

S A D R Ž A J

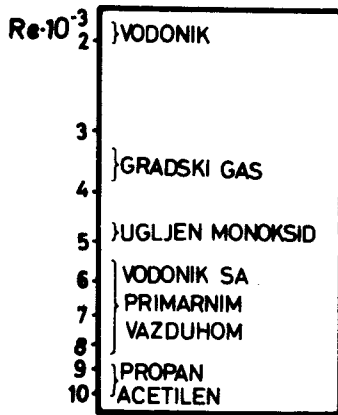
	Strana
Opšta klasifikacija plamena	1
1. Odredjivanje karakteristika difuzionog plamena	2
2. Odredjivanje brzine sagorevanja kinetičkog plamena ..	12
3. Odredjivanje koncentracionih granica paljenja	47
4. Odredjivanje granica stabilnog sagorevanja kinetičkog plamena	52
5. Prilozi	73
6. Literatura	80
7. Korišćene oznake	81

Opšta klasifikacija plamena

Plamen se može klasifikovati na više načina. Jedna od prvih podela zasniva se na činjenici da li su goriva komponenta i, najčešće, vazduh prethodno izmešani ili ne. Kod plamena koji nastaje prilikom isticanja goriva (gasovitog ili tečnog) u okolnu atmosferu, dolazi prvo do mešanja i obrazovanja gorive smeše, a zatim do njenog paljenja i sagorevanja. Kako je u ovom slučaju brzina sagorevanja bitno zavisna od brzine obrazovanja smeše - difuzije i kako brzinu sagorevanja određuje brzina najsporije faze u procesu sagorevanja, to onda ovakav vid sagorevanja nazivamo difuzionim, a sam plamen-difuzioni. Kod plamena koji se javlja sagorevanjem prethodno izmešanih komponentata goriva i vazduha, brzina sagorevanja zavisi samo od brzine termohemijskih reakcija - kinetike. Ovakav vid sagorevanja nazivamo kinetičkim, a plamen - kinetički.

I difuzioni i kinetički plamen mogu biti, zavisno od karaktera strujanja laminarni i turbulentni. Za ocenu da li je plamen laminaran ili turbulentan koristi se kritična vrednost Rejnoldsovog broja. Dok je za kinetički plamen ova postavka u potpunosti opravdana i korektna, kod difuzionih plamenova mora se voditi strogo računa i o nekim drugim pojavama. Prema Wohl-u uobičajena vrednost kritičnog Rejnoldsovog broja struje gasa ne može se koristiti za ocenu da li će plamen biti laminaran ili turbulentan. Neposredno u zoni sagorevanja, kada se sveža količina gasa susreće sa produktima sagorevanja dolazi do porasta temperature i time do porasta kinematskog viskoziteta. Prema istom izvoru kinematska viskoznost raste u opsegu temperatura od 300 do 1000^oK i do osam puta. Zato se vrednost Rejnoldsovog broja goriva u cevi gorionika čak i od 8000 naglo smanjuje i plamen postaje laminaran. Ove kritične vrednosti Rejnoldsovog broja za neke od gasovitih goriva date su na Sl.1.

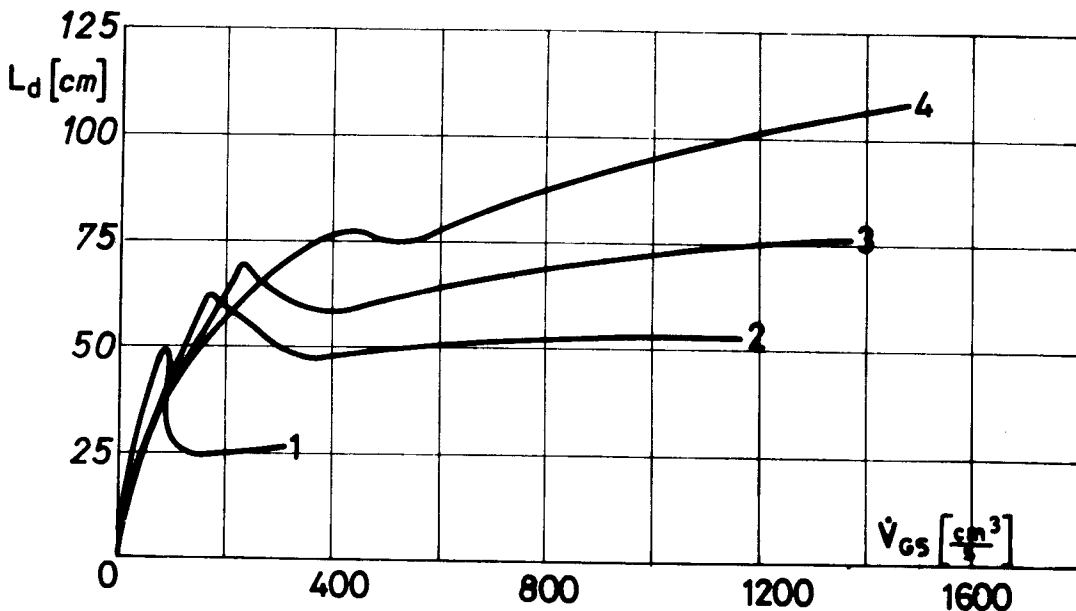
S obzirom na početno agregatno stanje komponentata koje ulaze u proces sagorevanja, plamen može biti homogen, ako su obe komponente u istoj fazi, (slučaj sagorevanja gasovitih i tečnih goriva) i heterogen ako su agregatna stanja različita (sagorevanje čvrstih goriva).



Sl. 1

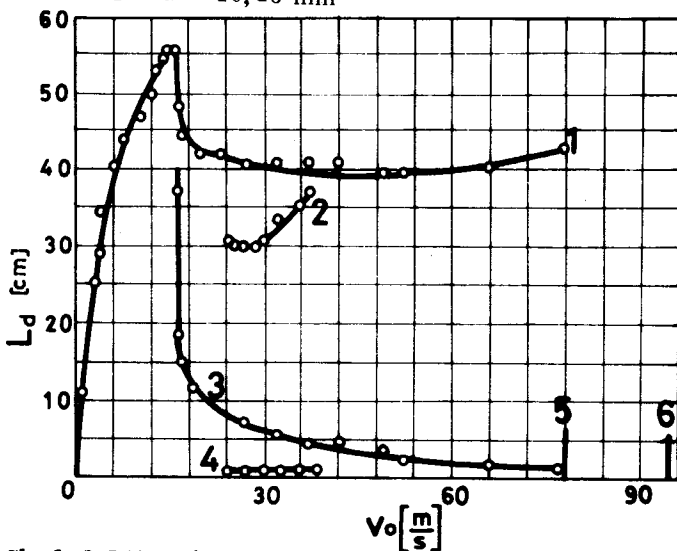
1. Odredjivanje karakteristika difuzionog plamena

Difuzioni plamen, koji nastaje isticanjem mlaza gasovitog goriva u okolini vazduh, odredjen je brzinom difuzije goriva i kiseonika pošto je brzina reakcija mnogo veća. U ovim uslovima plamen može biti definisan rešavanjem uprošćenih jednačina difuzije. Visina (dužina) difuzionog plamena, koji nastaje isticanjem gasovitog goriva kroz gorionik kružnog poprečnog preseka, prema W.Jost-u, zavisi upravno od brzine isticanja i kvadrata prečnika gorionika, a obrnuto od koeficijenta difuzije. Zakonitost ovih promena dobijenih eksperimentalno predstavljena je na sledećim slikama (Sl. 1.1 i Sl. 1.2). Turbulentni difuzioni plamen usložen je još više procesom turbulentne difuzije.



Sl.1.1 Uticaj protoka \dot{V}_{GS} i prečnika gorionika na dužinu (L_d) difuzionog plamena gradskog gasa (Prema Wohl-u, Gazley-u, Kapp-u) (1)

1 - $d = 2,34$ mm, 2 - $d = 4,52$ mm, 3 - $d = 6,35$ mm,
4 - $d = 10,16$ mm



1-dužina plamena; 2-višina podignutog plamena;
3-visina tačka u kojima plamen gubi stabilnost;
4-osnova podignutih plamenova;
5-područje samo podignutih plamenova;
6-oduvavanje podignutih plamenova.

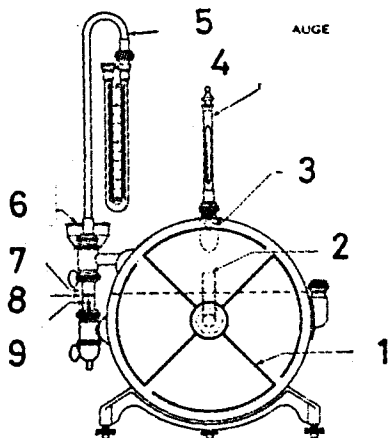
Sl. 1.2 Uticaj brzine strujanja (v_0) na dužinu difuzionog plamena gradskog gasa (prema Hottel-u i Hawthorne-u) (2).

1.1 Odredjivanje uticaja brzine isticanja gasovitog goriva na dužinu plamena

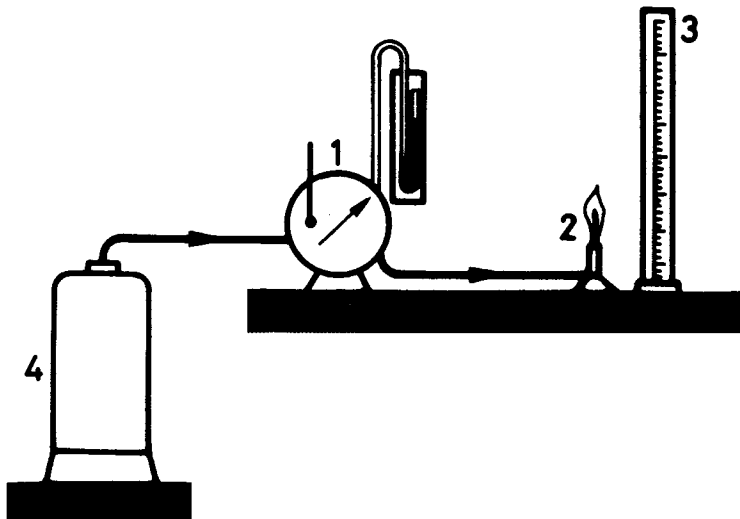
Za odredjivanje uticaja brzine strujanja na dužinu difuzionog plamena koristimo jednostavnu aparaturu koja se sastoji iz:

- protokomera (sl. 1.3)
- difuzionog gorionika (brizgaljke)
- merača visine plamena, i
- hronometra

Skica aparature data je na sl. 1.4



Sl. 1.3 Protokomer: 1 - rotor protokomera, 2 - priključak za dovod gasovitog goriva na zadnjoj strani protokomera, 3 - priključak za odvod gasovitog goriva iz protokomera na njegovoj poledjini, 4 - termometar za merenje temperature gasovitog goriva, 5 - diferencijalni manometar za merenje nadpritiska gasovitog goriva, 6 - otvor za punjenje protokometra vodom, 7 - staklena cev za kontrolisanje nivoa vode u protokomeru, 8 - nivo vode u protokomeru, 9 - igla za baždanje.



Sl. 1.4 Skica aparature za odredjivanje karakteristika difuzionog plamena:

1 - protokomer, 2 - gorionik, 3 - merač visine plamena, 4 - boca sa gasovitim gorivom

Postupak merenja sastoji se u merenju protekle količine gasovitog goriva u određenom vremenu i očitavanju odgovarajuće visine plamena (za tačna merenja potrebno je plamen snimiti fotografskim aparatom ili kamerom).

1.1.1 Primer

Određiti uticaj brzine isticanja smeše propana i butana na dužinu plamena. Prečnik gorionika $d_0 = 1$ mm. Smeša propana i butana sastoji se iz 26% Vol.propana i 74% Vol.butana. Ne vršiti korekciju na normalne uslove.

Rezultati ispitivanja predstavljeni su tabelarno i grafički (Sl. 1.5).

Tab. 1.1

Red. broj merjenja	V_1	V_2	τ	$\frac{V_2 - V_1}{\tau} = \dot{V}$	v_o	Re	L_{d_1}	L_{d_2}
	$10^{-3} m^3$	$10^{-3} m^3$	(sec)	$60 \cdot 10^{-3} m^3/s$	(m/sec)		(mm)	(mm)
1	0,15	0,2	30	0,10	2,122	606,29	31	-
2	0,00	0,05	44	0,068	1,443	414,28	27	-
3	0,10	0,15	24,0	0,124	2,631	751,71	72	-
4	0,00	0,20	30,0	0,400	8,488	2425,14	200	-
5	0,00	0,25	36,2	0,414	8,785	2510,0	270	-
6	0,00	0,40	34,0	0,706	14,982	4280,57	320	17
7	0,00	0,500	31,8	0,943	20,011	5717,42	360	19
8	0,00	0,75	41,2	1,092	23,173	6620,85	330	22
9	0,00	0,75	33,2	1,356	28,776	8221,71	390	28
10	0,00	0,75	30,2	1,490	31,619	9034,0	400	33
11	0,00	1,00	37,0	1,622	34,420	9834,28	410	37
12	0,00	0,5	16,4	1,829	38,813	11089,4	410	43

(L_{d_2} - Visina podnožja podignutog plamena, L_{d_1} - Visina plamena)

1.2 Određivanje uticaja prečnika na dužinu difuzionog plamena

Za određivanje uticaja prečnika gorionika na dužinu difuzionog plamena koristi se ista aparatura i postupak.

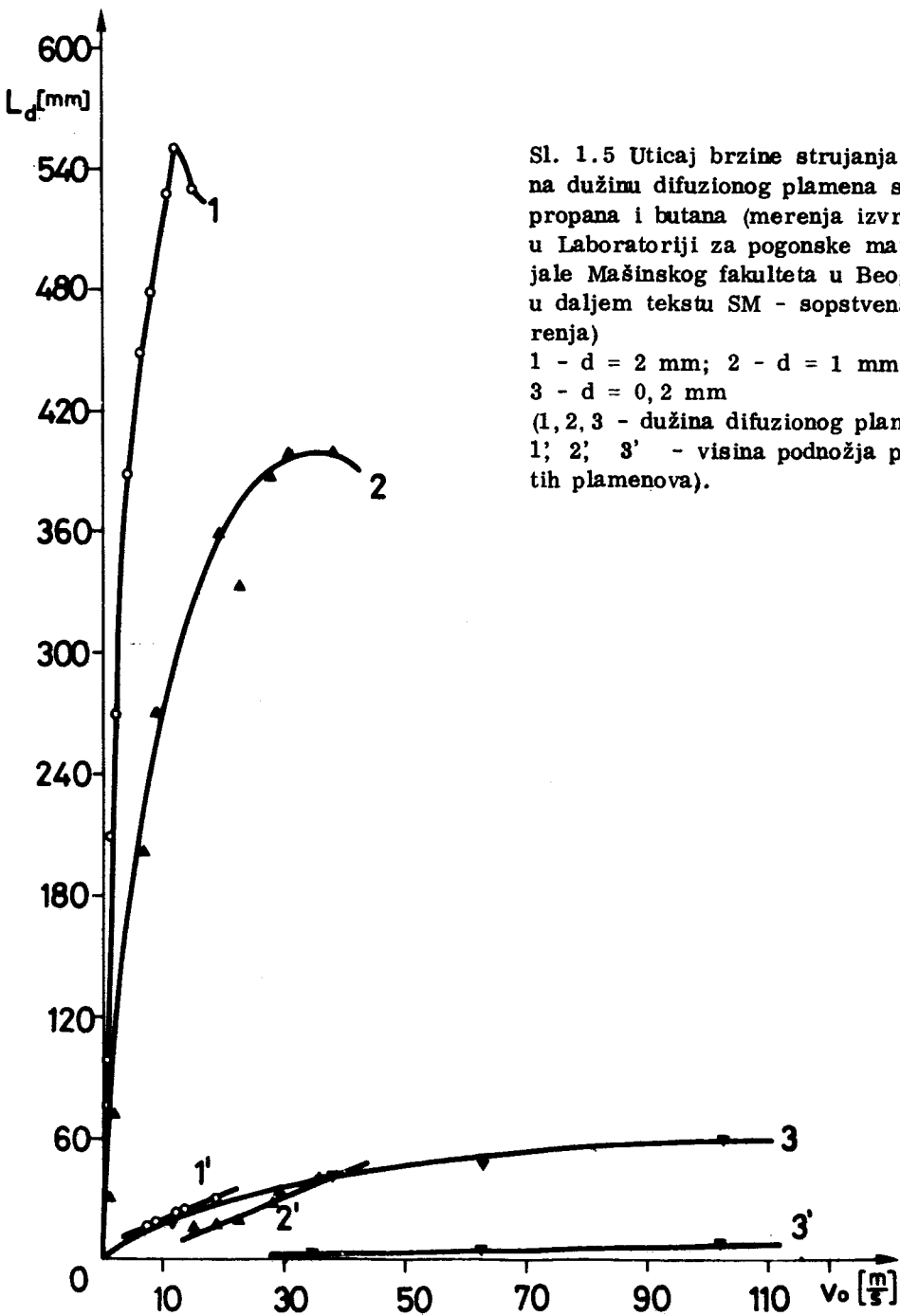
1.2.1 Primer

Odrediti uticaj prečnika gorionika na dužinu difuzionog plamena.

Prečnici gorionika $d_1 = 1,00$ mm, $d_2 = 2,00$ mm, $d_3 = 0,2$ mm. Smeša propana i butana sastoji se iz 26% Vol.propana i 74% Vol. butana.

Rezultati merjenja predstavljeni su grafički i tabelarno (Sl. 1.5).

U datoj tabeli neće se ponavljati rezultati dobijeni za prečnik od 1 mm, koji su dati u prethodnoj tablici.



Tab. 1.2

Red. broj merenja	V_1	V_2	τ	$\frac{V_2 - V_1}{\tau} = \dot{V}$	v_o	Re	L_{d_1}	L_{d_2}
	$10^{-3} m^3$	$10^{-3} m^3$	(s)	$60 \cdot 10^{-3} m^3/s$	(m/sec)		(mm)	(mm)
$d_o = 2 \text{ mm}$								
1	0,085	0,105	38	0,032	0,169	96,57	29	-
2	0,135	0,175	35,9	0,067	0,355	202,86	48	-
3	0,21	0,26	36,1	0,083	0,440	251,43	80	-
4	0,07	0,15	35,4	0,136	0,721	412,0	100	-
5	0,00	0,15	31	0,290	1,538	878,86	210	-
6	0,00	0,30	33,3	0,541	2,870	1640,0	270	-
7	0,00	0,45	31,3	0,863	4,578	2616,0	390	-
8	0,00	0,70	32,1	1,308	6,039	3965,14	450	-
9	0,00	0,85	31,2	1,635	8,674	4956,58	480	18
10	0,00	1,25	35,3	2,125	11,273	6441,72	530	19
11	0,00	1,50	39,0	2,308	12,244	6996,58	550	23
12	0,00	1,50	35,6	2,528	13,411	7663,43	530	25
$d_o = 0,2 \text{ mm}$								
1	0,065	0,085	33,2	0,036	19,099	1091,37	29	-
2	0,00	0,035	38,5	0,055	29,178	1667,32	36	1
3	0,00	0,04	35,8	0,067	35,545	2031,14	40	2
4	0,00	0,065	33,0	0,118	62,601	3577,2	50	6
5	0,00	0,1	31,0	0,194	102,92	5881,15	58	8

1.3 Odredjivanje konstante srazmernosti za izracunavanje dužine laminarnog difuzionog plamena

Dužina laminarnog difuzionog plamena izracunava se prema obrasu:

$$L_{dL} = K_L \frac{v_o d_o^2}{D} \quad (1.1)$$

gde su:

L_{dL} - dužina laminarnog difuzionog plamena, (m)

v_o - brzina isticanja gasovitog goriva, (m/h) (m/s)

d_o - prečnik gorionika na izlazu gasovitog goriva (m)

D - koeficijent difuzije (m^2/h) (m^2/s)

K_L - konstanta srazmernosti, koja zavisi od vrste goriva, gorionika i koja se određuje eksperimentalno.

Konstanta srazmernosti K_L određuje se na osnovu izmerenih vrednosti dužine plamena, brzine isticanja i poznatog prečnika, aparaturom koja je u prethodnim tačkama opisana.

$$K_L = \frac{L_{dL} \cdot D}{v_o \cdot d_o^2} \quad (1.1')$$

1.3.1 Primer

Odrediti konstantu srazmernosti K_L za slučaj kada gasovito gorivo (smeša 90% Vol.butana i 10% Vol.propana) difuziono sagoreva. Visina plamena $L_{dL} = 40$ mm, prečnik gorionika $d_o = 2$ mm, brzina strujanja $v_o = 0,277$ m/s.

R a d

Koeficijent difuzije izračunava se prema obrascu (prilog I)

$$D_o = A \frac{\sqrt{\frac{1}{M_G} + \frac{1}{M_L}}}{\left(\sqrt[3]{v_G} + \sqrt[3]{v_L}\right)^2} - B$$

$\frac{m}{s}$

Posle zamene vrednosti i izračunavanja potrebnih vrednosti za mešavinu dobija se vrednost

$$D_o = 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{\sqrt{\frac{1}{56,6} + \frac{1}{29}}}{\left(\sqrt[3]{93,98} + \sqrt[3]{29,7}\right)^2} - 2 \cdot 10^{-6} = 8,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Za uslove eksperimenta $T = 298 \text{ K}$ i $p = 100,6 \text{ KPa}$

$$D = D_o \left(\frac{T}{T_o}\right)^m \left(\frac{p_o}{p}\right) = 8,45 \cdot 10^{-6} \left(\frac{298}{273}\right)^{1,7} \left(\frac{101,3}{100,6}\right) = 10,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Konstanta srazmernosti se onda izračunava

$$K_L = \frac{40 \cdot 10^{-3} \cdot 10,14 \cdot 10^{-6}}{0,227 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 1,821$$

1.4 Odredjivanje konstante srazmernosti za izračunavanje dužine turbulentnog difuzionog plamena

Za odredjivanje dužine turbulentnog difuzionog plamena postoji više eksperimentalno dobijenih relacija:

- prema Mihejevu, $L_{dT} = K'_T \cdot d_o$ (1.2)

- prema S. Šorinu i O. Jermolajevu,

$$L_{dT} = K''_T \cdot d_o \left(\frac{\nu}{D}\right)^{+0,3}$$
 (1.3)

- prema Kitajevu,

$$L_{dT} = 20d_o \cdot K'''_T \cdot \left(\frac{v_o^2}{g \cdot d_o}\right)^{+0,17}$$
 (1.4)

gde su:

L_{dT} - dužina turbulentnog difuzionog plamena,

ν - koeficijent kinematske viskoznosti (m^2/s)

g - ubrzanje zemljine teže ($9,81 \text{ m/s}^2$)

K'_T, K''_T, K'''_T - konstante srazmernosti

Oдавде slede izrazi za izračunavanje konstanti srazmernosti:

$$K'_T = \frac{L_{dT}}{d_o}$$
 (1.3')

$$K''_T = \frac{L_{dT}}{d_o} \left(\frac{v}{D} \right)^{-0,3} \quad (1.4')$$

$$K'''_T = \frac{L_{dT}}{20 d_o} \left(\frac{v_o^2}{g \cdot d_o} \right)^{-0,17} \quad (1.5')$$

1.4.1 Primer

Odrediti konstante srazmernosti za izračunavanje dužine turbulentnog difuzionog plamena, ako su merenjima nadjene vrednosti brzine isticanja propa-
na $v_o = 36,4$ m/s, dužine turbulentnog difuzionog plamena $L_{dT} = 0,4$ m, preč-
nika gorionika $d_o = 0,001$ m.

R a d

$$K'_T = \frac{L_{dT}}{d_o} = 400$$

$$K''_T = \frac{L_{dT}}{d_o} \left(\frac{v}{D} \right)^{-0,3} = 400 \left(\frac{3,8 \cdot 10^{-6}}{8,78 \cdot 10^{-6}} \right)^{-0,3} = 554,4$$

$$K'''_T = \frac{L_{dT}}{20 d_o} \left(\frac{v_o^2}{g d_o} \right)^{-0,17} = 2,8$$

2. Odredjivanje brzine sagorevanja

Brzina sagorevanja predstavlja brzinu kojom se ravan front plamena kreće normalno na svoju površinu kroz pripremljenu smešu goriva i, najčešće, vazduha. Brzina sagorevanja, ili, kako se još naziva, brzina prostiranja plamena, predstavlja fundamentalnu veličinu određene gorive smeše i podjednako je važna i sa praktične (pri stabilizaciji plamena naprimer) i sa teorijske tačke gledišta (teorija prostiranja plamena). U svim slučajevima u primeni plamen nije normalan na brzinu gorive smeše. Brzina sagorevanja zavisi u osnovi od prvobitnih veličina stanja sistema - sastava, temperature i pritiska, a takodje i od protoka gasa i geometrije sistema. Povećanjem prvobitne temperature i smanjenjem pritiska brzina sagorevanja se povećava.

Pored izraza brzine sagorevanja u oblasti sagorevanja često se sreću i izrazi "normalna brzina sagorevanja" i "masena brzina sagorevanja".

Normalna brzina sagorevanja predstavlja brzinu sagorevanja hladne i još neupaljene smeše goriva i vazduha, kojom se plamen pomera po normali na svoju površinu, pri čemu se prenos toplote i mase vrši molekularnom toplotnom provodljivošću i difuzijom. Vrednost normalne brzine sagorevanja je konstantna po celoj površini plamena. Ova postavka zasniva se na postulatu Gouy-a, koji glasi: Oblik plamena stabilizuje se uvek tako, da količina gasa koja sagoreva na jedinici površine fronta plamena ostaje približno (konstantna).

U nizu slučajeva, a naročito pri sagorevanju čvrstih goriva, kao pogodna karakteristika procesa sagorevanja koristi se masena brzina sagorevanja. Masena brzina sagorevanja predstavlja količinu gorive materije koja sagoreva u jedinici vremena po jedinici površine.

Između normalne i masene brzine sagorevanja važi veza:

$$U_N = \varrho \cdot U_M \quad (2.1)$$

gde su:

U_N - normalna brzina sagorevanja (m/s)

U_M - masena brzina sagorevanja (kg/m²s)

ρ - gustina smeše goriva i vazduha (kg/m^3)

Odredjivanje brzine sagorevanja uopšte vrši se nizom različitih metoda. Sve metode, ipak, možemo podeliti u dve osnovne grupe:

- metode kojima se brzina sagorevanja odredjuje na gorionicima, pri čemu se plamen održava u stacionarnom stanju (smeša goriva i vazduha kreće se u jednom smeru, a front plamena u drugom), i

- metode kojima se brzina sagorevanja odredjuje slobodnim kretanjem fronta plamena kroz mirnu ili pokretnu gorivu smešu.

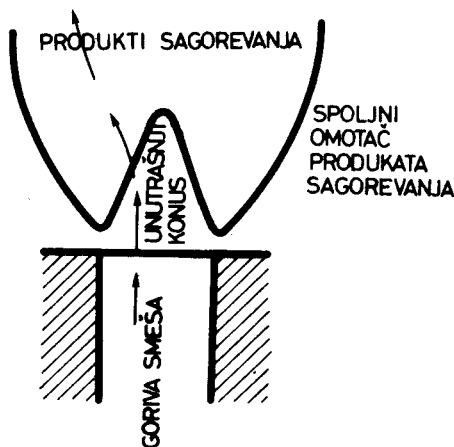
2.1 Metode kojima se brzina sagorevanja odredjuje gorionicima

Prvi pokušaj odredjivanja brzine sagorevanja izvršio je Bunzen. On je odredjivao brzinu protoka smeše goriva i vazduha u gorioniku, pri kojoj je dolazilo do uvlačenja plamena, tj. brzina sagorevanja bila je jednaka brzini smeše. Ovaj način odredjivanja tačan je samo za ravanski plamen koji nastaje samo onda kada je brzina smeše goriva i vazduha jednaka po celom preseku gorionika. Ovim vrstama gorionika, koji obezbeđuju ravanski plamen mogu se odrediti brzine sagorevanja ispod 15 - 20 (cm/sec) tako da, i pored toga to se ravanskim plamenom mogu na najpogodniji način izučavati struktura plamena i koncentracione granice paljenja u području siromašnih smeša, nisu od šireg interesa za većinu primenjenih procesa sagorevanja u praksi.

Posmatramo gorionik, koji predstavlja običnu cev, kroz koji laminarno protiče smeša goriva i vazduha koeficijenta viška vazduha manjeg od jedan. Paleći smešu goriva i vazduha nastaje stacionaran plamen, koji se sastoji iz unutrašnjeg jako svetlo plavog konusa i spoljašnjeg oreola, manjeg svetlosnog intenziteta (Sl. 2.1). Površina plavog konusa predstavlja stabilizovanu zonu sagorevanja (front plamena), dok površina slabijeg svetlosnog intenziteta predstavlja zonu dogorevanja. Višak goriva iz smeše prolazi kroz primarni front plamena i dogoreva u sekundarnom usled difuzije sa okolnim vazduhom.

Laminarna struja goriva i vazduha ima paraboličan raspored brzina: maksimalna brzina nalazi se u osi protoka, a ostale vrednosti brzina opadaju

od nje do nule idući ka zidovima gorionika. Očigledno je da u blizini zidova go-



Sl. 2.1

rionika postoji lokalna brzina v_0 koja je jednaka brzini sagorevanja U_N . U tom području javlja se mali deo stacionarnog ravanskog plamena, čije prisustvo omogućava da je protok neposredno u blizini zidova jako prigušen i ima malu brzinu. Suprotna njoj, brzina sagorevanja u tom području je takodje mala, jer zidovi gorionika, odvođeći količinu toplote nastale sagorevanjem, osetno smanjuju temperaturu, pa samim time i brzinu sagorevanja. Prstenasti deo ravanskog plamena predstavlja inicijalni izvor (prsten) paljenja, koji obezbedjuje neprekidno i sigurno paljenje sveže smeše goriva i vazduha. U plavom konusu se svaki element fronta plamena pomera brzinom sagorevanja U_N normalno na površinu plamena u smeru suprotnom strujanju smeše, a istovremeno kreće u smeru strujanja ose brzinom v_0 . Karakter raspodele brzina pri laminarnom strujanju, zajedno sa inicijalnim paljenjem uslovljava obrazovanje zone sagorevanja u obliku konusa.

Veličina konusa zavisi od protoka smeše: što je veći protok, povećava se brzina isticanja smeše i visina konusa. Površina plamena povećava se, znači, srazmerno povećanju protoka, što istovremeno znači da brzina isticanja prevazilazi po svojoj vrednosti brzinu sagorevanja, a da ne dolazi do oduvavanja

plamena.

Da bi se očuvao laminarni režim strujanja utvrđeno je istraživanjima da je potrebna dužina gorionika najmanje jednaka 40 prečnika gorionika ($d_{opt} = 10 \text{ mm}$).

U većini slučajeva kada se za određivanje brzine sagorevanja koriste gorionici, upotrebljava se unutrašnji konus stacionarnog plamena.

2.1.1 Metoda Gouy-a

Ova metoda određivanja brzine sagorevanja zasniva se na pretpostavci da je brzina sagorevanja konstantna duž čitave površine stacionarnog fronta plamena. Front plamena nije normalan na protok gasa, ali je komponenta protoka (brzine), normalna na front plamena, jednaka brzini sagorevanja.

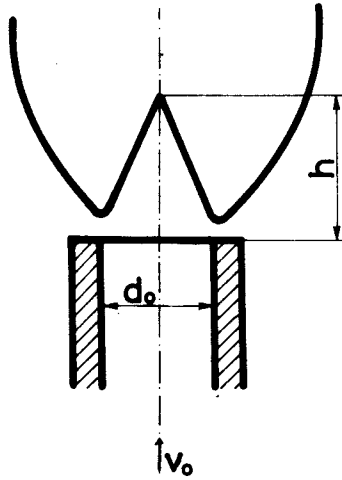
Ako površinu poprečnog preseka usta gorionika obeležimo sa A_o , srednju brzinu na izlazu iz gorionika sa v_o i ukupnu površinu na kojoj se proces sagorevanja odvija (front plamena) sa A_s , onda brzinu sagorevanja možemo da izračunamo iz jednačine:

$$A_o v_o = A_s U_N \quad (2.2)$$

odakle sledi da je brzina sagorevanja jednaka:

$$U_N = \frac{A_o}{A_s} v_o \quad (2.3)$$

Na ovaj način moguće je, mereći brzinu proticanja smeše goriva i vazduha, površinu poprečnog preseka izlaza gorionika i površinu fronta plamena, relativno lako odrediti brzinu sagorevanja. Ako prema slici 2.2 usvojimo oznake i zamenimo vrednosti površina odgovarajućim izrazima za poprečni kružni presek i omotač konusa, dobijamo konačan izraz za izračunavanje brzine sagorevanja. On se svodi sada na poznavanje vrednosti prečnika i visine unutrašnjeg konusa i brzine gorive smeše.



Sl. 2.2

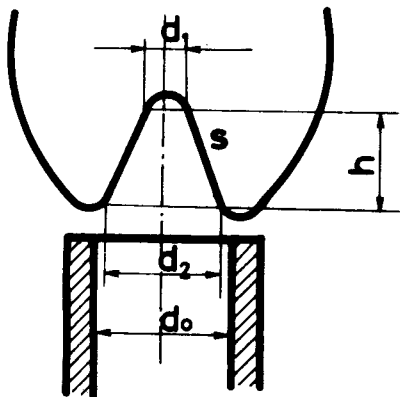
$$U_N = \frac{\pi (d_o^2/4) \cdot v_o}{\pi (d_o/2) \sqrt{(d_o^2/4) + h^2}} \quad (2.4)$$

$$U_N = \frac{r_o \cdot v_o}{\sqrt{r_o^2 + h^2}} \quad (2.5)$$

2.1.2 Metoda Derry-a

Metoda Derry-a imala je za cilj da odstrani greške koje se čine, ako se front plamena zameni konusom. Realan front plamena razlikuje se od konusa u osnovi i pri vrhu. Metodom Derry-a koristi se deo površine konusa bez vrha i dela blizu osnove konusa (površina omotača zarubljenog konusa). (Sl. 2.3). Brzina sagorevanja određuje se za gorionik kružnog poprečnog preseka prema obrascu:

$$U_N = \frac{2v_o}{s} (r_2 - r_1) \left(l - \frac{r_2^2 + r_1^2}{2r_o^2} \right) \quad (2.6)$$



Sl. 2.3

- gde su:
- r_o, d_o - poluprečnik, odn. prečnik usta gorionika
 - v_o - srednja brzina smeše goriva i vazduha,
 - h - visina unutrašnjeg konusa plamena,
 - r_2 - donji poluprečnik zarubljenog konusa,
 - r_1 - gornji poluprečnik zarubljenog konusa,
 - s - izvodnica zarubljenog konusa ($s = \sqrt{(r_2 - r_1)^2 + h^2}$)

2.1.3 Metoda planimetra

Poboljšanje Gouy-eve metode može se izvršiti finijim planimetrisanjem površine plamena. U tom cilju površina plavog konusa deli se na veći broj površina iste visine, tako da površina svakog dela iznosi:

$$a = \pi s(r_1 + r_2) \quad (\text{oznake na Sl. 2.4}) \quad (2.7)$$

Ako sa α označimo ugao između "s" i ordinate, površina $\frac{1}{2} h (r_1 + r_2)$, koja se može izmeriti planimetrom, daće površinu "a", kada se pomnoži sa $2\pi/\cos\alpha$. Merenjem ugla α duž konusa i množenjem odgovarajućeg poluprečnika sa $1/\cos\alpha$ dobićemo drugu konturnu liniju, čijim množenjem sa 2π dobijamo površinu plamena.

stili ovaj način određivanja brzine sagorevanja, pri čemu se ona izračunava jednostavno preko poznate brzine isticanja gorive smeše i polovine izmerenog ugla konusa:

$$U_N = v_o \sin \alpha \quad (2.8)$$

Ovakav način merenja dovidi i do određenih greški, jer usled postojanja graničnog efekta, lokalne brzine u centralnom delu mlaznika prevazilaze srednju brzinu gorive smeše i do 20%.

2.1.5 Metoda ispravljenog ravanskog plamena

Novu metodu za određivanje malih brzina sagorevanja najčešće u blizini donje koncentracione granice paljenja dali su Egerton i Powling. Ovom metodom smeša goriva i vazduha propušta se kroz modificiranu vertikalnu cev, koja obezbeđuje uniformni profil brzina. Oko ove cevi protiče struja azota. Po dešavanjem brzina azota i gorive smeše uspostavlja se ravanski plamen. Brzina sagorevanja jednaka je onda brzini isticanja gorive smeše, a izračunava se iz odnosa protoka i površine poprečnog kružnog preseka. (Sl. 2.5).

2.1.6 Metoda ugla

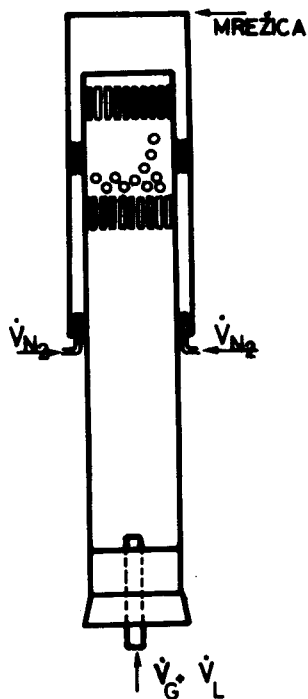
Metodom ugla izračunava se lokalna brzina sagorevanja na osnovu lokalne brzine smeše goriva i vazduha "v" i ugla φ - ugla između smera strujanja sveže smeše i izvodnice konusa površine plamena:

$$U = v \sin \varphi$$

Brzina sveže smeše "v" izračunava se za željenu tačku plamena pod pretpostavkom da raspodela brzina strujanja sveže smeše zadovoljava Poiseull-ovu jednačinu:

$$v = \frac{2v_o (r_o^2 - r^2)}{r_o^2} \quad (2.9)$$

gde su: v_o - srednja brzina sveže smeše goriva i vazduha,
 r_o - poluprečnik gorionika,
 r - poluprečnik od ose gorionika do površine plamena na kojoj se određuje brzina sagorevanja

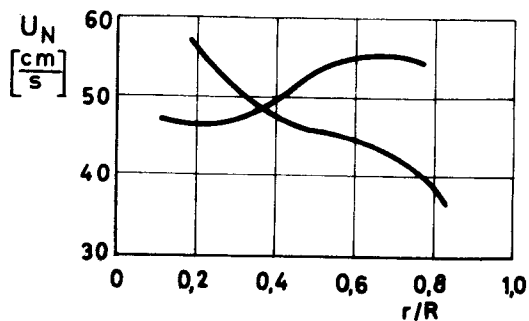


Sl. 2.5

2.1.7 Metoda ugla $r/R = 0,4$

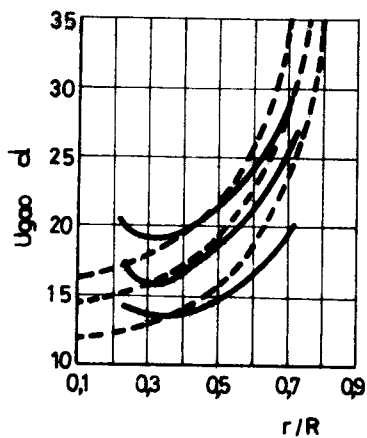
Merenjima Garner-a, Long-a i Ashfort-a utvrđeno je, da nije tačna konstatacija Lewis-a i von Elbea, da je normalna brzina sagorevanja konstantna na najvećem delu fronta plamena. Koristeći gorionike kružnog poprečnog preseka i uzimajući u obzir paraboličan raspored brzina smeše goriva i vazduha, utvrđeno je, na različitim rastojanjima od ose gorionika, metodom ugla, da brzina sagorevanja nije konstantna (Sl. 2.6).

Uočeni i proračunati uglovi konusa plamena, uzimajući da je brzina sagorevanja konstanta i paraboličan raspored brzina gorive smeše, predstavljene su na Sl. 2.7. Iako su krive različite, zakonitost promena je ista. Uočene razlike objašnjavaju se predgrevanjem u zoni sagorevanja. Iz podataka se uočava da se u području $r/R = 0,4$ posmatrane i poračunske vrednosti poklapaju, pa,



Sl. 2.6 Rezultati merenja Garner-a, Long-a, Ashfort-a (1)

prema citiranim autorima, brzinu sagorevanja treba odredjivati ovom metodom u tački $r/R = 0,4$.



Sl. 2.7 Rezultati merenja Garner-a, Long-a, Ashfort-a (1)

2.1.8 Odredjivanje brzine sagorevanja Smithels-ovom separacijom plamena

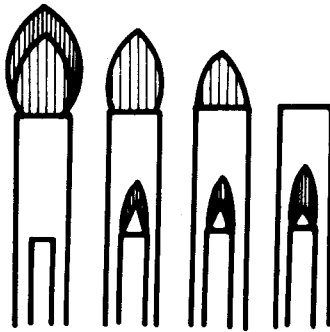
Posmatrajmo gorionik koji sagoreva sa siromašnom smešom. Povećanjem količine vazduha u gorivoj smeši veličina konusa plavog plamena se neće promeniti. Nasuprot ovom, pri sagorevanju bogate smeše i njenom sve većem obogaćivanju, utica ja koncentracije goriva u smeši biće sve приметniji, tako da pri nekoj graničnoj koncentraciji ne bi došlo do paljenja uopšte. Stvarno, do sagorevanja će dolaziti stalno, jer u procesu učestvuje okolni kiseonik iz vazduha.

Postavljanjem na gorionik staklene cevi, bogata smeša goriva i vazduha, u odredjenim uslovima, sagoreva i unutar staklene cevi (na prvobitnom gorioniku) i na izlazu iz nje. Goriva smeša sagoreva znači u dve faze, pri čemu unutar staklene cevi goriva smeša sagoreva uvek u sastavu koji omogućava dovedena količina kiseonika u gorionik, a na njenom izlazu - na račun kiseonika iz okolnog vazduha. Ovaj drugi plamen obezbedjuje prvobitnoj smeši nesmetano sagorevanje, jer za svoje sagorevanje koristi okolni vazduh.

Dodatnu staklenu cev nazivamo separatorom plamena, a postupak, prema istraživaču Smithels-u - Smithels-ovom separacijom plamena.

Na sledećoj slici (Sl. 2.8) šematski je prikazano nekoliko mogućih slučajeva pri korišćenju ovog postupka. Prva skica sa leve strane odgovara slučaju kada je smeša jako bogata i kada se nalazi izvan gornje koncentracione granice paljenja. Unutar separatora plamen ne postoji i celokupan proces sagorevanja vrši se na račun difuzije okolnog kiseonika u smešu goriva i vazduha. Zadnja skica odgovara slučaju kada je količina vazduha u gorivoj smeši dovoljna za potpuno sagorevanje. U tom slučaju gornji plamen ne postoji.

Postupak Smithels-ove separacije plamena koristi se i neophodan je u svim onim slučajevima kada se odredjuje brzina sagorevanja jako bogatih smeša.



Sl. 2.8

Zaključak

Osnova preimućstva metoda koje za određivanje brzine sagorevanja koriste gorionike su:

- jednostavna i relativno jeftina oprema,
- laka mogućnost ispitivanja uticaja veličina stanja - temperature i pritiska, kao i drugih uticajnih faktora,
- mogućnost korišćenja za ispitivanje sagorevanja tečnih goriva,
- lako uočavanje i ispitivanje stacionarnih plamenova.

Nedostatak ovih metoda je u tome, što difuziona razmena sa okolnom atmosferom utiče na sastav smeše, a može da izazove i nestabilan plamen. U određenim slučajevima ovu nestabilnost možemo sprečiti koristeći gorionike sa odbojenim (podeljenim) plamenom (Smithels-ova separacija plamena).

2.2 Metode slobodnog kretanja fronta plamena

2.2.1 Metoda prozračne cevi

Ako horizontalnu providnu cev unutrašnjeg prečnika većeg od kritičnog i dužine oko jednog metra ispunimo homogenom smešom goriva i vazduha i upalimo, plamen će se kretati unutar cevi od dela na kome je smeša upaljena ka drugom kraju cevi. Postavljajući na kraju cevi odgovarajuće dijafragme u cilju

smanjivanja intenziteta odbijenih talasa pritiska, može se dobiti ravnomerno linearno kretanje plamena na dovoljno velikom delu cevi, pri čemu će na tom delu oblik plamena ostati nepromenjen. Linearna brzina ravnomernog kretanja plamena određuje se merenjem vremena potrebnog da plamen predje određeni put između dva detektora (fotoelement naprimer), a takodje i snimanjem (fotografisanjem) pomoću kinokamere. Brzina sagorevanja izračunava se metodom celokupne površine pomoću jednačine:

$$U_N = (U_{lin} - v_o) \frac{A_o}{A_s} \quad (2.10)$$

gde su: A_o - poprečni presek cevi,

A_s - površina sagorevanja,

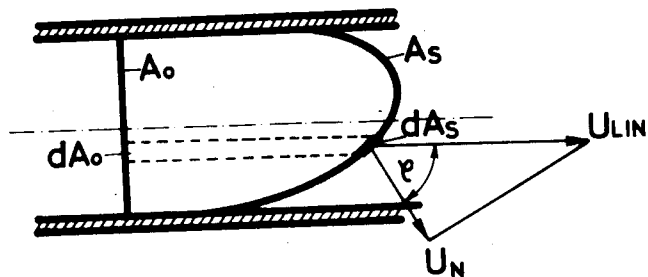
U_{lin} - linearna brzina ravnomernog kretanja plamena,

v_o - brzina sveže gorive smeše.

Proces prostiranja plamena uvek je praćen i kretanjem gorive smeše, pa čak i u uslovima sagorevanja nepokretne smeše, usled ekspanzije produkata sagorevanja. Ovo ima za posledicu da dolazi do deformacije fronta plamena i povećanja njegove površine. Nastala deformacija fronta plamena ne narušava njegovu strukturu u slučaju kada je zona sagorevanja vrlo tanka. Medjutim, kada ukupna količina gorivog gasa u smeši koja sagoreva raste, povećava se i površina sagorevanja. Tako uočena i određena brzina sagorevanja - brzina prostiranja plamena veća je od normalne. Uočena brzina sagorevanja biće utoliko veća od normalne, ukoliko je deformisana površina plamena veća od površine ravanskog fronta plamena koja je, u posmatranom slučaju (Sl. 2.9) kružnog poprečnog preseka.

Uočimo na frontu plamena elementarnu površinu dA_s , čija normala gradi sa smerom prostiranja plamena ugao γ . Njena projekcija na poprečni presek cevi predstavlja

$$dA_o = dA_s \cos \gamma \quad \text{odnosno,} \quad \frac{dA_o}{dA_s} = \cos \gamma \quad (2.11)$$



Sl. 2.9 Prostiranje kinetičkog plamena kroz cev (po Lewis-u i von Elbe-u) (2)

Kako je

$$dV = U_{\text{lin}} \cdot dA_o = U_N \cdot dA_s \quad (2.12)$$

sledi,

$$U_N = U_{\text{lin}} \cdot \cos \varphi \quad (2.13)$$

Ovaj tzv. "zakon kosinusa" potiče od ruskog naučnika Miheljsona.

Eksperimentalni uređjaj za određivanje brzine sagorevanja ovom metodom je jednostavan i relativno siguran, osim uređjaja za registraciju vremena; za ispitivanja izvršena metodom cevi potrebna je mala količina goriva u porudjenju sa metodom gorionika. Sa tačke gledišta određivanja normalne brzine sagorevanja metoda cevi je manje pogodna u odnosu na metodu gorionika, zbog poteškoća određivanja površine sagorevanja (A_s) plamena složenijih oblika. Uticaj zidova je ili nepoznat ili ga je veoma teško utvrditi. Ako se merenje brzine sagorevanja izvodi sa nepokretnom svežom smešom goriva i vazduha, koja se nalazi u providnoj cevi, onda je teško izvršiti merenja pri temperaturama i pritisku, koji se razlikuju od okoline.

Određjivanje brzine sagorevanja metodom cevi je u prednosti u odnosu na ostale, što na plamen ne utiče okolna atmosfera. Smatra se da ova metoda daje rezultate iste tačnosti kao i druge metode, ako se površina sagorevanja odredi na odgovarajući način, zanemarujući uticaj zidova. U radu Levine-a

i Gerstein-a predlaže se uprošćena jednačina za određivanje površine sagorevanja plamena, koji obično ima oblik poluelipsoida:

$$A_s = \frac{2\sqrt{3}(r_{op} \cdot r_{up} + r_{up} \cdot r_o + r_{op} \cdot r_o)}{3} \quad (2.14)$$

gde su: r_{op} - poluprečnik kruga, opisanog oko projekcije slike plamena,
 r_{up} - poluprečnik upisanog kruga,
 r_o - poluprečnik cevi.

Metoda je pogodna naročito za uporedna ispitivanja. Pri vertikalnom položaju cevi površina sagorevanja je obično osnosimetrična, dok se pri njenom horizontalnom položaju simetrija narušava usled delovanja gravitacionih sila.

2.2.2 Metoda sapunskog mehurića ili bombe konstantnog pritiska

Metoda sapunskih mehurića, koju je predložio Becker je jedna od najjednostavnijih.

Sastoji se u uduvavanju smeše goriva i vazduha u sapunski mehurić i njenom, najčešće u centru, paljenju. Površina mehurića se slobodno širi, pri čemu pritisak ostaje nepromenjen. Povećanje sfere plamena, kao i povećanje sfere sapunskog mehurića registruje se kinokamerom. Svaki sferni sloj izložen je sukcesivno delovanju unutrašnjeg pritiska, koji stalno raste, i sapunski mehurić se širi. Stepen ekspanzije je jednak:

$$e = \frac{\Delta V_s}{\Delta V_{ns}} = \frac{T_s}{T_{ns}} \mu \quad (2.15)$$

gde je μ odnos broja mola posle i pre sagorevanja.

Posle sagorevanja sfera, prvobitnog poluprečnik r_a , zauzima sferu poluprečnika $r \cdot \sqrt[3]{e}$, koja usled plamena postaje vidljiva. Ispitivanjima je utvrđeno, da već posle kratkog vremena, nastaje konstantna vidna brzina prostiranja plamena

$$U_{lin} = \frac{dr}{d\tau} = \text{const.} \quad (2.16)$$

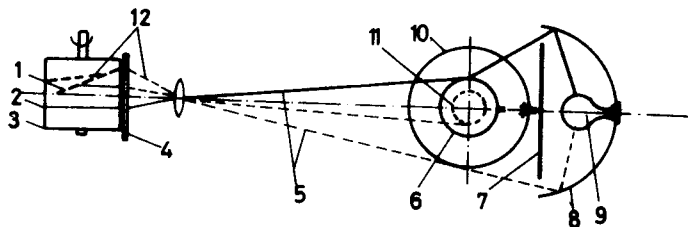
Kako je

$$dr = dr_a \frac{1}{\sqrt[3]{e}} \quad (2.17)$$

apsolutna brzina biće jednaka

$$U_N = U_{lin} \frac{1}{\sqrt[3]{e}} = \text{const.} \quad (2.18)$$

što je trebalo i očekivati, jer su početni uslovi ostali nepromenjeni.

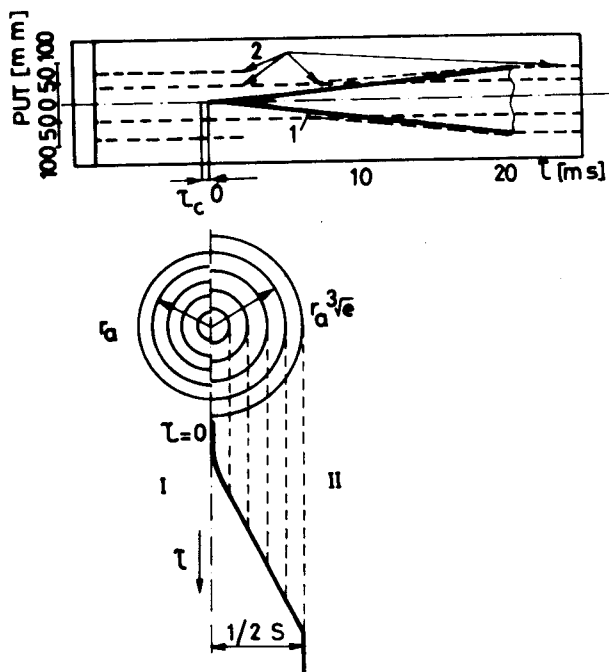


Sl. 2.10 Šema merenja brzine sagorevanja metodom sapunskog mehurića (metodom Dekera) (10)

1 - trag plamena, 2 - trag prvobitnog prečnika mehurića, 3 - film, 4 - procep i zatvarač kamere, 5 - odbijena svetlost, 6 - mehurić prvobitnog prečnika, 7 - ekran, 8 - reflektor, 9 - izvor svetlosti, 10 - mehurić konačnog prečnika, 11 - front plamena, 12 - trag prečnika mehurića.

Metoda u principu izgleda prosta, međjutim, kako je konačni prečnik plamena relativno velik (100-200 mm) primenjena metoda fotografisanja je otežana. Istovremeno, eksperimentalno odredjivanje konačnog poluprečnika sfere, vezano je i za poteškoće usled dogorevanja i mogućnosti nesfernog širenja fronta plamena, usled gravitacionih sila pri malim brzinama sagorevanja ili neizotropnog širenja pri većim brzinama sagorevanja. Kako voda utiče na brzinu sagorevanja, to se onda za stvaranje sapunskog rastvora ne može koristiti voda, već, na osnovu izvršenih ispitivanja, specijalni glicerinski rastvori. U oba slu-

čaja treba uzeti u obzir još i difuziju kroz zid mehurića, a također i uticaj komponenata iz kojih je mehurić sastavljen, na proces sagorevanja.



Sl. 2.11 Odredjivanje brzine sagorevanja metodom sapunskog mehurića (metodom Bekera)(10)

a - registracija plamena, b - nastajanje registracije, I - stanje sveže gorive smeše pre sagorevanja, II - stanje gorive smeše posle sagorevanja.
1 - trag plamena, 2 - trag mehurića, 3 - put plamena

2.2.3 Metoda bombe konstantne zapremine

Metodom bombe konstantne zapremine goriva smeša pali se u centru sfernog suda prečnika oko 300 mm. Pri tome se snimanjem dobijaju fotografije sfere plamena koja se stalno povećava, a istovremeno prati i zapisuje kontinualnim pisućem porast pritiska. Tokom procesa sagorevanja dolazi do širenja produkata sagorevanja i kao rezultat adijabatske kompresije nastaje po-

većanje i pritiska i temperature, sveže smeše. Porast temperature uslovljava stalno povećavanje brzine sagorevanja.

Brzina sagorevanja može se odrediti na dva načina:

Prvim načinom se za svaki trenutni prečnik sfere plamena, koji se uočava na fotografiji, izračunava zapremina produkata sagorevanja na osnovu zapisanog pritiska. Jednačina kojom se izračunava brzina sagorevanja, a koja se dobija iz diferencijalne jednačine za adijabatsku kompresiju, ima sledeći oblik:

$$U_N = \left(1 - \frac{r_B^3 - r^3}{3p \gamma r^2} \cdot \frac{dp}{dr} \right) \frac{dr}{d\tau} \quad (2.19)$$

$$U_N = \frac{dr}{d\tau} - \frac{r_B^3 - r^3}{3p \gamma r^2} \frac{dp}{d\tau} \quad (2.20)$$

gde su: r_B - poluprečnik bombe,

r - poluprečnik plamena u nekom trenutku τ , koji se određuje sa fotografije,

p - statički pritisak u trenutku τ ,

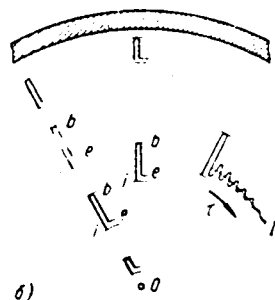
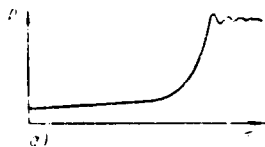
γ - odnos specifičnih toplota sveže gorive smeše za trenutne vrednosti temperature i pritiska (T i p).

Za ovu metodu neophodno je poznavati dva odnosa diferencijala a brzina sagorevanja određuje se razlikom uporednih veličina, jer greške u diferencijalnim odnosima i drugih podataka rastu.

Drugom metodom - metodom Lewis-a i von Elbea koriste se samo podaci za pritisak, na osnovu kojih se izračunava poluprečnik plamena u bilo kom trenutku, a pri čemu možemo istovremeno da izvršimo kontrolu na osnovu očitanih vrednosti poluprečnika sa fotografije.

Dijagram pritiska u bombi u svakom trenutku vremena odgovara sloju gorive smeše koja sagoreva i istovremeno predstavlja pritisak kompresije, kako nesagorelog dela smeše, tako i produkata sagorevanja. Prvobitno se proces

razvija kao i u slučaju sapunskog mehurića, ali se ipak radijalna ekspanzija brzo smanjuje sa razvojem procesa sagorevanja. Uzimajući u obzir opšte povećanje pritiska u bombi, razumljivo je, da sagorevanje svakog sledećeg sfernog sloja smeše izaziva kompresiju kako nesagorele smeše, tako i dela koji je već ranije sagoreo. Sa Sl. 2.12 se vidi, da se u periodu, kada se proces sagorevanja odvija od centra "O" do nekog konkretnog dela punjenja, taj deo punjenja kreće u smeru od centra do trenutka, kada ga front plamena stiže (tačka b) i on počinje da sagoreva ("i" predstavlja početni položaj svakog elementarnog dela gasa). Posle toga sagorevanje se vrši izvan sfernog sloja, kome pripada razmatrani deo punjenja (sveže smeše) i sledeći će se kretati ka centru do položaja "e", koji je (krajnji).



Sl. 2.12 Ispitivanje brzine sagorevanja bombom Lewis-a i von Elbea, a - dijagram promene pritiska u bombi, b - šema kretanja smeše goriva i vazduha u različitim tačkama zapremine, I - ravnotežno stanje (10)

Ovaj krajnji položaj elementarnog malog dela sveže smeše ne poklapa se u potpunosti sa početnim. Temperatura dela gorive smeše koji leži bliže centru i koji, prema tome, sagoreva pre, poseduje višu temperaturu od dela punjenja bližeg zidovima bombe. Ovo se može objasniti da deo gorive smeše, koji prvo sagoreva, (reaguje), sagoreva na pritisku p_0 , pri čemu njegova temperatura raste od T_0 na $T_0 + \Delta T$. Zatim dolazi do kompresije do konačnog pritiska p_k , pri čemu će temperatura biti

$$T_k = (T_o + \Delta T) \left(\frac{p_k}{p_o} \right)^{\frac{k_1 - 1}{k_1}} \quad (2.21)$$

gde je k_1 - eksponent adijabate, koji se odnosi na produkte sagorevanja.

Goriva smeša, koja u sledećem koraku treba da sagori, komprimuje se od stanja definisanog početnim pritiskom p_o i temperaturom T_o do pritiska p_k i temperature T_c

$$T_c = T_o \left(\frac{p_k}{p_o} \right)^{\frac{k_2 - 1}{k_2}} \quad (2.22)$$

gde je: k_2 - eksponent adijabate koji se odnose na nesagoreli deo smeše goriva i vazduha.

Posle sagorevanja temperatura će biti:

$$T_k = T_o \left(\frac{p_k}{p_o} \right)^{\frac{k_2 - 1}{k_2}} + \Delta T \quad (2.23)$$

Pri tome se smatra da se specifična toplota nije promenila, što nije realan slučaj. U zavisnosti od prirode posmatrane smeše goriva i vazduha i početnih uslova, razlika temperatura na početku i kraju procesa sagorevanja, nalazi se u granicama izmedju 600 - 1000 K.

Opisani mehanizam ne važi u neposrednoj blizini zidova bombe, jer se front plamena, koji se zidovima bombe približava konačnom brzinom, i sveže smeša koja se kreće takodje konačnom brzinom nasuprot, susreću takoreći trenutno u blizini zidova. Kao rezultat ovog dolazi do koncentričnih oscilacija mase gasa oko položaja ravnoteže e (ilustrovano na Sl. 2.12 b) što se primećuje i na Sl. 2.12 a. Brzina sagorevanja biće jednaka:

$$U = \frac{dr_o}{dt} \left(\frac{r_o}{r} \right)^2 \left(\frac{p_o}{p} \right)^{\frac{1}{\bar{\gamma}}} \quad (2.24)$$

gde je:

$$r_o = r_B \left(\frac{p - p_o}{p_e - p_o} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.25)$$

$$r = r_B \left[1 - \left(\frac{p_o}{p} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{p_e - p}{p_e - p_o} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.26)$$

gde je: p_o - početni statički pritisak pre paljenja smeše,
 p_e - konačni ravnotežni pritisak posle sagorevanja celokupne količine gasa.

Preimućstva bombe ogledaju se u tome, što ona omogućava kontrolu početnih vrednosti temperature, pritiska i vlažnosti, a zahteva malu količinu sveže smeše za samo odredjivanje. Nedostatak ove metode je složenost uredja i veliki i dug proračun, čija tačnost zavisi od brzine i tačnosti merenja pritiska. Osim toga, u toku ispitivanja brzina plamena se stalno menja.

Zaključak

Poredeći brzine sagorevanja, dobijene istraživanjima različitih istraživača za isto gorivo i koeficijent viška vazduha, pri istim uslovima ispitivanja, uočavaju se razlike. (Primer Tab. 2.1). Od svih metoda merenja brzine sagorevanja metoda bombe konstantne zapremine, pri čemu se meri samo pritisak, predstavlja najtačniju metodu, sa greškom manjom od 1%. Uopšte metode, koje se zasnivaju na odredjivanju brzine sagorevanja pomoću gorionika, su jednoslone, sigurne i efikasne. Medju njima, metoda puna površina je najjednostavnija, a poseduje zadovoljavajuću tačnost. Metode cevi, sapunskog mehurića, i bombe posebno su pogodni u onim uslovima kada na raspolaganju imamo malu količinu goriva. Opšta konstatacija je da je korišćenjem bilo koje metode od strane jednog istraživača njena tačnost u proseku $\pm 5\%$.

Uporedne vrednosti maksimalnih brzina sagorevanja odredjivanih različitim metodama (9)

(goriva smeša: propan-vazduh, $T = 298 \text{ K}$, $p = 101,3 \text{ kPa}$)

Tablica 2.1

Metoda	Prečnik cevi (mm)	α	$U_n \text{ max}$ (cm/sec)
Gorionika			
puna površina	12.6	1.06	43.0
metoda ugla. $r/R=0,4$	13.58	1.08	43,2
puna površina	15.7	1.12	40.2
" "	12.7	1.03	45.5
" "	15.7	1.12	45.4
Zarubljeni konus	-	1.05	46.7
" pravougaoni popr.presek)	0.65.2.55	1.0	41.2
" "	13.6	1.07	41.5
" "	9.4	1.05	46.3
Providne cevi			
puna površina	25.0	1.14	39.0
Bomba (sierna)			
registracija pritiska	150.0	1.0	40.6
fotografisanje	150.0	1.0	40.4

2.3 Odredjivanje brzine sagorevanja turbulentnog plamena

Struktura turbulentnog plamena obično se ispituje pomoću fotografisanja, ali kako je, za razliku od laminarnog plamena, površina turbulentnih plamenova složena, teško je uočiti i lokalizovati posmatranu površinu, koja se inače koristi kod laminarnog plamena. Kada se goriva smeša nalazi u turbulentnom području, plamen je takodje turbulentan i visina plamena se stalno menja. U turbulentnom plamenu sagoreva znatno veća količina gorive smeše u odnosu na

laminaran plamen iste visine.

Imajući u vidu fluktuacioni karakter turbulentnog plamena, između spoljašnje i unutrašnje granice plamena može se naći srednja veličina površine plamena oko koje osciluje stvarni front plamena. Ispitivanja velikog broja turbulentnih plamenova pokazala su da srednja površina plamena predstavlja pravilan paraboloid. Uzimajući ovu postavku, srednju površinu turbulentnog plamena možemo izračunati na osnovu poznatih veličina srednje visine plamena h_T i prečnika gorionika d_o pomoću jednačine:

$$A_{sT} = \frac{2\sqrt{\pi}}{3} \left(\frac{r_o^2}{2h_T} \right) \frac{1}{2} \left[(2h_T + \frac{r_o^2}{2h_T}) \frac{3}{2} - \left(\frac{r_o^2}{2h_T} \right) \frac{3}{2} \right] \quad (2.27)$$

Kad je $\left(\frac{r_o^2}{2h_T} \right) \ll 2h_T$, onda se jednačina svodi na

$$A_{sT} = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} r_o h_T \quad (2.28)$$

Praktični proračuni pokazuju, da, ako je $h_T = 2r_o$, koristeći prethodnu jednačinu, greška iznosi 2%.

Odredjeni rezultati postignuti su metodama providne cevi i sapunskog mehura, koji se koriste za određivanje brzina sagorevanja laminarnih plamena, ali se pri njihovom korišćenju mora voditi računa o suštinskim razlikama obe vrste plamena.

2.4 Određjivanje linearne brzine sagorevanja metodom providne cevi

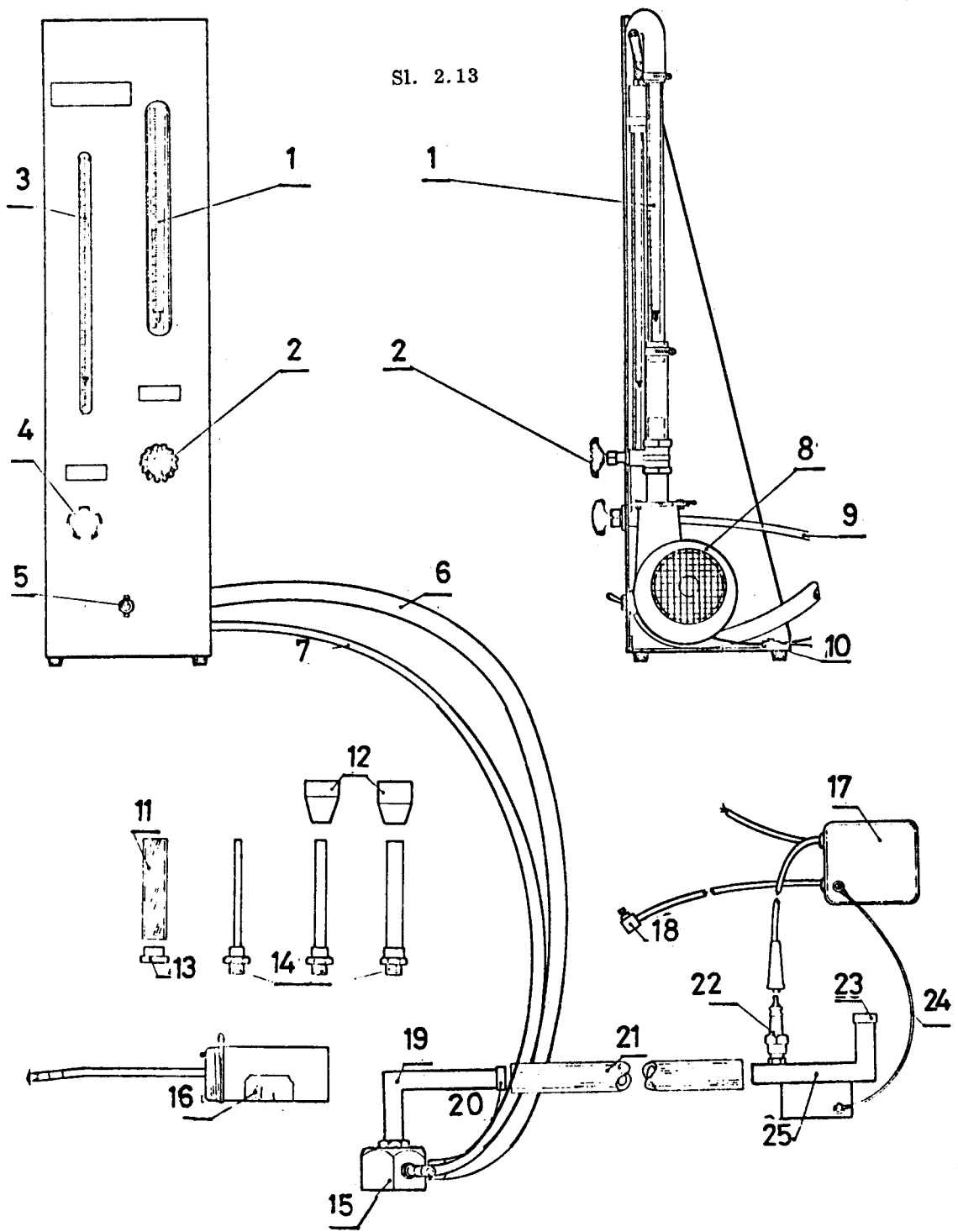
Za određivanje brzine sagorevanja koristi se višenamenski gasni gorionik.

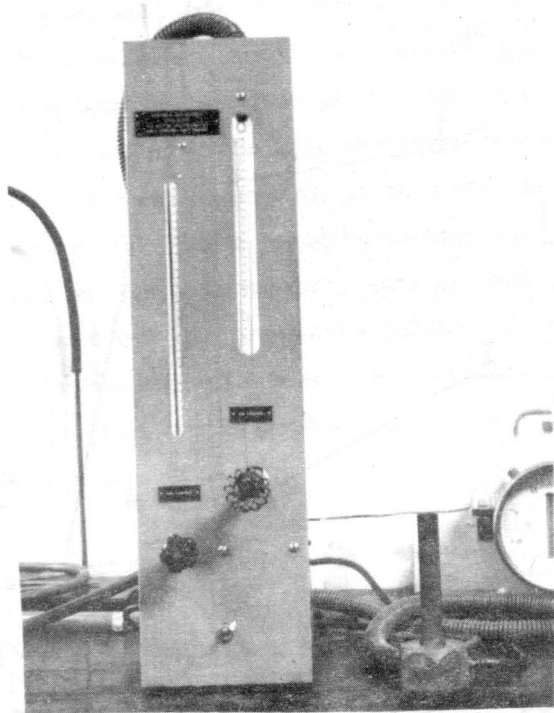
2.4.1 Opis uredjaja

Višenamenski gasni gorionik sastoji se iz sledećih elemenata:

(Sl. 2.13 i 2.14).

Sl. 2.13





Sl. 2.14

- 1 - merač protoka vazduha (rotametar - vidi prilog II)
- 2 - ventil za vazduh
- 3 - merač protoka gasovitog goriva (rotametar)
- 4 - ventil za gasovito gorivo
- 5 - prekidač za uključivanje i isključivanje ventilatora za vazduh
- 6 - cevovod vazduha,
- 7 - cevovod gasovitog goriva
- 8 - ventilator vazduha
- 9 - dovod gasovitog goriva,
- 10 - postolje uređaja
- 11 - dodatak za Smittels-ovu separaciju plamena
- 12 - stabilizacioni komusi
- 13 - odgovarajući priključak
- 14 - gorionici odgovarajućeg prečnika
- 15 - komora za mešanje gasovitog goriva i vazduha
- 16 - baterijski upaljač gorive smeše
- 17 - uređaj za paljenje
- 18 - prekidač za paljenje gorive smeše svećicom
- 19 - stabilizator gorive smeše
- 20 - čelična mrežica
- 21 - plastična providna cev
- 22 - svećica za paljenje gorive smeše

- 23 - čelična mrežica
- 24 - uzemljenje
- 25 - gorionik sa postoljem

2.4.2 Priprema uređaja za merenje brzine sagorevanja

Za odredjivanje brzine sagorevanja potrebno je komoru za mešanje goriva i vazduha (15) vezati sa cevovodima za dovod goriva i vazduha (6 i 7). Vod visokog napona transformatora (17) veže se za svećicu (22) na gorioniku (25), dok uzemljenje treba povezati sa postoljem gorionika (25). Na komoru za mešanje (15) uvrne se stabilizator gorive smeše (19), a na njega postavi plastična providna cev (21). Drugi kraj providne cevi navuče se na gorionik sa postoljem (25). Ovim postupcima pripreme za merenje brzine sagorevanja su izvršene.

2.4.3 Postupak merenja

Postupak merenja brzine sagorevanja sastoji se u sledećem:

- 1 - Prekidačem (5) pušta se u pogon ventilator za dovod vazduha, a neposredno posle toga otvara ventil za vazduh (2).
- 2 - Zatim se otvara ventil za gasovito gorivo (4). U komori za mešanje (15) stvara se smeša goriva i vazduha, koju, po prolasku kroz providnu cev, i izlasku iz gorionika sa postoljem (25), palimo baterijskim upaljačem (16). Pomoću više proba nalazimo odnos goriva i vazduha - koeficijent viška vazduha - koji se lako pali. Ovaj odnos se menja u zavisnosti od vrste goriva i vrste gorionika.
- 3 - Posle najmanje 15 sekundi, za koje vreme se smeša goriva i vazduha stabilizovala, isključimo, što je moguće približnije, istovremeno dovod i goriva i vazduha odgovarajućim ventilima (2 i 4). U providnoj cevi ostaje goriva smeša, podešenog koeficijenta vazduha, koju pomoću prekidača (18) palimo.
- 4 - Posle paljenja gorive smeše svećicom obrazuje se stabilan front plamena koji se u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha prostire odredjenom brzinom kroz cev. Mereći vreme za koje plamen predje put poznate vrednosti

odredjujemo linearnu brzinu sagorevanja.

2.4.4 Primer

Odrediti linearnu brzinu sagorevanja smeše propan-butan u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha.

R a d

1. Kako je smeša propana i butana bila nepoznatog sastava izmeren je pritisak u boci i na osnovu dijagrama "p-t" (Sl. 2.15) odredjeno učešće propana i butana u smeši. Za date primere sastav smeše iznosio je:

$$\text{a) } r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0,31, \quad r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 0,69$$

$$\text{b) } r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0,27, \quad r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 0,73$$

2. Kako je rotametar za gasovito gorivo baždaren za propan, potrebno je izvršiti odgovarajući proračun za butan, a onda za nadjeni odnos propana i butana u gasovitom gorivu stvaran protok. Takodje, pošto je protok propana baždaren na temperaturi od 288 K i p=101,3 KPa, bilo je potrebno odgovarajuće preračunavanje na stvarne uslove.

Stvarna vrednost protoka smeše propan - butan je:

$$\dot{V}_{\text{real}} = \dot{V}_{\text{iz}} \sqrt{S_1 / S_2}$$

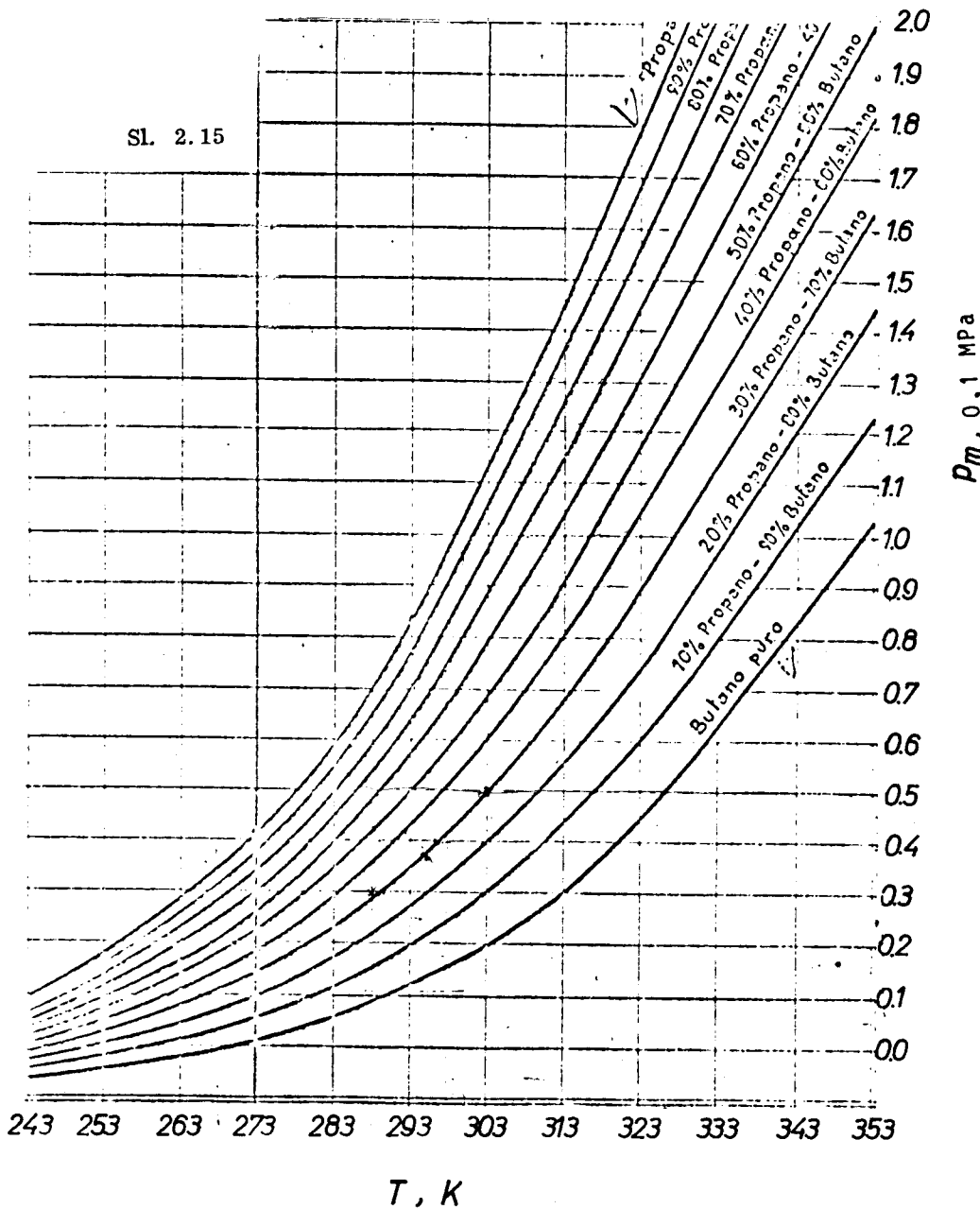
gde su: S_1 - gustina goriva prema kojoj je rotametar baždaren

S_2 - gustina smeše propana i butana

$$S_{\text{C}_3\text{H}_8} = 2,019 \text{ kg/m}^3, \quad S_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 2,703 \text{ kg/m}^3$$

Iz jednačina stanja sledi:

"p-t" DIJAGRAM MESAIVINE PROPANA I BUTANA



BAŽDARNE KRIVE ROTAMETARA

Sl. 2.16

Očitavanje rotametra

PROPAN

GRADSKI GAS

VAZDUH

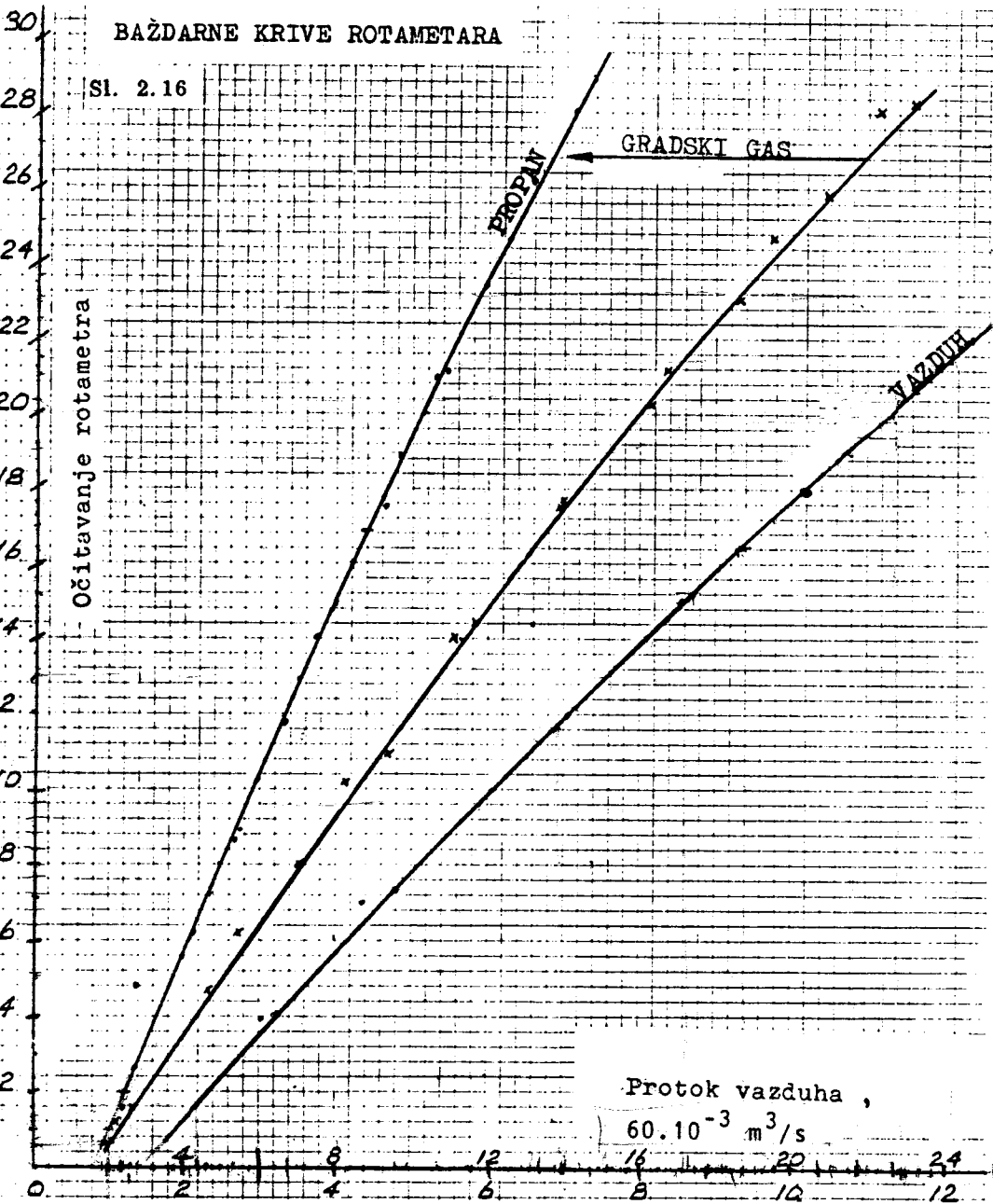
Protok vazduha,

$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Protok gasa,
 $60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

na 288 K i 101,3 kPa

U/min



$$\frac{p_0 \cdot V_0}{m \cdot R \cdot T_0} = \frac{p \cdot V}{m \cdot R \cdot T}$$

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \frac{T}{T_0}$$

$p = p_0 = 101,3 \text{ kPa}$; $T_0 = 288 \text{ K}$; $T(\text{K})$ - temperatura prostorija

$$\dot{V}_s = \dot{V}_{iz} \sqrt{\rho_1 / \rho_2} \cdot T / T_0$$

Po ovoj relaciji vrši se očitavanje protoka goriva preko baždarne krive (Sl. 2.16) za razne sastave smeše propan-butan, kao i temperature u prostoriji gde su vršena ispitivanja.

Ove vrednosti se unose u protokol ispitivanja, pri čemu je:

V_G - očitana vrednost na rotametu za gorivo

\dot{V}_{GS} (l/min) - stvarna vrednost protoka goriva

V_L - očitana vrednost na rotametu za vazduh

\dot{V}_{LS} (l/min) - stvarna vrednost protoka vazduha

Količina vazduha za sagorevanje se određuje na sledeći način:

$$O_{\min} = (\text{Nm}^3 / \text{Nm}^3) = \sum_I^k (m_i + n_i/4) \cdot r_i$$

Minimalna potrebna količina vazduha $L_{\min} (\text{Nm}^3 / \text{Nm}^3) = V_{L\min} = O_{\min} / 0,21$

Stvarna minimalna količina vazduha za određenu količinu goriva $V_{L\min s} = V_{L\min} \cdot V_{GS}$

Koeficijent viška vazduha iznosi:

$$\alpha = \frac{V_{LS}}{V_{L\min s}} = \frac{V_{LS}}{V_{L\min} \cdot V_{GS}}$$

U tabelama 2.2 i 2.3 dati su rezultati merenja linearne brzine sagorevanja kinetičkog plamena, pri različitim protocima goriva i vazduha, odnosno koeficijenta viška vazduha. Sva merenja su vršena na dužini cevi od $L=4\text{m}$.

Tablica 2.2

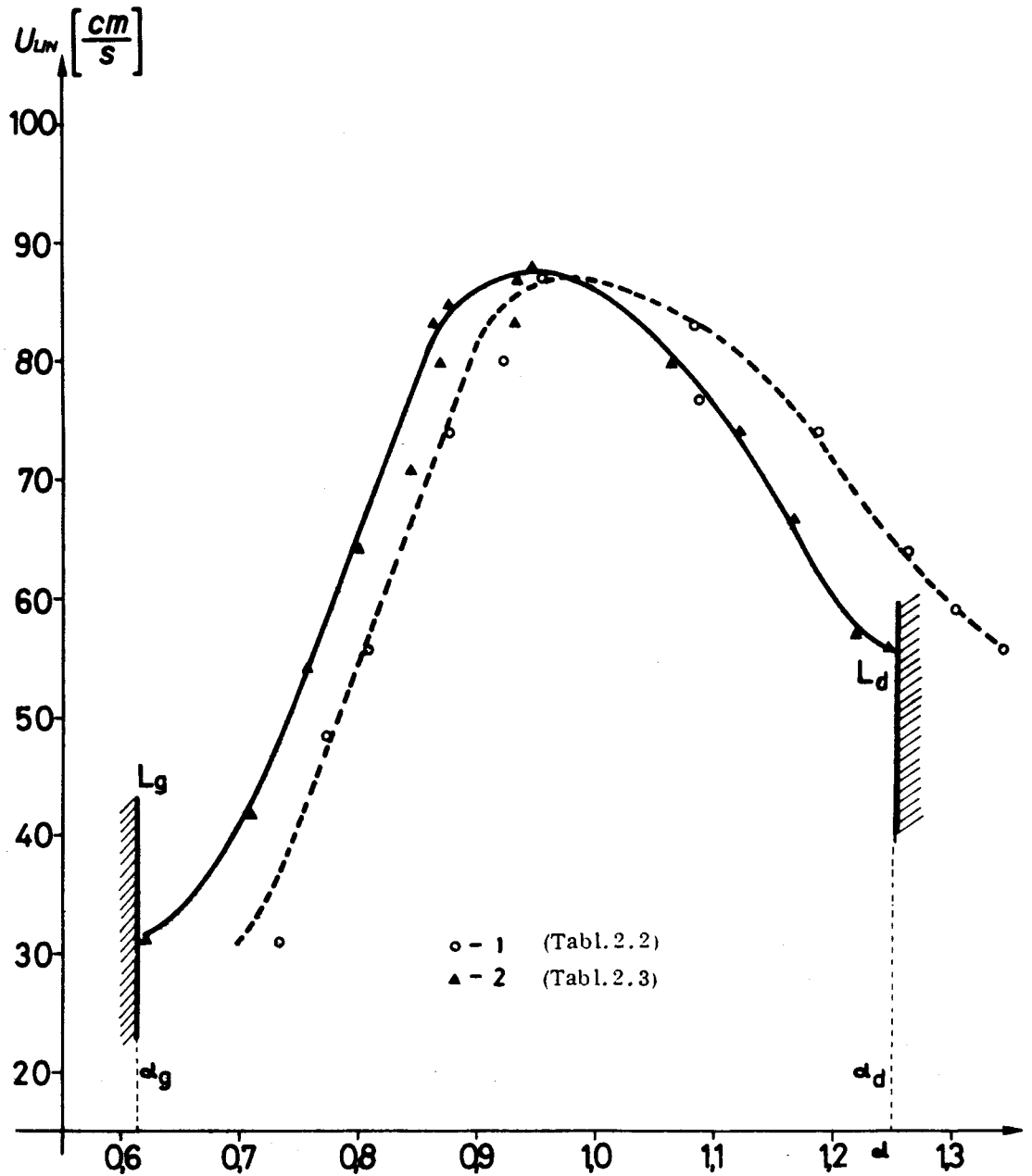
Br. me- re- nja	V_G	\dot{V}_{GS}	V_L	\dot{V}_{LS}	$\dot{V}_{LS}/\dot{V}_{GS}$	τ	U_{LIN}	α	Prime- dba
	$60 \cdot 10^{-3}$	m^3/s	$60 \cdot 10^{-3}$	m^3/s	(s)	(cm/s)			
1.	0,5	0,79	17,5	20,0	25,3	5,4	74,0	0,88	ima p a l j e n j a
2.	0,5	0,79	16,5	19,4	24,6	6,2	24,5	0,856	
3.	0,5	0,79	16,0	18,3	23,2	7,2	55,6	0,807	
4.	0,5	0,79	15,5	17,6	22,3	8,2	48,8	0,776	
5.	0,5	0,79	14,5	16,7	21,1	12,8	31,2	0,734	
6.	0,5	0,79	18,5	21,0	26,6	5,0	80,0	0,926	
7.	0,5	0,79	19,5	21,8	27,6	4,6	87,0	0,960	
8.	0,5	0,79	21,0	23,6	29,9	4,4	90,9	1,040	
9.	0,5	0,79	24,0	27,2	34,4	5,4	74,0	1,197	
10.	0,5	0,79	25,0	28,2	35,7	6,2	64,5	1,272	
11.	0,5	0,79	26,0	29,6	37,5	6,8	58,8	1,305	
12.	0,5	0,79	27,0	30,4	38,5	7,2	55,6	1,340	
13.	0,5	0,79	22,0	24,8	31,4	5,2	76,9	1,090	
14.	0,5	0,79	21,5	24,2	30,6	4,8	83,5	1,085	

(Primer a)

Tablica 2.3

Br. me-re-nja	V_G	\dot{V}_{GS}	V_L	\dot{V}_{LS}	$\dot{V}_{LS}/\dot{V}_{GS}$	τ	U_{LIN}	α	Primedba
	$60 \cdot 10^{-3}$	m^3/s	$60 \cdot 10^{-3}$	m^3/s		(s)	(cm/s)		
1.	0,5	0,83	5,5	7,8	9,63	-	-	0,320	
2.	0,5	0,83	7,0	9,2	11,40	-	-	0,380	nema
3.	0,5	0,83	10,0	12,2	14,64	-	-	0,505	paljenja
4.	0,5	0,83	13,0	15,2	18,25	-	-	0,629	
5.	0,5	0,83	18,0	20,4	24,49	5,6	71,43	0,845	
6.	0,5	0,83	17,0	19,2	23,05	6,2	64,52	0,798	
7.	0,5	0,83	16,0	18,2	21,85	7,4	54,05	0,754	ima
8.	0,5	0,83	15,0	17,2	20,65	9,6	41,70	0,712	paljenja
9.	0,5	0,83	14,0	16,2	19,45	-	-	0,671	nema paljenja
10.	0,5	0,83	14,5	16,6	19,93	9,6	31,25	0,617	
11.	0,5	0,83	19,0	21,4	25,20	4,7	85,10	0,869	
12.	0,5	0,83	20,0	22,8	27,13	4,6	86,90	0,936	
13.	0,5	0,83	21,0	23,6	27,61	4,55	87,90	0,952	ima palje-
14.	0,5	0,83	20,0	22,8	27,13	4,8	83,30	0,936	nja
15.	0,5	0,83	19,0	21,4	25,20	5,0	80,00	0,869	
16.	0,5	0,83	19,0	21,4	25,20	4,8	83,30	0,869	
17.	0,5	0,83	21,0	23,6	27,61	4,55	87,90	0,952	
18.	0,5	0,83	22,0	24,8	29,77	4,5	88,30	1,027	
19.	0,5	0,83	23,0	25,8	30,97	5,0	80,00	1,068	
20.	0,5	0,83	20,0	24,8	29,77	5,0	80,00	1,077	
21.	0,5	0,83	23,0	25,8	30,97	5,6	71,43	1,068	
22.	0,5	0,83	24,0	27,2	32,41	5,4	74,07	1,120	
23.	0,5	0,83	24,0	27,2	32,41	5,8	68,96	1,120	
24.	0,5	0,83	25,0	28,2	33,85	6,0	66,67	1,167	
25.	0,5	0,83	26,0	29,6	35,29	7,0	57,14	1,220	
26.	0,5	0,83	27,0	30,4	36,49	-	-	1,260	nema paljenja
27.	0,5	0,83	26,5	30,2	36,25	7,1	56,34	1,250	ima paljenja

(Primer b)



2.4.5 Primer

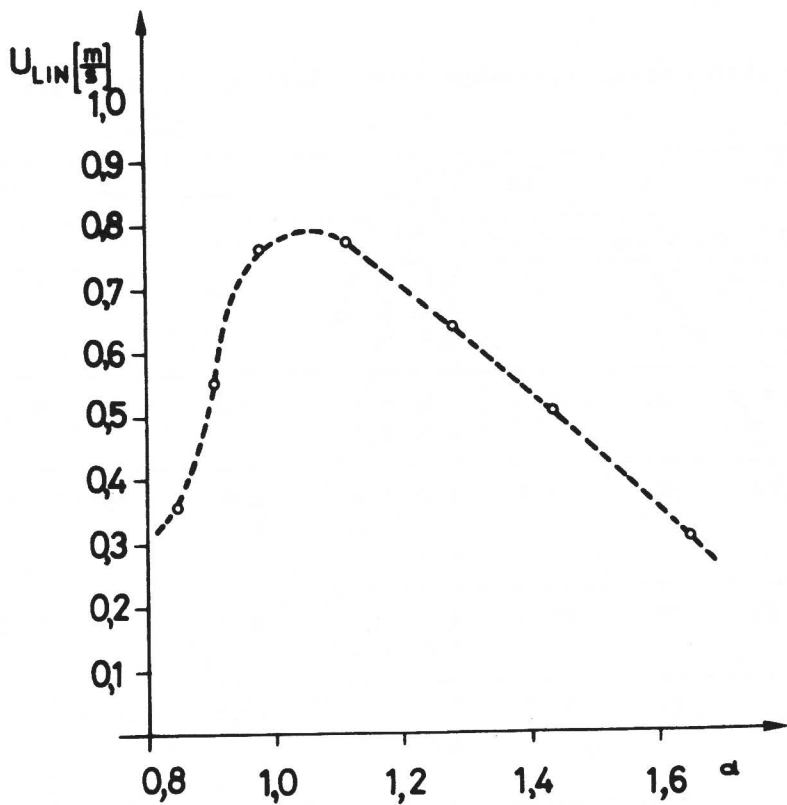
Odrediti linearnu brzinu sagorevanja metana u zavisnosti od koeficijenta viška vazduha.

R a d

Rezultati merenja i proračuna predstavljeni su tabelarno i grafički.

Tablica 2.4

Red. br.	V_G $60 \cdot 10^{-3}$	\dot{V}_{GS} m^3/s	V_L $60 \cdot 10^{-3}$	\dot{V}_{LS} m^3/s	τ (s)	$\tau_{srednje}$ (s)	U_{lin} (m/s)	α
1	9	3,6	28	31,5	5,4; 5,6; 5,5; 5,5; 5,5	5,5	0,555	0,918
2	10	3,9	28	31,5	8,5; 8,5; 8,6; 8,8	8,6	0,354	0,852
3	8	3,25	28	31,5	3,5; 3,5; 4,0; 4,8; 4,2	4,0	0,764	0,983
4	7	2,95	28	31,5	3,8; 4,2; 4,0; 3,8;	3,95	0,772	1,120
5	6	2,57	28	31,5	5,0; 4,8; 4,5; 4,8; 4,7	4,76	0,641	1,286
6	5	2,3	28	31,5	5,9; 5,7; 6,1; 6,2; 6,0	6,0	0,507	1,438
7	4	2,0	28	31,5	10,3; 10,8; 9,5; 9,0; 11,5; 9,0; 10,0	10,0	0,305	1,652



3. Koncentracione granice paljenja

Koncentracione granice paljenja predstavljaju, kao što je poznato, granice područja u kome je moguće paljenje smeše i njeno stabilno sagorevanje. Donja koncentraciona granica paljenja (L_D) predstavlja onu koncentraciju goriva (gorivog gasa ili para goriva) u smeši iznad koje je moguće paljenje, a ispod koje smeša nije u mogućnosti da se upali. Ona koncentracija goriva, pak, iznad koje se smeša neće upaliti, a ispod koje uvek dolazi do paljenja i stabilnog sagorevanja naziva se gornja koncentraciona granica paljenja (L_G).

Poznavanje ovih veličina od znatnog je praktičnog značaja, kako sa gledišta ostvarivanja sigurnog i bezbednog procesa sagorevanja, tako i sa gledišta obezbeđivanja niza procesa od pojave požara i eksplozija. Treba naglasiti da smeša može sagoreti i izvan koncentracionih granica paljenja u prisustvu jako zagrejanih produkata sagorevanja ili usijanih zidova, naprimer, ali nije sposobna da samostalno spontano i stabilno sagori.

Ne ulazeći u uslove toplotne teorije paljenja konstatovaće se samo da na koncentracione granice paljenja utiče niz uticajnih veličina: početni pritisak i temperatura gorive smeše, jačina izvora paljenja, geometrija i položaj prostora u kom procesu treba da otpočne, brzina strujanja smeše, prisustvo aktivnih i inertnih primesa ili dodataka i dr.

Vrednosti koncentracionih granica paljenja nekih ugljovodonika date su u Prilogu III.

3.1 Odredjivanje koncentracionih granica paljenja u mirnoj gorivoj smeši

Koncentracione granice paljenja odredjuju se uređajem koji je korišćen za odredjivanje brzine sagorevanja, pri čemu se tokom ispitivanja povećava ili smanjuje količina (protok) vazduha pri konstantnom protoku goriva, odnosno koeficijent viška vazduha, sve dok paljenje ne izostane. U području u kome dolazi do izostajanja paljenja treba merenja ponoviti sa postepenim povećanjem ili smanjenjem protoka vazduha da bi se tačno utvrdila pojava izostanka paljenja. Dobijena vrednost koeficijenta viška vazduha unosi se u dijagram u ko-

me se predstavlja zavisnost promene brzine sagorevanja od koeficijenta viška vazduha.

3.1.1 Primer

Ispitivanjem brzine sagorevanja smeše propana ($r_{C_3H_8} = 0,27$) i butana ($r_{C_4H_{10}} = 0,73$) utvrđene su koncentracione granice paljenja $\alpha_G = 0,61$ i $\alpha_D = 1,255$. Proračunom za istu smešu odrediti koncentracione granice paljenja i utvrditi kolika je razlika između eksperimentalnih i teorijskih vrednosti.

Iz Priloga III slede koncentracione granice propana i butana:

za propan - 2,0 i 9,5;

za butan - 1,55 i 8,5;

Srednje vrednosti koncentracionih granica paljenja prema La Chatelieu-u iznosi:

$$\frac{100}{L} = \frac{r_1}{L_1} + \frac{r_2}{L_2} + \frac{r_3}{L_3} \dots$$

gde su: r_1, r_2, r_3, \dots - sadržaji pojedinih gorivih komponentata u %,

L_1, L_2, L_3, \dots - koncentracione granice paljenja pojedinih gorivih komponentata u %.

Za smešu predviđenu zadatkom iznose:

$$\frac{100}{L_D} = \frac{0,27}{2,0} + \frac{0,73}{1,55}$$

odakle se dobija

$$L_D = 1,652 (\%)$$

odnosno,

$$\frac{1,00}{L_G} = \frac{0,27}{9,5} + \frac{0,73}{8,5}$$

odakle se dobija,

$$L_G = 8,77 (\%)$$

Da bi proračunom dobijene vrednosti mogli da uporedimo sa rezultatima dobijenim eksperimentima, potrebno je da ih prevedemo na isti oblik izražavanja. Veza izmedju koncentracije goriva u smeši i koeficijenta viška vazduha data je izrazom:

$$C_G(\%) = \frac{100}{1 + \alpha L_{\min}}$$

gde je - L_{\min} (kmol/kmol)

Da bi odredili koncentracione granice paljenja potrebno je da izračunamo vrednost minimalno potrebne količine vazduha.

$$\begin{aligned} O_{\min} &= \left(m_1 + \frac{n_1}{4}\right) r_1 + \left(m_2 + \frac{n_2}{4}\right) r_2 = \\ &= \left(3 + \frac{8}{4}\right) 0,27 + \left(4 + \frac{10}{4}\right) 0,73 = \\ &= 6,195 \text{ (kmol/kmol)} \end{aligned}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} = 29,5 \text{ (kmol/kmol)}$$

Koncentraciona granica biće onda:

$$L_G(\%) = \frac{100}{1 + 0,61 \cdot 29,5} = 5,26$$

$$L_D(\%) = \frac{100}{1 + 1,255 \cdot 29,5} = 2,70$$

Relativna greška iznosi

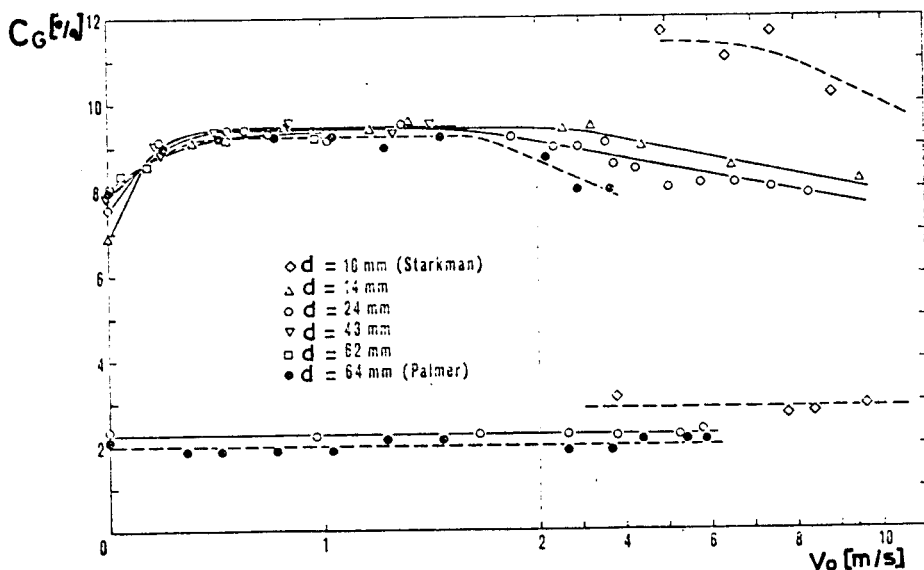
$$L_G(\%) = \frac{8,77 - 5,26}{8,77} 100 = 40,02$$

$$L_D(\%) = \frac{2,70 - 1,652}{1,652} 100 = 63,5$$

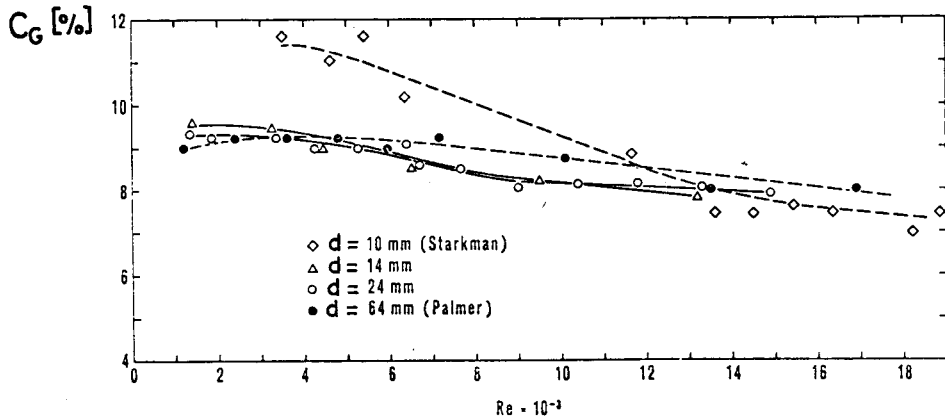
3.2 Odredjivanje koncentracionih granica paljenja u pokretnoj smeši

Odredjivanje koncentracionih granica paljenja u pokretnoj smeši vrši se istom aparaturom kao i za mirnu smešu. Izvršena ispitivanja Crescetti-ja i saradnika ukazuju da koncentracione granice paljenja zavise osetno od prečnika cevi, smeru i brzine strujanja gorive smeše. Utvrđeno je da gornja koncentraciona granica paljenja raste zajedno sa porastom brzine strujanja u laminarnom području i postiže neku maksimalnu vrednost, a zatim, u turbulentnom području, lagano opada (Sl. 3.1). Nasuprot ovom, donja koncentraciona granica paljenja je praktično nezavisna od brzine strujanja smeše goriva i vazduha.

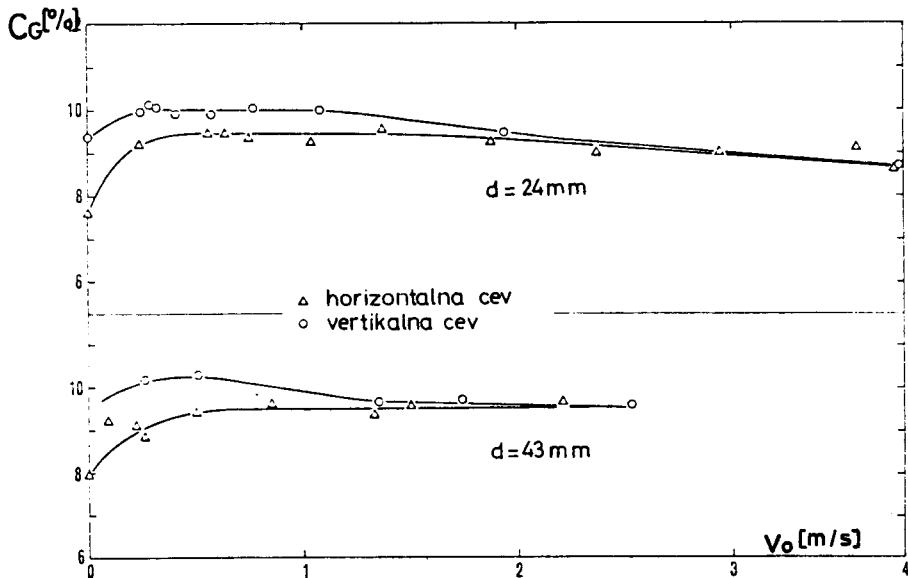
Zakonitost promene koncentracionih granica paljenja (u funkciji od brzine) je slična za oba smeru strujanja gorive smeše (horizontalan i vertikalni), ali je gornja granica paljenja veća za vertikalni položaj; uporedo sa porastom brzine strujanja razlika se smanjuje (Sl. 3.3).



Sl. 3.1 Uticaj brzine strujanja na koncentracione granice paljenja propana za različite prečnike opitne cevi (12)



Sl. 3.2 Uticaj Rejnoldosovog broja na koncentracione granice paljenja propana (12)



Sl. 3.3 Uticaj položaja opitne cevi odn. pravca prostiranja plamena na gornju koncentracionu granicu paljenja (12)

4. Odredjivanje granica stabilnog sagorevanja

Ako posmatramo jedan od uobičajenih gorionika u kome se vrši mešanje goriva i vazduha i ako menjamo brzinu isticanja nastale gorive smeše, onda se uočava da se stabilan proces sagorevanja odvija samo u jednom određenom opsegu brzina isticanja. Smanjenjem brzine isticanja dolazi do uvlačenja plamena u gorionik, a povećanjem - do oduvavanja plamena. Kod difuzionog plamena primećuje se ista pojava - povećanjem brzine isticanja goriva dolazi do oduvavanja plamena, dok do uvlačenja plamena u gorionik neće doći usled nepostojanja kiseonika. To znači da za određeni gorionik, određeno gorivo i dr., postoje granice unutar kojih se odvija nesmetan i siguran rad gorionika - granice stabilnog sagorevanja.

Pod stabilnim sagorevanjem pod razumeva se takvo sagorevanje, koje se u stacionarnim uslovima rada gorionika (brzine strujanja smeše, koeficijenta viška vazduha smeše, geometrije gorionika i dr.) stabilizuje u određenom prostoru i ne menja svoj srednji položaj (prema Hitrinu).

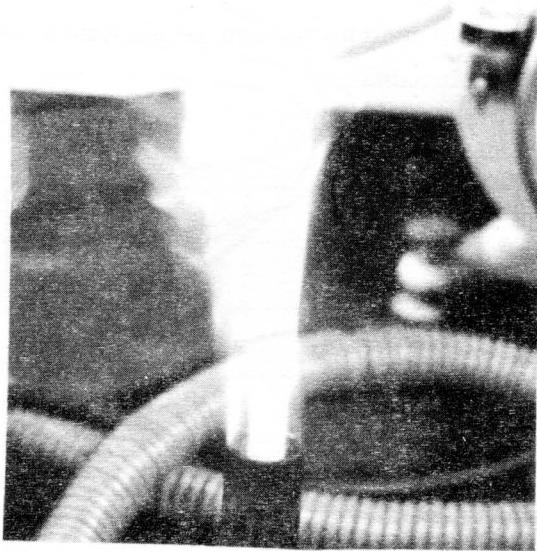
Sagorevanje je stabilno ako u bilo kojoj tački fronta plamena postaje jednake lokalne brzine, strujanja gorive smeše i sagorevanja, a svuda okolo brzina strujanja je veća od brzine sagorevanja (po Levis-u i von Elbe-u).

4.1 Odredjivanje granica stabilnog sagorevanja laminarnog kinetičkog plamena

Kritični gradijenti brzina pri oduvavanju i uvlačenju plamena (g_0 i g_u), koji određuju stabilnost plamena u laminarnoj gorivoj smeši mogu se lako eksperimentalno odrediti ukoliko raspored brzina u strujanju u potpunosti odgovara rasporedu brzina za laminarno strujanje. Raspored brzina za takav tok strujanja određen je onda Poiseuil-ovom jednačinom:

$$v = n (R^2 - r^2) \quad (4.1)$$

gde su: R - poluprečnik gorionika,
 r - rastojanje (poluprečnik) bilo koje tačke, a
 $n = - \Delta p / 4 \mu l$
 p - pad pritiska po dužini gorionika "l",
 μ - viskozitet gasa



Sl. 4.1 Potpuno uvučen plamen (propan - butan smeša (SM)

Diferencirajući prvu jednačinu po r i zamenjujući $r = R$, dobijamo izraz kojim možemo da odredimo gradijent brzine na granici strujanja

$$g = 2nR \quad (4.2)$$

Zapreminski protok (V) gasne smeše u cilindričnoj cevi odredjujemo integralom $\int_0^R 2\bar{\pi} \cdot v \cdot r \cdot dr$. Koristeći prvu jednačinu i izvršivši integraciju dobijamo

$$V = \frac{\bar{\pi}}{2} n \cdot R^4 \quad (4.3)$$

Zajedničko rešenje jednačina (4.1 i 4.3) daje

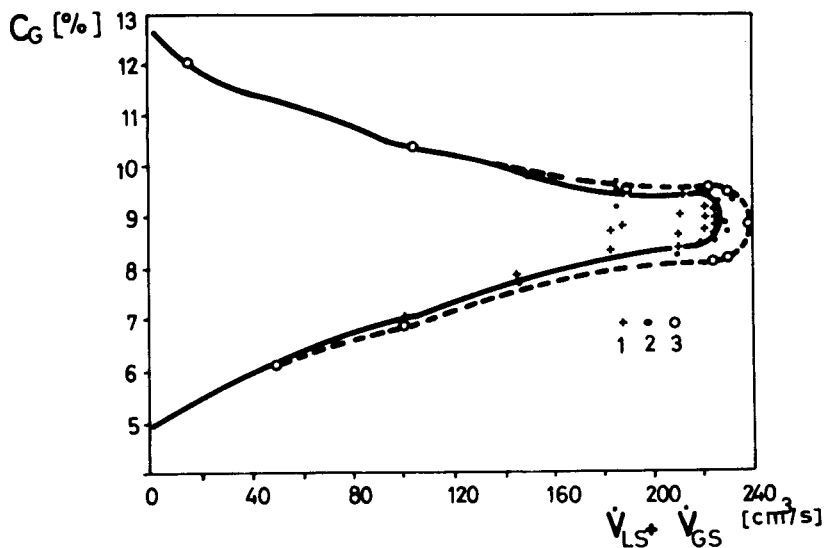
$$g = \frac{4 \cdot V}{\bar{\pi} R^3} \quad (4.4)$$

Na taj način kritični gradijenti brzina (g_o i g_u) mogu se eksperime-

ntalno odrediti mereči protok, odnosno srednju brzinu isticanja gorive smeše (V_o).

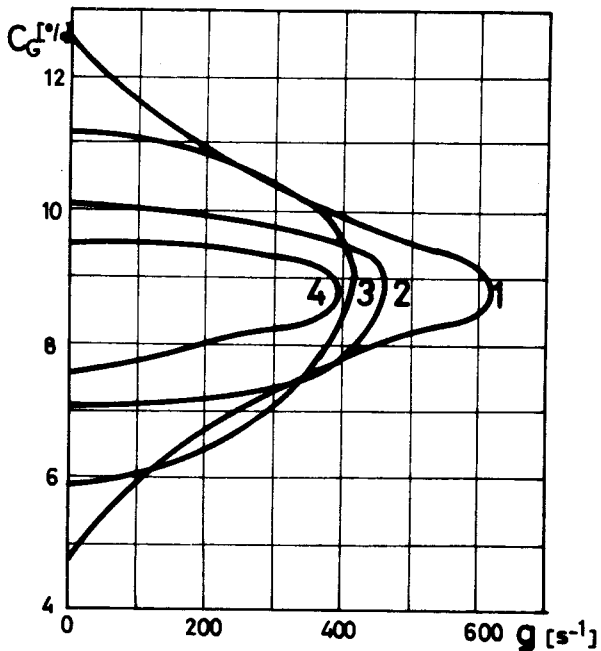
$$g = \frac{4 v_o}{R} \quad (4.5)$$

Dobijeni rezultati merenjem mogu se predstaviti na više načina. Ne-ki od njih dati su na sledećim slikama

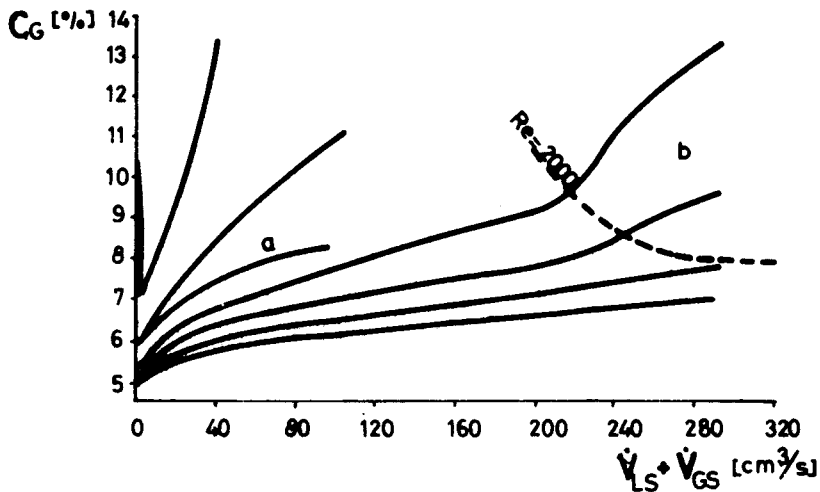


Sl. 4.2 Kritički uslovi uvlačenja plamena smeše prirodnog gasa i vazduha u cilindričnoj cevi na sobnoj temperaturi (Po Lewis-u i von Elbeu) (2)

- 1 - početak delimičnog uvlačenja osnove plamena u cev;
- 2 - osnova plamena delimično ušla u cev;
- 3 - uvlačenje plamena (plamen potpuno uvučen).



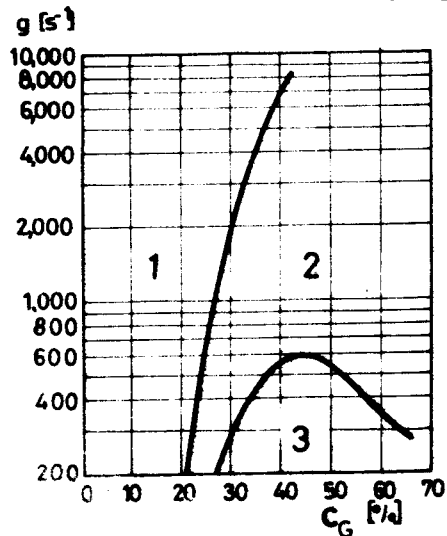
Sl. 4.3 Kritični gradijenti brzina na granici uvlačenja plamena smeša prirodnog gasa i vazduha u cilindrične cevi različitog prečnika na sobnoj temperaturi (po Lewis-u i von Elbeu) (2)



Sl. 4.4 Kritični protoci pri oduvavanju plamena smeša prirodnog gasa i vazduha (cilindrične cevi različitog prečnika) na sobnoj temperaturi (Po Lewis-u i von Elbe-u) (2).

a - sagorevanje u čistom kiseoniku; b - turbulentni plamen

Grafičke zavisnosti obe granice stabilnog sagorevanja predstavljene su na sledećoj slici. Oblast stabilnog sagorevanja nalazi se između krivih.



Sl. 4.5 Krive kritičnih gradijenata brzina pri uvlačenju i oduvavanju plamena smeše CO i vazduha.

1 - oblast oduvanog plamena;
2 - oblast stabilnog sagorevanja;
3 - oblast uvučenog plamena
(Po Hitrin-u) (3).

4.2 Odredjivanje granica stabilnog sagorevanja turbulentnog kinetičkog plamena

Izraz za odredjivanje kritičnog gradijenta brzine laminarnog kinetičkog plamena ne može se koristiti za odredjivanje istih kod turbulentnog kinetičkog plamena. Kao što je poznato, na granici turbulentnog toka postoji sloj gasa koji se kreće laminarno. Ako je brzina na granici između laminarnog sloja i turbulentnog toka pri oduvavanju plamena veća od brzine sagorevanja, onda će se osnova plamena formirati u laminarnom sloju, pa se podaci za laminarni kinetički plamen mogu povezati sa podacima za turbulentni kinetički plamen.

Sila koja se javlja u tangencijalnoj ravni između dva ravanska sloja protoka, koji se kreću brzinama duž ose "x" v i $v + dv$ jednaka je dv/dy , gde je "y" osa normalna na ravan slojeva. Istovremeno tangencijalna sila na granici laminarnog protoka iznosi $\mathcal{M}g$. Kako je

$$\mathcal{M}g = \frac{f \cdot \mathcal{S} \cdot v_o^2}{2} \quad (4.6)$$

gde je f - bezdimenzioni koeficijent trenja, a v_o - srednja brzina toka, to onda uvodeći u izraz i Reynolds-ov broj, dobijamo

$$g = \frac{f \cdot Re \cdot v_o}{4R} \quad (4.7)$$

Za $f = 16/R$ jednačina dobija vid za laminarno strujanje. Koeficijent trenja f u turbulentnom strujanju može se, prema Mc Adams-u u opsegu Re brojeva od 5000 do 200000 izračunati prema:

$$f = \frac{0,046}{Re^{0,2}} \quad (4.8)$$

Odakle sledi

$$g = \frac{0,023 \cdot v_o^{1,8} \cdot \mathcal{S}^{0,8}}{(2R)^{0,2} \cdot \mathcal{M}^{0,8}} = \frac{0,023 \cdot v_o^{1,8}}{(2R)^{0,2} \cdot \nu^{0,8}} \quad (4.9)$$

Prema Blazius-u koeficijent trenja u oblasti Re od 3000 do 100000 iznosi:

$$f = \frac{0,080}{\text{Re}^{0,25}} \quad (4.10)$$

odakle sledi da je kritični gradijent brzine jednak:

$$g = \frac{0,040 \cdot v_o^{1,75} \cdot g^{0,75}}{(2R)^{0,25} \cdot \mu^{0,75}} = \frac{0,040 \cdot v_o^{1,75}}{(2R)^{0,25} \cdot \nu^{0,75}} \quad (4.11)$$

Koristeći navedene izraze i rezultate dobijene eksperimentalnim putem utvrdjeno je dobro poklapanje rezultata.

4.3 Eksperimentalno određivanje granica stabilnog sagorevanja

Za određivanje granica stabilnog sagorevanja kinetičkog plamena koristi se višenamenski gasni gorionik koji je u poglavlju Određivanje brzine sagorevanja detaljno opisan, a koji je za ovu svrhu korišćenja predstavljen na Sl. 4.6 i 4.7.

4.3.1 Priprema uredjaja za merenje granica stabilnog sagorevanja

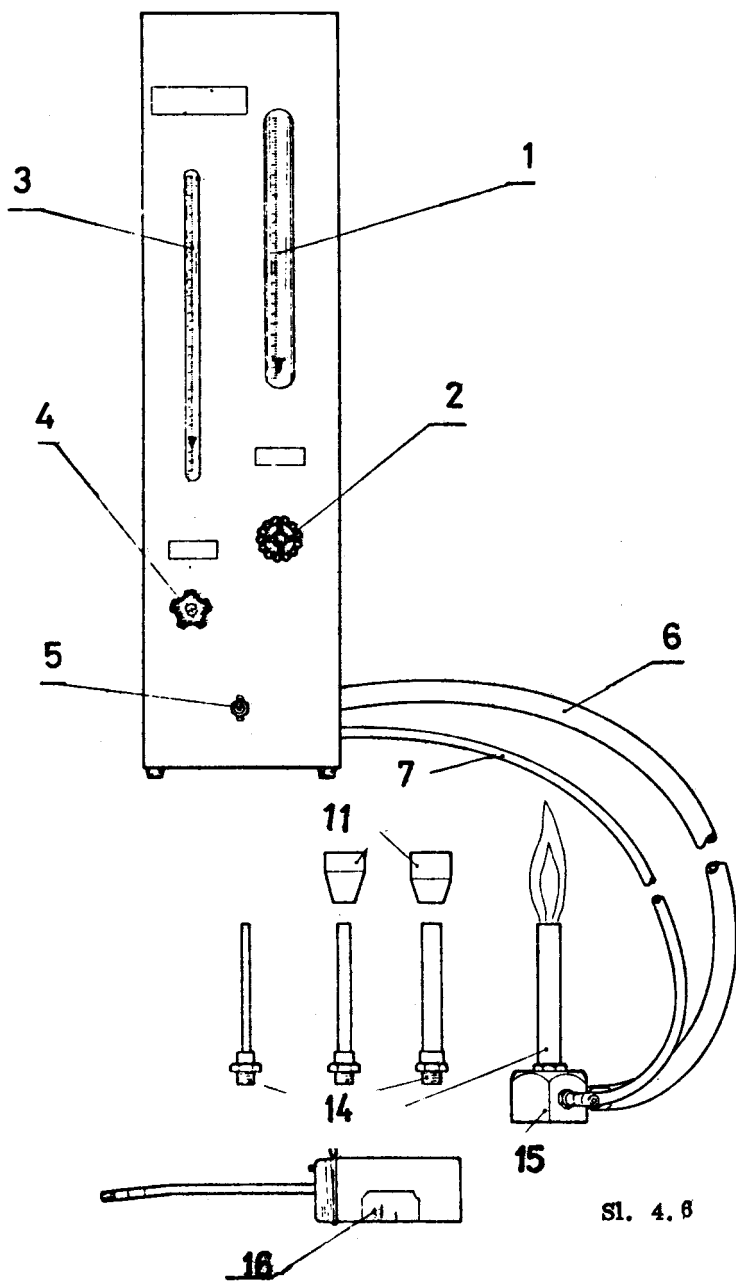
Za određivanje granica stabilnog sagorevanja potrebno je komoru za mešanje goriva i vazduha (15) vezati sa cevovodima za dovod goriva i vazduha (6 i 7). Na komoru se postavi jedan od gorionika (14) čije se granice stabilnog sagorevanja određuju.

4.3.2 Postupak merenja

Postupak određivanja granica stabilnog sagorevanja sastoji se u sledećem:

1 - Prvo se otvara ventil za gorivo (4) i gasovito gorivo pali upaljačem (16).

2. Prekidačem (5) pušta se u rad ventilator za vazduh (8) i postepeno otvara ventil za dovod vazduha (2), pri čemu se, za određeni protok goriva, posmatraju promene koje se javljaju pri sagorevanju. Uočene pojave uvlačenja ili



Sl. 4. 8

oduvavanja plamena očitavaju se i unose u protokol ispitivanja.

4.4.1 Primer

Odrediti granicu stabilnog sagorevanja na uvlačenje plamena smeše propana i butana.

Rad

Smeša propana i butana kvantitativno je određena na ranije opisani način. Rezultati merenja predstavljeni su tabelarno i grafički. (Sl. 4.8).

Tablica 4.1

Red. broj	V_G	\dot{V}_{Gs}	V_L	\dot{V}_{Ls}	$\dot{V}_{Ls} / \dot{V}_{Gs}$	Q	Prime- dba
		$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$		$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$		$(\text{kJ}/\text{cm}^2 \text{ min})$	
1	3,1	1,40	20,9	23,6	16,86	42,49	Plamen potpuno uvičen
2	5,7	1,85	26,5	29,6	16,00	56,13	
3	6,3	1,99	28,3	31,0	15,58	60,40	
4	2,0	1,11	18,4	20,8	18,74	33,70	
5	3,7	1,66	22,0	24,8	14,93	50,40	
6	1,0	0,93	16,0	18,2	19,6	29,26	
7	2,3	1,19	19,5	22,0	18,5	37,42	
8	1,8	1,06	18,5	20,9	19,7	33,32	
9	3,0	1,31	20,2	22,8	17,4	41,19	
10	4,1	1,50	23,5	26,0	17,3	47,18	
11	5,1	1,71	25,5	28,8	16,8	53,75	

Isti rezultati mogu se predstaviti i na drugi način: preko kritičnog gradijenta brzine pri uvlačenju plamena u zavisnosti od procentualnog sadržaja goriva u smeši (Sl. 4.9, Tabl. 4.2).

Tablica 4.2

Red. broj	\dot{V}_{Gs}	$\dot{V}_{Gs} + \dot{V}_{Ls}$	$\frac{\dot{V}_{Gs}}{\dot{V}_{Gs} + \dot{V}_{Ls}} \cdot 100$	v_o	$g_u = \frac{4v_o}{R}$
	$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	(%)	(cm/sec)	(sec ⁻¹)
1	1,40	25,0	5,6	111,8	410
2	1,85	31,45	5,88	140,5	516
3	1,99	32,99	6,03	147,3	541
4	1,11	21,91	5,07	97,85	359
5	1,66	26,46	6,27	118,2	434
6	0,93	19,13	4,86	85,5	314
7	1,19	23,19	5,13	103,7	380,5
8	1,06	23,96	4,83	98,2	360
9	1,31	24,11	5,43	107,8	395
10	1,50	27,50	5,45	123,0	451
11	1,71	18,51	9,23	82,6	303

Da bi ocenili da li se proces odvija u laminarnom ili turbulentnom području potrebno je izračunati Rejnoldsov broj. Kontrola je izvršena za merenje br. 3, kod koga je najveća brzina strujanja smeše goriva i vazduha $v_o = 147,3$ (cm/sec)

$$Re = \frac{v_o \cdot d}{\nu} \quad (4.12)$$

Kako su nam vrednosti brzina strujanja gorive smeše i prečnik poznati ($d = 21,8$ mm), potrebno je samo da nadujemo vrednost koeficijenta kinematske viskoznosti.

Kinematska viskoznost smeše gasova određuje se obično prema Mann-ovom obrascu:

$$\nu_s = \frac{1}{\frac{r_1}{\nu_1} + \frac{r_2}{\nu_2} + \dots + \frac{r_u}{\nu_n}} \quad (4.13)$$

gde su:

ν_s - kinematska viskoznost smeše gasova.

ν_i - kinematska viskoznost odgovarajuće komponente

r_i - zapreminsko učešće odgovarajuće komponente

n - broj komponentata

Za našu smešu od 27% Vol propana i 73% Vol butana i njen procentualni sadržaj u gorivoj smeši od 6,03% biće: zapreminsko učešće u gorivoj smeši:

$$r_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0,0162$$

$$r_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 0,0438$$

$$r_L = 0,94$$

Kako su vrednosti kinematske viskoznosti na $t = 273 \text{ K}$ i $p = 101,3 \text{ kPa}$ komponentata poznate

$$\nu_{\text{C}_3\text{H}_8} = 0,038 \text{ (cm}^2\text{/sec)}$$

$$\nu_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 0,035 \text{ (cm}^2\text{/sec)}$$

$$\nu_L = 0,155 \text{ (cm}^2\text{/sec)}$$

to se onda kinematska viskoznost smeše izračunava

$$\nu_s = \frac{1}{\frac{0,0162}{0,038} + \frac{0,0438}{0,035} + \frac{0,94}{0,155}} = 0,1398$$

a vrednost Reynoldsovog broja iznosi onda

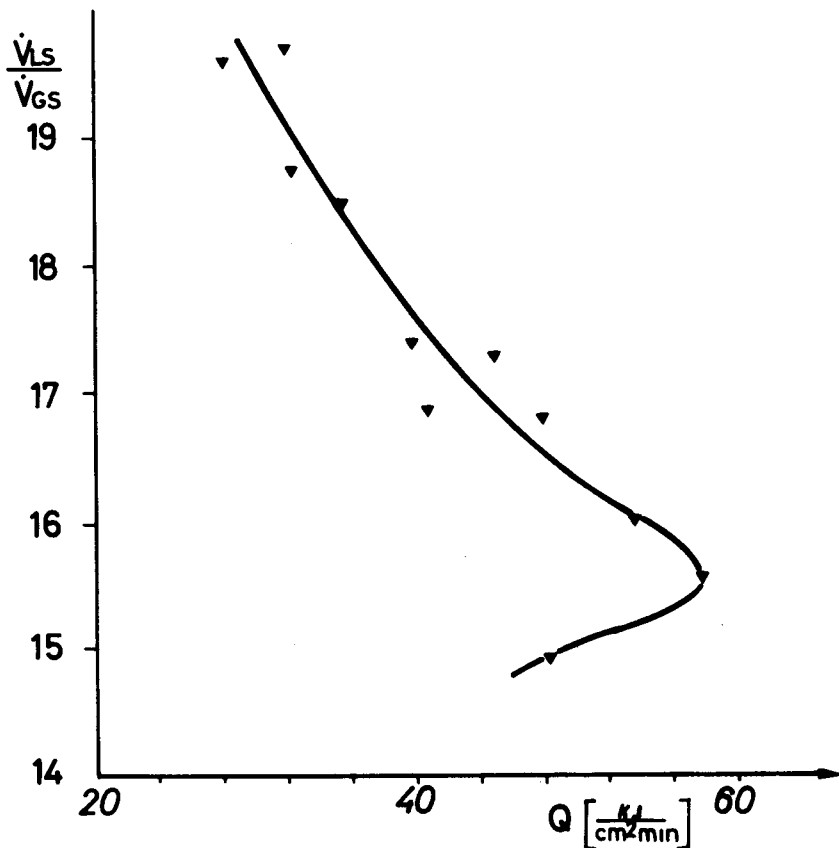
$$\text{Re} = \frac{147,3 \cdot 2,18}{0,1398} = 2300$$

Stvarna vrednost Reynoldsovog broja je manja od 2300, jer je kinematska viskoznost na $t = 293 \text{ K}$ veća u odnosu na uzetu vrednost na 273 K .

Na osnovu vrednosti Reynoldsovog broja izračunatog za najveću brzinu strujanja gorive smeše zaključuje se da je strujanje u svim slučajevima lamina-

rno i da se za izračunavanje kritičnog gradijenta brzine plamena pri uvlačenju može koristiti izraz

$$g_u = 4v_o/R$$

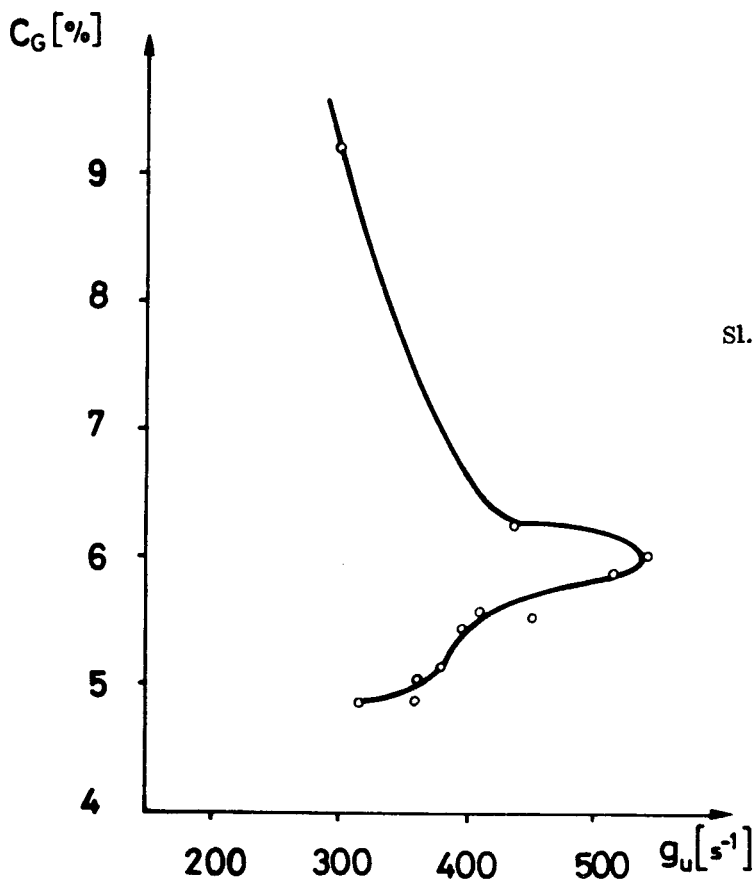


Sl. 4.8 Granica uvlačenja plamena (SM)

4.4.2 Primer

Oceniti poboljšanje granice stabilnog sagorevanja na uvlačenje plamena u gorionik primenom koničnog stabilizatora datog na skici.

Rad Smeša propana i butana sastoji se iz 22% Vol. propana i 78% Vol. butana. Stabilizator (Sl. 4.10) postavljen je na gorionik (14). Rezultati merenja predstavljeni su tabelarno i grafički (Tabl. 4,3, Sl. 4.11).



Sl. 4.9

Rezultati merenja bez stabilizatora

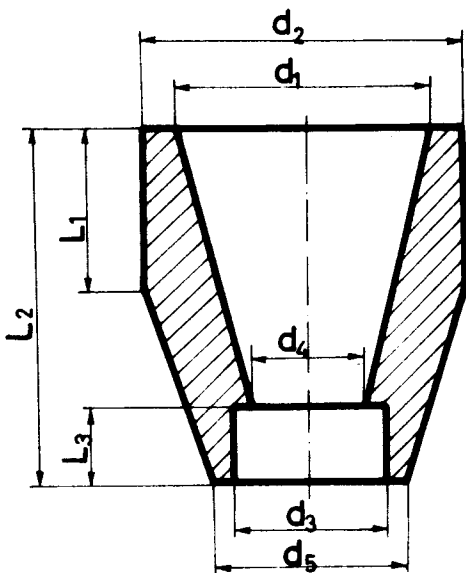
Tablica 4.3

Red. br.	V_G	\dot{V}_{Gs}	V_L	\dot{V}_{Ls}	$\dot{V}_{Ls}/\dot{V}_{Gs}$	Q	Primedba plamen
	$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$		$(\text{kJ}/\text{cm}^2 \cdot \text{min})$	
1	0,4	0,83	11,3	13,4	16,08	49,77	potp. uvučen
2	1,0	0,92	11,5	13,6	14,69	55,30	potp. uvučen
3	1,7	1,01	13,0	15,2	15,05	60,32	potp. uvučen
4	2,2	1,20	17,2	19,5	16,30	71,66	del. uvučen
5	3,0	1,34	18,0	20,4	15,22	80,04	del. uvučen
6	4,0	1,53	21,5	24,0	15,68	91,38	del. uvučen
7	5,5	1,85	23,0	25,8	13,94	110,51	del. uvučen
8	6,6	2,04	26,0	29,4	14,40	121,85	del. uvučen
9	0,7	0,87	10,5	12,6	14,48	51,95	potp. uvučen
10	0,4	0,83	9,5	11,6	13,89	49,81	potp. uvučen

Nastavak Tablice 4.3

Rezultati merenja sa stabilizatorom

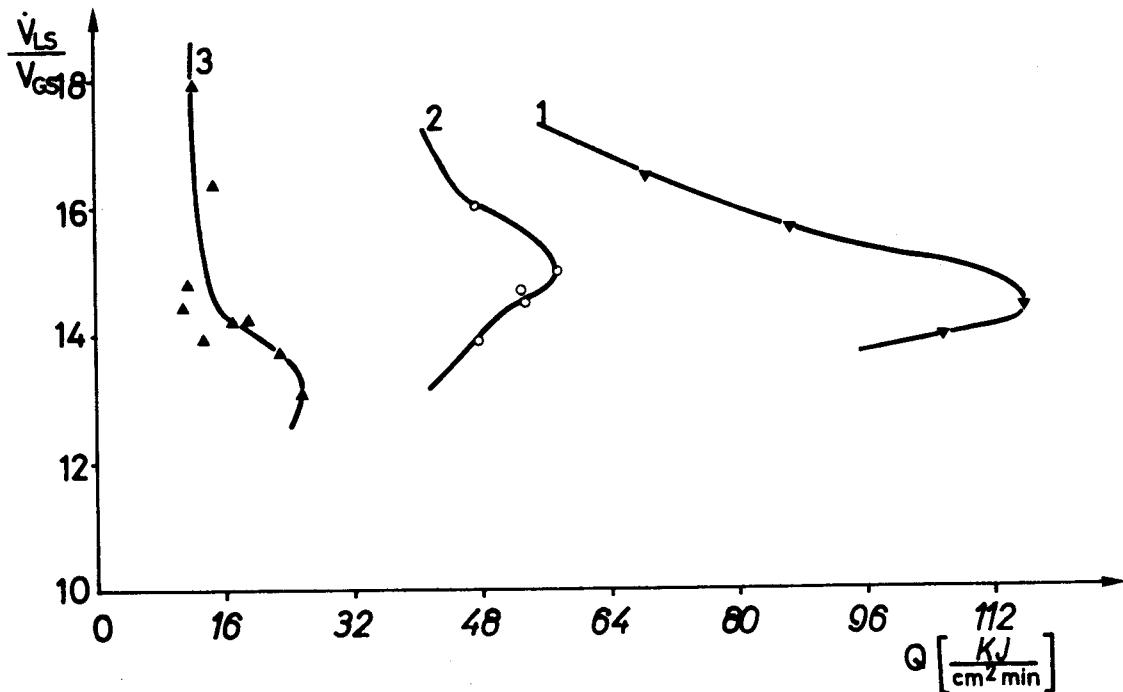
1	0,5	0,85	10,5	12,6	14,82	12,14	potp. uvučen
2	1,8	1,09	15,5	17,8	16,33	15,49	" "
3	2,5	1,25	15,5	17,8	14,24	17,79	" "
4	3,5	1,43	18,0	20,4	14,26	20,30	" "
5	4,8	1,66	20,3	22,8	13,73	23,65	" "
6	6,0	1,89	22,0	24,8	13,12	26,79	" "
7	0,9	0,89	10,2	12,4	13,93	12,98	" "
8	0,8	0,79	9,3	11,4	14,43	11,30	" "
9	1,0	0,93	12,5	16,6	17,92	13,19	" "



Sl. 4.10 Konični stabilizator

$$d_1 = 32,2 \text{ mm}; \quad d_2 = 38,2 \text{ mm}; \quad d_3 = 19,0 \text{ mm}; \quad d_4 = 15,8 \text{ mm}; \quad d_5 = 25,2 \text{ mm};$$

$$L_1 = 20,5 \text{ mm}; \quad L_2 = 44,4 \text{ mm}; \quad L_3 = 12,5 \text{ mm}.$$



Sl. 4.11 Uticaj stabilizatora na granicu uvlačenja plamena (SM)

1. početak uvlačenja, 2. uvlačenje, 3. uvlačenje sa stabilizatorom

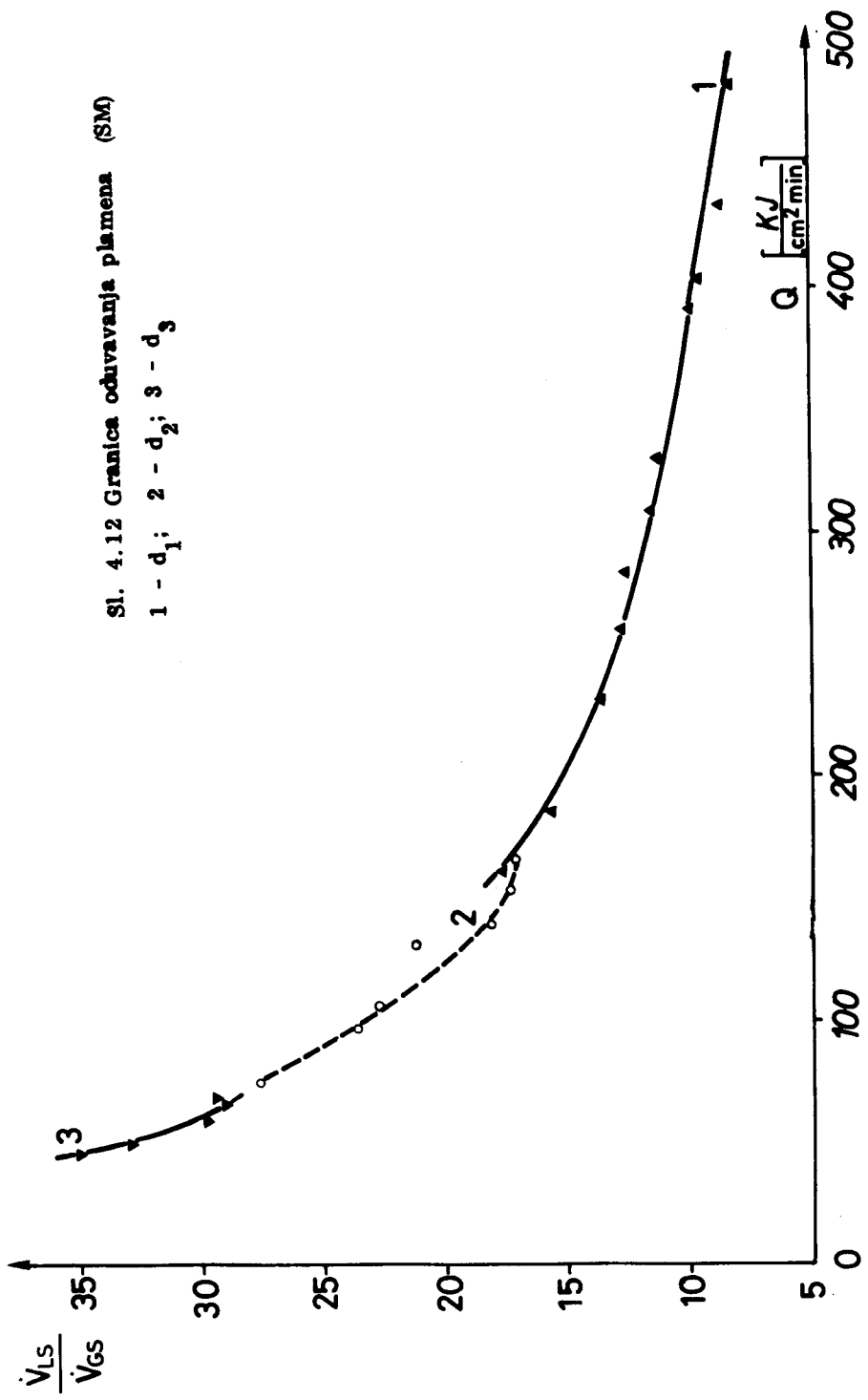
4.4.3 Primer

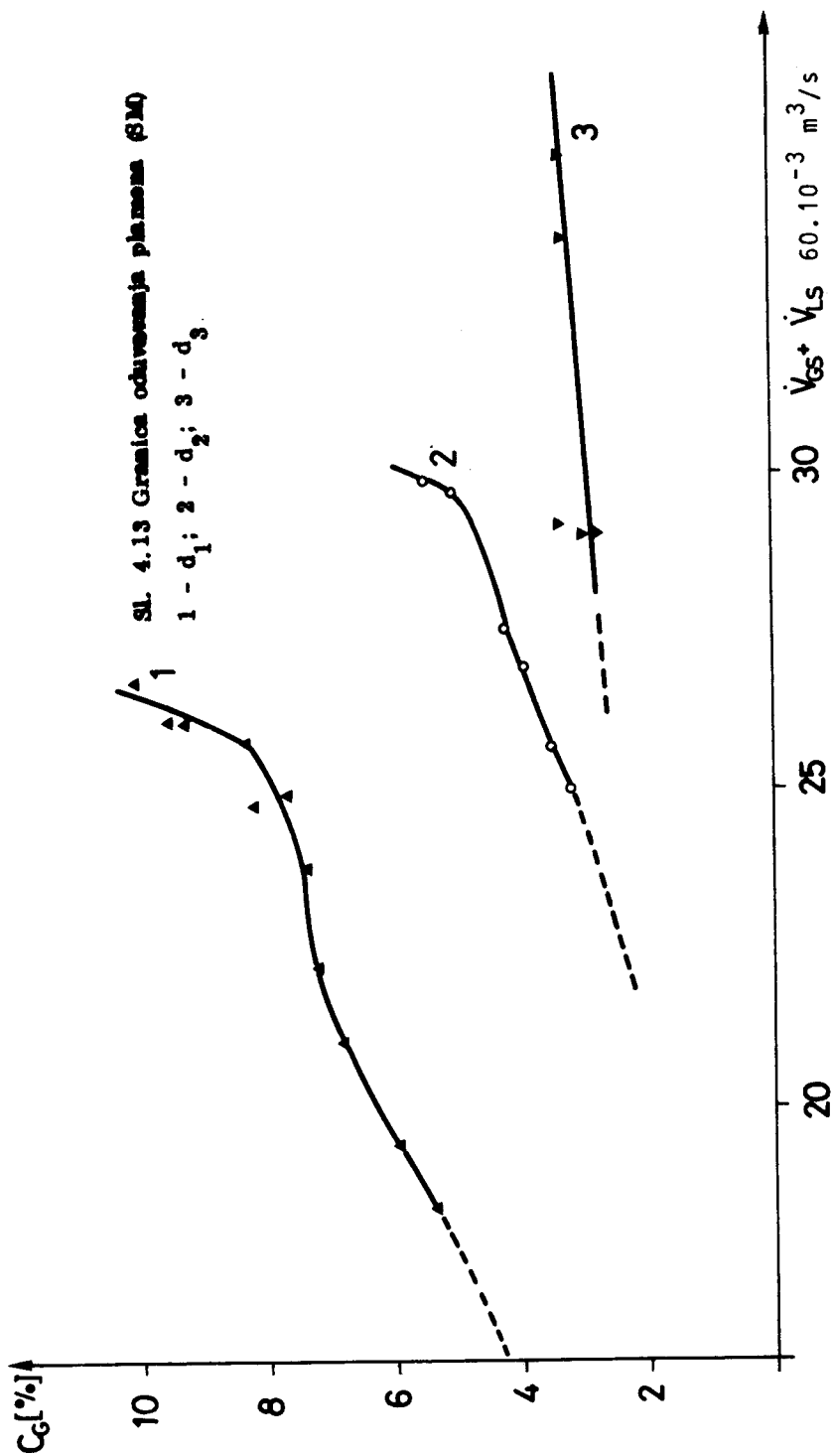
Odrediti granicu stabilnog sagorevanja na oduvavanje plamena smeše propana i butana, za različite prečnike gorionika $d_1 = 9,4$ mm; $d_2 = 12,4$ mm; $d_3 = 15,7$ mm.

Rad

Posle određivanja sastava propana i butana u smeši, izvršena su merenja čiji su rezultati predstavljeni tabelarno i grafički (Tabl. 4.4, Sl. 4.12 i Sl. 4.13).

Sl. 4.12 Granica oduvavanja plamena (SM)
 1 - d_1 ; 2 - d_2 ; 3 - d_3





Tablica 4.4

Broj mere- nje	V_G	\dot{V}_{GS}	V_L	\dot{V}_{LS}	$\dot{V}_{LS}/\dot{V}_{GS}$	Q
			oduv.	oduv.	oduv.	
		$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$		$(\text{kJ}/\text{cm}^2 \text{ min})$	
1.	1,1	0,98	14,6	17,4	17,8	164,93
2.	2,0	1,16	15,8	18,2	15,7	195,49
3.	3,2	1,43	17,4	19,6	13,7	241,53
4.	4,0	1,60	18,0	20,6	12,9	269,58
5.	4,9	1,76	19,5	22,0	12,5	296,37
6.	5,5	1,90	20,2	23,0	11,6	320,23
7.	6,0	2,05	22,3	22,7	11,1	345,35
8.	7,0	2,14	21,0	23,6	11,8	360,41
9.	8,0	2,42	21,0	23,6	9,9	407,72
10.	9,0	2,50	21,0	23,6	9,6	421,11
11.	10,0	2,70	21,2	24,0	8,9	455,02
12.	11,0	3,00	19,6	22,4	8,1	505,67
13.	0,5	0,80	21,3	24,2	27,8	77,44
14.	1,0	0,90	22,0	24,8	27,1	120,56
15.	1,5	1,05	23,0	25,9	23,8	101,72
16.	2,0	1,16	23,2	26,4	22,7	112,18
17.	3,3	1,50	25,0	28,2	18,2	145,25
18.	4,2	1,65	25,0	28,2	17,2	159,49
19.	3,2	1,43	27,0	30,4	21,2	138,56
20.	5,0	1,80	27,5	32,2	17,2	174,14
21.	0,5	0,80	25,0	28,2	35,0	46,05
22.	1,1	0,98	25,0	28,2	29,5	59,44
23.	0,6	0,85	25,0	28,2	33,1	51,49
24.	1,6	1,12	27,8	32,6	29,1	67,81
25.	2,0	1,16	28,5	34,0	29,3	69,91

 d_1 d_2 d_3 4.4.4 Primer

Odrediti granice stabilnog sagorevanja gasovitog goriva dobijenog ga-
zifikacijom uglja. Toplotna moć gasa iznosi H_i (kJ/Nm^3) = 18,63. Prečnik go-
rionika iznosi $d = 9,4$ mm.

R a d

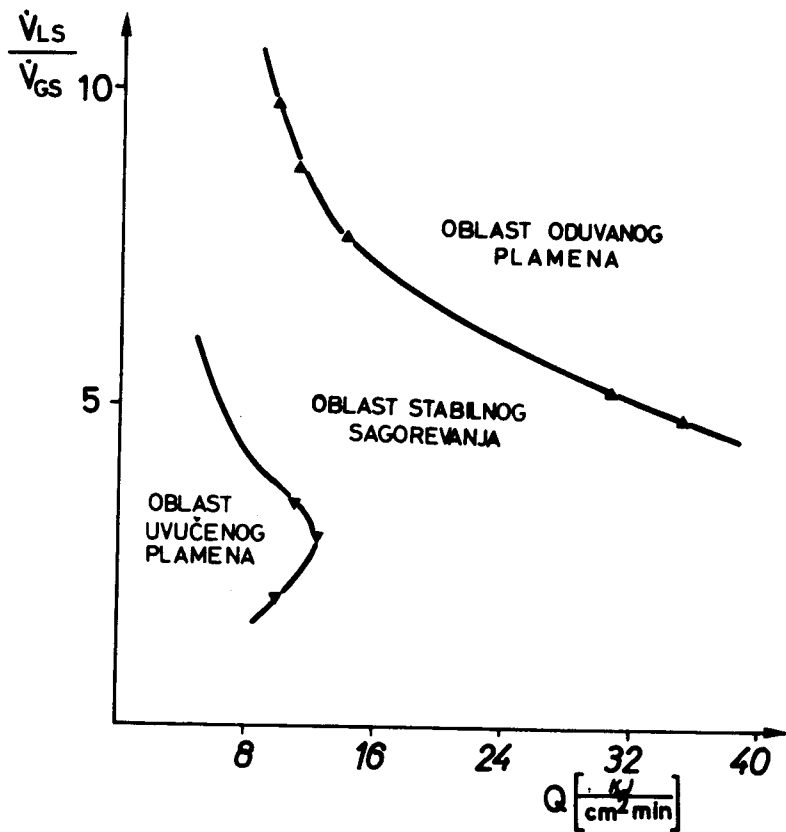
Rezultati ispitivanja predstavljeni su tabelarno i grafički.

Tablica 4.5

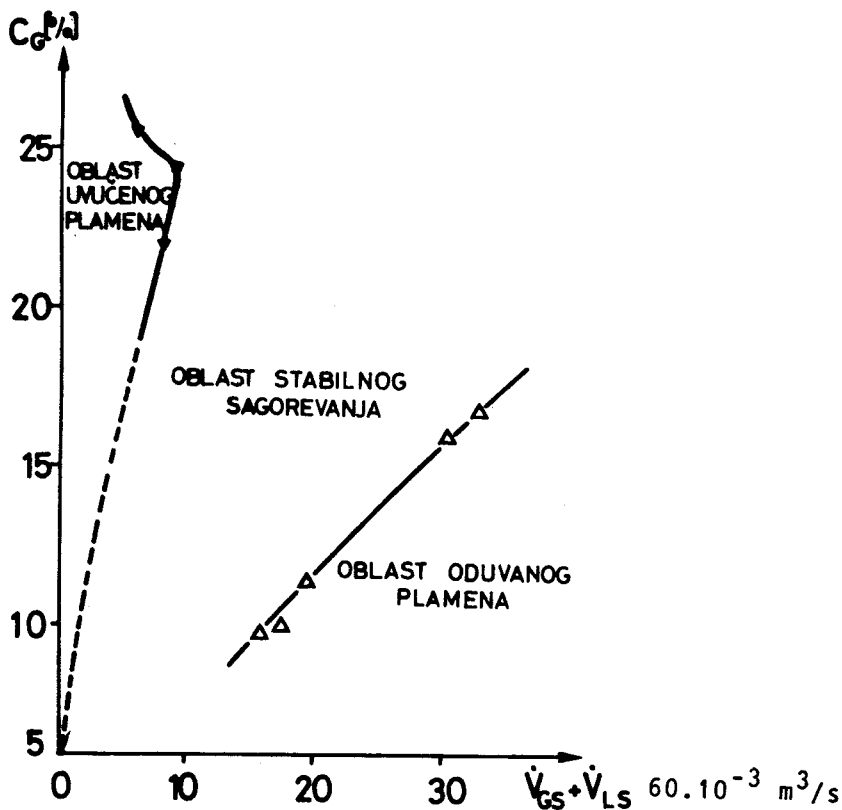
Red. broj	\dot{V}_{Gs}	\dot{V}_{Ls}	$\dot{V}_{Gs} + \dot{V}_{Ls}$	$\frac{\dot{V}_{Gs}}{\dot{V}_{Gs} + \dot{V}_{Ls}} \cdot 100$	$\dot{V}_{Ls} / \dot{V}_{Gs}$	Q	Primedba
	$60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$	m^3/s		(%)	-	$(\frac{\text{kJ}}{2})$	Plamen cm^2/min
1	1,55	14,0	15,55	9,96	9,8	10,26	oduvan
2	1,55	4,5	6,05	25,6	2,9	10,26	uvučen
3	1,75	15,5	17,25	10,13	8,8	11,55	oduvan
4	1,75	6,2	7,95	22,0	3,5	11,55	uvučen
5	2,2	17,0	19,20	11,46	7,7	14,57	oduvan
6	2,2	6,8	9,00	24,45	3,1	14,57	uvučen
7	4,85	25,5	30,35	16,0	5,3	31,90	oduvan
8	5,6	27,5	33,10	16,90	4,9	37,05	oduvan

(U tablicu nisu nošene očitane vrednosti protoka gasa i vazduha, već samo stvarne)

FUIDGE DIJAGRAM



Sl. 4.14



Sl. 4.15

5.1 Prilog I

Koeficijent difuzije

Prenos mase u bilo kojoj sredini uslovljen nejednakošću koncentracije u njoj, a koji nastaje u odsustvu konvekcije, samo na račun toplotnog kretanja molekula, nazivamo difuzijom. Prema Fikovom zakonu difuzioni protok proporcionalan je gradijentu koncentracije:

$$g = -D \frac{dC}{dx}$$

gde su: g - difuzioni protok ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$).

$\frac{dC}{dx}$ - gradijent koncentracije difundujuće materije, a

D - koeficijent difuzije (m^2/s)

Koeficijent proporcionalnosti D naziva se koeficijentom difuzije i predstavlja fizičku konstantu.

Za izračunavanje koeficijenta difuzije na pritisku od 101,3 kPa i temperaturi od 273 K. koristimo empirijski obrazac (13):

$$D_0 = A \frac{\sqrt{\frac{1}{M_G} + \frac{1}{M_L}}}{\left(\sqrt[3]{v_G} + \sqrt[3]{v_L}\right)^2} - B \quad \text{/m}^2\text{/s/}$$

gde su: $v_L = 29,7 \text{ (cm}^3\text{/mol)}$ - molska zapremina vazduha,

v_G - molska zapremina para goriva, koja se izračunava prema obrascu:

$$v_G = 14,8 m + 3,7 n + 21,2 k \text{ (cm}^3\text{/mol)}$$

gde su "m", "n" i "k" odgovarajući brojevi atoma ugljenika, vodonika i kiseonika u molekulu goriva ($C_m H_n O_k$).

A.B. - konstante, koje se dobijaju eksperimentalnim putem

- za ugljovodonične pare $A = 2,7 \cdot 10^{-3}$, $B = 2 \cdot 10^{-6}$

- za CO, CO₂, O₂ pare acetilena (C₂H₂): A = B = 3,2.10⁻³

Koeficijent difuzije gasova i para goriva u vazduh proporcionalan je temperaturi na stepen "m", a obrnuto proporcionalan pritisku sredine u koju gas ili goriva para difunduje:

$$D = D_o \left(\frac{T}{T_o} \right)^m \cdot \frac{p_o}{p}$$

Vrednost eksponenta m iznosi m = 1,5 - 2,0 (u proseku 1,7) (13).

Prema Spalding-u (8) vrednost eksponenta m iznosi za pare date u tablici sa zvezdicom - 1,75, a za ostale - 2,0.

Koeficijenti difuzije gasova na 273 K i 101,3 Pa

Tablica 3.1

Komponenta	gasna smeša	D _o (cm ² /sec)
Ugljenmonoksid	CO u O ₂ *	0,185
Kiseonik	O ₂ u N ₂ *	0,181
Kiseonik	O ₂ u vazduh *	0,178
Ugljendioksid	CO ₂ u vazduh	0,138
Vodonik	H ₂ u vazduh	0,611
Voda	H ₂ O u vazduh*	0,220
Metan	CH ₄ u vazduh	0,196
Etan	C ₂ H ₆ u vazduh	0,108
Propan	C ₃ H ₈ u vazduh	0,0878
Butan	C ₄ H ₁₀ u vazduh	0,0750
Pentan	C ₅ H ₁₂ u vazduh	0,0671
n-oktan	C ₈ H ₁₈ u vazduh	0,0505
Benzol	C ₆ H ₆ u vazduh	0,077
Toluol	C ₇ H ₈ u vazduh	0,051
Naftalin	C ₁₀ H ₈ u vazduh	0,0513
Metilalkohol	CH ₃ OH u vazduh	0,1325
Etilalkohol	C ₂ H ₅ OH u vazduh	0,102

Izračunavanje koeficijenta difuzije mešavine parafinskih ugljovodonika vrši se, prema A.Orlicek-u i H.S.Dornbacher-u, pomoću relacije

$$D = 0,0015 \frac{\sqrt{T^3} \sqrt{14n_1 + 14n_2 + 4}}{p \sqrt{(14n_1 + 2)(14n_2 + 2)} \left[\sqrt[3]{22, 2n_1 + 7, 4} + \sqrt[3]{22, 2n_2 + 7, 4} \right]^2}$$

gde su: T (K) - temperatura

p(MPa - pritisak, (0,1 MPa)

n_1 - broj atoma ugljenika u jednom parafinskom ugljovodoniku,

n_2 - broj atoma ugljenika u drugom parafinskom ugljovodoniku

Na bazi ovog obrasca napravljen je nomogram, kojim se lakše i brže može izračunati koeficijent difuzije na željenoj temperaturi i pritisku .

(Sl. 5.1).

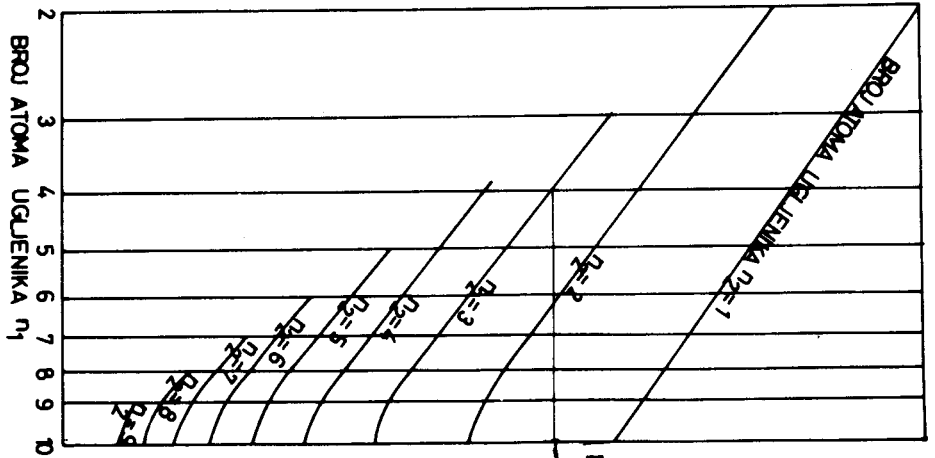
Nomogram se koristi na sledeći način:

Za parafinske ugljovodonike čiji je broj atoma ugljenika n_1 i n_2 na-
 dje se presek (vertikalne prave za n_1 i kose za n_2) na levoj strani nomograma
 i iz preseka povuče horizontalna prava do preseka sa krajnjom vertikalnom pravom
 (Tačka M). Potom se spoje vrednosti pritiska i temperature, za koje se ko-
 eficijent difuzije određuje. Presek ove prave sa referentnom pravom A koristi
 se da se kroz dobijenu tačku N povuče prava (kroz tačke M i N), čiji produžetak
 do preseka sa vertikalnom pravom za koeficijent difuzije određuje traženu vre-
 dnost.

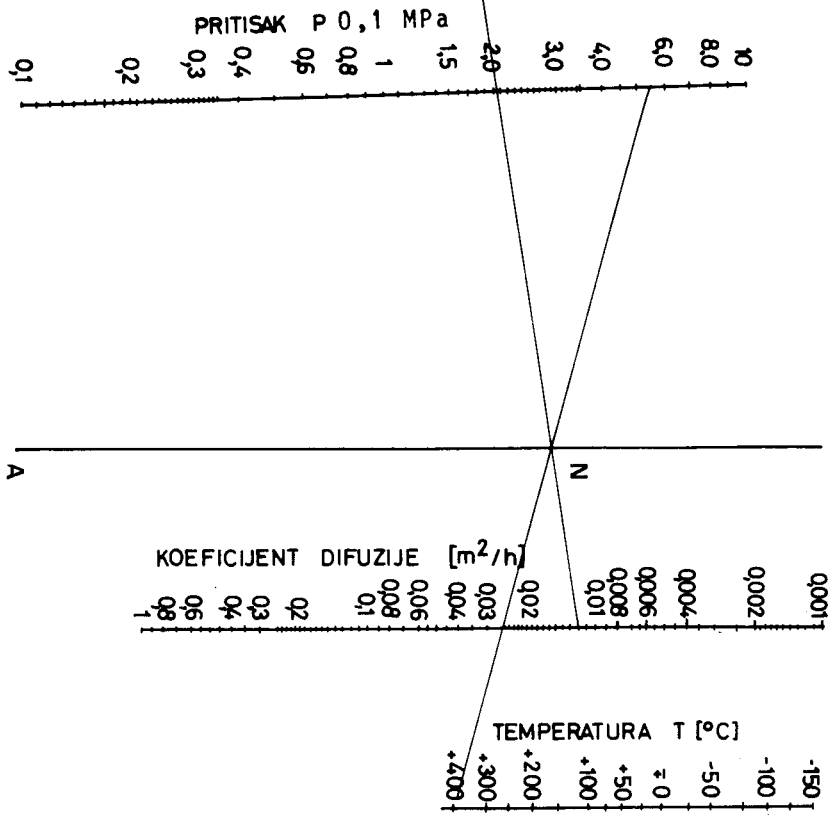
Primer

Odrediti koeficijent difuzije propana i butana na temperaturi od 663 K i pritisku od 0,55 Mpa

Kako se iz nomograma vidi tražena vrednost koeficijenta difuzije iz-
 nosi 0,012 m²/h.



Sl. 5.1



5.2 Prilog II

Merenje protoka rotametrima

Rotometri predstavljaju uređaje kojima se meri protok gasovitih ili tečnih materija. Rotametar se sastoji iz konične cevi unutar koje se pomera plovak. Prednosti rotametara ogledaju se u učevidnosti pokazivanja, mogućnosti merenja malih protoka, znatnom opsegu merenja, stalnosti relativne greške, dovoljno ravnomernoj skali i neznatnim gubicima pritiska. Osnovni elementi rotametara je plovak, klipčić, disk ili krilo, koji prima dinamički pritisak protoka fluida koji ga opstrujava i pomera se u zavisnosti od veličine protoka.

Protok gasovite materije koja se meri vrši se samo u jednom smeru - odozdo naviše, pa je zbog toga neophodno da rotametar bude potpuno vertikalno postavljen. Odstupanja od vertikalnog položaja dovode do dopunskih greški. Pri merenju većih protoka moguće je uključivanje paralelno dva rotametra. I plovak i cev treba održavati čistim, pa je u tom cilju potrebno vršiti periodično čišćenje.

Pri korišćenju rotametara potrebno je, u zavisnosti od gustine i viskoznosti mernog fluida, izvršiti odgovarajuće popravke u odnosu na vrednosti sa kojim je rotametar baždaren i s obzirom na eventualnu promenu plovka.

Ako je rotametar baždaren za merenje protoka gasa, čija je gustina ρ_1 , a neophodno je izmeriti protok gasa druge gustine (ρ_2), onda će stvarni protok, m^3/s , biti:

$$\dot{V}_{ST} = \dot{V}_{iz} \frac{\rho_2}{\rho_1} \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_2) \rho_1}{(\rho_p - \rho_1) \rho_2}}$$

gde su: \dot{V}_{iz} - očitani protok gasa m^3/s

$\rho_1 \rho_2$ - odgovarajući koeficijenti protoka dobijeni pri baždarenju i pri merenju,

ρ_p - gustina materijala plovka, (kg/m^3)

ρ_1 - gustina gasa sa kojim je rotametar baždaren (kg/m^3)

ρ_2 - gustina gasa čiji se protok određuje (kg/m^3)

Pri većoj razlici između gustina plovka i gasa prethodni obrazac može se uprostiti bez suštinskih pogreški, i glasi:

$$\dot{V}_{\text{ST}} = \dot{V}_{\text{iz}} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}$$

Za slučaj kada je protok koga treba izmeriti izvan mernog opsega rotametra, pravi se novi plovak od materijala veće gustine vodeći računa da novi plovak bude po obliku i dimenzijama identičan starom. Preračunavanje protoka sa starim plovkom na protok sa novim plovkom vrši se prema obrascu:

$$\dot{V}' = \dot{V} \sqrt{\frac{G'_p}{G_p}}$$

gde su:

\dot{V} - protok sa starim plovkom m^3/s

G_p - masa starog plovka (kg)

G'_p - masa novog plovka (kg)

5.3 Prilog III

Konzentracione granice paljenja

Gorivo	Ohrenje	Gornja (%)		Donja (%)	
		(13)	(11)	(13)	(11)
Metan	CH ₄	5,0	2,5	15,0	15,4
Etan	C ₂ H ₆	3,0	2,5	12,5	14,95
Propan	C ₃ H ₈	2,2	2,0	9,5	9,5
Butan	C ₄ H ₁₀	1,9	1,55	8,5	8,5
Pentan	C ₅ H ₁₂	1,4	-	7,8	-
Heksan	C ₆ H ₁₄	1,2	-	7,4	-
Heptan	C ₇ H ₁₆	1,1	-	6,7	-
Oktan	C ₈ H ₁₈	1,0	-	-	-
Etilen	C ₂ H ₂	3,1	1,53	32,0	82,0
Propilen	C ₃ H ₆	2,4	-	11,0	-
Butilen	C ₄ H ₈	2,0	-	9,6	-
Metilalkohol	CH ₃ OH	6,7	-	36,0	-
Etilalkohol	C ₂ H ₅ OH	3,3	-	19,0	-
Vodonik	H ₂	4,0	3,4	81,0	80,0
Ugljenmonoksid	CO	12,5	12,5	74,0	80,0

L I T E R A T U R A

1. Gaydon A.G., Wolfhard H.G. "Flames, their structure, radiation and temperature", Chapman - Hall, London, 1960
2. Lewis B., von Elbe G. "Combustion, flame and explosions of gases", ruski prevod, Mir, Moskva, 1968.
3. Hitrin A.N. "Fizika gorenija i vzryva", Moskovskij univerzitet, Moskva, 1957.
4. Lavrov N.V., Šurygin A.P. "Vvedenije v teoriju gorenija i gazifikacii", Akademija nauk SSSR, Moskva, 1962
5. Wojcicki S. "Spalanie", Wydawnictwa naukowotechniczne literatur, Waršawa, 1969.
6. Friestrom R.M., Westenberg A.A "Flame structure", ruski prevod, Metalurgija, Moskva, 1969.
7. Esterkin R.I., Isserlin A.S., Pevzner M.I.
"Metody teplotehničeskij izmerenij i ispitaniy pri sžiganiju gaza", Nedra Leningrad, 1972.
8. Spalding D.B. "Some fundamentals of combustion", ruski prevod, Gos.energ. izdat., Moskva 1959.
9. Belles F.E., Sweet C.C., Dugger G.L., Simon D.M., Gerstein M.,
"Basic considerations in the combustion of hydrocarbon fuels with air", ruski prevod, Izd. inostr. lit., Moskva, 1960.
10. Broeze J.J. "Combustion in piston engines" ruski prevod, Mašinstrojenje, Moskva, 1969.
11. Drašković D., Radovanović M. "Sagorevanje", I deo, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1973.
12. Crescitelli i dr. "Framability limits in flowing gases" La rivista dei combustibili, 6, 1974.
13. Dubovkin N. F. "Spravočnik po ugljevodorodnym toplivai ih produktam sgoranija", Gosenergo- izdat, Leningrad, 1962.
14. "Uputstvo za rad sa univerzalnim gasnim gorionikom", Hilton Ltd.,
15. Orlicek A.F., Sattler-Dornbacher H., "Nomogramm zur Berechnung der Diffusionskonstanten von Parafin-Kohlenstoffe", Erdöl und Kohle, 4, 1955.