

Mr Obrad Čabarkapa,  
potpukovnik, dipl. inž.  
Uprava za školstvo i obuku GŠ VJ,  
Beograd

## UTICAJ POČETNE MASE BARUTA NA MODEL DVOFAZNOG STRUJANJA U CEVI AUTOMATSKE PUŠKE

UDC: 531.57 : 519.237.7

### Rezime:

Jednofaktorskim planom eksperimenta u radu je izvršena analiza svih polaznih parametara koji se javljaju u procesu dvofaznog strujanja u cevi automatske puške. Prikazan je potpuni plan faktorskog eksperimenta 2<sup>4</sup> početne mase baruta sa odabranim parametrima i analiziran njihov uticaj na izlazne karakteristike. Kompletna analiza (disperziona i regresiona) izvršena je za maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila, kao veoma bitne izlazne karakteristike svakog oružja.

*Ključne reči:* faktorska analiza, početna masa baruta, maksimalni pritisak barutnih gasova, početna brzina projektila, disperziona analiza, regresiona analiza.

---

## INFLUENCE OF STARTING POWDER MASS ON A TWO-PHASE FLOW MODEL IN THE AUTOMATIC RIFLE TUBE

### Summary:

The one-factor plan of the performed experiment gave us a chance to analyze all starting parameters that appear in the process of two-phase flow in the tube of the automatic rifle. Here we present a comprehensive plan of the factoric experiment 2<sup>4</sup> starting mass of powder with chosen parameters and analyze their effects on the outgoing characteristics. A complete analysis (dispersive and regressive) is performed for the maximum pressure of powder gases and the starting speed of the projectile, as very important outgoing characteristics of any weapon.

*Key words:* factoric analysis, starting mass of powder, maximum pressure of powder gases, starting speed of the projectile, dispersive analysis, regressive analysis.

---

### Uvod

Klasični unutrašnjebalistički modeli uspešno su rešavali probleme koje je postavljala praksa. Ustanovljeno je da daju pojednostavljenu i vrlo grubu aproksimaciju fizičke slike procesa opaljenja u cevi oružja. Klasični modeli posmatraju za-

preminu iza projektila (ma kolika ona bila) kao jednu celinu i daju srednje vrednosti parametara (pritisak, brzina i put projektila, temperatura barutnih gasova kao i vreme trajanja procesa) koji egzistiraju u gasodinamičkoj struji.

Pored parametara koje analizira klasična teorija postoje i brojni drugi (poro-

znost, gustina, energija barutnih gasova, brzina barutnih gasova i barutnih zrna...) koje treba istražiti. Zajednička karakteristika svih parametara jeste da u određenom momentu u zapremini iza projektila imaju različite vrednosti, što upravo daju dvofazni modeli, odnosno gasodinamičke teorije strujanja. Razvojem računara i numeričke matematike sve više se usavršavaju modeli dvofaznog strujanja, gde dve faze sačinjavaju barutna zrna (čvrsta faza) i barutni gasovi (gasovita faza) kao produkti sagorevanja barutnih zrna. Primenom teorije dvofaznih modela strujnog procesa [1, 2] u znatnoj meri se poboljšavaju dosadašnje analize procesa opaljenja koje je davala klasična teorija. Teorija na osnovama dvofaznog strujanja omogućava analizu uticaja početne mase baruta ( $m_{b0}$ ) na izlazne karakteristike opaljenja, kao i svih ostalih polaznih parametara koji se javljaju u procesu opaljenja (ima ih oko 30).

Predmet istraživanja u ovom radu je faktorska analiza uticaja početne mase baruta, kao jednog vrlo bitnog parametra, na model dvofaznog strujanja kod automatske puške 7,62 mm M70, kao i doprinos njegovog uticaja na maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila. Srednja vrednost početne mase baruta za analizirano oružje iznosi 0,00162 kg, a dozvoljena odstupanja  $\pm 1,54\%$  [3, 4].

### **Faktorska analiza uticaja polaznih parametara**

Da bi se što realnije izvršio izbor parametara koji utiču na model dvofaznog strujanja, koji će se sa početnom masom baruta analizirati u faktorskom

planu eksperimenta, potrebno je prethodno izvršiti analizu svih parametara koji učestvuju u procesu opaljenja. Radi sticanja uvida u karakter promena izlaznih karakteristika, pri proračunu su za svaki parametar varirane vrednosti, i to za maksimalno i minimalno dozvoljena odstupanja od srednje vrednosti, dok su ostali parametri zadržavani na konstantnom nivou. Drugim rečima, sproveden je jednofaktorski plan eksperimenta.

Na osnovu pojedinačne analize uticaja svakog od parametara na model dvofaznog strujanja dolazi se do zaključaka da sledeći parametri bitno utiču na maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila, kao veoma bitne izlazne karakteristike procesa opaljenja: jedinična brzina sagorevanja baruta ( $u_{z0}$ ), početna masa barutnog zrna ( $m_{z0}$ ), početna masa baruta ( $m_{b0}$ ), masa projektila ( $m$ ), kovolumen barutnih gasova ( $\alpha$ ), početna površina barutnog zrna ( $S_{z0}$ ) i početni presek cevi ( $S_c$ ).

Pri promeni u granicama dozvoljenih odstupanja navedeni parametri samostalno najviše utiču na maksimalni pritisak i početnu brzinu. Pored samostalnog uticaja, navedeni parametri utiču na izlazne karakteristike i u kombinaciji sa drugim faktorima. Odgovor na pitanje kakav je taj uticaj daje faktorska analiza.

Pregled srednjih vrednosti odabranih parametara, koji će se analizirati u faktorskom planu eksperimenta sa procentualno dozvoljenim odstupanjem od svoje srednje vrednosti [3, 4] dat je u tabeli 1. U tabeli su, takođe, prikazani iznosi promene maksimalnog pritiska barutnih gasova i početne brzine projektila („rast“ i „pad“ od srednje vrednosti), pri

promeni odabranih parametara u dozvoljenim granicama odstupanja.

Tabela 1

Parametar	Srednja vrednost	Jed. mere	Odst. od sr. vred.	p <sub>max</sub>		V <sub>0</sub>	
				bar	%	m/s	%
u <sub>20</sub>	7,767 E-10	m/s	±1,2%	3222	+2,45	735,5	+1,13
				3069	-2,42	718,6	-1,19
m <sub>20</sub>	4,127 E-7	kg	±1,3%	3219	+2,35	733,3	+0,83
				3072	-2,32	721,2	-0,84
m <sub>30</sub>	0,00162	kg	±1,54%	3196	+1,62	735,4	+1,12
				3093	-1,65	718,9	-1,15
S <sub>20</sub>	2,905 E-6	m <sup>2</sup>	±1,3%	3219	+2,35	733,2	+0,81
				3071	-2,35	721,1	-0,86

Dalja ispitivanja koja podrazumevaju faktorsku, disperzionu i regresionu analizu uticaja početne mase baruta na izlazne karakteristike (p<sub>max</sub> i V<sub>0</sub>), modela dvofaznog strujanja u cevi automatske puške, vršena su u kombinaciji sa sledećim parametrima: početnom masom barutnog zrna, jediničnom brzinom sagorevanja baruta i početnom površinom barutnog zrna.

Za prethodno odabrana četiri faktora određuju se po dva nivoa, i to: minimalne i maksimalne dozvoljene vrednosti parametara:

1. X<sub>1</sub> (faktor A) – početna masa barutnog zrna,
2. X<sub>2</sub> (faktor B) – jedinična brzina sagorevanja baruta,
3. X<sub>3</sub> (faktor C) – početna masa baruta,
4. X<sub>4</sub> (faktor D) – početna površina barutnog zrna.

Nivoi faktora koji se analiziraju su:

$$\begin{aligned}
 X_{1,\min} &= 4,180651 \text{ E-7 kg}; & X_{2,\min} &= 7,675 \text{ E-10 m/s}; \\
 X_{1,\max} &= 4,073349 \text{ E-7 kg}; & X_{2,\max} &= 7,859 \text{ E-10 m/s}; \\
 X_{3,\min} &= 0,0015948 \text{ kg}; & X_{4,\min} &= 2,867235 \text{ E-6 m}^2; \\
 X_{3,\max} &= 0,001645 \text{ kg}; & X_{4,\max} &= 2,942765 \text{ E-6 m}^2;
 \end{aligned}$$

Ovakvi eksperimenti sa dva nivoa često se nazivaju ekstremni eksperimenti. U potpunom faktorskom eksperimentu treba napraviti sve kombinacije svih ni-

voa faktora, i one se obično nazivaju eksperimentalne jedinice. Nakon izbora broja faktora i broja nivoa vrši se kodiranje vrednosti faktora, tako da gornji nivo bilo kog faktora uvek ima vrednost +1, a donji nivo uvek vrednost -1. To se postiže pogodnom smenom, čime se znatno pojednostavljuje postupak planiranja i obrade rezultata faktorskog eksperimenta.

Postupak variranja i kodiranja signifikantnih (najuticajnijih) faktora vrši se na sledeći način:

$$X_{i,0} = \frac{X_{i,\max} + X_{i,\min}}{2}; i = 1 \dots 4 \quad (1)$$

$$W_i = \frac{X_{i,\max} - X_{i,\min}}{2}; i = 1 \dots 4 \quad (2)$$

Kodiranjem signifikantnih faktora dobija se:

$$X_{i,g} = \frac{X_{i,\max} - X_{i,0}}{W_i}; i = 1 \dots 4 \quad (3)$$

$$X_{i,d} = \frac{X_{i,\min} - X_{i,0}}{W_i}; i = 1 \dots 4 \quad (4)$$

Oznake X<sub>i,g</sub>; X<sub>i,d</sub>; X<sub>i,0</sub> i W<sub>i</sub> (prema izrazima 1 do 4), predstavljaju kodirane veličine signifikantnih faktora. Rezultati dobijeni variranjem i kodiranjem signifikantnih faktora prikazani su u tabeli 2.

Tabela 2

X <sub>1,min</sub>	4,180651 E-7	X <sub>1,d</sub>	-1	X <sub>1,0</sub>	4,127 E-7	W <sub>1</sub>	-0,053651 E-7
X <sub>1,max</sub>	4,073349 E-7	X <sub>1,g</sub>	+1				
X <sub>2,min</sub>	7,675 E-10	X <sub>2,d</sub>	-1	X <sub>2,0</sub>	7,767 E-10	W <sub>2</sub>	0,092 E-10
X <sub>2,max</sub>	7,859 E-10	X <sub>2,g</sub>	+1				
X <sub>3,min</sub>	0,0015948	X <sub>3,d</sub>	-1	X <sub>3,0</sub>	0,00162	W <sub>3</sub>	0,0000251
X <sub>3,max</sub>	0,001645	X <sub>3,g</sub>	+1				
X <sub>4,min</sub>	2,867235 E-6	X <sub>4,d</sub>	-1	X <sub>4,0</sub>	2,905 E-6	W <sub>4</sub>	0,037765 E-6
X <sub>4,max</sub>	2,942765 E-6	X <sub>4,g</sub>	+1				

## Disperziona analiza

Svaki mereni rezultat  $Y_{ij}$ , za određenu vrednost nezavisno promenljive (za određeni nivo faktora) može se prikazati sledećim matematičkim modelom:

$$Y_{ij} = \mu + T_j + \varepsilon_{ij}$$

gde je:

$\mu$  – opšta vrednost za sva posmatranja (istinita vrednost) kada nema uticaja ni faktora ni greške;

$T_j$  – uticaj j-tog nivoa faktora na rezultat (efekat nivoa faktora);

$\varepsilon_{ij}$  – ukupna greška eksperimenta (sadrži slučajne greške merenja i slučajne efekte randomiziranih spoljnih uticaja koji nisu uzeti kao faktori).

Uzimajući u obzir dejstva svih faktora, kao i međudejstva faktora, dobija se opšta suma kvadrata (OSK):

$$\begin{aligned} \text{OSK} = & \text{SKA} + \text{SKB} + \text{SKAB} + \text{SKC} + \\ & + \text{SKAC} + \text{SKBC} + \text{SKABC} + \text{SKD} + \\ & + \text{SKAD} + \text{SKBD} + \text{SKCD} + \text{SKABD} + \\ & + \text{SKACD} + \text{SKBCD} + \text{SKABCD} + \\ & + \text{SKG} \end{aligned}$$

Ove sume kvadrata imaju stepene slobode, koji se računaju prema sledećem, na primer:

SKA	$(a - 1)$ ,
SKAB	$(a - 1)(b - 1)$ ,
SKABC	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$ ,
SKABCD	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)(d - 1)$ ,
SKG	$abcd(m - 1)$ ,
OSK	$abcdm - 1$

Ove sume računaju se pomoću metode kontrasta, a kontrasti matričnom metodom na sledeći način: množi se sva-

ka od kolona matrice, sa elementima +1 i -1 sa kolonom Y rezultata eksperimenta. Tu se vrši ukupno  $(2n-1)$  puta i na taj način dobijaju kontrasti svakog od izvora promene. Za ispitivanje uticaja četiri faktora, ortogonalni kontrasti se računaju prema sledećem, na primer:

$$\begin{aligned} 8A = & -(1) + a - b + ab - c + ac - \\ & - bc + abc - d + ad - bd - cd + abd + \\ & + acd - bcd + abcd \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8AB = & (1) - a - b + ab + c - ac - \\ & - bc + abc + d - ad - bd + cd + abd - \\ & - acd - bcd + abcd \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8ABC = & (1) - a - b + ab - c + ac + \\ & + bc - abc + d - ad - bd - cd + abd + \\ & + acd + bcd - abcd \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 8ABCD = & (1) - a - b + ab - c + ac + \\ & + bc - abc - d + ad + bd + cd - abd - \\ & - acd - bcd + abcd \end{aligned}$$

Efekti ili izvori promena su svi faktori i sva njihova međudejstva. Kod ovakvih faktorskih eksperimenata  $2n$ , njih uvek ima  $2n - 1$ . Pri tome broj izvora promene iznosi  $2n - 1 = 15$ .

Sume kvadrata za sve faktore računaju se prema formuli:

$$SKC_i = \frac{(\text{kontrast})^2}{m \cdot 2^n}$$

gde je:

$n$  – broj faktora,

$m$  – broj ponavljanja na istom nivou faktorskog plana (kombinaciji nivoa faktora).

Opšta suma iznosi:

$$OS = \sum_j^{2^n} Y_j$$

Opšta suma kvadrata jednaka je:

$$OSK = SK_i - OS^2/N$$

gde  $SK_i$  predstavlja sumu kvadrata svih nivoa svih faktora.

Kada se govori o grešci treba naglasiti da je disperziona analiza statistička metoda koja se zasniva na određenim zakonitostima. Kod ove metode, za rangiranje značaja svakog od izvora promene koristi se Fišerova raspodela [5]. Najpre je potrebno definisati određene pojmove. Srednji kvadrat je količnik između sume kvadrata svakog od izvora promena i stepena slobode tog izvora promena. Isto važi i za srednji kvadrat greške koji predstavlja količnik sume kvadrata greške i stepena slobode greške:

$$SKV_i = \frac{SKC_i}{SS_i}$$

$$SKVG = \frac{SKG}{SSG}$$

gde je:

$SKV_i$  – srednji kvadrat i-tog izvora promene,

$SKVG$  – srednji kvadrat greške,

$SKC_i$  – suma kvadrata i-tog izvora promene,

$SKG$  – suma kvadrata greške,

$SS_i$  – broj stepeni slobode i-tog izvora promene,

$SSG$  – broj stepeni slobode greške,

$i = 1, 2, \dots, (2n - 1)$  – broj izvora promene.

Kada se odrede sve navedene vrednosti, sledi utvrđivanje značaja svakog izvora promena. Najpre se za svaki od izvora utvrdi odnos:

$$v_{0i} = \frac{SKV_i}{SKVG}$$

Nakon toga se, takođe za svaki izvor promena, iz tablica Fišerove raspodele (za izabrani nivo poverenja, broj stepeni slobode svakog izvora promena  $SS_i$  i broj stepeni slobode greške  $SSG$ ) očitava vrednost Fišerovog kriterijuma  $c_i = f(V, SS_i, SSG)$ . U slučaju da nema ponavljanja na svakom nivou faktornog plana eksperimenta, stepen slobode svakog izvora promene iznosi 1, pa se iz tablice Fišerove raspodele uzima samo jedan broj  $c$ . Da bi se odredilo da li je neki od izvora promena značajan, ili neznačajan, tj. koliko je njegovo dejstvo na rezultate eksperimenta, potrebno je izvršiti upoređenje  $v_{0i}$  i  $c_i$ . Ako je:

$v_{0i} \geq c_i$  tada je i-ti izvor promena značajan, tj. utiče na rezultate eksperimenta i tvrdnja je data sa nivoom poverenja  $V$ ,  
 $v_{0i} < c_i$  tada i-ti izvor promena nije značajan, tj. ne utiče na rezultate eksperimenta.

Mera relativne značajnosti jednog od izvora promena u odnosu na drugi je odnos veličina parametra  $v_{0i}$ , za odgovarajuće izvore promena. Što je vrednost tog parametra veća to je dati izvor promena značajniji i ima veći uticaj na rezultate eksperimenta.

Rezultati za ortogonalne kontraste, sume kvadrata, parametar značaja izvora promene i stepene slobode posmatranih faktora, na osnovu disperzione analize [5] za maksimalni pritisak i početnu brzinu, prikazani su u tabeli 3.

Za kriterijum  $c = 16,3$  (Fišerov kriterijum za nivo poverenja  $V = 99\%$ ), iz tabele 3 se vidi da je vrednost  $v_0$  za faktore A, B, C i D znatno veća od ovog kriterijuma. Na osnovu veličine ovog parametra za početnu masu baruta ( $v_{0C} = 257985$ ), njegov uticaj na maksimalni pritisak veoma je značajan.



Faktor	Maksimalni pritisak				Početna brzina			
	(8C <sub>i</sub> )	(SKC <sub>i</sub> )	(SS <sub>i</sub> )	v <sub>0</sub>	(8C <sub>i</sub> )	(SKC <sub>i</sub> )	(SS <sub>i</sub> )	v <sub>0</sub>
A	1179	86877,562	1	534631,2	98	600,25	1	2401
B	1225	93789,062	1	577163,5	136	1156	1	4624
C	819	41922,562	1	257985,0	134	1122,25	1	4489
AC	21	27,5625	1	169,6	-2	0,25	1	1
BC	23	33,0625	1	203,5	0	0	1	0
ABC	-1	0,0625	1	0,4	0	0	1	0
D	1179	86877,562	1	534631,2	98	600,25	1	2401
CD	21	27,5625	1	169,6	-2	0,25	1	1
ACD	-3	0,5625	1	3,5	2	0,25	1	1
BCD	-1	0,0625	1	0,4	0	0	1	0
ABCD	-1	0,0625	1	0,4	0	0	1	0
OSK	309685,9375		15		3481,75		15	
SKO	0		0		0		0	

Iz tabele je uočljivo da i međudejstva faktora AC, BC i CD takođe utiču na maksimalni pritisak, ali u znatno manjoj meri od samostalnog dejstva faktora.

Matematički model za maksimalni pritisak, zasnovan na ovim rezultatima, ima sledeću formu:

$$Y_{ijkl} = \mu + u_{z0i} + m_{z0j} + S_{z0k} + m_{b0l} + m_{z0j}u_{z0i} + m_{z0j}m_{b0l} + u_{z0i}m_{b0l} + m_{z0j}S_{z0k} + u_{z0i}S_{z0k} + m_{b0l}S_{z0k} + \varepsilon_{ijkl} \quad (5)$$

gde je:

$Y_{ijkl}$  – vrednost rezultata eksperimenta za bilo koju kombinaciju faktora (vrednost maksimalnog pritiska);

$\mu$  – srednja vrednost svakog od faktora (posmatranih veličina);

$u_{z0i}$  – doprinos jedinične brzine sagorevanja baruta maksimalnom pritisku;

$m_{z0j}$  – doprinos početne mase barutnog zrna maksimalnom pritisku;

$m_{b0k}$  – doprinos početne mase baruta maksimalnom pritisku;

$m_{z0j}u_{z0i}$  – doprinos međudejstva početne mase barutnog zrna i jedinične brzine sagorevanja maksimalnom pritisku;

$m_{z0j}m_{b0l}$  – doprinos međudejstva početne mase barutnog zrna i početne mase baruta maksimalnom pritisku;

$u_{z0i}m_{b0l}$  – doprinos međudejstva jedinične brzine sagorevanja i početne mase baruta maksimalnom pritisku;

$m_{z0j}S_{z0k}$  – doprinos međudejstva početne mase barutnog zrna i početne površine barutnog zrna maksimalnom pritisku;

$U_{z0i}S_{z0k}$  – doprinos međudejstva jedinične brzine sagorevanja i početne površine barutnog zrna maksimalnom pritisku;

$m_{b0l}S_{z0k}$  – doprinos međudejstva početne mase baruta i početne površine barutnog zrna maksimalnom pritisku;

$\varepsilon_{ijkl}$  – greška eksperimenta;

$i = j = k = l = 1 = 2$  – broj nivoa svakog od faktora.

Analogno za početnu brzinu projektila, za kriterijum  $c = 21,2$  (Fišerov kriterijum za nivo poverenja  $V = 99\%$ ) iz tabele 3 se vidi da je vrednost  $v_0$  za faktore A, B, C i D veća od ovog kriterijuma, tj. njihov uticaj na rezultate eksperimenta je značajan. Na osnovu veličine ovog parametra za početnu masu baruta ( $v_{0c} = 4489$ ) njegov uticaj na početnu brzinu projektila je značajan.

Uticaji međudejstva faktora na početnu brzinu projektila su zanemarivi. To znači da ova četiri faktora utiču na početnu brzinu projektila, pri čemu je relativni uticaj faktora B i C (prema odnosu srednjih kvadrata ili  $v_0$ ) skoro dva puta veći od uticaja faktora A i D.

Matematički model za početnu brzinu projektila, zasnovan na ovim rezultatima glasi:

$$Y_{ijkl} = \mu + u_{z0i} + m_{boj} + m_{z0k} + S_{z0l} + \varepsilon_{ijkl} \quad (6)$$

gde je:

$Y_{ijkl}$  – vrednost rezultata eksperimenta za bilo koju kombinaciju faktora (vrednost početne brzine),

$\mu$  – srednja vrednost svakog od faktora (posmatranih veličina),

$u_{z0i}$  – doprinos jedinične brzine sagorevanja baruta početnoj brzini,

$m_{boj}$  – doprinos početne mase baruta početnoj brzini,

$m_{z0k}$  – doprinos početne mase barutnog zrna početnoj brzini,

$S_{z0l}$  – doprinos početne površine barutnog zrna početnoj brzini,

$\varepsilon_{ijkl}$  – greška eksperimenta,

$i = j = k = l = 1 = 2$  – broj nivoa svakog od faktora.

Matematički modeli disperzije analize za maksimalni pritisak i početnu brzinu (izrazi 5 i 6) koriste se u regresionoj analizi rezultata eksperimenta i u suštini znače da se maksimalni pritisak i početna brzina projektila rasipaju oko neke srednje vrednosti pod uticajem analiziranih faktora (A, B, C i D).

### Regresiona analiza

Regresiona analiza za svaku od kombinacija nivoa faktora daje odgovor

na pitanje: kolika je srednja vrednost izlaznih karakteristika i koliko iznosi veličina rasipanja oko srednje vrednosti?

Dobijenim rezultatima za maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila analizom adekvatnosti, potvrđena je tvrdnja  $v_0 \leq c$ , što znači da je model adekvatan, pa će regresioni polinomi odslikavati posmatrani proces sa izabranim nivoom poverenja.

Za veličinu maksimalnog pritiska barutnih gasova kodirani regresioni polinom glasi:

$$p_m = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 \quad (7)$$

Ovde je  $b_0$  srednja vrednost maksimalnog pritiska dobijena pri izvođenju eksperimenta, prema ranije definisanom faktornom planu. To je kodirani regresioni polinom (svaki od faktora koji su njegovi članovi može da ima samo dve vrednosti: +1 kada su na gornjem nivou i -1 kada su na donjem nivou).

Regresionim polinomom (7), uz primenu vrednosti regresionih koeficijenata za maksimalni pritisak barutnih gasova, dobijaju se dve vrednosti maksimalnog pritiska, odnosno njegova gornja i donja granica:

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

$p_m = 3430,6875$  kada su faktori na gornjem nivou,

$p_m = 2862,4375$  kada su faktori na donjem nivou.

U odnosu na srednju vrednost maksimalnog pritiska dobija se odstupanje od  $\pm 284,125$  bara. Samostalni doprinos  $m_{b0}$  iznosi 51,1875 bara (oko 18%), što ukazuje na to da ovi parametri bitno utiču na maksimalni pritisak barutnih gasova, jer ga promene za 9% od svoje srednje vrednosti.

Za veličinu početne brzine zrna kodirani regresioni polinom glasi:

$$V_0 = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 \quad (8)$$

Analogno objašnjenju datom za prethodni regresioni polinom, ovde je  $b_0$  srednja vrednost početne brzine dobijena pri izvođenju eksperimenta, po ranije definisanom faktorskom planu. Regresionim polinomom (8), uz primenu vrednosti regresionih koeficijenata za početnu brzinu projektila, dobijaju se dve vrednosti početne brzine, odnosno njena gornja i donja granica:

$$V_0 = 726,875 + 6,125m_{z0} + 8,5u_{z0} + 8,375m_{b0} + 6,125z_0$$

$V_0 = 765$  m/s kada su faktori na gornjem nivou,

$V_0 = 697,75$  m/s kada su faktori na donjem nivou.

U odnosu na srednju vrednost početne brzine zrna dobija se odstupanje od  $\pm 29,125$  m/s. Od toga samostalni doprinos  $m_{b0}$  iznosi 8,375 m/s (oko 29%), što ukazuje na to da ovi parametri bitno utiču na početnu brzinu projektila, jer je promene za 4% od svoje srednje vrednosti.

## Zaključak

Od velikog broja polaznih parametara koji utiču na izlazne karakteristike analiziran je uticaj početne mase baruta u kombinaciji sa jediničnom brzinom sagorevanja baruta, početnom masom barutnog zrna, i početnom površinom barutnog zrna. Inače, ovi parametri, samostalno i u međusobnoj kombinaciji najviše utiču na izlazne unutrašnje balističke karakteristike. Potpunim faktorskim planom eksperimenta  $2^4$  obuhvaćeni su maksimalni pritisak barutnih gasova i početna brzina projektila, kao važne izlazne karakteristike procesa opaljenja. Postupkom disperzione i regresione analize izvršeno je rangiranje uticaja početne mase baruta u kombinaciji sa odabranim parametrima, formirani su regresioni polinomi, dobijene srednje vrednosti za maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila i prikazan doprinos početne mase baruta u ukupno dozvoljenom odstupanju od srednje granice.

### Literatura:

- [1] Cvetković, M.: Unutrašnja balistika, VIZ, Beograd, 1998.
- [2] Tančić, I.J.: Numeričko rešenje nestacionarnog modela unutrašnje balistike malih kalibara, doktorska disertacija, Beograd, 1997.
- [3] Propis o kvalitetu proizvoda (PKP), SOUR Prvi partizan RO Namenska proizvodnja, Užice, 1987.
- [4] Commission Internationale Permanente (CIP), Geneve, 1985.
- [5] Pantelić, I.: Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta, Radnički univerzitet Radivoj Čirpanov, Novi Sad, 1976.
- [6] Čabarkapa, O.: Istraživanje polaznih parametara za model dvofaznog strujanja u cevi oružja, magistarski rad, Beograd, 2000.