

6 Usazování

Lenka Schreiberová, Lubomír Neužil

A Výpočtové vztahy

Jednou z metod dělení heterogenních soustav je usazování rozptýlených částic působením hmotnostní (gravitační, setrvačné, odstředivé síly). V následujícím textu jsou uvedeny základní vztahy popisující usazování částice vlivem působení hmotnostní síly, a to síly tíže a odstředivé síly. Kapitola zahrnuje výpočtové vztahy pro usazování jednotlivé kulové i nekulové částice a pro usazování polydisperzních směsí. Popisuje výpočty gravitačních usazováků, sedimentačních odstředivek a cyklónů. Je zde též zahrnut odhad rychlosti usazování suspenze.

6.1 Usazování jednotlivé kulové částice

Při odvozování jednotlivých vztahů uvedených v této kapitole, které popisují usazování částice ve viskózním prostředí, byla zahrnuta pouze převládající hmotnostní síla. Za použití zjednodušujících předpokladů dostaneme z Newtonova zákona pro průměty sil působících na částici ve směru usazování vztah

$$f \pi d_p^3 (\rho_p - \rho_f) / 6 = \zeta_u \rho_f \pi d_p^2 v_u^2 / 8 \quad (6-1)$$

kde v_u je rychlost usazování kulové částice o průměru d_p a hustotě ρ_p . Veličina ρ_f je hustota tekutiny. Symbol f představuje zrychlení, které odpovídá hmotnostní síle působící na částici, tj. tíhovému zrychlení při usazování v gravitačním poli

$$f = g$$

nebo odstředivému zrychlení při usazování v odstředivkách,

$$f = \omega^2 r$$

(kde ω je úhlová rychlost částice a r je radiální vzdálenost částice od osy zařízení), popř. při usazování v cyklónech

$$f = v_t^2 / r$$

kde v_t je tangenciální rychlost částice. Součinitel odporu částice ζ_u závisí na režimu obtékání. Platí

$$\zeta_u = \zeta_u(Re_u) \quad (6-2)$$

kde Reynoldsovo kritérium Re_u pro usazování částice je definováno vzorcem

$$Re_u = v_u d_p / \nu \quad (6-3)$$

v němž ν je kinematická viskozita tekutiny.

Vyjádření rov. (6-2) empirickými vztahy je uvedeno v tab. 6-1, rov. (6-2a) až (6-2d).

Úpravou rov. (6-2) získáme kritériální závislost

$$Re_u = Re_u(Ar) \quad (6-4)$$

která je uvedena v tab. 6-1: rov. (6-4a) až (6-4d).

Z rov.(6-1) plyne

$$Ar = (3/4) \zeta_u Re_u^2$$

kde Ar je Archimédovo kritérium, které je definováno jako

$$Ar = f d_p^3 |(\rho_p - \rho_f)| / (\rho_f \nu^2) \quad (6-5)$$

Tab. 6-1 Empirické rovnice vyjadřující usazování izolované kulové částice

Oblast	Rovnice		Platnost rovnice
Stokesova	$\zeta_u = 24 / Re_u$ $Re_u = Ar / 18$ $Re_u = \sqrt[3]{(18 Ly)}$ $Ly = Ar^2 / 5832$	(6-2a) (6-4a) (6-7a) (6-8a)	$Re_u \leq 0,2$ $Ar \leq 3,6$ $Ly \leq 2,22 \cdot 10^{-3}$ $Ar \leq 3,6$
Stokesova a přechodná (Allenova)	$\zeta_u = 24(1 + 0,125 Re_u^{0,72}) / Re_u$ $Ar = 18 Re_u (1 + 0,125 Re_u^{0,72})$ $Ly = \frac{Re_u^2}{18(1 + 0,125 Re_u^{0,72})}$ $Ar^{2/3} = 18 Ly^{1/3} [1 + 0,125 (Ar Ly)^{0,24}]$	(6-2b) (6-4b) (6-7b) (6-8b)	$Re_u \leq 10^3$ $Ar \leq 3,43 \cdot 10^5$ $Ly \leq 2,92 \cdot 10^3$ $Ar \leq 3,43 \cdot 10^5$
turbulentní (Newtonova)	$\zeta_u = 0,44$ $Re_u = 1,73 \sqrt{Ar}$ $Re_u = 0,33 Ly$ $Ar = 3,6 \cdot 10^{-2} Ly^2$	(6-2c) (6-4c) (6-7c) (6-8c)	$Re_u \in \langle 1000; 1,5 \cdot 10^5 \rangle$ $Ar \in \langle 3,43 \cdot 10^5; 7,4 \cdot 10^9 \rangle$ $Ly \in \langle 2,92 \cdot 10^3; 4,6 \cdot 10^5 \rangle$ $Ly \in \langle 2,92 \cdot 10^3; 4,6 \cdot 10^5 \rangle$
přechodná (menší přesnost rovnic)	$\zeta_u = 18,5 Re_u^{-0,6}$ $Re_u = (Ar / 13,9)^{0,714}$ $Re_u = (13,9 Ly)^{0,625}$ $Ar = 138,6 Ly^{0,875}$	(6-2d) (6-4d) (6-7d) (6-8d)	$Re_u \in \langle 0,4; 500 \rangle$ $Ar \in \langle 3,85; 8,33 \cdot 10^4 \rangle$ $Ly \in \langle 1,66 \cdot 10^{-2}; 1500 \rangle$ $Ly \in \langle 1,66 \cdot 10^{-2}; 1500 \rangle$

Z uvedených rovnic je vidět, že rychlost usazování kulové částice je jednoznačně určena *hustotou a průměrem částice a hustotou a viskozitou tekutiny*. Je však třeba znát závislost uvedených veličin na *teplotě a tlaku*. Obecně tedy můžeme vypočítat z uvedených rov. (6-2) a (6-4) kteroukoliv veličinu, známe-li všechny ostatní. Při praktických výpočtech se nejčastěji zjišťuje rychlost usazování částice nebo průměr částice. Použití rov. (6-2) a (6-4) pro stanovení průměru částice představuje iterační výpočet. Proto bylo zavedeno Ljaščenkovo kritérium Ly

$$Ly = Re_u^3 / Ar = \nu_u^3 \rho_f / [f \nu |(\rho_p - \rho_f)|] \quad (6-6)$$

které neobsahuje průměr částice. Pomocí tohoto kritéria můžeme z rov. (6-4) eliminovat Archimédovo kritérium a dostaneme popis sedimentace ve tvaru

$$Re_u = Re_u(Ly) \quad (6-7)$$

přičemž platí vztah

$$Re_u = (3/4) \zeta_u Ly$$

Eliminací Re_u z rov. (6-4) dostaneme

$$Ly = Ly (Ar) \quad (6-8)$$

Z definic kritérií plyne

$$Ar^{1/3} = (3/4) \zeta_u Ly^{2/3}$$

Konkrétní tvar rov. (6-7) a (6-8) pro jednotlivé oblasti je uveden v tab.6-1, rov. (6-7a) až (6-7d) a (6-8a) až (6-8d). Zatímco rov. (6-4) je vhodná pro výpočet rychlosti sedimentace a rov. (6-7) k výpočtu průměru částice, je rov. (6-8) vhodná k výpočtu libovolné z obou veličin, jsou-li ostatní známé.

Probíhá-li obtékání částice v přechodné oblasti (viz tab. 6-1), je výpočet z rov. (6-4), (6-7) nebo (6-8) náročnější. V takovém případě je výhodnější použít grafickou závislost podle obr. 6-4 (viz část 6.6):

$$Ly^{1/3} = Ly^{1/3} (Ar^{1/3}) \quad (6-9)$$

6.2 Usazování nekulové částice

Nejdříve se věnujeme usazování izolované částice.

K vyjádření tvaru částice je užít *dynamický tvarový faktor* definovaný vzorcem

$$\varphi_{Ar} = v_u / v_{uo} \quad [Ar = Ar_o] \quad (6-10)$$

kde v_u a v_{uo} je rychlost usazování nekulové částice a kulové částice při stejné hodnotě Ar [N1, str. 231]. Obecný popis vlivu tvaru částice na sedimentaci a fluidaci (kap. 7) je uveden v práci [N2]. Společný popis umožňuje *normované Archimédovo kritérium*

$$Ar^* = Ar / Ar_{in} \quad (6-11)$$

kde dolní index in přiřazuje danou veličinu k bodu obratu, tj. inflexe a *normovaný dynamický tvarový faktor*

$$\varphi_{Ar}^* = (\varphi_{Ar} - \varphi_{Ar, min}) / (\varphi_{Ar, max} - \varphi_{Ar, min}) \quad (6-12)$$

Průběh vztahu mezi oběma veličinami je dán rovnicí

$$\varphi_{Ar}^* = 0,5 [1 - \tanh(C \log Ar^{*1/3})] \quad (6-13)$$

která může být vyhodnocena na základě faktoru F :

$$F = l_p / d_p \quad (6-14)$$

Zde je l_p - maximální délka nekulové částice a d_p - ekvivalentní průměr částice:

$$d_p = [6 m_p / (\pi \rho_p)]^{1/3} \quad (6-15)$$

kde m_p je hmotnost jedné částice.

Veličiny $\varphi_{Ar, max}$, $\varphi_{Ar, min}$, $Ar_{in}^{1/3}$ a C jsou dány rovnicemi

$$\varphi_{Ar, max} = 0,948 F^{-0,48} \quad (6-16)$$

$$\varphi_{Ar, min} = 0,646 F^{-0,76} \quad (6-17)$$

$$Ar_{in}^{1/3} = 57,6 F^{-0,76} \quad (6-18)$$

$$C = 4,44 F^{-0,853} \quad (6-19)$$

Rov. (6-10) až (6-19) umožňují výpočet sedimentační rychlosti v_u nekulové částice libovolného tvaru pomocí upravené rov. (6-10):

$$\nu_u = \varphi_{Ar} \nu_{u0} \quad (6-10a)$$

Hodnotu rychlosti usazování kulové částice vypočteme z některé rovnice v tab. 6-1.

Pokud nejde o sedimentaci izolované částice, ale o sedimentaci suspenze, tj. o rušené usazování, je rychlost sedimentace téměř o řád nižší (bližší informace je součástí citované publikace [N2]).

6.3 Usazování polydisperzních směsí

Při usazování polydisperzních směsí částic uplatňujeme vztahy odvozené pro usazování jednotlivé částice za předpokladu, že mezi částicemi nedochází ke sdílení hybnosti, tj. že částice se při sedimentaci vzájemně neovlivňují. Dále budeme předpokládat rovnoměrné počáteční rozdělení částic v celém objemu suspenze.

Jestliže hladina suspenze je ve výšce H nad přepážkou, pak se za dobu τ usadí všechny částice s rychlostí usazování $\nu_u \geq \nu_{u0}$, pro kterou platí

$$\nu_{u0} = H/\tau \quad (6-20)$$

Z částic i -té frakce s rychlostí usazování $\nu_{ui} \geq \nu_{u0}$ se usadí ta část, která byla v suspenzi na počátku usazování do výšky h_i nad přepážkou, pro niž platí

$$h_i = \tau \nu_{ui} \quad (6-21)$$

Celkovou hmotnost částic m_u usazených za dobu τ , ze všech suspendovaných částic o hmotnosti m v čase $\tau = 0$, dostaneme při nespojitém zastoupení částic v polydisperzní směsi podle rychlosti usazování

$$m_u / m = \sum_{i=1}^n (m_{ui} / m) = \sum_{i=1}^n (\nu_{ui} / \nu_{u0}) \Delta y_i \quad (6-22)$$

kde n je celkový počet frakcí a Δy_i je hmotnostní zlomek i -té frakce. Jestliže suspenze obsahuje částice s hodnotami rychlosti usazování spojitě rozloženými v určitém intervalu, pak pro celkovou odlučivost m_u / m platí

$$m_u / m = \int_0^1 (\nu_u / \nu_{u0}) dy \quad (6-23)$$

kde y je hmotnostní zlomek částic s usazovací rychlostí nula až ν_u .

Pokud probíhá usazování polydisperzní suspenze ve *Stokesově oblasti*, platí

$$m_u / m = \int_0^1 (d_p^2 / d_{p0}^2) dy \quad (6-24)$$

kde d_{p0} je ekvivalentní průměr částice s rychlostí usazování nula až ν_{u0} .

Označíme-li symbolem y_0 hmotnostní zlomek částic s rychlostí usazování ν_{u0} , můžeme rov. (6-23) upravit na tvar

$$m_u / m = \int_0^{y_0} (\nu_u / \nu_{u0}) dy + 1 - y_0 \quad (6-25)$$

Pro rovnici (6-24) platí obdobně

$$m_u / m = \int_0^{y_0} (d_p^2 / d_{p0}^2) dy + 1 - y_0 \quad (6-25a)$$

Složení polydisperzní směsi se pro danou suspenzi často získává pokusně sedimentační, síťovou nebo optickou analýzou. Sedimentační analýzou (např. Andreasenovou pipetovou nebo vážkovou metodou) získáme rozložení sedimentačních rychlostí v závislosti na množství odpovídajících částic v suspenzi. Ostatními metodami získáme rozdělení hmotnosti nebo četnosti částic podle jejich charakteristického rozměru.

Výpočtové vztahy uvedené v oddílech 6.1 až 6.3 platí i pro tekutinu, která se pohybuje vertikálně [N1, str. 210, obr.10.4].

6.4 Usazování suspenzí

Usazování koncentrovaných suspenzí částic v tekutině se též nazývá rušeným usazováním. Rychlost usazování je v takovém případě značně snižena, protože částice sedimentují proti vytěsňovanému proudu tekutiny. Z knihy [T1] byly převzaty 2 empirické rovnice:

$$Re_u = Ar (1 - \varepsilon)^{4,75} / \{18 + 0,6 [Ar (1 - \varepsilon)^{4,75}]^{0,5}\} \quad (6-26)$$

nebo

$$Ly^{1/3} = Ar^{2/3} (1 - \varepsilon)^{4,75} / \{18 + 0,6 [Ar (1 - \varepsilon)^{4,75}]^{0,5}\} \quad (6-27)$$

Teprve při hodnotách $(1 - \varepsilon) < 0,01$ je možno s chybou nejvýše 5 % považovat částice při usazování za izolované [N1, str. 232].

6.5 Usazováky

Nejčastěji používaným zařízením pro oddělování částic ze suspenzí jsou gravitační usazováky, prašné komory, cyklóny a odstředivky.

6.5.1 Gravitační usazovák

Z rov. (6-20) dostaneme po vynásobení průřezem usazováku S rovnicí výkonnosti periodického usazováku

$$V = H S = S \nu_u \tau \quad (6-28)$$

a pro kontinuální usazovák dostaneme

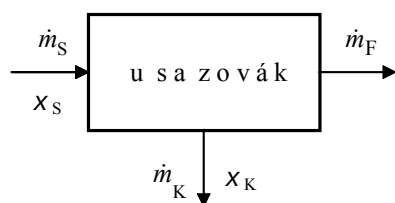
$$\dot{V}_F = S \nu_u \quad (6-28a)$$

kde V je objem usazováku, $\dot{V}_F$ je objemový tok tekutiny vystupující z usazováku, v_u je rychlost usazování částic, které mají být odděleny. S je průřez usazováku kolmý k vektoru usazovací rychlosti.

Celková bilance hmotnosti usazováku (obr.6-1) je

$$\dot{m}_S = \dot{m}_F + \dot{m}_K \quad (6-29)$$

kde $\dot{m}_S$, $\dot{m}_F$, resp. $\dot{m}_K$ je hmotnostní tok přiváděné suspenze, odváděné tekutiny, resp. usazeniny.



Obr. 6-1.
Schéma gravitačního usazováku

Pokud výstupní proud tekutiny obsahuje *zanedbatelné množství suspendovaných částic*, dostaneme z bilance hmotnosti pro suspendovanou látku vztah

$$x_S \dot{m}_S = x_K \dot{m}_K \quad (6-30)$$

kde x_S je hmotnostní zlomek suspendovaných částic v surovině, tj. ve vstupující suspenzi a x_K je hmotnostní zlomek suspendovaných částic v usazenině.

Úpravou rov. (6-28a) až (6-30) získáme vztah pro výkonnost kontinuálního gravitačního usazováku

$$\dot{m}_S = v_u S \rho_f x_K / (x_K - x_S) \quad (6-31)$$

Tyto vztahy platí pro gravitační usazováky a prašné komory s tekutinou proudící ve směru a proti směru působení gravitační síly i kolmo na tento směr [N1, obr.10-4 a 10-5].

6.5.2 Usazovací odstředivka

Usazovací odstředivky jsou obvykle používány k oddělování velmi jemných částic ze suspenzí, kdy bývá splněn Stokesův zákon

$$v_u = \omega^2 r d_p^2 (\rho_p - \rho_f) / (18 \eta) = v_{ug} \omega^2 r / g \quad (6-32)$$

kde v_{ug} je rychlost usazování dané částice v gravitačním poli a ve stejném prostředí jako při sedimentaci v odstředivce.

Pro dobu usazování τ_u v odstředivém poli můžeme z rov. (6-32) odvodit

$$\tau_u = [g / (\omega^2 v_{ug})] \ln(R / r_0) \quad (6-33)$$

kde R je poloměr bubnu odstředivky a r_0 je vzdálenost hladiny kapaliny v odstředivce od osy odstředivky (viz obr. 6-2.).

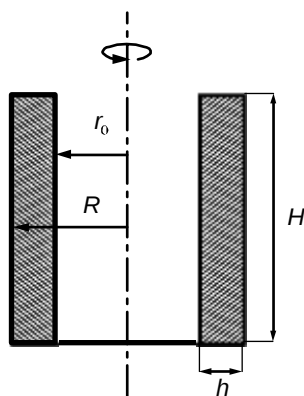
Protože v usazovacích odstředivkách je tloušťka vrstvy kapaliny v poměru k poloměru malá, dostaneme z rov.(6-33) výkonost sedimentační odstředivky

$$\dot{V} = A_c v_{ug} \quad (6-34)$$

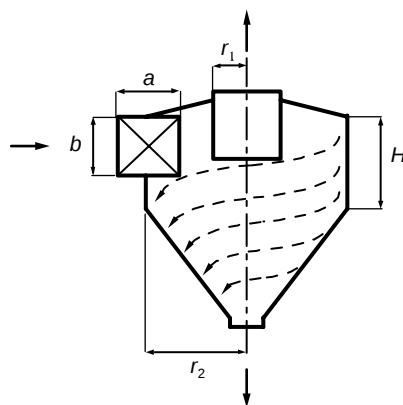
kde A_c je tzv. charakteristika odstředivky, pro kterou platí

$$A_c = 2 \pi \omega^2 R^2 H / g \quad (6-35)$$

a H je výška bubnu.



Obr. 6-2. Schéma sedimentační odstředivky



Obr. 6-3. Schéma cyklónu

Z rov. (6-34) lze odvodit rovnici pro průměr částice, která se ještě v odstředivce zachytí

$$d_p = \sqrt{18 \eta h \dot{V} / [\omega^2 R V_1 (\rho_p - \rho_f)]} \quad (6-36)$$

kde

$h = R - r_0$ a V_1 je objem kapaliny v odstředivce.

6.5.3 Cyklón

Vzhledem k složitým hydrodynamickým poměrům v cyklónu zde uvedeme pouze zjednodušené závislosti pro orientační výpočty. Při odvozování závislostí se předpokládá, že proudící tekutina vytváří ve válcové části cyklónu šroubovici o n otáčkách (obr.6-3). Předpokládá se, že

$$n = H / b \quad (6-37)$$

kde H je výška válcové části cyklónu a b je výška vstupního otvoru.

Protože v cyklónech se obvykle oddělují velmi jemné částice, můžeme předpokládat platnost Stokesova zákona

$$v_u = (v_t^2 / r) (d_p^2 / 18 \eta) (\rho_p - \rho_f) \quad (6-38)$$

Zanedbáním změny rychlosti v_t v tečném směru můžeme z rov. (6-38) odvodit vztah pro dobu usazování τ_u částice o průměru d_p v cyklónu

$$\tau_u = 9 \eta (r_2^2 - r_1^2) / [d_p^2 (\rho_p - \rho_f) v_t^2] \quad (6-39)$$

Když dosadíme za dráhu částice ve válcové části cyklónu

$$v_t \tau_u = \pi (r_1 + r_2) n$$

do rov. (6-39), dostaneme rovnici, ze které je možno vypočítat průměr částice, která se kvantitativně v cyklónu zachytí:

$$\pi H / b = 9 \eta (r_2 - r_1) / [d_p^2 (\rho_p - \rho_f) v_t] \quad (6-40)$$

kde v_t je tečná rychlost, kterou vypočítáme z rovnice

$$v_t = \dot{V} / a b$$

Tlaková ztráta v cyklónu Δp_{dis} je pro rychlost plynu v_t ve vstupním hrdle cyklónu dána rovnicí

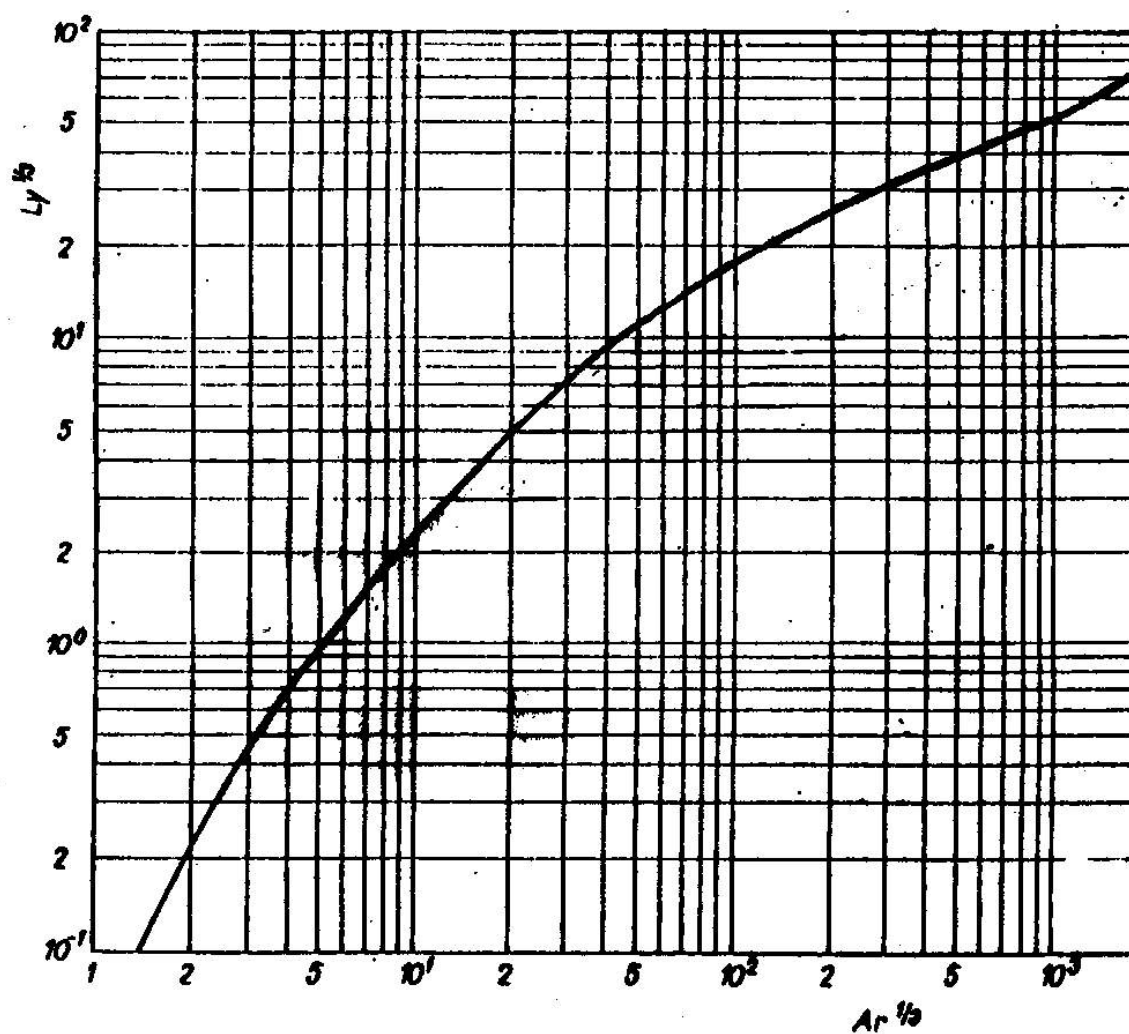
$$\Delta p_{\text{dis}} = \zeta_c v_t^2 \rho_f / 2 \quad (6-41)$$

Součinitel odporu cyklónu ζ_c lze odhadnout z přibližného vzorce

$$\zeta_c = C a b / (4 r_2^2) \quad (6-42)$$

kde konstanta C je závislá na konstrukci vstupního hrdla cyklónu. Pro tečný vstup (obr.6-3) je $C = 16$, pro šroubovicový vstup je $C = 12$ a pro vstup s přepážkou $C = 7,7$. Rov. (6-39) platí v rozmezí $a/r_1 \in \langle 0,16; 0,5 \rangle$, $b/r_1 \in \langle 0,5; 1 \rangle$ a $r_2/r_1 \in \langle 0,25; 0,5 \rangle$.

6.6 Přílohy



Obr. 6-4. Závislost $Ly (Ar)$ pro usazování kulových částic v přechodné a turbulentní oblasti

6.6.1 Literatura

- [H1] Holeček O.: Chemicko-inženýrské tabulky, skriptum VŠCHT, Praha 1997.
- [N1] Neužil L., Míka V.: Chemické inženýrství IA. Ediční středisko VŠCHT, Praha 1992.
- [N2] Neužil L., Drobník P., Čermák J.: Sedimentation and fluidization of spherical and non-spherical particles. International congress of CHISA, Prague, Czech Republic 1996.
- [T1] Todes O.M., Citovič O.B.: Apparaty s kipjaščim zernistim slojem. Chimija, Leningrad 1981.

B Úlohy

U 6-1 Určete usazovací rychlost kulové částice o průměru 0,1 mm a hustotě 2400 kg m^{-3} v plynu hustoty $1,25 \text{ kg m}^{-3}$ a dynamické viskozity 16 μPa s .

Výsledek: Rychlost usazování částic je $0,592 \text{ m s}^{-1}$.

U 6-2 Vypočtěte rychlost usazování křemenných částic (za předpokladu kulového tvaru) o průměru 10 μm ve vodě o teplotě 15°C .

Výsledek: Rychlost usazování křemenných částic bude nabývat hodnot $v_u \in \langle 5,26 \cdot 10^{-5}; 7,17 \cdot 10^{-5} \rangle \text{ m s}^{-1}$.

U 6-3 Jaká je rychlost usazování olověných kuliček průměru 0,1 mm v glycerolu a jeho 50%ním vodném roztoku při teplotě 20°C ?

Výsledek: Rychlost usazování olověných kuliček v čistém glycerolu je $0,0305 \text{ mm s}^{-1}$ a v 50%ním vodném roztoku glycerolu $9,86 \text{ mm s}^{-1}$.

U 6-4 Zjistěte rychlost usazování kulových částic hustoty 1200 kg m^{-3} o průměru 0,2 mm ve 40%ním vodném roztoku ethylalkoholu při teplotě 10°C a 40°C .

Výsledek: Rychlost usazování pevných částic v roztoku ethylalkoholu o teplotě 10°C je $0,862 \text{ mm s}^{-1}$ a v roztoku o teplotě 40°C činí $2,59 \text{ mm s}^{-1}$.

U 6-5 Vypočtěte hmotnostní tok vzduchu (kg h^{-1}) v proudové sušárně o průměru 100 mm pro sušení síranu měďnatého (pentahydrátu). Předpokládejte, že sušené částice mají prakticky tvar koule o průměru 1,25 mm. Střední rychlost vzduchu v sušárně má být dvojnásobkem rychlosti usazování daných částic. V sušárně je normální tlak a teplota 60°C .

Výsledek: Potřebný hmotnostní tok vzduchu sušárnou je 473 kg h^{-1} .

U 6-6 Stanovte takové rozmezí rychlosti vody v zařízení na dělení směsi zrn SiO_2 a PbS , aby částice SiO_2 byly unášeny proudem tekutiny a částice PbS se usazovaly. Voda o teplotě 15°C proudí proti směru působení tíže. Předpokládejte, že částice se neovlivňují a jsou kulového tvaru. Hustota PbS je $8\,500\text{ kg m}^{-3}$ a SiO_2 $2\,500\text{ kg m}^{-3}$. Dělí se směs polydisperzního materiálu. Částice obou materiálů mají průměr od 0,315 do 0,6 mm.

Výsledek: Rychlost vody se může měnit v rozmezí $v \in \langle 0,0871 ; 0,7133 \rangle\text{ m s}^{-1}$.

U 6-7 Kulové částice hustoty $3\,320\text{ kg m}^{-3}$ urazí v roztoku 30 hmot.% methylalkoholu ve vodě při teplotě 40°C svislou vzdálenost 1,6 m za 52 s. Jaká bude jejich rychlost usazování ve vzduchu o teplotě 90°C a normálním tlaku? Jaký je průměr těchto částic?

Výsledek: Rychlost usazování částic ve vzduchu je $1,74\text{ m s}^{-1}$ a jejich průměr je 0,2 mm.

U 6-8 Kulové částice průměru 0,7 mm a hustoty $1\,320\text{ kg m}^{-3}$ se usazují v čistém ethylalkoholu o teplotě 30°C . Jaký průměr by musely mít, aby se ve vodném roztoku ethylalkoholu s koncentrací 40 hmot.% a při teplotě 40°C usazovaly stejně rychle jako za původních podmínek? Jaká rychlost usazování by to byla?

Výsledek: Průměr částic by musel být 0,91 mm. Rychlost usazování by byla $57,5\text{ mm s}^{-1}$.

U 6-9 Určete maximální průměr kulové částice kalcitu, jejíž usazování ve vodě o teplotě 20°C probíhá

a) ve Stokesově oblasti,

b) v přechodné oblasti.

Jaká je rychlost usazování v obou případech?

Výsledek: Usazování částic kalcitu probíhá

a) ve Stokesově oblasti do průměru $60\text{ }\mu\text{m}$ rychlostí $3,35 \cdot 10^{-3}\text{ m s}^{-1}$,

b) v přechodné oblasti do průměru 2,74 mm rychlostí do $0,367\text{ m s}^{-1}$.

U 6-10 Jaký průměr musí mít kulová částice korundu, aby její usazovací rychlost ve vzduchu o teplotě 50°C a normálním tlaku byla osmdesátinásobkem její rychlosti v methylalkoholu o teplotě 20°C . Ověřte, zda je uvedené zadání reálné.

Výsledek: Zadání úlohy je nereálné, neboť poměr Reynoldsových kritérií, tzn. rychlostí usazování, je ve Stokesově a turbulentní oblasti nezávislý na průměru částice:

$$\frac{Re_1}{Re_2} = \frac{Ar_1}{Ar_2} \quad [Ar_i \leq 3,6; i = 1,2] \quad \text{a}$$

$$\frac{Re_1}{Re_2} = \left(\frac{Ar_1}{Ar_2} \right)^{1/2} \quad [Ar_i \geq 3,43; i = 1,2]$$

U 6-11 Vypočtete průtok vzduchu pro zadání úlohy U6-5 za předpokladu, že krystaly mají tvar hranolu o rozměrech $a \times a \times 2a$. Ekvivalentní průměr krystalů je 1,25 mm.

Výsledek: Hmotnostní tok vzduchu sušárnou je 300 kg h^{-1} .

U 6-12 Jaká je rychlost usazování grafitové krychle o délce hrany 1 mm ve vodě při teplotě 40°C ?

Výsledek: Rychlost usazování grafitové krychle je $0,138 \text{ m s}^{-1}$.

U 6-13 Stanovení granulometrického složení olovnaté běloby bylo provedeno Andreasenovou metodou v ethanolu o teplotě 25°C . Složení vzorků, odebíraných z hloubky 60 cm pod hladinou je uvedeno v tab. 6-2 (c_i je množství běloby v jednotkovém objemu vzorku odebraného v čase τ_i). Vypočtete granulometrické složení olovnaté běloby. Hustota olovnaté běloby je $6\,200 \text{ kg m}^{-3}$.

Tab. 6-2. Složení vzorků při stanovování granulometrického složení směsi Andreasenovou metodou

i	τ_i [min]	c_i [g l ⁻¹]	i	τ_i [min]	c_i [g l ⁻¹]
0	0	41,2	8	12	16,0
1	0,5	41,2	9	15	12,9
2	1	40,5	10	25	10,4
3	2	39,0	11	40	6,6
4	3	36,5	12	60	4,8
5	5	32,2	13	120	2,0
6	8	26,3	14	240	0,9
7	10	20,4			

Výsledek: Vypočtené granulometrické složení je uvedeno v tab. 6-3.

Tab. 6-3. Granulometrické složení olovnaté běloby

i	$y_i / 10^{-2}$	d_{pi} [μm]	i	$y_i / 10^{-2}$	d_{pi} [μm]
1	2,2	3,98	8	48,5	19,48
2	4,8	5,62	9	62,5	21,77
3	11,6	7,95	10	76,5	27,54
4	15,7	9,74	11	86,7	35,56
5	24,7	12,32	12	92,6	43,55
6	30,6	15,90	13	96,2	63,61
7	38,0	17,78	14	100,0	<91,9

U 6-15 Jak dlouhá má být prašná komora, aby se v ní ještě usadily kulové částice pevné fáze o průměru 50 μm a hustotě $3\,500 \text{ kg m}^{-3}$ ze vzduchu o teplotě 10°C a tlaku 1 at? Komora má 5 přepážek a je 2 m široká. Průtok vzduchu je $32\,400 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Objem pevné fáze ve vzduchu je zanedbatelný.

Výsledek: Délka prašné komory musí být 2,71 m.

U 6-16 Určete nejmenší průměr částic, které se kvantitativně oddělí z $5\,000\text{ kg h}^{-1}$ plynu v prašné komoře. Komora má 45 vodorovných přepážek, vzdálených od sebe 60 mm, je 6 m dlouhá a 2 m široká. Největší průměr unášeného prachu (kulové částice) je $50\text{ }\mu\text{m}$ a hustota prachu je $5\,000\text{ kg m}^{-3}$. Za podmínek usazování má plyn hustotu $0,51\text{ kg m}^{-3}$ a dynamickou viskozitu $3,275 \cdot 10^{-5}\text{ Pa s}$. Zjistěte také, o kolik se zvýší výkonnost prašné komory, připustíme-li, že je postačující zbavit plyn kvantitativně pouze částic o průměru $15\text{ }\mu\text{m}$ a větších.

Výsledek: Za daných podmínek se v prašné komoře kvantitativně oddělí částice průměru $7,78\text{ }\mu\text{m}$ a větších. Při oddělování částic o průměru $15\text{ }\mu\text{m}$ a větších vzroste výkonnost komory o $13\,550\text{ kg h}^{-1}$ plynu, tj. o 271 %.

U 6-17 V prašné komoře, která má výkonnost $2\,500\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$, se oddělí všechny částice průměru $90\text{ }\mu\text{m}$ ze vzduchu o teplotě 40°C . Hustota částic je $2\,100\text{ kg m}^{-3}$. Tato komora bude použita k usazování částic průměru $30\text{ }\mu\text{m}$ a hustoty $2\,910\text{ kg m}^{-3}$ ze vzduchu o teplotě 250°C . Pro změněné podmínky vypočtete výkonnost prašné komory a průměr částic, které by se kvantitativně usadily při výkonnosti $2\,500\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$. V obou případech je v komoře normální tlak.

Výsledek: Výkonnost prašné komory je $293\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$. Při výkonnosti $2500\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ by se usadily ty částice, které mají průměr nejméně $75\text{ }\mu\text{m}$.

U 6-18 V prašné komoře se mají oddělovat ze vzduchu částice chloridu sodného průměru $45\text{ }\mu\text{m}$. Výkonnost komory má být $2\,400\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$. Komora má tyto rozměry: délka 4 m, šířka 2 m a výška 2 m. V komoře je normální tlak. Vypočtete potřebný počet přepážek v komoře, jestliže po délce komory l dochází ke změně teploty vzduchu t podle tab. 6-4:

Tab. 6-4. Rozložení teploty v prašné komoře

$l\text{ [m]}$	$t\text{ [}^\circ\text{C]}$	$l\text{ [m]}$	$t\text{ [}^\circ\text{C]}$
0	80	1,5	58
0,2	75,5	2	55
0,4	72	2,5	53
0,6	69	3,0	52
0,8	66	3,5	51
1,0	63	4,0	50
1,25	60		

Výsledek : V prašné komoře musí být 8 přepážek.

U 6-19 V usazovací nádrži se usadí $5\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ kalu z vodné suspenze při teplotě 20°C . Kal obsahuje 30 obj.% vody. Pevnou fázi tvoří částice kulového tvaru o průměru $0,5\text{ mm}$ a hustotě $2\,600\text{ kg m}^{-3}$. Jak se změní výkonnost usazováku, jestliže se velikost částic zmenší na $0,2\text{ mm}$ a usazenina vzniklá z těchto částic obsahuje 40 obj.% vody? V obou

případech obsahuje vodná suspenze 15 hmot.% částic. Určete množství kalu při změněných podmínkách.

Výsledek: Výkonnost usazováku klesne na 31,6% původní výkonosti. Množství kalu při nových podmínkách bude $1,87 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

U 6-20 V usazováku válcového tvaru o průměru 5 m se zahušťuje $80 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ vodné suspenze, obsahující 7,2 hmot.% pevné fáze. Teplota suspenze je 10°C , průměr částic prakticky kulového tvaru je $35 \mu\text{m}$ a jejich hustota $2\,800 \text{ kg m}^{-3}$. Jaká je koncentrace pevné fáze v zahuštěném kalu?

Výsledek: Kal obsahuje 31,9 hmot.% pevné fáze.

U 6-21 V nepřetržitě pracujícím usazováku se zpracovává vodná suspenze o teplotě 20°C , obsahující 12 hmot.% pevné fáze hustoty $2\,700 \text{ kg m}^{-3}$. Částice mají tvar koule průměru $20 \mu\text{m}$. Usazenina obsahuje 40 hmot.% vody. Usazovák je stojatý válec průměru 3 m. Vypočítejte množství suspenze zpracovávané v usazováku.

Výsledek: V usazováku se zpracovává $11,72 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

U 6-22 Jaký má být průměr nepřetržitě pracujícího usazováku tvaru stojatého válce na zpracování $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ vodné suspenze o teplotě 20°C ? Suspenze obsahuje 10 hmot.% kulových částic o průměru $10 \mu\text{m}$ a hustotě $3\,200 \text{ kg m}^{-3}$. V kalu je 50 hmot.% vody.

Výsledek: Průměr usazováku má být 11,28 m.

U 6-23 Určete průměr usazováku tvaru stojatého válce pro nepřetržité usazování plavené křidy ve vodě. V usazováku se má zpracovávat 120 t h^{-1} suspenze, která obsahuje 6,5 hmot.% CaCO_3 . Průměr částic je $40 \mu\text{m}$ a hustota $2\,700 \text{ kg m}^{-3}$. V usazenině je 65 hmot.% vody. Teplota suspenze je 15°C . Skutečný průměr usazováku se zpravidla bere o 1/3 větší, než je průměr vypočtený.

Výsledek: Potřebný průměr usazováku se zahrnutím dané korekce bude 6,86 m.

U 6-24 K oddělování sorbentu z kyseliny octové o teplotě 20°C se má použít sedimentační odstředivka. Sorbent tvoří kuličky průměru $100 \mu\text{m}$ a hustoty $1\,300 \text{ kg m}^{-3}$. K dispozici jsou odstředivky s charakteristikami $A_{c1} = 465 \text{ m}^2$, $A_{c2} = 945 \text{ m}^2$, $A_{c3} = 647 \text{ m}^2$. Odstředivka má mít výkonost $2\,500 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ kyseliny octové. Která z daných odstředivek vyhovuje a jakou má výkonost?

Výsledek: Vyhovuje třetí odstředivka, jejíž výkonost je $2\,509 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

U 6-25 Jak velké částice se kvantitativně zachytí v usazovací odstředivce s frekvencí otáčení $2\,400 \text{ min}^{-1}$? Přepadová hrana v odstředivce je 7 cm vysoká (výška kapaliny v odstředivce), průměr a výška bubny odstředivky jsou 0,6 m. Odděluje se sraženina o hustotě $2\,500 \text{ kg m}^{-3}$ z vodné suspenze o teplotě 45°C . Výkonost odstředivky je 300 t h^{-1} .

Výsledek: V odstředivce se kvantitativně odloučí částice průměru 4 μm .

U 6-26 V sedimentační odstředivce podle úlohy U6-25 se mají oddělovat částice průměru 12 μm z kapaliny o hustotě 1 092 kg m^{-3} a viskozitě 1,48 Pa s. Vypočtete výkonnost odstředivky. Hustota částic je 1 510 kg m^{-3} .

Výsledek: Výkonnost odstředivky bude 174 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$.

U 6-27 V sedimentační odstředivce se má oddělovat BaSO_4 z 60 hmot.% kyseliny sírové. Teplota kyseliny je 30°C. Odstředivka má průměr bubnu 0,6 m, výšku bubnu 0,35 m, frekvenci otáčení 720 min^{-1} . Zadrž kyseliny v odstředivce je 40 l. Vypočtete výkonnost odstředivky. Předpokládejte, že částice BaSO_4 jsou kulové a mají průměr 5 μm .

Výsledek: Výkonnost odstředivky bude 2,61 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$.

U 6-28 V cyklónu o rozměrech $H = 1,6 \text{ m}$, $r_2 = 0,8 \text{ m}$, $r_1 = 0,5 \text{ m}$, $a = 0,3 \text{ m}$, $b = 0,6 \text{ m}$ (viz obr. 6-3) se mají odlučovat částice cukru ze vzduchu při teplotě 50°C a normálním tlaku. Průtok vzduchu je 14 400 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. Vypočtete minimální průměr částic, které se ještě kvantitativně zachytí v cyklónu. Předpokládejte kulový tvar částic cukru.

Výsledek: V cyklónu se kvantitativně zachytí ještě částice průměru 13,4 μm .

U 6-29 Vypočtete rozměry cyklónu typu LIOT pro odlučování bezvodé sody ze vzduchu o teplotě 70°C a normálním tlaku. Částice sody jsou prakticky kulové a mají průměr 10 μm . Průtok vzduchu je 7 800 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ za normálních podmínek. Rozměry cyklónu typu LIOT jsou vyjádřeny pomocí šířky vstupního hrdla a (viz obr. 6-3): $b = 2a$, $H = 2r_2 = 5,7a$, $2r_1 = 3,7a$. Jaká je tlaková ztráta v cyklónu?

Výsledek: Potřebná šířka vstupního hrdla cyklónu LIOT je 0,255 m. Tlaková ztráta v tomto cyklónu bude činit 527 Pa.

U 6-30 Jak velké částice bezvodé sody se kvantitativně odloučí v cyklónu podle úlohy U6-28, zvýšíme-li průtok vzduchu na 10 500 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ za jinak stejných podmínek? Jaká bude tlaková ztráta v cyklónu v tomto případě?

Výsledek: V cyklónu se kvantitativně odloučí částice o minimálním průměru 7,4 μm . Tlaková ztráta v cyklónu vzroste na 956 Pa.