



Процеси паљења

Процеси паљења

- За паљење гориве смеше потребно је да се остваре услови, под којима ће се горива смеша упалити спонтано или под дејством страног извора енергије.
- Паљење може бити
 - Спонтано паљење или самопаљење
 - Принудно паљење.

Начини паљења

- Спонтано паљење или самопаљење – смеша горива и ваздуха се пали спонтано сама од себе, **без посредства неког другог извора енергије.**
- Принудно паљење – паљење **под дејством неког високотемпературског извора** (варница, усијано тело, пламен).

Теорије паљења

- Топлотна теорија паљења
- Ланчана теорија паљења

Теорије паљења – Топлотна теорија паљења

- При загревању страним извором увек постоји температура на којој је количина топлоте која се доводи једнака или већа од топлотних губитака.
- Температура гориве смеше наставља да расте, све док се не оствари велика брзина издвајања топлоте. У тим условима може доћи до паљења.

Теорије паљења – Ланчана теорија паљења

- Ако се реакција сагоревања одвија као ланчана до паљења може доћи и у изотермским условима и то када је брзина настајања активних честица већа од њиховог трошења.
- Реакција се убзава (разграната ланчана реакција) прогресивно и води ка паљењу.
- За започињање ланчане реакције потребан је спољни извор топлоте.

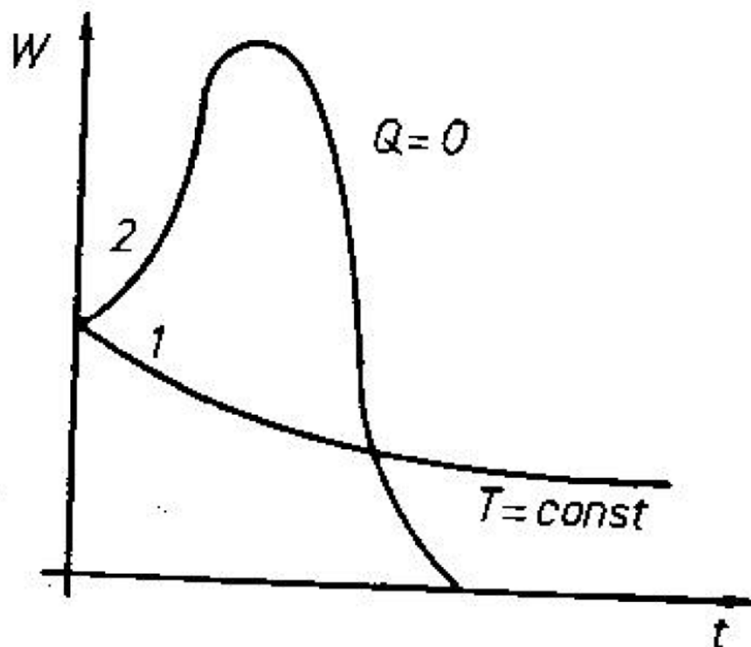
Паљење

- Паљење се дефинише следећим карактеристикама
 - Концентрационим границама паљења – концентрационе границе горива у смеши са ваздухом у којима може доћи до паљења
 - Температуром паљења – температура на којој долази до паљења
 - Периодом закашњења паљења – временски период до појаве паљења.

Паљење

- Паљење се односи на појаву код које реакција од веома споре и неприментне прелази у веома брзу, што је праћено тренутном трансформацијом хемијске енергије у топлотну.

Самопаљење

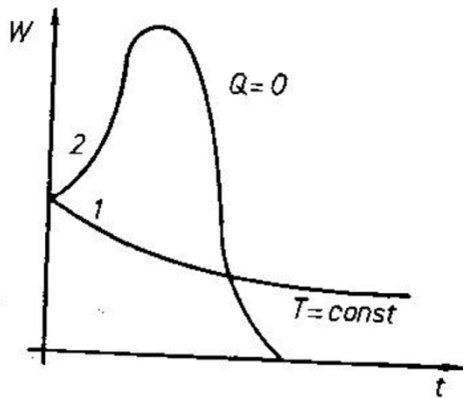


Крива 1 – промена брзине изотермне хемијске реакције, брзина се смањује са временом, тако да не може да дође до паљења. Изотермска реакција не може да доведе до паљења, јер је $dw/dt < 0$

Крива 2 – промена брзине хемијске реакције у адијабатским условима. Брзина расте услед пораста температуре до неког тренутка када почиње нагло да опада услед смањења садржаја почетних реактаната. Услов за појаву паљења је $dw/dt > 0$.

Граница између реакције која води ка паљењу и реакције која не води ка паљењу је када је $dw/dt = 0$

Самопаљење



Ако се уведе променљива x која означава трансформацију хемијске енергије. На почетку реакције је $x=0$, а на крају је $x=1$ (развијена количина топлоте једнака је топлотној моћи).

За процес који се одвија при $p=\text{const}$.

$$w = \frac{dx}{dt} = w(x, t)$$

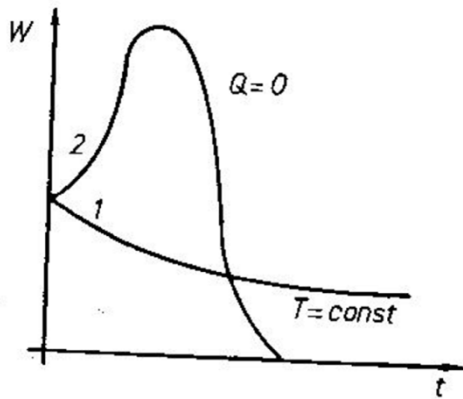
$$\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial w}{\partial T} \frac{dT}{dt}$$

При адијабатској трансформацији целокупна количина топлоте троши се на загревање гориве смеше

$$c_p \frac{dT}{dt} = x \frac{dx}{dt} \longrightarrow \frac{dw}{dt} = w \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{H}{c_p} \frac{\partial w}{\partial T} \right)$$

Самопаљење

Из услова $dw/dt > 0$



$$\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{H}{c_p} \frac{\partial w}{\partial T} > 0$$

И пошто је $\delta w / \delta x$ увек негативно

$$\left| \frac{H}{c_p} \frac{\partial w}{\partial T} \right| > \left| \frac{\partial w}{\partial x} \right|$$

Повећање брзине адијабатске реакције, услед повећања температуре, мора да компензује смањење брзине хемијске реакције услед смањења концентрације реактаната.

У случају када је температура на почетку ниска, а концентрација реактаната велика, увек долази до паљења.

Самопаљење

- У реалним условима:
 - Реакција није адијабатска
 - Горива смеша није хомогена
- Паљење и сагоревање
 - у ограниченем простору
 - део топлоте се губи у околину, па је температурско поље унутар смеше нехомогено
 - брзине реакција у различитим тачкама посматраног простора су различите.
- У централном делу посматраног простора, температуре гориве смеше су веће и веће су концентрације продуката реакције, па се услед различитих температура и концентрација јављају
 - Пренос топлоте (провођење)
 - Пренос масе (дифузија)

Самопаљење

$$-\frac{dc}{dt} = -\frac{\partial c}{\partial t} = \operatorname{div}\left(\frac{D}{T} \operatorname{grad} cT\right) - k_0 c^n \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)$$

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} = c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + H k_0 c^n \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right)$$

- Решавање претходних нелинеарних једначина у општем случају је математички немогуће. Уводе се упрошћења:
- Горива смеша се налази у суду запремине V
- Температура зидова је константна T_0
- Температура гориве смеше унутар суда је константна T
- Горива смеша унутар суда је хомогена
- За случај неадијабатске реакције могу се дефинисати
 - Брзина настајања топлоте q_1
 - Брзина одвођења топлоте q_2

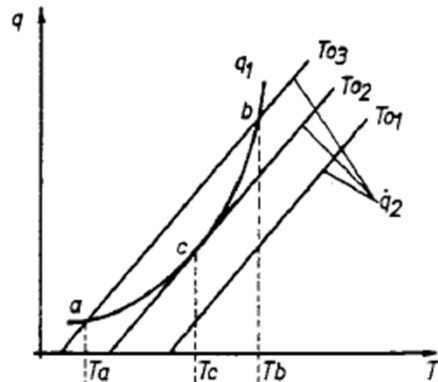
$$q_1 = HV_w$$

$$q_2 = \alpha A(T - T_0)$$

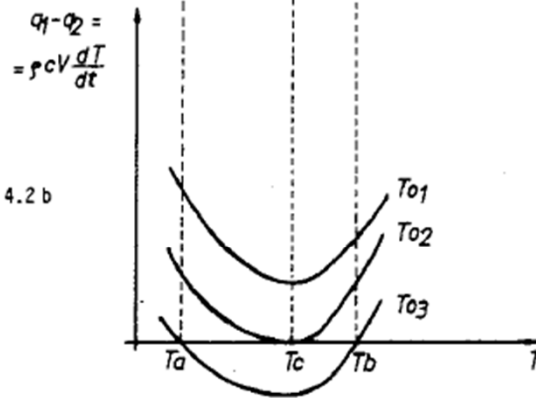
До тренутка паљења концентрације
реактаната се не мењају

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = q_1 - q_2$$

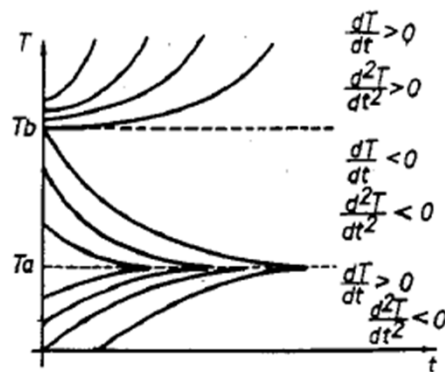
Sl. 4.2 a



Sl. 4.2 b



Sl. 4.3 a



Самопаљење

q_1 – брзина довођења топлоте

q_2 – брзина одвођења топлоте

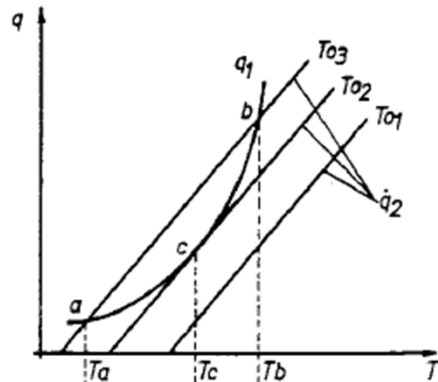
T_0 – температура зида

До појаве самопаљења долази у случају када је температура гориве смеше виша од температуре зида T_b , односно T_c , односно у свим случајевима за температуру зида T_{01} .

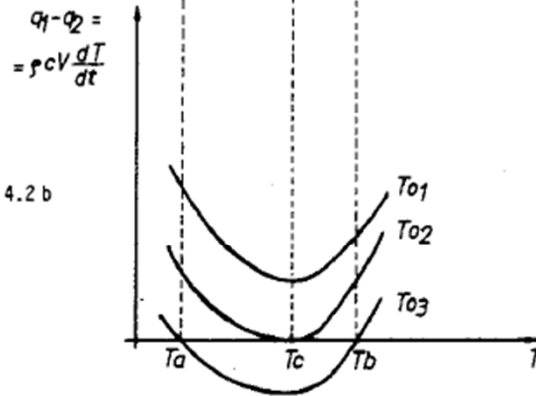
Разликују се три случаја

- Температура зида је релативно ниска (T_{03})
- Температура зида је умерена (T_{02})
- Температура зида је релативно висока (T_{01})

Sl. 4.2 a



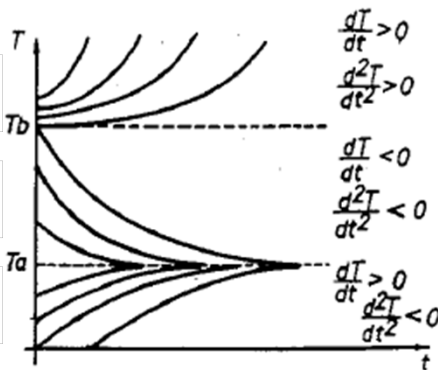
Sl. 4.2 b



$T > T_b$

$T_a < T < T_b$

$T < T_a$



Самопаљење

q_1 – брзина довођења топлоте

q_2 – брзина одвођења топлоте

T_o – температура зида

Температура зида је релативно ниска (T_{o3})

$T < T_a$, T_a стање стабилне равнотеже:

$q_1 - q_2 > 0$ $dT/dt > 0$ $d(q_1 - q_2)/dt < 0$

загревање до T_a брзином која се стално смањује

$T_a < T < T_b$:

$q_1 - q_2 < 0$ $dT/dt < 0$ $d(q_1 - q_2)/dt < 0$

горива смеша се хлади до T_a , брзином која се постепено смањује

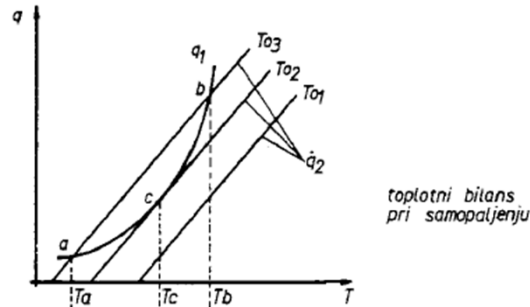
$T > T_b$, T_b стање метастабилне равнотеже:

$q_1 - q_2 > 0$ $dT/dt > 0$ $d(q_1 - q_2)/dt > 0$

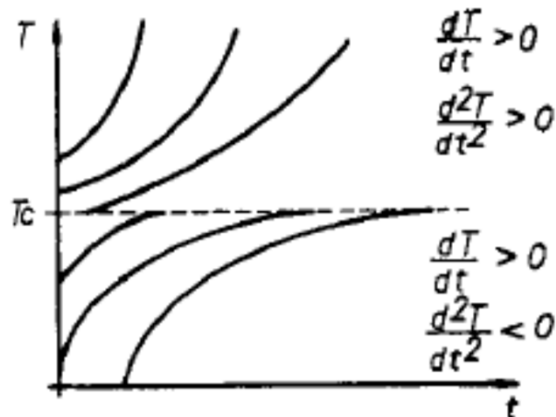
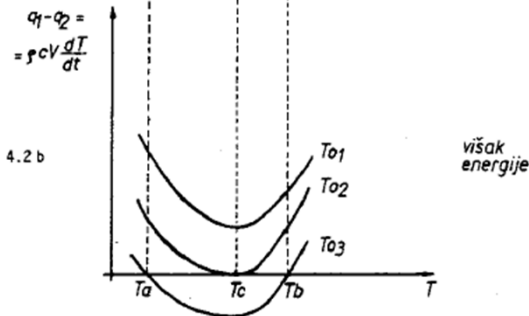
температура расте са сталним порастом брзине

Самопаљење

Sl. 4.2 a



Sl. 4.2 b



q_1 – брзина довођења топлоте

q_2 – брзина одвођења топлоте

T_o – температура зида

Температура зида је умерена (T_{o2})

$T < T_c$

$q_1 - q_2 > 0$ $dT/dt > 0$ $d(q_1 - q_2)/dt < 0$

загревање до T_c брзином која се стално смањује

$T > T_c$

$q_1 - q_2 > 0$ $dT/dt > 0$ $d(q_1 - q_2)/dt > 0$

температура расте са сталним порастом брзине

Самопаљење

q_1 – брзина довођења топлоте

q_2 – брзина одвођења топлоте

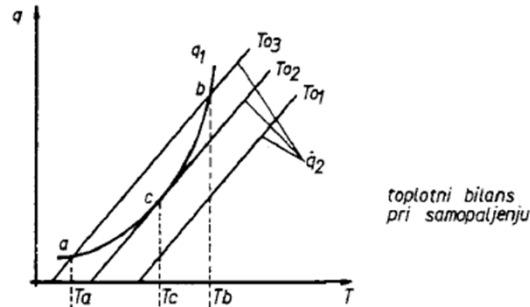
T_0 – температура зида

Температура зида је умерено висока (T_{01})

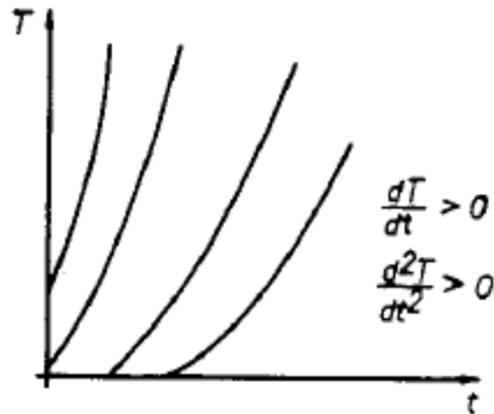
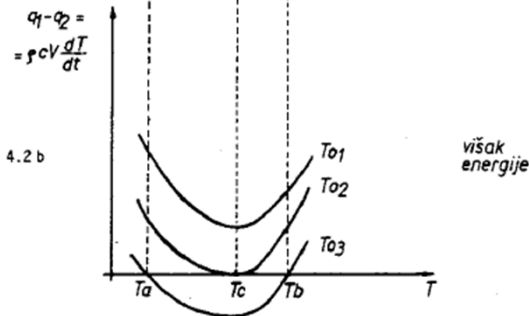
$$q_1 - q_2 > 0 \quad dT/dt > 0 \quad d(q_1 - q_2)/dt > 0$$

температура расте са сталним порастом брзине

Sl. 4.2 a



Sl. 4.2 b



Самопаљење

q_1 – брзина довођења топлоте

q_2 – брзина одвођења топлоте

T_0 – температура зида

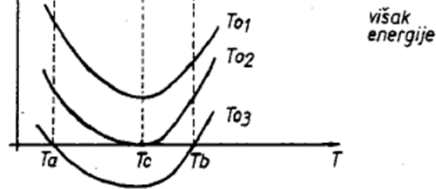
Температура самопаљења T_c - температура зида посуде у коме се налази горива смеша и изнад које се реакција прогресивно убрзава.

T_c – температура самопаљења дефинисана за одређене услове (p , T и састав)



$$q_1 - q_2 = \rho c V \frac{dT}{dt}$$

sl. 4.2 b



$$q_1 = HV_w$$

$$q_2 = \alpha A(T - T_0)$$

$$(q_1)_c = (q_2)_c$$

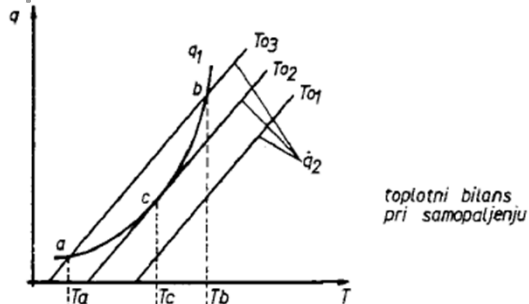
$$\left(\frac{dq_1}{dT} \right)_c = \left(\frac{dq_2}{dT} \right)_c$$

$$HVkc_{A_c}^n e^{-\frac{E_A}{RT_c}} = \alpha A(T_c - T_{oc})$$

$$HVkc_{A_c}^n e^{-\frac{E_A}{RT_c}} \left(\frac{E_A}{RT_c^2} \right) = \alpha A$$

Самопаљење

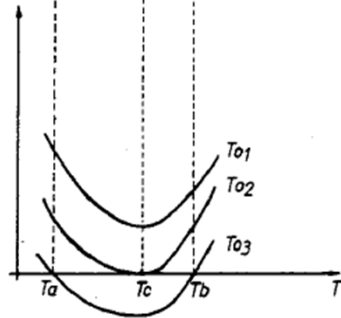
Sl. 4.2 a



toplotni bilans
pri samopaljenju

$$q_1 - q_2 = \rho c V \frac{dT}{dt}$$

Sl. 4.2 b



višak
energije

$$(q_1)_c = (q_2)_c \quad \left(\frac{dq_1}{dT} \right)_c = \left(\frac{dq_2}{dT} \right)_c$$

$$HVkc_{A_c}^n e^{-\frac{E_A}{RT_c}} = \alpha A (T_c - T_{oc})$$

$$HVkc_{A_c}^n e^{-\frac{E_A}{RT_c}} \left(\frac{E_A}{RT_c^2} \right) = \alpha A$$

$$\frac{RT_c^2}{E_a} = T_c - T_{oc}$$

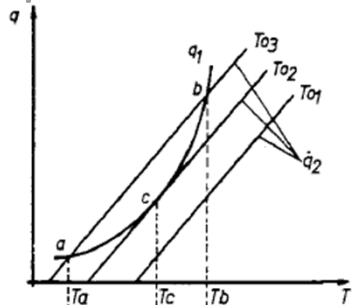
Квадратна једначина са 2 корена

мања вредност – користи се за паљење

већа вредност - користи се за гашење

Самопалјење

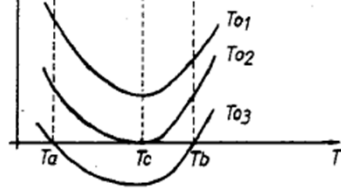
Sl. 4.2 a



toplotni bilans
pri samopaljenju

Sl. 4.2 b

$$q_1 - q_2 = \rho c V \frac{dT}{dt}$$



višak
energije

$$\frac{RT_c^2}{E_a} = T_c - T_{oc}$$

$$T_c = \frac{E_a}{2R} - \frac{E_a}{2R} \sqrt{1 - \frac{4RT_{oc}}{E_a}}$$

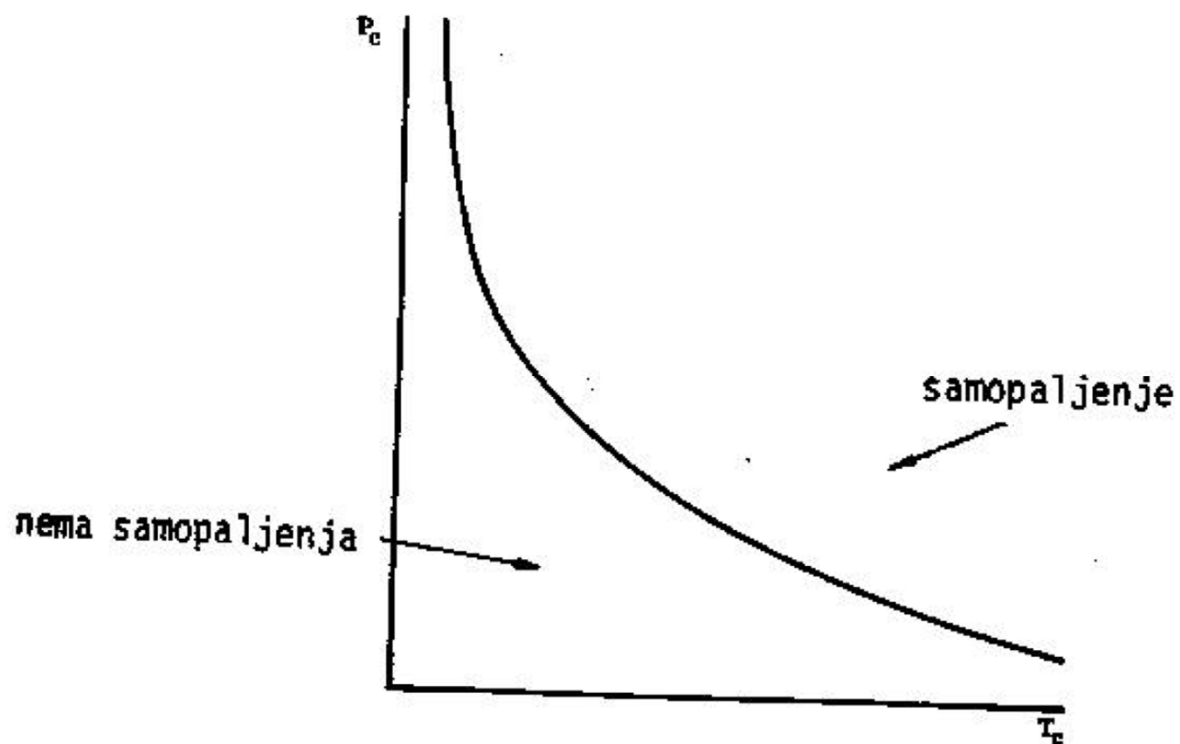


$$T_c \approx T_{oc}$$

Самопаљење

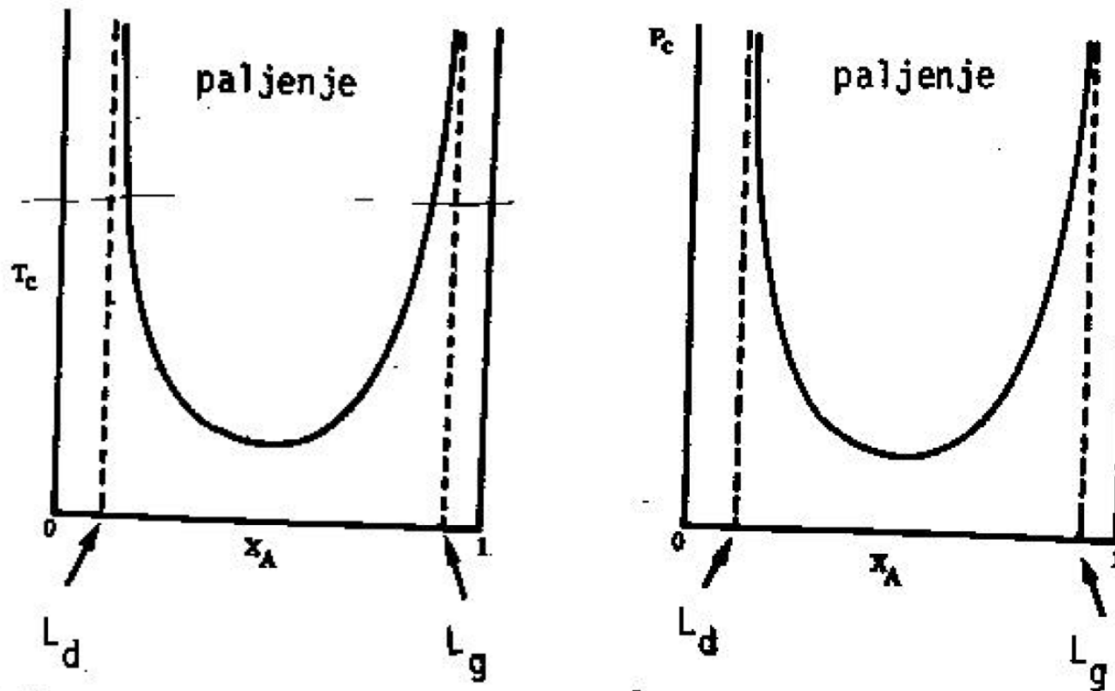
- Постоје границе у којима може доћи до појаве самопаљења
- Уколико је смеша сувише сиромашна или богата не може доћи до самопаљења без обзира на притисак и температуру
- Уколико је температура или притисак јако ниска до појаве самопаљења не може доћи

Самопаљење



Критични притисак у зависности од критичне температуре (услови за појаву самопаљења)

Самопаљење



Концентрациона граница испод које није могуће паљење гориве смеше назива се доња концентрациона граница.

Концентрациона граница изнад које није могуће паљење гориве смеше назива се горња концентрациона граница.

Период закашњења самопаљења

- Адијабатско паљење ($q_2=0$), могуће је израчунати период закашњења паљења

$$\rho c V \frac{dT}{dt} = q_1 - q_2$$

$$\rho C V \frac{dT}{dt} = H V w$$

$$w = k'_n c^n T^m$$

- m је у границама од 20 до 30 за већину горивих смеша

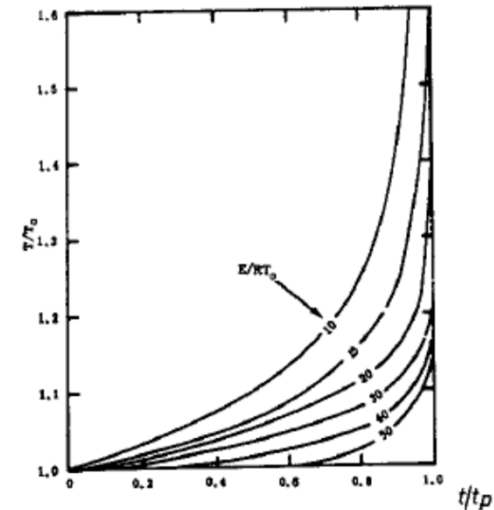
$$\left(\frac{T}{T_o} \right)^{m-1} = \left| 1 - \frac{t}{\frac{\rho C T_o}{(m-1) H k'_n c^n T_o^m}} \right|^{-1}$$

$$t_p \equiv \frac{\rho C T_o}{(m-1) H k'_n c^n T_o^m}$$

Период закашњења самопаљења

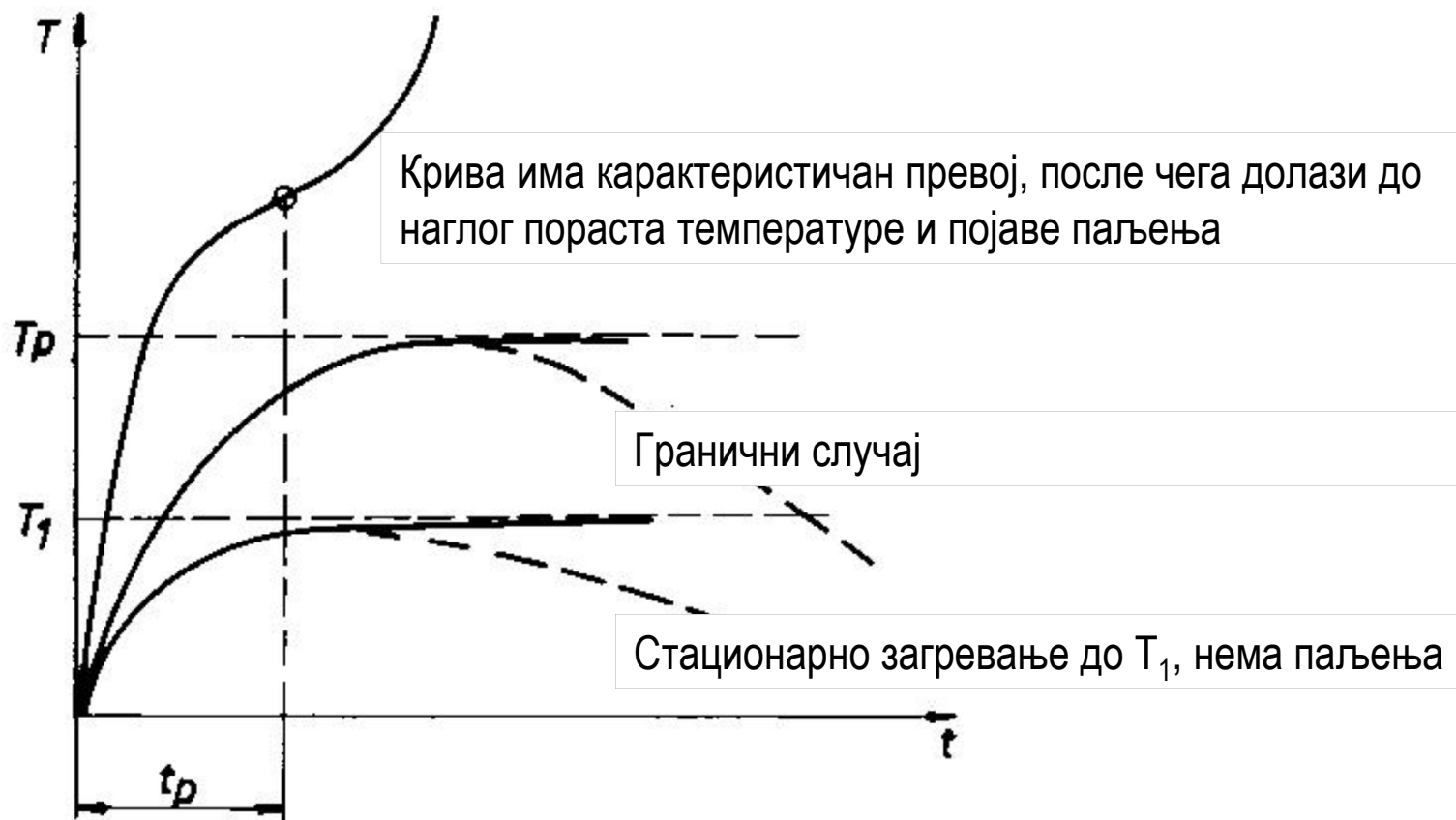
$$t_p \equiv \frac{\rho C T_o}{(m-1) H k'_n c_{A_o}^n T_o^m}$$

- Период закашњења паљења
 - мањи – специфична топлота мања
 - мањи – већа брзина реакције, температура, топлотна моћ



$$t_p \equiv \rho C \frac{RT_o^2}{E_A} \frac{\exp\left(\frac{E_A}{RT_o}\right)}{H k'_n c_{A_o}^n}$$

Паљење



Случај неадијабатске реакције (одвођење топлоте преко зидова суда, $q_2 \neq 0$)

Растојање гашења

- У непосредној брзини великих чврстих маса (зид суда) реакције сагоревања не могу да се одвијају – прекид реакције
- Растојање од зида на коме не може да дође до паљења, а ни до сагоревања – растојање гашења
- За стехиометријску смешу, на атмосферском притиску и околној температури:
 - Водоник 0,7 mm
 - Метан 2,0 mm
 - Пропан 1,8 mm

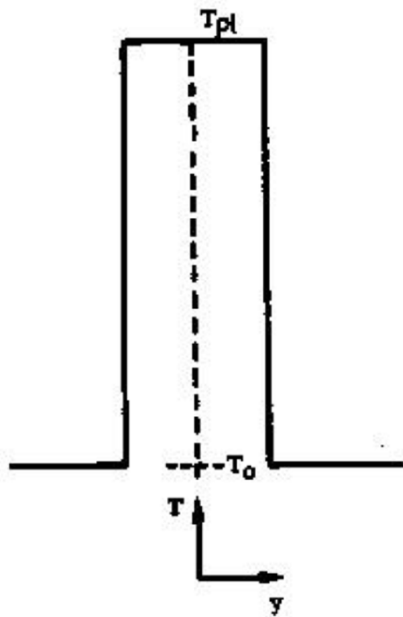
Принудно паљење

- Извори паљења при принудном паљењу могу се поделити у следеће групе:
 - Пламен – паљење пламеном
 - Варница – паљење електричном искром
 - Загрејана чврста супстанца – паљење јако загрејаним телом

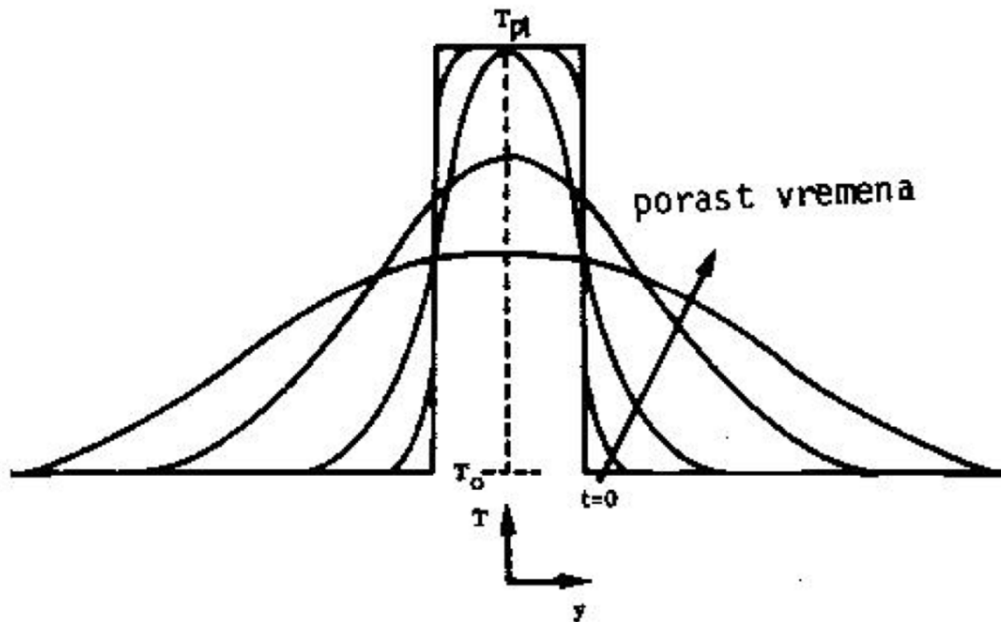
Паљење пламеном

- Паљење пламеном зависи од:
 - Карактеристика гориве смеше
 - Времена контакта између пламена и гориве смеше
 - Величине и температуре пламена
 - Карактера мешања.
- Иницијални пламен се посматра као бесконачна равна плоча, дебљине $2a$ и температуре T_{pl}

Паљење пламеном

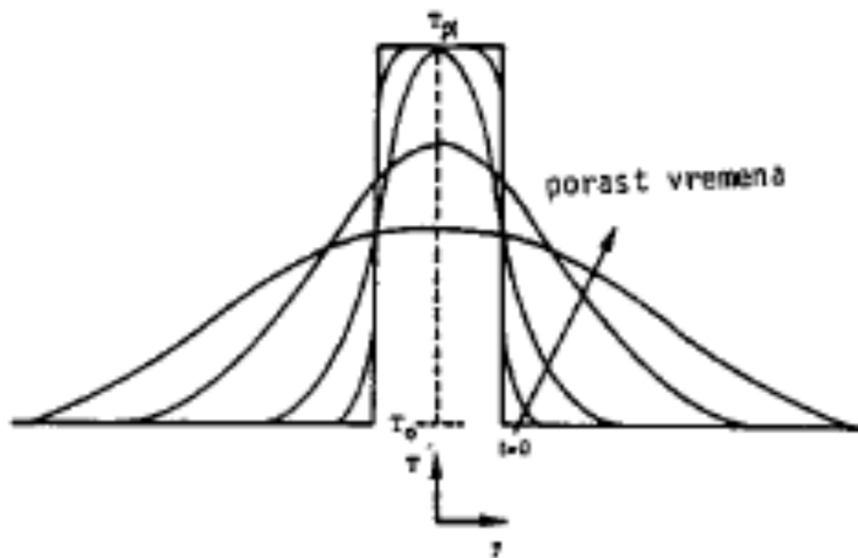


Температурски профил у тренутку уношења раванског пламена



Промена температуре са временом – Уколико је пламен тањи од неке критичне вредности неће доћи до паљења, јер је брзина хлађења већа од брзине настајања топлоте. Ако је пламен дебљи од критичне вредности долази до паљења.

Паљење пламеном



$$\rho C \frac{dT}{dt} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + H k_n c_A^n \exp \left(-\frac{E_A}{RT} \right)$$

$$t \leq 0$$

$$\begin{aligned} T &= T_p \\ T &= T_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 &< |y| < a \\ a &< |y| < \infty \end{aligned}$$

$$t > 0$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ u } y = 0$$

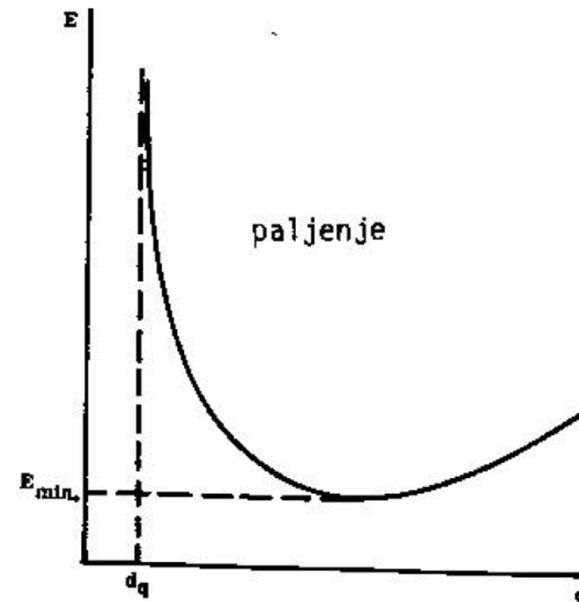
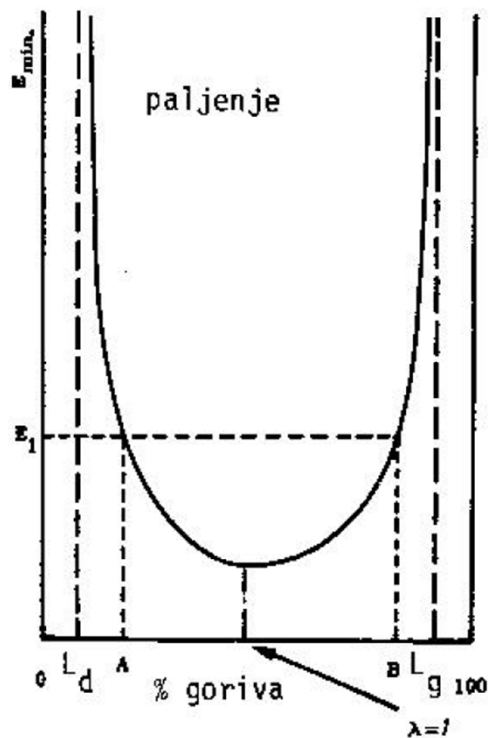
$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \text{ u } |y| = \infty$$

$$T = T_0 \text{ za } |y| = \infty$$

Критична дебљина пламена је реда величине два пута веће од зоне сагоревања гориве смеше.

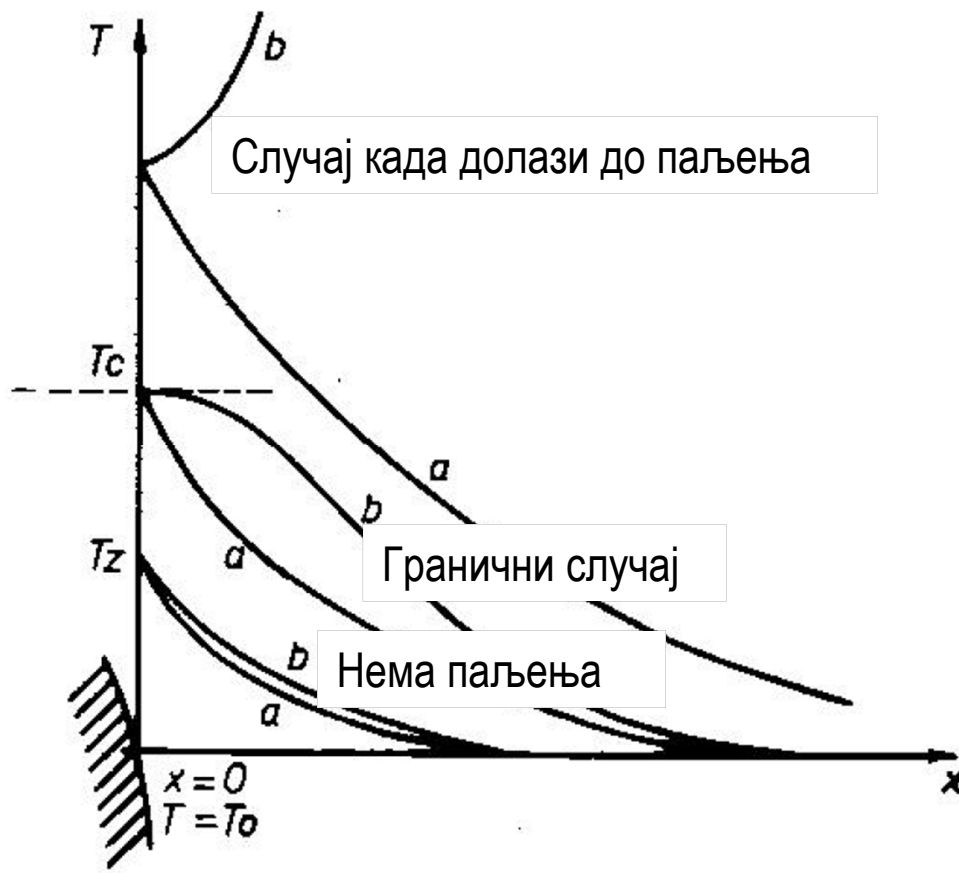
- Већа дебљина пламена – већа топлотна проводљивост гориве смеше
- Већа дебљина пламена – мања брзина издвајања топлоте хемијском реакцијом

Паљење електричном варницом



Минимална енергија паљења - Утицај концентрационих граница и растојања гашења (минимално растојање између електрода при паљењу електричном искром)

Паљење загрејаним телом



а – инертна смеша

б – реактивна смеша



Границе паљења

Границе паљења

- Границе паљења су граничне концентрације горива у горивој смеши при којима је још могуће њено паљење и успостављање простирања пламена
- Постоје горња и доња концентрациона граница паљења
- Горња је дефинисана максималном концентрацијом горива у горивој смеши
- Доња је дефинисана минималном концентрацијом горива у горивој смеши
- Границе паљења могу се представити при константном притиску и при константној температури

Границе паљења

- Границе паљења могу се одредити на основу познатог састава горива и познатих граница паљења за сваку од горивих компоненти у гориву

$$GU_{sm} = \frac{100}{\frac{V_1}{GU_1} + \frac{V_2}{GU_2} + \dots + \frac{V_n}{GU_n}}$$

GU_{sm} – горња/доња концентрациона граница паљења у запреминским процентима у горивој смеси

V_i – запремина појединих горивих компоненти у горивој смеси

GU_i - горња/доња концентрациона граница паљења одговарајуће гориве компоненте за случај када сама образује смешу са ваздухом

Границе паљења

$$GU_{sm} = \frac{100}{\frac{V_1}{GU_1} + \frac{V_2}{GU_2} + \dots + \frac{V_n}{GU_n}}$$

Експериментална провера је показала добро слагање обрасца за случај одређивања доње границе паљења.

За одређивање горње концентрационе границе паљења потребно је концентрације горивих компонената прерачунати на чисту гориву масу и тек онда заменити у горњи образац.

Границе паљења

- Границе паљења зависе од:
 - Врсте горива
 - Врсте гориве смеше
 - Температуре
 - Притиска
 - Брзине струјања гориве смеше

Границе паљења

Паљењу гориве смеше електричном варницом погодују:

- Ниже температуре сагоревања
- Виша почетна температура гориве смеше
- Већа брзина издвајања топлоте хемијском реакцијом
- Већа топлотна моћ
- Мања специфична топлота
- Мањи коефицијент топлотне проводљивости
- Виши притисак