Rušené usazování

Úvod:

Při rušeném usazování dochází ke srážkám částic a jejich narážení na stěny nádoby. Výsledkem je prodlužování dráhy částic a zpomalování usazování. V praxi probíhá usazování v usazovácích různé konstrukce, nejčastěji ve vzestupném proudu kapaliny působením gravitační síly nebo v odstředivkách působením mnohem větší odstředivé síly. O tom, zda a jak rychle se částice usazují rozhodují faktory uvedené v nerušeném usazování s tím rozdílem, že při nerušeném usazování se částice většinou pohybují ve směru gravitační (odstředivé) síly, a tekutina zůstává v klidu, kdežto při rušeném se většinou pohybuje tekutina a částice se buď unášejí s ní nebo se vznášejí nebo usazují podle velikosti sil na ně působících. Usazování ve vzestupném proudu tekutiny je analogií fluidace.

Úkol:

Úkolem úlohy je

1) poznat chování částic různé velikosti ve vzestupném proudu kapaliny tekoucí různou rychlostí a jeho třídicí účinky,

2) uplatnit rovnici kontinuity při výpočtu rychlostí vzestupného proudu,

3) vhodnou metodou stanovit hustotu usazovaných částic a hustotu kapaliny a její dynamickou viskozitu,

4) vypočítat velikosti kulových částic o známé hustotě, které se ještě mohou usazovat při dané rychlosti vzestupného proudu vody při zadaném průtoku např. 3,5 l/min nebo rychlost vzestupného proudu vody, ve kterém se ještě mohou kulové částice, např. písku o průměru 0,05 mm, usazovat,

5) určit oblasti usazování v užších válcích Kopeckého usazovacího přístroje, má-li usazování v nejširším válci probíhat ještě v laminární oblasti,

6 vypočítat doby zdržení v jednotlivých válcích při zadané třídicí době v nejširším válci, např. trojnásobku doby zdržení suspenze v nejširším válci,

7) připravit tři vhodné frakce o hmotnostech 20 až 40 g podle výsledků výpočtů prosévání normalizovanými síty,

8) ověřit velikost usazovaných částic v jednotlivých válcích jejich separací filtrací a po vysušení prosévání normalizovanými síty.

Teoretický úvod:

Usazování ve vzestupném proudu kapaliny se liší od usazování v nehybné kapalině pouze relativitou pohybu usazujících se částic a kapaliny. Zákonitosti vzájemného působení se nemění. Odpor částic je způsoben nejen jejich pohybem, ale i pohybem kapaliny. Rychlosti pohybu částic a kapaliny se sčítají.

Částice se usazují, je-li jejich tíha větší než vztlak a odpor prostředí, jsou unášeny (odplavovány), jsou-li vztlak a odpor prostředí větší než jejich tíha. Je-li výslednice sil nulová, částice se vznášejí. Chování částic v usazovacím přístroji Kopeckého se jsou velmi blízké reálným podmínkám usazování v průmyslových usazovácích, např. v čistírnách odpadních vod a výsledky měření mohou být využity při jejich výpočtech.

Zvolíme-li vhodný průtok vody Kopeckého přístrojem, můžeme v něm roztřídit částice podle velikosti a z průtoku vody a průměru válců vypočítat

jejich usazovací rychlosti nebo roztřídit (rozdružit) částice přibližně stejné velikosti, ale různého druhu s různou hustotou.

Při výpočtech velikosti částic $d_č$, které se ještě usadí ve vzestupném proudu kapaliny o rychlosti v nebo výpočtech rychlostí vzestupného proudu kapaliny v , ve kterém se částice o průměru $d_č$ vznášejí, musíme přihlížet k závislosti součinitele odporu částic ς , který je určen kriterii : Reynoldsovým (Re), Archimédovým (Ar) a Ljaščenkovým (Ly) a tvarovými součiniteli uvedenými v úloze *Nerušené usazování*. Pro zjednodušení výpočtů budeme počítat s kulovými částicemi a použijeme opět usazovací tabulku.

Tabulka pro výpočet usazovací rychlosti v , průměru částic $d_č$ a součinitele odporu ς pro nerušené usazování kulových částic o hustotě $\rho_č$ v tekutině o hustotě ρ_f a dynamické viskozitě η v gravitačním poli o zrychlení a (gravitačním - g nebo odstředivém - $\omega^2 r$).

symbol	laminární (Stokes)	přechodová (Allen)	turbulentní (Newton)
Re	$\leq 0{,}2$	$\langle 0{,}2;\ 5\cdot 10^2 \rangle$	$\langle 5\cdot 10^2;\ 1{,}5\cdot 10^5 \rangle$
Ar	$\leq 3{,}6$	$\langle 3{,}6\ ;\ 8{,}33\cdot 10^4 \rangle$	$\langle 8{,}33\cdot 10^4;\ 7{,}4\cdot 10^9 \rangle$
Ly	$\leq 2{,}22\cdot 10^{-3}$	$\langle 2{,}22\cdot 10^{-3};\ 1{,}5\cdot 10^3 \rangle$	$\langle 1{,}5\cdot 10^3\ ;\ 4{,}5\cdot 10^5 \rangle$
ς	$\dfrac{24}{\mathrm{Re}}$	$\dfrac{18{,}5}{\mathrm{Re}^{0{,}6}}$	$0{,}44$
v	$\dfrac{d_č^2\left(\rho_č-\rho_f\right)a}{18\,\eta}$	$\dfrac{0{,}153\left[\left(\rho_č-\rho_f\right)a\right]^{0{,}714}\,d_č^{1{,}143}}{\eta^{0{,}430}\,\rho_f^{0{,}286}}$	$1{,}74\left[\dfrac{d_č\left(\rho_č-\rho_f\right)a}{\rho_f}\right]^{0{,}5}$
d	$\left[\dfrac{18\,\eta\,v}{\left(\rho_č-\rho_f\right)a}\right]^{0{,}5}$	$5{,}175\dfrac{\eta^{0{,}375}\,\rho_f^{0{,}250}\,v^{0{,}875}}{\left[\left(\rho_č-\rho_f\right)a\right]^{0{,}625}}$	$0{,}330\,\dfrac{\rho_f v^2}{\left(\rho_č-\rho_f\right)a}$

$$\mathrm{Ar}=\frac{a\,d_č^3\left(\rho_č-\rho_f\right)\rho_f}{\eta^2},\ \mathrm{Ly}=\frac{v^3\,\rho_f^2}{a\,\eta\left(\rho_č-\rho_f\right)},\ \mathrm{Re}=\frac{d_č\,v\,\rho_f}{\eta},\ \mathrm{Ar}\cdot\mathrm{Ly}=\mathrm{Re}^3$$

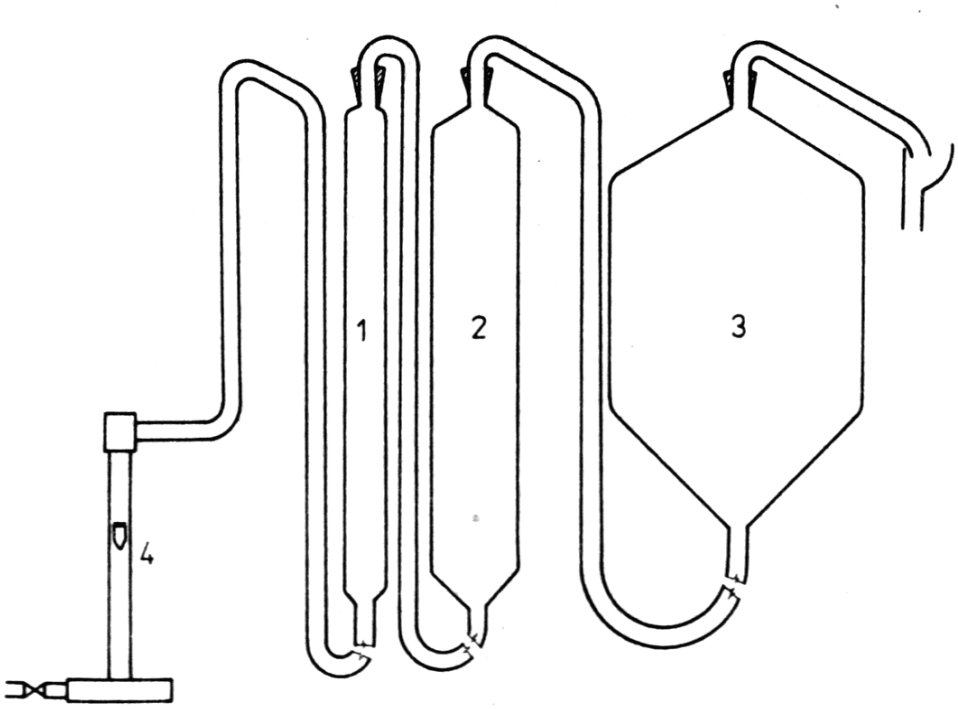
$$\mathrm{Ar}=3\,\varsigma\,\mathrm{Re}^2/4$$

Poznámka: Usazování v turbulentní oblasti má omezený význam, protože se částice usazují velmi rychle.

Je-li dána rychlost vzestupného proudu v v usazováku průtokem $\dot{V}$ a průměrem usazováku D , určíme oblast usazování výpočtem hodnoty Ly a podle tabulky vypočteme minimální průměr částic $d_č$, které se ještě usadí v jednotlivých válcích.

Je-li dán minimální průměr částic $d_č$, které se ještě mají usadit v příslušném válci, vypočteme maximální rychlost vzestupného proudu (rychlost usazování) na základě výpočtu hodnoty Ar, která určí oblast usazování a tím i příslušný vzorec pro výpočet usazovací rychlosti z usazovací tabulky.

Sestava aparatury:



Kopeckého plavicí přístroj

1 - třídicí válec o průměru 30 mm a objemu 310 ml, 2 - válec o průměru 56 mm a objemu 1200 ml, 3 - válec o průměru 178 mm a objemu 5 680 ml, 4 - - rotametr

Postup při měření:

Změříme teplotu vody a v tabulkách vyhledáme její hustotu a dynamickou viskozitu. Hustotu usazovaného materiálu, pokud není zadána, zjistíme běžným způsobem.

Je-li zadán průtok,

- vypočteme ze známých průměrů válců rychlosti vzestupných proudů v nich,
- vypočtené rychlosti proudění dosadíme do vzorce pro výpočet hodnot Ly ,
- podle hodnot Ly určíme oblast usazování,
- podle příslušných vzorců v usazovací tabulce vypočteme průměry nejmenších částic, které se ještě v příslušném válci zadrží.

Např. při průtoku vody 4 l/min o teplotě 20 °C jsou rychlosti proudění v jednotlivých válcích 2,7 mm/s, 2,7 cm/s a 9,4 cm/s a hodnoty Ly 1,31 $.10^{-3}$ pro laminární oblast, 1,35 pro přechodovou a 57,1 rovněž pro přechodovou oblast usazování. Podle příslušných vzorců z usazovací tabulky mají kulové částice, které se v příslušném válci ještě usadí, minimální průměry 0,057 mm, 0,24 mm a 0,72mm. V nejužším válci by se měly usazovat částice větší 0,72 mm, v prostředním v intervalu $\in \langle 0,72 ; 0,24 \rangle$ a v nejširším v intervalu

$\in \langle 0{,}24;\ 0{,}057 \rangle$. Nekulové částice mají větší povrch a jejich velikost (efektivní průměr) by bylo třeba korigovat příslušnými sféricitami nebo tvarovými faktory. Pro zjednodušení počítáme s kulovými částicemi. Částice minimálního průměru by mohly být vlivem interakcí při rušeném usazování unášeny do širších válců. Tento nežádoucí jev omezíme vhodným zúžením frakcí. Např. pro shora uvedený průtok a válec o průměru 178 mm připravíme sítováním frakci písku se zrny většími než 1 mm, pro válec o průměru 56 mm frakci 0,60/0,30 mm a pro válec o průměru 178 mm frakci 0,20/0,075 mm.

Sestavíme Kopeckého přístroj podle uvedeného schématu a zajistíme zátky proti vyskočení. Odvážíme asi 30 g každé frakce s přesností 0,1 g , nejužší válec naplníme asi do poloviční výšky vodou a nasypeme do něj odvážené frakce. Nastavíme průtok vody na zadanou nebo vhodně zvolenou hodnotu a udržujeme jej konstantní. Protože teplota používané vodovodní vody není 20 °C, jak se předpokládalo při příkladu výpočtu, musíme nastavení plováku rotametru na příslušný dílek stupnice vypočítat podle rovnice

$$\dot{V}_s = \dot{V}\sqrt{\frac{\rho\left(\rho_p - \rho_s\right)}{\rho_s\left(\rho_p - \rho\right)}} = \dot{V}\sqrt{\frac{\rho\left(7\,900 - 998\right)}{998\left(7\,900 - \rho\right)}} = \dot{V}\sqrt{\frac{6\,902\,\rho}{998\left(7\,900 - \rho\right)}}$$

ve které je $\dot{V}$ zadaný průtok při nestandartní teplotě,

$\dot{V}_s$ přepočtený standartní průtok při teplotě 20 °C (teplota kalibrace rotametru) ,

ρ hustota vody při nestandardní teplotě,

ρ_p hustota plného plováku rotametru (7 900 kg m^{-3}),

ρ_s hustota vody při standardní teplotě 20 °C .

V kalibračním grafu nebo z rovnice závislosti *n*- tého dílku na standartním průtoku najdeme k jeho vypočtené hodnotě $\dot{V}_s$ příslušný *n*-tý dílek stupnice, na který nastavíme polohu horní hrany plováku rotametru.

Rotametrem kontrolujeme stabilitu průtoku během měření. Průtok vody ještě zkontrolujeme jeho výpočtem z hmotnosti vody jímané po změřenou dobu do zvážené nádoby a hustoty.

Po naplnění nejširšího válce začneme měřit dobu třídění. Při průtoku 4 l/min a objemu 5 680 ml nejširšího válce, je doba zdržení ve válci 1,42 min a doba třídění trojnásobkem (přibližně 4,5 min). Po jejím uplynutí zastavíme průtok vody, válce přístroje rozpojíme a jejich obsah kvantitativně vyprázdníme do vhodných nádob (kádinky, kbelík). Na kvantitativní vypláchnutí válců použijeme střičku upravenou na navlečení hadice vhodného průměru. Většinu čiré vody nad usazenými tuhými fázemi opatrně slijeme, tuhé fáze rozmícháme se zbytkem vody a zfiltrujeme na Büchnerově nálevce. Filtr s vlhkou tuhou fází usušíme v sušárně a po seškrábání z filtru zvážíme na laboratorních váhách. Sítováním stejnou soupravou sít, jaká byla použita při přípravě vzorku pro usazovací zkoušku, zkontrolujeme, zda se v příslušných válcích usadily částice vypočtené velikosti. Získané frakce (vlastní frakci, hrubší frakci a propad) zvážíme.

Je-li zadána velikost částic, které se mají příslušném válci usadit,

- určíme podle hodnoty Archimedova čísla oblast usazování,
- podle usazovací tabulky zvolíme vhodný vzorec pro výpočet usazovací rychlosti a vypočteme ji, předpokládajíce kulový tvar částic,
- vypočteme průtoky jednotlivými válci a pro zadanou velikost částic vybereme pro usazování vhodný válec, ve kterém průtok vody nepřesáhne měřicí rozsah rotametru (4 l/min),
- dále postupujeme jak je již popsáno shora.
- z rovnice kontinuity vypočteme usazovací rychlosti ve zbývajících válcích, podle hodnoty Ljaščenkova kriteria a usazovací tabulky určíme oblast usazování, vypočteme průměr kulových částic a připravíme frakce vhodné velikosti atd.

Je-li zadána oblast usazování hodnotou Archimedova nebo Ljaščenkova čísla

- vypočteme z hodnoty Archimedova čísla a známých hustot a viskozity průměr usazujících se částic a dál pokračujeme podle postupu při zadané velikosti částic,
- vypočteme z hodnoty Ljaščenkova čísla a známých hustot a viskozity usazovací rychlost a dál pokračujeme podle postupu při zadané rychlosti usazování.

Je-li zadána oblast usazování hodnotou Reynoldsova čísla

- vypočteme z usazovací tabulky hodnotu součinitele odporu ς a dosadíme ji do vzorce

$$\mathrm{Ar} = 3\,\varsigma\ \mathrm{Re}^2 / 4$$

- dále postupujeme jako by byla zadána hodnota Archimedova čísla.

např.pro laminární oblast a pro Re = 0,1 je

$$\mathrm{Ar} = 3\,\varsigma\,\mathrm{Re}^2/4 = 3\,\frac{24}{\mathrm{Re}}\,\mathrm{Re}^2/4 = 18\,\mathrm{Re} = 1{,}8,$$

$$d_{č} = \left(\frac{1{,}8 \cdot 1 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{kg^2 m^{-2} s^{-2}}}{9{,}81\ \mathrm{m\,s^{-2}} \cdot 1500\ \mathrm{kg\,m^{-3}} \cdot 1000\ \mathrm{kg\,m^{-3}}} \right)^{\frac{1}{3}} =$$

$$= 4{,}96 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{m} \approx 0{,}05\ \mathrm{mm},$$

$$v = \frac{\left(0{,}05 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m}\right)^2 \cdot 1500\,\mathrm{kg\,m^{-3}} \cdot 9{,}81\,\mathrm{m\,s^{-2}}}{18 \cdot 0{,}001\,\mathrm{kg\,m^{-1}\,s^{-1}}} = 2{,}04 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m\,s^{-1}} \approx 2\,\mathrm{mm\ s^{-1}}$$

Správnost výsledku zkontrolujeme dosazením vypočtených hodnot $d_{č}$ a v do vzorce pro výpočet Reynoldsova čísla:

$$\mathrm{Re} = \frac{d\,v\,\rho}{\eta} = \frac{0{,}05 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} \cdot 2{,}04 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m\,s^{-1}} \cdot 1000\,\mathrm{kg\,m^{-3}}}{1 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{kg\,m^{-1}\,s^{-1}}} = 0{,}1$$

Vyhodnocení výsledků měření:

Granulometrické složení frakcí po skončeném usazování porovnáme s granulometrickým složením před usazováním.

Tabulka usazovací zkoušky

zrnění mm/mm	hmotnost frakcí g				ztráta g
	ve vzorku	z válce o průměru			
		30 mm	56 mm	178 mm	

Diskuse výsledků:

Výsledky usazovací zkoušky zhodnotíme stručně a výstižně vyjádřením, do jaké míry splnilo laboratorní cvičení teoretické předpoklady, které rušivé vlivy se v průběhu úlohy vyskytovaly a jaké mohly být příčiny případných rozporů teorie s laboratorní praxí.

Kontrolní otázky:

1) Čím se liší rušené usazování od nerušeného?

2) Jak vypočtete usazovací rychlosti v jednotlivých válcích Kopeckého přístroje o průměrech 30, 56 a 178 mm?

3) Mohl by v Kopeckého přístroji nastat případ, že by usazování v každém válci probíhalo v jiné oblasti?

4) Jak vypočtete průměr částic $d_č$, které se ještě usadí ve vzestupném proudu tekutiny o rychlosti v?

5) Jak vypočtete rychlost vzestupného proudu v, ve kterém se ještě mohou usadit částice o průměru $d_č$?

6) Jak vypočtete rychlost vzestupného proudu a a průměr částic, které se ještě mohou usadit při zadané hodnotě Reynoldsova čísla?