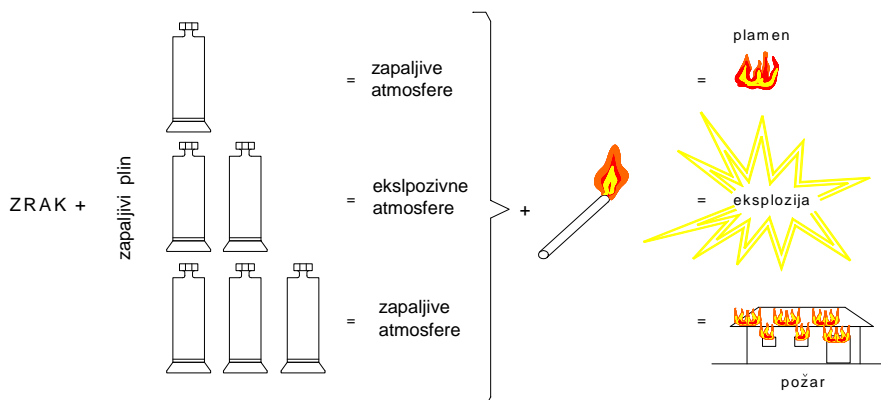


PROTUEKSPLOZIJSKA ZAŠTITA ELEKTRIČNIH UREĐAJA

protueksplozijska izvedba omogućuje korištenje električnih uređaja u eksplozivnoj atmosferi

zapaljivi medij + zrak (kisik) u stanovitom omjeru = eksplozivna atmosfera



Opasnost od požara i eksplozije

u rudnicima zapaljivi plin (pretežno metan) i ugljena prašina
eksplozija metana → uzvrtlavanje ugljene prašine → eksplozija ugljene prašine
u naftnom rudarstvu zapaljivi plinovi, i pare zapaljivih tekućina

područja PEX zaštite $\left\{ \begin{array}{l} \text{I. podzemni rudnici} \\ \text{II. sva ostala mjesta (industrija)} \end{array} \right.$

u rudnicima - zemni plin (metan),
ugljena prašina,
mehanička oštećenja,
vlaga,
direktni kontakt s uređajima

na ostalim mjestima - plinovi - svi osim inertnih
prašine - metalne, ugljene, brašna, puderi, plastičnih materijala,
pare - zapaljivih tekućina
mehanička oštećenja
vlaga
kontakt s uređajima

za opremu postoje, na državnoj i međunarodnoj razini $\left\{ \begin{array}{l} \text{konstrukcijski propisi i standardi} \\ \text{instalacijski propisi} \\ \text{propisi za održavanje} \end{array} \right.$

Zapaljive i eksplozivne atmosfere

zapaljive - gorivi medij + zrak (kisik) eksplozivne - (gorivi medij + zrak) u stanovitom omjeru

PROCESI GORENJA

Proces gorenja	Brzina širenja plamena (m/s)	Tlak (bara)	
Buktanje	do 2	—	BUKTANJE - trenutno izgaranje na rubnim granicama eksplozivnosti
Eksplozija	0,5—30	4—10	EKSPLOZIJA - trenutno izgaranje unutar granica eksplozivnosti lančanom reakcijom gorenja
Detonacija	1 000—4 000	10—60	DETONACIJA - trenutno izgaranje uz veliko povećanje tlaka i koncentracije medija

Eksplozivne atmosfere

agregatna stanja zapaljivog medija - plin, para, prašina

eksplozivna atmosfera samo ako

- određeni volumenski omjeri (koncentracija)
- tlak
- temperatura

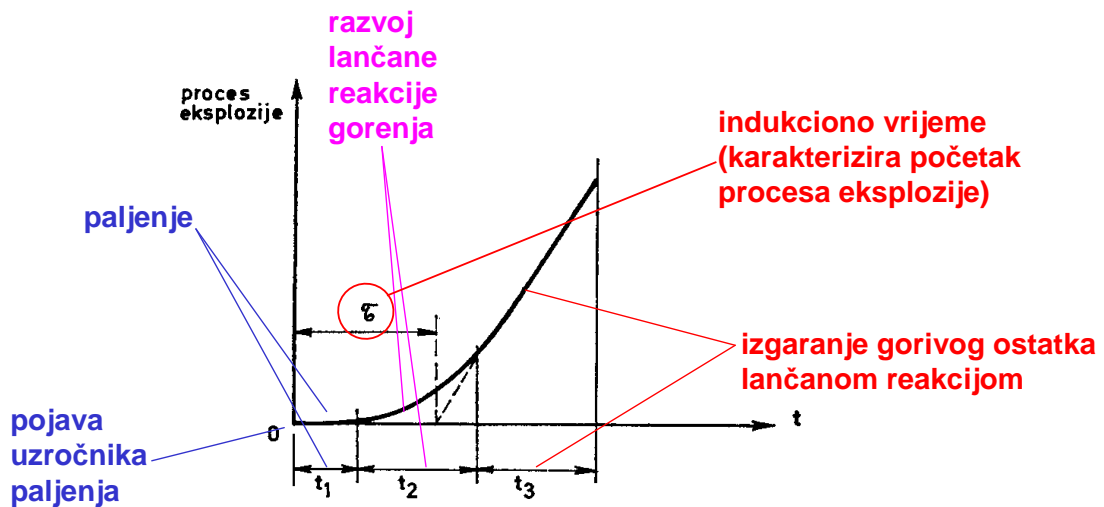
eksplozija samo ako

- postoji eksplozivna atmosfera
- dostatna temperatura uzročnika (nužno)
- dostatna energija uzročnika

EKSPLOZIJA POD ATMOSFERSKIM UVJETIMA

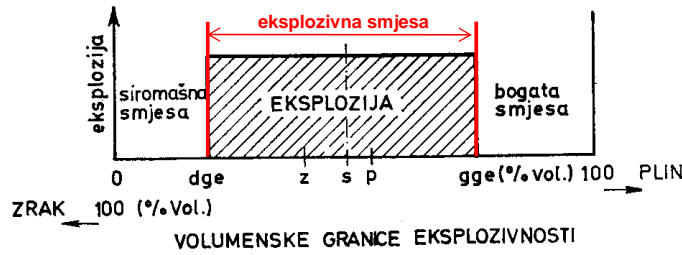
temperatura : - 25 do + 40 °C

tlak: oko 1013 hPa



vremenski tok procesa eksplozije eksplozivne atmosfere

granice eksplozivnosti :
 dge - % (vol.) koncentracije plina u zraku
 gge - % (vol.) koncentracije plina u zraku



- z - koncentracija minimalne energije paljenja
- p - koncentracija maksimalnog tlaka eksplozije
- s - stehiometrijska smjesa (izgaranje bez ostatka : zap. medija i kisika)

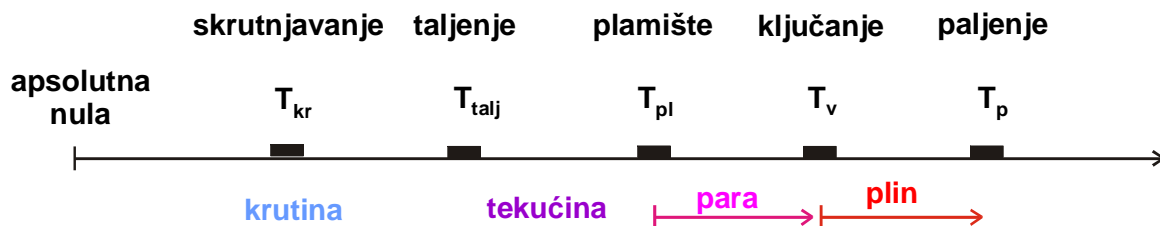
Volumenske koncentracije eksplozivnosti

uzročnik inicijalnog paljenja

- temperaturu \uparrow od min. temperature paljenja smjese (prije ko potreban uvjet)
- energiju $>$ od min. energije paljenja smjese

za paljenje eksplozije **uzročnik** mora imati toplinsku **energiju** dostatnu za **održavanje** potrebnog **toplinskog intenziteta duže od inducionog vremena**

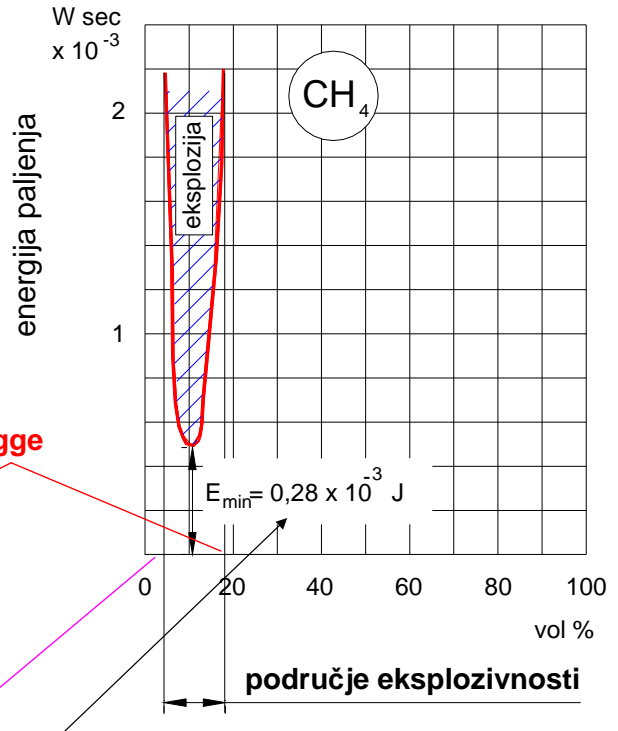
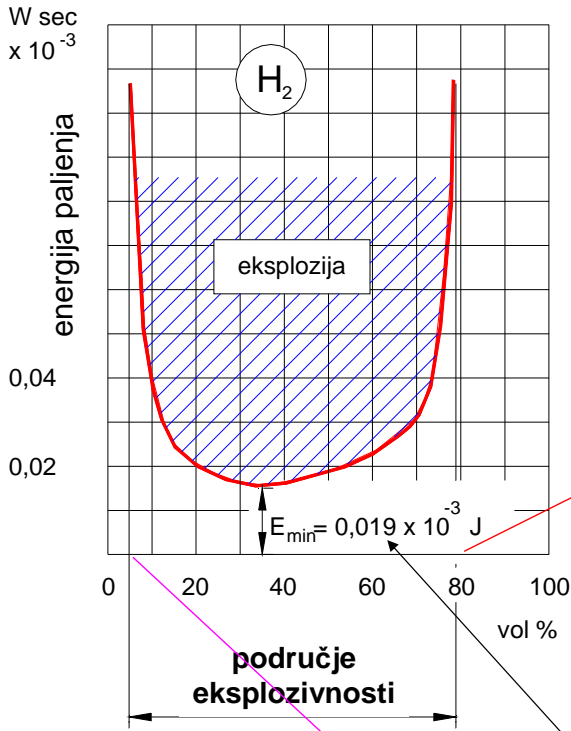
temperature i agregatna stanja zapaljive materije



Eksplozivne atmosfere zraka i plina

do eksplozije dolazi samo ako je $T_u \uparrow$ od T_p $E_u > E_{pmin}$

- T_u - temperatura uzročnika paljenja
- T_p - temperatura paljenja atmosfere
- E_u - energija uzročnika paljenja
- E_p - minimalna energija paljenja atmosfere

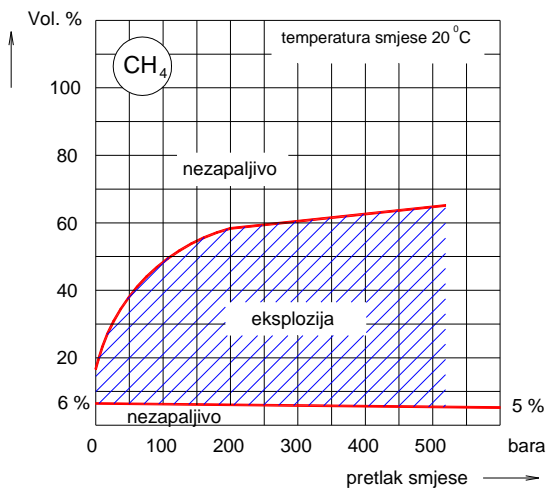


gge

dge

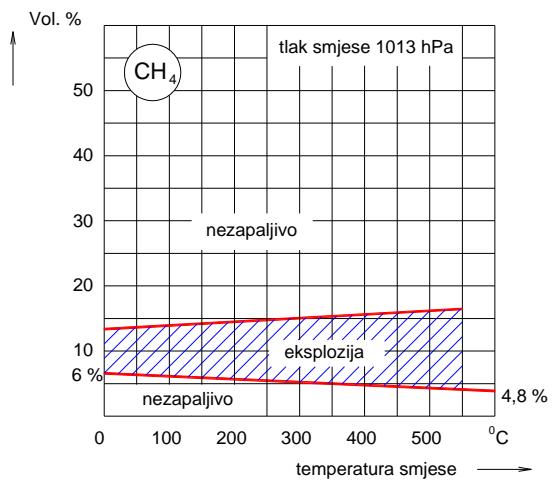
1:15

tlak
povećava razmak između dge i gge
(izrazito povisuju gge)



Ovisnost granica eksplozivnosti zemnog plina o tlaku smjese

temperatura
povećava razmak između dge i gge
(izrazitije povisuju gge)



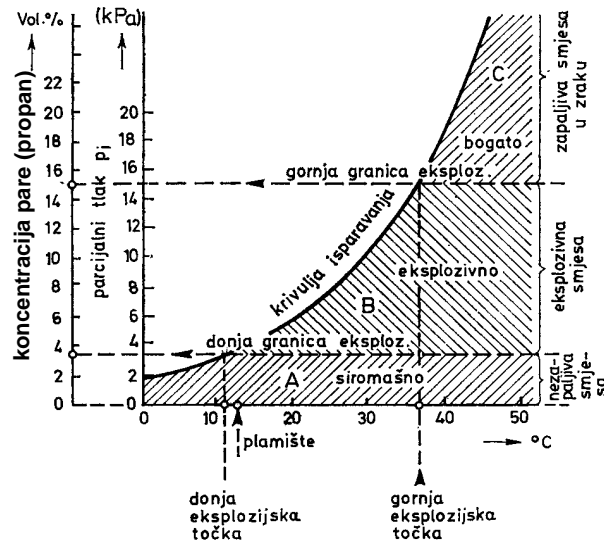
Ovisnost granica eksplozivnosti zemnog plina o temperaturi smjese

Eksplzivne atmosfere para zapaljivih tekućina

tekućine - mediji u tekućem stanju unutar 0,85 bar do 1,1 bar
-20 °C do +40 °C

za $T \downarrow$ od T_{pl} nema isparavanja nema eksplozivne atmosfere

za $T \uparrow$ ili $= T_{pl}$ isparavanje (ovisno o parcijalnom tlaku) \Rightarrow eksplozivna atmosfera



Granice i točke eksplozivnosti para zapaljivih tekućina

pri normalnim atmosferskim prilikama isparavaju \Rightarrow mogu stvoriti ekspl. atmos. (EA)

KLASIFIKACIJA ZAPALJIVIH TEKUĆINA

Hrvatski propisi °C		VDE (njemački) °C		UTE (francuski) °C		BS (britanski) °C	NFPA (USA) °C	
I	< 38 *	I	< 21	A	≤ 15 (**)	< 32	I	< 38 (***)
II	38 - 55	II	21—55	B	< 55	32—66	II	< 60
III	> 55	III	> 55	C	≥ 55	> 66	III	< 93
				D	< 100			

(*) Dijeli se u tri podgrupe: I.1. < 23 s vrelištem < 38, I.2. vrelište > 38 I.3. plamnište > 23

(**) Grupa nije određena plamništem, već tlakom isparavanja većim od 1 bara.

(***) Class I se dijeli na IA i IB < 23°C i IC ≥ 23°C

pri normalnim atmosferskim prilikama ne isparavaju \Rightarrow izuzetno stvaraju EA

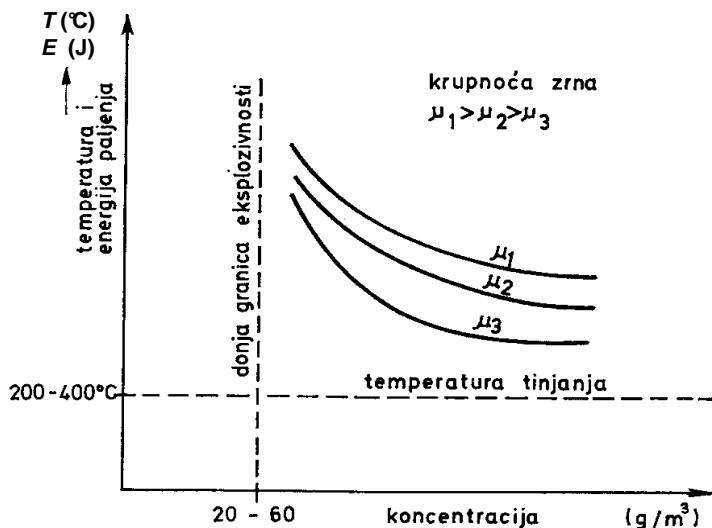
samo zagrijana tekućina na temperaturu iznad T_{pl} isparavaju \Rightarrow stvaraju EA

Eksplzivne atmosfere uzvitlane prašine i zraka

uzvitlane zapaljive prašine - kao pare zapaljivih tekućina

nataložena prašina (latentna opasnost) - tinjanje (temperatura tinjanja) uzvitlavanje prašine

tri grupe prašina: metalne, organskog porijekla i ugljene



paljenje tinjanjem pri temperaturi

$$T \uparrow \text{ od } T_{ti}$$

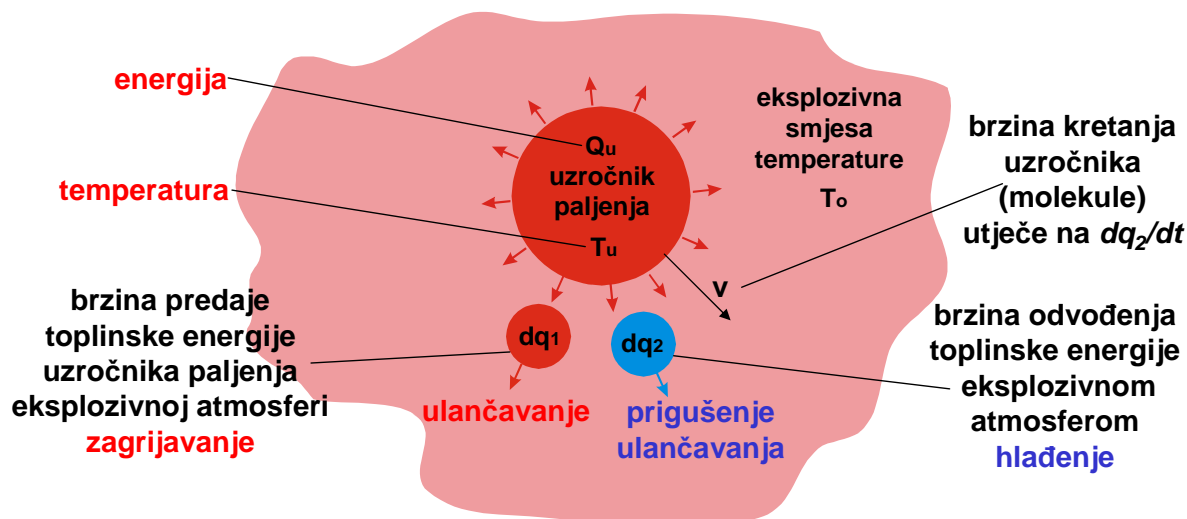
T_{ti} - temperatura tinjanja

T_{ti} - temperatura zagrijane vodoravne površine pri kojoj nastaje samozapaljenje 5 mm nataloženog sloja prašine

Granice eksplozivnosti zapaljivih prašina

Fizikalna svojstva eksplozije

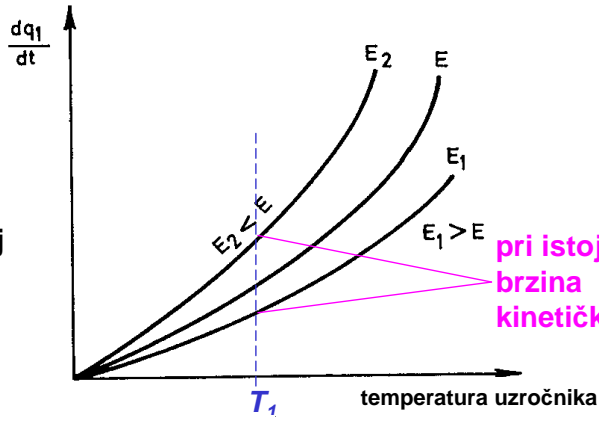
Uvjeti nastanka eksplozije



ako je $\frac{dq_1}{dt} > \frac{dq_2}{dt}$ \Rightarrow moguć lančani proces \Rightarrow **eksplozija**

ako je $\frac{dq_1}{dt} < \frac{dq_2}{dt}$ \Rightarrow nema lančanog procesa \Rightarrow **nema eksplozije**

brzina predaje topline ovisi o potrebnoj aktivirajućoj kinetičkoj energiji E

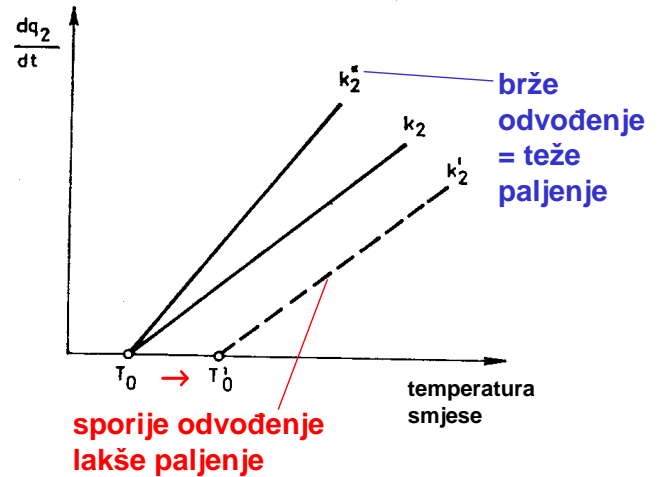


pri istoj temperaturi brzina $>$ za $<$ aktivirajuću kinetičku energiju

brzina odvođenja topline smjesom

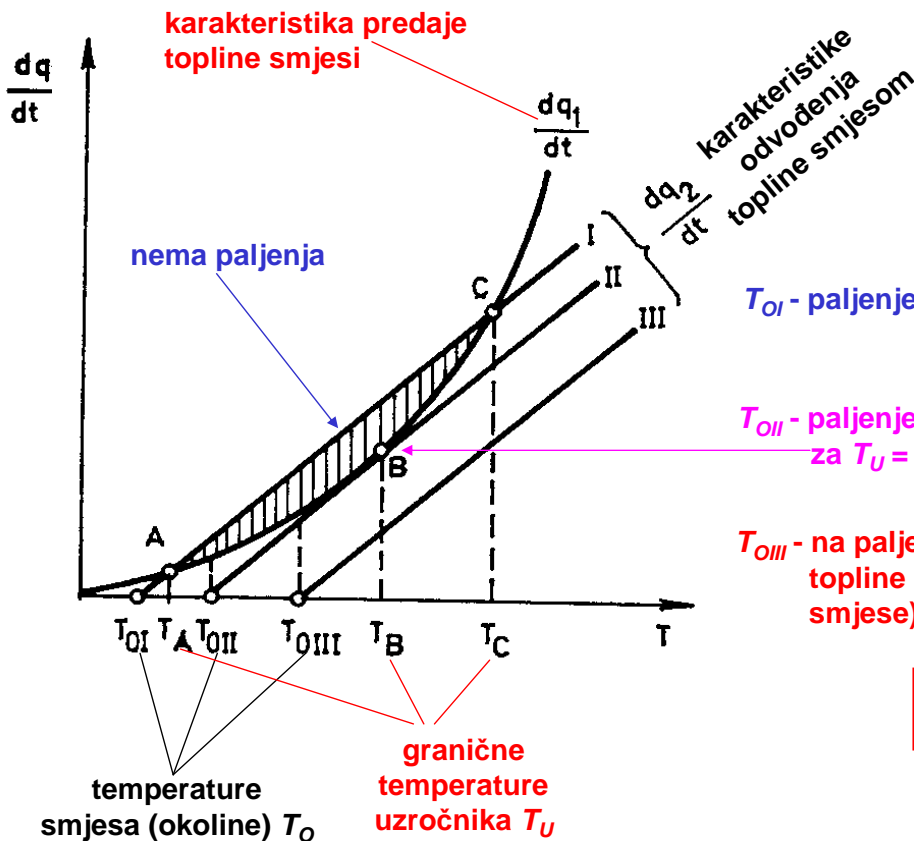
$\frac{dq_2}{dt} = k_2 \cdot (T - T_o)$ — određuje intenzitet odvođenja

k_2 - konstanta (karakterizira odvođenje topline smjesom)
 T - temperatura uzročnika
 T_o - temperatura eksplozivne smjese



sporije odvođenje lakše paljenje

mogućnost pojave inicijalnog paljenja



T_{0I} - paljenje za $T_U < T_A$ i $T_U > T_C$

T_{0II} - paljenje uvijek osim možda ne za $T_U = T_B$

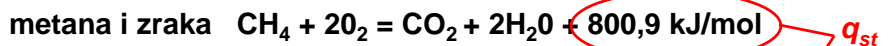
T_{0III} - na paljenje ne utječe odvođenje topline (visoka temperatura smjese) - paljenje uvijek jer je

$\frac{dq_1}{dt} > \frac{dq_2}{dt}$

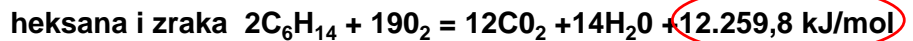
temperature smjese (okoline) T_o granične temperature uzročnika T_U

Toplina oslobođena eksplozijom

plin + O₂ (**EKSPLOZIJA**) = spoj s kisikom + ostatak + toplina

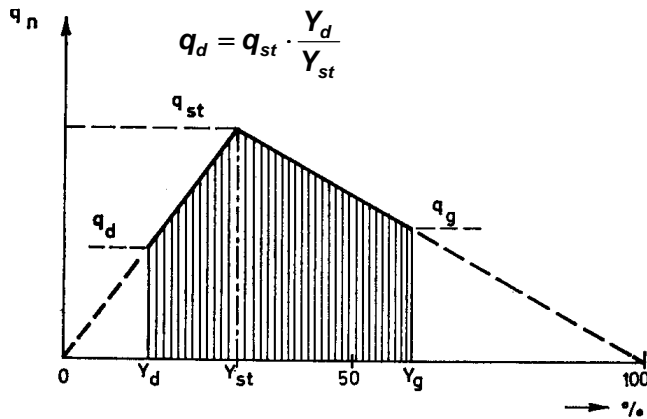


za stehiometrijske smjese



za donju granicu eksplozivnosti

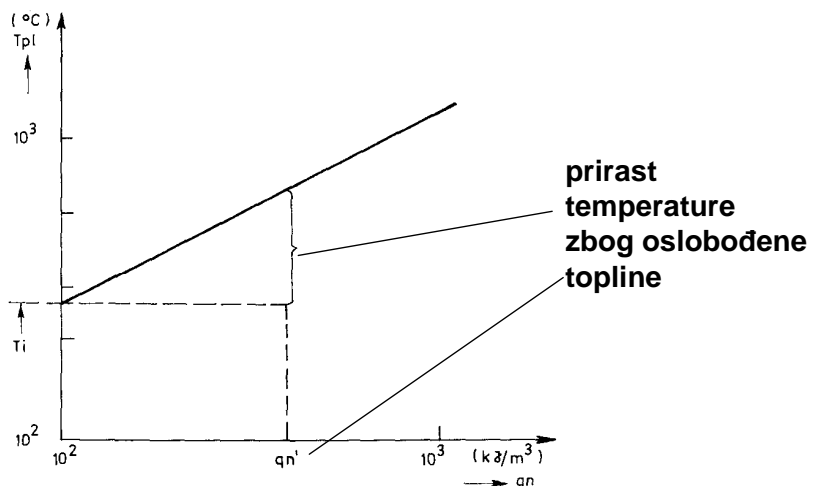
za gornju granicu eksplozivnosti



q_{st} - oslobođena toplina stehiometrijskom smjesom
 Y_d - % (vol) donje granice eksplozivnosti
 Y_s - % (vol) stehiometrijske smjese

Oslobođena toplina eksplozijom u odnosu na volumensku koncentraciju eksplozivne smjese

Temperatura eksplozije



Odnos temperature eksplozije u odnosu na oslobođenu toplinu eksplozijom

temperature 1500 do 2500 °C

Tlak eksplozije

za stehiometrijske smjese

za eksploziju u zatvorenom prostoru vrijedi

$$p_s \cdot V = R \cdot T_s \text{ za smjesu prije eksplozije}$$

$$p_e \cdot V = R \cdot T_e \text{ za eksplodiranu smjesu}$$

$$\Rightarrow \frac{p_e}{p_s} = \frac{T_e}{T_s}$$

uz promijenu volumena (dilacija)

$$\mu = \frac{V_s}{V_e}$$

imamo

$$p_e = \mu \cdot p_s \cdot \frac{T_e}{T_s}$$

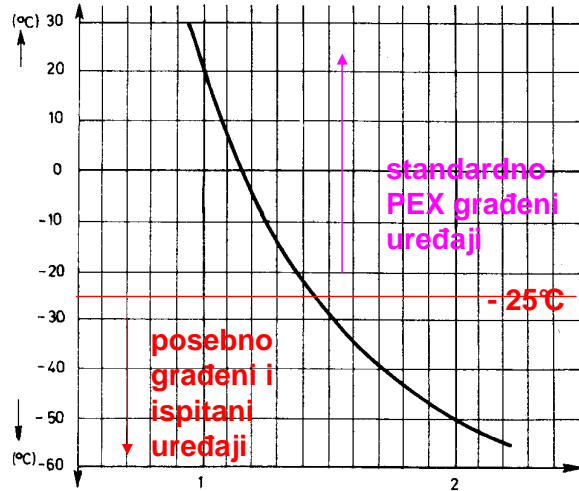
nadtlak eksplozije

$$p_{ne} \approx 22.4 \cdot 273 \cdot \frac{q_n'(273) \cdot \mu}{[c_v]_s^e \cdot T_s^2} = \frac{k}{T_s^2}$$

q_n' - toplina utrošena na povišenje temperature od T_s do T_e

$[c_v]_s^e$ - srednja specifična toplina uz stalan V za raspon temperatura od T_s do T_e

$$p_{ne} \approx f\left(\frac{1}{T_s^2}\right)$$



Ovisnost tlaka eksplozije o temperaturi eksplozivne smjese

za nestehiometrijske smjese

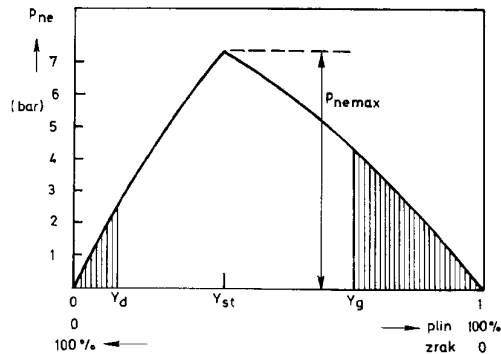
za $Y_x < Y_s$

$$p_{ne} \approx 0.0765 \cdot \frac{q_{st}' \cdot Y_x}{[c_v]_s^e \cdot Y_{st}} (k_i + Y_x \cdot k_{ij})$$

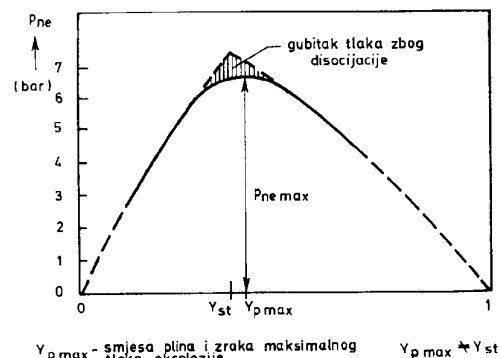
k-ovi ovisni o koncentraciji obzirom na stehiometrijsku smjesu

$$p_{ne} \approx 0.0765 \cdot \frac{q_{st}'}{[c_v]_s^e} \cdot \frac{1 - Y_x}{1 - Y_{st}} (k_i + Y_x \cdot k_{ij})$$

za $Y_x > Y_s$

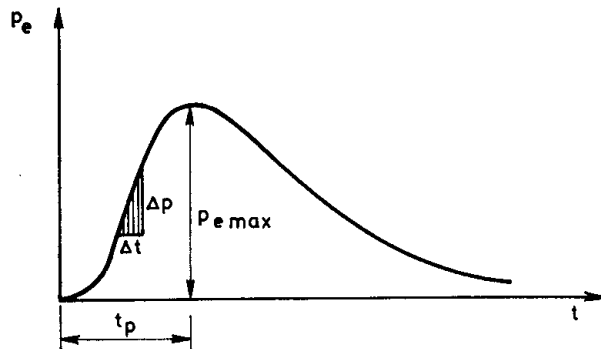


Računska krivulja tlaka eksplozije u odnosu na volumensku koncentraciju

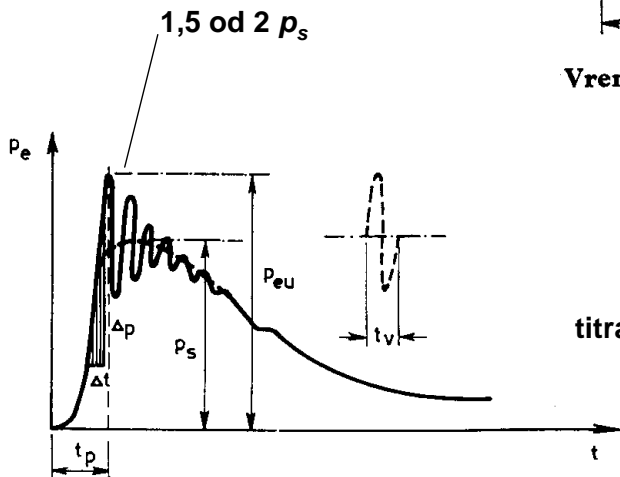


Krivulja tlaka eksplozije u odnosu na volumensku koncentraciju smjese

vremenska promjena tlaka eksplozije



Vremenski tok tlaka eksplozije bez titranja



Vremenski tok tlaka eksplozije s titranjem

titranje uvjetuje $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ ($\frac{dp}{dt}$ - brizanca)
oblik i volumen prostora
(pojava rezonancije)

Povećani tlak eksplozije (pretkompresija)

tlak povećava gustoću smjese

$$g = \frac{p_s}{1.1013} \cdot \frac{273 + \vartheta_1}{273 + \vartheta_0} \rightarrow p_e = g \cdot p'_e$$

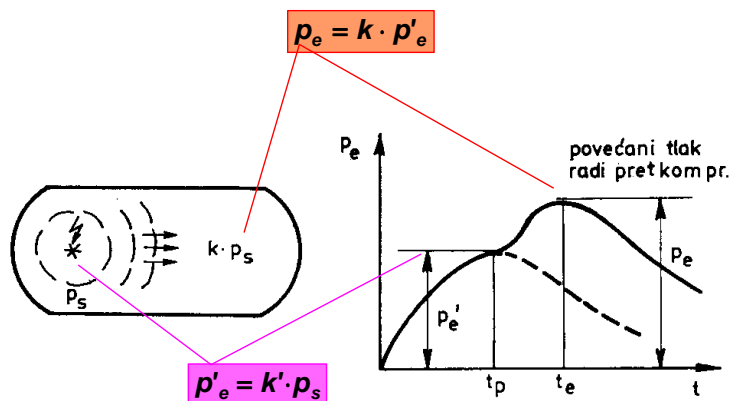
p_s - početni tlak smjese (mbar)

ϑ_1 - referentna temperatura (20 °C)

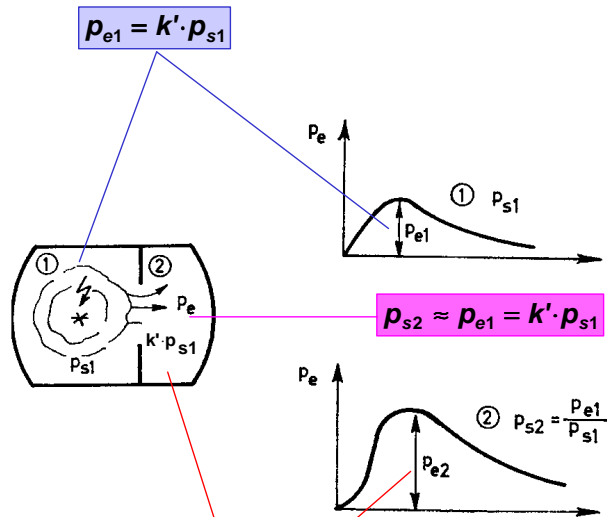
ϑ_2 - temperatura smjese °C

p'_e - tlak eksplozije bez povećanja gustoće

p_e - tlak eksplozije uz povećanu gustoću



Povećanje tlaka eksplozije pretkompresijom u cjevastom prostoru

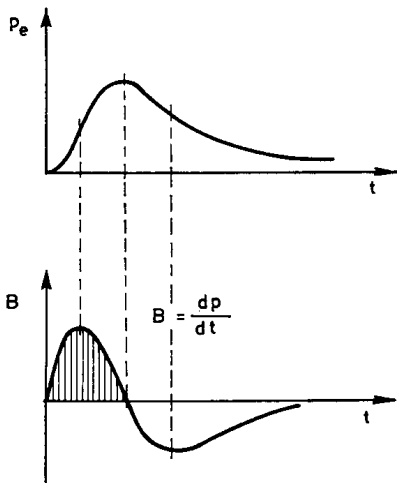


Povećanje tlaka eksplozije pretkompresijom u podijeljenom prostoru

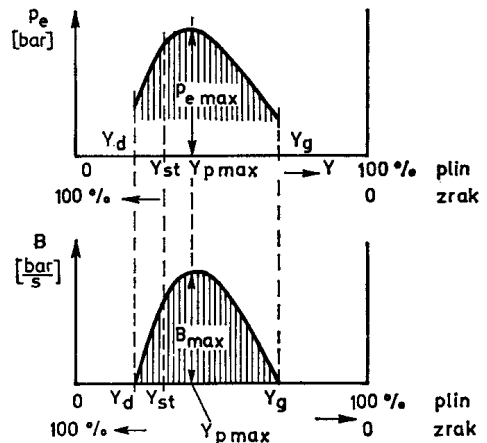
Brzina porasta tlaka (brizanca)

$$B = \frac{10^4}{k-1} \cdot V \cdot \frac{dp}{dt} (Nm/s) \quad \text{ili} \quad B = \frac{100}{k-1} \cdot V \cdot \frac{dp}{dt} (kW) \quad \text{uz} \quad k = \frac{[c_p]_s^e}{[c_v]_s^e}$$

k - omjer srednje specifične topline kod p i V konst. u rasponu temperature T_s i T_e



Vremenski tok tlaka i brizance eksplozije



Tlak i brizanca eksplozije u ovisnosti o volumenskoj koncentraciji smjese