

Univerzitet u Beogradu

Aleksandar M. Milivojević

# FIZIKA SAGOREVANJA



Mašinski fakultet  
Beograd 2023.

Univerzitet u Beogradu

Mašinski fakultet

## FIZIKA SAGOREVANJA

### 1. Izdanje

Recenzenti:

dr Miroljub Adžić, professor emeritus

prof. dr Marija Živković

Izdavač:

Univerzitet u Beogradu

MAŠINSKI FAKULTET

Ul. Kraljice Marije br.16, Beograd

Tel. (011) 3370-299

Faks. (011) 3370-364

[www.mas.bg.ac.rs](http://www.mas.bg.ac.rs)

Za izdavača:

Dekan, prof. dr Vladimir Popović

Urednik:

Dr Milan Lečić, red. prof.

Predsednik komisije za izdavačku delatnost

Mašinskog fakulteta u Beogradu

Tiraž: 100 primeraka

Štampanje odobrila:

Komisija za izdavačku delatnost

Mašinskog fakulteta u Beogradu

i

Dekan Mašinskog fakulteta

Odlukom br. 02/2023

od 16.03.2023.

Štampa: "Planeta-print", 11000 Beograd

[www.planeta-print.rs](http://www.planeta-print.rs)

Beograd, 2023. godine

ISBN 978-86-6060-151-5

**Univerzitet u Beogradu**

**Aleksandar M. Milivojević**

# **FIZIKA SAGOREVANJA**

Mašinski fakultet  
Beograd 2023.

## **Predgovor**

Ova knjiga proizašla je iz potrebe za udžbenikom koji bi obuhvatio gradivo koje predajem na osnovnim i master studijama na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu, a odnosi se na tematiku iz oblasti sagorevanja. Ovaj udžbenik sadrži teoretske osnove kao i rešene računске primere koji su vezani za sledeće kurseve: Ekologija sagorevanja, Sagorevanje i održivi razvoj B, Sagorevanje i održivi razvoj M, Uređaji za sagorevanje, Fizika eksplozivnih procesa i Sagorevanje za sisteme propulzije.

Zahvalan sam svakome ko mi ukaže na greške i propuste nastale prilikom pisanja ovog udžbenika.

U Beogradu,

februar 2023.

Aleksandar Milivojević

## Sadržaj

Sagorevanje.....	1
Definicija sagorevanja .....	1
Stehiometrijske jednačine sagorevanja .....	2
Stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanje ugljenika .....	2
Stehiometrijska jednačina sagorevanje vodonika .....	3
Stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanje sumpora .....	3
Stehiometrijska jednačina nepotpunog sagorevanje ugljenika .....	3
Hess-ov zakon .....	4
Hess-ov trougao .....	5
Teorijska količina kiseonika potrebna za potpuno sagorevanje $O_{min}$ .....	5
Teorijska količina vazduha potrebna za potpuno sagorevanje $L_{min}$ .....	8
Materijalni bilans sagorevanja goriva tipa $C_mH_nO_k$ .....	9
Elementi hemijske termodinamike .....	11
Jednačina stanja .....	12
Odnos masa-mol .....	13
Maseni udeo .....	14
Molarni udeo .....	14
Prvi zakon termodinamike .....	14
Drugi zakon termodinamike .....	15
Termodinamički potencijali .....	16
Hemijski potencijal .....	17
Zakon Lavoazijea (Lavoisier) i Laplase (Laplace) .....	20
Dalton-ov zakon.....	20
Toplotna energija hemijske reakcije .....	20
Toplota formiranja .....	21

Standardna toplota (entalpija) reakcije .....	21
Zavisnost toplote reakcije od temperature (Kirchoff-ov zakon).....	22
Toplotna moć .....	22
Veza između gornje i donje toplotne moći .....	23
Temperatura sagorevanja .....	23
Primer određivanja temperatura sagorevanja računskim putem.....	26
Hemizam sagorevanja .....	33
Brzina reakcije .....	33
Frekvencija sudara .....	33
Brzina reakcije .....	34
Kompleks aktivacije.....	37
Arrhenius-ov zakon.....	37
Mlekularnost i red hemijske reakcije.....	40
Integralni oblici jednačina.....	40
Složene reakcije .....	41
Povratne reakcije.....	41
Paralelne reakcije .....	41
Uzastopne reakcije .....	41
Lančane reakcije .....	42
Hemijska ravnoteža.....	43
Konstanta hemijske ravnoteže .....	45
Uticao temperature na konstantu hemijske ravnoteže .....	46
Le Chateriel-ov princip .....	48
Uticao katalizatora .....	48
Difuziona i kinetička oblast reagovanja.....	50
Teorije paljenja .....	50
Samopaljenje.....	51
Temperatura samopaljenja, granice .....	51

Prinudno paljenje .....	54
Paljenje plamenom.....	54
Paljenje električnom varnicom .....	55
Minimalna energija paljenja i rastojanje gašenja.....	55
Paljenje zagrejanim telom.....	57
Vrste i struktura plamena .....	58
Brzina prostiranja fronta plamena.....	62
Pojave nestabilnosti u procesu sagorevanja gasovitih goriva.....	63
Disocijacija .....	64
Detonativno sagorevanje.....	66
Model sagorevanja izdvojene kapljice tečnih goriva.....	68
Vreme sagorevanja kapljice.....	71
Stabilizacija plamena i metode stabilizacije plamena.....	72
Oduvavanje i stabilizacija plamena .....	77
Mehanizmi oduvavanja plamena .....	78
Oduvavanje plamena u siromašnoj smeši - teorijske osnove.....	81
Stabilizacija plamena kao preventiva pojavi oduvavanja plamena.....	82
Stabilizacija sagorevanjem u vihornoj struji.....	83
Granice oduvavanja plamena.....	85
Specifičnosti sagorevanja čvrstih goriva .....	87
Sagorevanje u fluidizovanom sloju.....	87
Sagorevanje uglja.....	88
Modeli sagorevanja uglja.....	89
Zagadjujuće komponente u produktima sagorevanja .....	94
Ugljen monoksid i nesagoreli ugljovodonici .....	95
Azotni oksidi.....	96
Azot monoksid.....	96
Termički NO .....	96

Promptni NO.....	96
Gorivi NO .....	97
Sumporni oksidi.....	99
Čvrste čestice .....	100
Gasovi staklene bašte.....	100
Ugljen dioksid CO <sub>2</sub> .....	100
Raketna goriva .....	105
Tečna raketna goriva.....	105
Hibridna raketna goriva .....	107
Čvrsta raketna goriva .....	108
Tendencije u razvoju čvrstih raketnih goriva.....	110
Brzina gorenja kod čvrstih raketnih goriva.....	111
Model gorenja DB pogonskih materija.....	112
Dvobazne (DB) pogonske materije.....	112
Sagorevanje kompozitnih goriva .....	115
Model višestrukog plamena (BDP).....	117
Sagorevanje metala .....	118
Poboljšanje performansi postojećih goriva.....	120
Nova dostignuća u razvoju čvrstih raketnih goriva .....	121
Hipotetička goriva.....	122
Sagorevanje računski primeri .....	122
Značenja indeksa.....	124
Sagorevanje čvrstih goriva.....	124
Sagorevanje tečnih i gasovitih goriva.....	152
Sagorevanje bojevih materija.....	172
LITERATURA .....	178



## Sagorevanje

### Definicija sagorevanja

Sagorevanje predstavlja složen fizičko hemijski proces intenzivne oksidacije goriva koji je praćen oslobađanjem znatne količine toplote kao i određenim svetlosnim efektima. Sagorevanje se u osnovi sastoji od niza termohemijskih reakcija. Termohemijske reakcije koje su praćene intenzivnim oslobađanjem toplote nazivamo egzotermnim termohemijskim reakcijama, dok termohemijske reakcije za čije odvijanje treba dovesti u utrošiti određenu količinu toplote nazivamo endotermnim termohemijskim reakcijama.

Prilikom odvijanja određene hemijske reakcije razlikujemo tzv. reaktante koji predstavljaju jedinjenja koja u određenim uslovima međusobno reaguju stvarajući nova jedinjenja koja nazivamo produktima hemijske reakcije. U slučaju egzotermnih termohemijskih reakcija, u koje spada sagorevanje, pored materijalnih produkata sagorevanja dobijamo i određenu količinu oslobođene toplote.

Kada govorimo o reaktantima koji tokom sagorevanja stupaju u interakciju treba napomenuti da jedan reaktant predstavlja gorivo dok je drugi oksidator. Kod klasičnog sagorevanja oksidator je kiseonik i to najčešće kiseonik iz okolnog vazduha.

U zavisnosti od količine oksidatora koga dovodimo u proces sagorevanje može biti potpuno i nepotpuno.

Kod potpunog sagorevanja, kada u procesu sagorevanja raspoložemo dovoljnom količinom oksidatora da bi data količina goriva u potpunosti sagorela i oslobodila celokupnu potencijalnu hemijsku energiju koju dato gorivo sadrži, produkte sagorevanja čine:

$\text{CO}_2$  – nastao sagorevanjem ugljenika iz goriva.

$\text{H}_2\text{O}$  – nastala sagorevanjem vodonika iz goriva,

$\text{SO}_2$  – nastao sagorevanjem sumpora iz goriva,

$\text{N}_2$  – koji se, kod klasičnog sagorevanja, može nalaziti u vazduhu u kome se nalazi i kiseonik koji se koristi kao oksidator u procesu, a može se nalaziti i u samom gorivu,

$\text{O}_2$  – koji se, kod klasičnog sagorevanja, može nalaziti u vazduhu, zatim se može dovesti u proces kao čist kiseonik a može biti integrisan i u molekulu goriva.

U slučaju nepotpunog sagorevanja, pored već navedenih produkata potpunog sagorevanja nailazimo i na nesagorele gorive komponente. Produkte nepotpunog sagorevanja čine:

CO – nastao prilikom nepotpunog sagorevanja ugljenika iz goriva,

$C_mH_nO_k$  – nesagoreli ugljovodonici (kod sagorevanja ugljovodoničnog goriva),

$H_2$  – vodonik,

C – ugljenik u čađi, pepelu i dr.

Prema agregatnom stanju u kome se nalaze gorivo i sagorevanje može biti:

Homogeno – ako su obe komponente (gorivo i oksidator) u istoj fazi (slučaj sagorevanja gasovitih i tečnih goriva).

Heterogeno – ako se agregatno stanje gorivih komponenti razlikuje (slučaj sagorevanja čvrstih goriva).

Prema karakteru protoka smeše gorivo/oksidator, sagorevanje može biti:

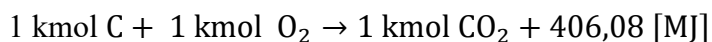
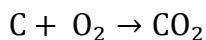
laminarno, ili

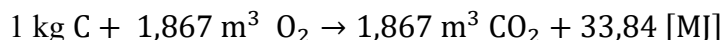
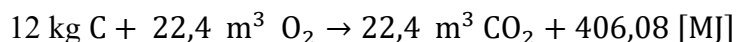
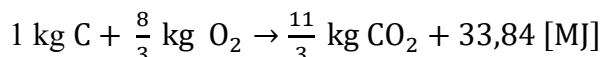
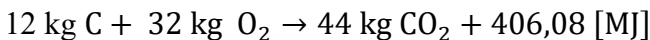
turbulentno.

## Stehiometrijske jednačine sagorevanja

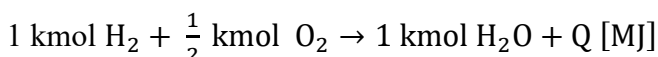
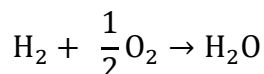
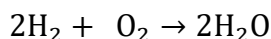
Jednačine koje nam pokazuju u kojim međusobnim odnosima gorive komponente reaguju sa oksidatorom, kolika količina oksidatora je potrebna za proces potpunog sagorevanja, koja količina produkata sagorevanja nastaje tokom odvijanja procesa sagorevanja, kao i kolika količina toplote se oslobodi tom prilikom, nazivaju se stehiometrijske jednačine sagorevanja. Ove jednačine napisane su za sve gorive komponente. Budući da je proces sagorevanja krajnje složen stehiometrijske jednačine nam daju samo početno i krajnje stanje prilikom procesa sagorevanja. Takođe, treba napomenuti da se procesi sagorevanja prikazani stehiometrijskim jednačinama odvijaju sa tačno potrebnom količinom čistog kiseonika za formiranje određenih produkata sagorevanja.

## Stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanje ugljenika

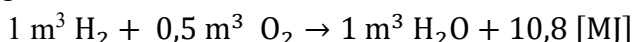
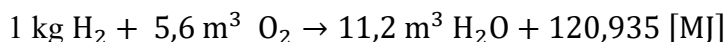
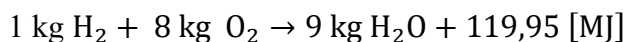
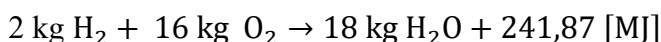
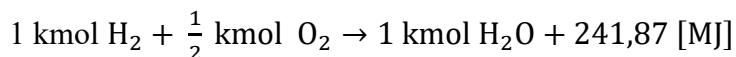




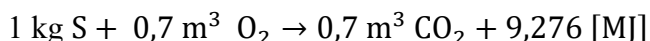
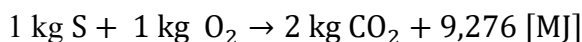
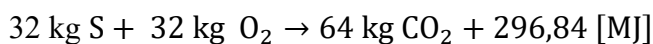
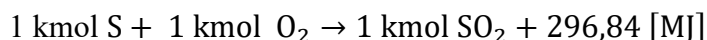
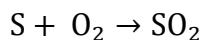
### **Stehiometrijska jednačina sagorevanje vodonika**



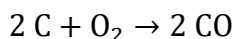
Količina toplote Q koja se oslobađa sagorevanjem 1 kmol H<sub>2</sub> može imati dve vrednosti zavisno od toga da li je voda ohlađena na okolnu temperature ili ostaje u parnom stanju. Za slučaj da vodena para u produktima sagorevanja ostaje u parnom stanju dobijamo:

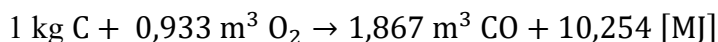
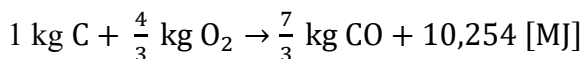
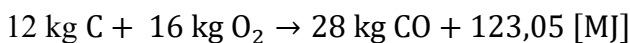
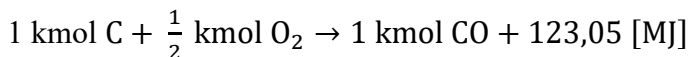
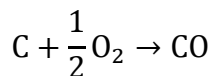


### **Stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanje sumpora**

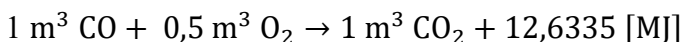
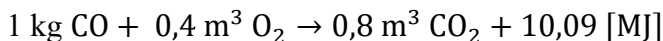
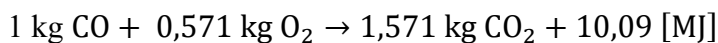
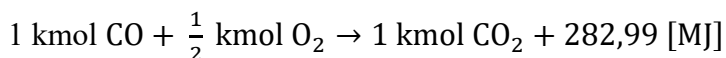
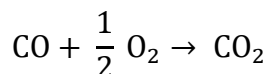
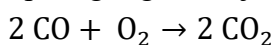


### **Stehiometrijska jednačina nepotpunog sagorevanje ugljenika**





Stehiometrijska jednačina potpunog sagorevanje ugljenmonoksida

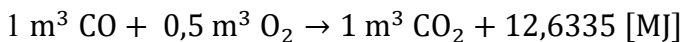
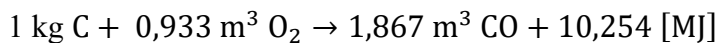
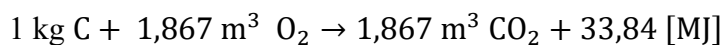


## Hess-ov zakon

Formulacija Hess-ov zakona glasi:

Količina toplote koju dobijemo ili utrošimo tokom odvijanja određene termohemijske reakcije ne zavisi od puta odvijanja reakcije, već isključivo od početnog i krajnjeg stanja reakcije.

Hess-ov zakon preko stehiometrijskih jednačina:



Vidimo da je:

$$10,254 + 1,867 \cdot 12,6335 = 33,84.$$

## Hess-ov trougao

Za grafički prikaz Hess-ovog zakona poslužimo se Hess-ovim trouglom (slika 1.) gde je:

$Q_{1,2}$  – Toplota oslobođena prilikom odvijanja hemijske reakcije čije je početno stanje 1, a krajnje stanje 2.

$Q_{2,3}$  – Toplota oslobođena prilikom odvijanja hemijske reakcije čije je početno stanje 2, a krajnje stanje 3.

$Q_{1,3}$  – Toplota oslobođena prilikom odvijanja hemijske reakcije čije je početno stanje 1, a krajnje stanje 3.

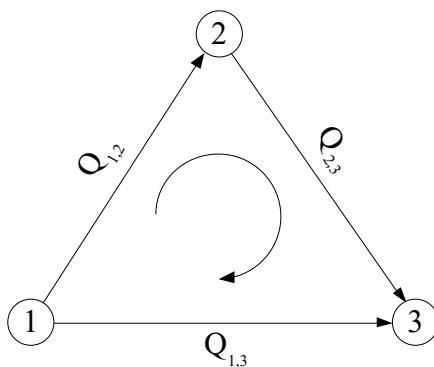
Tada imamo da je:

$$Q_{1,2} + Q_{2,3} - Q_{1,3} = 0,$$

$$Q_{1,2} + Q_{2,3} = Q_{1,3},$$

ili

$$Q_{2,3} = Q_{1,3} - Q_{1,2}.$$



Slika 1. – Hess-ov trougao

## Teorijska količina kiseonika potrebna za potpuno sagorevanje Omin

Teorijska količina kiseonika (oksidatora) predstavlja minimalno potrebnu količinu kiseonika (oksidatora) neophodnu za potpuno sagorevanje svih gorivih komponenti u određenoj količini goriva. Ova količina kiseonika (oksidatora) zavisi prevashodno od sastava goriva, obeležava se sa Omin a

izražava se kao količina kiseonika (oksidatora) po količini sagorelog goriva t.j.  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right]$  ili  $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}\right]$  za čvrsta i tečna goriva, odnosno  $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}\right]$  za gasovita goriva.

Ukoliko nam je poznat elementarni sastav goriva izražen preko masenih udela pojedinih komponenata goriva, imamo:

$$Omin \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right] = Omin_C g_C + Omin_H g_H + Omin_S g_S - g_O,$$

gde su:

$Omin_C \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right] = \frac{8}{3}$ , teorijska količina kiseonika (oksidatora) potrebna za potpuno sagorevanje ugljenika,

$Omin_H \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right] = 8$ , teorijska količina kiseonika (oksidatora) potrebna za potpuno sagorevanje vodonika.

$Omin_S \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right] = 1$ , teorijska količina kiseonika (oksidatora) potrebna za potpuno sagorevanje sumpora,

$g_C [\%m/m]$ , maseni udeo ugljenika u gorivu,

$g_H [\%m/m]$ , maseni udeo vodonika u gorivu,

$g_S [\%m/m]$ , maseni udeo sumpora u gorivu,

$g_O [\%m/m]$ , maseni udeo kiseonika u gorivu.

Posle zamene odgovarajućih vrednosti dobijamo:

$$Omin \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right] = \frac{8}{3} g_C + 8 g_H + g_S - g_O.$$

Uvođenjem Molier-ove konstante:

$$\sigma = 1 + \frac{3g_H - \frac{3}{8}(g_O - g_S)}{g_C},$$

Dobijamo:

$$Omin \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}}\right] = 2,67 \sigma g_C.$$

Takođe u zavisnosti od jedinica u kojima izražavamo Omin možemo koristiti i sledeće obrasce:

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} \right] = \frac{\sigma_{\text{GC}}}{12},$$

i

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = 1,867 \sigma_{\text{GC}}.$$

Ovai izrazi uglavnom se koristi za čvrsta goriva.

Ukoliko imamo tečno gorivo definisano opštim izrazom za ugljovodonična goriva tipa  $C_mH_n$  koristimo sledeće obrasce za izračunavanje teorijske količine kiseonika:

$$\begin{aligned} O_{\min} \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} \right] &= m + \frac{n}{4}, \\ O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] &= \frac{(m + \frac{n}{4}) \cdot 22,4}{12m + n}, \\ O_{\min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] &= \frac{(m + \frac{n}{4}) \cdot 32}{12m + n}, \end{aligned}$$

Gde su:  $m$  - broj atoma ugljenika, a  $n$  - broj atoma vodonika u gorivu tipa  $C_mH_n$ .

Za tečna goriva sastavljena iz više ugljovodoničnih komponenti tipa  $C_mH_n$  teorijska količina kiseonika računa se prema sledećem izrazu:

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = 22,4 \cdot \sum_{i=1}^k \frac{m_i + \frac{n_i}{4}}{12m_i + n_i}.$$

Ukoliko su tečna goriva sastavljena iz više ugljovodoničnih komponenti tipa  $C_mH_nO_k$  teorijska količina kiseonika računa se prema sličnim izrazima:

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = 22,4 \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(m_i + \frac{n_i}{4} - \frac{k_i}{2})}{12m_i + n_i + 16k_i},$$

Odnosno

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] = 32 \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(m_i + \frac{n_i}{4} - \frac{k_i}{2})}{12m_i + n_i + 16k_i}.$$

Kod gasovitih goriva teorijska količina kiseonika računa se prema sastavu goriva, koja se opet najčešće sastoje iz ugljenmonoksida, vodonika i gasovitih ugljovodonika. Ukoliko zapreninsko učešće određene gasovite komponente u gorivu obeležimo sa  $r_i$ , teorijsku količina kiseonika izračunavamo prema sledećem izrazu:

$$O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \frac{1}{2} (r_{\text{CO}} + r_{\text{H}}) + \sum_{i=1}^k \left( m_i + \frac{n_i}{4} \right) \cdot r_i - r_{\text{O}},$$

gde su  $m_i$  i  $n_i$  brojevi atoma ugljenika i vodonika, respektivno, u ugljovodoničnoj komponenti goriva.

## **Teorijska količina vazduha potrebna za potpuno sagorevanje $L_{\min}$**

Budući da se za procese sagorevanja često kao oksidator koristi kiseonik iz vazduha, svakako je važno odrediti teorijsku ili minimalno potrebnu količinu vazduha u kojoj je sadržana minimalno potrebna količina kiseonika neophodna za potpuno sagorevanje određenog vrste goriva.

Teorijska količina vazduha obeležava se sa  $L_{\min}$  i računa se na osnovu teorijske količine kiseonika, prema sledećim izrazima:

$$L_{\min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] = \frac{O_{\min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right]}{0,232},$$

$$L_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] = \frac{O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]}{0,21},$$

$$L_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \frac{O_{\min} \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right]}{0,21}.$$

Gde 0,21 i 0,232 predstavljaju zaokružene vrednosti zapreminskog i masenog učešća kiseonika u vazduhu respektivno.

Stvarna količina kiseonika  $O_s$ , vazduha  $L_s$  i koeficijent viška vazduha  $\lambda$

Stvarna količina kiseonika (oksidatora) ili vazduha, u zavisnosti od toga da li imamo sagorevanje sa čistim kiseonikom ili sa kiseonikom koji se nalazi u vazduhu, često se razlikuje od teoretski potrebne količine kiseonika odnosno vazduha potrebne za potpuno sagorevanje datog goriva.



Stvarna količina kiseonika obeležava se sa  $O_s$ , a stvarna količina vazduha sa  $L_s$  i izračunavaju se preko teorijske količine kiseonika  $O_{min}$ , odnosno teorijske količine vazduha  $L_{min}$  prema sledećim izrazima:

$$O_s \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \lambda \cdot O_{min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right],$$

odnosno,

$$L_s \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right] = \lambda \cdot L_{min} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}, \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right].$$

Sa  $\lambda$  je označen koeficijent viška vazduha koji predstavlja odnos stvarne i teorijski potrebne količine vazduha odnosno kiseonika (oksidatora) u toku procesa sagorevanja:

$$\lambda = \frac{L_s}{L_{min}},$$

$$\lambda = \frac{O_s}{O_{min}}.$$

Ukoliko koeficijenta viška vazduha ima vrednost 1 ( $\lambda=1$ ), imamo stehiometrijsku smešu goriva i vazduha (oksidatora), za vrednost koeficijenta viška vazduha manju od 1 ( $\lambda<1$ ) imamo bogatu smešu goriva i vazduha (oksidatora), dok za vrednost koeficijenta viška vazduha veću od 1 ( $\lambda>1$ ) imamo siromašnu smešu goriva i vazduha (oksidatora).

U anglosaksonskoj literaturi se češće koristi termin equivalence ratio ( $\phi$ ) koji je inverzna vrednost koeficijent viška vazduha.

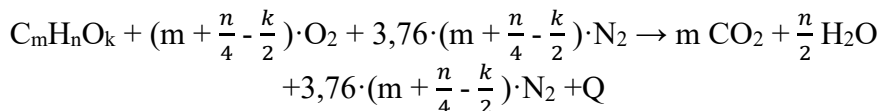
$$\phi = 1/\lambda.$$

## Materijalni bilans sagorevanja goriva tipa $C_mH_nO_k$

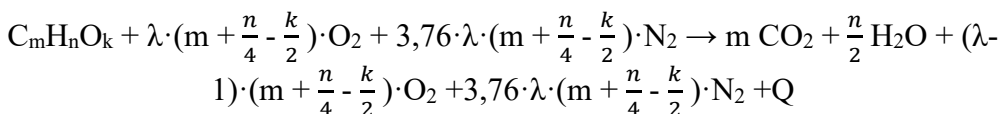
U opštem slučaju, potpuno sagorevanje ugljovodonika  $C_mH_nO_k$  u vazduhu se predstavlja hemijskom jednačinom prema kojoj pomenuti ugljovodonik sa kiseonikom iz vazduha, a uz prisustvo azota iz vazduha, reaguje stvarajući ugljen-dioksid, vodu i oslobađajući određenu količinu toplote,  $Q$ . U

produktima sagorevanja se pored ugljendioksida i vode nalazi i azot iz vazduha u čijem je prisustvu došlo do reakcije.

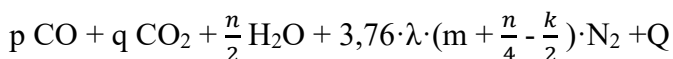
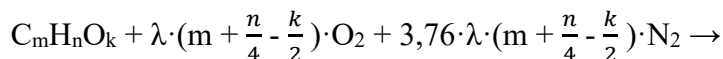
Ako je koeficijent viška vazduha jednak 1 ( $\lambda=1$ ), a sagorevanje se odvija u prisustvu vazduha, a samim tim i u prisustvu azota, tada se jednačina sagorevanja može predstaviti kao:



Ukoliko je  $\lambda > 1$ , tj. postoji višak vazduha, u reakciju će ući više kiseonika, ali i srazmerno više azota. Među produktima sagorevanja će se naći višak vazduha, i naravno sav azot koji ne reaguje, već se samo u njegovom prisustvu odvija reakcija:



Ako je  $\lambda < 1$ , tj. ako se sagorevanje odvija sa manjkom kiseonika (nepotpuno sagorevanje), u produktima sagorevanja neće biti kiseonika, a deo ugljenika iz ugljovodonika sagoreva do ugljen-monoksida, CO, koji se javlja u produktima sagorevanja:



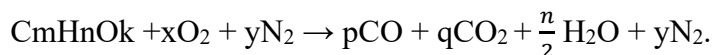
Ovde važi pravilo da broj atoma bilo kog hemijskog elementa među reaktantima (na levoj strani jednačine) mora biti jednak broju atoma istog elementa među produktima sagorevanja (na desnoj strani jednačine). Nepoznate vrednosti p i q se mogu odrediti iz ovog uslova za atome ugljenika:

$$m = p + q$$

i atome kiseonika:

$$k + 2 \cdot \lambda \cdot \left( m + \frac{n}{4} - \frac{k}{2} \right) = p + 2 \cdot q + \frac{n}{2}$$

Opšta jednačina nepotpunog sagorevanja  $C_mH_nO_o$  se kraće može napisati i kao:



## Elementi hemijske termodinamike

### Nomenklatura

e	Energija po molu	[J/mol]
E	Energija	[J]
f	Helmholtz-eva energija po molu	[J/mol]
F	Helmholtz-eva energija	[J]
g	Gibbs-ova energija po molu	[J/mol]
G	Gibbs-ova energija	[J]
h	Entalpija po molu	[J/mol]
H	Entalpija J	
n	Broj molova	[mol]
p	Pritisak Pa	
q	Toplota po molu	[J/mol]
Q	Toplota J	
R	Gasna konstanta	[J/molK]
s	Entropija po molu	[J/molK]
S	Entropija	[J/K]
T	Temperatura	[K]
u	Unutrašnja energija po molu	[J/mol]
U	Unutrašnja energija	[J]
V	Zapremina	[ m <sup>3</sup> ]
w	Rad po molu	[J/mol]
W	Rad	[ J]
μ	Hemijski potencijal	[J/mol]
Opšti termini		

**Efikasnost metoda**

LowNOx gorionici	25 – 60 %
Stepenasto uvođenje vazduha	10 – 40 %
Stepenasto uvođenje goriva	50 – 60 %
SCR	50 – 80 (90) %
SNCR	20 – 50 %

**Raketna goriva**

Raketna goriva su hemijske smeše goriva i oksidatora, koja sagorevanjem u raketnom motoru proizvode odgovarajuću energiju koja obezbeđuje silu potiska neophodnu za let rakete. Razvoj raketa bio je uslovljen razvojem raketnih goriva. Ako se izuzme upotreba crnog baruta kao raketnog goriva (u Kini još u 7. veku, a u Evropi u 18. i 19. veku), onda se može tvrditi da je epoha razvoja i šire primene raketnih goriva započela sa Drugim svetskim ratom. U SAD je formiran sastav na bazi balistita, poznat pod oznakom JP i JPN, a u SSSR-u je proizvedeno slično dvobazno gorivo sa dodatkom dinitrotoluena, poznato kao kordit. U Nemačkoj je u toku rata konstruisana prva raketa na tečnogorivo, pod oznakom V-2, koja je kao gorivo koristila 75%-tni metil-alkohol sa tečnim kiseonikom kao oksidatorom. Veliki napredak ostvaren je osvajanjem proizvodnje kompozitnih goriva tehnologijom livenja, čime su se mogla proizvesti pogonska punjenja željenih prečnika. Prva kompozitna goriva bila su na bazi asfalta, kao vezivne komponente, koga je ubrzo zamenio polisulfid, zatim polivinil-hlorid, a pedesetih i šezdesetih godina 20. veka proizvedena su termo-stabilna veziva na bazi poliuretana i poli-butadiena sa znatno boljim karakteristi-kama od prethodnih. Kao oksidator najpre je korišćen kalijum-perhlorat koji je kasnije zamenjen mnogo boljim amonijum-perhloratom, koji i danas ima najširu primenu. Za poboljšanje energetske svojstava, kao gorivna komponenta, dodavani su metalni prahovi od kojih najveću primenu ima aluminijum u prahu.

Prema svom agregatnom stanju raketna goriva mogu biti tečna, čvrsta i hibridna.

**Tečna raketna goriva**

Kod raketa na tečno gorivo oksidator i goriva komponenta smešteni su u odvojenim rezervoarima i doziraju se pomoću sistema cevi, ventila i turbopumpi u u komoru za sagorevanje, gde se mešaju i sagorevaju.

Motori na tečno gorivo složenije su konstrukcije u odnosu na motore na čvrsto gorivo, ali imaju i mnogo prednosti. Njihova osnovna prednost je što omogućuju kontrolu doziranja goriva u komoru za sagorevanje, čime je moguće menjati potisak u toku leta, isključivanje i ponovno startovanje raketnog motora. S druge strane, tečna raketna goriva imaju manju gustinu od čvrstih, što zahteva veće rezervoare za njihov smeštaj, čime se povećava ukupna masa raketnog sistema. Temperatura skladištenja takođe je vrlo bitna. Goriva sa niskom temperaturom skladištenja, tzv. kriogena goriva, zahtevaju termičku izolaciju, čime se masa sistema povećava. Pojedina tečna goriva su vrlo agresivna, što zahteva primenu specijalnih otpornih materijala u konstrukciji rezervoara i sistema za doziranje.

Načelno, tečna goriva mogu se podeliti na tri grupe: goriva na bazi naftinih derivata, kriogena goriva i hipergoli.

Od naftinih derivata kao gorivo koristi se visokorafinirani kerozin koji predstavlja smešu složenih ugljovodonika. On se najčešće primenjuje u kombinaciji sa tečnim kiseonikom kao oksidatorom. Specifični impuls ovih goriva znatno je manji u odnosu na kriogena goriva.

Kriogena goriva najčešće predstavljaju kombinaciju tečnog vodonika i tečnog kiseonika koji se skladište na vrlo niskim temperaturama (vodonik prelazi u tečno stanje na  $-253^{\circ}\text{C}$ , a kiseonik na  $-183^{\circ}\text{C}$ ).

Zbog niske temperature kriogenih goriva vrlo je teško da se čuvaju duže vreme, pa nisu pogodna za primenu u raketnim sistemima namenjenim za vojne svrhe. Uz to, tečni vodonik ima vrlo malu specifičnu masu, što iziskuje znatno veće rezervoare u odnosu na druga goriva. Bez obzira na to, zbog visoke efikasnosti ovih goriva (imaju 40% veći specifični impuls u odnosu na ostala raketna goriva) ona uvek imaju prednost kada problem skladištenja nije izražen i kada faktor vremena nije bitan.

Tečni vodonik i tečni kiseonik najčešće se primenjuju u visokoefikasnim raketnim motorima kosmičkih raketa nosača (tabela 2).

Tabela 2. Prikaz nekih raketnih sistema i Njihovih goriva

Raketa	Stepen	Raketno gorivo	Specifični impuls [s]
Atlas/Kentaur	0	tečni O <sub>2</sub> /rafinisani	259/292 (vak.)
	1	kerozin	220/309 (vak.)
	2	tečni O <sub>2</sub> /rafinisani kerozin tečni O <sub>2</sub> /tečni H <sub>2</sub>	444 (vak.)
Titan II	1	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /Aerozine 50*	259
	2	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /Aerozine 50	312 (vak.)
Saturn V	1	tečni O <sub>2</sub> /rafinisani	260
	2	kerozin	424 (vak.)
	3	tečni O <sub>2</sub> /tečni H <sub>2</sub> tečni O <sub>2</sub> /tečni H <sub>2</sub>	414 (vak.)
Spejs [atl 0]	0	čvrsto	242/269 (vak.)
	1	tečni O <sub>2</sub> /tečni H <sub>2</sub>	455 (vak.)
	OMS**	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /monometil- hidrazin	313 (vak.)
	RCS**	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /monometil- hidrazin	260–280 s (vak.)

\* smeša hidrazina i dimetil-hidrazina (50: 50)

\*\* sistem za orbitalno manevrisanje (orbital maneuvering system)

\*\*\* reaktivni kontrolni sistem (reaction control system)

Kod hipergolnog goriva dolazi do spontanog pripaljivanja pri kontaktu oksidatora i gorivne komponente, tako da ne zahtevaju izvor pripaljivanja. Lako startovanje i mogućnost ponovnog starta čini ova goriva idealnim za sisteme koji služe za manevrisanje vasijskim brodovima (npr. Spejs Šatl). Takođe, hipergoli se nalaze u tečnom stanju i na običnoj temperaturi, tako da nisu izraženi problema njihovog skladištenja. Hipergolna goriva obično čine hidrazin, monometil hidrazin ili nesimetrični dimetil-hidrazin. Oksidator je najčešće azottetraoksid (N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) ili azotna kiselina (HNO<sub>3</sub>).

## Hibridna raketna goriva

Raketni motori sa hibridnim gorivima predstavljaju kombinaciju motora sa čvrstim i tečnim gorivom, mada postoje i kombinacije čvrsto-čvrsto i čvrsto-

gasovito, koje se teško mogu primeniti kod zemaljskih raketa. Jedna komponenta je u čvrstom stanju, obično gorivna, dok je druga, najčešće oksidator, u tečnom ili gasovitom stanju. Oksidator se pomoću brizgaljki direktno ubrizgava u produkte sagorevanja čvrste komponente, čime se efikasnost sagorevanja izrazito povećava.

## Čvrsta raketna goriva

Raketni motori na čvrsta goriva najjednostavnije su konstrukcije. Za razliku od motora na tečno gorivo, raketni motori na čvrsto gorivo se ne mogu gasiti i ponovo startovati. Postoje dve osnovne vrste čvrstih goriva – homogena i kompozitna. Obe vrste imaju relativno veliku gustinu, stabilna

su na normalnoj temperaturi i ne zahtevaju posebne uslove skladištenja. Homogena goriva najčešće su dvobazna, sadrže dve osnovne komponente: nitrocelulozu i nitroglicerina, a mogu biti i jednobazna (sadrže samo jednu osnovnu komponentu – nitrocelulozu). Pored osnovnih komponenti goriva sadrže, u manjim količinama, i različite dodatke (plastifikatore, stabilizatore, balističke modifikatore, itd.).

Specifični impuls homogenih goriva obično se kreće do 210 s u standardnim uslovima. Njihovi produkti sagorevanja ne sadrže dimove, pa su pogodna za rakete taktičke namene. često se primenjuju i za izradu bustera vođenih i višestepenih raketnih sistema. Savremena kompozitna goriva najčešće su na bazi poliuretana ili polubutadiena, kao vezivne komponente, amonijum-perhlorata, kao oksidansa, i metalnih prahova, najčešće aluminijuma, koji sagorevanjem oslobađaju veliku količinu toplote i time podižu temperaturu sagorevanja. Imaju bolje mehaničke i energetske karakteristike od homogenih goriva (tabela 3), pa se uglavnom upotrebljavaju za izradu pogonskih punjenja marševskih motora kod raketnih sistema taktičke namene, kao i za izradu buster motora velikih raketnih sistema (npr. za nosača rakete Titan).

Tabela 3. Uporedni pregled osnovnog sastava i specifičnog impulsa različitih vrsta raketnih goriva

Gorivo	Osnovni sastav	Isp (s)
Crni barut	kalijum-nitrat, sumpor, drveni ugalj	$\approx 125$
	nitroceluloza, nitroglicerini	$\approx 200$ $\approx 180$
	asfalt, amonijum-perhlorat	$\approx 200$
	polisulfid, amonijum-perhlorat	$\approx 200$
	poliuretan, amonijum-perhlorat	$\approx 225-230$
	polibutadien, amonijum-perhlorat	$\approx 230-235$
	poliuretan, aluminijum, amonijum-perhlorat	$\approx 240$
	polibutadien, aluminijum, amonijum-perhlorat	$\approx 245$
	polibutadien akrilonitril, aluminijum, amonijum-perhlorat	$\approx 250$
Kompozitno	kompozitno modifikovana dvobazna goriva (NC, NGL, HMX, Al)	$\approx 275$
	PBAA, aluminijum, amonijum-perhlorat	$\approx 275$
	kerozin, tečni kiseonik	$\approx 300$
	tečni vodonik, tečni kiseonik	$\approx 450$



## Tendencije u razvoju čvrstih raketnih goriva

Većina raketnih goriva koja se i danas primenjuju razvijena je pedesetih i šezdesetih godina 20. veka. U tabeli 4 prikazani su najčešći tipovi čvrstih raketnih goriva koji se primenjuju u svetu i kod nas.

Tabela 4. Sastavi nekih karakterističnih tipova čvrstih raketnih goriva

Gorivo	Tip	Sastav
J.P.N., Balistit (SAD)	homogeno dvobazno	nitroceluloza (51,5%), nitroglicerini (43%), diefilftalat (3%), ostali dodaci (2,5%)
Cordit (Rusija)	homogeno dvobazno	nitroceluloza (56,5%), nitroglicerini (28%), etilcentralit (4,5%), dinitrotoluen (11%)
SRB gorivo (SAD)	kompozitno	polibutadien akrilonitril (12%), amonijum- perhlorat (70%), aluminijum prah (16%), ostali dodaci (2%)
NGR gorivo (SCG)	homogeno dvobazno	nitroceluloza ( ), nitroglicerini ( ), plastifikator ( ), ostali dodaci ( )
PU gorivo (SCG)	kompozitno	amonijum-perhlorat (65%), poliuretan (21%), aluminijum prah (12%), ostali dodaci (2%)

Razvoj i usavršavanje raketnih goriva odvija se u dva pravca. Jedan je poboljšanje performansi postojećih vrsta goriva dodavanjem novih komponenti, primena efikasnijih balističkih modifikatora ili, osvajanje novih oksidatora i veziva. Na drugoj strani vrše se istraživanja radi osvajanja potpuno novih goriva koja bi imala mnogo bolje performanse od postojećih.

## Poboljšanje performansi postojećih goriva

S obzirom na relativno mali specifični impuls, težišta istraživanja u području čvrstih raketnih goriva su usmerena, pre svega, na poboljšanje energetskih svojstava, zatim zakonitosti brzine sagorevanja, smanjenje osetljivosti na spoljne impulse, poboljšanje mehaničkih karakteristika, itd.

Za poboljšanje energetskih svojstava dvobaznih goriva najpre su dodavani amonijum-perhlorat i aluminijum, čime su dobijena tzv. Kompozitnomodifikovana dvobazna goriva (CMDDB). Ova vrsta goriva korišćena je npr. za pogon trećeg stepena rakete „Minitmen“. Dalje poboljšanje energetskih svojstava ove vrste goriva postignuto je dodatkom nitramina, heksogena ili oktogena, koji imaju veliku specifičnu masu i energiju, što se naročito pozitivno odrazilo na poboljšanje zapreminskog specifičnog impulsa. Goriva sa dodatkom HMX-a našla su primenu kod raketnih sistema „Trident“, „MX“ i drugih. Međutim, dodatkom HMX-a povećana je i njihova osetljivost, što onemogućava da se koriste za raketne sisteme većih gabarita. Što se tiče kompozitnih raketnih goriva, istraživanja su usmerena na poboljšanje energetskih svojstava postojećih sastava dodatkom energetskih komponenti, na razvoju novih veziva, oksidatora, kao i metalnih prahova. Kao veziva i danas se najčešće koriste polimeri na bazi poliuretana i polibutadiena CTPB – karboksi terminirani polibutadien, HTPB – hidroksiterminirani polibutadien, PBAN – polibutadien akrilonitril i PBAA – kopolimer butadiene i akrilne kiseline), koji su razvijeni šezdesetih godina 20. veka. Usavršavanje veziva usmereno je, pre svega, u pravcu povećanja njihove energetske moći, poboljšanja reoloških karakteristika i smanjenja toksičnosti produkata sagorevanja. U tom smislu proizvedena su nova energetska veziva tipa nitropolimera, od kojih je primenu našao nitrouretan (NU), zatim polimeri na bazi fluora i ugljenika (fluorougljenici), poliglicidilazid (GAP), poli 3,3 bis<sup>a</sup>azidomethyl<sup>o</sup> oxetane (BAMO), poly 3-nitrometoxymetil oxetane (PLN) poliglicidil-nitrate (PGN) i druga. Pored toga, za povećanje energetske moći standardnim sastavima kompozitnih goriva u određenom odnosu dodaju se i nitraminski eksplozivi NMX i RDX, a vrše se i ispitivanja goriva sa najnovijim nitraminskim eksplozivom HNIW (heksanitroheksa-azoizovurcitan). Što se tiče gorivnih komponenti primenu su našli metalni hidridi kao što su LiH i LiAlH, MgH<sub>2</sub>, LiBH<sub>4</sub>, ili, pak, AlH<sub>3</sub> i BeH<sub>2</sub>, koji su nestabilni, pa se moraju vezati u komplekse sa organskim molekulima da bi bili stabilni. Sastavi na bazi berilijuma daju najveći specifični impuls, ali pri sagorevanju stvaraju otrovne produkte. Od metalnih prahova, pored aluminijuma, magnezijuma, bora, berilijuma, perspektivu ima gorivo na bazi cirkonijuma, jer ima visoku temperaturu sagorevanja i veliku specifičnu masu (6,49.), pa se dobija veliki zapreminski specifični impuls. Od oksidanasa je

razvijeno nekoliko novih jedinjenja sa znatno većom energijom od amonijum-perhlorata, kao što su nitronijum-perhlorat NP ( $\text{NO}_2\text{ClO}_4$ ), litijum-perhlorat,  $\text{LiClO}_4$ , hidrazinijumdiperhlorat,  $\text{N}_2\text{H}_6(\text{ClO}_4)_2$ . Međutim, zbog izuzetno velike osetljivosti na spoljne impulse, nemaju značajniju primenu u raketnim gorivima.

## **Nova dostignuća u razvoju čvrstih raketnih goriva**

Do sada se kao oksidator u kompozitnim raketnim gorivima uglavnom koristio amonijum-perhlorat. Međutim, nedavno je Holandska agencija za svemirska istraživanja, u okviru Evropske svemirske agencije (ESA), razvila energetski jači oksidator, hidrazin/nitroformat ( $\text{N}_2\text{H}_5\text{C}(\text{NO}_2)_3$ ). U kombinaciji sa svremenim vezivima, kao što su glicidil azid polimer (GAP), BAMO (poly 3,3 bis<sup>a</sup>azidomethyl<sup>o</sup> oxetane), PLN (poly 3-nitromethoxy-methy oxetane) ili PGN (polyglycidyl nitrate), ovaj oksidans ne samo da povećava performanse raketnih motora na čvrsto gorivo već i sa ekološkog aspekta ne utiče na zagađenje okoline, jer pri sagorevanju ne oslobađa otrovni hlorovodonik. Glavni produkti sagorevanja su azot, voda, ugljen-dioksid, azotovi oksidi i, ako je gorivu dodat aluminijum, aluminijumoksid. U početku proizvodnje glavni problem je bio kristalografske prirode, odnosno tendencija hidrazin-nitroformata (HNF) da formira igličastu kristalnu formu različitih veličina i oblika. To je onemogućavalo proizvodnju goriva sa visokim udelom čvrste frakcije, za koja je poželjan sferični oblik oksidatora. Dalja istraživanja bila su usmerena na rešavanje ovog problema (primenom različitih postupaka kristalizacije i rekristalizacije) koji je ublačen ali još uvek nije potpuno rešen. U toku razvoja posebna pažnja posvećena je definisanju pogodnog umreživanja, katalizatora polimerizacije i postupka polimerizacije. Iako postupak još uvek nije optimizovan već se proizvode goriva za potrebe eksperimentalnih balističkih ispitivanja. Istraživanja ovih goriva fokusirana su na kombinaciju HNF sa GAP i aluminijumom. Pokazalo se da ovo gorivo ima veliku brzinu sagorevanja, ali i tendenciju znatnog povećanja brzine sagorevanja sa pritiskom (eksponent brzine sagorevanja je  $\approx 0,8$ ). Daljim istraživanjem identifikovani su balistički modifikatori kojima je eksponent brzine sagorevanja snižen na 0,59, a istraživanja se nastavljaju radi njegovog daljeg smanjenja. Istraživanja su pokazala da, iako je HNF visokoenergetski oksidans, njegova termička dekompozicija odvija se umereno, čak i na temperaturama iznad  $260^\circ\text{C}$ . To je vrlo važno za praktičnu upotrebu ovih goriva u raketnim motorima. Teorijski proračuni i balistička ispitivanja goriva na bazi GAP/Al/HNF u eksperimentalnom motoru pokazala su da pri istim uslovima daju do 10% već i specifični impuls u odnosu na najboljakonvencionalna goriva na bazi HTPB/Al/AP.

## Hipotetička goriva

Ratno vazduhoplovstvo SAD nedavno je pokrenulo ambiciozan program čiji je cilj smanjenje mase kosmičkih letelica. Jedan od načina za to je sinteza novih hemijskih jedinjenja koja bi seupotrebljavala kao raketna goriva, a koja bi imala mnogo veću gustinu, veći specifični impuls i bila jeftinija. Istraživanja se sprovode u Superkompjuterskom centru Arktičkog regiona (ARSC) gde se uz pomoć moćnih računara obavlja modeliranje i definisanje kompleksnih hemijskih jedinjenja visoke energije i gustine, koja bi se mogla upotrebiti kao raketna goriva. Kao rezultat ovih istraživanja dobijena je teorijska struktura jednog jona, kao potencijalne osnove za sintezu poliazotnih jedinjenja koja se mogu upotrebiti u visokoenergetskim raketnim gorivima. Značajniji rezultati tek se očekuju u budućnosti.

## Sagorevanje računski primeri

### Lista oznaka

A - maseni udeo mineralnih primesa u gorivu, %; C - maseni udeo ugljenika u gorivu, %;

$C_mH_n$  - udeo ugljovodonika opšteg oblika, sa m atoma ugljenika i n atoma vodonika, u gorivu, %;

$C_mH_nO_o$  - udeo jedinjenja čiji molekul ima m atoma ugljenika, n atoma vodonika i o atoma kiseonika u gorivu, %;

CO - udeo ugljen-monoksida u gorivu, %;

CO<sub>2</sub> - udeo ugljen-dioksida u gorivu ili produktima sagorevanja, %;

g - maseni udeo u gorivu, - ili kg/kg; indeksi koji su identični sa oznakama hemijskih elemenata ili jedinjenja označavaju masene udele odgovarajućih elemenata ili jedinjenja u gorivu; moguće je dodati i indeks koji označava neku od uslovnih masa goriva (videti Značenja indeksa);

GWP<sub>CH4</sub> - potencijal globalnog zagrevanja metana za period od 100 godina, ima vrednost 21;

GWP<sub>CO2</sub> - potencijal globalnog zagrevanja ugljen-dioksida za period od 100 godina, ima vrednost 1;

GWP<sub>N2O</sub> - potencijal globalnog zagrevanja azot-oksida za period od 100 godina, ima vrednost 310;

H - maseni udeo vodonika u gorivu, %; H<sub>2</sub> - udeo vodonika u gorivu, %;

H<sub>2</sub>O - udeo vode ili vodene pare u gorivu ili produktima sagorevanja, %;

$$\text{CO}_{(\text{vol})} [\%_{\text{vol}}] = \frac{V_{\text{CO}}}{V_{\text{P}}} \cdot 100 = \frac{n_{\text{CO}} \cdot V_{\text{m}}}{(n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}) \cdot V_{\text{m}}} \cdot 100 = \frac{n_{\text{CO}}}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} \cdot 100$$

$$\text{CO}_{(\text{vol})} [\%_{\text{vol}}] = \frac{0,6}{0,6+0,4+2+4,412} \cdot 100 = 8$$

$$\text{CO}_{2(\text{vol})} [\%_{\text{vol}}] = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{P}}} \cdot 100 = \frac{n_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{m}}}{(n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}) \cdot V_{\text{m}}} \cdot 100 = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} \cdot 100$$

$$\text{CO}_{2(\text{vol})} [\%_{\text{vol}}] = \frac{0,4}{0,6+0,4+2+4,412} \cdot 100 = 5,32$$

$$\text{H}_2\text{O}_{(\text{vol})} [\%_{\text{vol}}] = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{P}}} \cdot 100 = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{m}}}{(n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}) \cdot V_{\text{m}}} \cdot 100 = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} \cdot 100$$

$$\text{H}_2\text{O}_{(\text{vol})} [\%_{\text{vol}}] = \frac{2}{0,6+0,4+2+4,412} \cdot 100 = 26,62$$

$$\text{N}_{2(\text{vol})} [\%_{\text{vol}}] = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{P}}} \cdot 100 = \frac{n_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{m}}}{(n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}) \cdot V_{\text{m}}} \cdot 100 = \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} \cdot 100$$

$$\text{N}_{2(\text{vol})} [\%_{\text{vol}}] = \frac{4,412}{0,6+0,4+2+4,412} \cdot 100 = 60,06$$

## Sagorevanje bojnih materija

### Primer 1.

Izračunati sastav u zapreminskim procentima (% Vol), disociranih ravnotežnih produkata heksogena (RDX)  $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$ .

Predpostaviti da se u produktima sagorevanja nalaze sledeće komponente:

$\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  and  $\text{N}_2$ .

Disocijacija je vođena sledećom povratnom:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 = \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ .

Konstanta hemijske ravnoteže za adijabatske uslove odvijanja procesa je  $K = 12$ .

### Rešenje:

Proces disocijacije heksogena možemo prikazati na sledeći način:



Odnos reaktanata i produkata:

$$\text{C} \quad n_1 + n_3 = 3 \quad (1)$$

$$\text{H} \quad 2n_2 + 2n_4 = 6 \quad \text{or} \quad n_2 + n_4 = 3 \quad (2)$$

$$\text{N} \quad 2n_5 = 6 \quad (3)$$

$$\text{O} \quad 2n_1 + n_2 + n_3 = 6 \quad (4)$$

Jednačina hemijske ravnoteže:

$$K = (n_3 n_2)/(n_1 n_4) = 12 \quad (5)$$

Imamo 5 nepoznatih,  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  i  $n_5$  i 5 jednačina, tako da je problem u potpunosti određen:

Iz jednačine (3)  $n_5 = 3$  mol

Koristeći jednačine (4) i (1) dobijamo:

$$2n_1 + n_2 + n_3 = 6$$

$$- (n_1 + n_3) = -3$$

---


$$n_1 + n_2 = 3 \quad (6)$$

$$n_2 + n_4 = 3 \quad (7)$$

$$n_1 + n_3 = 3 \quad (8)$$

iz jednačine (6) dobijamo  $n_2 = 3 - n_1$

iz jednačine (7) dobijamo  $n_4 = 3 - n_2 = 3 - (3 - n_1) = n_1$

iz jednačine (8) dobijamo  $n_3 = 3 - n_1$

Sada, koristeći izraz:

$$K = (n_3 n_2)/(n_1 n_4) = 12 \text{ dobijamo}$$

$$[(3 - n_1) (3 - n_1)] / [n_1 n_1] = 12$$

$$12 n_1^2 = 9 - 6 n_1 + n_1^2$$

$$11 n_1^2 + 6 n_1 - 9 = 0$$

$$n_1 = \frac{-6 \pm \sqrt{36 + 396}}{22} = 0.672 \text{ mol}$$

$$n_1 + n_2 = 3 \quad (6)$$

$$n_2 = 3 - 0.672 = 2.328 \text{ mol}$$

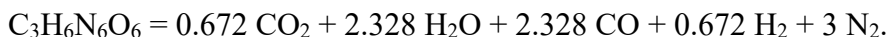
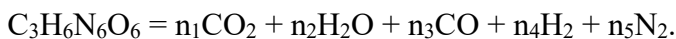
$$n_3 = 2.328 \text{ mol}$$

$$n_2 + n_4 = 3 \quad (7)$$

$$n_4 = 3 - n_2 = 3 - 2.328 = 0.672 \text{ mol}$$

$$n_5 = 3 \text{ mol}$$

Konačno, dobijamo sastav produkata ove reakcije:



Možemo proveriti tačnost dobijenih rešenja koristeći polazne jednačine:

$$\text{C} \quad n_1 + n_3 = 3 \quad 0.672 + 2.328 = 3$$

$$\text{H} \quad 2n_2 + 2n_4 = 6 \quad 2 \times 2.328 + 2 \times 0.672 = 6$$

$$\text{N} \quad 2n_5 = 6 \quad 2 \times 3 = 6$$

$$\text{O} \quad 2n_1 + n_2 + n_3 = 6 \quad 2 \times 0.672 + 2.328 + 2.328 = 6$$

**Zaključak:**

Ukupni broj molova produkata je:

$$0.672 + 2.328 + 2.328 + 0.672 + 3 = 9 \text{ mol.}$$

$$\text{CO}_2 = 0.672 \times 100/9 = 7.47 \% \text{ Vol}$$

$$\text{H}_2\text{O} = 2.328 \times 100/9 = 25.87 \% \text{ Vol}$$

$$\text{CO} = 2.328 \times 100/9 = 25.87 \% \text{ Vol}$$

$$\text{H}_2 = 0.672 \times 100/9 = 7.47 \% \text{ Vol}$$

$$\text{N}_2 = 3 \times 100/9 = 33.33 \% \text{ Vol}$$

**Primer 2.**

Odrediti produkte degradacije nitroceluloze  $\text{C}_6\text{H}_9(\text{NO}_2)\text{O}_5$ .

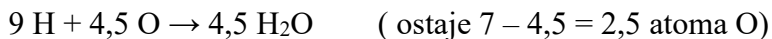
**Rešenje:**

Potrebna teorijska količina kiseonika neophodna sa potpuno sagorevanje gorivig komponenata u datom molekulu nitroceluloze iznosi:

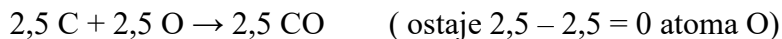
$$O_{min} \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} \right] = m + \frac{n}{4} = 6 + \frac{9}{4} = 8,25 \text{ O}_2 = 16,5 \text{ atoma O}$$

Vidimo da mi na raspolaganju u molekulu imamao svega  $2 + 5 = 7$  atoma O

Najreaktivniji element u datom molekulu nitroceluloze je vodonik i stoga on prvi stupa u hemijsku reakciju:

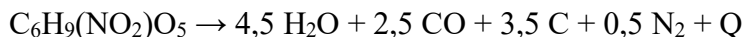


Zatim imamo sledeću reakciju:





Dakle naša reakcija degradacije nitroceluloze ima sledeći oblik:



### **Primer 3.**

Odrediti produkte degradacije nitroceluloze  $\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_9$ .

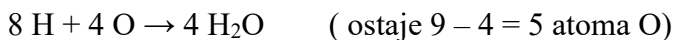
#### **Rešenje:**

Potrebna teorijska količina kiseonika neophodna sa potpuno sagorevanje gorivig komponenata u datom molekulu nitroceluloze iznosi:

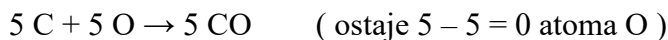
$$O_{\min} \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{kmol}} \right] = m + \frac{n}{4} = 6 + \frac{8}{4} = 8 \text{ O}_2 = 16 \text{ atoma O}$$

Vidimo da mi na raspolaganju u molekulu imamao svega 9 atoma O.

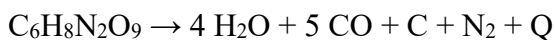
Najreaktivniji element u datom molekulu nitroceluloze je vodonik i stoga on prvi stupa u hemijsku reakciju:



Zatim imamo sledeću reakciju:



Dakle naša reakcija degradacije nitroceluloze ima sledeći oblik:



### **Primer 4.**

Odrediti produkte degradacije nitroceluloze  $\text{C}_6\text{H}_7(\text{NO}_2)_3\text{O}_5$ .

**Rešenje:**

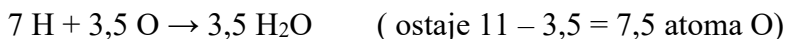
Svedena formula ovog molekula nitroceluloze glasi:  $C_6H_7N_3O_{11}$ .

Potrebna teorijska količina kiseonika neophodna sa potpuno sagorevanje gorivig komponenata u datom molekulu nitroceluloze iznosi:

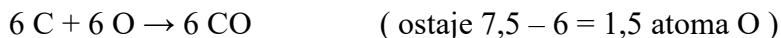
$$O_{min} \left[ \frac{kmol}{kmol} \right] = m + \frac{n}{4} = 6 + \frac{7}{4} = 7,75 \text{ O}_2 = 15,5 \text{ atoma O}$$

Vidimo da mi na raspolaganju u molekulu imamao svega 11 atoma O.

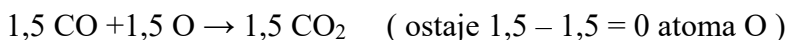
Najreaktivniji element u datom molekulu nitroceluloze je vodonik i stoga on prvi stupa u hemijsku reakciju:



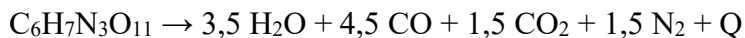
Zatim imamo sledeću reakciju:



Sledeća reakcija je:



Dakle naša reakcija degradacije nitroceluloze ima sledeći oblik:



## LITERATURA

- [1] F.A. Williams, Progress in knowledge of flamelet Structure and extinction, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, CA 92093-0411, USA, February 2000.
- [2] Vladimir Strelec, Plinarski priručnik, Energetika Marketing, Zagreb, 1995.
- [3] D. Drašković, M. Radovanović, M. Adžić, Sagorevanje, Mašinski fakultet Beograd, 1986.
- [4] Kenneth Kuan-Yun Kuo, Principles of combustion, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and sons, New York, 1986
- [5] M. Savković, Doktorska disertacija: „Optimizacija unutrašnje balističkih karakteristika raketnog motora sa čvrstom pogonskom materijom Technique”, Beograd, 1995.
- [6] V. R. Kuznetsov and V. A. Sabelnikov. Turbulence and Combustion, 1990.
- [7] J. Warnatz-u, Schematic of oxidation of methane, (1992)
- [8] M. Radovanović, Goriva, Mašinski fakultet Beograd, 1994.
- [9] Dr Radun Jeremić, pukovnik, dipl. inž., Vojna akademija – Odsek logistike, Beograd, NEKI ASPEKTI PERFORMANSI RAKETNIH GORIVA I PRAVCI RAZVOJA ČVRSTIH RAKETNIH GORIVA, VOJNOTEHNIČKI GLASNIK 1/2004., UDC: 621.45.07-66

Kao izvor informacija korišćene su sledeće internet adrese:

- A. [www.cleaver-brooks.com](http://www.cleaver-brooks.com)
- B. [www.euroteh-gas.co.yu](http://www.euroteh-gas.co.yu)
- C. [www.worgas.it](http://www.worgas.it)
- D. [www.johnsongas.com](http://www.johnsongas.com)
- E. [www.pyronics.com](http://www.pyronics.com)
- F. [www.furigas.com](http://www.furigas.com)
- G. [www.bct.com](http://www.bct.com)
- H. [www.flowmeterdirectory.com](http://www.flowmeterdirectory.com)

CIP - Каталогизација у публикацији

Народна библиотека Србије, Београд

662.61(075.8)

539.91(075.8)

МИЛИВОЈЕВИЋ, Александар, 1973-

Fizika sagorevanja /

Aleksandar M. Milivojević. - 1. izd. - Beograd : Univerzitet, Mašinski fakultet, 2023 (Beograd : Planeta-print). - IV, 178 str. : ilustr. ; 26

cm

Tiraž 100. - Bibliografija: str. 178.

ISBN 978-86-6060-151-5

a) Горива -- Сагоревање

COBISS.SR-ID 111456777