

Určení prahové rychlosti fluidace

Fluidní vrstva

Uplatnění fluidní vrstvy je široké, od energetiky přes zpracovatelský, potravinářský a chemický průmysl. V oblasti energetiky se jedná především o aplikace spalování, zplyňování a sušení. U fluidních kotlů jsou rozlišovány dva základní režimy, a to kotle se stacionární fluidní vrstvou a s cirkulující fluidní vrstvou. V prvním případě se rychlost fluidačního média pohybuje mezi prahovou rychlostí fluidace a úletovou rychlostí částic, obvykle se jedná o hodnoty v rozmezí 1 až 3 m/s. U kotlů s cirkulující fluidní vrstvou tato rychlost převyšuje úletovou rychlost částic a jedná se tedy řádově o 3 až 10 m/s.

Mezi přednosti fluidní vrstvy se řadí především vysoká intenzita přenosu tepla a hmoty zajišťující rovnoměrné rozložení teploty v celém objemu vrstvy, stejně tak jako intenzivní přívod reagentů, respektive odvod produktů spalovacího procesu. Další podstatnou výhodou možnost aditivování vápence přímo do vrstvy za účelem odsíření.

Pro názornost uvažujme situaci, kdy je pevná částice v gravitačním poli obtékána plynem (nebo kapalinou) ve směru proti působení gravitační síly. Na částici působí gravitační, odporová a vztlaková síla. Z těchto tří sil je pouze odporová síla závislá na rychlosti – s rostoucí rychlostí roste. Při určité rychlosti dojde k vyrovnání sil – silové rovnováze. Tento stav nazýváme stavem fluidace (vznosu) a příslušná rychlost se nazývá prahová (minimální) rychlost fluidace u_{mf} . Překročením této prahové rychlosti se soubor částic dostává do stavu fluidace. Částice přestávají být ve vzájemném trvalém kontaktu a dochází k nárůstu objemu prostoru okupovaného částicemi. Při dalším zvyšování rychlosti se expanze vrstvy zvětšuje a při překročení úletové rychlosti částic u_t dochází jejich úletu a dostáváme se do stavu nazývaného pneumatický transport. Stacionární fluidní vrstva je tedy charakterizována dvěma hraničními veličinami (u_{mf} a u_t). Prahová rychlost fluidace je tedy jedním ze základních charakteristických parametrů fluidní vrstvy.

Tlaková ztráta fluidní vrstvy

Závislost tlakové ztráty na rychlosti proudění v oblasti tzv. „fixed bed“ velmi dobře popisuje Ergunova rovnice (1). Jedná se o rovnici, která umožňuje dosáhnout dobré přesnosti a je navíc univerzální, viz [1]. Po překročení prahové rychlosti fluidace lze stanovit tlakovou ztrátu pomocí rovnice (2).

$$\Delta p_b = \frac{150 \cdot H \cdot (1-\varepsilon)^2 \cdot \mu}{\varepsilon^3 \cdot \Phi^2 \cdot d_m^2} \cdot u + \frac{1,75 \cdot H \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_g}{\varepsilon^3 \cdot \Phi \cdot d_m} \cdot u^2 \quad (1)$$

$$\Delta p_b = \frac{M}{A \rho_p} \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \quad (2)$$

Přechod do stavu fluidace je velmi dobře patrný z průběhu tlakové ztráty fluidní vrstvy a efektivním nástrojem je tedy experimentální měření tlakové difference.

Výpočet prahové rychlosti fluidace – u_{mf}

Úpravami a zavedením bezrozměrných kritérií lze rovnici (1) převést do podoby (3), ze které je získána potřebná hodnota. Nevýhodou je vysoká citlivost na mezerovitost fluidní vrstvy a potřebná znalost dalších parametrů, např. kulovitost částic, jejichž stanovení s dobrou přesností je obtížné.

$$\frac{1,75}{\varepsilon^3 \cdot \Phi} \cdot Re_p^2 + \frac{150 \cdot (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 \cdot \Phi^2} \cdot Re_p = Ar \quad (3)$$

Archimedovo a Reynoldsovo číslo se určí dle (4) a (5).

$$Ar = \frac{d_m^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \quad (4)$$

$$Re_p = \frac{d_m \cdot u \cdot \rho_g}{\mu} \quad (5)$$

Pro přibližné stanovení mezerovitosti je možno využít vztah

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p \rho_b}{\rho_p m_b} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (6)$$

Kde m je hmotnost, ρ hustota, dolní index p značí tuhé částice a b označuje vrstvu jako celek.

Kromě výše uvedené rovnice, je v literatuře dostupná celá řada vzorců pro stanovení prahové rychlosti fluidace, avšak obvykle jsou definována omezení, respektive podmínky platnosti. Jedná se o intervaly hodnot např. průměru částic nebo bezrozměrných kritérií, pro které je vzorec vhodný. Jednou z možností je zjednodušená Ergunova rovnice dle autorů Wen a Yu, která je použitelná pro částice větší jak 100 μm

$$24,5 \cdot Re_p^2 + 1650 \cdot Re_p = Ar \quad (7)$$

Kterou lze dále upravit na tvar:

$$Re_{mf} = \sqrt{33,7^2 + 0,0408Ar} - 33,7 \quad (8)$$

Experimentální určení u_{mf}

Pro experimentální určení prahové rychlosti fluidace je nutné proměřit závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti proudění a identifikovat dvě oblasti, kdy tlaková ztráta je:

- Rostoucí
- konstantní

Obě oblasti je možné proložit přímkou a hledaná rychlost u_{mf} se určí jako jejich průsečík. Nicméně pro dosažení přesnějšího výsledku je lepší oblast s rostoucí tlakovou ztrátou proložit kvadratickou funkcí.

Pozor: pokud je tlaková ztráta fluidní vrstvy měřena včetně distributoru, je nutno brát v úvahu jeho tlakovou ztrátu, který se Ergunovou rovnicí neřídí a chová se jako standartní místní odpor. Měřená tlaková ztráta je pak součtem tlakové ztráty fluidní vrstvy a distributoru ($\Delta p_b + \Delta p_d$). Tlakovou ztrátu distributoru je nutno měřit odděleně a následně odečíst od celkové tlakové ztráty.

Úkoly:

- 1) Do přehledné tabulky sumarizujte naměřená a vypočtená data.
- 2) Změřte tlakovou ztrátu **distributoru** vzestupně a sestupně, a výsledek stanovte jako průměr. Do grafu vynesete závislost tlakové ztráty distributoru Δp (Pa) na rychlosti v (m/s). Dále z vyhodnocených dat získejte kvadratickou funkci tak, aby výsledek byl ve tvaru $\Delta p = a \cdot x^2 + bx + c$
- 3) Stanovte mezerovitost. Nezapomeňte zjistit potřebné veličiny: průřez reaktoru, výška a hmotnost fluidní vrstvy.
- 4) Pro předložený materiál – keramzit – změřte závislost tlakové ztráty fluidní vrstvy na rychlosti proudění a vyhodnoťte odděleně vzestupné a sestupné měření. Znázorněte graficky (do stejného grafu jako Δp distributoru). Při výpočtu rychlosti proudění z průtoku předpokládejte rovnoměrný rychlostní profil. Závislost by měla mít dvě oblasti – přibližně lineární nárůst a stagnaci. Oblast nárůstu tlakové ztráty proložte kvadratickou funkcí a oblast stagnace lineární

funkcí. Z rovnic vypočítejte jejich průsečík – hledanou prahovou rychlost fluidace.

Pokud je tlaková ztráta vrstvy měřena včetně distributoru, je nezbytné průběh distributoru odečíst.

- 5) Výsledky z bodu 4) porovnejte s teoretickým výpočtem pomocí rovnic (3), (4), (5) a také s hodnotou dle rovnice (8).

Do protokolu není třeba kopírovat obsah přípravy. Použité vztahy uveďte a vzorově do nich dosadíte.

Vlastnosti keramzitu:

- $d_m = 1,36 \text{ mm}$
- $\rho_p = 950 \text{ kg/m}^3$
- $\Phi_s = 0,9$
- $\varepsilon = 0,46$ (ověřte)

Pomůcky:

- model reaktoru s fluidní vrstvou
- ventilátor
- frekvenční měnič Teco
- plováчковý průtokoměr 20 – 160 m³/hod
- manometr se sklopnou trubicí

Značení

| | | |
|-----------|---------------------|--------------------------------------|
| d_m | [m] | střední průměr částic fluidní vrstvy |
| g | [m/s ²] | gravitační zrychlení |
| H | [m] | výška vrstvy |
| p | [Pa] | tlak |
| u | [m/s] | rychlost proudění |
| \dot{V} | [m ³ /s] | objemový průtok |

Kritéria

| | |
|--------|-------------------------------|
| Ar | Archimedovo číslo |
| Re_p | Reynoldsovo číslo pro částice |

Řecké znaky

| | |
|-------------------------------|---|
| $\varepsilon[-]$ | mezerovitost; část celkového objemu vrstvy připadající na prázdný prostor |
| $\mu[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ | dynamická viskozita |
| $\rho[\text{kg/m}^3]$ | hustota |
| $\Phi, \varphi[-]$ | sféricita (kulovitost) |

Dolní indexy

| | |
|------|-----------------------------------|
| b | vrstva (bed) |
| p | částice (particle) |
| d | distributor |
| g | plyn (gas) |
| mf | stav prahové (minimální) fluidace |

Literatura

- [1] HOWARD, J.R. *Fluidized Bed Technology: Principles and Applications*. Taylor & Francis, 1989. ISBN 0-8527-4055-7.
- [2] KUNII, D., LEVENSPIEL, O. *Fluidization Engineering*. Krieger Publishing Company.