzine projektila na ustima cevi (početna brzina), a može da se primeni i na ostale karakteristike strujanja. Ona se može provesti i za bilo koji trenutak vremena u procesu opaljenja i za bilo koji položaj projektila u cevi.

Literatura

- [1] CVETKOVIĆ, M. *Primena nestacionarne gasodinamike na unutrašnje balistički problem oružja malih kalibara*. doktorska disertacija, Visoke Vojnotehničke škole KoV JNA, Zagreb, 1984.
- [2] TANČIĆ, LJ. *Numeričko rešenje nestacionarnog modela unutrašnje balistike oružja malih kalibara*. doktorska disertacija Vojnotehnička akademija VJ, Beograd, 1997.
- [3] CVETKOVIĆ, M., TANČIĆ, LJ. *Analiza uslova numeričkog modeliranja dvofaznog strujanja u oružju*. XXII jugoslovenski kongres teorijske i primenjene mehanike JUMEH '97, Vrnjačka Banja, SRJ, 1997.
- [4] *** Propis o kvalitetu proizvoda (PKP), SOUR "Prvi Partizan" RO Namenska proizvodnja, Užice, 1987.
- [5] *** Commission Internationale Permanente (CIP), Geneve, 1985.
- [6] PANTELIĆ, I. *Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta*. Radnički univerzitet - "Radivoj Čirpanov", Novi Sad, 1976.
- [7] ČABARKAPA, O. *Istraživanje polaznih parametara za model dvofaznog strujanja u cevi oružja*. magistarski rad, Vojnotehnička akademija VJ, Beograd, 2000.
- [8] MOMIRSKI, M. *Prilozi za metodologiju tehničkih nauka*. Institut za industrijske sisteme, Novi Sad, 1986.

Rad primljen: 22.12.2000.god.