



# Сагоревање М



---

# Сагоревање течних горива

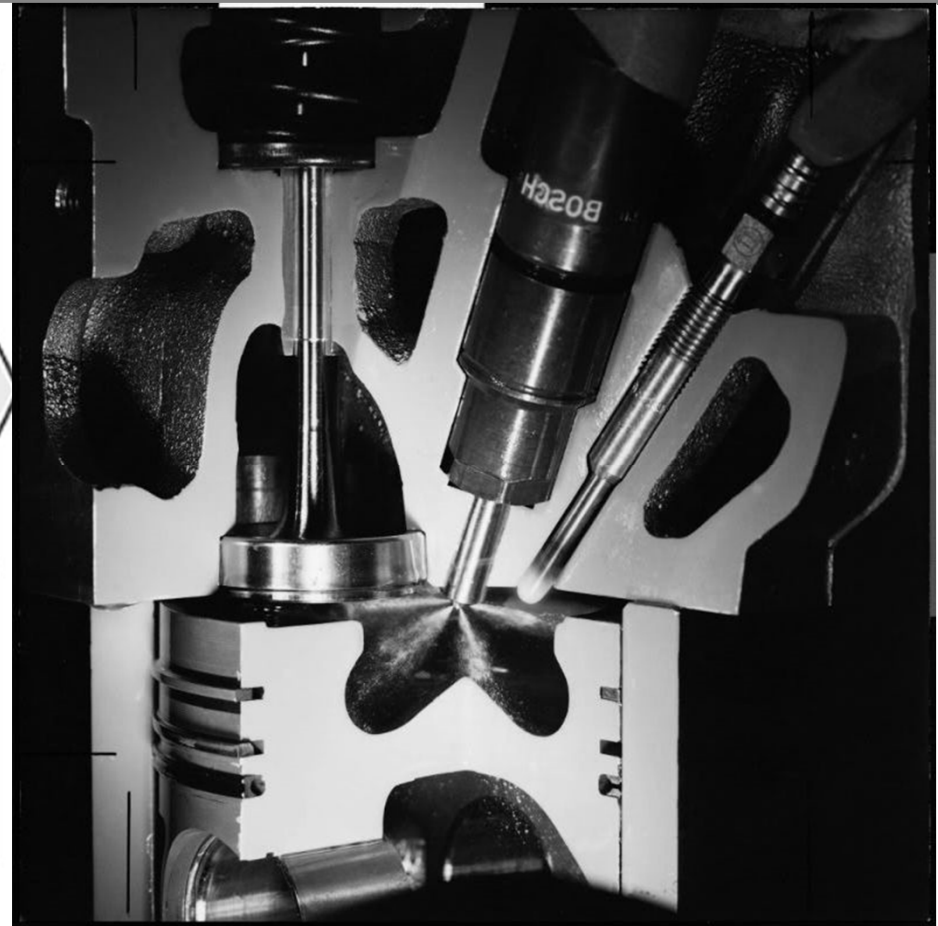
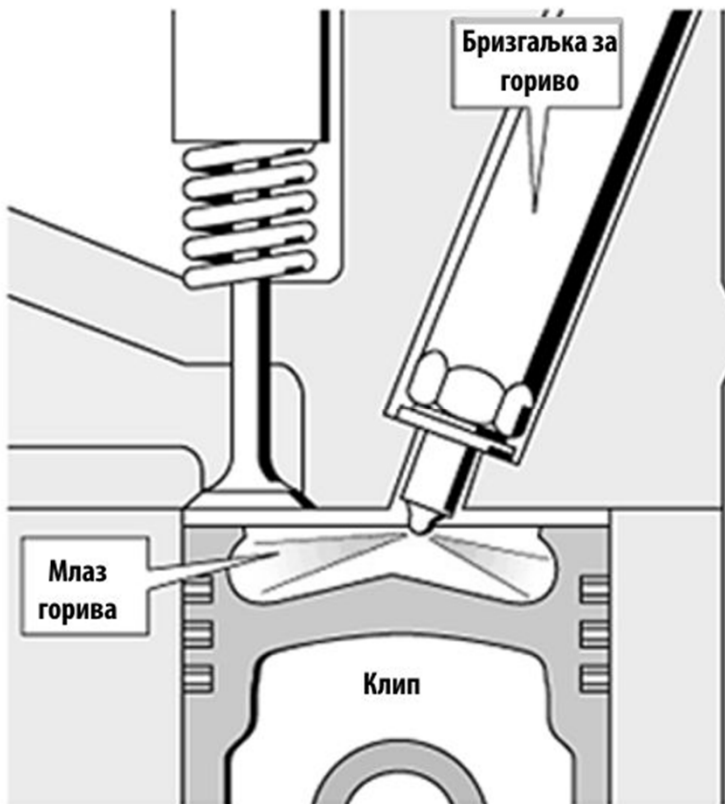


# Како сагорева течено гориво?

- **Дифузионо!**
- **Прво испаравање, затим образовање гориве смеше и коначно сагоревање капљице или млаза капљица.**
- **Примери: Diesel мотори, ракете, гасне турбине, котлови и пећи, индустријски грејачи с горионцима на течено гориво.**
- **Једини пример кинетичког сагоревања течног горива је сагоревање моторног бензина у комори за сагоревање Otto мотора.**

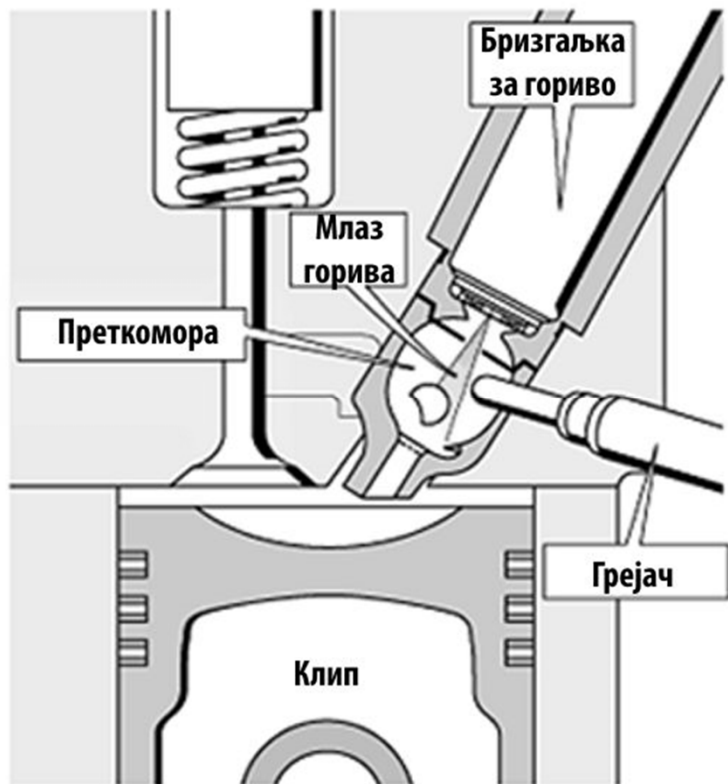


# Diesel motor – непосредно (директно) убризгавање горива



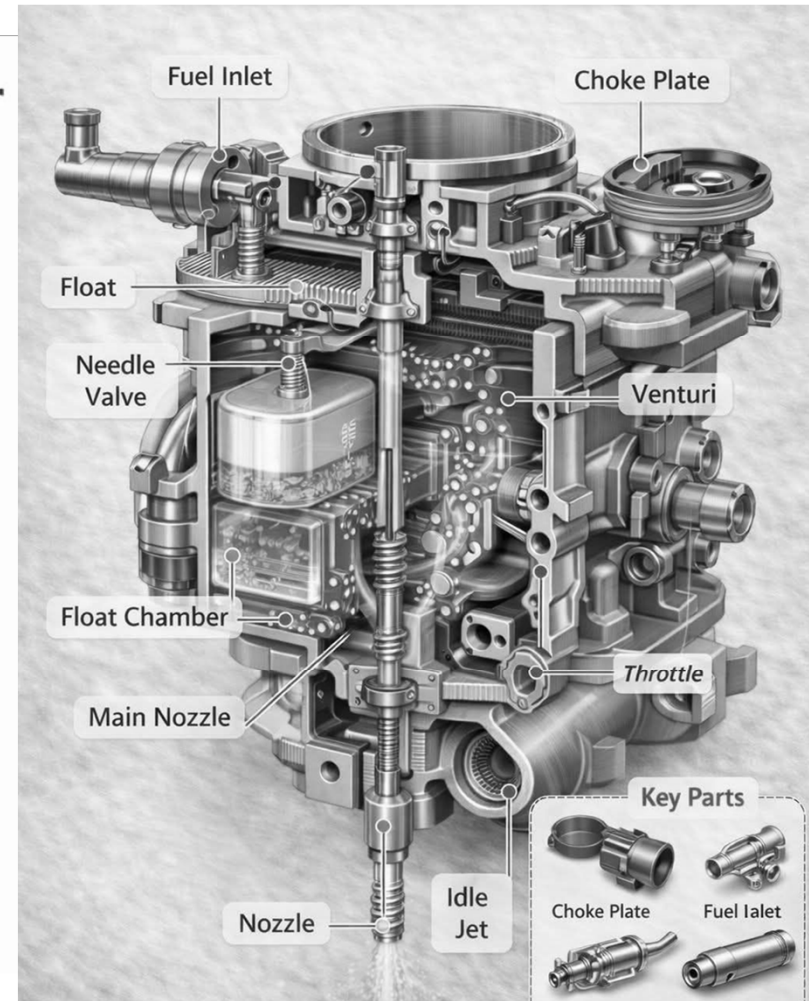
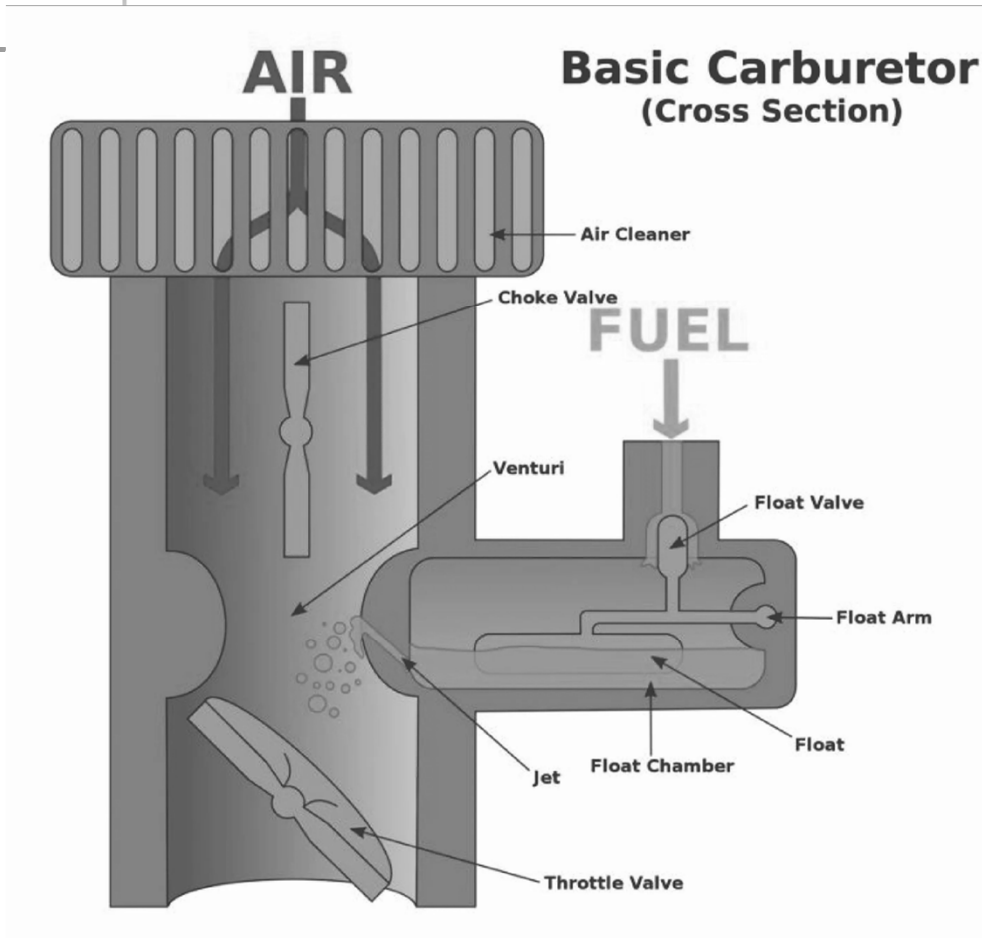


# Diesel мотор – посредно (индиректно) убризгавање горива



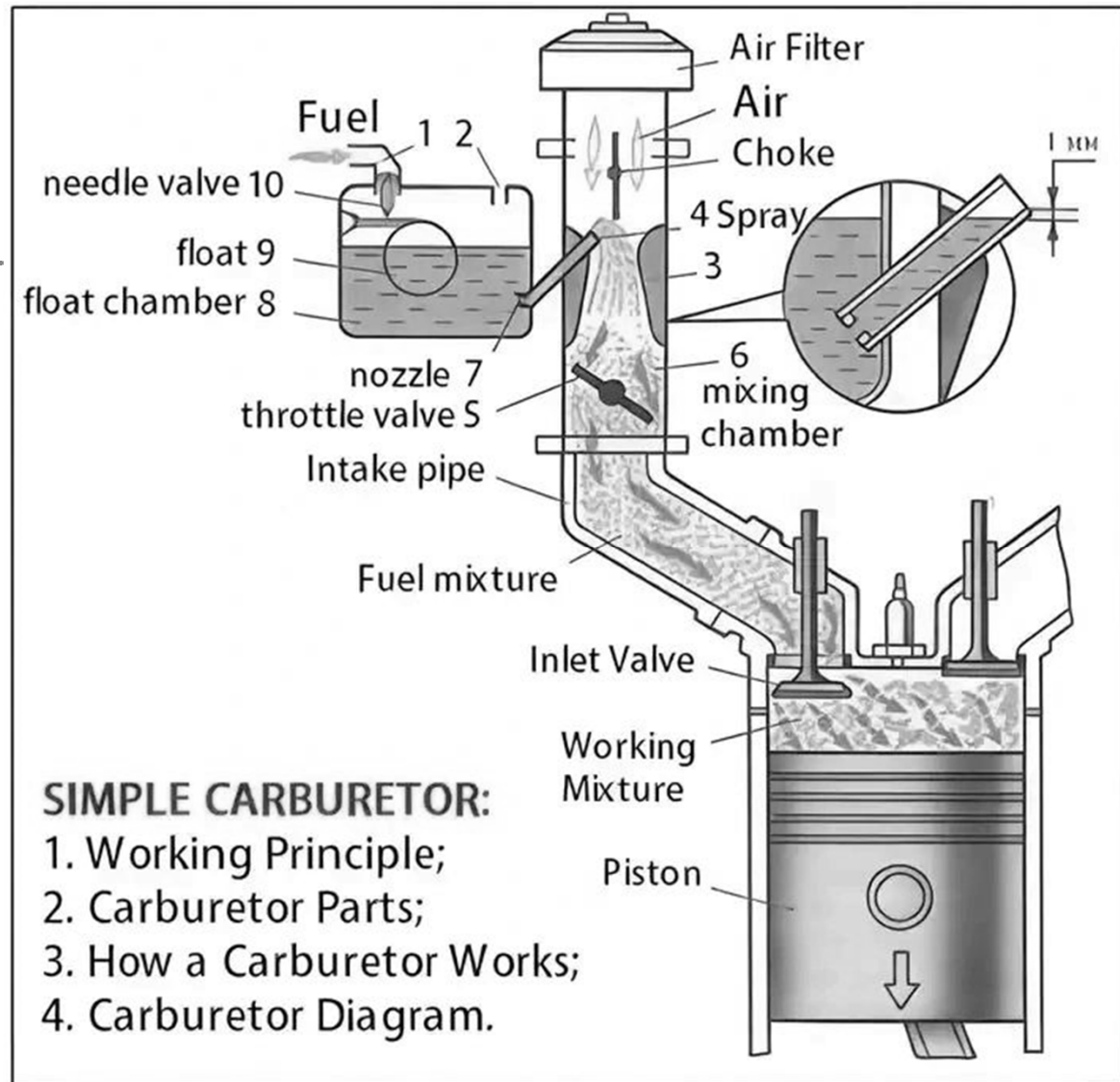


# Otto motor – карбуратор (распршивач)





# Otto motor – карбуратор (распршивач) и усисна грana





# Otto motor – посредно (индиректно) убризгавање горива



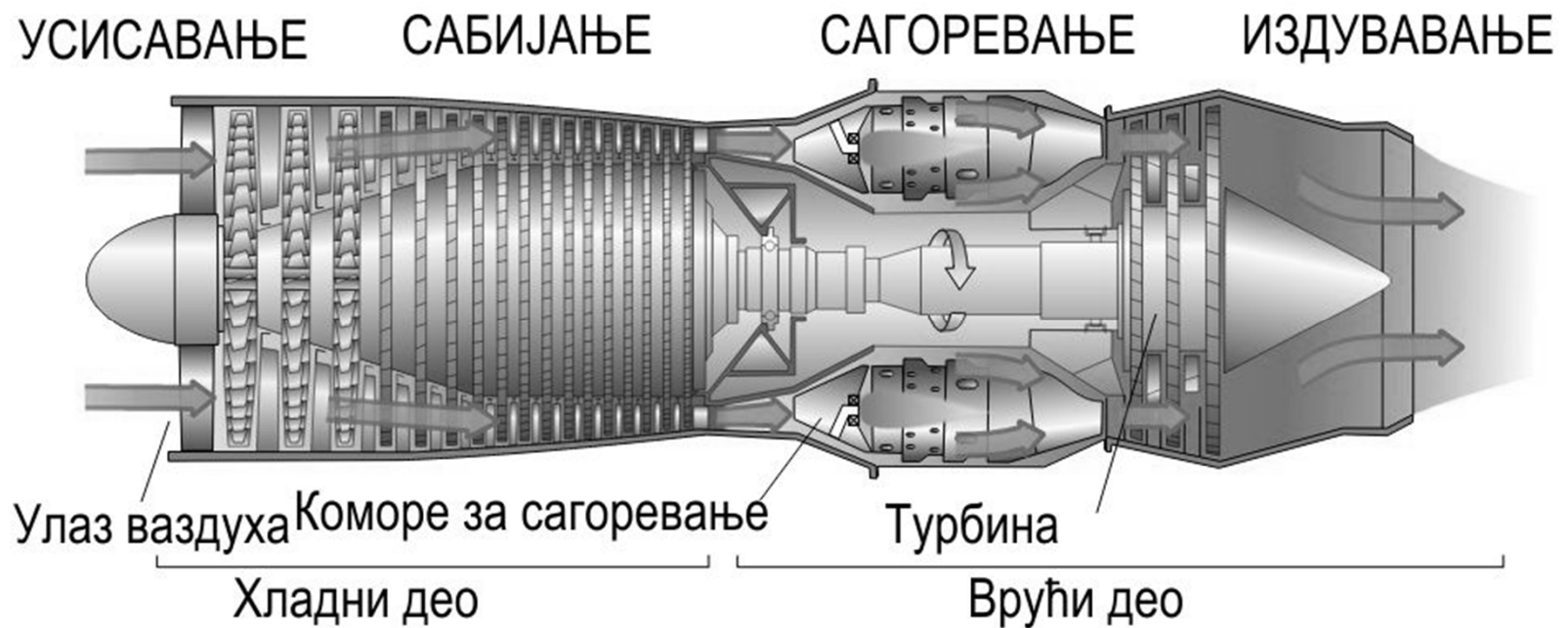


# Otto motor – директно убризгавање горива



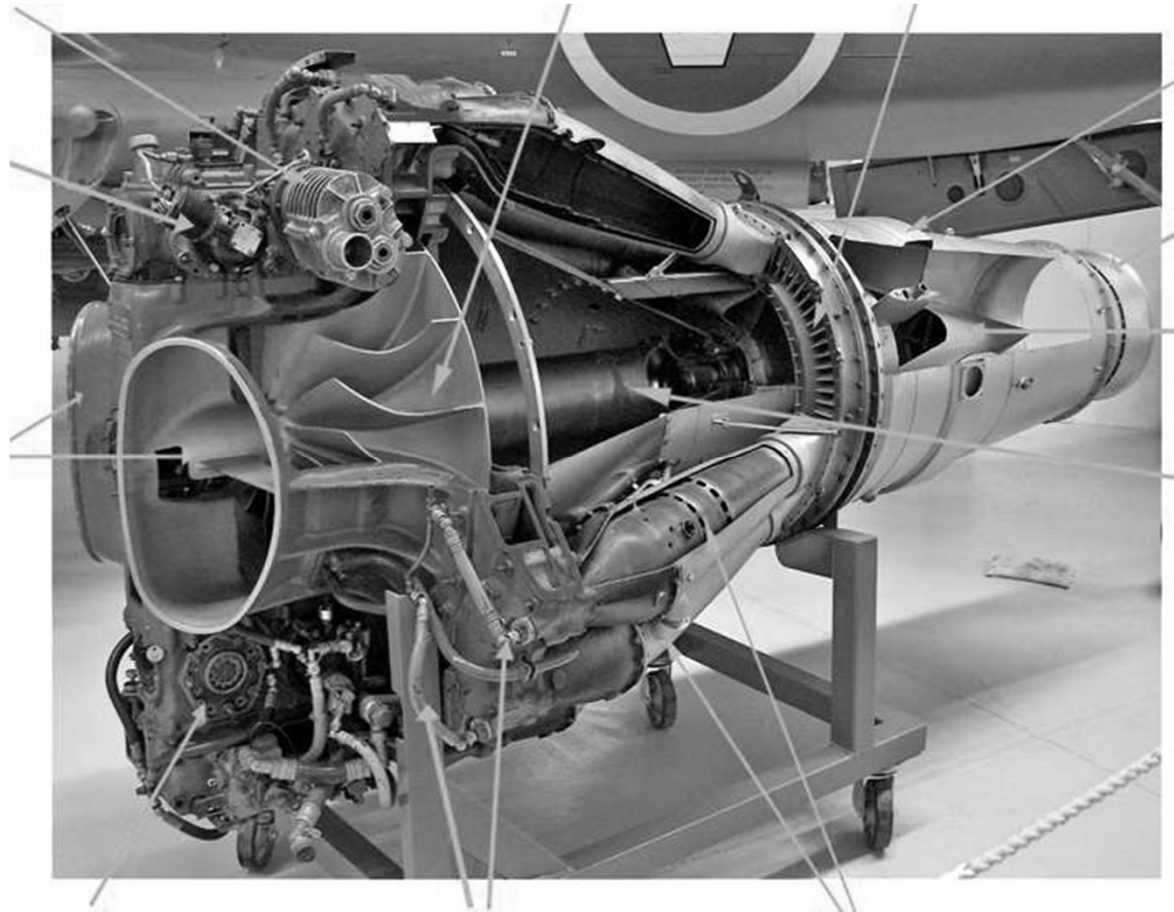


# Гасна турбина





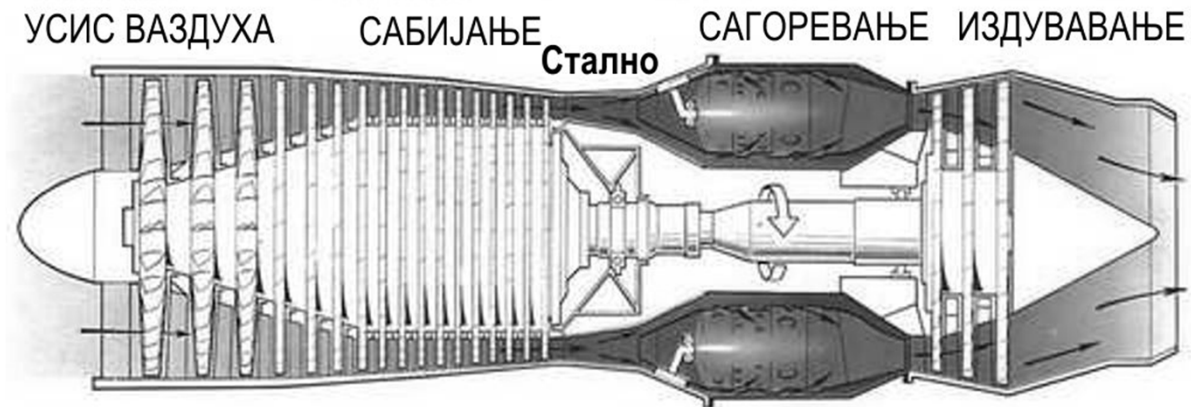
# Гасна турбина



Сагоревање М, школска 2025/26,  
7. предавање

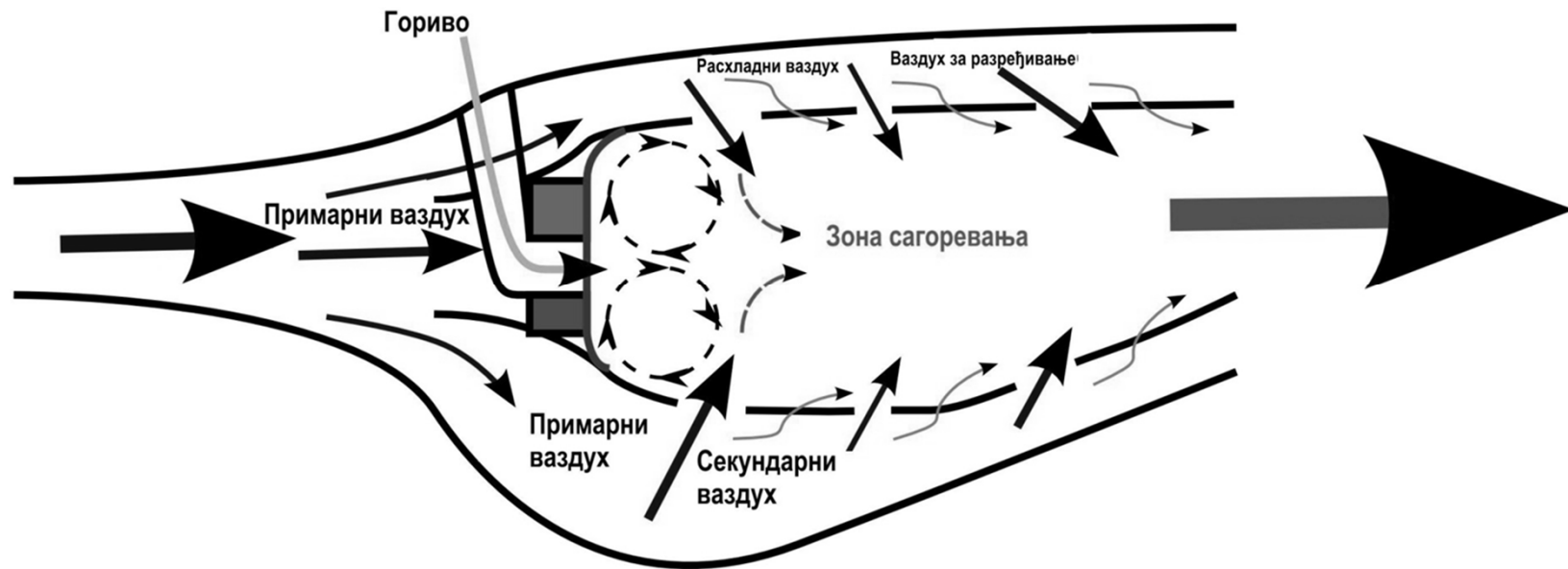


# Гасна турбина и Otto мотор



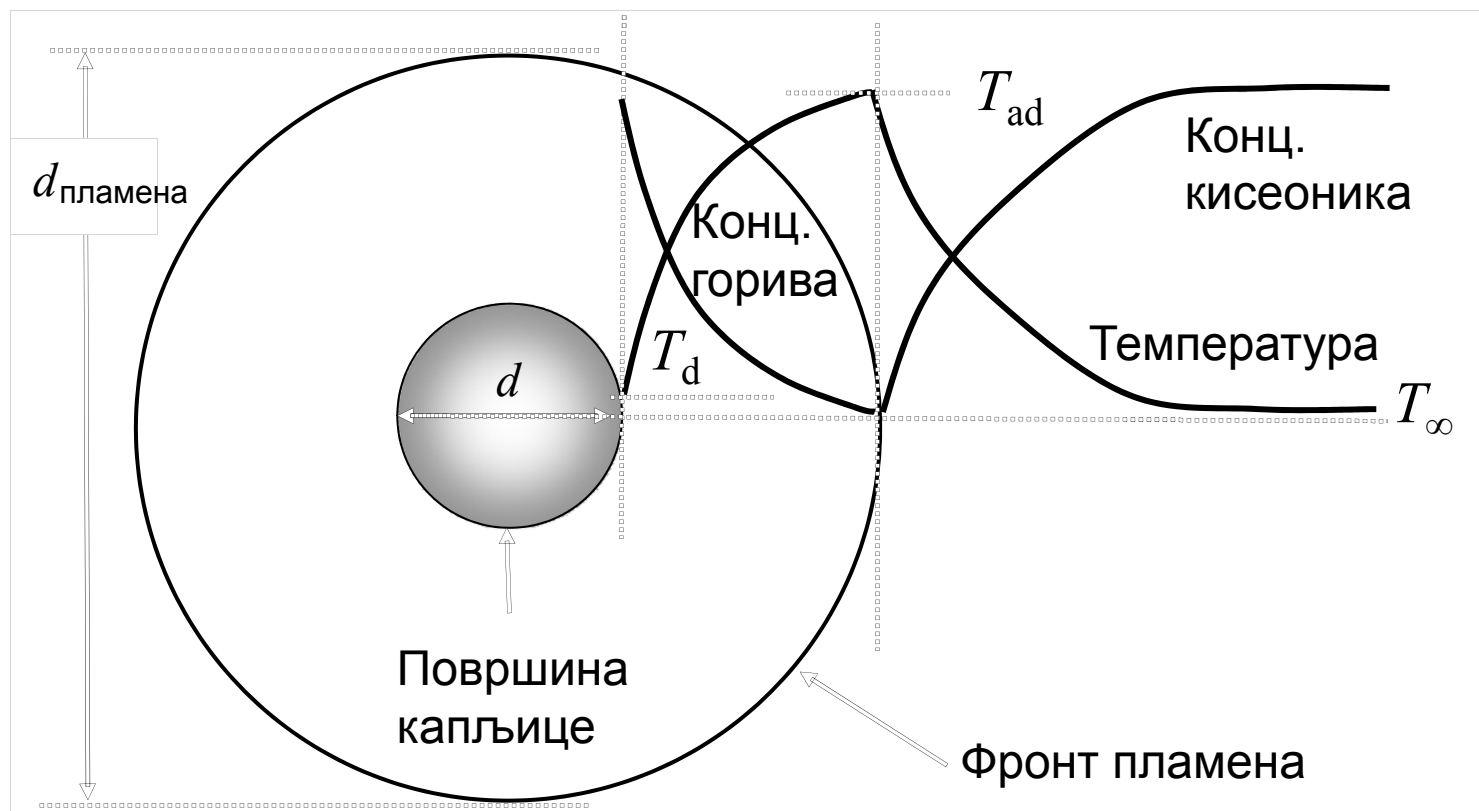


# Горионик гасне турбине





# Сагоревање капљице течног горива





# Сагоревање капљице течног горива (претпоставке)

- Процес се одвија сферно симетрично.
- Процес је квазистационаран,
- Занемарује се принудна и природна конвекција, као и утицај суседних капљица.
- Процес је изобарски ( $p=\text{const}$ ).
- Температура је униформна у целој капљици.
- Топлота из пламена се проводи до површине горива, услед чега оно испарава.
- Гориво конвекцијом/дифузијом продире до фронта пламена, при томе су константни  $D$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$ , а  $Le=1$ .
- Кисеоник дифундује у фронт пламена из околине, сагоревање се одвија на месту стехиометријске смеше.
- Пречник капљице се смањује док она не сагори или се не угаси ( $d(t) \rightarrow d=0$ ).



# Колико брзо сагорева капљица течног горива ( $d^2$ закон)

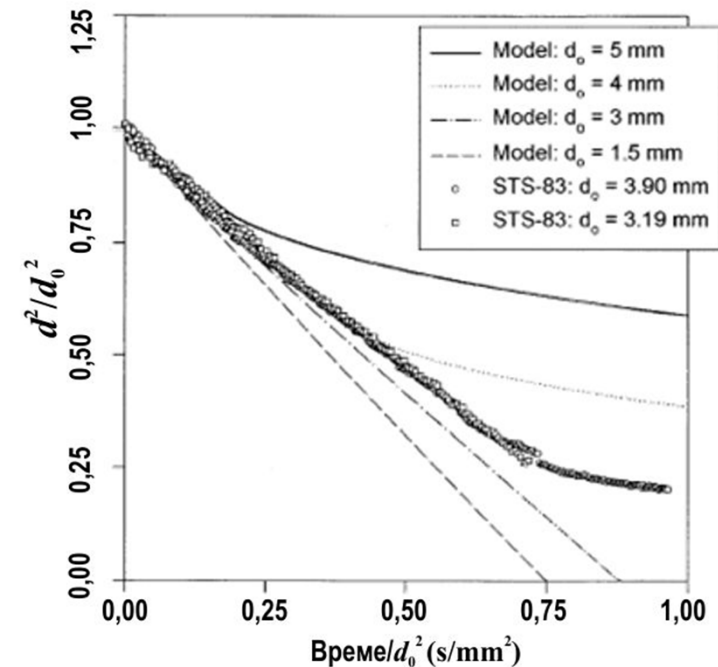
- Сферно-симетрични модел развијен од стране Godsave-а и Spalding-а 1953.

$$[d(0)]^2 - [d(t)]^2 = Kt \Rightarrow K = \frac{8\lambda}{\rho_{\text{gor}} c_p} \ln(1+B)$$

$$B_M \equiv \frac{m_{\text{gor}\infty} - m_{\text{gors}}}{m_{\text{gors}} - 1} \text{ - за пренос масе}$$

$$B_T \equiv \frac{c_p (T_\infty - T_s)}{Q_{\text{isp}}} \text{ - за пренос топлоте}$$

$$\alpha = D \Rightarrow B_T = B_M$$





# Колико брзо сагорева капљица течног горива ( $d^2$ закон)

Шта је шта у једначинама:

- $d(0)$  - пречник капљице у почетном тренутку,
- $d(t)$  - пречник капљице у тренутку времена  $t$ ,
- $K$  - константа брзине сагоревања капљице ( $m^2/s$ ),
- $\lambda$  - топлотна проводност ( $W/m \cdot K$ ),
- $\rho_{gor}$  - густина капљице горива ( $kg/m^3$ ),
- $c_p$  - специфични топлотни капацитет паре горива при конст. притиску ( $J/kgK$ ),
- $Q_{isp}$  - латентна топлота испаравања горива ( $J/kg$ ),
- $T_{\infty}$  - температура околног ваздуха (K),
- $T_s$  - температура на површини капљице (једнака је температури испаравања) (K),
- $B$  - „преносни број“ познатији као Spalding-ов број/кофицијент.



# Време сагоревања капљице течног горива



- Одређује се из услова да је коначни пречник капљице једнак нули, тако да је:

$$t = \frac{d_0^2 \rho_{\text{gor}}}{8 \cdot \rho \cdot D \cdot \ln(1 + B)}$$

- Где је  $\rho$  густина средине у којој се одвија сагоревање.



---

# Сагоревање чврстих горива



# Технологије за сагоревање чврстих горива



- Сагоревање на покретној/непокретној решетки – комад (**Fixed Bed Combustion**) до  $30 \text{ MW}_{\text{th}}$ 
  - Гранулација 5 - 50 mm
  - Брзина загревања – неколико K/s до неколико стотина K/s
  - Време сагоревања – 1 min – 1 h
- Сагоревање у флуидизованом слоју – дробљен (**Fluidized Bed Combustion – FBC**)
  - Гранулација <6 mm (циркулациони), <25 mm (атмосферски)
  - Брзина загревања – 1.000 – 10.000 K/s
  - Време сагоревања – 1 min



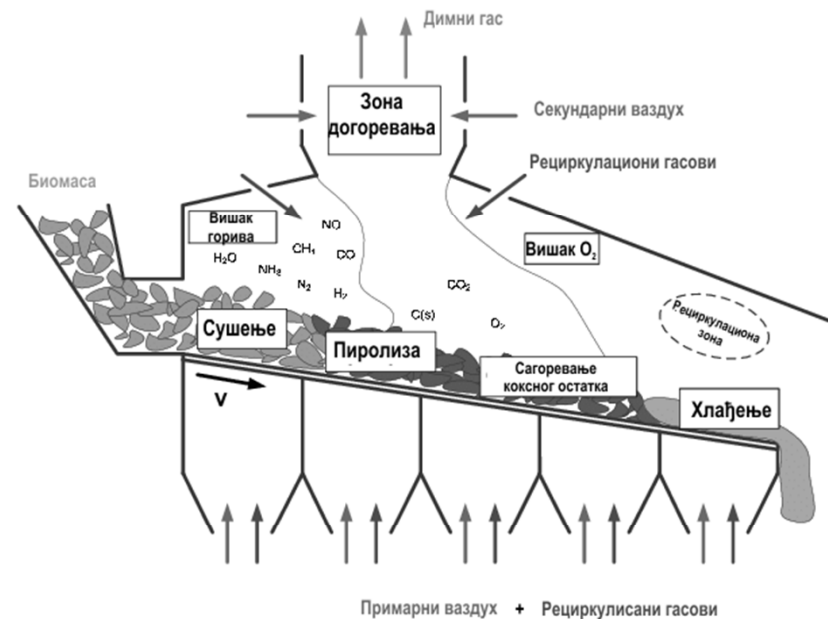
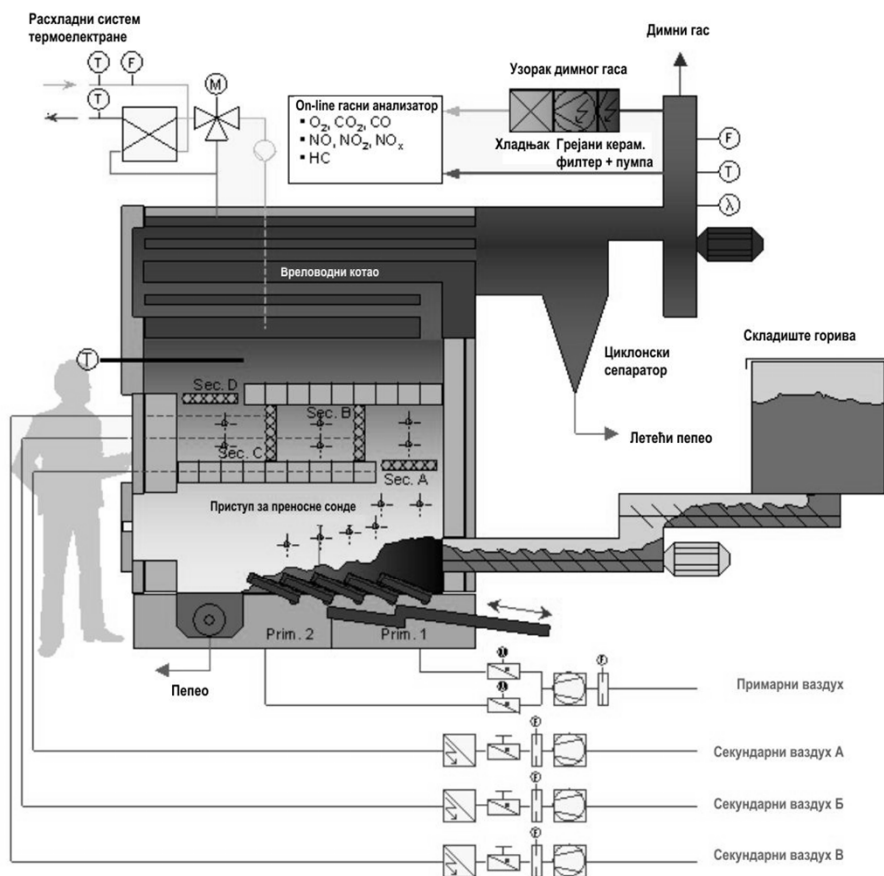
# Технологије за сагоревање чврстих горива



- Сагоревање у лету – у спрашеном стању (Pulverized Coal Combustion – PCC)
  - Гранулација  $<200 \mu\text{m}$  (за лигните  $<90 \mu\text{m}$ )
  - Брзина загревања –  $100.000-1.000.000 \text{ K/s}$
  - Време сагоревања –  $1 \text{ s}$



# Сагоревање на покретној решетки (схема)





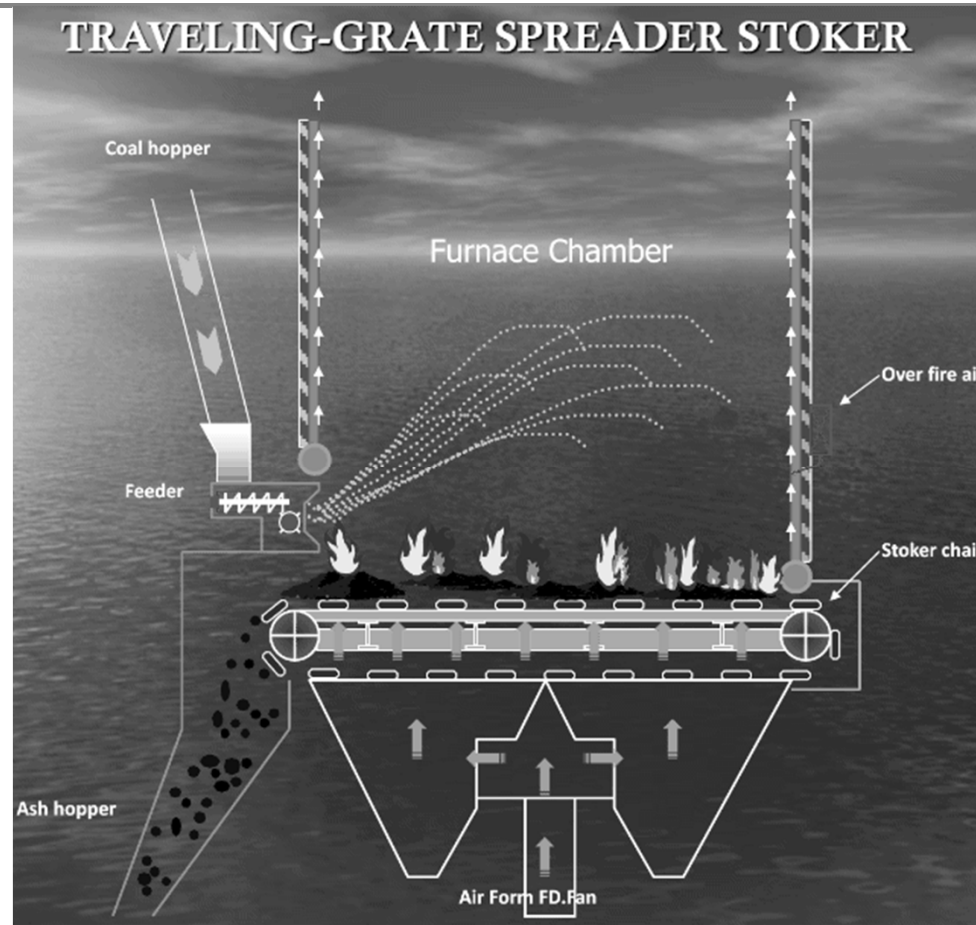
# Сагоревање на покретној решетки (стварни изглед)



Сагоревање М, школска 2025/26,  
7. предавање



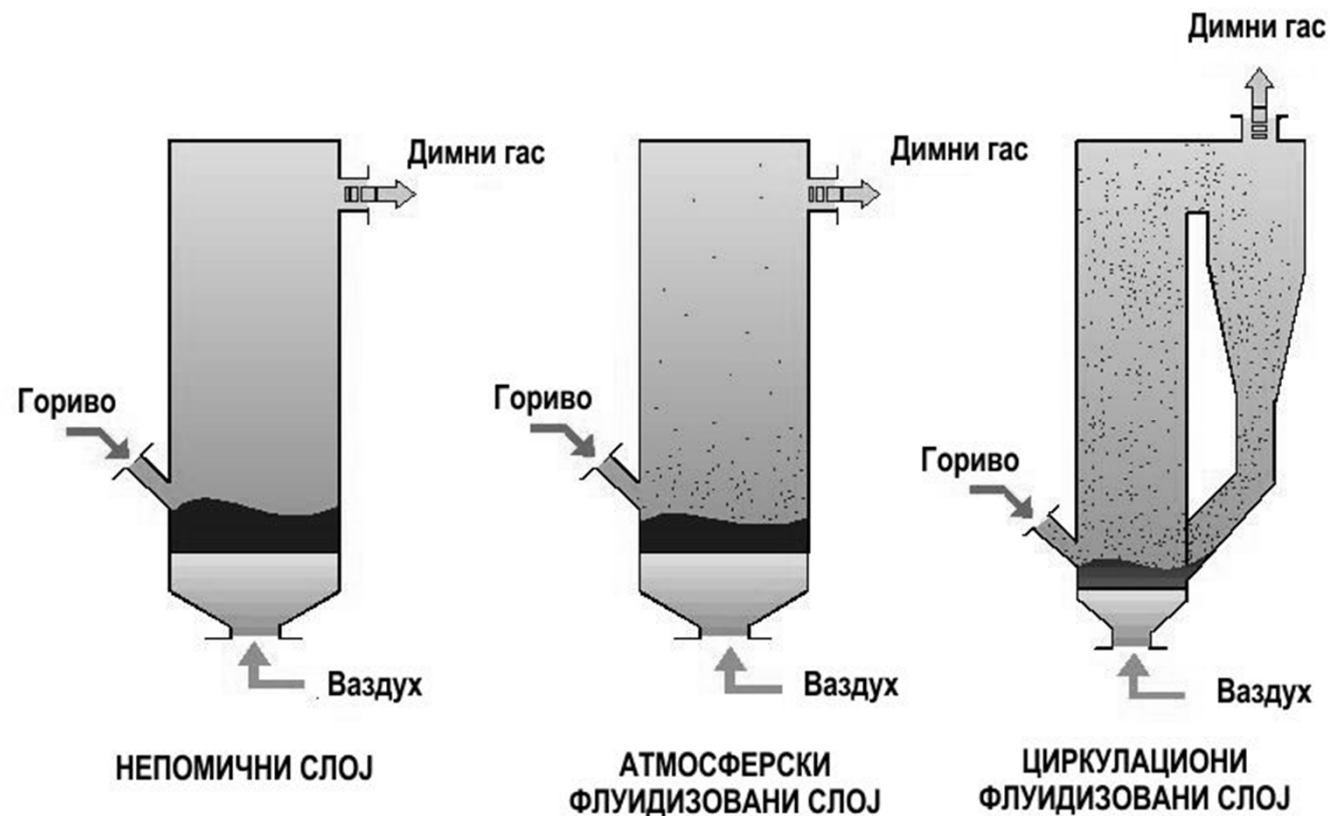
# Сагоревање на покретној решетки (анимација)



Сагоревање М, школска 2025/26,  
7. предавање



# Сагоревање у флудизованом слоју (врсте)





# Сагоревање у флудизованом слоју ✓ (врсте и основна предност)

Врсте:

- 1-ва генерација – атмосферски (Bubbling-Bed Combustion – BBC),
- 2-га генерација – циркулациони (Circulating Fluidized Bed Combustion – CFBC),
- 3-ћа генерација – под притиском (Pressurised Fluid Bed Combustion – PFBC).

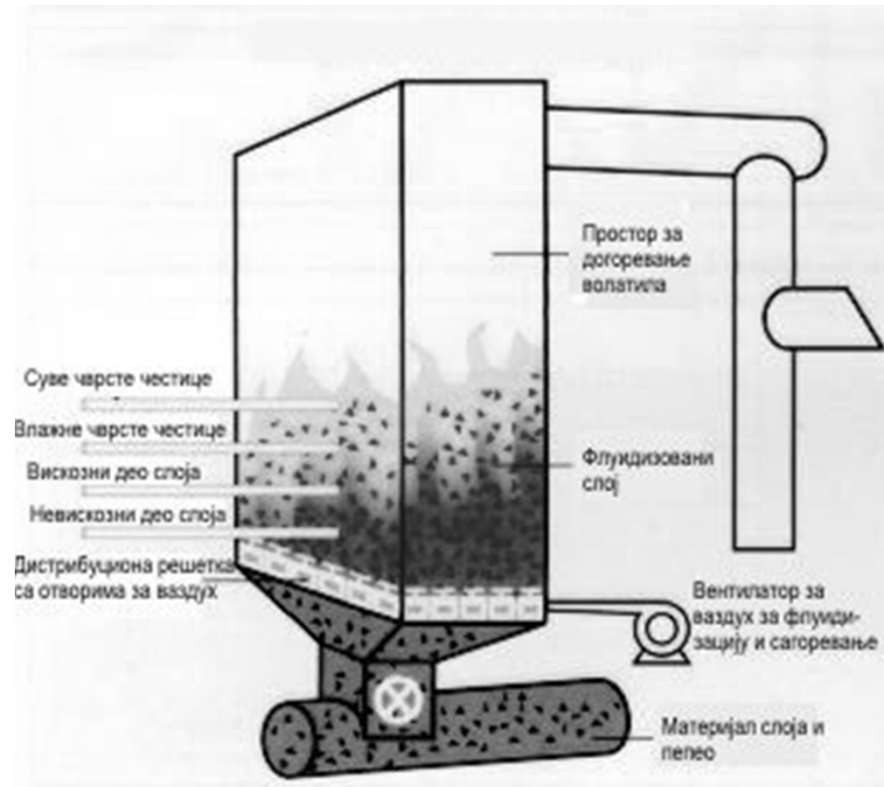
Основна предност - испуњење критеријума 3Т:

- температура (довољно висока),
- турбуленција (довољно интензивна),
- време (time – довољно дуго).



# Сагоревање у флудизованом слоју (атмосферски)

- Обично (најстарији начин – атмосферски) ложиште за сагоревање у флуидизованом слоју се састоји од дистрибуционе плоче на којој се налазе отвори кроз које се удувава носећи гас (ваздух) и усправних зидова који образују призму (цилиндар или квадар).





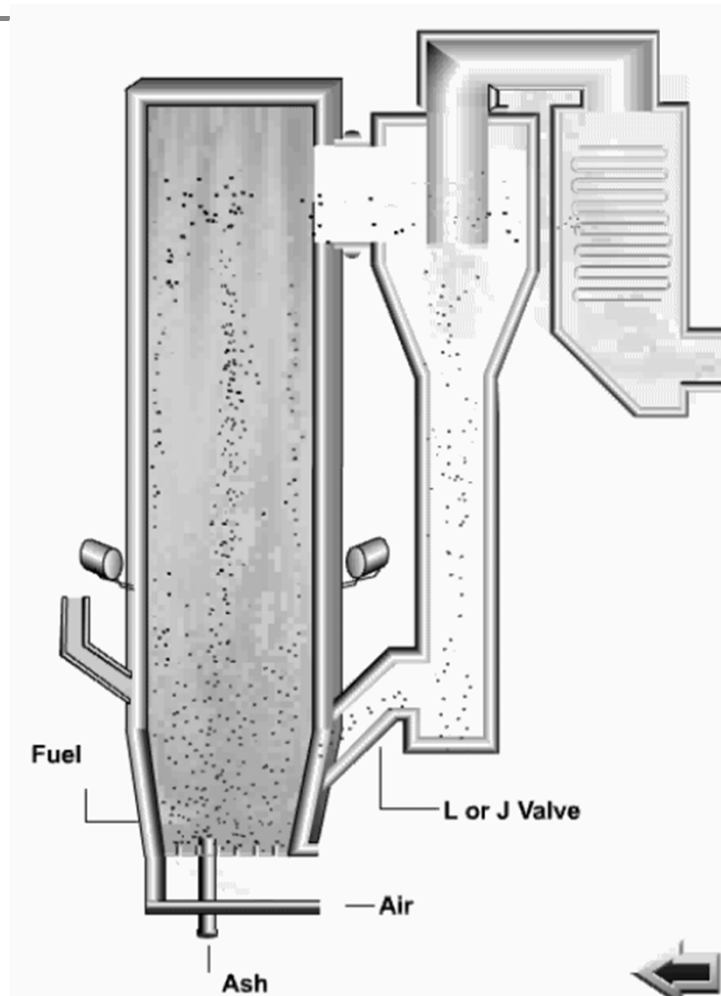
# Сагоревање у флудизованом слоју (циркулациони)

- Материјал слоја и гориво круже кроз ложиште и циклонски одвајач (сепаратор).





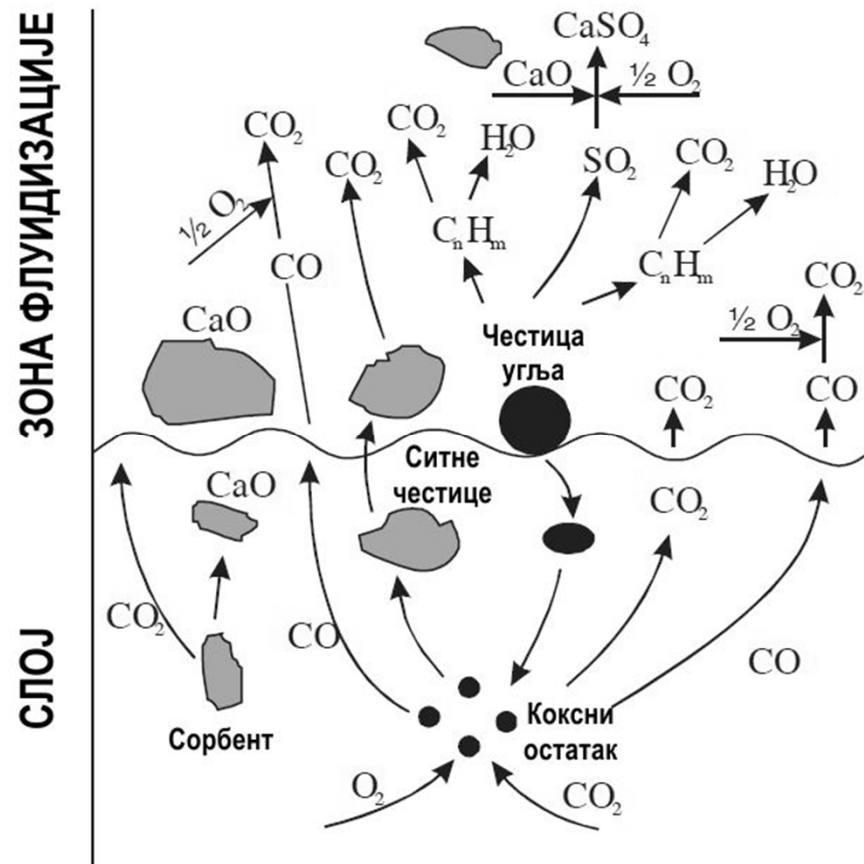
# Сагоревање у флудизованом слоју (анимација)



7. предавање

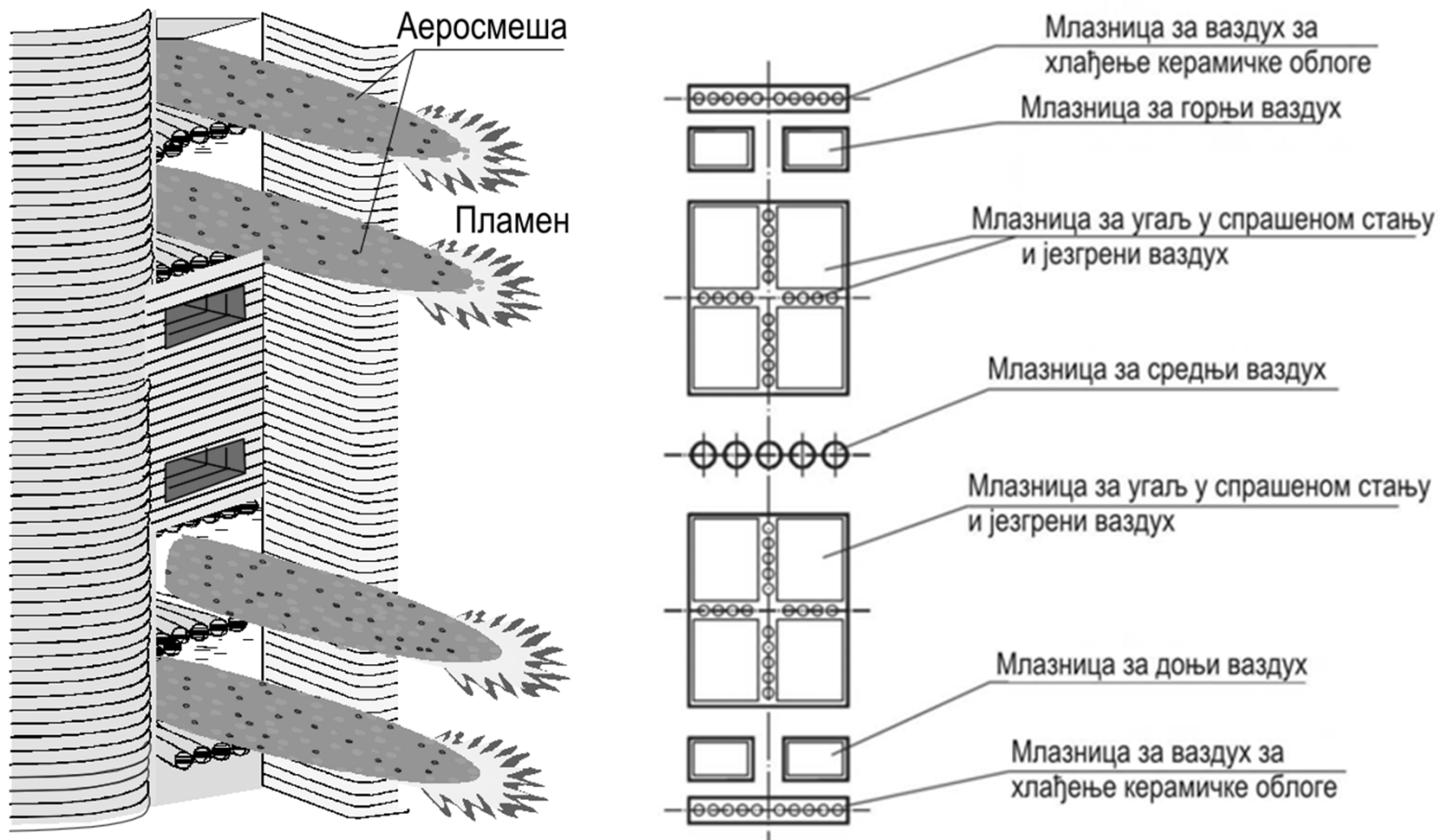


# Сагоревање у флудизованом слоју (фазе сагоревања)



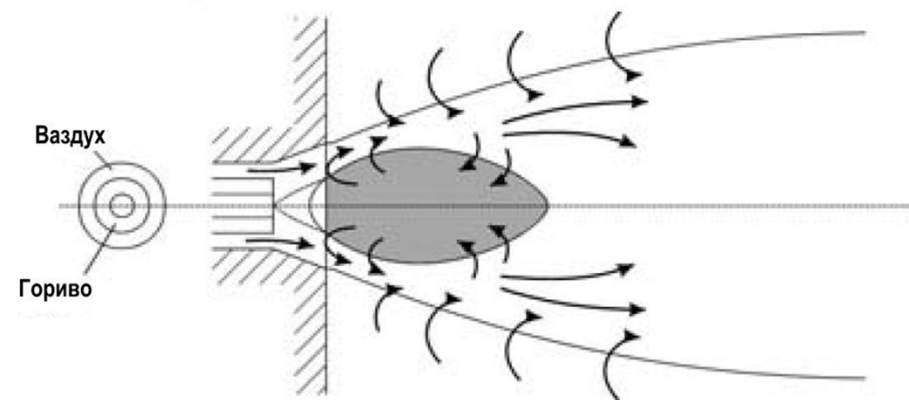
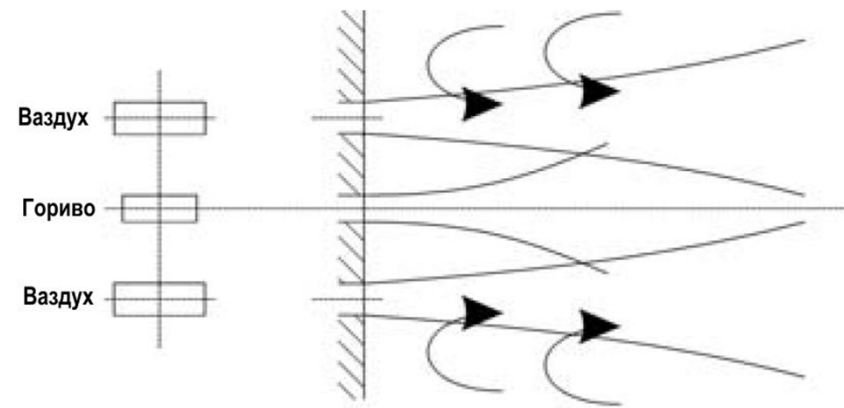
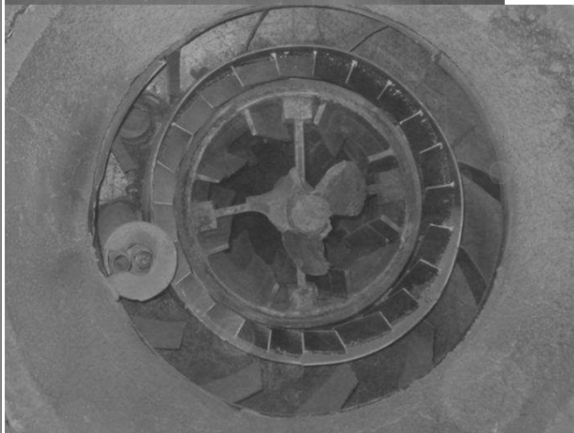


# Сагоревање у лету (принцип рада)





# Сагоревање у лету (примери горионика)



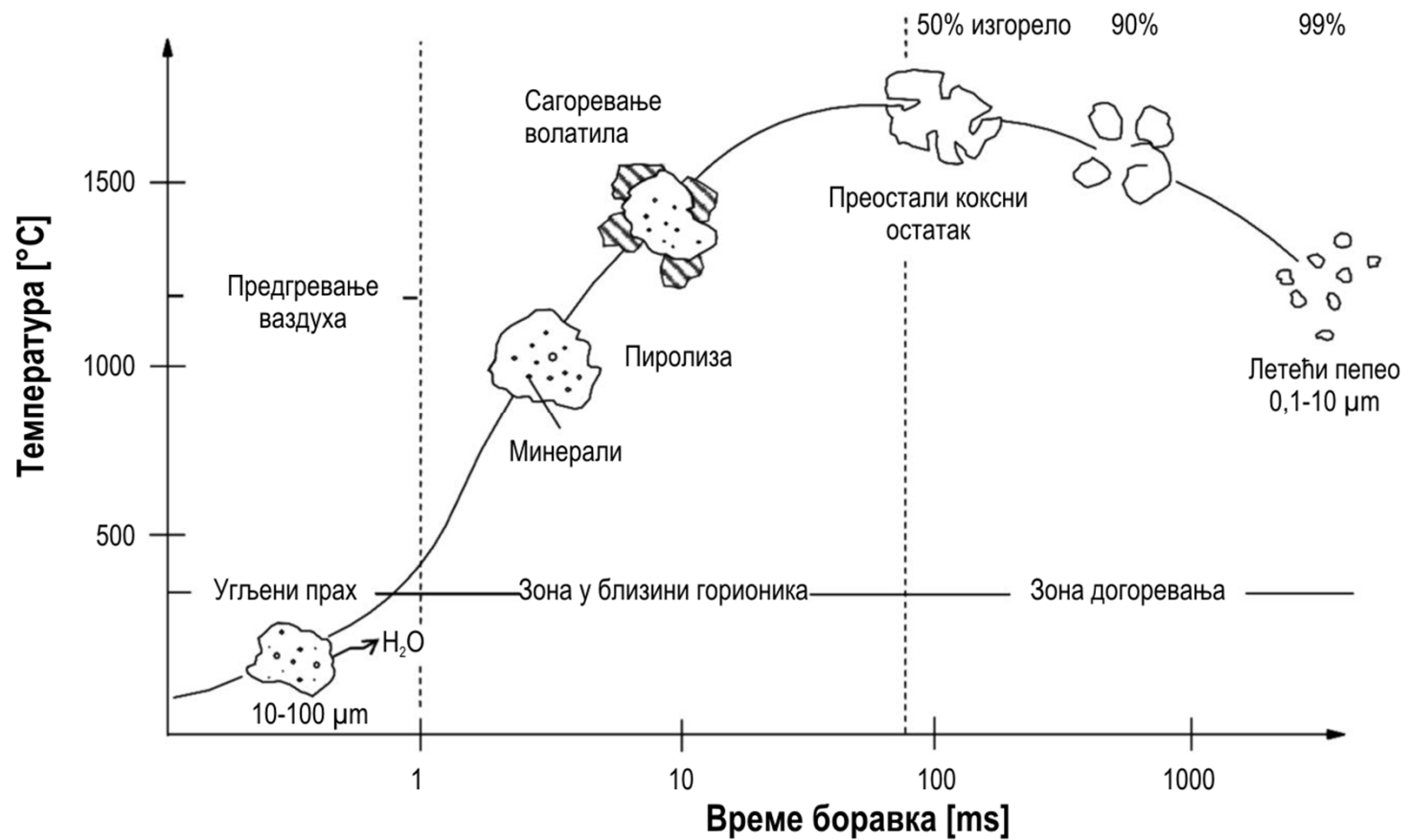


# Сагоревање у лету (структура пламена)





# Сагоревање у лету (фазе сагоревања)

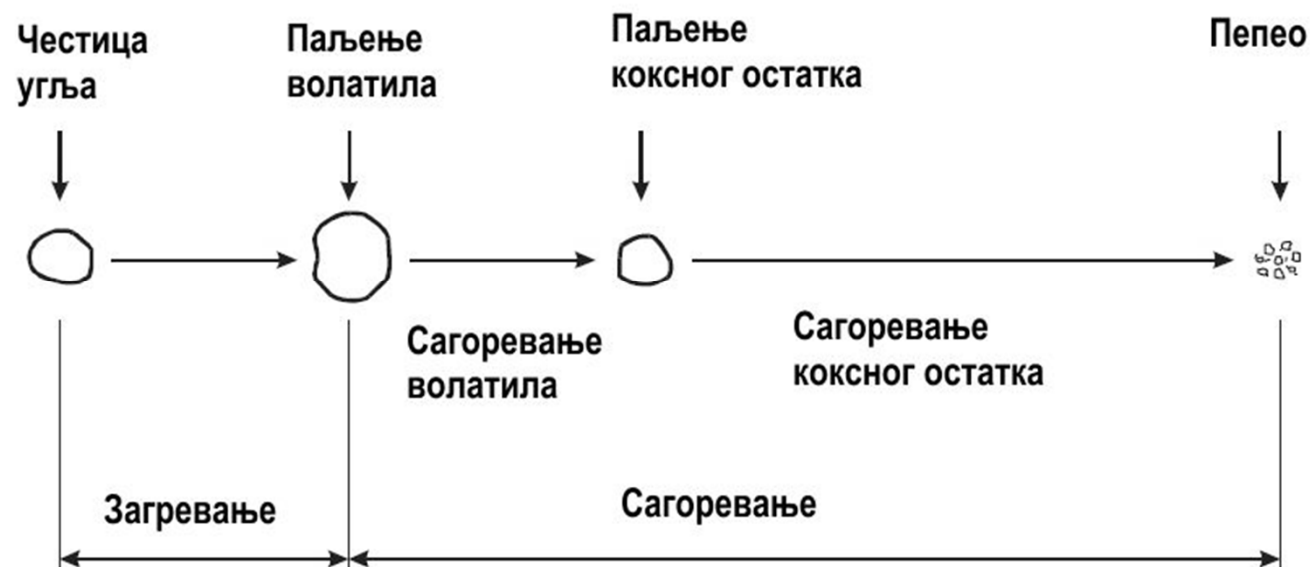




# Сагоревање у лету (фазе сагоревања)

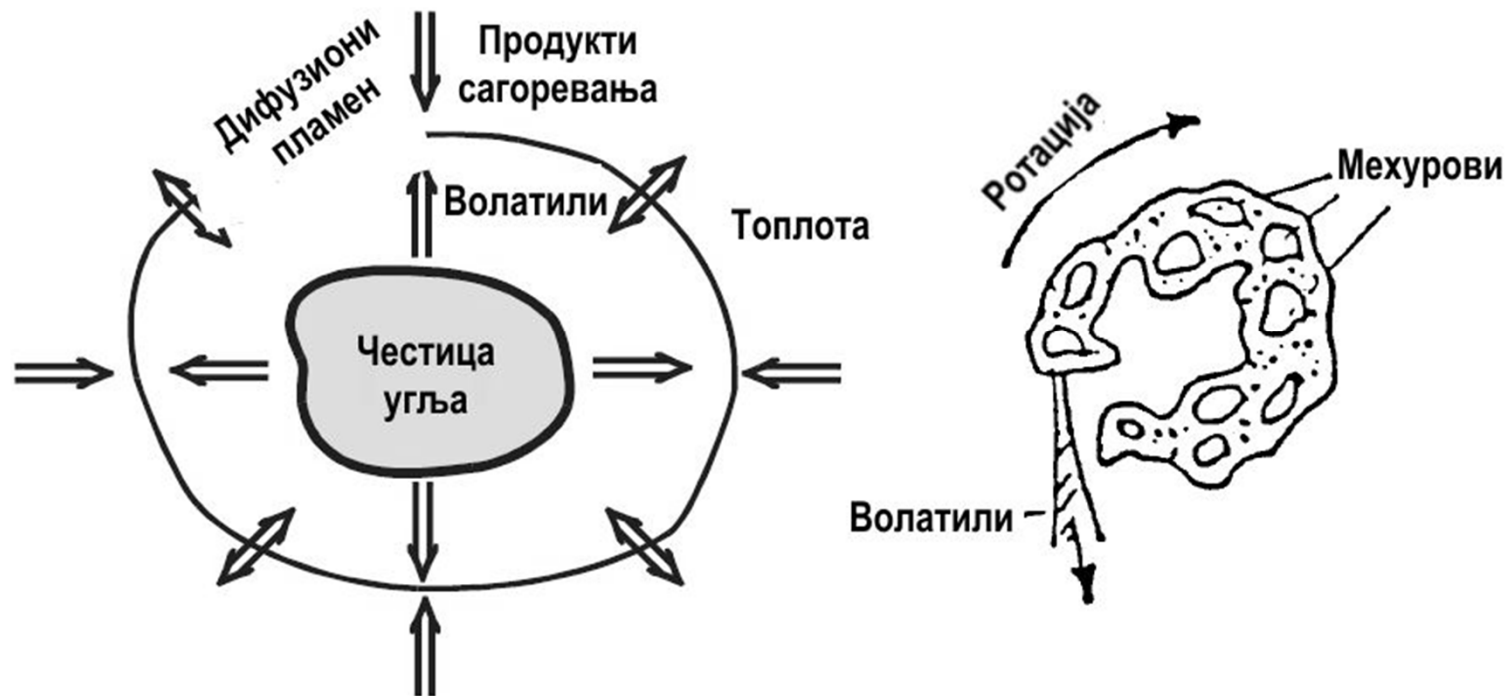


1. Закашњење паљења волатила.
2. Паљење и сагоревање волатила.
3. Закашњење паљења коксног остатка.
4. Паљење и сагоревање коксног остатка.



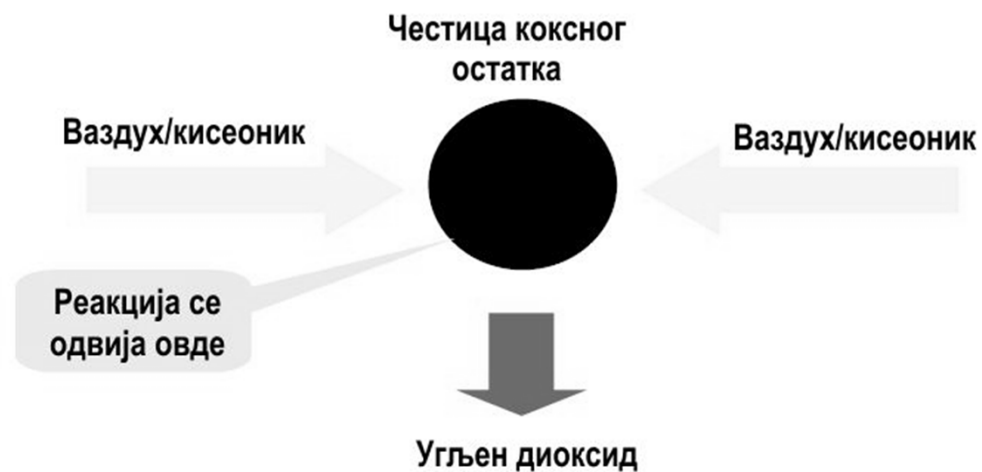


# Механизми ослобађања волатила





# Једноставни модел сагоревања честице коксног остатка



Најважнији утицајни чиниоци на брзину сагоревања:

## 1. Хемијски:

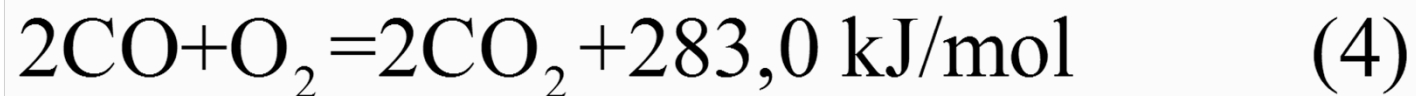
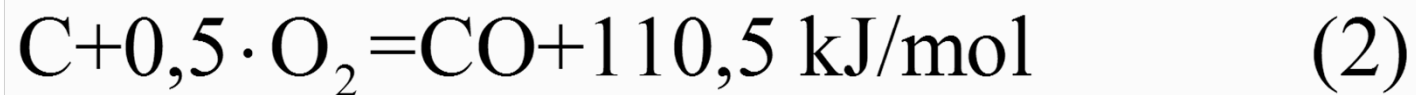
Кинетика реакције оксидације (температура, концентрација кисеоника).

## 2. Физички:

Транспорт кисеоника до површине честице коксног остатка.

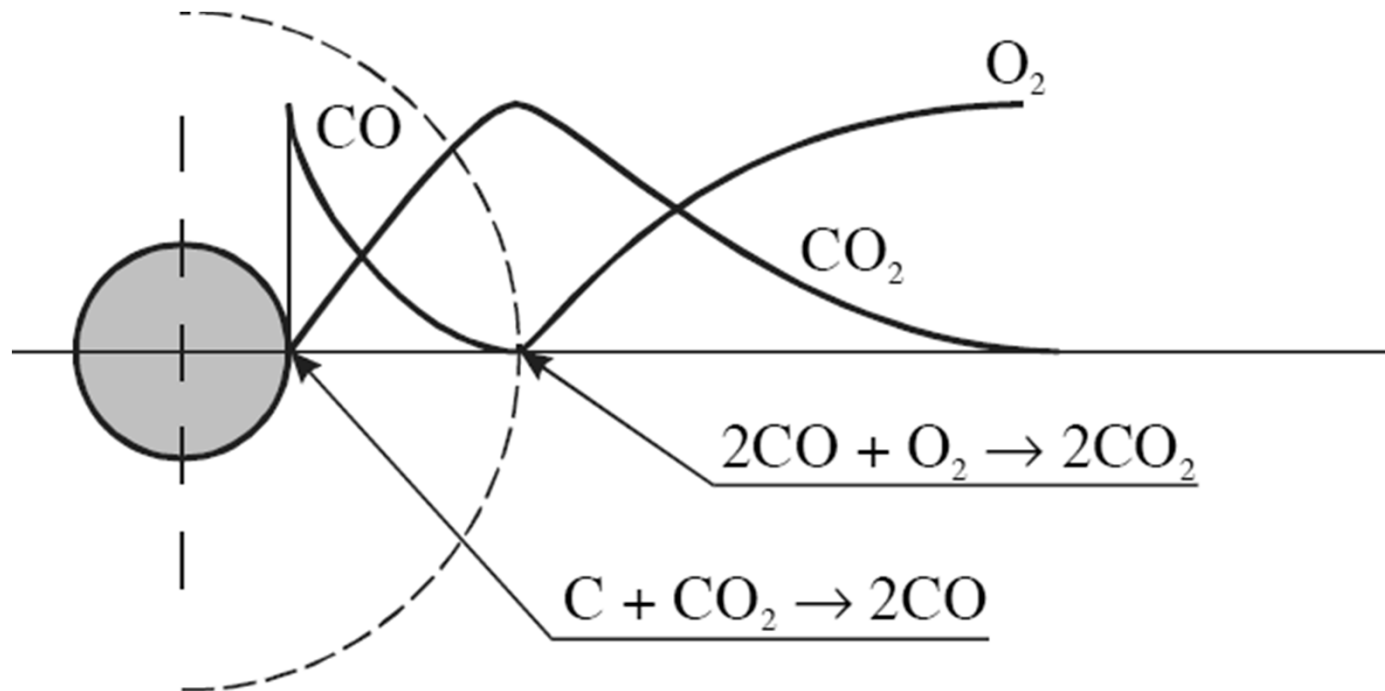


# Основне хемијске реакције при сагоревању коксног остатка



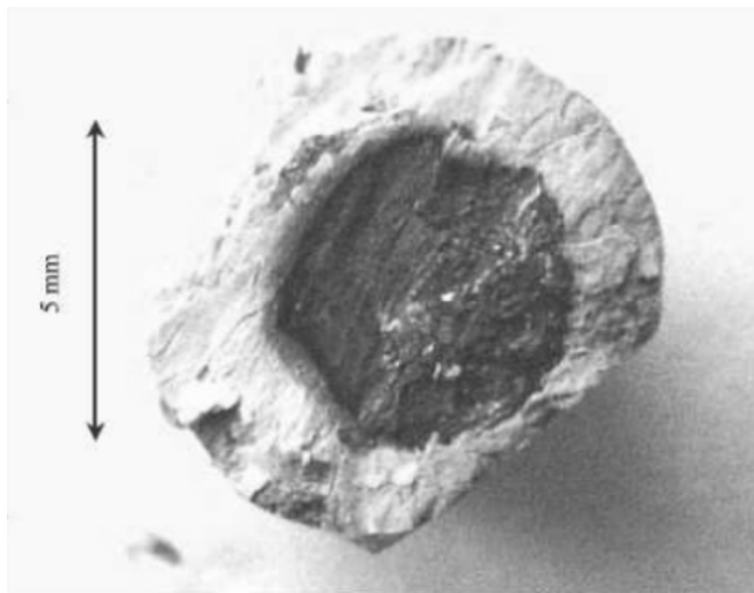


# Расподела примарних и секундарних продуката при сагоревању коксног остатка

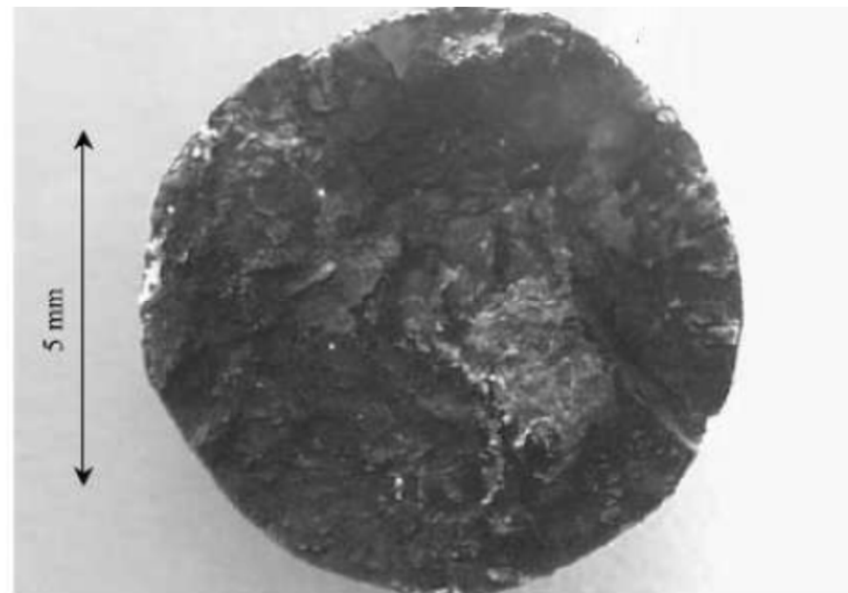




# Утицај температуре на ток сагоревања чврсте честице угља



650 °C



450 °C