Mr Ljubiša Tančić,
major, dipl. inž.

IZBOR OPTIMALNIH BALISTIČKIH PARAMETARA U FAZI PROJEKTOVANJA ORUĐA

Uvod

Balističko projektovanje podrazumeva određivanje optimalnih osnovnih konstruktivnih karakteristika cevi, uslova punjenja i energetske karakteristika opaljenja na osnovu taktičko-tehničkih zahteva (TTZ) ili propisa o kvalitetu proizvoda (PKP) koji se postavljaju pred oruđe, i definisana je kroz tri osnovna zadatka:

— *klasični* zadatak definiše kalibar cevi, masu projektila i početnu brzinu projektila, a određuje karakteristike kanala cevi, uslove punjenja oruđa, osnovne karakteristike punjenja i sve podatke neophodne za proračun cevi, projektila i lafeta;

— *uopšteni* zadatak usvaja maksimalni domet za oruđe zemaljske artiljerije, probojnost na zadanoj daljini cilja za protivoklopna oruđa ili horizontalnu daljinu i visinu cilja za protivavionska oruđa, odabira kalibar oruđa, masu projektila, početnu brzinu projektila i sve ostale parametre, kao i klasični zadatak. Očigledno da je klasični zadatak jedan deo uopštenog zadatka;

— *uprošćeni* zadatak, u odnosu na klasični, definiše još neka dodatna ograničenja. Tako, na primer, projektovano oruđe mora da koristi istu municiju kao neko već postojeće oruđe tog kali-

bra, ili istu cev, hidroelastični sistem, lafet, itd. Ovaj zadatak se rešava kao i klasični, s tim što su neki parametri unapred zadani i ne treba ih analizirati. Ovaj zadatak obuhvata i problem modifikacije nekog dela postojećeg oruđa na bazi promene unutrašnjebalističkih parametara.

Klasičan zadatak može da se reši tabličnim i analitičkim metodama. Tablične metode su starije i daju neke srednje podatke, tako da ne nalaze veliku primenu. Analitičke metode daju sistem odgovarajućih jednačina na osnovu teorije unutrašnje balistike. Izbor parametara vrši se rešenjem sistema jednačina, uz odgovarajuće kriterijume nalaženja optimalnog rešenja. Od analitičkih metoda uglavnom se koriste metoda Sluhockog, metoda Serebrjakova i metoda Čujeva [1, 2].

Uopšteni zadatak sastavljen je, uglavnom, od dva dela. Prvi deo predstavlja postupak izbora optimalnog oruđa, a drugi deo je klasičan zadatak balističkog projektovanja. U ovom radu biće obrađena metoda Čujeva prema [1, 2] za oruđa zemaljske artiljerije (ZA).

Današnja teorija ratovanja predviđa veći domet ZA, pa je tendencija razvoja artiljerijskih oruđa da se modifikuju postojeća ili konstruišu nova oruđa sa što boljim performansama.

Cilj ovog rada je da se na osnovu definisanih željenih podataka kao što su: početna brzina projektila $V_0=820$ m/s, masa projektila $m=46$ kg, maksimalni pritisak barutnih gasova $p_m \leq 300$ MPa i dužina vodišta projektila $L_k \approx 39$ kalibara — odrede optimalni balistički parametri posebno: najpogodniji barut, masa baruta i zapremina barutne komore na osnovu kriterijuma cene artiljerijskog oruđa.

Korišćene oznake i unutrašnjebalistički parametri:

$\frac{W_0}{m}, \frac{W_0}{d^3}$ — zapremina barutne komore,

koja se definiše kao relativni odnos prema masi projektila ili kalibru na treću;

$\frac{L_c}{d}$ i $\frac{L_k}{d}$ — dužina cevi i kanal cevi de-

finišu se u relativnom odnosu sa kalibrom cevi;

$\lambda_u = \frac{X_u}{X_0}$ — relativni put projektila de-

finišu se kao odnos ukupnog puta i dužine barutne komore;

$\chi = \frac{X_0}{X_{kom}}$ — koeficijent proširenja ba-

rutne komore predstavlja odnos dužine barutne komore i stvarne dužine barutne komore;

$\Delta = \frac{\omega}{W_0}$ — gustina punjenja predstavlja odnos mase baruta i barutne komore;

$\frac{\omega}{m}$ — masa baruta se daje u relativnom odnosu prema masi projektila;

$K_m = \frac{m}{d^3}$ — koeficijent mase projektila predstavlja odnos mase projektila i kalibra na treću;

$\frac{I_k}{d}$ — ukupni impuls pritiska barutnih

gasova takođe se daje u odnosu na kalibar i koristi se za definisanje modela baruta;

$B = \frac{S^2 I_k^2}{\phi m f \omega}$ — parametar Drozdova ob-

jedinjuje prethodna tri parametra, a predstavlja osnovnu karakteristiku za određivanje maksimalnog pritiska i položaja projektila na kraju sagorevanja. Smanjenjem parametra B raste p_m , a tačka kraja sagorevanja se pomera ka dnu cevi;

$K_k = \frac{X_k}{X_u}$ — relativni put projektila na

kraju sagorevanja predstavlja odnos puta na kraju sagorevanja i ukupnog puta projektila u cevi;

$K_e = \frac{E_0}{d^3}$ — koeficijent moći oruđa pred-

stavlja odnos kinetičke energije projektila na ustima cevi i kalibra na treću;

$K_\omega = \frac{E_0}{\omega}$ — koeficijent iskorišćenja ma-

se punjenja predstavlja odnos kinetičke energije na ustima cevi i mase punjenja;

$K_0 = \frac{E_0}{E}$ — koeficijent korisnog dejstva

barutnog punjenja predstavlja odnos kinetičke energije na ustima cevi i raspoložive energije barutnog punjenja tj. potencijala baruta;

N — vek cevi podrazumeva broj metaka koji može da se ispali iz cevi, a da cev ima karakteristike (V_0 i p_m) u dozvoljenim granicama.

Ograničenja pri balističkom projektovanju:

$L_c \leq L_{cdoz}$ — dužina cevi gde je $L_c = L_z + L_k + L_{gk}$, pri čemu je $L_k = f(\Delta, \omega, p_m, \chi)$; $m_c \leq m_{cdoz}$ — masa cevi;

$\Delta_{mn} \leq \Delta \leq \Delta_{mx}$ — gustina punjenja dvostruko ograničena;

$N(L_k, p_m, \Delta, \chi) \geq N_{doz}$ — dozvoljeni vek cevi (minimalni);

$p_m \leq p_{mdoz}$ — dozvoljeni maksimalni pritisak barutnih gasova;

$\frac{\omega}{\Delta} = W_{odoz}$ — zapremina barutne komore;

$K_k < 0,8$ — položaj kraja sagorevanja;
 $\chi_{mn} \leq \chi \leq \chi_{mx}$ — koeficijent proširenja barutne komore.

Opis metode Čujeva

Nedostatak metoda Sluhockog i Se-rebrjakova [1, 2] jeste u tome što važni parametri, kao što su: maksimalni pritisak barutnih gasova p_m i koeficijent proširenja barutne komore χ , a kod Sluhockog i gustina punjenja Δ , ne variraju. Oni se biraju na osnovu opita pri projektovanju. Opit je, u svakom slučaju, neophodan, ali dostignuta naučno-tehnička saznanja omogućuju promenu

karakteristika baruta, cevnih čelika, zahteva za konstrukcijom, itd., što uslovljava da što više parametara varira. Zbog toga treba tražiti nove pristupe problemu i nove metode. Prema [1] dat je jedan od mogućih prilaza ka rešavanju klasičnog zadatka, a razmatra se i uopšteni zadatak. U ovom radu posmatra se klasični zadatak.

Polazna varijanta definiše se praktično isto kao u metodi Sluhockog, a onda se poboljšava metodama operacionih istraživanja. Za izbor polazne varijante koristi se tablica slična tablici Sluhockog samo sa pouzdanijim i realnijim rezultatima. Tablica je sastavljena za koeficijent mase projektila $K_m = 15\,000\text{ kg/m}^3$, tabela 1. Ukoliko stvarna vrednost K_m bitno odstupa od tablične, treba preračunati koeficijent moći oruđa K_o i koeficijent iskorišćenja mase punjenja K_ω u odnosu na tablične.

Tabela 1

Vrednosti karakteristika za $K_m = 15\,000\text{ kg/m}^3$

$10^{-7} K_e$ J/m ³	P_{mkr} MPa	Δ kg/m ³	χ	$10^{-4} K_\omega$ J/kg	L_c/d	V_o m/s
50	125	470	1,01	136	12	252
100	170	510	1,02	134	18	362
200	195	580	1,09	130	29	573
300	220	640	1,18	127	39	627
400	245	680	1,28	123	47	725
500	270	710	1,39	120	53	810
600	295	720	1,5	116	59	888
700	320	740	1,61	113	63	957
800	340	740	1,73	111	66	1025
900	365	740	1,85	108	69	1085
1000	390	740	1,98	106	71	1145
1100	415	750	2,07	103	73	1200
1200	440	750	2,14	101	75	1254
1300	465	760	2,2	100	77	1305
1400	490	780	2,25	98	80	1355
1500	515	810	2,3	96	82	1403
1600	540	850	2,34	95	86	1450

Prema jednoj od teorema balističke sličnosti, za balistički slična oruđa kod kojih je isti maksimalni pritisak barutnih gasova p_m i masa baruta ω važi relacija:

$$V_{01} = V_{02} \sqrt{\frac{\varphi_2 m_2}{\varphi_1 m_1}} \quad (1)$$

Pomoću ove teoreme može se naći uslov za korišćenje tabele 1, ako je $K_m \neq 15\,000$. Neka je za zadate podatke V i m , $K_m = 15\,000$ i neka je za oruđe sa $K_m = 15\,000$, pripadajuća brzina projektila V_{15} , a masa m_{15} . Za oba oruđa masa baruta je (po teoremi) ω_{15} ista. Tada, na osnovu (1) i izraza za $\varphi = \alpha + \frac{1}{3} \frac{\omega}{m}$ ako je $\alpha = 1$, važi:

$$V_{15}^2 \left(m_{15} + \frac{1}{3} \omega_{15} \right) = V^2 \left(m + \frac{1}{3} \omega_{15} \right)$$

Stavljajući u ovaj izraz

$$\omega_{15} = \frac{m_{15} V_{15}^2}{2K_\omega}$$

i oznake

$$A_1 = \frac{m}{m_{15}} \quad (2)$$

$$A_2 = 6K_\omega \quad (3)$$

dobija se jednačina oblika:

$$V_{15}^4 + (A_2 - V^2) V_{15}^2 - A_1 A_2 V^2 = 0$$

iz koje proističe:

$$V_{15}^2 = - \frac{A_2 - V^2}{2} + \sqrt{\frac{(A_2 - V^2)^2}{4} + A_1 A_2 V^2} \quad (4)$$

U daljem postupku izračuna se K_e za dati kalibar i iz tabele 1 odredi približno K_ω . Zatim se računaju veličine:

$$m_{15} = 15\,000 d^3,$$

odnosno A_1 , A_2 i V_{15}^2 , pa se odredi koeficijent moći oruđa

$$K_{e15} = \frac{m_{15} V_{15}^2}{2d^3}$$

Pomoću ove vrednosti nalaze se iz tabela 1 vrednosti za: p_{mkr} , Δ , χ , K_ω^* i konačno izračunava

$$\omega = \frac{m_{15} V_{15}^2}{2K_\omega^*} \quad (5)$$

Ovi podaci su polazni za projektovanje oruđa sa $K_m = 15\,000$. Ukoliko su odstupanja za K_m mala (neznatna) direktno se uzimaju iz tabele 1.

Kao kriterijum za izbor optimalnog rešenja Čujev predlaže cenu koštanja (u daljem tekstu CK) artiljerijskog oruđa. Pre nego što se definiše izraz za CK koji će se koristiti pri balističkom projektovanju, daju se opšta razmatranja za određivanje CK oruđa [1].

CK artiljerijskog oruđa sastoji se od CK razvoja, proizvodnje i eksploatacije. CK razvoja (C_r) uključuje troškove naučnoistraživačkog rada (NIR-a), projektovanja, izrade opitnih modela i ispitivanja. Troškovi zavise od stepena inovacije (realizacija principijelno novih ideja je skuplja od modernizacije) i CK oruđa u procesu proizvodnje (C_p). Prema američkim izvorima važi odnos:

$$C_r = (200 \div 2000) C_p \quad (6)$$

CK proizvodnje se obično definiše izrazom

$$C_p = C_{p1} n_p^\mu \quad (7)$$

gde je:

C_{p1} — CK proizvodnje prvog komada;

n_p — broj proizvedenih oruđa;

μ — eksponent, obično se uzima u granicama $\mu \approx 0,7$.

C_{p1} se može odrediti sumiranjem rashoda kroz sve proizvodne operacije. Međutim, obično se koriste približne metode. Najčešće se koristi analogija sa sličnim oruđem, gde u proporciju ulaze mase oruđa:

$$C_{p11} = C_{p22} \frac{M_1}{M_2} \quad (8)$$

Ako su razlike u masama velike uzima se njihov odnos sa eksponentom $2/3$. Moguće je korišćenje i složenijeg izraza u obliku:

$$C_{pl} = k_p \chi^{\alpha_x} y^{\alpha_y} \quad (9)$$

gde su:

- x, y — osnovni tehnički parametri od bitnog uticaja na CK oruđa;
 k_p, α_x, α_y — parametri koji se određuju obradom raspoloživih podataka (obično metodom najmanjih kvadrata).

CK skladištenja (C_s) uključuje CK održavanja skladišta, manipulacionih poslova, zaštite i definiše se sa:

$$C_s = \int_0^T C_{s1} n_p dt \quad (10)$$

gde je:

- C_{s1} — CK skladištenja jednog oruđa godišnje,
 T — ukupno vreme čuvanja oruđa.

$$C_{s1} = C_{sk1} + \sum_i \frac{C_{bi}}{\alpha_i} + C_0 n_0 \quad (11)$$

gde je:

- C_{sk1} — CK skladištenja i opreme u godini svedena na jedno oruđe;
 C_{bi} — CK pojedinih blokova i agregata oruđa;
 α_i — amortizacioni period;
 C_0 — CK jedne osobe personala godišnje;
 n_0 — broj osoba neophodnih za opsluživanje jednog oruđa.

Ukoliko je sredstvo na eksploataciji u određenoj jedinici važi izraz (10), odnosno (11), samo je neophodno uzeti u obzir troškove tipične za jedinicu, a i dopunske troškove za obuku vojnika (utrošak municije, goriva i maziva za nastavu, amortizaciju sredstva u toku

nastave, itd.) koji se uzimaju po određenim normativima.

Na taj način, ukupni troškovi su:

$$C = C_r + C_{p1} n_p^u + \int_0^T C_{s1} n_p dt \quad (12)$$

Ne treba zaboraviti i na troškove municije koji se izražavaju analognim formulama. Pored toga, za normalnu eksploataciju i borbenu upotrebu artiljerijskih oruđa neophodan je čitav niz mehanizama, uređaja i organa za opsluživanje. To su, pre svega, remontni organi, transportna sredstva (za vuču, za dotur municije, itd.), prateća sredstva (metrološka, topografska, balistička), itd. Dakle, ukupni troškovi oruđa su:

$$C^* = C + \sum_i n_i C_i \quad (13)$$

gde je:

- C_i — CK elemenata koji opslužuju oruđe;
 n_i — broj elemenata sveden na jedno oruđe.

U svakom konkretnom slučaju neophodno je ograničiti se na najmanji mogući broj razmatranih elemenata.

Kao primer, napišimo formulu za određivanje CK u slučaju borbene upotrebe oruđa:

$$C_{bz} = \frac{C k_c n_{op}}{n_p N p_b} + \frac{(C_r + C_s) n_{op}}{N} + \frac{(C_{p0} + C_{s0}) k_o n_{op}}{p_l} + \delta C \quad (4)$$

gde je:

- k_c, k_o — koeficijenti koji uzimaju u obzir borbene gubitke;
 n_{op} — broj opaljenja neophodan za rešavanje borbenog zadatka bez uzimanja u obzir dejstva vatre protivnika i zastoja pri gađanju;
 N — vek oruđa;

p_b — verovatnoća bezotkaznog dejstva;

C_{po}, C_{so} — CK proizvodnje i skladištenja za izvođenje jednog opaljenja;

δC — dopunski troškovi.

$$\delta C = \frac{k_c n_{op}}{N} \sum_i n_i C_i \quad (15)$$

Pri balističkom projektovanju oruđa često se zanemaruje CK razvoja, što je dopustivo ako se oruđe proizvodi u velikim količinama. Takođe se zanemaruje CK skladištenja, jer se osnovna masa oruđa i municije proizvodi u ratno vreme. Tako se dobija relacija:

$$C = \left(C_{po} k_o + \frac{C_p k_c}{N} \right) n_{op} \quad (16)$$

Koeficijenti borbenih gubitaka k_o i k_c mogu se odrediti iz modela borbenih dejstava, mada se u praksi, po pravilu, određuju iz analize prethodnih ratova, često uzimajući da je $k_o = k_c$.

Izraz (16) se detaljnije analizira, tako da se C_{po} razlaže na sastavne elemente. To se radi za oruđe ZA.

CK barutnog punjenja je:

$$C_{bp} = C_\omega \omega \quad (17)$$

gde je:

C_ω — CK kilograma baruta.

CK čaure je:

$$C_{ch} = k_{ch} k_{chi} \omega \left(\frac{p_m}{\alpha_p} \right)^{h_{ch}} \quad (18)$$

gde je:

k_{ch} — koeficijent koji vezuje CK čaure sa masom punjenja razmeštenog u njoj;

k_{chi} — koeficijent ponovnog korišćenja čaure;

h_{ch} — pokazatelj uticaja p_m na CK čaure;

α_p — popravni koeficijent koji se uvođi radi pogodnijeg proračuna.

CK projektila je $C_{pr} = k_{pr} m \left(\frac{p_m}{\alpha_p} \right)^{h_{pr}} f(E_{pr})$ (19)

gde je:

k_{pr} — koeficijent koji vezuje masu projektila sa njegovom CK;

h_{pr} — pokazatelj uticaja p_m na CK projektila;

$f(E_{pr})$ — funkcija uticaja zahteva za efikasnošću projektila na CK projektila.

CK cevi je $C_c = k_{cev} M_c \left(\frac{p_m}{\alpha_p} \right)^{h_c} \left(\frac{L_c}{d} \right)^{h_{cl}}$ (20)

gde je:

k_{cev} — koeficijent koji vezuje CK cevi sa njenom masom,

h_c, h_{cl} — pokazatelji uticaja p_m i L_c na CK cevi.

Masa cevi može se odrediti približnom metodom, izvedeći proračun cevi na otpornost u preseku zadnjaka i usta cevi:

$$k_{m1} = \frac{3\sigma_e + 2.2n_z p_{mkr}}{3\sigma_e - 4.48n_z p_{mkr}} \quad (21)$$

$$k_{m2} = \frac{3\sigma_e + 2n_u p_u}{3\sigma_e - 4n_u p_u} \quad (22)$$

$$M_c = k_{cev} \rho_c \frac{\pi d^2}{4} \left\{ X_0(k_{m1} - 1) + X_m(\chi k_{m1} - 1) + (X_u - X_m) \left[\frac{\chi k_{m1}}{3} + \frac{1}{3} \sqrt{k_{m2}(1 + \chi k_{m1})} \right] \right\} \quad (23)$$

gde je:

ρ_c — zapreminska masa čelika za cev;

σ_e — dozvoljeno naprezanje čelika;

n_z, n_u — neophodne rezerve otpornosti cevi (koeficijenti sigurnosti) u preseku zadnjaka i usta cevi.

CK lafeta je:

$$C_l = k_l M_l \quad (24)$$

gde je:

k_l — koeficijent koji vezuje CK lafeta i njegovu masu;

M_l — masa lafeta.

Radius zone dejstva projektila je:

$$r_z = k_z \sqrt[3]{\alpha_z m \left(\frac{\alpha_p}{p_m} \right)^{h_z}} \quad (25)$$

gde je:

α_z — koeficijent punjenja projektila eksplozivom pri $p_m = a_p$.

Veličina n_{op} je funkcija od r_z i K_k .

Na osnovu (17) do (25) izraz (16) može se konačno napisati u obliku:

$$C = k_0 \left[C_{bp} + C_{ch} + C_{pr} + \frac{1}{N} (C_c + C_l) \right] n_{op} \quad (26)$$

To je izraz za kriterijum koji omogućava izbor optimalnog rešenja. Redosled i metodologija proračuna su: polazeći od K_e biraju se Δ , p_{mkr} , χ , $K\omega$ i računa se ω , tj. dobija se polazna varijanta balističkog rešenja. Zatim se izvodi UB proračun i nalaze parametri X_m , X_u , p_u iz kojih se određuje M_c i L_c/d . Dobljeni podaci omogućuju da se izračuna C . Dalje se koristi tzv. »metoda koordinatnog silaska«. Prvo se menja Δ (vodeći računa o ograničenjima) dok se ne dobije minimalno C . Zatim se, sa tako određenim Δ , menja p_{mkr} dok se opet ne dobije minimalno C . Zatim se sa tim Δ i p_{mkr} menja χ . Analogno se postupa sa ω , a zatim se ponovo varira Δ , p_{mkr} , χ i ω . Na taj način može se naći globalni minimum ukupnih troškova.

Izvođenje proračuna izloženim postupkom bez primene računara vrlo je teško, a primena računara uz korišćenje

tabela nema smisla. Zbog toga se koristi približna metoda, tj. posmatra se uprošćeni slučaj sa pritiskom forsiranja $p_0 = 0$, koji daje zadovoljavajuće rešenje.

Za dalji izvod koristi se izraz (6.29) iz metode Serebrjakova [1, 2]:

$$\frac{W_k}{m} = \frac{\omega}{m} \frac{1}{\Delta} \left[\frac{1 - \alpha\Delta}{\left(1 - \frac{B\theta}{2}\right)^{\frac{1}{\theta}} (1 - r_0)^{\frac{1}{\theta}}} + \alpha\Delta \right] \quad (26a)$$

gde je:

r_0 — koeficijent korisnog dejstva koji se definiše kao odnos iskorišćene energije u momentu kada je projektil na ustima cevi i raspoložive energije;

θ — odnos specifičnih toplota umanjen za jedan.

Dalje sledi:

$$X_u = \frac{\omega(1 - \alpha\Delta)}{\Delta n_s d^2} \left[\frac{1}{(1 - r_0)^{\frac{1}{\theta}} \left(1 - \frac{B\theta}{2}\right)^{\frac{1}{\theta}}} - 1 \right] \quad (27)$$

Takođe, mogu se lako izvesti relacije:

$$X_m = \frac{\omega}{\Delta n_s d^2} (1 - \alpha\Delta) [F_1(\theta) - 1] \quad (28)$$

$$F_1(\theta) = \left(\frac{2 + 2\theta}{2 + \theta} \right) \quad (29)$$

$$p_u = \frac{f\Delta}{(1 - \alpha\Delta) \left(1 - \frac{B\theta}{2}\right) \left[1 + \frac{X_u \Delta n_s d^2}{\omega(1 - \alpha\Delta)} \right]^{1 - \theta}} \quad (30)$$

$$K_k = \frac{\omega(1 - \alpha\Delta)}{\Delta n_s d^2 X_u} \left[\left(1 - \frac{B\theta}{2}\right)^{\frac{2}{\theta}} - 1 \right] \quad (31)$$

Rezultati proračuna programskih rešenja metode Čujeva

$10^{-7} K_e$ J/m ³	Δ kg/m ³	P_{mkr} MPa	χ	$10^{-4} K_{\omega}$ J/kg	CK "uj"
421,13	686,34	250,28	1,30	122,37	118638,6
421,13	600,00	203,33	1,12	129,00	110609,2
421,13	610,00	207,50	1,14	128,50	111149,7
421,13	620,00	211,67	1,15	128,00	111752,8
421,13	630,00	215,83	1,17	127,50	112426,7
421,13	640,00	220,00	1,18	127,00	113181,4
421,13	650,00	226,25	1,21	126,00	114128,8
421,13	660,00	232,50	1,23	125,00	115185,7
421,13	670,00	238,75	1,26	124,00	116366,0
421,13	680,00	245,00	1,28	123,00	117688,0
421,13	690,00	253,33	1,32	122,00	119222,8
421,13	700,00	261,67	1,35	121,00	120962,9
421,13	600,00	200,00	1,11	129,40	110592,4
421,13	600,00	215,00	1,16	127,60	110899,4
421,13	600,00	230,00	1,22	125,40	111885,4
421,13	600,00	245,00	1,28	123,00	113423,7
421,13	600,00	260,00	1,35	121,20	115328,6
421,13	600,00	275,00	1,41	119,20	117719,3
421,13	600,00	200,00	1,02	136,00	108171,3
421,13	600,00	200,00	1,12	129,00	110861,7
421,13	600,00	200,00	1,22	125,40	113180,0
421,13	600,00	200,00	1,32	121,91	115537,7
421,13	600,00	200,00	1,42	118,91	117835,9
421,13	600,00	200,00	1,52	115,45	120332,1
421,13	600,00	200,00	1,62	112,83	122642,5
421,13	600,00	200,00	1,72	111,17	124654,2
421,13	600,00	200,00	1,82	108,75	126971,4
421,13	600,00	200,00	1,92	106,92	129095,5
421,13	600,00	200,00	2,02	104,67	131444,3
421,13	600,00	200,00	2,12	101,57	134280,5
421,13	600,00	200,00	2,22	99,20	136864,2
421,13	600,00	200,00	2,32	95,50	140369,5
421,13	600,00	200,00	1,02	134,00	108400,1
421,13	600,00	200,00	1,02	130,00	109006,9
421,13	600,00	200,00	1,02	126,00	109813,3
421,13	600,00	200,00	1,02	122,00	110821,8
421,13	600,00	200,00	1,02	118,00	112037,4
421,13	600,00	200,00	1,02	114,00	113467,9
421,13	600,00	200,00	1,02	110,00	115123,7
421,13	600,00	200,00	1,02	106,00	117018,5
421,13	600,00	200,00	1,02	102,00	119169,4
421,13	600,00	200,00	1,02	98,00	121597,8

$$X_0 = \frac{\omega}{\Delta n_s d^2} \quad (32)$$

$$\frac{L_c}{d} = \frac{\omega}{\Delta n_s d^3 \chi} + \frac{X_u}{d} + 1,5 \quad (33)$$

Korišćenje formula (27) do (33) znatno je lakše nego korišćenje tabela ako se proračun izvodi na računaru.

Rezultati proračuna metodom Čujeva

Za opisani metod sastavljeno je programsko rešenje u programskom jeziku fortran za PC računar tipa 386. Konceptija programskog rešenja ogleda se u redosledu proračuna, dok se za određivanje nekih koeficijenata koristi metoda najmanjih kvadrata, a za izbor globalnog-ukupnog minimuma troškova koristi se metoda koordinatnog silaska. Rezultati proračuna programskog rešenja metode Čujeva dati su u tabelama 2 i 3:

Analizirajući rezultate proračuna (tabele 2 i 3) programskog rešenja metode Čujeva uočava se da po kriterijumu cene optimalno rešenje ima sledeće veličine parametara (red ispod naglašenog u tabeli):

$\Delta = 600 \text{ kg/m}^3$, $p_{mkr} = 200 \text{ MPa}$, $\chi = 1,02$, $K_\omega = 136,00 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$, $C = 108171,3 \text{ n.j.}$, $X_m = 0,478 \text{ m}$, $p_m = 218,63 \text{ MPa}$, $X_u = 9,573 \text{ m}$, $p_u = 32,17 \text{ MPa}$, $\omega = 11,53 \text{ kg}$, $V_0 = 362 \text{ m/s}$, $L_c/d = 69 \text{ kalibara}$, $M_c = 2346,7 \text{ kg}$.

Međutim, s obzirom na postavljene zahteve da je maksimalni pritisak barutnih gasova do 300 MPa, početna brzina oko 820 m/s, a dužina cevi oko 39 kalibara, može se primetiti da ima dovoljno prostora za usvajanje rešenja koje nema neki veliki porast cene, ali ima maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila približno zadanim vrednostima, a i dužina cevi je, takođe, u dozvoljenim granicama. Usvo-

jeno rešenje ima sledeće parametre (naglašeni red).

$\Delta = 600 \text{ kg/m}^3$, $p_{mkr} = 275 \text{ MPa}$, $\chi = 1,41$, $K_\omega = 119,20 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$, $C = 117719,3 \text{ n.j.}$, $X_m = 0,545 \text{ m}$, $p_m = 299,3 \text{ MPa}$, $X_u = 5,36 \text{ m}$, $p_u = 68,17 \text{ MPa}$, $V_0 = 825,60 \text{ m/s}$, $L_c/d = 41 \text{ kalibar}$, $\omega = 13,16 \text{ kg}$, $M_c = 2568,8 \text{ kg}$.

Za ovo rešenje vrši se dalji proračun, odnosno unutrašnjebalističko projektovanje. Na osnovu analize sprovedene u literaturi [3] usvaja se barut NCD-031 sa svim fizičko-hemijskim i balističkim karakteristikama bitnim za unutrašnjebalistički proračun:

$\varphi = 1,1169$, $\theta = 0,25$, $f = 919889 \text{ J/kg}$, $\alpha = 0,00105 \text{ m}^3/\text{kg}$, $u_1 = 6,3 \cdot 10^{-10} \text{ m/sPa}$, $2e_0 = 0,001 \text{ m}$, $k = 1,11$, $\lambda = -0,10266$.

Rezultati UB proračuna dobijaju se postojećim programskim rešenjem [4, 5] na Katedri naoružanja BTA (normalno modificiranog za rešenje konkretnog problema) i ilustruju se dijagramima zavisnosti (sl. 1) i (sl. 2).

Očigledno je da dijagrami zavisnosti unutrašnjebalističkih karakteristika u potpunosti ispunjavaju definisani cilj u uvodu.

Nakon ove faze projektovanja sledi projektovanje unutrašnje trase cevi [6] sa svim detaljima, kao što su: olučenje, prelazni konus, barutna komora, itd. Posle projektovanja unutrašnje trase cevi sledi projektovanje spoljne trase [7] i idejno rešenje metka [8].

Radi komparativne analize priložen je tabelarni pregled proračunskih karakteristika projektovanog oruđa kalibra 155 mm [9, 10].

Tabela sadrži uporedne vrednosti pojedinih parametara nekih izvedenih oruđa kalibra 155 mm iz zapadnih zemalja i cevi projektovane u ovom radu. Parametri projektovanog oruđa ispunili su sva ograničenja definisana u postavci zadatka. Upoređivanjem sa parametrima oruđa iz zapadnih zemalja uočava se da parametri projektovanog topa imaju približno srednju vrednost, a neki od njih su optimalne vrednosti, što opravdava primenu odabrane metode u radu.

Rezultati proračuna programskog rešenja metode Čujeva

X_m , m	p_m , MPa	X_u , m	p_u , MPa	V_0 , m/s	L_c/d	ω , kg	M_c , kg
0,350	272,64	7,568	48,26	742,96	55	12,82	2776,6
0,503	221,89	8,624	38,65	591,00	63	12,16	2324,4
0,483	226,41	8,510	39,45	600,00	62	12,20	2353,7
0,463	230,93	8,417	40,19	609,00	61	12,25	2388,4
0,444	235,44	8,345	40,84	618,00	61	12,30	2429,1
0,425	239,96	8,298	41,39	627,00	60	12,35	2476,6
0,408	246,71	8,101	42,95	651,50	59	12,45	2522,4
0,392	253,46	7,934	44,43	676,00	58	12,55	2577,1
0,376	260,20	7,799	45,81	700,50	57	12,65	2642,0
0,360	266,94	7,695	47,06	725,00	56	12,75	2718,5
0,345	275,94	7,502	48,92	753,33	55	12,85	2813,0
0,330	284,94	7,348	50,62	781,67	53	12,96	2924,7
0,502	218,28	8,878	37,41	583,80	65	12,12	2337,0
0,509	234,54	7,847	43,02	616,20	58	12,29	2299,7
0,518	250,76	7,012	49,15	666,20	52	12,51	2304,7
0,528	266,94	6,330	55,73	725,00	48	12,75	2347,1
0,536	283,14	5,807	61,75	776,00	44	12,94	2442,0
0,545	299,30	5,360	68,17	825,60	41	13,16	2568,8
0,478	218,63	9,573	32,17	362,00	69	11,53	2346,7
0,503	218,26	8,839	37,75	591,00	64	12,16	2346,4
0,518	218,05	8,506	40,90	666,20	62	12,51	2417,4
0,533	217,84	8,209	44,14	755,91	60	12,86	2488,5
0,546	217,65	7,973	47,09	831,27	58	13,19	2566,9
0,563	217,43	7,722	50,67	900,55	56	13,58	2636,3
0,576	217,25	7,546	53,53	962,67	55	13,90	2719,2
0,584	217,13	7,440	55,41	1019,33	54	14,11	2816,3
0,597	216,95	7,294	58,23	1070,00	53	14,42	2900,5
0,607	216,81	7,189	60,43	1117,31	52	14,67	2993,1
0,621	216,63	7,068	63,23	1169,44	51	14,98	3079,1
0,639	216,37	6,913	67,24	1238,57	50	15,44	3154,9
0,655	216,17	6,804	70,44	1325,00	49	15,81	3241,5
0,680	215,83	6,649	75,67	1425,50	48	16,42	3317,1
0,485	218,52	9,351	33,69	502,67	68	11,70	2302,1
0,500	218,31	8,937	36,90	362,00	66	12,06	2219,9
0,515	218,08	8,560	40,36	700,50	63	12,45	2146,5
0,532	217,85	8,217	44,06	781,67	61	12,85	2081,3
0,550	217,59	7,905	48,02	849,00	60	13,29	2023,8
0,570	217,33	7,623	52,25	911,00	58	13,76	1973,5
0,590	217,04	7,368	56,76	1065,00	57	14,26	1930,2
0,613	216,73	7,139	61,56	1085,00	55	14,79	1893,4
0,637	216,41	6,933	66,68	1227,00	54	15,37	1863,2
0,663	216,06	6,751	72,11	1305,00	54	16,00	1839,4

Karakteristike projektovanih oruđa kalibra 155 mm

Oruđe i poreklo	Haubica 155 mm FH-77 (III)	Haubica 155 mm M198 (SAD)	Haubica 155 mm M114 (SAD)	Top-haubica 155 mm TRIL40 (F)	Top-haubica 155 mm GHN-45 (A)	Projektovani top 155 mm
Kalibar d. mm	155	155	155	155	155	155
Masa projektila m, kg	43	43,5	43,8	43,6	46,5	46
Masa barutnog punjenja ω , kg	10,8	11,5	6,3	10,5	15,5	13,16
Početna brzina projektila V_0 , m/s	815	823	564	810	897	824
Energija E_0 , kJ	14281	147,32	6966	14303	18305	15645
$K_e 10^9$, kJ/m ³	3,83	3,96	1,87	3,84	4,92	4,21
$K\omega$, kJ/kg	1,32	1,28	1,11	1,36	1,18	1,19
$K_m 10^3$, kg/m ³	11,55	11,68	11,76	11,71	12,22	12,35

Sl. 1 — Dijagram zavisnosti $p(x)$ i $V(x)$ Sl. 2 — Dijagram zavisnosti $p(t)$, $V(t)$ i $X(t)$

Zaključak

Rad prezentira rešenje jednog zadatka unutrašnjebalističkog projektovanja oruđa kalibra 155 mm analitičkom metodom Čujeva, koja kao kriterijum za izbor optimalnog rešenja koristi cenu koštanja artiljerijskog sistema.

Osnovni cilj ovog rada definisan je u naslovu, a ogleda se u izboru optimalnih balističkih parametara, i to prvenstveno: najpogodnijeg modela i tipa baruta, mase baruta, zapremine barutne komore, na osnovu cene koštanja artiljerijskog oruđa. Kasnije se vrši projektovanje unutrašnje trase cevi sa svim detaljima kao što su: olučenje, prelazni konus, barutna komora, itd. Posle projektovanja unutrašnje trase cevi sledi projektovanje spoljne trase i idejno rešenje metka, što se zbog obimnosti u ovom radu ne daje. Ovako projektovano oruđe, u poređenju sa postojećim oruđima istog kalibra, na zapadu ima vrlo dobre, čak i optimalne karakteristike, što opravdava primenu i verifikuje odabranu metodu proračuna.

Tendencija usavršavanja postojećih i razvoj novih oruđa jeste da se poveća domet (preko 40 km) i dijapazon dome-

ta koji se mogu ostvariti promenom barutnog punjenja (npr. korišćenjem modularnih barutnih punjenja). Radi se i na tome da se poveća preciznost, tačnost i brzina gađanja (najmanje 4 metka za 15 sekundi). Usavršava se i municija, a povećava uspešnost dejstva na cilju, vrši se osposobljavanje za izvršavanje zadataka protivoklopne borbe na velikim daljinama (razvojem »inteligentne« municije sa senzorskim upaljačem ili sa samonavođenjem na završnom delu putanje). Povećava se polje dejstva po pravcu i po visini i usavršavaju i automatizuju uređaji za pokretanje cevi. Smanjuje se ukupna masa oruđa, a time i masa cevi, radi prenošenja i prevoženja vazдушnim putem ili se projektuju samohodna oruđa koja ostvaruju bolja svojstva taktičke i strategijske pokretljivosti. To su tendencije razvoja artiljerijskih sistema za naredni period koje bi trebalo da budu putokaz i smernice budućeg razvoja i kod nas.

Realizacija svih ovih budućih zadataka zavisi prvenstveno od raspoloživih materijalnih, tehničko-tehnoloških mogućnosti zemlje, a korišćenje kriterijuma cene koštanja artiljerijskog sistema je opravdano samo ako se postiže bolja efikasnost artiljerijskog sistema.

Literatura:

- [1] J. V. Čujev: Projektovanje stvoljnih kompleksov, Mašinstrojenje, Moskva, 1976.
- [2] M. Cvetković: Unutrašnje balističko projektovanje, TŠC, Zagreb, 1983.
- [3] Baruti jugoslovenske proizvodnje, VTI, Beograd, 1981.
- [4] M. Cvetković: Unutrašnja balistika, CVTŠ, Zagreb, 1985.
- [5] Lj. Tančić: Zbirka zadataka iz unutrašnje balistike, VTA, Beograd, 1994.
- [6] Z. Pavelić: Definisanje barutnog punjenja i projektovanje cevi kalibra 155 mm — Diplomski rad, VVTŠ, Zagreb, 1991.

- [7] Lj. Tančić: Dimenzionisanje cevi artiljerijskog oruđa pomoću računara, VTG-1/90, Beograd, 1990.
- [8] N. Kršić: Osnovi konstrukcije municije, TŠC, Zagreb, 1973.
- [9] Z. Ristić: Osnove naoružanja, VVTŠ, Zagreb, 1989.
- [10] M. Kalezić: Tendencije razvoja naoružanja u svetu, predavanje, CVTŠ, Zagreb, 1988.