

Fluidace

Úvod:

Fluidace je mechanická operace (hydro- nebo aeromechanická), při které se udržují tuhé částice ve vlnosku v tekuté (kapalné nebo plynné) fázi. Uplatňuje se v energetice při spalování uhlí, v katalytických reaktorech, sušení, třídění, pneumatické dopravě, klasifikační krystalizaci apod.

Úkol:

- 1) poznat chování reálné fluidní vrstvy,
- 2) popsat její parametry:
 - objemový průtok nosné fáze $\dot{V} / \text{m}^3 \text{ s}^{-1}$,
 - průřez kolony S / m^2 ,
 - mimovrstvovou rychlost proudění tekutiny $v = \frac{\dot{V}}{S} / \text{m s}^{-1}$, (R-1)
 - rychlost proudění tekutiny ve vrstvě v_v ,
 - hmotnost náplně tuhé fáze m / kg ,
 - sypný objem náplně V_V / m^3 ,
 - objem (samotné) tuhé fáze V_s / m^3 ,
 - výšku klidové vrstvy (volně nasypané) tuhé fáze h_0 / m ,
 - ekvivalentní výšku tuhé fáze (kompaktní bez mezer) h_s / m ,
 - výšku fluidní vrstvy h / m ,
 - mezerovitost klidové vrstvy $\varepsilon_0 / 1$,
 - mezerovitost expandované a fluidní vrstvy $\varepsilon / 1$,
 - tlakový odpor roštu fluidační kolony $\Delta p_r / \text{Pa}$,
 - celkový tlakový odpor fluidní vrstvy $\Delta p / \text{Pa}$,
 - statický tlakový odpor fluidní vrstvy $\Delta p_s / \text{Pa}$,
 - dynamický odpor částic fluidní vrstvy $\Delta p_\xi / \text{Pa}$,
 - práh fluidace (souřadnice $\Delta p - v$),
 - práh úletu (souřadnice $\Delta p - v$).
- 3) graficky znázornit chování fluidní vrstvy závislostmi jejího tlakového odporu Δp a její mezerovitosti ε na mimovrstvové rychlosti proudění v nosné tekutiny,
- 4) poznat a popsat rozdíly chování monodisperzních fluidních vrstev s různým průměrem částic a různou výškou h_0 klidové vrstvy,
- 5) poznat a popsat rozdíly chování mono- a polydisperzní fluidní vrstvy,
- 6) popsat průvodní charakteristické jevy reálné fluidní vrstvy (tryskání, pístitování, vlající záclony apod.),
- 7) na grafu závislosti tlakového odporu fluidní vrstvy vymežit oblasti expanze klidové vrstvy, expanze fluidní vrstvy a úletu (práh fluidace a úletu),
- 8) vypočítat hodnoty statického a dynamického odporu fluidní vrstvy,
- 9) porovnat zrnění použité náplně s velikostí částic vypočtenou z mimovrstvové rychlosti proudění nosné fáze na prahu úletu.

Teoretický úvod:

Objemový průtok vzduchu \dot{V} měříme rotametry. Průřezy sekcí fluidační kolony vypočteme z jejich průměrů 50 mm, 100 mm a 150 mm. V úvahu

přicházejí průměry 50 mm a 100 mm. Výpočet mimovrstvové rychlosti proudění tekuté fáze je uveden ve výčtu popisovaných parametrů.

Rychlost proudění vzduchu v_f ve fluidní vrstvě vypočteme z výšky fluidní vrstvy h a doby zdržení τ tekutiny v ní

$$v_f = h / \tau \quad (\text{R-2})$$

Doba zdržení je dána objemem mezer v objemu V a průtokem tekutiny \dot{V} tímto objemem

$$\tau = \frac{\varepsilon V}{\dot{V}} = \frac{h}{v_f}$$

odkud

$$v_f = \frac{\dot{V}}{\varepsilon S} = \frac{\dot{V}}{\left(1 - \frac{h_s}{h}\right) S} = \frac{v}{\varepsilon} \quad (\text{R-3})$$

kde podle rov.(R- 6) je

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_s}{h}$$

Sypný objem náplně V_V a objem (samotné) tuhé fáze V_s vypočteme z její hmotnosti m a sypné hustoty ρ_V , případně hustoty ρ_s kompaktního materiálu bez mezer stanovených postupem uvedeným v úloze *Mletí*.

Výšku klidové vrstvy tuhé fáze h_0 odečteme na stupnici fluidační kolony a ověříme výpočtem ($h_0 = V_V / S$).

Ekvivalentní výšku tuhé fáze h_s vypočteme podle rovnice

$$h_s = \frac{m}{\rho_s S} \quad (\text{R-4})$$

Výšku h fluidní vrstvy odečteme na měřítku kolony.

Mezerovitost ε_0 klidové vrstvy vypočteme podobně jako v úloze *Mletí* z hustot ρ_V a ρ_s

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_V}{\rho_s} = 1 - \frac{\frac{m}{V_V}}{\frac{m}{V_s}} = 1 - \frac{V_s}{V_V} = 1 - \frac{S h_s}{S h_0} = 1 - \frac{h_s}{h_0} \quad (\text{R-5})$$

Podobně vypočteme i mezerovitost fluidní vrstvy o výšce h

$$\varepsilon = 1 - \frac{h_s}{h} \quad (\text{R-6})$$

Tlakový odpor roštu Δp_r fluidační kolony neměříme, je v našem případě zanedbatelný.

Celkový tlakový odpor Δp fluidní vrstvy vypočteme z rozdílu výšek hladin vody Δh v U-manometru, je-li nosnou tekutinou vzduch se zanedbatelnou hustotou proti hustotě ρ_v manometrické kapaliny:

$$\Delta p = \Delta h \rho_v g \quad (\text{R-7})$$

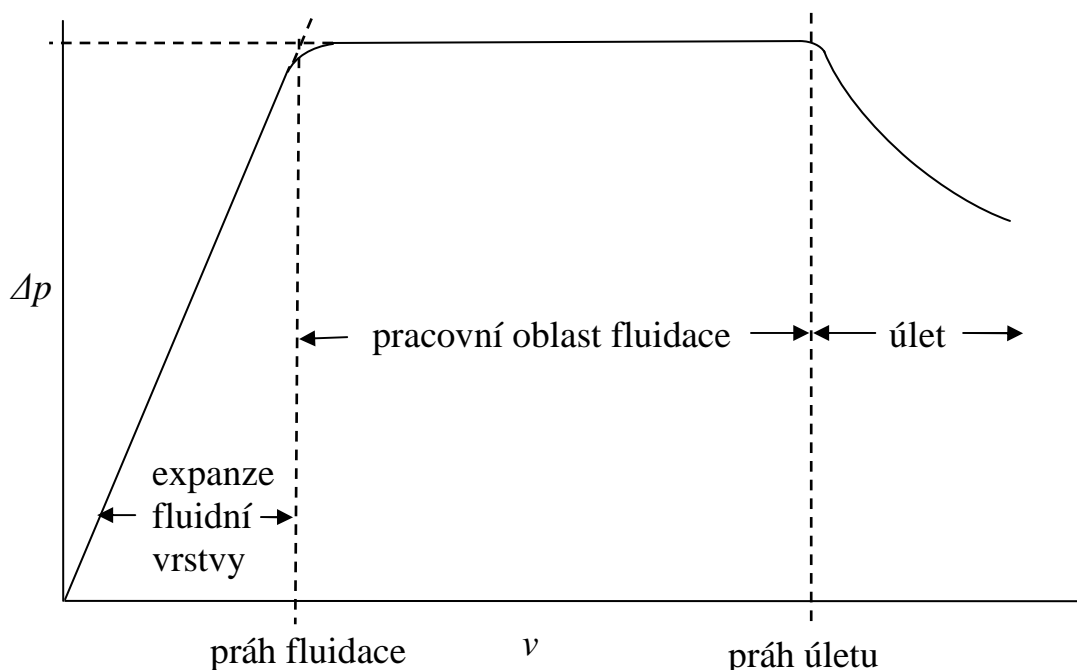
Statický tlakový odpor Δp_s způsobený tíhou náplně fluidovaného materiálu vypočteme podle rovnice

$$\Delta p_s = \frac{m g}{S} = \left(\frac{V_s \rho_s g}{S} = h_s \rho_s g \right) \quad (\text{R-8})$$

Dynamický tlakový odpor Δp_ξ vypočteme z rozdílu celkového tlakového odporu fluidní vrstvy a statického tlakového odporu náplně fluidovaného materiálu

$$\Delta p_\xi = \Delta p - \Delta p_s \quad (\text{R-9})$$

Prahy fluidace a úletu odečteme z grafu závislosti tlakového odporu fluidní vrstvy na mimovrstvové rychlosti proudění vzduchu způsobem naznačeným na idealizované závislosti celkového tlakového odporu Δp fluidní vrstvy na mimovrstvové rychlosti v proudění vzduchu:



Průměr d fluidovaných vypočteme z rychlosti proudění vzduchu v_f ve fluidní vrstvě na prahu úletu, kdy se mezerovitost blíží hodnotě 1 (0,8 i více) a kdy se rychlost proudění vzduchu ve fluidní vrstvě blíží hodnotě mimovrstvové rychlosti v (pro mezerovitost $\varepsilon = 1$). Pro přibližný výpočet průměru fluidovaných částic můžeme počítat s mimovrstvovou rychlostí proudění vzduchu. Postup je uveden v úloze *Usazování*: Podle hodnoty mimovrstvové rychlosti v vypočteme hodnotu Ljaščenkova kriteria Ly , určíme oblast usazování a použijeme příslušného vzorce pro výpočet průměru fluidovaných částic shodného s průměrem nerušeně se usazujících částic.

Můžeme také porovnat vypočtenou rychlost nerušeného usazování podle zrnění použitých částic s mimovrstvovou rychlostí fluidace, opět za předpokladu, že při prahu úletu je hodnota mezerovitosti blízká jedné. Podle střední velikosti zrna vypočteme Archimedovo kriterium Ar , určíme podle usazovací tabulky oblast usazování a podle příslušného vzorce vypočteme usazovací rychlost, která by měla být prakticky shodná s mimovrstvou rychlostí proudění vzduchu.

Sestava aparatury:

Hodnoty veličin potřebných pro vyhodnocení fluidace se měří na laboratorní fluidační koloně s průměry sekcí 50, 100 a 150 mm. Sekce jsou opatřeny měřítky a tlakovými odběry k připojení U-manometrů případně měřičů tahu. Měří se hlavně na sekci o průměru 50 mm opatřené nátrubkem pro vsypání fluidovaného materiálu. Zdrojem tlakového vzduchu je výkonný kompresor.

Postup při měření:

Příprava materiálu a stanovení jeho fyzikálních vlastností

Pro fluidaci připravíme síťováním monodisperzní frakce iontoměniče vhodného zrnění, např. 0,71/0,80 mm nebo použijeme netříděný iontoměnič a stanovíme jejich sypanou hustotu a hustotu kompaktního materiálu (bez mezer) metodami popsanými v úloze *Mletí*. Obě veličiny jsou potřebné pro výpočty mezerovitostí klidových i fluidních vrstev. Ke stanovení hustoty kompaktního materiálu se doporučuje použít nejhrubší frakci, která se nejlépe usazuje. Iontoměnič (přibližně 50 g) navažujeme na laboratorních vahách (analytické jsou zbytečně přesné) z prachovnice do kádinky o objemu 100 ml. Objemy a jejich změny měříme odměrnými válečky objemu 100 ml. Protože se suchý iontoměnič smáčí vodou obtížně, použijeme ke stanovení jeho hustoty ethanolu. Po stanovení hustoty suspenzi zfiltrujeme, iontoměnič vysušíme na porcelánové misce. na vzduchu nebo při teplotě do 80 °C v sušárně a ethanol použijeme pro opakovaná stanovení hustoty (celkem třikrát). Při opakovaných měřeních hustoty nemusíme váleček kvantitativně vyprazdňovat, protože měříme jen přírůstek objemu ethanolu po nasypání odvážené hmotnosti iontoměniče.

Výpočet hmotnosti náplně

Ze známé sypané hustoty iontoměniče a zadaných nebo zvolených výšek klidové vrstvy (aspoň dvou v intervalu 5cm až 15 cm) vypočteme hmotnost náplně a nasypeme ji do kolony. Případný nerovný povrch srovnáme mírným proudem vzduchu a porovnáme výšku klidové vrstvy odečtenou na měřítku s výškou vypočtenou. Tlakové odběry k U-manometru vyplníme smotky záclonoviny, které zabrání vniknutí fluidovaného materiálu do přívodních hadic a manometru, tlumí tlakové rázy způsobené nerovnoměrným chováním fluidní vrstvy a usnadní odečítání tlakové difference. Tlakové odběry občas pročistíme profouknutím mírně stlačeným vzduchem (nejlépe ústy).

Zrnitost náplně

Kolonu plníme jednak monodisperzními frakcemi připravenými síťováním, jednak netříděným materiálem a porovnááme jejich chování subjektivním popisem a objektivním vyjádřením závislosti tlakové difference, výšky fluidní vrstvy, mezerovitosti a dalších parametrů uvedených v teoretickém úvodu na mimovrstvové rychlosti proudění vzduchu formou zápisu do tabulky naměřených a vypočtených hodnot a formou grafů závislostí celkového tlakového odporu fluidní vrstvy a mezerovitosti a rychlosti proudění vzduchu fluidní vrstvou na mimovrstvové rychlosti proudění. Průtoky vzduchu měříme rotametry a jejich konstantní hodnoty během měření regulujeme příslušnými ventily. Průtoky do 9 m³ zvyšujeme po 1 m³/hod, průtoky od 10 do 50 m³/hod po 5 m³/hod. Po ukončení měření vysajeme náplň fluidační kolony vysavačem a iontoměnič vysypeme do příslušné prachovnice. Hadice tlakových odběrů

sejmeme z nátrubků kolony a manometrů, aby se nepřilepily a neztěžovaly případné čištění tlakových cest.

Vyhodnocení výsledků měření:

Změřené a vypočtené hodnoty zapisujeme do tabulky

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot fluidace monodisperzní frakce iontoměniče se zrněním .../... mm (netříděného iontoměniče) o hmotnosti ... g, hustotě $\rho_s = \dots \text{ kg m}^{-3}$, sypné hustotě $\rho_v = \dots \text{ kg m}^{-3}$, objemu samotné tuhé fáze $V_s = \dots \text{ cm}^3$, její výšce $h_s = \dots \text{ mm}$ a statickém tlakovém odporu $\Delta p_s = \dots \text{ Pa}$ v koloně o průměru 50 mm při teplotě ...°C a tlaku ...kPa.

č. měř.	$\frac{\dot{V}}{\text{m}^3 \text{hod}^{-1}}$	$\frac{h}{\text{mm}}$	$\frac{\Delta h_m}{\text{mm}}$	$\frac{\dot{V}}{\text{m}^3 \text{s}^{-1}}$	$\frac{v}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{v_f}{\text{m s}^{-1}}$	$\frac{\Delta p}{\text{Pa}}$	$\frac{\Delta p_\xi}{\text{Pa}}$	$\frac{\varepsilon}{1}$
1	0	.....	0	0	0	0	0	0	...
2	1	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	...

Diskuse výsledků:

Podle tabulky a hlavně přiložených grafů zhodnotíme rozdílné průběhy fluidace a vypočtených parametrů u frakcí různého zrnění, všimneme si závislosti hodnot rychlostí proudění vzduchu ve vrstvě a dynamického tlakového odporu částic na mimovrstvové rychlosti proudění vzduchu. Porovnáme též vypočtené hodnoty průměrů částic se střední velikostí zrn fluidované frakce.

Příloha:

Grafy závislostí uvedených v odst. **Úkol**.

Kontrolní otázky:

- 1) Uveďte příklady praktického využití fluidace.
- 2) Vysvětlete pojmy nehybná a expandující klidová vrstva, fluidní vrstva, mimovrstvová rychlost a důvod jejího použití při fluidaci, prahy fluidace a úletu a jejich praktický význam.
- 3) Napište rovnici pro výpočet mimovrstvové rychlosti proudění vzduchu fluidační kolonou z průtoku vzduchu a průměru fluidační kolony.
- 4) Odvoďte vzorec pro výpočet rychlosti proudění vzduchu (tekutiny) fluidní vrstvou.
- 5) Jak stanovíme hustotu a sypnou hustotu fluidovaného materiálu. Vyjádřete slovně a napsáním příslušných rovnic.
- 6) Napište rovnici pro výpočet navážky fluidovaného materiálu pro dosažení zadané klidové výšky.
- 7) Napište rovnici pro výpočet ekvivalentní výšky tuhé fáze (kompaktní, bez mezer) fluidovaného materiálu.
- 8) Vysvětlete pojem mezerovitosti klidové a fluidní vrstvy a odvoďte vzorec pro jejich výpočet z příslušných výšek fluidovaného materiálu ve fluidační koloně. Jak velké mohou být přibližné hodnoty mezerovitosti kulových částic?

9) Odvoďte vzorce pro výpočet celkového, statického a dynamického tlakového odporu fluidní vrstvy. Kterým vzorcům se podobají a jak s nimi souvisejí?

10) Nakreslete průběh fluidace v příslušném souřadném systému, popište v něm charakteristické oblasti a čáry, které je vymezují.

11) Jaké závěry vyvodíte z konstantních hodnot tlakových odporů v oblasti fluidace a jak je zdůvodníte?

12) Vysvětlete pojmy monodisperzního a polydisperzního materiálu. Jak se liší mezerovitostí v případě částic kulového tvaru?

13) Uveďte výpočet průměru fluidovaných kulových částic. Které veličiny a rovnice použijete?