

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

Kriterijumi pripaljivanja čvrstih raketnih goriva

Dr Dragan Lemić, dipl.inž.¹⁾

Razmatrani su različiti kriterijumi pripaljivanja čvrstih raketnih goriva. Kriterijumi se međusobno razlikuju zbog različitih pretpostavki teorijskih modela (teorija pripaljivanja u čvrstoj fazi, gasnoj fazi ili heterogena teorija pripaljivanja), vrste goriva ili eksperimentalnih uslova. Prikazan je postupak određivanja parametara procesa pripaljivanja za jednu vrstu goriva koji daje zadovoljavajuću tačnost.

Cljučne reči: Čvrsto raketno gorivo, pripaljivanje, sagorevanje.

Uvod

PRIPALJIVANJE čvrstih raketnih goriva je, kao i sagorevanje, kompleksan problem i predstavlja njihovo dovođenje na radni režim. To se postiže dejstvom nekog spoljašnjeg stimulusa koji može biti toplotni, hemijski ili mehanički. Proces pripaljivanja traje od trenutka početka spoljašnjeg stimulusa do trenutka uspostavljanja normalnog sagorevanja čvrstog goriva. Taj vremenski interval se naziva vreme kašnjenja pripaljivanja i veoma je značajan. Prilikom istraživanja ovog procesa postavljani su različiti teorijski modeli, koji su pokušavali da definišu pripaljivanje čvrstih goriva: događaje koji se odvijaju i uslove pri kojima se postiže ili obezbeđuje postizanje regularnog režima sagorevanja goriva. Zavisno od pretpostavljenih dominantnih reakcija, definisani su i različiti kriterijumi pripaljivanja.

U realnim raketnim motorima delovanje spoljašnjeg toplotnog izvora (pripale), koji se uglavnom koriste, nije uniformno a često ni dovoljno precizno poznato u svim regionima. Kod eksperimentalnih istraživanja uslovi koji vladaju tokom procesa (pritisak, temperatura, brzina strujanja gasa, toplotni fluks itd.) su mnogo preciznije određeni ali često nisu obuhvaćeni svi fenomeni koji se odvijaju u realnom raketnom motoru. Koristi se zagrevanje uzorka čvrstog goriva zračenjem, kondukcijom ili konvekcijom. Kriterijumi pripaljivanja razvijani i korišćeni tom prilikom, zavise od uslova u kojima se eksperiment odvija i primenjenih mernih metoda.

Sam proces pripaljivanja sastoji se iz perioda inertnog zagrevanja i perioda odvijanja hemijskih reakcija bilo u kondenzovanoj ili gasovitoj fazi bilo na površini goriva između gasovitog oksidatora i čvrstog veziva. On obuhvata prenos toplote, strujanje fluida, promenu faze, masenu difuziju i kinetiku hemijskih reakcija. Teorijska i eksperimentalna istraživanja dala su niz podataka o pripaljivanju različitih čvrstih goriva. Pošto je praktično nemoguće postaviti jedan jedini univerzalni kriterijum pripaljivanja koji bi bio upotrebljiv za sve vrste goriva pod svim uslovima pripaljivanja, potrebno je za konkretne slučajeve definisati odgovarajuće kriterijume na bazi eksperimentalnih rezultata i dominantne hemijske reakcije (npr. za kompozitna goriva na bazi amonijum-perhlorata).

Kriterijumi pripaljivanja

Pripaljivanje čvrstih raketnih goriva je kompleksan fenomen koji obuhvata mnoge fizičko-hemijske procese a postiže se dovođenjem toplotne energije spoljašnjim izvorom, putem zračenja, kondukcije i konvekcije. Tokom istraživanja ovog procesa, razvijene su različite teorije pripaljivanja. Teorija pripaljivanja u čvrstoj fazi zasniva se na pretpostavci da proces pripaljivanja određuje temperatura čvrste faze čiji je porast prouzrokovan spoljašnjim zagrevanjem i potpovršinskom hemijskom reakcijom. Ne obuhvataju se procesi u gasnoj fazi ni uticaj oksidatora u okolnom gasu. Osnovna postavka heterogene teorije pripaljivanja je ta da se primarne reakcije koje kontrolišu proces javljaju između oksidatora u gasovitom stanju, nastalog razlaganjem oksidatora iz goriva ili iz okolnog gasa, i čvrste matrice veziva na površini goriva. Kod teorije pripaljivanja u gasnoj fazi pretpostavlja se da proces kontrolišu egzotermne hemijske reakcije između gasovitih produkata razlaganja komponenti goriva i oksidatora u okolnom gasu. Stvorena toplota predaje se čvrstoj fazi i na taj način ubrzava proces.

U različitim teorijama i eksperimentalnim istraživanjima korišćeni su različiti kriterijumi pripaljivanja. To je moguće objasniti time što pripaljivanje ne zavisi samo od toplotne energije koja se predaje čvrstom gorivu, već i od njegove vrste i uslova koji vladaju u okolnoj sredini. U literaturi su uglavnom navođeni sledeći kriterijumi pripaljivanja čvrstih raketnih goriva [1 - 8]:

- kada temperatura površine čvrste faze goriva dostigne ili nadmaši kritičnu vrednost ($T_s \geq T_{s,cr}$);
- kada brzina porasta temperature površine čvrste faze nadmaši neku kritičnu vrednost ($dT_s / dt \geq (dT_s / dt)_{cr}$);
- kada dođe do promene nagiba krive temperature površine čvrste faze u funkciji vremena ($d^2T_s / dt^2 = 0$);
- kada brzina regresije čvrste faze postane bliska veličini prilikom stacionarnog sagorevanja ($r \approx r_{ss}$);
- kod pojave akumulacije kritične količine toplote u površinskom sloju čvrste faze;
- prilikom naglog porasta temperature površine čvrste faze merene pomoću termoparova;

¹⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

- u slučaju nagle promene napona prilikom korišćenja električno zagrejane žice ili trake;
- prilikom početka gubitka mase čvrstog goriva;
- kada temperatura bilo koje tačke u gasnoj fazi dostigne ili premaši kritičnu vrednost $(dT_g / dt \geq (dT_g / dt)_{cr})$;
- u slučaju dostizanja, u gasnoj fazi, stanja bliskog stacionarnom sagorevanju odnosno kod ograničenog porasta temperature gasa $((\Delta T_{g,max} / T_{g,max}) / (\Delta t / t) \leq C \approx 0.01)$;
- kada se posle prekida dejstva spoljašnjeg izvora toplotne energije ponovo pojavi porast temperature u gasovitoj fazi $(dT_g / dt > 0)$;
- ukoliko toplota generisana egzotermnim hemijskim reakcijama u gasovitoj fazi postane jednaka ili veća od toplotne koja se odvodi kroz čvrstu fazu kondukcijom;
- kada brzina nastajanja toplotne u gasnoj fazi nadmaši totalni fluks usled zračenja apsorbovan u čvrstoj fazi;
- u slučaju da maksimalna brzina hemijske reakcije u gasnoj fazi nadmaši kritičnu vrednost $(\omega_{max} > \omega_{cr})$;
- kada prostorno integrisana brzina hemijske reakcije nadmaši neku kritičnu vrednost $(\int \omega dy > C_{cr}^a)$;
- kada brzina promene prostorno integrisane brzine hemijske reakcije u gasovitoj fazi nadmaši neku kritičnu vrednost $(\partial(\int \omega dy) / \partial t \geq C_{cr}^b)$;
- ukoliko je izvod vremena zagrevanja čvrstog goriva po temperaturi površine jednak nuli $(dt / dT_s = 0)$;
- kada dođe do prve pojave svetlosti u zoni reakcije;
- u slučaju da intenzitet svetlosti koju emituju vreli gasovi koji sagorevaju nadmaši neku kritičnu vrednost;
- kada dođe do registrovanja prve pojave plamena snimanjem i
- u slučaju kada dođe do izjednačenja veličine toplotnog fluksa usled hemijskih reakcija u gasovitoj fazi sa spolja dovedenim toplotnim fluksom.

Jasno je da su mnogi od navedenih kriterijuma povezani sa konkretnim uslovima ispitivanja pripaljivanja čvrstog goriva i da međusobno mogu ali ne moraju biti kompatibilni. Poseban problem je izbor kriterijuma pripaljivanja prilikom proračuna i stvarnog procesa pripaljivanja raketnih motora sa čvrstim gorivom. Neka merenja i izračunavanja odgovarajućih parametara teško je sprovesti u realnim raketnim motorima zbog postojanja fenomena kojih nije bilo pri mnogim laboratorijskim ispitivanjima čvrstog goriva. Primeri za to su kriterijumi na bazi temperature ili porasta temperature gasovite faze postavljeni na bazi eksperimenata bez konvektivnog prenosa toplotne i strujanja iznad čvrstog goriva.

U mnogim modelima proračuna procesa pripaljivanja raketnih motora sa čvrstim gorivom korišćen je kriterijum dostizanja jedne kritične temperature na površini goriva [12-14].

Proces pripaljivanja, od trenutka početka dejstva spoljašnjeg stimulusa na čvrsto gorivo pa do postizanja stabilnog sagorevanja, sastoji se iz tri faze: 1) perioda internog zagrevanja; 2) vremena mešanja, difuzijom i konvekcijom i 3) vremena reakcije.

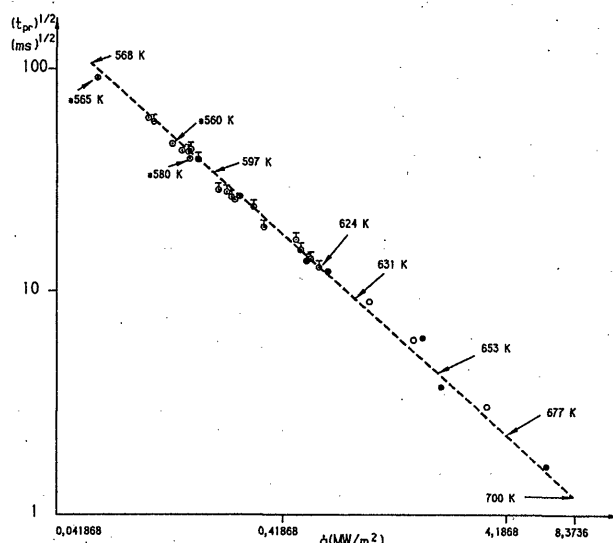
Zavisno od radnih uslova i sastava goriva glavni deo vremena kašnjenja pripaljivanja može biti bilo koji od navedena tri karakteristična vremenska intervala. Pošto nema jasnog razgraničenja između procesa mešanja i hemijskih reakcija, vreme kašnjenja često se iz praktičnih razloga deli

samo na dva intervala, od kojih se prvi odnosi na inertno zagrevanje a drugi na ukupni proces mešanja komponenti i njihovih hemijskih reakcija.

$$t_{K,pr} = t_1 + t_2 \quad (1)$$

Analizom teorijskih i eksperimentalnih istraživanja ovog procesa teško je izdvojiti samo jedan dominantan mehanizam pripaljivanja. Potrebno je znati da li je gorivo dvobazno ili kompozitno, koja vrsta pripale se koristi, kakva je atmosfera okoline itd. Različite teorije su pokušale da definišu skup fizičko-hemijskih procesa potrebnih za pojavu samopodržavajuće hemijske reakcije usled dejstva spoljašnjeg precizno definisanog toplotnog stimulusa tako da može da se proračuna vreme potrebno za pojavu takvog procesa kao i njihova zavisnost od parametara sistema (temperatura, pritisak, brzina strujanja gasa itd.). Zbog kompleksnosti fenomena, prihvatljivo je korišćenje podataka dobijenih tokom eksperimentalnog ispitivanja čvrstog goriva sa toplotnim fluksevima i vremenima kašnjenja koji se javljaju u realnim situacijama.

Na sl.1 su prikazana vremena kašnjenja pripaljivanja u funkciji toplotnog fluksa u opsegu od 0.0418 MW/m² do 6,27 MW/m² [11].



(a) Kompozitno gorivo 82% AP (čestice veličine 15 do 280 mikrona)-polibutadien. Uzorak izložen mlazu jednog generatora luka (argon).

Γ — t_f
 \circ — t_{pr} 1. pr određuje vreme t_{pr} prvog pripaljivanja i vreme uspostavljanja plamena t_r .

(b) Isto kompozitno gorivo 82% AP.

Uzorak izložen mlazu mikromotora:
 \circ — motor sa punjenjem bez aluminijuma (butalit sa 88% AP)
 \bullet — motor sa punjenjem sa dodatkom aluminijuma (butalit sa 20% Al-).
 Pripaljivanje registrovano sa unutrašnjim senzorom regresije.

$$\Gamma = 879.228 \frac{J}{m^2 K s^{1/2}}$$

*560K: temperatura pripaljivanja merena infracrvenim pirametrom ($\epsilon=1$)

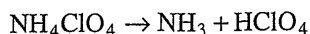
--- kriva korelacije

624K: izračunata temperatura dobijena u odgovarajućoj tački krive.

Slika 1. Kompozitna goriva (bez dodatka aluminijuma)

Rezultati su dobijeni sistematskim ispitivanjem kompozitnih goriva na bazi amonijum-perhlorata, bez dodatka aluminijuma, sa međusobno vrlo različitim vezivima, zagrevanjem uzorka goriva strujom neutralnog gasa na pritisku bliskom atmosferskom, produktima sagorevanja jednog mikromotora sa AP-CTPB gorivom ili gasovitim produktima sagorevanja sa česticama jednog AP goriva sa dodat-

kom aluminijuma na pritisku od nekoliko bara. Korelacija dobijenih rezultata je veoma dobra u celokupnom opsegu primenjenih vrednosti toplotnog fluksa. Može se zaključiti da priroda toplotnog fluksa ne utiče na vreme kašnjenja prvog pripaljivanja. Fenomen pojave prvog plamena povezan je sa temperaturom površine goriva a nivo pritiska i vrsta ambijentnog gasa nema značajan uticaj. Kod kompozitnih goriva na bazi amonijum-perhlorata pripaljivanje zavisi od reakcije razlaganja amonijum-perhlorata:



sa energijom aktivacije $E_s = 125,6 \text{ kJ/mol}$.

Prilikom površinskog termičkog razlaganja amonijum-perhlorata dolazi do pojave egzotermne reakcije između produkata razlaganja u gasnoj fazi. Porast temperature površine goriva se određuje pomoću jednačine prenosa toplote:

$$\rho_p C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda_p \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

sa graničnim uslovom

$$\dot{q}_{pr} + Be^{-E_s/RT_s(t)} = -\lambda_p \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} \quad (3)$$

gde su: \dot{q}_{pr} - toplotni fluks od spoljašnjeg izvora toplote a $B \exp[-E_s/RT_s(t)]$ - brzina generisanja toplote usled egzotermne reakcije.

Amerikanci Baer i Ryan su izvršili korelaciju svojih eksperimentalnih rezultata numeričkim rešavanjem jednačina (2 i 3) [8] i dobili izraz za vreme kašnjenja pripaljivanja:

$$(t_{pr})^{1/2} = \frac{\Gamma(\pi)^{1/2}}{2\dot{q}_{pr}} \left[\frac{E_s/R}{1 - 1.04 \ln(\dot{q}_{pr}/B)} - T_p \right] \quad (4)$$

Korišćenjem relacije za provođenje toplote u slučaju konstantnog toplotnog fluksa [1]:

$$\dot{q} = (T_s - T_p) \frac{\Gamma(\pi)^{1/2}}{2} \left(\frac{\pi}{t} \right) \quad (5)$$

dobija se zavisnost temperature površine goriva u trenutku pripaljivanja od odgovarajućeg toplotnog fluksa

$$T_{s,pr} = \frac{E_s}{R} \left[1 + 1.04 \left(\frac{B}{\dot{q}_{pr}} \right) \right]^{-1} \quad (6)$$

Francuski autori u [11] uvode pretpostavku da pripaljivanje nastaje kada toplotni fluks od egzotermne reakcije dostigne značajnu vrednost u odnosu na spolja doveden toplotni fluks:

$$B \exp(-E_s/RT_{s,pr}) = \varphi \cdot \dot{q}_{pr} \quad (7)$$

Na osnovu (7) sledi da je temperatura površine goriva prilikom pripaljivanja:

$$T_{s,pr} = \frac{E_s}{R} \cdot \frac{1}{\ln \left(\frac{B}{\dot{q}_{pr}} \right)} \quad (8)$$

što uz korišćenje (5) daje izraz za određivanje vremena kašnjenja pripaljivanja:

$$(t_{pr})^{1/2} = \frac{\Gamma}{2} \cdot \frac{(\pi)^{1/2}}{\dot{q}_{pr}} (T_{s,pr} - T_p) \quad (9)$$

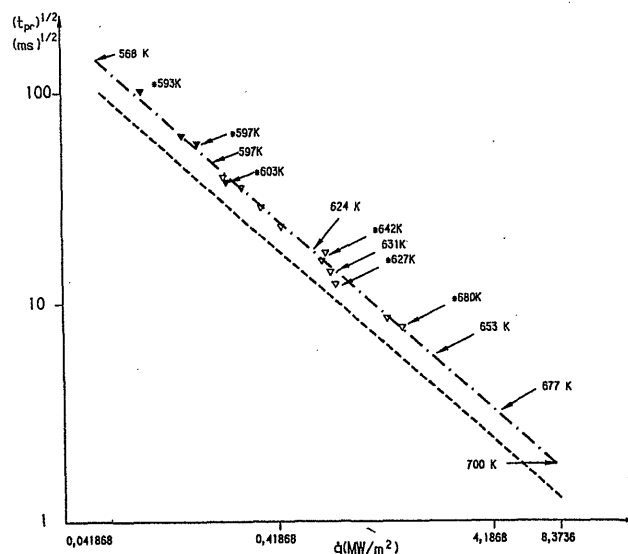
Upoređivanjem jednačina (6 i 8) utvrdili su da se jednakost javlja za $\varphi = 0.15$, odnosno da toplotni fluks usled egzotermne reakcije treba da dostigne vrednost od 15% spolja dovedenog toplotnog fluksa. U tabeli 1 su prikazani rezultati ispitivanja pripaljivanja kompozitnog goriva na bazi amonijum-perhlorata bez dodatka aluminijuma sa karakteristikama $\Gamma = 879,2 \text{ J/Km}^2\text{s}^{1/2}$, $\rho_{pr} = 1600 \text{ kg/m}^3$, $C_p = 1256 \text{ J/kgK}$, $\lambda_p = 0.36 \text{ W/mK}$ [11].

Tabela 1

$\dot{q}_{pr} [\text{MW/m}^2]$	0.0628	0.523	0.628	2.083	8.37
Eksperimentalno određeno t_{pr}, s	11.66	0.234	0.169	0.018	0.0014
$T_{s,pr} [K]$ - izračunato pomoću jednačine (6)	568	620	624	653	700
$T_{s,pr} [K]$ - izračunato pomoću jednačine (8)	569	619	624	656	699

Temperature pripaljivanja su određivane na osnovu izmerenih vremena kašnjenja pripaljivanja i poznatih vrednosti toplotnog fluksa dovedenog gorivu. Na osnovu prikazanih rezultata jasno je da povećanje toplotnog fluksa znatno skraćuje vreme kašnjenja pripaljivanja, a temperatura površine goriva umereno raste.

Kod kompozitnih goriva sa znatnim procentualnim udelom aluminijuma korelacija eksperimentalno dobijenih rezultata, sl.2, dobijena je sa istim kinetičkim parametrima kao u slučaju bez aluminijuma. Uočeno je duže vreme kašnjenja pripaljivanja u odnosu na goriva bez dodatka aluminijuma za iste vrednosti toplotnog fluksa. Njihova toplotna osetljivost je za $\approx 40\%$ veća tako da je porast temperature znatno sporiji.



Aluminizovano kompozitno gorivo 70% AP, 20% Al-polibutadien.
Uzanci izloženi mlazu generatora luka.

▼ ▼ t_{pr} vreme do prvog pripaljivanja

--- kriva korelacije goriva bez dodatka aluminijuma ($\Gamma = 879,228 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{Ks}^{1/2}}$)

- - - kriva korelacije aluminizovanog goriva određenog ($\Gamma = 1256,04 \frac{\text{J}}{\text{m}^2\text{Ks}^{1/2}}$)

za iste kinetičke karakteristike pripaljivanja

624K: izračunata temperatura na toj krivoj

*560K: temperatura pripaljivanja merena infracrvenim pirometrom

Slika 2. Kompozitna goriva sa dodatkom aluminijuma

U tabeli 2 je prikazana korelacija rezultata pripaljivanja kompozitnog goriva na bazi amonijum-perhlorata sa dodatkom aluminijuma sa karakteristikama $\Gamma = 1256 \text{ J/Kms}^{1/2}$, $\rho = 1810 \text{ kg/cm}^3$, $C_p = 1256 \text{ J/kgK}$, $\lambda_p = 0.711 \text{ W/mK}$ [11].

Tabela 2

$\dot{q}_{pr} [\text{MW/m}^2]$	0.0628	0.628	2.093	8.37
$T_{s,pr} [\text{K}]$ - određeno pomoću jednačine (8)	569	624	656	699
$t_{pr} [\text{s}]$ - određeno pomoću jednačine (9)	23.9	0.344	0.037	0.0029

Razlika između vremena prvog pripaljivanja t_{pr} i vremena potrebnog za uspostavljanje plamena t_f zavisi od pritiska na kome se odvija proces. Za toplotni fluks $\dot{q}_{pr} = 0.523 \text{ MW/m}^2$ na pritisku od 1 bara, u slučaju jednog kompozitnog goriva sa 82% AP i 18% CTPB dobijene su proračunske vrednosti $t_{pr} = 0.234 \text{ s}$, $t_f = 0.268 \text{ s}$ i $T_{s,pr} = 620 \text{ K}$, dok je korelacija eksperimentalnih rezultata dala vrednost $t_{pr} = 0.225 \text{ s}$, $t_f = 0.260 \text{ s}$ i $T_{s,pr} = 619 \text{ K}$ [11]. Jasno je da vreme pojave prvog pripaljivanja iznosi $\approx 87\%$ vremena t_f . Povišenjem pritiska razlika između navedenih vremena opada, a na pritisku od 10 bara postaje veoma mala i može se zanemariti.

Zaključak

Tokom istraživanja procesa pripaljivanja korišćeni su različiti kriterijumi pripaljivanja čvrstog raketnog goriva. Neki autori su kao kritične uslove koristili dostizanje određene temperature goriva ili gasovite faze. Takođe se u otvorenoj literaturi mogu naći kriterijumi zasnovani na porastu temperature gasovite ili kondenzovane faze, dostizanju određenih vrednosti brzine hemijske reakcije ili toplotnog fluksa. Korišćena je promena karaktera krive temperature površine goriva u funkciji vremena, a ima i kriterijuma zasnovanih na merenjima vršenim tokom odvijanja procesa (npr. nagla promena neke veličine ili registrovanje nekih fenomena). Različiti kriterijumi su posledica različitih uslova ispitivanja, vrste goriva i prenosa toplote. Neke kriterijume je vrlo teško koristiti u praksi u slučaju pripaljivanja realnih raketnih motora, dok su drugi pogodniji. Tokom eksperimentalnih istraživanja dobijene su vrednosti vremena kašnjenja pripaljivanja zavisno od toplotnog fluksa za mnoga čvrsta raketna goriva. U slučaju kompozitnih goriva na bazi amonijum-perhlorata, sa ili bez dodatka aluminijuma, postignuta je korelacija eksperimentalnih rezultata pomoću površinske reakcije razlaganja amonijum-perhlorata. Do pojave prvog

plamena dolazi kada brzina generisanja toplote egzotermnom hemijskom reakcijom dostigne određeni nivo. Vreme do uspostavljanja stabilnog sagorevanja čvrstog goriva zavisi od pritiska okoline i vrlo je kratko. Već na pritiscima od 10 bara je praktično zanemarljivo. Stoga se u praktičnim proračunima, za navedenu vrstu goriva, vreme pojave prvog plamena može usvojiti kao vreme kašnjenja procesa pripaljivanja a moguće je vršiti korekciju koja obuhvata konkretne uslove.

Literatura

- [1] PRICE, E.W., BRADLEY, H.H. JR, DEHORITY, G.L. IBIRICU M.M. Theory of Ignition of Solid Propellants. *AIAAJ*, July 1966, vol.4, no.7, p. 1153-1181.
- [2] PAUL, B.E., LOVINE, R.L. *Ignition Problems in Solid Propellant Rockets*. Advances in Tactical Rocket Propulsion, AGARD Conference, Maidenhead, England 1968, p.195-148.
- [3] RAJZBERG, B.A., EROHIN, B.T., SAMSONOV, K.P. *Osnovu teorijii raboćih processov v raketnih sistemah na tverdom toplive*. Moskva, Mašinstroenie, 1972.
- [4] EROHIN, B.T., LIPANOV, A.M. *Nestacionarnie i kvazistacionarnie režimu rabotu RDTT*. Moskva, Mašinstroenie, 1977.
- [5] VOLKOV, E.B., SIRICIN, T.A., MAZING, G.J. *Statika i dinamika RDU I i II*. Moskva, Mašinstroenie, 1978.
- [6] KULKARNI, A.K., KUMAR, M., KUO, K.K. *Review of Solid Propellant Ignition Studies*. AIAA - 80 - 1210.
- [7] PRISNJAKOV, B.R. *Dinamika raketnih dvigatelej tverdogo topliva*. Moskva, Mašinstroenie, 1984.
- [8] KUO, K.K., SUMMERFIELD, M. *Fundamentals of Solid Propellant Combustion*. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, vol.90, New York, 1984.
- [9] KELLER, J.A., BAER, A.D., RYAN, N.W. Ignition of Ammonium perchlorate Composite Propellants by Convective Heating. *AIAA Journal*, 1966, vol.4, no.8, p.1358-1365.
- [10] WILLIAMS, F.A., BARRERE, M., HUANG, N.C. *Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets*, AGARD ograph 116 (1969).
- [11] LENGELLE, G., BIZOT, A., DUTERQUE, J., AMIOT, J.C. Ignition of Solid Propellants, *Rech. Aerosp.*, 1991, no.2, p.1-20.
- [12] PERETZ, A., KUO, K.K., CAVENY, L.H., SUMMERFIELD, M. Starting Transient of Solid Propellant Rocket Motors with High Internal Gas Velocities. *AIAA Journal*, Dec. 1973, vol.11, no.12, p.1719-1727.
- [13] THEBAULT, P., GUERNIGOU, I., MENTRE, P.G. *Etude experimentale mode-lisation de l'allumage des propulseurs a propergol solide*. Eclipsifs et Pyrotechnic Application Spatiale, Toulouse, Januar, 1980, N80-26492.
- [14] LEMIĆ, D. *Istraživanje procesa pripaljivanja raketnih motora sa čvrstim gorivom*. doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1997.

Rad primljen: 8.3.1999.god..