



---

# Сагоревање М



# Закони за феномене преноса

$$G_{M_i} = -D_{ij} \frac{dc_i}{dx}$$

## Фиков закон

Флукс **месе** је директно сразмеран градијенту **концентрације**.

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} = -a \frac{d\rho \cdot c_p \cdot T}{dx}$$

## Фуријеов закон

Флукс **топлоте** је директно сразмеран градијенту **температуре**.

$$\tau = -\eta \frac{d(\rho \cdot u)}{dx} = \nu \frac{du}{dx}$$

## Њутнов закон

Напон **смицања** је директно сразмеран градијенту **импулса**.



# Аналогије

- Претходне појаве описују законитости истог облика, па су аналогне.
- За гасове аналогија није само формална, јер је механизам преноса исти.
- Коефицијент преноса масе  $D$ , коефицијент топлотне дифузивности  $a$  и коефицијент кинематске вискозности  $\nu$  имају исте јединице мере -  $m^2/s$ .

$$[D]=[a]=[\nu]$$



# Бездимензиони бројеви који се највише користе у сагоревању ✓

- Прантлов (Prandtl) број  
зависи само од флуида и његовог стања  
(физичка карактеристика флуида)

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

- Шмитов (Schmidt) број  
карактерише струјање флуида у којем  
постоји истовремени пренос кретања и масе

$$Sc = \frac{\nu}{D}$$

- Луисов (Lewis) број  
карактерише струјање флуида у којем  
постоји истовремени пренос топлоте и масе

$$Le = \frac{a}{D} = \frac{Sc}{Pr}$$

За смеше реалних гасова:

$$Pr, Sc, Le < 1$$

За идеалне системе:

$$Pr, Sc, Le = 1$$



# Дифузионо и кинетичко сагоревање



- **Дифузионо сагоревање** - ако је брзина хемијске реакције већа од брзине којом се молекули доводе у контакт (процес дифузије).
- **Кинетичко сагоревање** – ако је брзина хемијске реакције мала у односу на дифузију, тада је критична фаза управо хемијска реакција, тј, кинетика процеса.



# Карактеристични број за врсту сагоревања



- **Дамкелеров број** - однос карактеристичних времена процеса дифузије и кинетике хемијских реакција:

$$Da = \frac{\tau_{\text{dif}}}{\tau_{\text{kin}}}$$

- $Da \ll 1$  – кинетичко сагоревање
- $Da \gg 1$  – дифузионо сагоревање



# Процеси паљења



# Паљење – појам

- 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.



# Паљење – кључне карактеристике



- Паљење се дефинише следећим карактеристикама:
  - **Концентрационим границама паљења** – границе концентрације горива у горивој смеши (с оксидатором) у којима може доћи до паљења;
  - **Температуром паљења** – температура на којој долази до паљења;
  - **Периодом закашњења паљења** – временски период до појаве паљења.



# Врсте/начини 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 и
  - **принудно паљење.**



# Теорије паљења

- У пракси се користе две кључне теорије паљења:
  - топлотна (thermal ignition theory) и
  - ланчана (Isothermal chain branching).



# Топлотна теорија паљења

(Николай Семёнов, Максим Франк-Каменецкиј)

- У суду запремине  $V$  је затворена горива смеша, Температура зидова суда  $T_0$  се одржава константном.
- На почетку је и температура гориве смеше једнака  $T_0$ , али се она мења услед ослобађања топлоте.
- Температура гориве смеше наставља да расте, све док брзина ослобађања топлоте не прерасте брзину одвођења топлоте.
- Тада долази до самопаљења гориве смеше.





# Топлотна теорија паљења

(Николай Семёнов, Максим Франк-Каменецкиј)

- Изрази за израчунавање температуре самопаљења у изолованом суду:

– Тачни (потпуни):

$$T_C = \frac{E_A}{2 \cdot R_0} - \frac{E_A}{2 \cdot R_0} \sqrt{1 - \frac{4 \cdot R_0 T_{0C}}{E_A}}$$

– Приближни (делимични):

$$T_C = T_{0C} + \frac{R_0 T_{0C}^2}{E_A}$$

- где су:

$T_C$	-	температура самопаљења (К),
$T_{0C}$	-	температура суда (К),
$E_A$	-	енергија активације (kJ/mol),
$R_0$	-	универзална гасна константа (8,314 kJ/kmol·K).



# Топлотна теорија паљења

(зависност критичног притиска од критичне температуре)





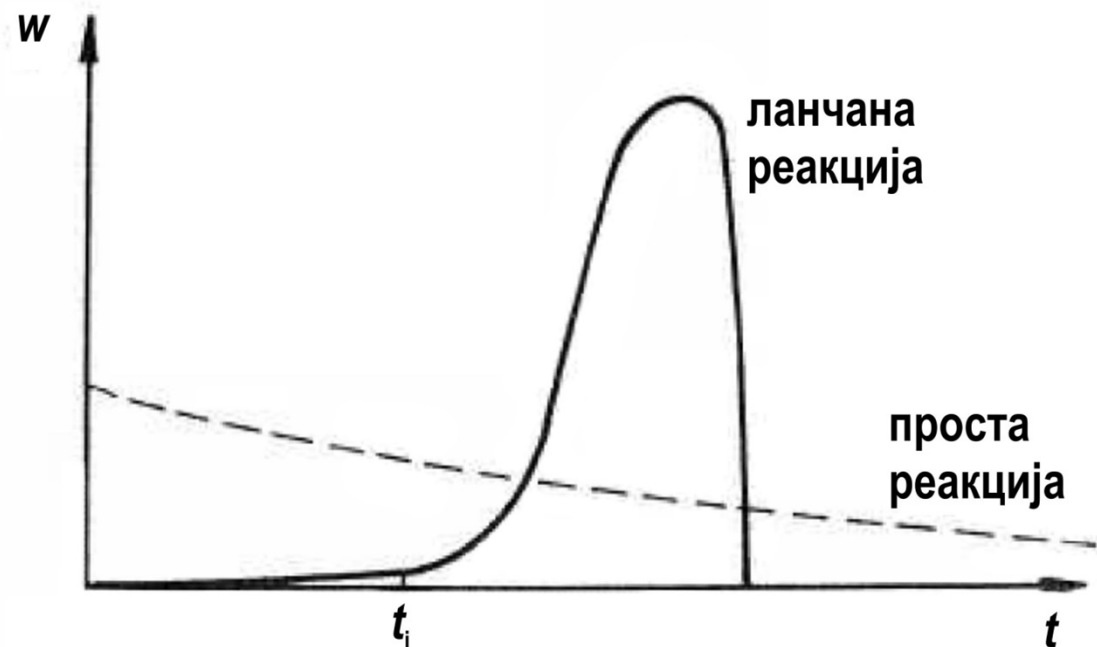
# Ланчана теорија паљења

- И овде је један од твораца био Семёнов,.
- 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 убрзава (разграната ланчана реакција) прогресивно и води ка паљењу.
- **За започињање ланчане реакције потребан је спољни извор топлоте.**



# Ланчана теорија паљења

Суштинска разлика између прости и ланчане реакције је у зависности брзине реакције од времена при константној температури.





# Основни појмови

---

- Границе запаљивости (flammability limits)
- Границе експлозије (explosion limits)
- Границе детонације (detonation limits)



# Границе запаљивости (flammability limits)

- Границе запаљивости односе се на ОПСЕГ САСТАВА, ЗА ФИКСНУ ТЕМПЕРАТУРУ И ПРИТИСАК, у оквиру којих је могућа експлозивна реакција када се уведе спољни извор паљења,.
- Ово се може десити чак и када је смеша хладна, Границе запаљивости су дате као концентрација горива (запреминска) на одређеном притиску и температури.
- Границе запаљивости нису апсолутне, већ зависе од врсте и јачине извора паљења.
- Студије о границама запаљивости угљоводоничних горива показале су да што је јачи извор паљења, то је сиромашнија смеша која се може запалити.
- Границе запаљивости такође зависе од типа атмосфере (на пример, границе су много шире у кисеонику него у ваздуху), притиска и температуре атмосфере.



# Границе експлозије (explosion limits)



- Границе експлозије се обично односе на **ОПСЕГ ПРИТИСКА И ТЕМПЕРАТУРЕ** за који је могућа експлозивна реакција гориве смеше фиксног састава.
- Састав гориве смеше мора бити у опсегу запаљивости, Реакција се обично покреће аутокаталитичком (понекад се назива самозагревањем) реакцијом у тим условима, без икаквог спољашњег извора паљења.
- У пракси, то значи да смеша мора бити довољно врућа, **Границе експлозије су дате у смислу најмање температуре самопаљења за гориво убризгано у врућ ваздух.**
- **Најнижа температура самопаљења је снажна функција врсте горива (атомски састав и молекуларна структура), притиска и концентрације горива.**



# Границе детонације (detonation limits) ✓...

- Границе детонације су **ОПСЕГ САСТАВА ГОРИВЕ СМЕШЕ** у којем су детонације уочене у лабораторијским и теренским експериментима.
- Границе детонације су јака функција састава смеше, почетног притиска и температуре, али су обично уже од граница запаљивости.
- Поред тога, границе детонације много више зависе од извора паљења, затворености и физичке величине експеримента него границе запаљивости.
- **Способност иницирања и ширења детонације захтева испуњење скупа критичних услова и упркос опсежним истраживањима о овој теми, оне су емпиријске природе.**



# Упоредни преглед

Параметар	Запаљивост (Сагоревање/Deflagration)	Експлозивност (Explosion)	Детонација (Detonation)
Механизам ширења	Молекуларна дифузија и провођење топлоте.	Нагли пораст притиска у затвореном простору.	Ударни талас (компресионо паљење).
Брзина фронта	Подзвучна (<100 m/s, типично <1 m/s).	Подзвучна или звучна брзина гасова.	Надзвучна (1.000 – 3.000 m/s).
Пораст притиска	Мали (константни притисак или спори раст).	Нагао и разоран (5 – 10 bar типично).	Екстреман и тренутан (20 – 100 bar).
Природа таласа	Нема дисконтинуитета притиска.	Дисконтинуитет притиска (ударни талас).	Спрегнут ударни талас и зона реакције.
Границе горња/доња (L/U)	LFL / UFL: Концентрациони опсег за одржавање пламена.	LEL / UEL: Концентрација за разоран пораст притиска.	LDL / UDL: Ужи опсег; потребна већа енергија активације.
Термодинамички процес	Приближно изобарски.	Изохорски (у затвореном суду).	Схарман-Јоугвет-ова тачка.



# Концентрационе границе паљења (flammability/explosive limits)

- Концентрационе границе паљења су граничне вредности концентрације горива у горивој смеши изван којих паљење није могуће.
- Разликују се **две концентрационе границе паљења**:
  - горња и
  - доња.
- Поред тога разликују се и **две врсте концентрационих граница паљења**:
  - у ваздуху и
  - у кисеонику.



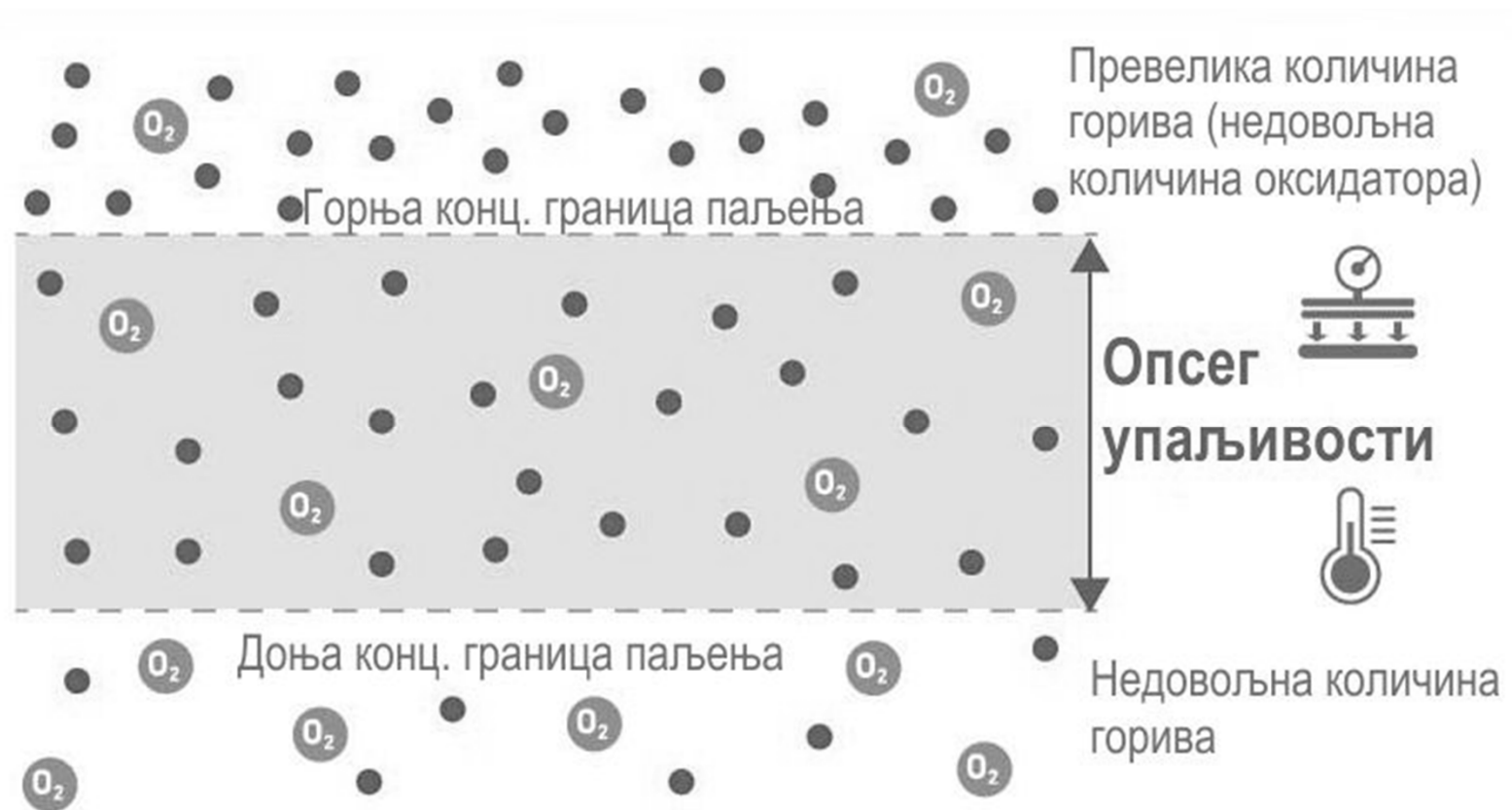
# Концентрационе границе паљења



- Горња концентрациона граница паљења је највећа вредност концентрације горива у горивој смеши изнад које паљење није могуће.
- Доња концентрациона граница паљења је најмања вредност концентрације горива у горивој смеши испод које паљење није могуће.



# Концентрационе границе паљења





# Концентрационе границе паљења



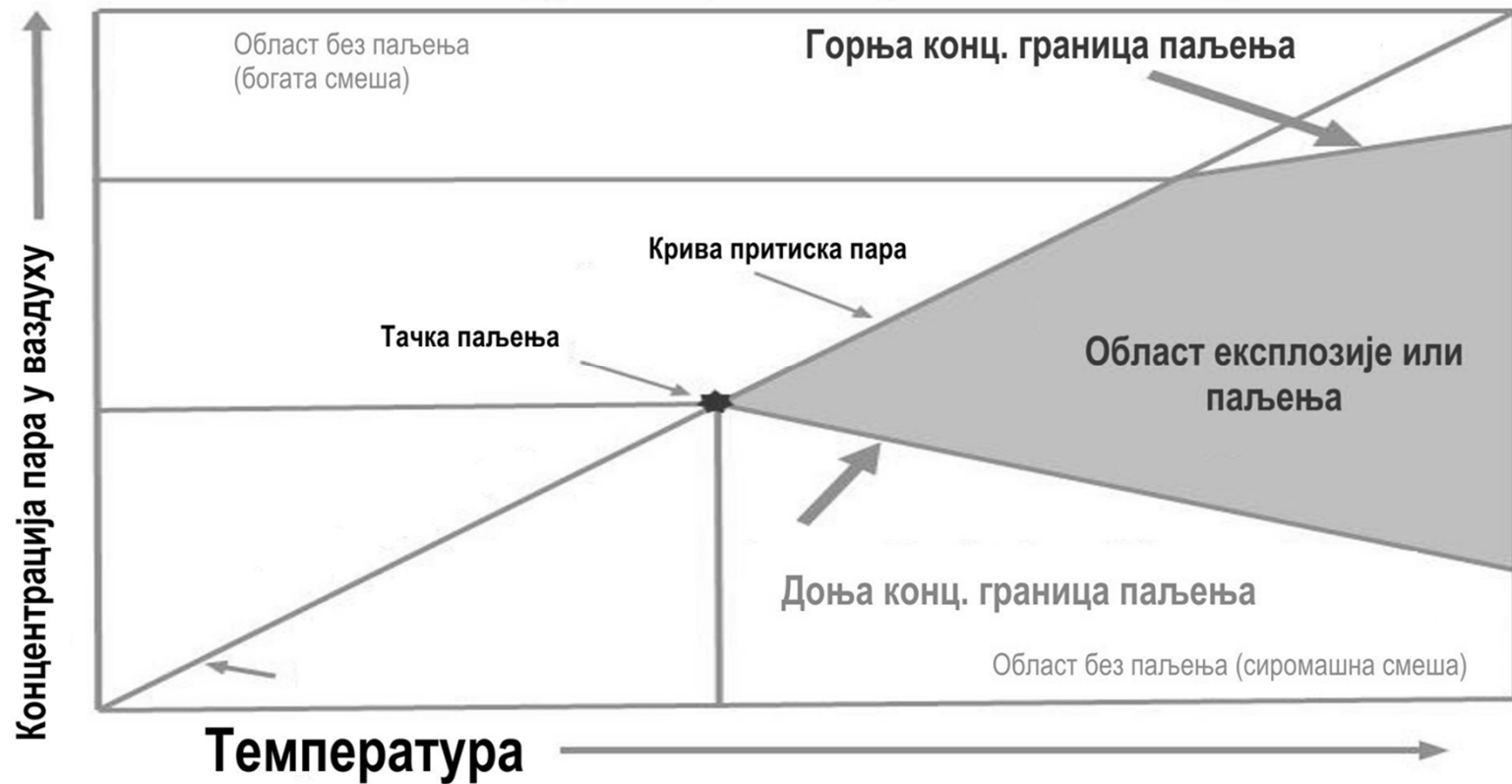


# Концентрационе границе паљења различитих горива у ваздуху

Гориво	Опсег упаљивости у ваздуху (% V/V)	Опсег упаљивости у кисеонику (% V/V)
Метан	5,3 – 14	5,1 – 61
Пропан	2,2 – 9,5	2,3 – 55
Водоник	4 – 75	4 – 94
Угљен моноксид	12,5 – 74	15,5 – 94
Моторни бензин	1,4 – 7,6	–
Гасно уље – еуродизел	1,3 – 6	–
Етанол	3,3 – 19	–
Метанол	6 – 35	–

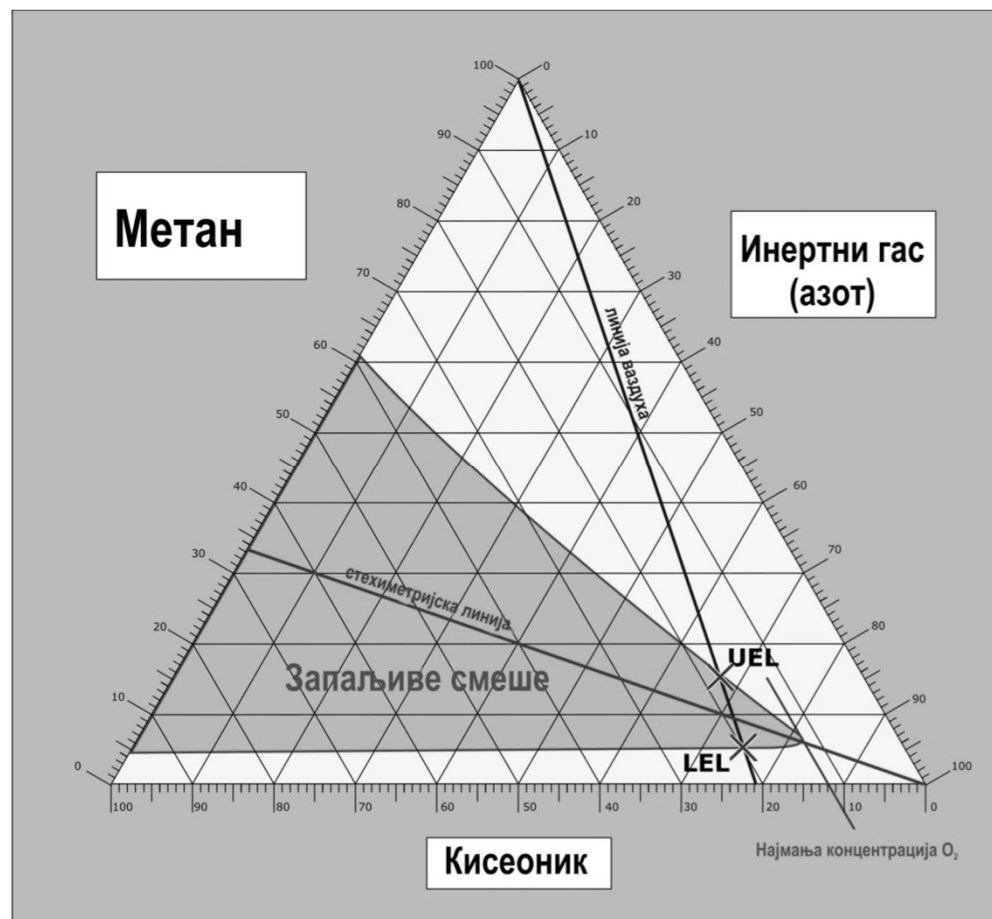


# Концентрационе границе паљења





# Дијаграм запаљивости за метан



Сагоревање М, школска 2025/26,  
4, предавање



# Концентрационе границе паљења (утицајне величине)



- Најважније утицајне величине су:
  - присуство инертних гасова,
  - притисак и
  - температура.
- Стандардно се дају за  $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  и атмосферски притисак  $p = 101,3 \text{ kPa}$ .



# Концентрационе границе паљења за смешу гасова



- Изрази за израчунавање конц, граница паљења  
смеше гасова:

$$L_D = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{L_{Di}}} \quad , \quad L_G = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{L_{Gi}}}$$

- У случају присуства инертних гасова, **мора се кориговати само ГОРЊА** конц, граница паљења!!!