

11. predavanje

Predhodno premešani plamen

12. predavanje

Difuzijski plamen

OSNOVNI MEHANIZMI GORENJA

S PLAMENOM (homogeno gorenje v plinski fazi
gorivo in oksidant sta plina)
predhodno premešani plamen
gorljiv plin in zrak sta premešana pred vstopom
v cono zgorevanja
difuzijski plamen
mešanje gorljivega plina z zrakom je postopno
z vrtničasto in/ali molekularno difuzijo

BREZ PLAMENA (heterogeno gorenje;
trdno gorivo in plinast oksidant)
z žarjenjem ali tlenjem
na površini trdnih gorljivih snovi

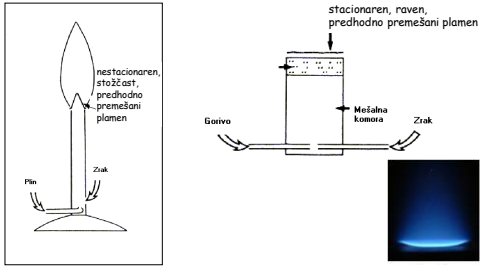
Zakaj so pomembne lastnosti plamena?

poznavanje lastnosti plamena omogoča:

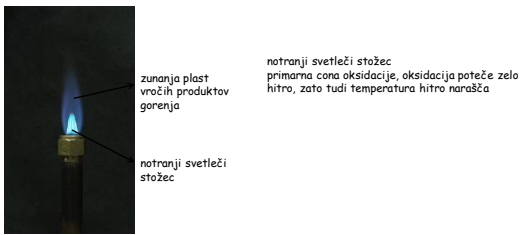
učinkovito izvedbo detekcije požarov
oceno vpliva gorenja na gradbene elemente
oceno nastajanja in širjenja dima
projektiranje ustreznih sistemov za odvajanje toplote in dima

Predhodno premešani plamen

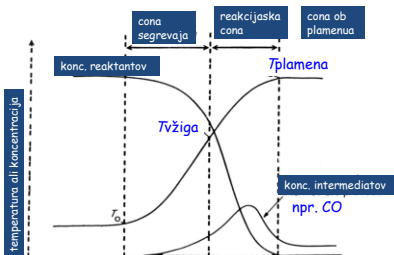
v gorilnikih - najprej mešanje, potem gorenje - ločeni coni



Predhodno premešani plamen - gorilnik



Predhodno premešani plamen



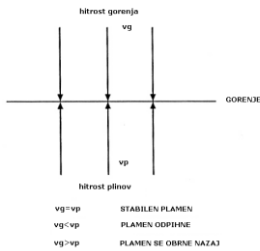
Predhodno premešani plamen

Cona predgretja. Temperatura vnetljive zmesi se od začetne temperature (T_0) dvigne do temperature vžiga (T_V). Temperatura vžiga je temperatura pri kateri se zmes vname in je značilna za posamezni gorljiv plin.

Reakcijska cona. Temperatura naraste od T_V do končne temperature plamena (T_P). V tej coni poteka večina zgorevanja (radikalne reakcije) in je vidni del plamena.

Cona ob plamenu vsebuje končne produkte gorenja. Visoka temperatura plinov z oddaljenostjo pada.

Kdaj je predhodno premešani plamen stabilen?

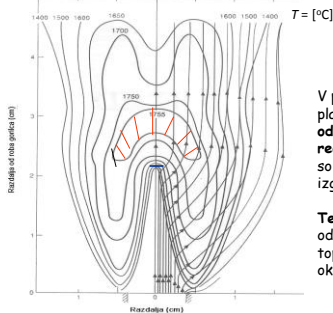


hitrost gorenja = hitrosti oksidacije, ki je odvisna od vrste goriva



Velja za gorenje stacionarnega, ravnega, predhodno premešanega plamena.

Predhodno premešani plamen

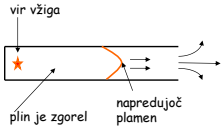


V predhodno premešanem plamenu je hitrost gorenja odvisna od hitrosti kemijske reakcije. Oksidacije pri gorenju so večinoma zelo hitre reakcije, izgube lahko zanemarimo.

Temperatura plamena je odvisna od hitrosti sproščanja toplote in od izgube toplote v okolico.

7,5 vol % zemeljskega plina v zraku

Hitrost gorenja v predhodno premešanem laminarnem plamenu



$$v_{pl} = \frac{v_g A_G}{D}$$

v_{pl} - hitrost plamena je večja od v_g , ker je A_G - površina plamena večja od D (premer cevi)

Osnovna hitrost gorenja (v_g) je hitrost s katero raven zgorevalni val napreduje v mirujočo gorljivo zmes.

v_g je odvisna od: sestave zmesi (plina in koncentracije)

$v_{g,max}$ je največja pri "bogati" mešanici, kjer je koncentracija goriva malo višja od stehiometrične (najbolj reaktivna zmes)

$v_{g,max}$ je merilo za reaktivnost gorljivega plina

$v_{g,max}$

	Lower flammability limit (LFL)		$\frac{L}{C_w}$	Upper flammability limit (UFL)		$\frac{U}{C_w}$	S_L (m/s)	Minimum ignition energy ^a (mJ)	Minimum quenching distance ^b (mm)	
	% Vol	g/m ³		kJ/m ³	% Vol					g/m ³
Hydrogen	4.0 ^c	3.6	435	0.13	75	67	2.5	3.2	0.01	0.5
Carbon monoxide	12.5	157	1591	0.42	74	932	2.5	0.43	—	—
Methane	5.0	36	1906	0.53	15	126	1.6	0.37	0.26	2.0
Ethane	3.0	41	1952	0.53	12.4	190	2.2	0.44	0.24	1.8
Propane	2.1	42	1951	0.52	9.5	210	2.4	0.42	0.25	1.8
n-Butane	1.8	48	2200	0.58	8.4	240	2.7	0.42	0.26	1.8
n-Pentane	1.4	46	2090	0.55	7.8	270	3.1	0.42	0.22	1.8
n-Hexane	1.2	47	2124	0.56	7.4	310	3.4	0.42	0.23	1.8
n-Heptane	1.05	47	2116	0.56	6.7	320	3.6	0.42	0.24	1.8
n-Octane	0.95	49	2199	0.58	—	—	—	—	—	—
n-Nonane	0.85	49	2194	0.58	—	—	—	—	—	—
n-Decane	0.75	48	2145	0.56	5.6	380	4.2	0.40	—	—
Ethene	2.7	35	1654	0.41	36	700	5.5	>0.69	0.12	1.2
Propene	2.4	46	2110	0.54	11	210	2.5	0.48	0.28	—
Butene-1	1.7	44	1998	0.50	9.7	270	2.9	0.48	—	—
Acetylene	2.5	29	1410	—	(100)	—	—	1.7	0.02	—
Methanol	6.7	103	2141	0.55	36	810	2.9	0.52	0.14	1.5
Ethanol	3.3	70	1948	0.50	19	480	2.9	—	—	—
n-Propanol	2.2	60	1874	0.49	14	420	3.2	0.38	—	—
Acetone	2.6	70	2035	0.52	13	390	2.6	0.50	1.1	—
Methyl ethyl ketone	1.9	62	1974	0.52	10	350	2.7	—	—	—
Diethyl ketone	1.6	63	2121	0.55	—	—	—	—	—	—
Benzene	1.3	47	1910	0.48	7.9	300	2.9	0.45	0.22	1.8

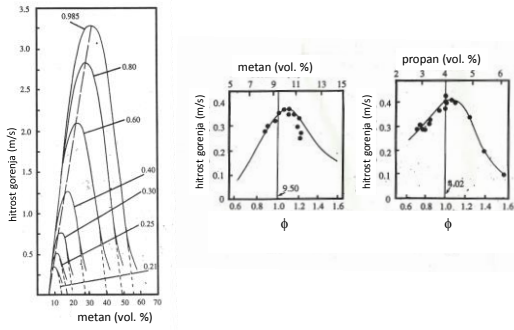
^a Data from Zahradnik (1965). Mass concentration values are approximate and refer to 0°C (L(g/m³) = 0.45 M_gL (vol %)).
^b Data from various sources including Kanury (1975) and Lees (1980). There is uncertainty with some of these data (Lees, Harris, 1983).
 See p. 111.

Hitrost gorenja v predhodno premešanem plamenu

višja temperatura plamena - višja hitrost gorenja

Hitrost gorenja je odvisna od:
 vrste gorljivega plina
 sestave gorljive zmesi (deleža goriva v zraku ali kisiku)
 začetne temperature gorljive zmesi
 tlaka
 stopnje turbulence

Hitrost gorenja $v_{g,max}$ in sestava zmesi



Maksimalna hitrost gorenja v predhodno premešanem plamenu

$v_{g,max}$ maksimalne hitrosti gorenja v laminarnih predhodno premešanih plamenih pri sobni T

gorivo	$v_{g,max}$ (zrak) [cm/s]	$v_{g,max}$ (O_2) [cm/s]
propan*	41	360
eten	68	
acetilen	175	1120
vodik	320	1180

*podobno za vse nasičene C_xH_y

Maksimalna hitrost gorenja v predhodno premešanem plamenu glede na T in P

$v_{g,max}$ maksimalne hitrosti gorenja v laminarnih predhodno premešanih plamenih v temp. intervalu $T = 200 - 600$ K

$v_{g,max} = 0,1 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$ [m/s] velja za nasičene C_xH_y

$\frac{v_{g,max,a}}{v_{g,max,b}} = \left(\frac{P_a}{P_b}\right)^n$ $n = 0,25 - 0,33$ $n = 0,25$; gorenje v O_2 ;
 $n = 0,33$; gorenje v zraku

Toplotne izgube v predhodno premešanem plamenu

Toplotne izgube pri gorenju predhodno premešanega plamena:

prenos toplote s konvekcijo

(prevladujejo pri gorenju v cevi)

toplotno sevanje

(zanemarljive pri gorenju v cevi, pomembne v odprtem prostoru, če plamen ni v stiku s trdno površino) posredne

prevajanje v cono ob plamenu in sevanje plinastih produktov gorenja in direktne, sevanje iz reakcijske cone v manjši meri, ozka r. cona in nizka konc. sevajočih delcev (zelo malo saj, CO_2 in H_2O)

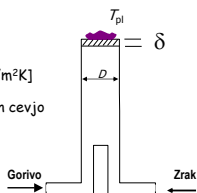
Toplotne izgube v predhodno premešanem plamenu

toplotne izgube zaradi konvekcije

$$\dot{Q} = h(T_{pl} - T_0) \frac{\pi D \delta}{\pi D^2 / 4}$$

h - koeficient toplotne prestopnosti [W/m^2K]

$\pi D \delta$ - stična površina med plamenom in cevjo



Razdalja ohladitve v predhodno premešanem plamenu

Sposobnost plamena, da napreduje po ozki cevi, je odvisna od toplotnih izgub na steno.

Ko se toplotne izgube izenačijo s hitrostjo sproščanja toplote, plamen ne more napredovati po zmesi.

Če premer cevi zmanjšamo na premer ohladitve ali na razdaljo ohladitve, plamen ne more napredovati niti po najbolj reaktivni zmesi.

Razdalja ohladitve je tista maksimalna razdalja, ki še **onemogoča** širjenje plamena po kakršnikoli mešanici goriva in oksidanta.

Razdalja ohladitve v predhodno pomešanem plamenu

Reaktanti	d_0 (mm)	Reaktanti	d_0 (mm)
H_2+O_2	0,2	H_2+zrak	0,6
CH_4+O_2	0,3	CH_4+zrak	2,5
$C_2H_2+O_2$	0,2	C_2H_2+zrak	0,5
$C_2H_4+O_2$	0,1	C_2H_4+zrak	1,25
$C_3H_8+O_2$	0,25	C_3H_8+zrak	2,1
		C_6H_6+zrak	2,6
		$C_8H_{18}+zrak$	1,9

Ohladitvene razdalje za gorljive zmesi v stehiometričnem razmerju pri 101 kPa in 293K.

Vprašanja

Kako se v posamezni coni predhodno pomešanega plamena spreminjata temperatura in koncentracija reaktantov in ogljikovega oksida (CO)?

Kakšna je hitrost plina v stabilnem predhodno pomešanem plamenu?

Kako je definirana osnovna hitrost gorenja v laminarnem predhodno pomešanem plamenu? Od česa je odvisna; v katerem primeru je največja? Kaj lahko sklepamo po primerjavi osnovnih hitrosti gorenja različnih snovi?

Razložite toplotne izgube pri gorenju predhodno pomešanega plamena.

Kaj vpliva na toplotne izgube zaradi konvekcije v predhodno pomešanem plamenu? Razložite pojem razdalja ohladitve.

Difuzijski plamen

Difuzijski plamen

mešanje goriva in zraka (vzgon ali zagonski moment)

laminaren ali turbulenten plamen

Froudovo število

brezdimenzijska hitrost sproščanja toplote

povprečna višina plamena

frekvenca utripanja plamena

višina vzgonskega difuzijskega plamena

področja vzgonskega difuzijskega plamena

hitrost, masni vzgonski tok in T_v plamenu

Iz difuzijskega v predhodno premešani plamen

Pri Bunsnovem gorilniku je vrsta plamena odvisna od dotoka kisika.

1 - zaprt dotok zraka, difuzijski plamen (saje - rumen plamen)

4 - odprt dotok zraka, predhodno premešani plamen (višja T , ni saj)



Difuzijski plamen

V procesu gorenja poteka transport (difuzija) snovi iz nasprotnih strani reakcijske cone (plamena).

Difuzija - transport snovi iz področja z višjo koncentracijo v področje z nižjo koncentracijo.



Difuzijski plamen

v požarih prevladuje difuzijski plamen

razmerje gorivo/ oksidant je v difuzijskem plamenu lokalno različno

v vročem modrem plamenu je revna mešanica

v rumenem plamenu je bogata mešanica

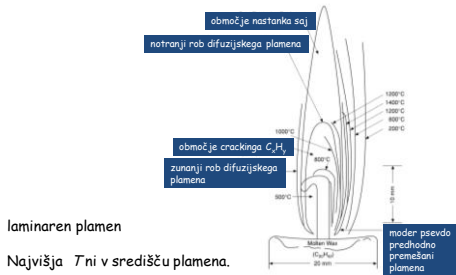
Difuzijski plamen

Gorivo in oksidant sta ločena,
gorenje poteka na mestu,
kjer se mešata.

Hitrost gorenja v difuzijskem plamenu
je odvisna od hitrosti mešanja plinov,
ne od hitrosti oksidacije.

Večinoma
hitrost oksidacije > hitrosti mešanja plinov

Sveča gori z difuzijskim plamenom



Mešanje zraka in goriva v difuzijskem plamenu

mešanja goriva in oksidanta poteka v plamenu
po dveh mehanizmih

"jet" (goreči curek):
mešanje zaradi začetnega zagonskega momenta goriva
primer - gorenje plina, ki izhaja iz cevi

vzgonski plamen:
mešanje zaradi vzgona
gorivo nima izrazitega zagonskega momenta,
primer - gorenje trdnih snovi in tekočin

Difuzijski plamen

Laminaren

- Pri velikosti površine gorljive snovi pod $\phi < 5\text{cm}$ → plamen je laminaren ($Re < 2000$)



Turbulenten

- Stopnja turbulence narašča s premerom
- plamena, $\phi > 30\text{cm}$
- plamen je turbulenten ($Re \gg 2000$)



V požaru prevladuje vzgonski, difuzijski, turbulenten plamen

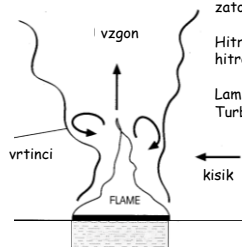
Difuzijski plamen - vzgonski

Gorivo in oksidant sta ločena, gorenje poteka na mestu, kjer se mešata.

Vroči produkti gorenja se dvigujejo, zato v plamen vstopa hladen zrak.

Hitrost prehajanja zraka v plamen določa hitrost gorenja in višino plamena.

Laminarni plamen - višina je skoraj konstantna.
Turbulentni plamen utripa, višina ni konstantna.



Višina difuzijskega "jet" laminarnega plamena

Višina laminarnega plamena - h

$$h = f(\dot{V})$$

je premosorazmerna volumskemu pretoku plina

Reynoldsovo število $Re < 2000$

Difuzijski "jet" plamen - turbulenten

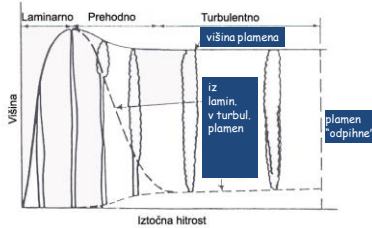
prehod iz laminarnega v turbulenten plamen:
 $Re \gg 2000$.

turbulenten plamen v primerjavi z laminarnim ni urejen, je nižji, izgorevanje je učinkovitejše, manj saj, manj izgub zaradi sevanja, višina plamena ni odvisna od volumnskega pretoka, a je premosorazmerna premeru curka plina

$$h \neq f(\dot{V})$$

$$h = f(D, T_{plamen})$$

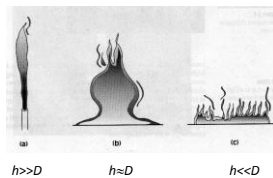
Iz laminarnega v turbulenten "jet" plamen



Oblike difuzijskega plamena razmerje h/D

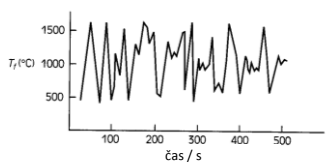
Vzgon je sorazmeren sili na fluid, ki deluje zaradi razlike v gostoti ali temperaturi.

- a) "jet" plamen - vzgon ne vpliva na obliko
- b) gorenje razlite tekočine („pool“) - velik vpliv vzgona
- c) gozdni požar - zrak iz zgornje strani



T_v difuzijskem, turbulentnem plamenu

Primer povprežna T je 900°C, a T na istem mestu se s časom spreminja



Difuzijski plamen

"jet" ali vzgonski plamen?

merilo je Froudeovo število - Fr

"jet" - visok Fr , vzgon - nizek Fr

Fr je razmerje med zagonskim momentom in gravitacijo oz. vzgonom

Froudeovo število - Fr

$$Fr = \frac{v^2}{gD}$$

$$\dot{Q} = \Delta H_c \dot{m}_g \quad \dot{m}_g = \rho_f A_D v; \quad A_D = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$\dot{Q} = \Delta H_c \rho_f v \frac{\pi}{4} D^2$$

$$v = \frac{\dot{Q}}{\rho_f \left(\frac{\pi}{4} D^2\right) \Delta H_c}$$

Froudeovo število - Fr

$$v \sim \frac{\dot{Q}}{D^2}$$

$$Fr = \frac{v^2}{gD} \sim \frac{\dot{Q}^2}{D^5}$$

Froudeovo število - Fr

$$Fr \sim \frac{\dot{Q}^2}{D^5}$$

\dot{Q} konstanten

D zelo majhen - visok pretok plina, visok Fr , "jet" plamen
 $h(\text{plamena}) \gg D$

D zelo velik - nizek pretok plina, nizek Fr , vzgonski plamen
 $h(\text{plamena}) \sim D$
 primer - gorenje oblaženjenega pohištva, razlize tekočine

Višina plamena

Številni preskusi kažejo, da je višina plamena odvisna od hitrosti sproščanja toplote in premera plamena.

Pri računanju višine plamena je smiselno uporabiti

brezdimenzijsko hitrost sproščanja toplote \dot{Q}^*

Višina difuzijskega plamena in \dot{Q}^*

Pri izračunu višine plamena je pomembno modificirano Froudeovo število \dot{Q}^* (izraženo s količino toplote, ki se sprošča pri gorenju!!!)

$$\dot{Q}^* = \sqrt{Fr} \sim \frac{\dot{Q}}{D^{5/2}} \quad \dot{Q}^* \text{ -brezdimenzijska hitrost sproščanja toplote}$$

$\dot{Q}^* \sim 10^3$ "jet"; $\dot{Q}^* \sim 1$ za vzgonski plamen

Difuzijski plamen in \dot{Q}^*

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g D D^2}} \quad \dot{Q}^* \text{ -brezdimenzijska spremenljivka uporabna za izračun višine plamena}$$

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{1110 D^{3/2}} \quad \dot{Q} \text{ hitrost sproščanja toplote [kW]}$$

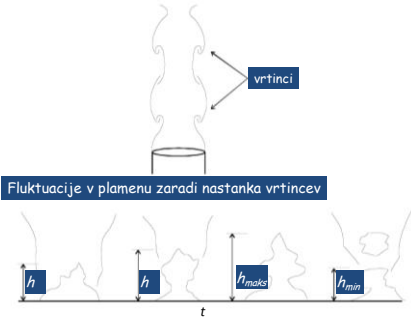
D - premer [m]
 c_p [kJ/kg K]
 T_∞ [K]
 g - gravitacija [m/s²]
 ρ_∞ [kg/m³]

\dot{Q}^*

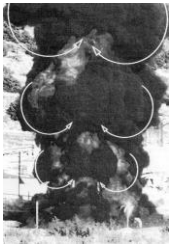
red velikosti 0,36 - 1,7

material	\dot{m}'' [g/s m ²]	ΔH [MJ/kg]	\dot{Q}'' [kW/m ²]	\dot{Q}^*
polistiren	8,3	42	330	0,3
les (14% vlaga)	14	14	180	0,16
deske na prostem	110	14	1450	1,3
bencin	44-53	42	1700-2000	1,7
nafta	20,5	32	620	0,6
(D = 1 m)				
PU mehka pena			420-510	0,36
PU trda pena			280-440	0,20
PE			960	0,67
PP			890	0,61

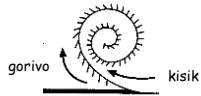
Oblika in višina vzgonskega plamena



Vrtinčenje v plamenu



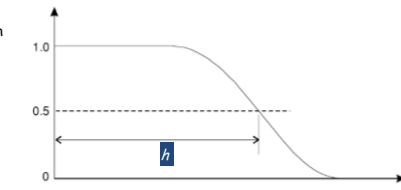
Goreči vrtinci se dvigujejo.



Povprečna višina plamena

I - intermitenca
 $I = 1$: gori neprekinjeno
 $I = 0,5$: plamen prisoten polovico časa

h - višina plamena



Oblika in višina vzgonskega plamena

1/30s 2/30s 3/30s 4/30s 5/30s 6/30s 7/30s
8/30s 9/30s

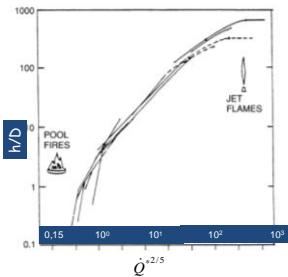
$$v = (0,50 \pm 0,04)(g / D)^{1/2} \text{ Hz}$$

Pagnijeva korelacija: ($D = 0,3 \text{ m}$)
3 Hz (3 utrip/s); en utrip 0,33 s

Lastnosti plamena

- Oblika plamena (osnosimetrični, ob steni, linijski, ...)
- Geometrija plamena - h/D
- Hitrost plinov v plamenu
- Masni tok v vzgorskem difuzijskem plamenu (produkti gorenja in zrak)
- Temperatura v plamenu in vzgorskem toku

\dot{Q}^* in geometrija plamena



Višina vzgonskega plamena - enačbe iz preskusov

poskus	\dot{Q}^*	h/D	opombe
Zukoski, zemeljski plin $D = 10-50$ cm	$\dot{Q}^* < 0,15$ $0,15 < \dot{Q}^* < 1$ $1 < \dot{Q}^* < 40$	$40 \cdot \dot{Q}^{*2}$ $3,3 \cdot \dot{Q}^{*2,3}$ $3,3 \cdot \dot{Q}^{*2,5}$	
Cox, Chitty zemeljski plin 45×60 cm	$0,13 < \dot{Q}^* < 0,28$ $0,28 < \dot{Q}^* < 0,55$	$15,1 \cdot \dot{Q}^{*2}$ $3,2 \cdot \dot{Q}^*$	
Thomas lesena polena stranica $10-200$ cm	$0,75 < \dot{Q}^* < 8,8$	$3,4 \cdot \dot{Q}^{*0,61}$	les $\Delta H = 18600$ kJ/kg
Heskestad plini, tekočine, trdno	$0,12 < \dot{Q}^* < 1,2 \times 10^4$	$3,7 \cdot \dot{Q}^{*2,5} - 1,02$	$\Delta H = 3185$ kJ/kg zraka
Steward plini - jet	$1 < \dot{Q}^* < 1 \times 10^4$	$4,16 \cdot \dot{Q}^{*2,5}$	

Višina vzgonskega plamena

V nadaljevanju obravnavamo plamen, ki nastane pri gorenju razlize tekočine (nastane „bazen“ goriva (pool fire)).

Glede na položaj v prostoru ločimo več vrst vzgonskega plamena:

plamen, ki je simetričen glede na središčnico,
(prosto gori, na plamen ne vpliva strop in stene)

plamen v kotu,

plamen ob zidu,

Višina vzgonskega plamena

Izračuni višine plamena - glede na vrsto plamena različni: osnosimetrični plamen (Heskestad)

Območje veljavnosti $7 < \dot{Q}^{2,5}/D < 700$ kW^{2/5}/m
Ne velja, če je: $h/D < 1$



$$h = 3,7 \dot{Q}^{*2,5} D - 1,02 D$$

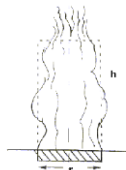
$$h = 0,235 \dot{Q}^{*2,5} - 1,02 D$$

h - povprečna višina plamena (m)

D - premer osnove (m)

\dot{Q} - hitrost sproščanja toplote kW

\dot{Q}^* - brezdimenzijsko število



Višina vzgonskega plamena

plamen s podnožjem v obliki bazena, ob steni (Hasemi)

$\dot{Q}_1 = \dot{Q} / D$ sproščena toplota na dolžino požara



$$\dot{Q}_1^* = \frac{\dot{Q}_1}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g} D^{3/2}}$$

$$h = 2,8 \dot{Q}_1^{*2/3} D \text{ (neprek. plamen)}$$

$$h = 6,0 \dot{Q}_1^{*2/3} D \text{ (vrh plamena)}$$

$$h = 4,2 \dot{Q}_1^{*2/3} D \text{ (vidni plamen)}$$

neprekinjen plamen: plameni prisotni 100% časa, vidni plamen 50% časa

Povzetek: Fr in geometrija plamena

Fr	nizek	srednji	visok
plamen	vzgonski	prevladuje vzgon	„jet“
premer, D	velik	majhen	majhen
hitrost, v	majhna	srednja	velika
geometrija	$h = D$		$h \gg D$

Vprašanja

Naštejte in razložite razlike med predhodno premešanim plamenom in difuzijskim plamenom.

Kaj omogoča mešanje zraka z gorivom v difuzijskem plamenu?

Kaj opazimo pri prehodu difuzijskega jet plamena iz laminarnega v turbulenten plamen? (oblika plamena, višina plamena, Fr , Q^*)

Kateri spremenljivki določata Fr , kaj lahko sklepamo iz visokega oz. nizkega Fr ?

Kateri veličini je sorazmerna višina plamena v difuzijskem laminarnem in turbulentnem jet plamenu in v vzgonskem plamenu?

Opišite značilnosti osnosimetričnega vzgonskega plamena.

Naloge

- izračun višine vzgonskega difuzijskega plamena
