

FAKTORSKA ANALIZA POLAZNIH PARAMETARA KOJI NAJVIŠE UTIČU NA MODEL DVOFAZNOG ŠTRUJANJA U CEVI AUTOMATSKE PUŠKE

UDC: 623.522:623.442.45]:519.237.7

Rezime:

U radu je jednofaktorskim planom eksperimenta izvršena analiza svih polaznih parametara koji se javljaju u procesu dvofaznog strujanja u cevi automatske puške. Nakon ove analize odabrani su oni parametri koji dominantno utiču na izlazne karakteristike. Dat je potpuni plan faktorskog eksperimenta 2⁴ odabranih parametara, gde je analiziran doprinos svakog od parametara, kao i njihovo međudejstvo na izlazne karakteristike. Kroz disperzivnu i regresivnu analizu izvršeno je rangiranje uticaja parametara, određeni su regresivni polinomi sa regresivnim koeficijentima i date granice odstupanja od srednje vrednosti. Kompletna analiza izvršena je za maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila, kao veoma bitne izlazne karakteristike svakog oružja. Na osnovu rezultata proračuna dat je tabelarni i grafički trodimenzionalni prikaz parametara strujanja u zavisnosti od vremena i puta projektila.

Ključne reči: faktorska analiza, polazni parametri, maksimalni pritisak barutnih gasova, početna brzina projektila, disperziona analiza, regresivna analiza.

FACTOR ANALYSIS OF INPUT PARAMETERS WITH THE STRONGEST EFFECTS ON THE TWO PHASE FLOW MODEL IN AN AUTOMATIC RIFLE BARREL

Summary:

The one-factor experiment design has been applied in the analysis of all input parameters occurring in the two phase flow process in automatic rifle barrels. The parameters predominantly influencing input characteristics have been chosen afterwards. A complete factor experiment plan is given for 2⁴ chosen parameters, with the analysis of each particular parameter as well as of their effects on output characteristics. Parameter effects are ranked, regression polynomials with regression coefficients are determined and average value deviation limits are given by dispersion and regression analyses. The complete analysis is carried out for the maximum pressure of powder gases and the muzzle velocity as two significant output characteristics of all arms. Based on calculation results, tabelar and graphical 3D presentation of flow parameters is given as a function of projectile time and trajectory.

Key words: factor analysis, input parameters, maximum pressure of powder gases, projectile muzzle velocity, dispersion analysis, regression analysis.

Uvod

Godinama su klasični unutrašnjebalistički (UB) modeli uspešno rešavali probleme koji su se javljali u praksi. Usta-

novljeno je da klasični modeli daju pojednostavljenu i vrlo grubu aproksimaciju fizičke slike procesa opaljenja u cevi oružja. Geometrijska zakonitost sagorevanja barutnog punjenja (gde se nalazi i po

nekoliko hiljada barutnih zrna), identifikuje se sa sagorevanjem jednog barutnog zrna određenog geometrijskog oblika. Klasični modeli posmatraju zapreminu 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 drugi parametri (poroznost, gustina, energija barutnih gasova, brzina barutnih gasova i barutnih zrna ...) koje treba istražiti. Zajednička karakteristika svih parametara jeste da u određenom momentu imaju različite vrednosti u zapremini iza projektila, što upravo daju dvofazni modeli, odnosno gasodinamičke teorije strujanja. Zbog toga se javila potreba poboljšanja dosadašnje teorije sa dvofaznim modelima strujnog procesa [1, 2]. 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. Kod nas, razvojem dvofaznih UB modela, poslednjih godina potiskuje se primena klasičnih modela. S obzirom na dostignuti i budući razvoj novih koncepcija oružja, problematika dvofaznog strujanja u cevi posebno je značajna. Teorija na osnovama dvofaznog strujanja posmatra realno strujanje smeše barutnih gasova i nesagorelog baruta u cevi.

Predmet istraživanja u ovom radu je faktorska analiza najuticajnijih parametara na model dvofaznog strujanja kod automatske puške 7,62 mm M70, kao i rangiranje njihovog uticaja na maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu

projektila, kao veoma važne UB karakteristike u procesu opaljenja.

Jednofaktorska analiza uticaja polaznih parametara

Polazni parametri za model dvofaznog strujanja u cevi automatske puške 7,62 mm M70 prikazani su u tabeli 1. Pored naziva, u tabeli su date oznake parametara koje se koriste u literaturi, kao i njihove jedinice mere.

Postoji niz izlaznih karakteristika, ali kao veoma važne kod svakog oružja, pa i automatske puške, smatraju se maksimalni pritisak barutnih gasova i početna brzina projektila. Dalje analize vršene su na osnovu dobijenih rezultata proračuna za ove dve veličine. Da bi izbor parametara koji utiču na model dvofaznog strujanja, koji će se analizirati u faktorskom planu eksperimenta bio što realniji, 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 uzimane 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 dobijenih rezultata dolazi se do zaključaka koji od parametara samostalno najviše utiče na promenu izlaznih karakteristika (u ovom slučaju p_{max} i V_0), čime je olakšan izbor parametara koji će se analizirati u faktorskom planu eksperimenta 2ⁿ.

Karakter promene (rast ↑, pad ↓ i bez promene →) maksimalnog pritiska (p_{max}) i početne brzine (V_0) pri promeni parametara u dozvoljenim granicama,

Red. br.	Oznaka u literaturi	Naziv parametra	Jed. mere
1.	ρ_b	Zapreminska masa baruta	kg/m ³
2.	$2r_0$	Početna debljina barutnog zrna	m
3.	m_{z0}	Početna masa barutnog zrna	kg
4.	S_{z0}	Početna površina barutnog zrna	m ²
5.	α	Kovolumen barutnih gasova	m ³ /kg
6.	κ	Koeficijent oblika KAPA	-
7.	λ	Koeficijent oblika LAMBDA	-
8.	μ	Koeficijent oblika MI	-
9.	c_p	Specifična toplota pri konstantnom pritisku	J/kgK
10.	c_v	Specifična toplota pri konstantnoj zapremini	J/kgK
11.	u_{z0}	Jedinična brzina sagorevanja	m/s
12.	T_0	Početna temperatura barutnog zrna	K
13.	α_b	Koeficijent prelaza toplote	W/m ² K
14.	m_{b0}	Početna masa baruta	kg
15.	η	Koeficijent dinamičke viskoznosti	Pas
16.	ϵ_0	Poroznost na početku 1. perioda	-
17.	ρ_0	Gustina barutnih gasova na početku 1. perioda	kg/m ³
18.	e_0	Energija barutnih gasova na početku 1. perioda	J/kg
19.	e_b	Energija baruta	J/kg
20.	p_0	Pritisak forsiranja	P _a
21.	X_0	Početni položaj projektila	m
22.	X_u	Ukupna dužina unutrašnjosti cevi	m
23.	S_c	Poprečni presek cevi	m ²
24.	m	Masa projektila	kg
25.	r_{z0}	Put plamena na početku 1. perioda	m
26.	t_0	Vreme prethodnog perioda	s
27.	α_0	Početni koeficijent provođenja toplote	W/mK

prikazan je u tabeli 2. Pod dozvoljenim granicama podrazumevaju se odstupanja od srednje vrednosti, koja su propisana u [3] i [4].

Na osnovu pojedinačne analize uticaja svakog od parametara na model dvofaznog strujanja može se zaključiti da sledeći parametri bitno utiču na razmatrane izlazne karakteristike:

– jedinačna brzina sagorevanja baruta u_{z0} ,

- početna masa barutnog zrna m_{z0} ,
- početna masa baruta m_{b0} ,
- masa projektila m ,
- kovolumen barutnih gasova α ,
- početna površina barutnog zrna S_{z0} ,
- poprečni presek cevi S_c .

Pri promeni u granicama dozvoljenih odstupanja navedeni parametri samostalno, najviše menjaju maksimalni pritisak i početnu brzinu. Pored toga, oni utiču i na izlazne karakteristike i u kombinaciji

Parametar	Rast vrednosti	P_{max}	V_0
Konstrukcioni parametri			
S_c – Poprečni presek cevi	$S_c \uparrow$	$P_{max} \downarrow$	$V_0 \downarrow$
X_0 – Početni položaj projektila	$X_0 \uparrow$	$P_{max} \rightarrow$	$V_0 \rightarrow$
X_u – Ukupna dužina unutrašnjosti cevi	$X_u \uparrow$	$P_{max} \rightarrow$	$V_0 \uparrow$
m – Masa projektila	$m \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \downarrow$
m_{b0} – Početna masa baruta	$m_b \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
p_0 – Pritisak forsiranja	$p_0 \uparrow$	$P_{max} \rightarrow$	$V_0 \rightarrow$
Balistički parametri (tip baruta)			
$2r_0$ – Početna debljina barutnog zrna	$2r_0 \uparrow$	$P_{max} \downarrow$	$V_0 \downarrow$
m_{z0} – Početna masa barutnog zrna	$m_{z0} \uparrow$	$P_{max} \downarrow$	$V_0 \downarrow$
S_{z0} – Početna površina barutnog zrna	$S_{z0} \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
κ – Koeficijent oblika KAPA	$\kappa \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
λ – Koeficijent oblika LAMBDA	$\lambda \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
Balistički parametri (model baruta)			
α – Kovolumen barutnih gasova	$\alpha \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
c_p – Specifična toplota pri konst. pritisku	$c_p \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
c_v – Specifična toplota pri konst. zapremini	$c_v \uparrow$	$P_{max} \downarrow$	$V_0 \downarrow$
u_{z0} – Jedinačna brzina sagorevanja	$u_{z0} \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
e_0 – Energija barutnih gasova na poč. 1. perioda	$e_0 \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
e_b – Energija baruta	$e_b \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$
ρ_b – Zapreminska masa baruta	$\rho_b \uparrow$	$P_{max} \uparrow$	$V_0 \uparrow$

sa drugim faktorima. Odgovor na pitanje kakav je taj uticaj daje faktorska analiza.

Pregled srednjih vrednosti odabranih parametara, sa procentualno dozvoljenim odstupanjem od srednje vrednosti, prikazan je u tabeli 3, u kojoj su, takođe, prikazani iznosi promene maksimalnog pritiska barutnih gasova i početne brzine projektila („rast“ i „pad“ od svoje srednje vrednosti), pri promeni odabranih parametara u dozvoljenim granicama odstupanja.

Maksimalne i minimalne vrednosti izlaznih karakteristika (prikazanih u tabeli 3), odnose se na gornju i donju granicu posmatranih parametara. Na iznos odstupanja maksimalnog pritiska barutnih gasova i početne brzine projektila

Tabela 3

Parametar	Srednja vrednost	Odstupanje od sr. vred.	P_{max}		V_0	
			bar	%	m/s	%
u_{z0}	7,767 E-10	$\pm 1,2\%$	3222	+2,45	735,5	+1,13
			3069	-2,42	718,6	-1,19
m_{z0}	4,127 E-7	$\pm 1,3\%$	3219	+2,35	733,3	+0,83
			3072	-2,32	721,2	-0,84
m_{b0}	0,00162	$\pm 1,54\%$	3196	+1,62	735,4	+1,12
			3093	-1,65	718,9	-1,15
m	0,0079	$\pm 1,56\%$	3194	+1,56	727,1	+0,01
			3096	-1,56	727,2	-0,01
α	0,000914	$\pm 0,33\%$	3150	+0,16	727,7	+0,05
			3139	-0,19	726,8	-0,07
S_{z0}	2,905 E-6	$\pm 1,3\%$	3219	+2,35	733,2	+0,81
			3071	-2,35	721,1	-0,86
S_c	4,68 E-5	$\pm 0,05\%$	3148	+0,10	727,6	+0,03
			3141	-0,13	727,0	-0,04

od svoje srednje vrednosti svaki od posmatranih parametara utiče pojedinačno. Očigledno je da polazni parametri imaju različit gradijent udela na izlazne rezultate. Tako, na primer, jedinična brzina sagorevanja baruta u_{20} ima najmanji procenat promene a najviše utiče na izlazne parametre.

Ukupan uticaj dominantnih parametara, kao i njihovog međudejstva, prikazuje faktorska analiza, koja ima za cilj da odredi *pojas* rezultata razmatranih izlaznih karakteristika, unutar kojih se očekuju i eksperimentalni rezultati.

Faktorski plan eksperimenta

Da bi se što pouzdanije i što tačnije izvršila analiza uticaja odabranih parametara na model dvofaznog strujanja u cevi oružja, neophodno je realizovati faktorski plan eksperimenta [5] prema postavljenom modelu ili prema eksperimentu kao u [6]. U ovom radu primenjen je faktorski plan eksperimenta prema modelu.

Jedan od najvažnijih zadataka u realizaciji faktorskog plana eksperimenta, radi ispitivanja najuticajnijih parametara i njihovo rangiranje na model dvofaznog strujanja u cevi automatske puške, jeste izbor parametara (faktora) čiji će se uticaj na posmatrani proces opaljenja u cevi oružja pratiti.

Svaki od posmatranih faktora može da ima niz vrednosti unutar dozvoljenih odstupanja od svoje srednje vrednosti, koji se zovu broj nivoa faktora. U ovom radu broj nivoa faktora je dva, i to: donji (minimalna vrednost faktora) i gornji (maksimalna vrednost faktora).

Za faktorski plan eksperimenta karakteristično je da se svi nivoi jednog od faktora kombinuju sa svim nivoima osta-

lih faktora, tako da on predstavlja sve moguće kombinacije posmatranih parametara.

Jednofaktorska analiza daje rezultate samostalnog uticaja na izlazne karakteristike svakog od posmatranih polaznih parametara. Da bi se što pouzdanije odredili dominantni parametri koji, kako samostalno, tako i u kombinaciji sa ostalim parametrima utiču na model dvofaznog strujanja, prethodno su realizovana dva faktorska plana eksperimenta 2^3 i jedan faktorski plan 2^4 .

U prvom faktorskom planu 2^3 analizirani su faktori:

X_1 – jedinična brzina sagorevanja baruta,

X_2 – početna masa barutnog zrna,

X_3 – početna masa baruta.

Potpunom analizom ovih parametara, došlo se do podataka za v_0 – parametar značaja izvora promene ($X_1 = 333322,32$, $X_2 = 309750,89$ i $X_3 = 150822,32$), na osnovu čega se dolazi do zaključka da na maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila najviše utiče jedinična brzina sagorevanja, zatim početna masa barutnog zrna i, na kraju, početna masa baruta. Iz analize se, takođe, vidi da prva dva parametra utiču oko dva puta više od trećeg parametra.

U drugom faktorskom planu 2^3 analizirani su faktori:

X_1 – masa projektila,

X_2 – početna površina barutnog zrna,

X_3 – kovolumen barutnih gasova.

Analogno prethodnom eksperimentu, na osnovu dobijenih podataka za v_0 – parametar značaja izvora promene ($X_1 = 38809$, $X_2 = 87025$ i $X_3 = 484$), došlo se do zaključka da na maksimalni pritisak barutnih gasova i na početnu brzinu projektila najviše utiče početna

površina barutnog zrna, zatim masa projektila i, na kraju, kovolumen barutnih gasova. Iz ove analize se, takođe, vidi da početna površina barutnog zrna za oko dva i po puta ima veći uticaj od mase projektila, a znatno veći od kovolumena barutnih gasova.

Realizovan je i faktorski plan eksperimenta 2^4 , sa analizom faktora:

- X_1 – početna masa barutnog zrna,
- X_2 – jedinična brzina sagorevanja baruta,
- X_3 – početna masa baruta,
- X_4 – masa projektila.

Istim postupkom analize dolazi se do zaključka da na maksimalni pritisak barutnih gasova i početnu brzinu projektila, na osnovu dobijenih podataka za v_0 – parametar značaja izvora promene ($X_1 = 349281$, $X_2 = 374544$, $X_3 = 168921$ i $X_4 = 154449$), najviše utiče jedinična brzina sagorevanja baruta, početna masa barutnog zrna, početna masa baruta i na kraju masa projektila. Iz ove analize se, takođe, vidi da jedinična brzina sagorevanja baruta i početna masa barutnog zrna imaju za oko dva puta veći uticaj od početne mase baruta i mase projektila.

Iz sprovedenih analiza uočljivo je da najveći uticaj uvek ima jedinična brzina sagorevanja, a zatim početna površina barutnog zrna, početna masa barutnog zrna i početna masa baruta. Na osnovu toga, dalja ispitivanja i faktorska analiza, kao i rangiranje uticaja parametara na izlazne karakteristike (p_{max} i V_0), modela dvofaznog strujanja u cevi automatske puške, obavljena je sa parametrima čiji je uticaj najveći:

- X_1 (faktor A) – početna masa barutnog zrna,
- X_2 (faktor B) – jedinična brzina sagorevanja baruta,

- X_3 (faktor C) – početna masa baruta,
- X_4 (faktor D) – početna površina barutnog zrna.

Faktorski eksperiment 2^4

Da bi se izvršila faktorska analiza uticaja odabranih faktora na model dvofaznog strujanja, neophodno je realizovati potpuni plan faktorskog eksperimenta 2^4 , jer su odabrana četiri faktora sa po dva nivoa: minimalne i maksimalne dozvoljene vrednosti parametara. Izradom faktorskog plana eksperimenta zaključuje se o tome na kom nivou (donji ili gornji) mora da se nalazi određeni faktor za datu kombinaciju faktora. U jednofaktorskoj analizi uticaja polaznih parametara prikazan je karakter promene izlaznih karakteristika (p_{max} i V_0), pri variranju vrednosti parametara u dozvoljenim granicama odstupanja od srednjih vrednosti. Iz ove analize ne vidi se karakter promene izlaznih karakteristika pri istovremenoj promeni vrednosti dva ili više parametara.

Nivoi faktora koji se analiziraju su:

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

Ovakvi eksperimenti sa dva nivoa često se nazivaju *ekstremni eksperimenti*. U potpunom faktorskom eksperimentu treba napraviti sve kombinacije svih nivoa faktora i one se obično nazivaju *eksperimentalne jedinice*. Ukupan broj kombinacija nivoa faktora zavisi od broja nivoa faktora i broja faktora koji se analiziraju. Ovde će ih biti $2^4 = 16$. Pri izvođenju eksperimenta redosled kombinacija se bira na slučajan način.

Matematički model faktorskog eksperimenta 2^4

Matematički model eksperimenta sa četiri faktora (A, B, C i D) i sa m ponavljanja na svakom nivou faktorskog plana može se iskazati izrazom:

$$X_{ij} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + C_k + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + D_g + AD_{ig} + BD_{jg} + CD_{kg} + ABD_{ijg} + ACD_{ikg} + BCD_{jkg} + ABCD_{ijkl} + \epsilon_{ijkl} \quad (1)$$

gde je:

X – posmatrana (merena) veličina u procesu,

μ – srednja vrednost merene veličine,

A – faktor sa $i = 1, 2, \dots$ a nivoa faktora,

B – faktor sa $j = 1, 2, \dots$ b nivoa faktora,

C – faktor sa $k = 1, 2, \dots$ c nivoa faktora,

D – faktor sa $g = 1, 2, \dots$ d nivoa faktora,

$l = 1, 2, \dots, m$ – broj ponavljanja za svaku kombinaciju nivoa faktora,

ϵ_{ijkl} – greška eksperimenta.

Ovi podaci dobijaju se sprovođenjem faktorskog eksperimenta prema unapred definisanom planu.

Nakon izbora broja faktora i broja nivoa vrši se kodiranje vrednosti faktora,

tako da gornji nivo bilo kog faktora ima uvek 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 obavlja se na sledeći način:

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

$$W_i = \frac{X_{i,max} - X_{i,min}}{2}; \quad i = 1 \dots 4 \quad (3)$$

Kodiranjem signifikantnih faktora dobija se:

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

$$X_{i,d} = \frac{X_{i,min} - X_{i,0}}{W_i}; \quad i = 1 \dots 4 \quad (5)$$

Rezultati dobijeni variranjem i kodiranjem signifikantnih faktora prema izrazima (2 do 5) prikazani su u tabeli 4.

Konačan oblik potpunog faktorskog plana eksperimenta 2^4 prikazan je u tabeli 5, gde je uvedena pomoćna kolona X_0 koja služi za računanje u regresivnoj analizi i sadrži samo gornje nivoe faktora.

Tabela 4

$X_{1,min}$	4,180651 E-7	$X_{1,g}$	+1	$X_{1,0}$	4,127 E-7	W_1	-0,053651 E-7
$X_{1,max}$	4,073349 E-7	$X_{1,d}$	-1				
$X_{2,min}$	7,675 E-10	$X_{2,g}$	+1	$X_{2,0}$	7,767 E-10	W_2	0,092 E-10
$X_{2,max}$	7,859 E-10	$X_{2,d}$	-1				
$X_{3,min}$	0,0015948	$X_{3,g}$	+1	$X_{3,0}$	0,00162	W_3	0,0000251
$X_{3,max}$	0,001645	$X_{3,d}$	-1				
$X_{4,min}$	2,867235 E-6	$X_{4,g}$	+1	$X_{4,0}$	2,905 E-6	W_4	0,037765 E-6
$X_{4,max}$	2,942765 E-6	$X_{4,d}$	-1				

X_0	X_1	X_2	X_1X_2	X_3	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	X_4	X_1X_4	X_2X_4	X_3X_4	$X_1X_2X_4$	$X_1X_3X_4$	$X_2X_3X_4$	$X_1X_2X_3X_4$	Kombinacija nivoa	Rezultati	
																	P_{max}	V_0
+	-	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	(1)	2880	697	
+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	a	3019	710	
+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-	b	3024	715	
+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+	ab	3169	727	
+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	c	2975	714	
+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	+	+	ac	3118	727	
+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	bc	3124	732	
+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+	abc	3274	744	
+	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	d	3019	710	
+	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	ad	3163	723	
+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	bd	3169	727	
+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+	cd	3118	727	
+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	abd	3320	739	
+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	acd	3268	739	
+	-	+	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	bcd	3274	744	
+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+	abcd	3431	755	
Opšta suma (OS)																50345	11630	

Disperzivna analiza uticaja signifikantnih faktora na maksimalni pritisak i početnu brzinu

Svaki mereni rezultat Y_{ij} , za određenu vrednost nezavisno promenljive (za određeni nivo faktora) može se prikazati sledećim matematičkim modelom [5]:

$$Y_{ij} = \mu + T_j + \varepsilon_{ij} \quad (6)$$

gde je:

μ – 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),

ε_{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), kao: $OSK = SKA + SKB + SKAB + SKC + SKAC + SKBC + SKABC + SKD + SKAD + SKBD + SKCD + SKABD + SKACD + SKBCD + SKABCD + SKG$ (7)

Sabiranje se obavlja pomoću metode kontrasta. Kontrasti se računaju matričnom metodom, i to na sledeći način: množi se svaka od kolona matrice, sa elementima +1 i -1 koja je prikazana u tabeli 5 (izuzev kolone X_0) sa kolomom Y rezultata eksperimenta. Obavlja se ukupno $(2^n - 1)$ množenja, te se na taj način dobijaju kontrasti svakog od izvora promene.

Efekti ili izvori promena su svi faktori i sva njihova međudejstva. Kod ova-

kvih faktorskih eksperimenata 2^n uvek ih ima $2^n - 1$, pri čemu je broj izvora promene $2^n - 1 = 15$.

Sume kvadrata za sve faktore nalaze se prema formuli:

$$SKC_i = \frac{(\text{kontrast})^2}{m \cdot 2^n} \quad (8)$$

gde je:

n – broj faktora,

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

Ukupan broj eksperimentalnih jedinica eksperimenta je:

$$N = m2^n \quad (9)$$

Opšta suma je:

$$OS = \sum_j Y_j \quad (10)$$

Opšta suma kvadrata iznosi:

$$OSK = SK_i - OS^2/N \quad (11)$$

gde SK_i predstavlja sumu kvadrata svih nivoa, svih faktora.

Ukoliko nije bilo ponavljanja eksperimenta na istom nivou faktorskog plana ($m = 1$), suma kvadrata ostatka se (umesto greške eksperimenta koja se ne može proceniti) dobija prema sledećoj formuli:

$$SKO = OSK - \sum SKC_i \quad (12)$$

U tom slučaju disperziona analiza nema smisla, jer kontrasti imaju po jedan stepen slobode, a suma kvadrata ostatka stepen slobode jednak nuli. U ovakvim slučajevima se kontrasti neznačajnih međudejstava (oni koji su po apsolutnoj

vrednosti manji od jedan) pridodaju ostatku sa svojim stepenima slobode, pa se taj zbir smatra greškom. Tada je suma kvadrata greške:

$$SKG = SKO + \sum_i \quad (13)$$

gde \sum_i predstavlja sumu kontrasta neznačajnih međudejstava.

Kada se govori o grešci potrebno je naglasiti da je disperziona analiza statistička metoda koja se zasniva na određenim zakonima statistike. Pri ovoj metodi, 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.

$$SKV_i + \frac{SKC_i}{SS_i} \quad (14)$$

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

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,

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

Kada se odrede sve navedene vrednosti, sledi utvrđivanje značaja svakog od

izvora promena. Najpre se za svaki od izvora utvrdi odnos:

$$v_{0i} = \frac{SKV_i}{SKVG} \quad (15)$$

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 faktorskog plana eksperimenta, stepen slobode svakog izvora promene je 1, pa se iz tablice Fišerove raspodele uzima samo jedan broj c . Da bi se odredilo da li je neki od izvora promena značajan, tj. kakvo je njegovo dejstvo na rezultate eksperimenta, potrebno je izvršiti upoređenje v_{0i} i c_i .

Ako je:

$v_{0i} \geq c_i$ – onda je i -ti izvor promena značajan, tj. utiče na rezultate eksperimenta i tvrdnja je data sa nivoom poverenja V_i

$v_{0i} < c_i$ – onda 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 disperzivne analize, prema formulama 5–12), za maksimalni pritisak i početnu brzinu, prikazani su u tabeli 6.

Tabela 6

Faktor	Maksimalni pritisak				Početna brzina			
	Ort. kon. (8C _i)	Suma kvadr. (SKC _i)	St. sl. (SS _i)	v_0	Ort. kon. (8C _i)	Suma kvadr. (SKC _i)	St. sl. (SS _i)	v_0
A	1179	86877,562	1	534631,2	98	600,25	1	2401
B	1225	93789,062	1	577163,5	136	1156	1	4624
AB	27	45,5625	1	280,4	-4	1	1	4
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
AD	25	39,0625	1	240,4	-2	0,25	1	1
BD	27	45,5625	1	280,4	-4	1	1	4
CD	21	27,5625	1	169,6	-2	0,25	1	1
ABD	-1	0,0625	1	0,4	0	0	1	0
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	

Za kriterijum $c = 16,3$ (Fišerov kriterijum za nivo poverenja $V = 99\%$), a iz tabele 6 se vidi da je vrednost v_0 za faktore A, B, C i D znatno veća od ovog kriterijuma, tj. njihov uticaj na rezultate eksperimenta je veoma značajan. Na osnovu veličine ovog parametra rangira se uticaj faktora A, B, C i D na maksimalni pritisak, prema sledećem:

1. faktor B ($v_{0B} = 577163,5$) – jedinična brzina sagorevanja baruta,

2–3. faktor A ($v_{0A} = 534631,2$) – početna masa barutnog zrna,

2–3. faktor D ($v_{0D} = 534631,2$) – početna površina barutnog zrna,

4. faktor C ($v_{0C} = 257985,0$) – početna masa baruta.

Najveći uticaj na veličinu maksimalnog pritiska barutnih gasova ima jedinična brzina sagorevanja baruta, dok jednak uticaj imaju početna masa barutnog zrna i početna površina barutnog zrna i, na kraju, početna masa baruta. Iz tabele je, takođe, uočljivo da i međudejstva faktora AB, AC, BC, AD, BC i CD takođe utiču na maksimalni pritisak, ali u znatno manjoj meri od samostalnog dejstva faktora. Na osnovu ove analize vidi se da je relativni uticaj faktora B, A i D (prema odnosu srednjih kvadrata ili v_0) oko dva puta veći od uticaja faktora C.

Matematički model, zasnovan na ovim rezultatima, ima oblik:

$$Y_{ijkl} = \mu + u_{z0i} + m_{z0j} + S_{z0k} + m_{b0l} + m_{z0j}u_{z0i} + m_{z0j}m_{b0l} + u_{z0i}m_{b0l} + m_{z0j}S_{z0k} + u_{z0i}S_{z0k} + m_{b0l}S_{z0k} + \varepsilon_{ijkl} \quad (16)$$

gde je:

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

μ – 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,

S_{z0l} – doprinos početne površine 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,

ε_{ijkl} – greška eksperimenta,
 $i = j = k = l = 2$ – broj nivoa svakog od faktora.

Za kriterijum $c = 21,2$ (Fišerov kriterijum za nivo poverenja $V = 99\%$), a iz tabele 6, vidi se 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 rangira se uticaj faktora A, B, C i D na početnu brzinu projektila, prema sledećem:

1. faktor B ($v_{0B} = 4624$) – jedinična brzina sagorevanja baruta,

2. faktor C ($v_{0C} = 4489$) – početna masa baruta,

3–4. faktor A ($v_{0A} = 2401$) – početna masa barutnog zrna,

3–4. faktor D ($v_{0D} = 2401$) – početna površina barutnog zrna.

Najveći uticaj na veličinu početne brzine projektila ima jedinična brzina sagorevanja baruta, drugi po uticaju je početna masa baruta, dok su treći, odnosno četvrti po uticaju – početna masa barutnog zrna i početna površina barutnog zrna. Disperzivna analiza, za sve veličine, pokazuje da su i uticaji međudejstva faktora zanemarivi. To znači da ova četiri faktora utiču na početnu brzinu projektila, ali među njima nema međudejstva, tj. svaki od njih deluje sam na posmatrani proces, 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.

Analogno, kao i za maksimalni pritisak, matematički model zasnovan na ovim rezultatima, ima oblik:

$$Y_{ijkl} = \mu + u_{z0i} + m_{b0j} + m_{z0k} + S_{z0l} + \varepsilon_{ijkl} \quad (17)$$

gde je:

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

μ – srednja vrednost svakog od faktora (posmatranih veličina),

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

m_{b0j} – doprinos početne mase baruta početnoj brzini,

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

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

ε_{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 16 i 17), koriste se u regresivnoj analizi rezultata eksperimenta. Oni znače da se maksimalni pritisak i početna brzina projektila rasipaju oko određene srednje vrednosti pod uticajem faktora A, B, C i D.

Regresivna analiza daje odgovore na pitanja kolika je ta srednja vrednost i koliko iznosi veličina rasipanja oko srednje vrednosti.

– nastaviće se –