



Difuze v procesu hoření



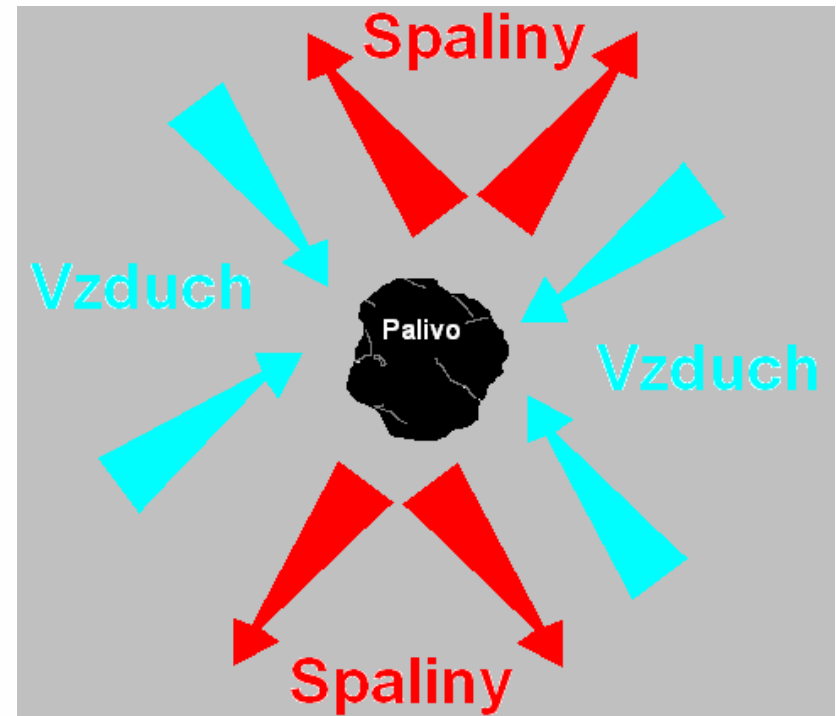
Fyzikální podmínky hoření

Základní podmínkou nepřetržitého průběhu spalovací reakce je přívod reagentů (paliva a vzduchu) do ohniště a zároveň odvod produktů hoření (spalin).

Pro dosažení optimálního průběhu hoření, je nutno zajistit, aby se reagenty dostaly na správné místo ve správný čas a v potřebné koncentraci. Tyto podmínky představují fyzikální děj, nazývaný jako **přenos hmoty**.



Vzhledem k jednodušší manipulaci se jedná vždy o transport spalovacího vzduchu (okysličovadla) k částicím paliva.

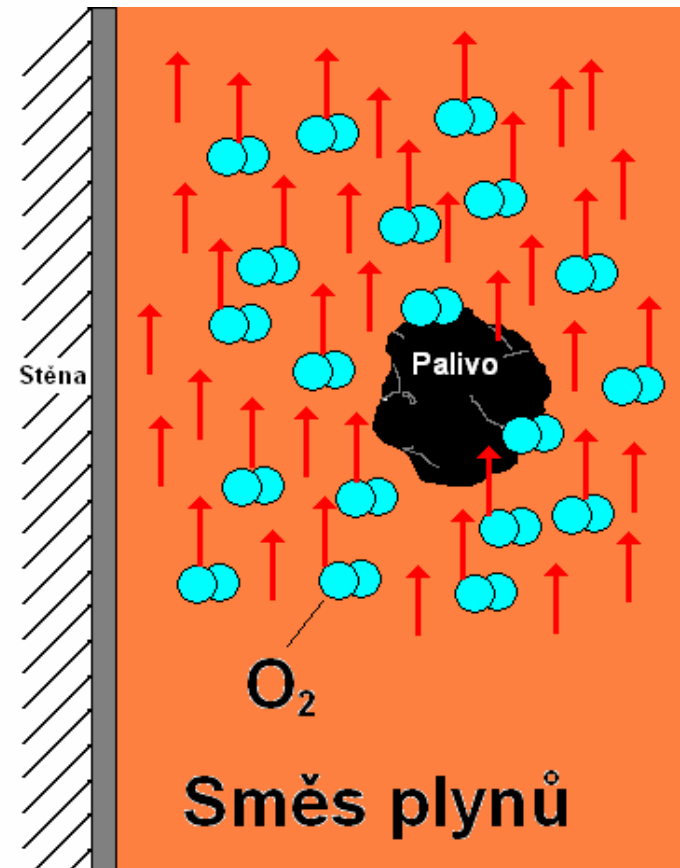


V ustáleném režimu spalování musí být rychlost reakce rovna rychlosti přívodu kyslíku k hořícímu palivu.



Tato teorie je nejlépe představitelná pro případ spalování uhlénohého prášku v práškovém kotli.

Relativní rychlost molekul kyslíku vůči částicím paliva je téměř nulová, kyslík se tak dostává k povrchu paliva především difuzí.





Difuze

Difuze je proces rozptylování se částic v prostoru.

Veškeré látky mají tendenci přecházet z prostředí se svou vyšší koncentrací do prostředí s nižší koncentrací a postupně ve všech jeho částech vyrovnají svou koncentraci.

Říkáme, že látky difundují.



Difuze je spjata s kinetikou hoření, proto pro připomenutí:

Rychlostí reakce w_R se rozumí **rychlost změny koncentrace C_A reagentů nebo produktů** chemické reakce v čase τ .

- střední rychlost reakce

$$w_R = - \frac{C_{A0} - C_{A1}}{\tau_0 - \tau_1}$$

- okamžitá rychlost reakce

$$w_R = - \frac{dC_A}{d\tau}$$

V dalším výkladu budeme používat koncentraci pomocí hmotnostní koncentrace.

m_i ...hmotnost složky [kg]

V ...objem směsi [m³]

$$C_i = \frac{m_i}{V} \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \right]$$



Rychlost reakce je úměrná koncentracím složek reagentů C_A , C_B .

$$w_R = k \cdot C_A \cdot C_B \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \right]$$

Kde k je součinitel rychlosti reakce a má rozměr $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

Arrheniův zákon popisuje závislost konstanty rychlosti reakce na teplotě.

$$k = k_0 \cdot e^{\left(-\frac{E_A}{RT} \right)} \left[\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \right]$$

Kde:

k_0 ...max. hodnota konstanty rychlosti reakce $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

E_A ...aktivační energie $[\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}]$

R ...univerzální plynová konstanta $[\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

T ...termodynamická teplota $[\text{K}]$

Pak je rychlost reakce:

$$w_R = k_0 \cdot e^{\left(-\frac{\Sigma E_A}{RT} \right)} \cdot C_A \cdot C_B \left[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \right]$$



Přestup hmoty

Jedná se přenosový jev, který je popsán podobnou rovnicí, jakou je popsán přestup tepla.

Rovnice přestupu tepla konvekcí: $q = \alpha \cdot (t_1 - t_2) \quad [W \cdot m^{-2}]$

q ...tepelný tok [$W \cdot m^{-2}$]

α ...součinitel přestupu tepla [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

t_1, t_2 ...teploty [$^{\circ}C$]

Rovnice přestupu hmoty difuzí:

m_D ...difuzní hmotový tok [$kg \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$] $m_D = \beta \cdot (C_1 - C_2) \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$

β ...součinitel difuze [$m \cdot s^{-1}$]

C_1, C_2 ...koncentrace látky [$kg \cdot m^{-3}$]



Aplikujeme poznatky na náš případ.

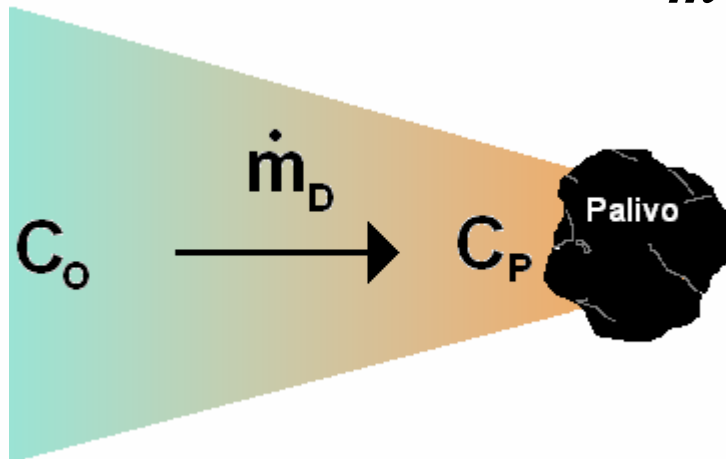
V okolí paliva (ve spalinách) je koncentrace **kyslíku** C_O [kg.m⁻³].

Na povrchu paliva je koncentrace **kyslíku** C_P [kg.m⁻³].

Směr difuzního hmotového toku m_D je tedy z místa s větší koncentrací do místa s nižší koncentrací a je roven:

$$m_D = \beta \cdot (C_O - C_P) \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$$

Kde β je součinitel difuze [m.s⁻¹]



Difuze v procesu hoření



Reakce probíhá na povrchu paliva, kde je koncentrace C_P , a rychlost je tedy dána vztahem:

$$w_R = k \cdot C_P \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

V ideálním případě se rychlost reakce rovná rychlosti difuze.

$$w_R = m_D$$

$$w_R = k \cdot C_P = \beta \cdot (C_O - C_P) \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Odtud můžeme vyjádřit:

$$C_P = C_O \cdot \frac{\beta}{k + \beta} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

A dosadíme do rovnice rychlosti reakce (nahore).



Dostaneme vztah pro **rychlost hoření** w_H , který obsahuje jak fyzikální, tak chemické podmínky.

$$w_H = C_o \cdot \frac{k \cdot \beta}{k + \beta} \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$$

Zlomek můžeme nahradit členem k_c , což je celková konstanta rychlosti hoření.

$$k_c = \frac{k \cdot \beta}{k + \beta} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Rychlost hoření lze vyjádřit:

$$w_H = C_o \cdot k_c \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$$

Pro rychlost hoření je podstatné, který ze členů β nebo k bude mít větší omezující vliv.



Mimo rovnovážný stav může hoření probíhat ve dvou režimech.

Kinetický režim

Rychlost difuze je podstatně větší než rychlost reakce. Kinetika reakce je tedy omezujícím dějem. $\beta \gg \gg k$

$$k_c = \frac{k \cdot \beta}{k + \beta} \doteq k \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Pak rychlost hoření:

$$w_H = k \cdot C_O = k_0 \cdot e^{\left(-\frac{E_A}{R \cdot T}\right)} \cdot C_O \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$$

Pro tento režim je charakteristické **dobré promíšení** – dostatečný přívod reagentů ($C_O = C_P$) a **nízké spalovací teploty**. Příkladem může být spalování před hořákem vytvořené směsi ZP a vzduchu.



Druhým režimem je:

Difuzní režim

Rychlost reakce je podstatně větší než rychlost difuze. Difuze látek je tedy omezujícím dějem. $k \gg \beta$

$$k_c = \frac{k \cdot \beta}{k + \beta} \doteq \beta \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Pak rychlost hoření:

$$w_H = \beta \cdot C_o \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$$

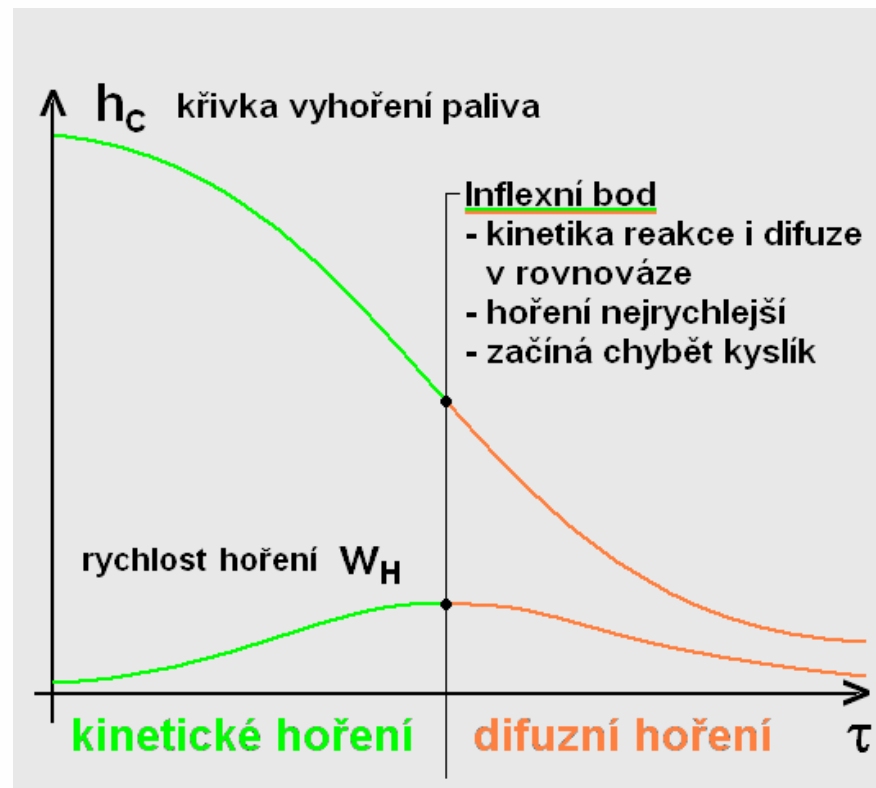
Pro tento režim je charakteristická **vysoká spalovací teplota (1400°C)** a **nízká (nulová) koncentrace kyslíku na povrchu paliva $C_p=0$** .

Difuzní režim hoření je nejběžnější případ hoření za vysokých teplot.



Jelikož dochází k nárůstu teploty po vznícení,

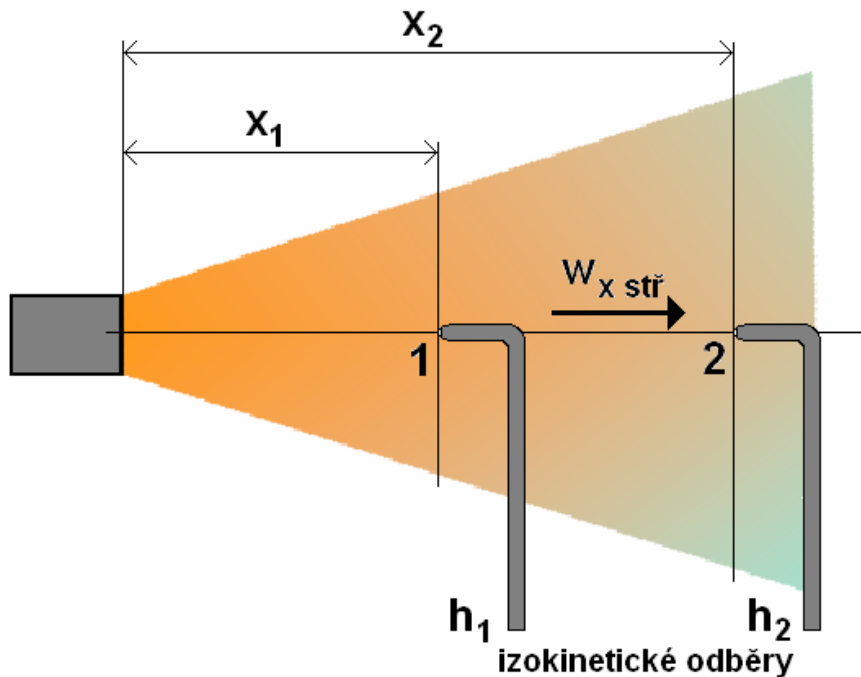
každý spalovací proces spěje k difuznímu hoření.



Difuze v procesu hoření



Problematiku difuze kyslíku k povrchu částice tuhého paliva objasní následující postup výpočtu součinitele difuze pro případ hoření částice uhlénoho prášku.



Podmínky:

- před rovinou **1** vyhořela veškerá prchavá hořlavina, hoří tedy pouze uhlík
- je známa střední rychlost proudu
- je znám obsah hořlaviny v částici v rovinách **1** a **2**
- je známa vzdálenost obou rovin
- odběry jsou izokinetické

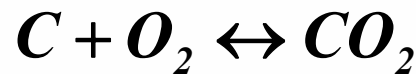


Vypočteme úbytek hořlaviny (uhlíku) Δh_C , který však musí být přepočten na konstantní množství popeloviny.

$$\Delta h_C = h_1 - \frac{A_1}{A_2} \cdot h_2 \quad \left[\text{kgC} \cdot \text{kg}^{-1} \text{prášku} \right]$$

h...podíl hořlaviny [1]
A...podíl popeloviny [1]

Množství spotřebovaného kyslíku m_{O_2} určíme ze stechiometrických rovnic.



$$12 + 32 \leftrightarrow 44 \quad [\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$$

$$1 + 2.667 \leftrightarrow 3.667 \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$m_{O_2} = \beta_S \cdot \Delta h_C \quad [\text{kgO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \text{prášku}]$$

β_S ...stechiometrický součinitel 2,667 [kgO₂.kg⁻¹C]



Doba trvání transportu:

$$\tau = \frac{x_2 - x_1}{w_{xstř}} \quad [s]$$

Jedná se o heterogenní reakci probíhající na povrchu. Vyjádříme-li měrný povrch částic s v $m^2 \cdot kg^{-1}$ prášku, pak je rychlost difuze:

$$w_D = \frac{m_{O_2}}{s \cdot \tau} = \frac{\beta_s \cdot \Delta h_C \cdot w_{xstř}}{s \cdot (x_2 - x_1)} \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$$

Tato rychlost difuze udává hmotový difuzní tok m_D :

$$m_D = \beta \cdot \Delta C_{O_2} = \beta \cdot (C_{O_2,O} - C_{O_2,P}) \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$$

$C_{O_2,P}$...koncentrace kyslíku na povrchu částice [$kg \cdot m^{-3}$]

$C_{O_2,O}$...koncentrace kyslíku v okolí částice (v proudu) [$kg \cdot m^{-3}$]

β ...difuzní součinitel [$m \cdot s^{-1}$]



Jelikož je rychlost reakce podstatně větší než rychlost difuze, je koncentrace kyslíku na povrchu částic $C_{O_2,P}$ rovna nule.

$$m_D = \beta \cdot C_{O_2,0} \quad [kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$$

Porovnáním rovnic z minulého snímku můžeme vyjádřit vztah pro součinitel difuze:

$$\beta = \frac{w_D}{C_{O_2,0}} = \frac{\beta_S \cdot \Delta h_C \cdot w_{x\text{ stř}}}{s \cdot (x_2 - x_1) \cdot C_{O_2,0}} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

V uvedeném vzorci jsou všechny veličiny zjistitelné, a je tedy možné zjistit hodnotu součinitele difuze.



Hodnota součinitele difuze je měřítkem spalovacího procesu.

- Čím jsou lepší podmínky pro vznícení a hoření uhlénoho prášku,
- čím lépe je organizován transport prášku a spalovacího vzduchu do ohniště
- a čím jsou lépe vyřešeny tepelné podmínky v oblasti hořáku,

tím je hodnota součinitele difuze vyšší.



Děkuji za pozornost.