

UDK: 621.454.3-6:536.46(047)=861  
COSATI: 21-08, 21-09, 21-02

# Analiza uticaja geometrijskih parametara dvokanalnih barutnih cevi na površinu sagorevanja

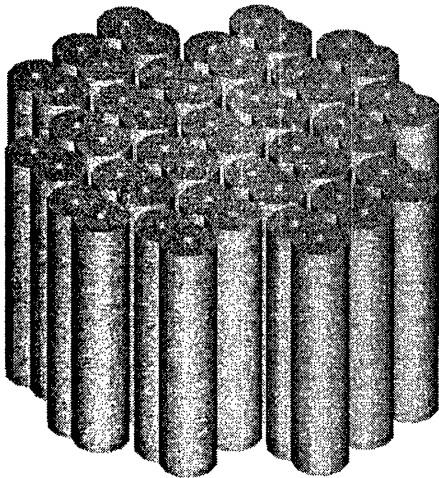
Dr Milorad Savković, dipl. inž.<sup>1)</sup>

Prikazane su matematičke relacije za određivanje površine sagorevanja dvokanalne barutne cevi poprečnog preseka u obliku osmice. Dati su grafički prikazi promene perimetra, površine sagorevanja i poprečnog preseka zavisno od geometrijskih veličina barutne cevi i sagorelog svoda. Analiziran je uticaj dužine cevi na površinu sagorevanja. Dati su odnosi pojedinih geometrijskih veličina za koje se ostvaruju približno neutralni uslovi sagorevanja. Relativno mali raspon promene površine sagorevanja u funkciji sagorelog svoda, omogućava široku primenu rešenja pogonskog punjenja sastavljenog od snopa barutnih cevi poprečnog preseka u obliku osmice.

*Ključne reči:* Pogonsko punjenje, dvokanalna barutna cev, perimetar, površina sagorevanja.

## Uvod

DVOKANALNA barutna cev poprečnog preseka u obliku osmice ugrađuje se u pogonsko punjenje raketnih motora (sl.1), koji realizuju relativno velike potiske za kratko vreme. Ova pogonska punjenja primenjuju se u motorima koji rade u fazi starta rakete [1 i 2].



Slika 1. Pogonsko punjenje sastavljeno od snopa barutnih cevi poprečnog preseka u obliku osmice

Pogonsko punjenje sastavljeno od snopa barutnih cevi poprečnog preseka u obliku osmice, za razliku od rešenja sa cilindričnim cevima, omogućava razvoj površine sagorevanja sa progresivnim i regresivnim tokom. Promena površine sagorevanja utiče na karakter promene unutrašnjebalističkih veličina u raketnom motoru. Pritisak u komori raketnog motora menja se zavisno od karakteristika pogonske materije, geometrijskih veličina raketnog motora, uslova strujanja i promene površine sagorevanja pogonskog punjenja. Progresivan ili regresivan tok promene pritiska u ko-

mori ostvaruje se promenom površine sagorevanja, koja poprima rastući ili opadajući karakter, pravilnim odabirom geometrijskih veličina poprečnog preseka ili odgovarajućom dužinom barutne cevi.

Rešenje pogonskog punjenja poprečnog preseka u obliku osmice daje u nekim slučajevima veći koeficijent ispunje od rešenja sa cilindričnim cevima. To važi samo za određene slučajeve odnosa prečnika smeštajnog prostora i cilindrične cevi kod kojih, i pored povećanja prečnika smeštajnog prostora, nije moguće smestiti jedan ceo red cilindričnih cevi, postavljenih u kružnom rasporedu ili veći broj cevi u šahovskom rasporedu [3 i 4]. U raketnom motoru rešetka, koja pridržava pogonsko punjenje sa snopom barutnih cevi poprečnog preseka u obliku osmice, ima veće otvore od rešenja rešetke koja pridržava cilindrične cevi, što daje manje padove pritiska i termička naprezanja.

Prikazane su relacije za određivanje površine sagorevanja dvokanalne barutne cevi poprečnog preseka u obliku osmice, na osnovu promena perimetra i poprečnog preseka u funkciji sagorelog svoda.

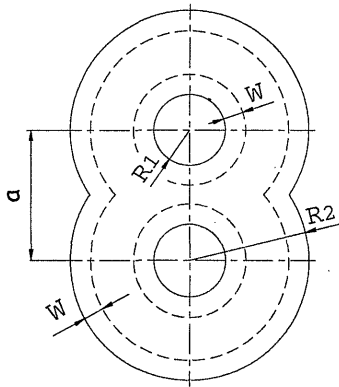
Dati su grafički prikazi promena perimetra i površine sagorevanja zavisno od geometrijskih veličina barutne cevi i sagorelog svoda. Analiziran je uticaj dužine barutne cevi na površinu sagorevanja. Dati su odnosi pojedinih geometrijskih veličina za koje se ostvaruju približno neutralni uslovi sagorevanja.

## Promena perimetra i poprečnog preseka u funkciji sagorelog svoda

Barutna cev poprečnog preseka u obliku osmice (u daljem tekstu: barutna cev), karakteriše se pomoću četiri geometrijske veličine (sl.2):

- $R_1$  - unutrašnji poluprečnik,
- $R_2$  - spoljašnji poluprečnik,
- $a$  - rastojanje otvora i
- $L$  - dužina cevi.

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

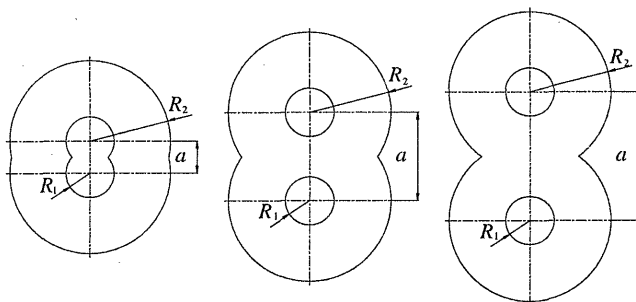


Slika 2. Poprečni presek barutne cevi

Izgled poprečnog preseka barutne cevi zavisi od osnog rastojanja otvora, što se vidi na sl.3. Razlikuju se tri slučaja izgleda poprečnog preseka cevi, i to :

- I slučaj za  $0 < a \leq 2 \cdot R_1$ , kod koga se unutrašnji otvori presecaju (sl. 3A);
- II slučaj za  $2 \cdot R_1 < a < R_1 + R_2$ , kod koga se u procesu sagorevanja u određenom trenutku presecaju unutrašnji otvori, a do kraja sagorevanja ne odvajaju delovi osmice (sl.3B);
- III slučaj za  $R_1 + R_2 \leq a < 2 \cdot R_2$ , kod koga se u procesu sagorevanja ne presecaju unutrašnji otvori, a pri kraju sagorevanja odvajaju se delovi osmice i sagorevanje se obavlja kao kod dve odvojene cilindrične cevi (sl.3C).

Veličine: perimetar ( $P_r$ ) i površina poprečnog preseka barutne cevi ( $A$ ) zavise od oblika barutne cevi i sagorelog svoda ( $W$ ).



$a_{\min} = 0$	$a_{\min} = 2 \cdot R_1$	$a_{\min} = R_1 + R_2$
$a_{\max} = 2 \cdot R_1$	$a_{\max} = R_1 + R_2$	$a_{\max} = 2 \cdot R_2$
A	B	C

Slika 3. Izgled barutne cevi zaviso od rastojanja otvora

Matematički izrazi koji opisuju te zavisnosti su sledeći :

**A. Slučaj I, kada je  $0 < a \leq 2 \cdot R_1$  i  $0 \leq w < \frac{R_2 - R_1}{2}$**

$$P_r = 4 \cdot \pi \cdot (R_1 + R_2) - 4 \cdot (R_1 + w) \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_1 + w)} - 4 \cdot (R_2 - w) \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)}$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot (R_2 - w)^2 - 2 \cdot \pi \cdot (R_1 + w)^2 + 2 \cdot (R_1 + w)^2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_1 + w)} - 2 \cdot (R_2 - w)^2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)} - a \cdot (R_1 + w) \cdot \sin(\arccos \frac{a}{2 \cdot (R_1 + w)}) + a \cdot (R_2 - w) \cdot \sin(\arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)})$$

**B. Slučaj II, za  $2 \cdot R_1 < a < R_1 + R_2$**

- Kada je  $0 \leq w \leq \frac{a}{2} - R_1$  :

$$P_r = 4 \cdot \pi \cdot (R_1 + R_2) - 4 \cdot (R_2 - w) \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)}$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot (R_2 - w)^2 - 2 \cdot \pi \cdot (R_1 + w)^2 - 2 \cdot (R_2 - w)^2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)} + a \cdot (R_2 - w) \cdot \sin(\arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)})$$

- Kada je  $\frac{a}{2} - R_1 < w < \frac{R_2 - R_1}{2}$  :

$$P_r = 4 \cdot \pi \cdot (R_1 + R_2) - 4 \cdot (R_1 + w) \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_1 + w)} - 4 \cdot (R_2 - w) \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)}$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot (R_2 - w)^2 - 2 \cdot \pi \cdot (R_1 + w)^2 + 2 \cdot (R_1 + w)^2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_1 + w)} - 2 \cdot (R_2 - w)^2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)} - a \cdot (R_1 + w) \cdot \sin(\arccos \frac{a}{2 \cdot (R_1 + w)}) + a \cdot (R_2 - w) \cdot \sin(\arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)})$$

**C. Slučaj III, za  $R_1 + R_2 \leq a < 2 \cdot R_2$**

- Kada je  $0 \leq w \leq R_2 - \frac{a}{2}$  :

$$P_r = 4 \cdot \pi \cdot (R_1 + R_2) - 4 \cdot (R_2 - w) \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)}$$

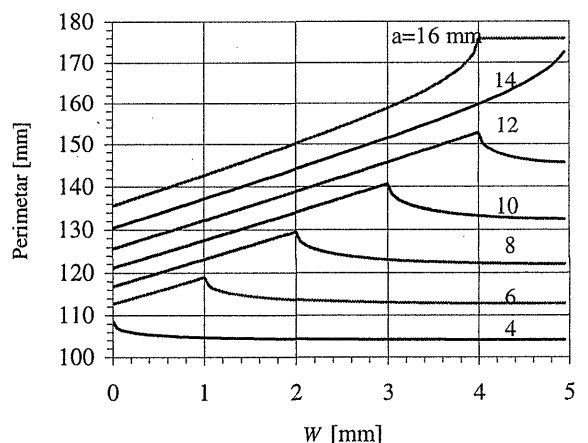
$$A = 2 \cdot \pi \cdot (R_2 - w)^2 - 2 \cdot \pi \cdot (R_1 + w)^2 - 2 \cdot (R_2 - w)^2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)} + a \cdot (R_2 - w) \cdot \sin(\arccos \frac{a}{2 \cdot (R_2 - w)})$$

- Kada je  $R_2 - \frac{a}{2} < w < \frac{R_2 - R_1}{2}$  :

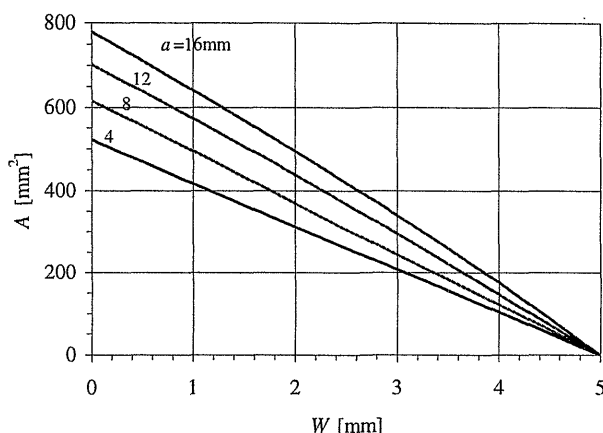
$$P_r = 4 \cdot \pi \cdot (R_1 + R_2)$$

$$A = 2 \cdot \pi \cdot (R_2 - w)^2 - 2 \cdot \pi \cdot (R_1 + w)^2$$

Promena perimetra u funkciji sagorelog svoda je rastuća ili blago opadajuća funkcija zavisno od geometrijskih veličina poprečnog preseka barutne cevi, kao što se može videti na sl.4.

Slika 4. Promena perimetra barutne cevi sa  $R_1=2$  i  $R_2=12$  mm

Tokom sagorevanja poprečni presek barutne cevi (A) smanjuje se približno linearno. Gradijent te promene zavisi od geometrijskih veličina kako je dato na sl.5.

Slika 5. Poprečni presek barutne cevi sa  $R_1=2$  i  $R_2=12$  mm

### Odnos krajnjeg i početnog perimetra

Na tok promene površine sagorevanja barutne cevi u funkciji sagorelog svoda utiče više faktora od kojih su najznačajniji :

- tok promene perimetra u funkciji sagorelog svoda (sl.4) i
- dužina barutne cevi.

Parametar koji najbolje karakteriše tok promene perimetra u funkciji sagorelog svoda je odnos perimetra na kraju i početku procesa sagorevanja. U radu je označen sa  $\psi$ , a definisan je odnosom perimetra barutne cevi na kraju, kada je  $P_r = P_{rz}$  i  $W$  teži vrednosti  $(R_2 - R_1)/2$ , i na početku, kada je  $P_r = P_{ro}$  i  $W=0$ . Ovaj odnos zavisi od oblika poprečnog preseka barutne cevi i to na sledeći način :

#### A. Slučaj I, za $0 < a \leq 2 \cdot R_1$

$$\psi = \frac{P_{rz}}{P_{ro}} = \frac{\pi \cdot (R_1 + R_2) - (R_1 + R_2) \cdot \arccos \frac{a}{R_1 + R_2}}{\pi \cdot (R_1 + R_2) - R_1 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot R_1} - R_2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot R_2}}$$

Odnos  $\psi$  jednak je 1, kada je :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\arccos \frac{a}{2 \cdot R_2} - \arccos \frac{a}{R_1 + R_2}}{\arccos \frac{a}{R_1 + R_2} - \arccos \frac{a}{2 \cdot R_1}}$$

pri čemu je  $\psi < 1$  za  $a$  blisko  $2 \cdot R_1$ .

#### B. Slučaj II, za $2 \cdot R_1 < a < R_1 + R_2$

$$\psi = \frac{P_{rz}}{P_{ro}} = \frac{\pi \cdot (R_1 + R_2) - (R_1 + R_2) \cdot \arccos \frac{a}{R_1 + R_2}}{\pi \cdot (R_1 + R_2) - R_2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot R_2}}$$

Za  $a = 2 \cdot R_1$  odnos  $\psi$  je minimalan i iznosi približno 0,95.

Odnos  $\psi$  je jednak 1 za :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\arccos \frac{a}{2 \cdot R_2}}{\arccos \frac{a}{R_1 + R_2}} - 1$$

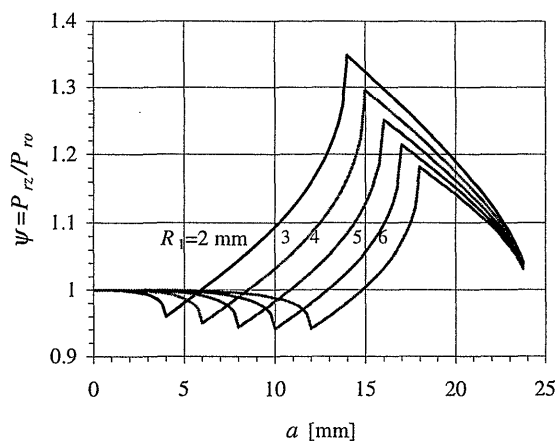
Za barutne cevi slučaja II važi  $d\psi/da > 0$ , što drugim rečima znači da je za svako veće osno rastojanje otvora  $a$ , veći i odnos  $\psi$  krajnjeg u odnosu na početni perimetar.

#### C. Slučaj III, za $R_1 + R_2 \leq a < 2 \cdot R_2$

Kod ovog oblika odnos perimetra na kraju i početku sagorevanja uvek je veći od 1 i iznosi:

$$\psi = \frac{P_{rz}}{P_{ro}} = \frac{\pi \cdot (R_1 + R_2)}{\pi \cdot (R_1 + R_2) - R_2 \cdot \arccos \frac{a}{2 \cdot R_2}}$$

Za  $a = R_1 + R_2$ , odnos  $\psi$  je maksimalan i iznosi približno 1,1 za manji odnos  $R_2/R_1$ , a približno 1,4 za veći odnos  $R_2/R_1$ . Za  $a > R_1 + R_2$  funkcija  $\psi(a)$  je opadajuća, odnosno  $d\psi/da < 0$ , tako da se za veće rastojanje otvora dobija manji odnos perimetra na kraju i početku sagorevanja.

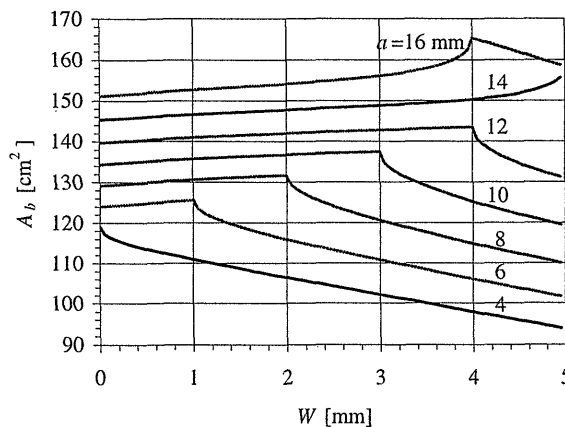
Slika 6 Odnos perimetra barutne cevi sa  $R_2=12$  mm

Na sl.6 je prikazana zavisnost odnosa perimetra od geometrijskih karakteristika poprečnog preseka barutne cevi.

### Promena površine sagorevanja

Tokom sagorevanja barutne cevi dolazi do promene površine sagorevanja ( $A_b$ ). Površina sagorevanja barutne cevi u funkciji sagorelog svoda definiše se relacijom :

$A_b = P_r \cdot (L_0 - 2 \cdot W) + 2 \cdot A$ , gde je  $L_0$  početna dužina barutne cevi.

Slika 7 Površina sagorevanja barutne cevi sa  $R_1=2$ ,  $R_2=12$  i  $L_0=100$  mm

### Odnos krajnje i početne površine sagorevanja

Promena površine sagorevanja pogonskog punjenja utiče na karakter promene unutrašnjebalističkih veličina u raket-

nom motoru. Odnos krajnje i početne površine sagorevanja je označen sa  $\varphi$ . Ovaj odnos utiče na karakter procesa sagorevanja u raketnom motoru, koji može biti progresivan ili degresivan.

Odnos  $\varphi$  za barutnu cev zavisi od odnosa krajnjeg i početnog perimetra i dužine cevi, na sledeći način :

$$\varphi = \frac{A_{bz}}{A_{bo}} = \frac{P_{rz} \cdot (L_o - R_2 + R_1)}{P_{ro} \cdot L_o + 2 \cdot A_o}, \text{ gde je } A_o \text{ početni poprečni presek barutne cevi.}$$

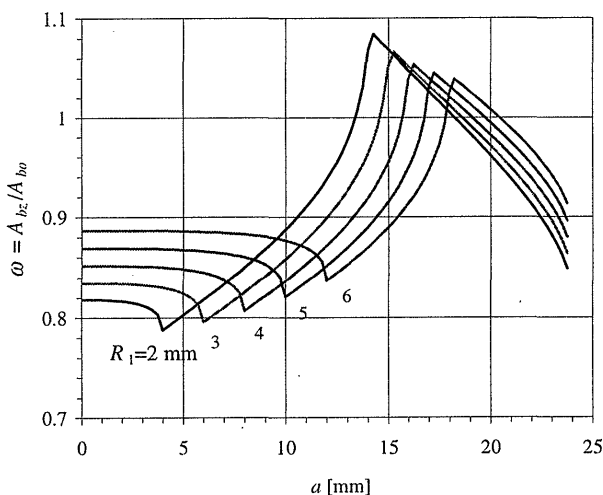
Jasno je da odnos krajnje i početne površine sagorevanja zavisi od svih geometrijskih veličina poprečnog preseka i dužine barutne cevi. Ova zavisnost prikazana je na sl.8.

Može se zapaziti da se za iste geometrijske veličine, koje karakterišu poprečni presek, odnos  $\psi$  (prema sl.6) menja u granicama od 0,95 do 1,4, dok se odnos  $\varphi$  (prema sl.8) menja u užim granicama od 0,8 do 1,1 za dužinu cevi od 100 mm.

Uticao dužine barutne cevi na promenu odnosa krajnje i početne površine sagorevanja u odnosu na promenu krajnjeg i početnog perimetra iznosi preko 10% za manje dužine, odnosno kada je  $L_o/R_2 < 16$ , što je utvrđeno analizom transformisanog izraza za odnos  $\varphi$ , pomoću izraza:

$$\varphi = \psi \cdot (1 - \Delta), \text{ gde je : } \Delta = 1 - \frac{L_o - R_2 + R_1}{L_o + \frac{2 \cdot A_o}{P_{ro}}}$$

Veličina  $\Delta$  zavisi samo od početnog oblika barutne cevi, tako da su karakteri krivih  $\psi$  i  $\varphi$  istovetni, kao što se vidi na slikama 6 i 8. Za manje dužine cevi izraženija je degresivnost promene površine sagorevanja, tako da je i manja vrednost odnosa  $\varphi$ .

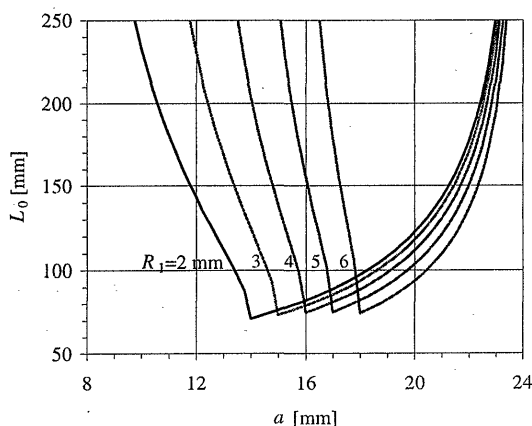


Slika 8. Odnos površina sagorevanja barutne cevi sa  $R_2=12$  i  $L_0=100$  mm

Približno neutralni uslovi sagorevanja, kada su iste krajnja i početna površina sagorevanja, odnosno kada je  $\varphi=1$ , mogu se dobiti sa dva poprečna preseka za istu dužinu cevi. Naime, izjednačenost površina sagorevanja na početku i kraju procesa sagorevanja, kada je  $\varphi=1$ , ostvaruje se za barutne cevi, kod kojih su geometrijske veličine poprečnog preseka opisane u slučaju II, kada je  $2 \cdot R_1 < a < R_1 + R_2$  (sl.3 B) i u slučaju III, kada je  $R_1 + R_2 \leq a < 2 \cdot R_2$  (sl.3 C).

Geometrijske veličine barutne cevi koja obezbeđuju približno neutralno sagorevanje prikazane su na sl.9. Sl.9 definisana je bez obuhvatanja uticaja erozivnog sagorevanja, na osnovu jednačine :

$$L_o = \frac{2 \cdot A_o}{P_{ro} \cdot (\psi - 1)} + \frac{\psi \cdot (R_2 - R_1)}{\psi - 1}$$



Slika 9. Geometrijske veličine barutne cevi koje obezbeđuju neutralno sagorevanje, uz uslov da je  $R_2=12$  mm

Može se zaključiti da ne postoji dužina barutne cevi koja obezbeđuje neutralno sagorevanje kada u poprečnom preseku cevi važi  $\psi \leq 1$ . To je zato što se površina sagorevanja sastoji iz obimne površine i dve čeonne površine. Na obimnu površinu utiče perimetar i dužina barutne cevi. Čeonna površina i dužina se tokom sagorevanja smanjuju. Da bi se to kompenziralo, odnosno obezbedilo da ukupna površina na početku i na kraju sagorevanja bude jednaka, potrebno je za datu dužinu ostvariti dovoljno velik porast perimetra. To je moguće ostvariti odgovarajućim dimenzijama poprečnog preseka barutne cevi kod koje je  $\psi > 1$ . Takodje se može zapaziti da uslove za približno neutralno sagorevanje imaju samo cevi kod kojih je odnos  $L_o/R_2 > 6$ .

## Zaključak

Primena pogonskog punjenja sastavljenog od snopa dvokanalnih barutnih cevi poprečnog preseka u obliku osmice u raketnom motoru omogućava ostvarenje potiska približno konstantnog ili neznatno promenljivog intenziteta. Potisak promenljivog intenziteta ostvaruje se na osnovu mogućnosti realizacije programiranog progresivnog ili degresivnog sagorevanja u komori raketnog motora. Odstupanje od neutralnog toka, izraženo preko odnosa početne i krajnje površine sagorevanja, kreće se u rasponu od -20 do +10%. Prikazana je matematička interpretacija tih zavisnosti.

Dati su odnosi pojedinih geometrijskih veličina barutne cevi za koje se ostvaruju približno neutralni uslovi sagorevanja. Za dati poprečni presek barutne cevi može se odrediti dužina koja daje te uslove.

Relativno mali raspon promene površine sagorevanja u funkciji sagorelog svoda, omogućava široku primenu rešenja pogonskog punjenja sastavljenog od snopa barutnih cevi sa poprečnim presekom u obliku osmice.

## Literatura

- [1] JAUKOVIĆ, Đ. *Konstrukcija unutrašnjebalističkih punjenja od čvrste pogonske materije*. int. dok. br.4, Vojnotehnički institut VJ, Beograd, 1978.
- [2] FAHRUTDINOV, I.H., KOTELJNIKOV, A.V. *Konstrukcija i projektovanje raketnih dvigatelej tverdovo topliva*. Mašinstroenie, Moskva, 1987.

- [3] SAVKOVIĆ M. Odredjivanje broja smeštenih tela valjčastog oblika u otvor kružnog preseka sa primenom na unutrašnjebalističku analizu kod impulsnih raketnih motora. *Naučnotehnički pregled*, 1979, vol. XXIX, no.5, p.41-47.
- [4] JOVANOVIĆ, M. Jedan postupak za odredjivanje maksimalnog broja valjčastih tela koja se mogu smestiti u prostor prstenastog poprečnog preseka. *Vojnotehnički glasnik*, 1982, no.5.

Rad primljen: 2.2.1999.god.