

## Primena principa komore visokog/niskog pritiska na optimizaciju pogona municije za automatski bacač granata

Dr Slobodan Jaramaz, dipl.inž.<sup>1)</sup>  
Dr Dejan Micković, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Radi optimizacije pogonskih i konstrukcionih parametara određenog automatskog bacača granata, izvršena su teorijska i eksperimentalna istraživanja. U teorijskim razmatranjima, posebna je pažnja posvećena modeliranju strujanja dvofazne smeše barutnih gasova i nesagorelog baruta iz komore visokog pritiska u komoru niskog pritiska, kao i produžetku sagorevanja baruta u komori niskog pritiska i cevi bacača. Razvijena je i gradijentna jednačina pritiska za definisanje raspodele pritiska barutnih gasova u komori niskog pritiska i cevi bacača. Formirano programsko rešenje, zasnovano na razvijenom teorijskom modelu, omogućava optimizaciju pogonskih i konstrukcionih karakteristika automatskih bacača granata. Tokom eksperimentalnih istraživanja, proučavan je uticaj vrste baruta, odnosa zapremina komora, broja i dimenzija otvora na pregradnom zidu između komora, kao i uticaj pokrivke na zidu na unutrašnjobalističke parametre. Sve ove uticaje razvijeno programsko rešenje adekvatno simulira.

*Ključne reči:* Automatski bacač granata, unutrašnja balistika, teorijski model, kompjuterski program, eksperimentalna ispitivanja.

### Korišćene oznake i simboli

$a, b, n$	– konstante u zakonu sagorevanja baruta,	$V_{pr}$	– brzina projektila,
$c_p$	– specifična toplota barutnih gasova pri konstantnom pritisku,	$w$	– relativna sagorela debljina svoda barutnog zrna,
$c_v$	– specifična toplota barutnih gasova pri konstantnoj zapremini,	$w_1$	– relativna sagorela debljina svoda barutnih zr-na u komori niskog pritiska,
$c_b$	– specifična toplota baruta,	$W_0$	– zapremina komore visokog pritiska,
$C_1, C_2, C_3$	– koeficijenti oblika barutnog zrna,	$W_1$	– zapremina komore niskog pritiska,
$2e_0$	– debljina svoda barutnog zrna,	$X$	– put projektila u cevi,
$2e$	– izgorela debljina barutnog zrna,	$z$	– maseni udeo baruta sagorelog u komori visokog pritiska,
$2e_1$	– izgorela debljina barutnih zrna u komori niskog pritiska,	$z_1$	– maseni udeo sagorelog baruta za barutna zrna u komori niskog pritiska,
$f$	– sila baruta,	$\alpha$	– kovolumen barutnih gasova,
$f_p$	– sila pripale,	$\delta$	– gustina baruta,
$m_{pr}$	– masa projektila,	$\varepsilon$	– maseni udeo čvrste faze u smeši pri isticanju kroz otvore,
$\dot{m}$	– maseni protok barutnih gasova kroz otvore,	$\phi$	– poroznost (zapreminski udeo gasne faze),
$\dot{m}_b$	– maseni protok baruta kroz otvore,	$\eta$	– maseni udeo barutnih gasova isteklih kroz otvore,
$M$	– molarna masa barutnih gasova,	$\varphi$	– koeficijent fiktivne mase projektila,
$p_{iz}$	– pritisak probijanja obloge barutnog punjenja i dodatne pokrivke,	$\varphi_1$	– parcijalni koeficijent fiktivne mase projektila,
$p_0$	– pritisak forsiranja,	$\kappa$	– koeficijent adijabatskog širenja barutnih gasova,
$p_1$	– srednji balistički pritisak u komori niskog pritiska i cevi bacača,	$\mu$	– koeficijent isticanja kroz otvor,
$\hat{A}$	– univerzalna gasna konstanta ( $\hat{A} = 8.3144 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),	$\rho$	– gustina gasovitih produkata sagorevanja baruta,
$s$	– površina poprečnog preseka cevi,	$\omega$	– masa barutnog punjenja,
$S_{ot}$	– ukupna površina poprečnog preseka otvora između komora,	$\omega_p$	– masa pripale,
$t$	– vreme,	$\xi$	– maseni udeo baruta isteklog kroz otvore
$T_{sag}$	– temperatura sagorevanja baruta,	$NP$	– niskog pritiska,

<sup>1)</sup> Mašinski fakultet, 11000 Beograd, 27. marta 80

VP – visokog pritiska.

### Uvod

OSNOVNI koncept automatskih bacača granata poznat je već duže od trideset godina a poslednjih desetak godina automatski bacači se nalaze u žiži interesovanja stručnjaka koji se bave opremanjem armija. Razlog je činjenica da automatski bacači granata omogućava rešavanje vrlo konkretnih operativnih zadataka, što je uslovalo njihovo uvođenje u naoružanje, kao dodatnog oružja, na nivou pešadijske čete.

Radi pravilnog sagledavanja taktičkih razloga za uvođenje automatskih bacača granata u naoružanje pešadijskih četa, najbolje je sagledati njihovu ulogu u odnosu na drugo naoružanje koje se na istom nivou koristi za borbu protiv prostornih ciljeva, tj. u odnosu na ulogu automatskih oružja i minobacača.

Kada se razmatraju tri osnovna kriterijuma - mobilnost, vatrena moć i mogućnost samostalnog održavanja - prema kojima su organizovane pešadijske jedinice, postaje očigledno da svakoj jedinici treba obezbediti sredstva za brzo i efikasno rešavanje svih, pa i najkritičnijih situacija u kojima se ona može naći, bez mogućnosti dobijanja vatrene podrške od viših nivoa. U takvoj je situaciji neophodno da se raspolože sredstvima koja omogućavaju brzu i efikasnu koncentraciju vatre na pretnju neprijatelja, čim je ona identifikovana. Automatski bacači granata su namenjeni za ispunjavanje te uloge najčešće na nivou čete [1,2].

Moglo bi se tvrditi, da teška automatska oružja i minobacači u okviru pešadijske čete omogućavaju ostvarivanje ovih ciljeva, ali to nije tačno. Upravo na ograničenjima u njihovoj upotrebi, zasnovana je upotreba automatskih bacača granata. Automatski bacači granata omogućavaju gađanje prostornih ciljeva, na relativno velikim dometima, korišćenjem direktne i indirektno vatre. Pri tome se ostvaruje preciznost koja je, u najmanju ruku, jednaka preciznosti minobacača pri znatno većim brzinama gađanja. Te činjenice omogućavaju da se automatskim bacačima granata gađaju ciljevi koji se ne mogu gađati minobacačima (npr. gađanje kroz vrata i prozore) i ostvaruju znatno veće gustine vatre.

Sledeća važna prednost automatskih bacača granata, u odnosu na minobacačem, jeste činjenica da oni, praktično, nemaju minimalnu daljinu gađanja (osim sigurnosne granice za armiranje upaljača, koja obično iznosi 10 m do 20 m od usta cevi oružja, zavisno od korišćene municije). Pored toga, automatski bacači granata mogu da vrše vrlo brz prenos vatre na ciljeve postavljene na različitim dometima, uključujući pri tome i vrlo bliske ciljeve (postavljene na 50 m do 100 m). Takođe, nišandžija može pri gađanju automatskim bacačem pratiti pokretni cilj s istom lakoćom kao i kad prati cilj automatskim oružjem. Automatski bacači granata su podesni za instalaciju na nekoliko različitih tipova postolja i platformi (oklopna vozila, brodovi, torpedni čamci, helikopteri itd.) [1].

Glavni ciljevi dejstva automatskih bacača granata su trupe izvan zaklona ili iza lakih zaklona, kao i lako oklopljena vozila. U operativnom smislu, automatski bacači granata čine vezu između teških automatskih oružja i minobacača; oni imaju preciznost, kratko vreme reakcije i veliku brzinu gađanja (delimično) automatskih oružja, kao i prostorno dejstvo minobacača. Prema tome, pogodni su za brzo dejstvo po individualnim ciljevima, ili za gađanje relativno velikih površina u cilju trenutnog sprečavanja pokreta neprijatelja. Automatski bacači granata, montirani na vozila, su pogodni i za izviđačka i prepadna dejstva.

Automatski bacači granata su korisni u svim onim situacijama (ofanzivnim, defanzivnim, za vreme patroliranja) gde je imperativ trenutna neutralizacija iznenadnih pretnji neprijateljske pešadije izvan zaklona, što je bila tradicionalna uloga teških automatskih oružja. Međutim, bez pretenzija da u potpunosti zamene teška automatska oružja, automatski bacači granata mogu da obezbede dodatnu vatrenu moć, pri čemu deluju kao veza između pešadijskih oruđa s posrednim i neposrednim gađanjem.

Savremeni bacači granata su u unutrašnjobalističkom smislu ponovo aktuelizovali pogon projektila korišćenjem principa komore visokog/niskog pritiska. Ovaj se princip prvi puta koristio u Nemačkoj u Drugom svetskom ratu. Osnovne ideje na kojima je zasnovana primena ovoga principa su:

- smanjenje maksimalnog pritiska barutnih gasova u komori niskog pritiska (NP), tj. u cevi oruđa; na taj način smanjena su naprezanja projektila i oružja u toku procesa opaljenja što za posledicu ima lakši sistem poboljšane efikasnosti,
- poboljšano pripaljivanje barutnog punjenja smeštenog u komori visokog pritiska (VP) i ujednačenje odvijanje unutrašnjobalističkih procesa, od opaljenja do opaljenja.

Povećana složenost konstrukcije, bez posebnog dobitka u unutrašnjobalističkim performansama na primenjenim sistemima, uslovala je da se ovaj unutrašnjobalistički koncept zaboravi. Pojava automatskih bacača granata i podvesaka za puške učinila je ovaj koncept ponovo interesantnim zbog njegovih opisanih prednosti.

U toku razvoja municije za automatski bacač granata 30 mm, javila se potreba poboljšavanja pripaljivanja barutnog punjenja i smanjenja rasturanja početnih brzina granata u rafalnoj paljbi. Ovi su zahtevi uslovali da se s klasične unutrašnjobalističke koncepcije pređe na koncepciju komore visokog/niskog pritiska. Pri tome je realizacija ove koncepcije morala poštovati sva ograničenja koja su proisticala iz činjenice da se ona prilagođava postojećem sistemu [3].

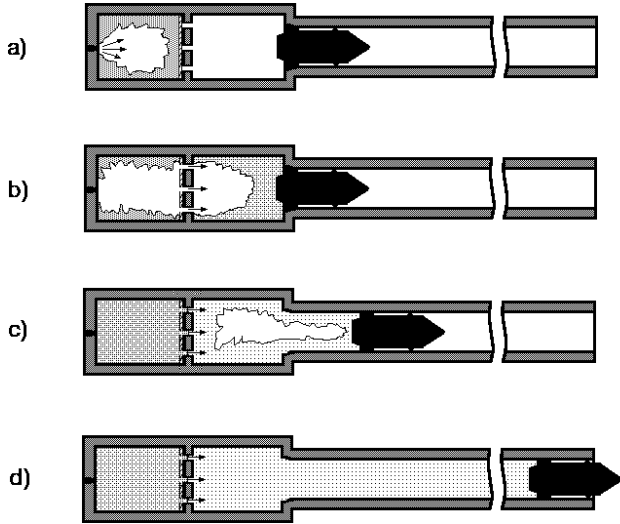
U nastavku ovog rada dato je matematičko modeliranje unutrašnjobalističkog ciklusa bacača granata s komorom visokog/niskog pritiska, kao i verifikacija programskog rešenja kroz poređenje s eksperimentalnim podacima.

### Matematičko modeliranje unutrašnjobalističkog procesa kod sistema sa komorom visokog/niskog pritiska

#### Unutrašnjobalistički ciklus

Proces opaljenja počinje aktiviranjem inicijalne kapisle i pripaljivanjem barutnog punjenja smeštenog u komori visokog pritiska (sl.1a). Sagorevanje barutnog punjenja se odvija u konstantnoj zapremini komore visokog pritiska, sve dok pritisak barutnih gasova ne dostigne vrednost  $p_{z}$  potrebnu za probijanje obloge barutnog punjenja i dodatne pokrivke. Tada dolazi do isticanja barutnih gasova i zapaljenih barutnih zrna kroz otvore na pregradi između komore visokog pritiska i komore niskog pritiska (sl.1b). Deo barutnog punjenja sagoreva na visokom pritisku koji vlada u komori VP, a deo barutnog punjenja koji prolazi kroz otvore nastavlja da sagoreva u komori NP. Kada pritisak barutnih gasova u komori NP dostigne vrednost pritiska forsiranja  $p_0$ , projektil u cevi bacača se pokreće

(sl.1c). Tokom procesa opaljenja prvo završava sagorevanje baruta u komori VP, jer je na visokom pritisku sagorevanje baruta znatno brže. Tada kroz otvore protiču samo barutni gasovi, dok je u komori NP sagorevanje baruta u završnoj fazi (sl.1d). Nakon sagorevanja baruta, projektil se u cevi bacača dalje ubrzava uz ekspanziju barutnih gasova. Unutrašnjobalistički ciklus se završava kada dno projektila prođe kroz ravan usta cevi.



Slika 1. Unutrašnjobalistički ciklus sistema sa komorom visokog/niskog pritiska

#### Osnovne pretpostavke

U matematičkom modeliranju unutrašnjobalističkog ciklusa sistema s komorom visokog/niskog pritiska, usvajaju se u unutrašnjoj balistici uobičajene pretpostavke:

- Pripaljivanje barutnih zrna je trenutno i jednovremeno;
- Sagorevanje baruta odvija se po geometrijskom zakonu;
- Barut sagoreva u svakom trenutku procesa na srednjem balističkom pritisku  $p$ , pri čemu je zakon brzine sagorevanja:

$$r = a p^n + b \quad (1)$$

- Veličine stanja barutnih gasova povezane su Abel-Nebeovom jednačinom stanja:

$$p \left( \frac{1}{\rho} - \alpha \right) = \frac{\mathfrak{R}}{M} T_{sag} \quad (2)$$

- U svakom trenutku procesa smeša gasovitih produkata sagorevanja baruta nalazi se u stanju termodinamičke ravnoteže;
- Sistem ne razmenjuje nikakvu energiju sa okolnom sredinom;
- Sistem oruđe - projektil je nedeformabilan;
- Sekundarni radovi barutnih gasova proporcionalni su ubrzanju projektila i uzimaju se u obzir uvođenjem konstantnog koeficijenta fiktivne mase  $\varphi$  i
- Ureživanje vodećeg prstena je trenutno i projektil počinje da se kreće u trenutku postizanja pritiska forsiranja  $p_0$ .

#### Osnovni sistem jednačina

Sistem jednačina, koje opisuju fizičke procese tokom opaljenja metka u sistemu s komorom visokog/niskog pritiska, usvajanjem navedenih pretpostavki dobija sledeći oblik:

- a) Komora visokog pritiska

- jednačina energije:

$$p = \frac{f_p \omega_p + f \omega (z - \eta)}{W_0 - \frac{\omega (1 - z - \xi)}{\delta} - \omega \alpha (z - \eta)} \quad (3)$$

- jednačine sagorevanja baruta:

$$w = \frac{e}{e_0} \quad (4)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{ap^n + b}{e_0} \quad (5)$$

$$z = C_1 w + C_2 w^2 + C_3 w^3 \quad (6)$$

- jednačina isticanja barutnih gasova kroz otvore:

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\dot{m}}{\omega} \quad (7)$$

- jednačina isticanja baruta kroz otvore:

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{\dot{m}_b}{\omega} \quad (8)$$

- a) Komora niskog pritiska

- jednačina energije:

$$p_1 = \frac{f \omega \xi z_1 + f \omega \eta - (\kappa - 1) \varphi m_{pr} \frac{V_{pr}^2}{2}}{W_1 - \frac{\omega \xi (1 - z_1)}{\delta} - \omega \alpha (\eta + \xi z_1) + sX} \quad (9)$$

- jednačine sagorevanja baruta:

$$w_1 = \frac{e_1}{e_0} \quad (10)$$

$$\frac{dw_1}{dt} = \frac{a p_1^n + b}{e_0} \quad (11)$$

$$z_1 = C_1 w_1 + C_2 w_1^2 + C_3 w_1^3 \quad (12)$$

- jednačine kretanja projektila:

$$p_1 s = \varphi m_{pr} \frac{dV_{pr}}{dt} \quad (13)$$

$$V_{pr} = \frac{dX}{dt} \quad (14)$$

#### Strujanje barutnih gasova kroz otvore između komore visokog pritiska i komore niskog pritiska

Radi određivanja masenih protoka gasova i barutnih zrna ( $\dot{m}$  i  $\dot{m}_b$ ) potrebno je da se posebno razmatra dvofazno strujanje kroz otvore između komore visokog pritiska (VP)

i komore niskog pritiska (NP).

Dvofazna struja barutnih gasova i barutnih zrna kroz otvore između komora tretira se kao homogena smeša čvrste i gasovite faze. Tada je koeficijent adijabatske smeše pri isticanju kroz otvore definisan izrazom:

$$\kappa_m = \frac{(1-\varepsilon)c_p + \varepsilon c_b}{(1-\varepsilon)c_v + \varepsilon c_b} \quad (15)$$

Maseni udeo čvrste faze u smeši pri isticanju kroz otvore određuje se iz uslova homogenosti smeše u komori VP i dat je izrazom:

$$\varepsilon = \frac{1-\xi-z}{1-\xi-\eta} \quad (16)$$

Veličinu  $\varepsilon$  treba razlikovati od poroznosti (zapremninskog udela gasne faze) koja je definisana jednačinom:

$$\phi = 1 - \frac{\omega(1-z-\xi)}{\delta W_0} \quad (17)$$

Isticanje dvofazne homogene smeše kroz otvore između komora definisano je u svakom trenutku odnosom pritiska barutnih gasova u komori VP i pritiska barutnih gasova na dno komore NP. Kritična vrednost pritiska na dno komore NP je:

$$p_{1,krit} = p \left( \frac{2}{\kappa_m + 1} \right)^{\frac{\kappa_m}{\kappa_m - 1}} \quad (18)$$

Razlikujemo dva slučaja:

1)  $p_{1,z} \leq p_{1,krit}$

Pritisak barutnih gasova na dno komore niskog pritiska  $p_{1,z}$  manji je od kritične vrednosti pritiska. U ovom sučaju  $p_{1,z}$  praktično ne utiče na isticanje smeše iz komore visokog pritiska. Maseni protok smeše kroz otvore definisan je u ovom slučaju sledećim izrazom:

$$\dot{m}_{sm} = \mu \cdot p \cdot S_{ot} \sqrt{\kappa_m \left( \frac{2}{\kappa_m + 1} \right)^{\frac{\kappa_m + 1}{\kappa_m - 1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{(1-\varepsilon)f}}} \quad (19)$$

Brzina uticanja smeše kroz otvore u komoru niskog pritiska određena je izrazom:

$$V_u = \sqrt{\frac{2\kappa_m}{\kappa_m + 1} \cdot \sqrt{(1-\varepsilon)f}} \quad (20)$$

2)  $p_{1,z} > p_{1,krit}$

Kada je pritisak barutnih gasova na dno komore niskog pritiska veći od kritičnog pritiska, njegov uticaj na isticanje smeše iz komore visokog pritiska postaje značajan. Maseni protok smeše kroz otvore definisan je tada sledećim izrazom:

$$\dot{m}_{sm} = \mu \cdot p \cdot S_{ot} \sqrt{\frac{2\kappa_m}{(\kappa_m - 1)(1-\varepsilon)f}} \cdot \sqrt{\left( \frac{p_{1,z}}{p} \right)^{\frac{2}{\kappa_m}} - \left( \frac{p_{1,z}}{p} \right)^{\frac{\kappa_m + 1}{\kappa_m}}} \quad (21)$$

Brzina uticanja smeše kroz otvore u komoru niskog pritiska u ovom slučaju je:

$$V_u = \sqrt{\frac{2\kappa_m}{\kappa_m - 1} \cdot \sqrt{(1-\varepsilon)f}} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{p_{1,z}}{p} \right)^{\frac{\kappa_m - 1}{\kappa_m}}} \quad (22)$$

Maseni protok barutnih gasova ( $\dot{m}$ ) i maseni protok barutnih zrna ( $\dot{m}_b$ ) u homogenoj dvofaznoj smeši određuju se sledećim jednačinama:

$$\dot{m} = (1-\varepsilon)\dot{m}_{sm} \quad (23)$$

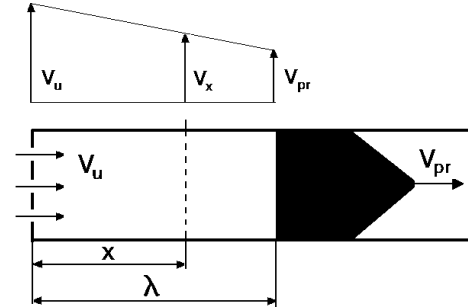
$$\dot{m}_b = \varepsilon\dot{m}_{sm} \quad (24)$$

*Raspodela pritiska barutnih gasova u komori niskog pritiska i cevi bacača*

Raspodela pritiska barutnih gasova u komori niskog pritiska je izuzetno značajna, jer od nje zavise početna brzina projektila i maksimalni pritisak barutnih gasova u cevi bacača.

Kod sistema s komorom visokog/niskog pritiska, uspostavlja se u komori NP tokom opaljenja karakterističan profil pritiska koji se ne javlja kod klasičnih sistema. U cilju određivanja profila pritiska, polazi se od uobičajene aproksimacije Lagrangea, prema kojoj je gustina smeše barutnih gasova i nesagorelih barutnih zrna konstantna u prostoru iza granate tokom kretanja kroz cev bacača. Tada se u komori niskog pritiska i cevi bacača uspostavlja linearni profil brzine strujanja dvofazne smeše (sl.2):

$$V_x = Kx + V_u \quad (25)$$



Slika 2. Raspodela brzina strujanja u komori niskog pritiska i cevi bacača

Konstanta  $K$  u izrazu (25) određuje se iz graničnog uslova na dnu projektila i jednaka je:

$$K = \frac{V_{pr} - V_u}{\lambda} = \frac{V_u}{\lambda} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \quad (26)$$

Promena brzine strujanja definisana je totalnim diferencijalom:

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} \quad (27)$$

Kada se u jednačinu (27) uvrste parcijalni izvodi:

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} = x \frac{dK}{dt} \quad (28)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = K \quad (29)$$

dobija se:

$$\frac{dV_x}{dt} = K_0 x + KV_u \quad (30)$$

gde je  $K_0 = K^2 + dK/dt$ . Konstanta  $K_0$  određuje se iz jednačine (30) napisane za ravan dna projektila ( $x=\lambda$ ,  $V=V_{pr}$ ) u sledećem obliku:

$$K_0 = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dV_{pr}}{dt} - K \frac{V_u}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dV_{pr}}{dt} - \frac{V_u^2}{\lambda^2} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \quad (31)$$

Jednačina kretanja projektila (13) izražena preko pritiska na dno projektila, dobija sledeći oblik:

$$p_{1,pr} s = \varphi_1 m_{pr} \frac{dV_{pr}}{dt} \quad (32)$$

Parcijalni koeficijent fiktivnosti  $\varphi_1$  obuhvata sekundarne radove barutnih gasova utrošene na obrtanje projektila i savlađivanje trenja pri kretanju projektila kroz cev bacača. Kombinovanjem jednačina (31 i 32) za konstantu  $K_0$  dobija se:

$$K_0 = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{s}{\varphi_1 m_{pr}} p_{1,pr} - \frac{V_u^2}{\lambda^2} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \quad (33)$$

Zamenom konstanti  $K$  i  $K_0$  u (30), konačno se dobija izraz za promenu brzine strujanja dvofazne smeše na udaljenosti  $x$  od dna komore NP:

$$\frac{dV_x}{dt} = \left[ \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{s}{\varphi_1 m_{pr}} p_{1,pr} - \frac{V_u^2}{\lambda^2} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \right] x - \frac{V_u^2}{\lambda} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \quad (34)$$

Veza između pritiska i brzine strujanja barutnih gasova data je diferencijalnom jednačinom:

$$\frac{\partial p_{1,x}}{\partial x} = -\rho_\lambda \frac{dV_x}{dt} \quad (35)$$

gde je  $\rho_\lambda$  gustina homogene dvofazne smeše (u svakom trenutku procesa  $\rho_\lambda = \text{const}$  u komori niskog pritiska i cevi bacača iza projektila).

Zamenom jednačine (30) u jednačinu (35), nakon integraljenja dobija se:

$$p_{1,x} = -\frac{\rho_\lambda}{2} K_0 \lambda^2 - \rho_\lambda K V_u \lambda + g(t) \quad (36)$$

Konstanta  $g(t)$  za svaki trenutak procesa određuje se iz jednačine (36) napisane za ravan dna projektila:

$$g(t) = p_{1,pr} + \frac{\rho_\lambda}{2} K_0 \lambda^2 + \rho_\lambda K V_u \lambda \quad (37)$$

pa je:

$$p_{1,x} = p_{1,pr} + \frac{\rho_\lambda}{2} K_0 \lambda^2 \left( 1 - \frac{x^2}{\lambda^2} \right) + \rho_\lambda K V_u \lambda \left( 1 - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (38)$$

Zamenom konstanti  $K$  i  $K_0$  izrazima (26 i 33), i uvođenjem ukupne mase dvofazne smeše u prostoru iza projektila  $\omega' = \rho_\lambda s \lambda$ , za pritisak na udaljenosti  $x$  od dna komore NP dobija se konačno:

$$p_{1,x} = p_{1,pr} \left[ 1 + \frac{\omega'}{2 \varphi_1 m_{pr}} \left( 1 - \frac{x^2}{\lambda^2} \right) \right] - \frac{\rho_\lambda V_u^2}{2} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \left( 1 - \frac{x}{\lambda} \right)^2 \quad (39)$$

Jednačina (39) omogućava određivanje pritiska na udaljenosti  $x$  od dna komore NP kada je poznat pritisak na dno projektila. Masa i gustina dvofazne smeše u prostoru iza projektila određuju se iz izraza:

$$\omega' = \omega (\eta + \xi) \quad (40)$$

$$\rho_\lambda = \frac{\omega'}{W_1 + sX} \quad (41)$$

Grupisanjem članova za integraljenje po  $x$ , jednačina (39) postaje:

$$\int_0^\lambda p_{1,x} dx = \left[ p_{1,pr} \left( 1 + \frac{\omega'}{2\varphi_1 m_{pr}} \right) - \frac{\rho_\lambda V_u^2}{2} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \right] \int_0^\lambda dx + \frac{\rho_\lambda V_u^2}{\lambda} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \int_0^\lambda x dx - \left[ p_{1,pr} \frac{\omega'}{2\varphi_1 m_{pr} \lambda^2} + \frac{\rho_\lambda V_u^2}{2\lambda^2} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \right] \int_0^\lambda x^2 dx \quad (42)$$

Integral na levoj strani jednačine (42) definiše srednji balistički pritisak u prostoru iza projektila ( $p_1$ ).

$$\int_0^\lambda p_{1,x} dx = \lambda p_1 \quad (43)$$

Posle integraljenja dobija se:

$$\lambda p_1 = p_{1,pr} \left( \lambda + \frac{\omega' \lambda}{2\varphi_1 m_{pr}} - \frac{\omega' \lambda}{6\varphi_1 m_{pr}} \right) - \frac{\rho_\lambda \lambda V_u^2}{6} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \quad (44)$$

Nakon sređivanja jednačine (44), konačno se dobija izraz koji povezuje pritisak na dno projektila  $p_{1,pr}$  sa srednjim balističkim pritiskom  $p_1$ :

$$p_{1,pr} = \frac{p_1 + \frac{\rho_\lambda V_u^2}{6} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right)}{1 + \frac{\omega'}{3\varphi_1 m_{pr}}} \quad (45)$$

Pritisak na dno komore niskog pritiska  $p_{1,z}$  određuje se iz jednačine (39) za  $x=0$ :

$$p_{1,z} = p_{1,pr} \left( 1 + \frac{\omega'}{2\varphi_1 m_{pr}} \right) - \frac{\rho_\lambda V_u^2}{2} \left( \frac{V_{pr}}{V_u} - 1 \right) \quad (46)$$

Treba naglasiti da se uvođenjem  $V_u=0$  u jednačine (45 i 46) one svode na poznate relacije između srednjeg balističkog pritiska, pritiska na zatvarač i pritiska na dno projektila koje važe kod klasičnih unutrašnjobalističkih sistema.

#### Programsko rešenje

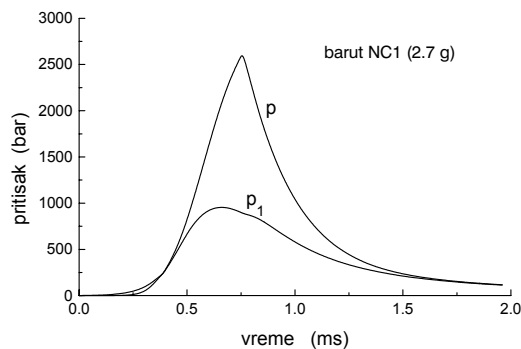
Osnovni sistem jednačina koje opisuju unutrašnjobalistički ciklus sistema sa komorom visokog/niskog pritiska sastoji se od običnih diferencijalnih

jednačina prvog reda (jednačine (5,7,8,11,13 i 14)) i algebarskih jednačina.

Za rešavanje sistema diferencijalnih jednačina primenjena je numerička metoda Runge-Kutta četvrtog reda s konstantnim korakom integracije. Numeričkom analizom se došlo do optimalnog koraka integracije po vremenu  $10^{-5}$  s.

Za proračun procesa opaljenja automatskog bacača granata s komorom visokog/niskog pritiska, formirano je programsko rešenje VINIP u programskom jeziku FORTRAN.

Na sl.3 su prikazani rezultati proračuna (pomoću programa VINIP) srednjeg pritiska barutnih gasova u komori visokog pritiska ( $p$ ) i komori niskog pritiska ( $p_1$ ) tokom unutrašnjobalističkog ciklusa automatskog bacača granata 30 mm.



Slika 3. Rezultati proračuna promene srednjeg pritiska u komori visokog pritiska ( $p$ ) i komori niskog pritiska ( $p_1$ )

### Ekperimentalna istraživanja i verifikacija modela

Ekperimentalna istraživanja su obavljena na automatskom bacaču granata 30 mm u saradnji sa Kompanijom "Sloboda"- Čačak. Ova istraživanja su imala dva glavna cilja:

- optimizaciju pogonskih i konstrukcionih karakteristika pri korišćenju koncepta komore visokog/niskog pritiska i
- verifikaciju razvijenog teorijskog modela.

Proučavan je uticaj na unutrašnjobalističke parametre vrste baruta, odnosa zapremina komora, broja i dimenzija otvora na pregradnom zidu između komora, kao i uticaj pokrivke na zidu. Mogućnost promene ispitivanih faktora bio je ograničen konfiguracijom postojećeg bacača.

Uticaj vrste baruta na osnovne unutrašnjobalističke karakteristike prikazan je u tabeli 1.

Tabela 1. Uticaj vrste baruta na unutrašnjobalističke parametre

Barutno punjenje		$p_m$ [bar]	$p_{1,zm}$ [bar]	$V_0$ [m/s]
2.7 g NC1	eksperiment	2605	1456	176.4
	proračun	2629	1491	177.3
2.3 g NG1	eksperiment	2982	1875	184.3
	proračun	3034	1893	184.2

Napomene:  $P_m$  - maksimalni pritisak u komori visokog pritiska  
 $P_{1,zm}$  - maksimalni pritisak na dno komore niskog pritiska  
 $V_0$  - brzina granate na ustima bacača

Dati podaci pokazuju dobru saglasnost eksperimentalnih i proračunskih rezultata. U odnosu na postojeće unutrašnjobalističke zahteve, nitrocelulozni barut NC1 daje bolje rezultate od dvobaznog baruta NG1, pa su sva dalja ekperimentalna istraživanja obavljena sa barutom NC1.

Uticaj odnosa zapremina na osnovne balističke karakteristike dat je u tabeli 2; podaci pokazuju dobru

saglasnost eksperimentalnih i proračunskih rezultata.

Tabela 2. Uticaj odnosa zapremina komora na unutrašnjobalističke parametre

$W_0/W_1$		$p_m$ [bar]	$p_{1,zm}$ [bar]	$V_0$ [m/s]
10	eksperiment	2605	1456	176.4
	proračun	2629	1491	177.3
140	eksperiment	2769	1401	177.2
	proračun	2778	1421	178.4

Barutno punjenje je smešteno u celuloznu školjku. Radi poboljša uniformnosti unutrašnjobalističkih ciklusa, otvori na pregradnom zidu između komora su prekrivani mesinganim pokrivkama različite debljine. Rezultati ovih istraživanja su dati u tabeli 3. I ovaj je uticaj adekvatno procenjen programskim rešenjem VINIP.

Tabela 3. Uticaj pokrivke na unutrašnjobalističke parametre

Pokrivka		$p_m$ [bar]	$p_{1,zm}$ [bar]	$V_0$ [m/s]
celuloid	eksperiment	2605	1456	176.4
	proračun	2629	1491	177.3
celuloid + 0.1 mm mesing	eksperiment	2785	1607	178.6
	proračun	2827	1555	179.3
celuloid + 0.2 mm mesing	eksperiment	2961	1677	180.3
	proračun	3002	1644	181.0

Za određivanje uticaja broja i prečnika otvora u pregradnom zidu između komora, izvršena su ispitivanja sa 6 otvora prečnika 3.0 mm, 6 otvora prečnika 3.3 mm i 9 otvora prečnika 2.1 mm. Rezultati ovih istraživanja su prikazani u tabeli 4 i, kao i prethodni, pokazuju dobru saglasnost eksperimentalnih i teorijskih rezultata.

Tabela 4. Uticaj otvora u pregradnom zidu na unutrašnjobalističke parametre

Barutno punjenje	Otvori (broj x prečnik)		$p_m$ [bar]	$p_{1,zm}$ [bar]	$V_0$ [m/s]
2.7 g NC1	6 x 3.0 mm	eksperiment	2605	1456	176.4
		proračun	2629	1491	177.3
3.0 g NC1	6 x 3.3 mm	eksperiment	3518	1661	183.5
		proračun	3561	1665	184.8
3.0 g NC1	9 x 2.1 mm	eksperiment	2430	1438	178.2
		proračun	2462	1451	178.3

Izbor optimalnih pogonskih i konstrukcionih karakteristika sistema s komorama visokog/niskog pritiska zavisi od konkretnih unutrašnjobalističkih zahteva.

### Zaključak

Na osnovu prethodno napisanog, može da se zaključi sledeće:

- Automatski bacači granata predstavljaju savremena sredstva čija je primena izuzetno aktuelizovana poslednjih godina.
- U unutrašnjobalističkom smislu automatski bacači granata su reafirmisali primenu koncepta komore visokog/niskog pritiska ističući njegove prednosti.
- Razvijen je matematički model za sisteme sa komorom visokog/niskog pritiska i oformljeno je programsko rešenje VINIP.
- Matematički model je verifikovan kroz poređenje s rezultatima eksperimentalnih istraživanja uticaja različitih faktora na unutrašnjobalističke karakteristike.
- Ekperimentalna istraživanja i verifikovani teorijski model omogućavaju optimizaciju pogonskih i

konstrukcionih karakteristika sistema s komorom visoko/niskog pritiska.

### Literatura

- [1] LENARTS, J. Automatic Grenade Launchers and their Role, *Military Technology*, 1987, no.10, p.48-53
- [2] JARAMAZ, S. Između minobacača i tromblona. *Report*, 1998, no.3, p.30-31.
- [3] JARAMAZ, S., MICKOVIĆ, D. *Istraživanje mogućnosti optimizacije pogona granate za automatski bacač granata 30 mm*. Elaborat TD-8/2000, Mašinski fakultet, Beograd, 2000.

Rad primljen: 10.7.2001.god.

