

*Rezime:*

Istraživanja opisana u ovom radu obuhvatila su proučavanje katalitičke aktivnosti balističkih modifikatora i proces sagorevanja dvobaznih raketnih goriva. Sagorevanje čvrstih raketnih goriva jedan je od najsloženijih vidova sagorevanja. Svako sagorevanje predstavlja se hemijskim reakcijama pa bi hemijska kinetika trebalo da ima glavnu ulogu u teoriji sagorevanja. Međutim, kod raketnih motora sagorevanje je često vrlo složeno. Zakonitosti hemijske kinetike tada su u drugom planu, a primarne su zakonitosti toplotne provodljivosti i gasodinamike.

*Cljučne reči:* dvobazna raketna goriva, brzina sagorevanja, teorija sagorevanja.

---

CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF BURNING OF DOUBLE  
BASE PROPELLANTS

*Summary:*

The investigation included studies of catalytic activities of ballistic modifiers and the process of burning of double base propellants. Burning of solid rocket propellants in one of the most complex types of burning. As it is known, any kind of burning is presented by chemical reactions and therefore chemical kinetics should play the basic role in the theory of burning. But, in rocket motors, burning is often complex and its character is changeable. The laws of chemical kinetics, therefore yield before the laws of thermal conduction and gas-dynamics.

*Key words:* double base propellants, burning rate, the theory of burning.

---

**Uvod**

Raketni baruti ili homogena dvobazna raketna goriva (DRG) čvrste su kolidne smeše koje sagorevaju u odsustvu kiseonika. U svom sastavu imaju sledeće konstituyente: nitrocelulozu, nitroglicerol ili dinitroglikol, odnosno njima slične nitroestre, stabilizatore procesa autokatali-

tičkog razlaganja aktivnih komponenata, interne plastifikatore (dietilftalat, dibutilftalat, dinitrotoluen i dr.), koji omogućavaju bolju tehnološku obradljivost, i aditive (modifikatore) brzine sagorevanja DRG.

Postoji više tipova balističkih modifikatora čiji su efekti različiti u zavisnosti od njihovih svojstava, načina delovanja i

ciljeva koji se žele postići. Balistički modifikatori u osnovnim sastavima (jaka smeša – JS) DRG omogućavaju da se reguliše nivo brzina sagorevanja ovih pogonskih materija, i da se istovremeno smanje vrednosti temperaturnog koeficijenta i eksponenta pritiska. Tako je moguće, u oblastima pritiska značajnim za rad raketnih motora, dostići vrednosti eksponenta pritiska čija je vrednost približno mala.

Modifikatori koji omogućavaju da se ostvare zahtevani efekti jesu jedinjenja olova i jedinjenja bakra pridružena jedinjenjima olova. Njihov uticaj zavisi od osobina i udela ovih supstanci, kao i od energetskih potencijala osnovnih sastava [3, 4, 5, 6].

### **Teorija sagorevanja dvobaznih raketnih goriva**

#### *Mehanizam sagorevanja dvobaznih raketnih goriva*

Karakteristike sagorevanja dvobaznih raketnih goriva su sledeće:

- u procesu sagorevanja čvrstog raketnog goriva dolazi do predgrevanja na određenoj dubini od površine sagorevanja, a površinski sloj se topi;

- hemijske reakcije razlaganja i oksidacije komponenata goriva započinju u čvrstoj fazi, a završavaju se u gasnoj fazi;

- kao posledica intenzivnog zagrevanja tečne faze, i u njoj obrazovanja gasnih produkata, sloj na površini ima penastu strukturu (u novijoj literaturi superficialna zona), gde je temperatura dovoljno visoka za molekulske razlaganje nitroestara u raketnom gorivu;

- simultana rekombinacija događa se tako da se stvara smeša  $\text{NO}_2$ , aldehida, kao i  $\text{NO}$  na površini sagorevanja. Ukupni energetski bilans razlaganja u ovoj fazi je egzoterman;

- temperatura na površini sagorevanja nije visoka, najčešće od 600 K do 900 K;

- istovremeno, sa isparavanjem tečne faze dolazi do dispergovanja čvrstih čestica goriva u penastom sloju. Obrazovane aerosolne čestice, srazmerno udaljenosti od površine sagorevanja, smanjuju se i na kraju sasvim nestaju.

Gasna faza deli se na dve zone: „tamnu“, sa maksimalnom temperaturom od 1700 K do 1900 K (u novijoj literaturi poznatija kao „fizz zona“ i „primarni plamen“, i „svetlu“ koju predstavlja sekundarni plamen sa maksimalnom temperaturom od 2500 K do 3500 K.

Podela na zone ima uslovni karakter pošto stvarni procesi zona nisu uvek izraženi, a fizičko-hemijski procesi mogu teći paralelno.

Čvrsta raketna goriva sagorevaju slojevito, paralelno sa površinom sagorevanja. Brzina promene položaja goreće površine, odnosno brzina kretanja plamena, definiše linearnu brzinu sagorevanja, tj. brzinu sagorevanja čvrstog raketnog goriva [6, 7].

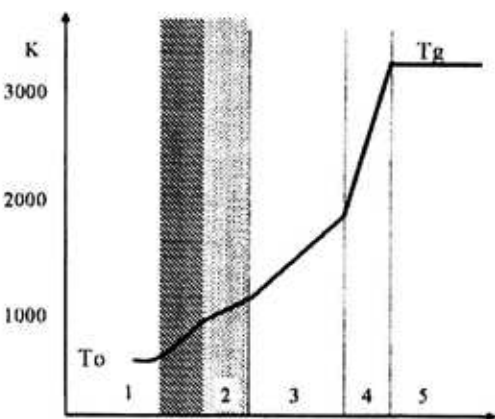
Brzina sagorevanja uslovljena je brzinom predavanja toplote od gorećih produkata sagorevanja (plamen) na površinu goriva. Ona zavisi od sastava goriva, pritiska u komori motora, brzine gasovitih produkata duž goreće površine i od početne temperature goriva.

Debljina zone sagorevanja veoma je mala, što istraživanja čini težim i složenim, kao i korišćenje termoparova veliči-

ne nekoliko mikrometara. Radi boljeg razumevanja zone sagorevanja, njene osnovne veličine prikazane su u tabeli (po Zeninu [1, 8]). Na slici 2 šematski je prikazana zona sagorevanja po modelu Parr-Crawforda [7].

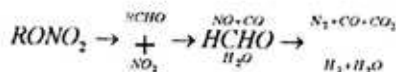
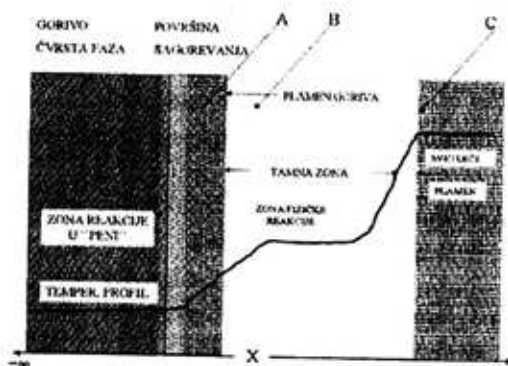
Sastav goriva određuje toplotni efekat reakcije, temperaturu sagorevanja, fizička svojstva, debljinu tečnog sloja, indukcioni period i širinu pretplamene ili dimno-gasne faze, brzinu hemijskih reakcija i širinu reakcione zone, tj. sve faktore od kojih zavisi gradijent temperature u zoni sagorevanja. Šema sagorevanja čvrstog raketnog goriva i karakter promene temperature, u opštem obliku predstavljeni su na slici 1 [1].

Homogena dvobazna raketna goriva imaju kontrolisan plamen, definisan jednodimenzionim hemijskim procesom, za razliku od trodimenzionih kompleksnih difuzionih procesa kod kompozitnih goriva. Plamen dvobaznih raketnih goriva može da se ispituje teorijski i eksperi-



Sl. 1 - Šema sagorevanja čvrstog raketnog goriva:

1 - čvrsta faza, 2 - tečni sloj, 3 - dimno-gasna zona (pretplamene reakcije), 4 - reakciona zona (plamena), 5 - zona maksimalne temperature,  $T_0$  - početna temperatura goriva,  $T_g$  - temperatura sagorevanja



Sl. 2 - Model Crawforda i Parra

mentalno. Međutim, u plamenu ovih materija postoje mnoge hemijske reakcije čija struktura do danas nije poznata.

Proces sagorevanja mase DRG odvija se kroz celokupnu zapreminu, međutim, radi jednostavnije teorijsko-matematičke analize prikazuje se u jednoj ravni. Opšte zakonitosti hemijske kinetike u procesu sagorevanja mogu se prikazati po zonama.

U zoni „pene“ (A) odvija se reakcija razlaganja nitroestara opšteg tipa:



Najslabija veza kod nitroceluloze i nitroglicerina je O-N. Imajući u vidu da je to primarni stepen od kojeg zavisi brzina hemijske reakcije, reakcija je monomolekulska. Pošto je koncentracija ovih veza definisana početnim sastavom, konačan red reakcije je nulti. Pri ovom razlaganju oslobađa se energija koja se troši na dispergovanje čvrste faze, isparavanje i topljenje ostalih komponenata sastava goriva [5, 8].

U tamnoj zoni (B) nastali čvrsti i gasoviti produkti C, NO, NCHO, CO,

Osnovne veličine zone sagorevanja kod goriva N

Pritisak (bar)	10	20	30	50	75	100
V (mm/s)	1,9	3,0	4,8	6,7	8,5	10,6
$m_f$ (kg/m <sup>2</sup> s)	3,0	4,8	7,7	10,7	13,6	17,0
$T_s$ (K)	573	620	643	673	698	718
$T_g$ (K)	-	1920	2020	2280	2330	2330
Zona predgrevanja (merena) ( $\mu$ m)	60	35	-	23	-	20
Vreme boravka u zoni predgrevanja (mereno/izračunato) (ms)	140/155	-	-	50	-	45
Superfijalna zona razlaganja ( $\mu$ m)	9	-	-	3	-	2
Vreme boravka u superfijalnoj zoni (ms)	5	-	-	0,4	-	0,15
Debljina plamena (merena) ( $\mu$ m)	200	-	-	75	-	110

H<sub>2</sub>O, R'CHO, N<sub>2</sub>O, HCN, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> i drugi, međusobno reaguju prema reakciji drugog reda. Pojedini stručnjaci [10] smatraju da su reakcije u tamnoj zoni podložne katalitičkim uticajima i da su verovatnije reakcije adicije od reakcija oksidacije.

U zoni plamena (C) najverovatnije su lančane reakcije između radikala, kada nastaju stabilni produkti krajnjeg sagorevanja (N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>), pri čemu se dostiže krajnja temperatura sagorevanja – temperatura plamena koja je viša od 2000 K.

Mehanizam koji uslovljava ove promene u procesu sagorevanja teško je opisati čak i kvalitativno, samim tim što ni opšti model sagorevanja dvobaznih raketnih goriva nema dovoljno relevantnih parametara za adekvatno definisanje mehanizma sagorevanja.

Proučavanje mehanizma sagorevanja goriva sa plato efektom predmet je izučavanja mnogih istraživača, počev od Rice i Ginela koji ističu ulegnuće na grafu pritisak – brzina, čija širina zavisi od početne temperature goriva. Kasnija istraživanja [3] ukazuju na to da kod modifikovanih DRG brzina sagorevanja ne mora zavisiti od pritiska.

U kasnijim istraživanjima (Preckela) rezultati su pokazali uticaj aromatičnih jedinjenja olova na brzine sagorevanja. Primećeno je da efikasnost olovnih jedinjenja zavisi od energije potrebne za njihovo raspadanje. Smatra se da se Pb-stearat lakše raspada i da deluje kod goriva nižeg toplotnog potencijala, a da su kod visokoenergetskih goriva efikasnija aromatična organska jedinjenja zbog toga što se ona teže razlažu. Pojavu plato efekta pri sagorevanju tumačili su mnogi istraživači (Bohman, Lenchitz i Haywood, Powling, Hewkin, Kubota – Ohlenmiller, Eisenreich i dr.).

Eksperimentalna ispitivanja Hewkina i Stonea [4] potvrdila su postojanje ugljenisane skrame sa metalnim uključcima u oblasti plato sagorevanja.

Uticaj katalizatora na brzine sagorevanja obimno je istraživao Kubota [5], a osnovni zaključci do kojih se došlo na osnovu eksperimentalnih rezultata su da katalizatori sagorevanja ne menjaju kinetiku hemijskih reakcija u tamnoj zoni. Na površini sagorevanja uočeno je postojanje ugljeničnih niti i sitnih čestica katalizatora. Povišenje temperature u „fizz-zoni“ je neznatno u prisustvu katalizatora.

U zoni plamena i tamnoj zoni nisu konstatovane bitne promene u prisustvu Pb jedinjenja. Smatra se da se kataliza odvija u „fizz-zoni“, vrlo blizu površine sagorevanja ili nešto pre nje. Takođe, konstatovano je da pojedini aditivi znatno povećavaju temperaturu plamena, i to na pritiscima ispod 30 bara, i poboljšavaju stabilnost sagorevanja do ispod 3 bara.

U prisustvu Pb jedinjenja konstatovan je povećan odnos  $CO_2/CO$ . Smatra se da je ovaj stehiometrijski odnos u „fizz-zoni“ poboljšao ugljenik koji se stvara u prisustvu katalizatora. U oblasti viših pritisaka katalizatori stvaraju manju količinu ugljenika, pa je i njihova efikasnost manja.

U prisustvu Pb soli hladno gorivo dostiže veliku superbrzinu i meza efekat, dok topla goriva imaju niže superbrzine locirane u oblasti nižih pritisaka. Veličina (nivo) superbrzine može zavisiti i od tehnologije izrade DRG.

Termogravimetrijska analiza olovnih soli obavljena je tako što je količina od nekoliko miligrama DRG podvrgnuta stalnom zagrevanju, uz permanentno merenje. Zapaženo je da na temperaturi od 573 K nema značajnijih promena na površini sagorevanja goriva, i da se so razgrađuje za nekoliko minuta. Pod istim uslovima nitroceluloza bi se razgradila na 473 K. Energija aktivacije razlaganja nitroceluloze iznosi 168 kJ/mol, a olovo stearata 126 kJ/mol, i ne postoji način da se dogodi na višim temperaturama.

Iz karakteristika Pb stearata može se odrediti da će za tipično vreme boravka u talasu sagorevanja od 10 ms, Pb-stearat dostići 973 K, tj. temperaturu razlaganja, što se dešava daleko iznad površine sagorevanja.

Ovi rezultati ukazuju da će se aktivni deo olovne soli, PbO ostatak, naći sa-

mo jednom iznad površine sagorevanja, i da se tada može vezati sa ugljeničnim ostacima koji se formiraju kod nemodifikovanih goriva. Iz svega navedenog može se dobiti samo kvalitativna slika mehanizma „superbrzina“.

Posmatranjem uzoraka pod elektronskim mikroskopom, i to onih koji su dobijeni brzim vakuumiranjem dok su sagorevali na različitim pritiscima, utvrđeno je da su kontrolna goriva imala izvesnu količinu ostatka ugljenika u oblasti pritisaka do 100 bara. Kad je dodata olovna so, količina ugljenika se znatno povećala u zoni superbrzina, da bi nestala na kraju zone meza efekta.

Smatra se da povećana količina izdvojenog ugljenika, pri sagorevanju modifikovanih goriva u prisustvu Pb aditiva, potiče od specifičnih reakcija aldehida sa PbO koji predstavlja ostatak raspadanja soli, a formira se malo iznad površine sagorevanja.

Uloga ugljenika, u manjem udelu, zajedno sa PbS daje efekat „platoa“ (znatno smanjenje vrednosti koeficijenta  $n$  u oblasti manjih pritisaka, do 70 bara), dok veći udeo ugljenika uspešno platonizira goriva od 70 bara do 110 bara. Maksimalno zasićenje ugljenika uslovljava, u kombinaciji sa Pb solima i nekim drugim modifikatorima, plato sagorevanje DRG u područjima viših pritisaka. Uočeno je da kataliza i platonizacija zavise od odnosa  $C/NO$  u „fizz“ zoni sagorevanja, i da je efekat platoa postignut kada je odnos  $C/NO = 1$  [10].

#### *Unutrašnjebalistički parametri*

U ovom radu su ukratko analizirane brzine sagorevanja i temperaturne osetljivosti.



Brzina sagorevanja čvrstog DRG je linearna brzina pomeranja granice između čvrstog goriva i gasovitih produkata njegovog razlaganja i sagorevanja.

Za kompozitna i dvobazna goriva primarna reakcija stvaranja toplote odigrava se između pirolizovanih produkata sagorevanja i metala. Čvrsta goriva sagorevaju u poluzatvorenom sistemu kakav je raketni motor. Parametarska zavisnost brzine sagorevanja ( $V$ ) u komori raketnog motora (RM) može se prikazati na sledeći način:

$$V = f\left(P_k \equiv P_o, T_{OOP}, \rho v, \frac{dp}{dt}, a\right) \quad (1)$$

odnosno

$$V = f_1(P_k) f_2(T_{OOP}) f_3(\rho v) f_4\left(\frac{dp}{dt}\right) f_5(a) \quad (2)$$

gde je:

$P_k = P_o$  – pritisak u komori sagorevanja;  
 $T_{OOP}$  – početna temperatura pogonskog punjenja;  
 $\rho v$  – specifični maseni fluks;  
 $dp/dt$  – brzina promene pritiska;  
 $a$  – ubrzanje normalno na površinu sagorevanja.

Brzina sagorevanja u funkciji pritiska u komori RM, može se prikazati izrazom:

$$V = f_1(P_k) = a_1 + b_1 P_o \quad (3)$$

Ovaj oblik linearne zavisnosti uglavnom se ne primenjuje, a najčešći je Sent-Robertov zakon koji glasi:

$$V = bP^n \text{ gde je } b = f(T_{OOP}) \quad (4)$$

Brzine sagorevanja DRG koja u sastavu imaju samo nitrocelulozu, nitroglicerini, stabilizator i plastifikator zavisne su samo od toplotne vrednosti goriva prema jednačini:

$$V = e^{-1,02+0,236\frac{Q}{4187}} P^{0,468+0,24\frac{Q}{4187}} \quad (5)$$

Temperaturna osetljivost goriva obično se opisuje sledećim empirijskim izrazima:

$$\sigma_p = \left(\frac{\partial \ln V}{\partial T}\right)_p \quad (6)$$

$$\sigma_{K_n} = \left(\frac{\partial \ln V}{\partial T}\right)_{K_n} \quad (7)$$

gde je:

$\sigma_p$  – temperaturna osetljivost  $V$  na određenom pritisku;

$\sigma_{K_n}$  – temperaturna osetljivost  $V$  na određenoj vrednosti  $K_n$  ( $K_n = Sg/At$ ).

Zbog kompleksne zavisnosti temperaturne osetljivosti od  $T$ ,  $P$ ,  $V$  neophodno je uvesti i nove relacije kao što su:

$$\pi_{K_n} = \left(\frac{\partial \ln P}{\partial T}\right)_{K_n} \quad (8)$$

gde je  $\pi_{K_n}$  temperaturna osetljivost pritiska na određenoj vrednosti  $K_n$ , i

$$\pi_{P/V} = \left(\frac{\partial \ln P}{\partial T}\right)_{P/V} \quad (9)$$

gde je  $\pi_{P/V}$  temperaturna osetljivost na određenoj vrednosti  $P/V$ .

Polazeći od zakona brzine sagorevanja,  $V = bP^n$ , gde je  $b = f$  (Toop), i od jednačine ravnotežnog pritiska u komori motora, može se doći do izraza:

$$\sigma_{Kn} = \sigma_p + n\pi_{Kn} \quad (10)$$

odnosno:

$$\pi_{p/v} = \frac{\sigma_p}{1-n}$$

Kao mera efikasnosti balističkih modifikatora koristi se koeficijent katalitičke aktivnosti  $K[1]$ , koji predstavlja odnos brzine sagorevanja goriva sa modifikatorima i brzine sagorevanja referentnog modela DRG bez balističkih modifikatora:

$$K = \frac{V_m}{V_o} = \frac{b_m P^{n1}}{b_o P^{no}} = k P^{n1-no} \quad (11)$$

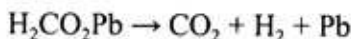
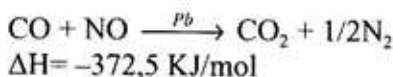
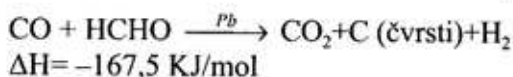
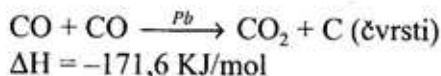
## Diskusija

Razmatraće se uloga balističkih modifikatora u mehanizmu sagorevanja goriva.

Kod modifikovanih DRG na bazi različitih aditiva i pored različitih katalitičkih aktivnosti, proces sagorevanja uglavnom se odvija na površini sagorevanja ili u „fizz“ (tamnoj) zoni [4, 10 i dr.].

Najbolju katalitičku efikasnost u DRG pokazuju jedinjenja olova i bakra. Pretpostavlja se da ova jedinjenja doprinose povećanoj redukciji NO ugljenikom koji se stvara u prisustvu katalizatora. Smanjenje koncentracije NO pomoću aldehida, CO, H<sub>2</sub> ili ugljenika krajnje je egzoterman proces. Ugljenik je dobar katalizator za mnoge gasne reakcije, a olovo je katalizator za CO<sub>2</sub> i ugljenik [10].

Lako se dokazuje da viši odnosi CO<sub>2</sub>/CO u gasnim produktima doprinose višoj energiji katalizovanih goriva u oblasti supersagorevanja. To se uočava i iz reakcije prevodenja CO u CO<sub>2</sub>, kao što je npr.:



Svaka od ovih reakcija je egzotermna i utiče na povećanje temperature sagorevanja.

Na prvi pogled, činjenica da je kataliza sa jedinjenjima olova bolja (veća) na 20 ili 40 bara nego na 1 bar, može ukazati da je aktivnost katalizatora locirana u sekundarnoj zoni plamena (kao što je i predložio Camp). Međutim, to je demantovano u [5], a takođe nije saglasno sa velikim brojem eksperimentalnih rezultata. U stvari, kataliza se uglavnom odvija na površini sagorevanja i/ili u „fizz“ zoni.

Kubota [5, 8] je pokazao da goriva sa olovnim modifikatorima pokazuju stepenasti gradijent temperature u „fizz“ zoni, i pretpostavio da je uzrok tome povećanje NO<sub>2</sub> (odnos aldehida koji je proizi-šao iz povećanja stvaranja ugljenika na površini). Takođe, pretpostavio je da kataliza ne menja toplotni efekat čvrste faze i ukazao na to da stepenasti temperaturni gradijent utiče na veću toplotnu provodljivost ka površini. Stvaranje ugljenika, ili relativno povećano stvaranje

nje CO<sub>2</sub> u odnosu na CO, jeste egzoterman proces, što uslovljava pojavu viših temperatura gasova koji ulaze u „fizz“ zonu, a samim tim i brže reakcije u ovoj zoni.

Redukcija NO uslovljava povećanje udela CO<sub>2</sub> u odnosu na CO i favorizuje stvaranje ugljenika na površini sagorevanja. S druge strane, ugljenik i relativno povećano stvaranje CO<sub>2</sub> u odnosu na CO je egzotermni proces i uslovljava povećanje temperature gasova koji ulaze u „fizz“ zonu, usled čega se povećava brzina reakcije u ovoj zoni.

Oblast platoa pojavljuje se usled smanjenja udela ugljenika. Može se pretpostaviti da kataliza i platonizacija zavise od odnosa C i NO u zoni „penušanja“ („fizz“ zoni), kao što je prikazano sledećim odnosima [10]:

– ako je C/NO veće od 1 radi se o području superbrzog sagorevanja;

– ako je C/NO = 1 radi se o području plato – meza sagorevanja;

– ako je C/NO manje od 1 radi se o području post plato sagorevanja.

U oblasti plato – meza sagorevanja dvobazna raketna goriva imaju mali koeficijent temperaturene osetljivosti,

$$\pi_{Kn} = \left( \frac{\partial \ln P}{\partial T} \right)_{Kn}, \text{ odnosno } \sigma_p = \left( \frac{\partial \ln V}{\partial T} \right)_p.$$

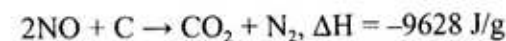
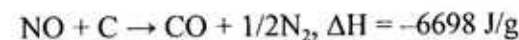
Ovaj mehanizam superbrzog sagorevanja je u saglasnosti sa eksperimentalno-teoretskim radovima. Proračuni su rađeni pod pretpostavkom da se transformacija ugljenika u CO, azota u NO i 50% vodonika u H<sub>2</sub>O ostvaruje u „fizz“ zoni. Dalji rezultati, u zavisnosti od udela ugljenika, povoljno deluju na katalizu i platonizaciju DRG u prisustvu olovnih jedinjenja i podržavaju ovaj proces. Čak

0,2 dela ugljenika, zajedno sa baznim olovo-stearatom, daje plato efekat (znatno smanjenje koeficijenta n u oblasti manjih pritisaka – do 70 bara), dok udeo preko 0,5 dela ugljenika sa olovnim solima stvara plato efekat i do 150 bara. Povećanje koncentracije ugljenika iznad 0,5 delova poboljšava efekat i preko 150 bara. Preporučuje se da se odnos C prema NO održava konstantnim (oko 1) [10].

Analizom ispitivanih opitnih modela u eksperimentalnim istraživanjima [8] i iz prethodnih zapažanja može se konstatovati sledeće:

– efekat balističkih modifikatora (metalne organske soli ili metalni oksidi olova i bakra) jeste, najverovatnije, prouzrokovan hemijskom interakcijom, koja započinje stvaranjem površinskog kompleksa, na primer olovnog oksida ili disociranog olovnog jedinjenja, na kiseoničnom ostatku disocirane gorivne komponente;

– u katalizovanom gorivu stvara se znatno gušći sloj na površini sagorevanja. On se formira interakcijom između aldehida i PbO čestica uhvaćenih u ugljeničnom ostatku. To može ubrzati reakcije NO – ugljenik, a očekivane su sledeće:



Ove egzotermne reakcije povećavaju temperaturu plamena i dovode do uvećanja toplotnog fluksa na površini goriva [5, 8];

– na vrednost brzine sagorevanja utiče hemijski sastav goriva, zračenje i maseni protok vrelih gasova (pV).



Najveći uticaj na brzinu sagorevanja ima hemijski sastav goriva. U principu, najbrže sagorevaju ona goriva pri čijem se sagorevanju oslobađa najveća energija, međutim modifikovana goriva sa plato i meza efektom znatno odstupaju od prikazanih zavisnosti brzine sagorevanja i toplotne moći. Povećan toplotni efekat čvrste faze, zajedno sa povećanim konduktivnim prenosom toplote na površinu, takođe su uslovljeni katalitičkom aktivnošću Pb jedinjenja.

U slučaju goriva veće toplotne moći, sa umerenom superbrzinom, nakon koje nastaje plato efekat, stvara se znatno veća koncentracija ugljenika, što je verovatno uslovljeno interakcijom aldehida i čestica PbO zadržanih u ostacima ugljenika. To može podstaći reakcije NO – ugljenik, proizvesti više temperature plamena i dovesti do uvećanja toplote reakcije, bliže površini. Brzina sagorevanja modifikovanih goriva može biti i ispod brzine sagorevanja osnovnog goriva. Tragove toplog crvenog ostatka koji su odbačeni sa površine uočili su u oblasti platoa i više Eisenreich i Kubot. Ovaj gubitak ugljenika može dovesti do smanjenja reakcije NO – ugljenik i odgovarajućeg smanjenja brzine sagorevanja.

Kod hladnih goriva više ugljenika se stvara čak i kod osnovnog goriva, tako da su uočeni relativno debeli ostaci ugljenika nakon sagorevanja. Posmatranjem sagorevanja (Eisenreich, Hawkin) uočeno je da sekundarni svetli plamen doseže do površine. U većini slučajeva plamen se fizički drži za površinu debelim slojem ugljenika. Buran kraj superbrzine sa jasnim meza efektom može biti uzrokovan pucanjem debelog ostatka. Dodatkom ugljenika proširuje se oblast superbrzina.

Idući naviše uz plamen, atmosfera toplog NO postaje sve bliža površini, koja apsorbuje ugljenik i eliminiše mogućnost bilo kakve interakcije ugljenikovih ostataka na visokim pritiscima. Vizuelnim pregledom utvrđeno je da površina ostaje bez ugljenika na višim pritiscima (preko 300 bara) [5].

## Zaključak

Osnovni uticaj na mehanizam sagorevanja dvobaznih raketnih goriva ima njegov hemijski sastav.

Najbrže sagorevaju ona goriva koja u tom procesu oslobađaju najveću energiju, međutim, modifikovana goriva sa plato i meza efektom znatno odstupaju od prikazanih zavisnosti brzine sagorevanja i toplotne moći, tako da zakoni termo i gasodinamike mogu imati i dominantniji uticaj u procesu sagorevanja.

Toplotni efekti čvrste faze, zajedno sa povećanim konduktivnim prenosom toplote na površinu, takođe su uslovljeni katalitičkom aktivnošću olovnih jedinjenja i drugih balističkih modifikatora.

Kod dvobaznih goriva veće toplotne moći, sa umerenom superbrzinom sagorevanja nakon koje nailazi plato efekat, stvara se mnogo veća koncentracija ugljenika, što je verovatno uslovljeno interakcijom aldehida i čestica PbO zadržanih u ostacima ugljenika.

Plamen sagorevanja fizički se drži za površinu debelim slojem ugljenika, pa se dodavanjem ugljenika, kao balističkog modifikatora, proširuje oblast super brzina sagorevanja. Vizuelnim pregledom utvrđeno je da površina ostaje bez ugljenika na pritiscima preko 300 bara.

*Literatura:*

- [1] A. I., Grigorijev: Tverdiye raketnije topliva, Izdatel'stvo Himija, Moskva, 1969.
- [2] A. S., Androsov: Fizika Gorenjija i Vzriva, 1977, 4 (576-584).
- [3] R. F., Preckel: ARS Journal, vol. 31, No 8, 1961, 1286.
- [4] D. J., Hewkin: Verbrennungsvorgange bei Treib und Brennstoffen, 1974., 35.
- [5] N., Kubota; T. J., Ohlemiller, L. H., Caveny; M., Sumerfield: AIAA Journal, vol. 12, No 2, 1974, 1709.
- [6] Lewis, J.: The effect of Processing Variations on the Ballistics of Fast-Burning, Ekstruded, Double Base Propellants, AIAA/SAE 14-th Joint Propulsion Conference, Las Vegas, NEV/Juli 25-27, 1978.
- [7] R. G., Parr; B. L., Crawford: The Journal of Physical and Colloid Chemistry, 1950, 929.
- [8] P., Maslak: Upporedno ispitivanje različitih balističkih modifikatora u dvobaznim barutima, Magistarski rad, TMF, Beograd, 1990. god.
- [9] K. C., Salooja: Combustion Flame 11, 247 (1967).
- [10] S., Hardwar; K., Rao: Mechanism of Combustion of Catalyzed DoubleBasePropellants, Combustion and Flame 71: 205-213 (1988).