

POSTUPUJÍCÍ FLUIDNÍ VRSTVA VI*)

Výpočet parametrů postupující rovnoměrné fluidní vrstvy úzkých frakcí zrnitého materiálu

LUBOMÍR NEUŽIL, MILOSLAV HRDINA*

Vysoká škola chemickotechnologická, Suchbátarova 3, 166 28 Praha 6

**Ústav nerostných surovin, Vítězná 425, 284 03 Kutná Hora*

Došlo 10. 1. 1979

Je popsán postup pro určení důležitých parametrů postupující rovnoměrné fluidní vrstvy úzkých frakcí zrnitých materiálů, jako jsou postupné rychlosti obou fází, objemový tok tekutiny, mezerovitost vrstvy nebo koncentrace částic při různém uspořádání toku a potřebný průřez zařízení. Postup je ilustrován praktickým příkladem hydrotransportu křemičitého písku. Obecnější diskuse ukazuje možnosti uplatnění postupující fluidní vrstvy k hydraulické dopravě v úpravních zrnitých materiálech a v silikátovém průmyslu.

ÚVOD

Postupující fluidní vrstva je používána v široké oblasti technologické praxe. Nejčastěji snad v případech svislé hydraulické dopravy zrnitých materiálů, či jejich rušené sedimentace. Dále pak při granulometrické úpravě polydisperzních materiálů, např. při výrobě slévarenských a sklářských písků, při třídění keramických surovin nebo v případech oddělování vhodně velikých krystalů různých látek v třídícím krystalizátoru. Zařízení s postupující fluidní vrstvou zaručují kontinuální provoz a vysokou výkonnost při malé zastavěné ploše. Obvykle neobsahují točivé součásti, a proto vyžadují poměrně nízké náklady na údržbu a jsou nenáročné na obsluhu.

Přesto nebyla dosud problematika postupující fluidní vrstvy uspokojivě komplexně řešena. Tak např. Kwauk [1], podobně jako Lapidus a Elgin [2], se zabývali popisem různě uspořádané postupující fluidní vrstvy pouze monodisperzních částic. Gasparjan a Zaminjan [3], [4] se zaměřili na vertikální pohyb nejen monodisperzního, ale i polydisperzního zrnitého materiálu v suspenzi. Omezili se však [3], [4] jen na případ, kdy se zrnitý materiál pohybuje souhlasným směrem s tekutinou. Kolář [5] zavedl definici relativní rychlosti tekutiny vůči monodisperzním částicím při sedimentaci v uzavřené nádobě. Jeho popis však platí i pro fluidní vrstvu.

Tato práce navazuje především na dříve uveřejněné články [6] až [8]. V nich byly odvozeny a pokusně ověřeny vztahy popisující rovnoměrnou postupující fluidní vrstvu monodisperzního i polydisperzního zrnitého materiálu při různém uspořádání směru pohybu tektiny a pevné fáze.

TEORIE

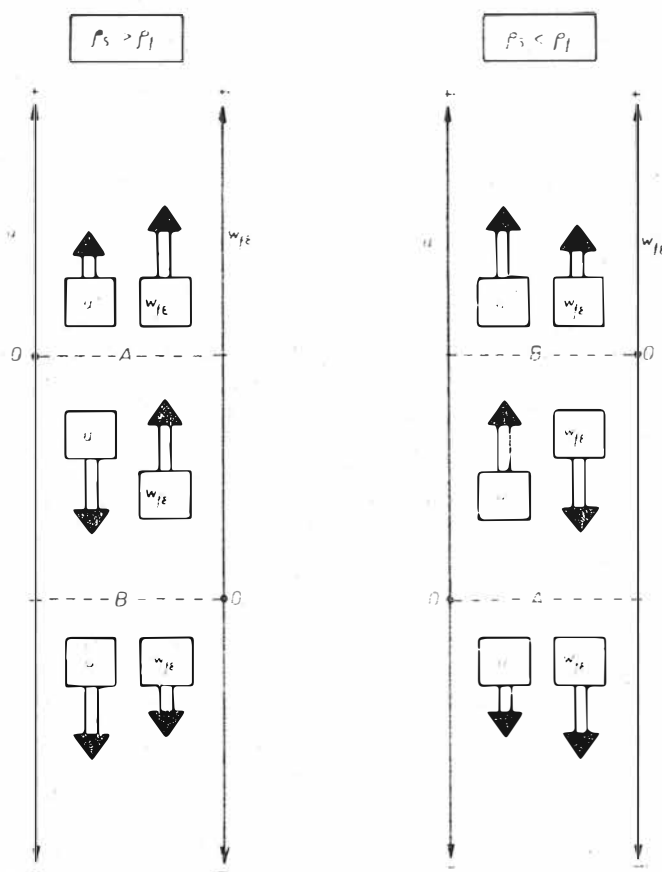
Postupující fluidní vrstva je zde chápána jako taková rovnoměrná fluidní vrstva, ve které je výsledná střední rychlost kterékoliv složky souboru pevných částic nenulová. V této práci se omezujeme na popis jednosložkového zrnitého materiálu, tj. na

*) Sdělení V. v sérii „Postupující fluidní vrstva“: Coll. Czech. Chem. Commun. 44, 2790 (1979).

úzkou frakci o stejné hustotě a tvaru zrn, kterou je možno přibližně považovat za monodisperzní soubor částic.

Rovnoměrná fluidní vrstva má konstantní hodnotu mezerovitosti v čase a po vodorovném průřezu zařízení. Fluidace je uvažována pouze v poli tíže zemské a tok tekutiny i pohyb pevných částic se zde uvažuje jen ve vertikálním směru. Pro tyto podmínky je k popisu možno použít orientovaných skalárních veličin. Za kladný směr je zvolen směr opačný vůči směru gravitačního zrychlení. Průřezu zařízení je přiřazeno znaménko shodné se znaménkem střední rychlosti tekutiny nebo pevných částic.

V případě, že směr toku částic a tekutiny je souhlasný, mluvíme o souproudém uspořádání (souproud), jsou-li směry opačné, jde o uspořádání protiproudé (protiproud). Schematické znázornění různých případů uspořádání postupující fluidní vrstvy, které mohou nastat ve vertikálním zařízení, je ukázáno na obr. 1. Na tomto obrázku jsou uvedeny dvě alternativy podle znaménka rozdílu hustot pevných



Obr. 1. Schematické znázornění různých případů uspořádání toku zrnitého materiálu a tekutiny; u — střední rychlost pohybu částic, w_f — střední rychlost tekutiny v mezerách mezi částicemi, ρ_s a ρ_f — hustota částic a tekutiny

částic a tekutiny ($\varrho_s - \varrho_f$). V obrázku je dále použito symbolu w_f , který označuje tzv. mezerovou rychlost tekutiny ve vrstvě a symbolu u , který odpovídá střední rychlosti částic v daném průřezu fluidní vrstvy. Úrovně A a B rozdělují obě alternativy na tři oblasti, v nichž je typické uspořádání toku. Dostáváme tak šest případů, kromě čtyř případů hraničních, které spadají do úrovně A a B .

Z obr. 1 plyne, že úroveň A odpovídá nepostupující fluidní vrstva ($u = 0$), úrovni B sedimentace v klidné tekutině ($w_f = 0$). Oblast mezi úrovněmi A a B zahrnuje protiproudé uspořádání, což je vlastně přechod mezi obvykle označovanou fluidní a sedimentující vrstvou. V ostatních oblastech jde o různé případy souproudu. V obr. 1 je dále schematicky vyznačeno, kdy při souproudu předbíhá tekutina částice a kdy je tomu naopak.

V obr. 1 není zahrnut případ, pro který platí $(\varrho_s - \varrho_f) = 0$, protože zde může existovat pouze souproudé uspořádání toku suspenze. Na tento zvláštní případ nelze uplatnit vztahy vhodné k popisu postupující fluidní vrstvy, neboť při ustáleném stavu toku neexistuje hydraulický odpor proti pohybu částic v tekutině. Částice mají stejnou postupnou rychlost jako tekutina (na rozdíl od případů, kdy $\varrho_s \neq \varrho_f$) a popis chování takové suspenze se tím podstatně zjednodušuje.

Vztah mezi rychlostí tekutiny a monodisperzních částic při pohybu suspenze ve vertikálním směru byl podrobně diskutován a pokusně ověřen v pracích [6] až [8]. Je vyjádřen rovnicí

$$w_f = w + u_c \varepsilon / (1 - \varepsilon), \quad (1)$$

kde w_f je mimovrstvová rychlost tekutiny, tj. rychlost tekutiny vypočtená z objemového toku tekutiny zařízením V_f a průřezu zařízení S_f podle vzorce

$$w_f = \dot{V}_f / S_f. \quad (2)$$

Symbol ε značí mezerovitost fluidní vrstvy, což je objemový zlomek tekutiny v suspenzi:

$$\varepsilon = V_f / V = 1 - V_s / V = 1 - c. \quad (3)$$

Zde je V_f objem tekutiny v suspenzi o celkovém objemu V a obsahující objem pevných částic V_s . Symbol c označuje tedy objemový zlomek pevných částic.

Postupná rychlost kompaktní vrstvy zrnitého materiálu (pro $\varepsilon = 0$) je dána podílem objemového toku zrnitého materiálu V_s a průřezu zařízení S_s :

$$u_c = \dot{V}_s / S_s. \quad (4)$$

Přitom platí rovnost absolutních hodnot

$$|S_f| = |S_s| = S, \quad (5)$$

kde S je absolutní hodnota průřezu zařízení. Obě veličiny S_f a S_s se liší pouze znaménky. Při protiproudu zrnitého materiálu a tekutiny je

$$\text{sign } S_f = - \text{sign } S_s \quad [\text{protiproud}], \quad (5a)$$

při souproudu

$$\text{sign } S_f = \text{sign } S_s \quad [\text{souproud}], \quad (5b)$$

neboť znaménka průřezů S_f a S_s jsou volena shodně se znaménky rychlostí w_f a u_c . (Za směr kladný je volen směr nahoru.)

Pokud je hledanou veličinou mezerovitost postupující fluidní vrstvy ε , lze ji určit po úpravě rovnice (1):

$$\varepsilon = \frac{1}{u_c/(w_f - w) + 1}. \quad (1a)$$

Často je naopak hledanou veličinou objemový tok tekutiny $\dot{V}_f$ a průřez S nebo průměr potrubí D , v němž dochází k toku $\dot{V}_s$ zadaného množství pevné fáze. Spojením rovnic (1), (2), (3) a (5) vyjádříme poměr $\dot{V}_f/\dot{V}_s$ a z něho již snadno určíme hodnotu $\dot{V}_f$ a S , resp. D . Přitom je nutno rozlišovat sou proud a protiproud. Dostáváme vztah

$$\frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_s} = \pm \frac{w_f/w}{[(w_f/w) - 1](1 - \varepsilon)/\varepsilon}, \quad (6)$$

v němž znaménko $+$ platí při souproudu a znaménko $-$ při protiproudu.

Veličina w v rovnici (1) představuje mimovrstvovou rychlost tekutiny, při které se vytvoří nepostupující fluidní vrstva ($u_c = 0$) o mezerovitosti ε . Hodnotu w můžeme určit buď empiricky, nebo výpočtem pomocí publikovaných vztahů.

Empirické výsledky lze s výhodou vyjádřit expanzní rovnicí [9] typu

$$\varepsilon = a(w/w_0)^b, \quad (7)$$

kde a , b jsou pokusně stanovené konstanty a w_0 je sedimentační rychlost jednotlivých částic daného materiálu. Poměrně jednoduchá rovnice popisující expanzi nepostupující fluidní vrstvy se uvádí v literatuře [10] a [11]

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}}. \quad (8)$$

Z vlastností tekutiny a částic vypočteme Archimedovo kritérium Ar podle vzorce

$$\text{Ar} = g d_e^3 (\rho_s - \rho_f) / (v^2 \rho_f), \quad (9)$$

kde je d_e — ekvivalentní průměr částic definovaný jako průměr koule téhož objemu jako mají částice, g — gravitační zrychlení, v — kinematická viskozita tekutiny, ρ_s a ρ_f — hustota částic a tekutiny.

Reynoldsovo kritérium Re je definováno rovnicí

$$\text{Re} = d_e w / \nu. \quad (10)$$

Tím je dána hodnota rychlosti w .

Jiný postup výpočtu rychlosti w je založen [11] na grafickém vyjádření expanze fluidní vrstvy ve formě závislosti

$$\varphi(\text{Ly}^{1/3}, \text{Ar}^{1/3}, \varepsilon) = 0, \quad (11)$$

kde Ljaščenkovo kritérium Ly je dáno vzorcem

$$\text{Ly} = \frac{w^3}{g \nu} \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}. \quad (12)$$

Není-li předem stanoveno, jakou požadujeme mezerovitost ε , lze pro výpočty podle rovnice (6) doporučit při vzestupném toku tekutiny hodnotu ε alespoň o 25 % vyšší, než je mezerovitost nehybné (volně sypané) vrstvy zrnitého materiálu. Např.

vrstva volně nasypaných kulových částic má mezerovitost zhruba 0,4. Volíme tedy $\varepsilon \doteq 0,5$. Tím je zajištěno, že se zařízení neucpe zrnitým materiálem. Současně volíme poměr $w_f/w \doteq 2$. Tím docílujeme toho, že při poměrně malé spotřebě tekutiny a relativně malém průřezu zařízení budou únosné tlakové ztráty (touto otázkou se zde nezabýváme — viz např. [13]).

PŘÍKLAD VÝPOČTU

Uplatnění popsané teorie k praktickým výpočtům ilustruje příklad hydraulické dopravy $\dot{m}_s = 1000 \text{ kg h}^{-1}$ úzké frakce křemičitého písku o ekvivalentním průměru zrn $d_e = 0,619 \text{ mm}$ a hustotě 2624 kg m^{-3} . K hydrotransportu se má používat voda o teplotě 23°C ($\rho_f = 997,5 \text{ kg m}^{-3}$, $\nu = 0,9381 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$). Dopravní trasa má mít vzestupné a sestupné vertikální úseky. Úkolem je určit spotřebu dopravní vody $\dot{V}_f$, postupnou rychlost vody w_f a zrnitého materiálu u_c , mezerovitost fluidní vrstvy v sestupném úseku ε'' a na výstupu ze zařízení ε_c za předpokladu, že na vzestupném úseku bude $\varepsilon' = 0,5$, potřebný průřez S a průměr D dopravní trasy. Pro uvedené podmínky byly pokusně stanoveny hodnoty konstant v rovnici (7): $a = 1,012$; $b = 0,323$; $w_0 = 0,086 \text{ m s}^{-1}$.

Nejprve vypočteme rychlost tekutiny w' potřebnou k dosažení mezerovitosti nepostupující fluidní vrstvy $\varepsilon' = 0,5$. Rovnici (7) upravíme a dosadíme:

$$w' = w_0(\varepsilon'/a)^{1/b} = 0,086(0,5/1,012)^{1/0,323} = 9,693 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}.$$

Zvolíme $w_f/w' = 2$, takže

$$w'_f = 2w' = 2 \cdot 9,693 \cdot 10^{-3} = 0,01939 \text{ m s}^{-1}.$$

Z rovnice (6) pro souproud obdržíme

$$\frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_s} = 1 + \frac{2}{[2 - 1](1 - 0,5)/0,5} = 2.$$

Objemový tok pevné fáze

$$\dot{V}_s = \frac{\dot{m}_s}{\rho_s} = \frac{1000/3600}{2624} = 1,059 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}.$$

Objemový tok tekutiny

$$\dot{V}_f = 2\dot{V}_s = 2 \cdot 1,059 \cdot 10^{-4} = 2,118 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 0,7625 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}.$$

Z rovnice (2) s přihlédnutím k rovnici (5) a k hodnotě $w_f > 0$ (vzestupný tok) dostaneme průřez zařízení

$$S = \dot{V}_f/w'_f = 2,118 \cdot 10^{-4}/0,01939 = 1,092 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2.$$

Průměr potrubí D pro hydrotransport potom bude

$$D = \sqrt{4S/\pi} = \sqrt{4 \cdot 1,092 \cdot 10^{-2}/\pi} = 0,1179 \text{ m} \doteq 118 \text{ mm}.$$

Ještě vypočteme postupnou rychlost zrnitého materiálu u_c pomocí rovnice (4) pro $S_s = S$:

$$u_c = \dot{V}_s/S = 1,059 \cdot 10^{-4}/1,092 \cdot 10^{-2} = 9,693 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}.$$

Tím jsme vypočetli všechny požadované hodnoty pro vzestupný tok. Ukažme si ještě, jaké výsledky bychom dostali při použití publikovaných expanzních vztahů (výpočet rychlosti w'). Nejprve vypočteme hodnotu Ar podle rovnice (9):

$$\text{Ar} = 9,81(0,619 \cdot 10^{-3})^3(2624 - 997,5)/[(0,9381 \cdot 10^{-4})^2 997,5] = 4311.$$

Tuto hodnotu dosadíme spolu s $\varepsilon' = 0,5$ do rovnice (8) a dostaneme

$$\text{Re}' = \frac{4311 \cdot 0,5^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{(4311 \cdot 0,5^{4,75})}} = 6,260.$$

Z rovnice (10) vyjádříme a vypočteme rychlost w' :

$$w' = \text{Re}' \nu / d_e = 6,260 \cdot 0,9381 \cdot 10^{-4} / 0,619 \cdot 10^{-3} = 9,487 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}.$$

Tato hodnota w' je pouze o 2 % nižší, než jsme získali z empirické rovnice (7).

Jiný postup výpočtu w' je založen na vztahu (11). V literatuře [11] odečteme pro $\varepsilon' = 0,5$ a

$$\text{Ar}^{1/3} = 4311^{1/3} = 16,28$$

hodnotu

$$\text{Ly}'^{1/3} = 0,40.$$

Z definice Ly rovnici (12) vyjádříme a vypočteme w' :

$$\begin{aligned} w' &= \text{Ly}'^{1/3} [g\nu(\rho_s - \rho_f)/\rho_f]^{1/3} = \\ &= 0,40 [9,81 \cdot 0,9381 \cdot 10^{-4}(2624 - 997,5)/997,5]^{1/3} = 9,866 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}. \end{aligned}$$

I tato hodnota rychlosti w' je ve velmi dobré shodě s hodnotou vypočtenou z empirického vztahu (7), neboť je vyšší pouze o 2 %. Nadále budeme počítat s hodnotou $w' = 9,693 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$.

V sestupném úseku hydrotransportu uvažujeme tentýž průřez potrubí, stejné absolutní hodnoty rychlosti tekutiny a částic. Vzhledem k souproudu směrem dolů musí platit

$$w_j'' = -w_j', \quad u_c'' = -u_c'.$$

Nyní je předmětem výpočtu mezerovitost vrstvy ε'' na základě známých hodnot w_j' a u_c' . Vyjdeme z rovnic (1a) a (7), v nichž je další neznámou rychlost w'' . Veličinu ε'' nelze z obou vztahů vyjádřit v explicitní formě, proto použijeme iteračního výpočtu. Oba vztahy si pro tento účel upravíme a známé hodnoty dosadíme:

$$\varepsilon'' = \frac{1}{u_c'/(w_j'' - w'') + 1},$$

$$w'' = w_0(\varepsilon''/\alpha)^{1/b};$$

$$\varepsilon'' = \frac{1}{-9,693 \cdot 10^{-3}/(-19,39 \cdot 10^{-3} - w'') + 1}, \quad (13a)$$

$$w'' = 0,086(\varepsilon''/1,012)^{1/0,323}. \quad (13b)$$

První odhad hodnoty ε'' nejlépe zjistíme za předpokladu $w''^{(0)} = -w_j' = 19,39 \times 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. Výpočtem z rovnice (13a) dostaneme

$$\varepsilon''^{(1)} = 0,7500.$$

Tuto hodnotu dosadíme do rovnice (13b) a obdržíme

$$w^{(1)} = 34,00 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}.$$

Výpočtové cykly opakujeme dosazením této hodnoty do rovnice (13a) atd. až se s požadovanou přesností výsledky v jednotlivých iteračních cyklech shodují. S přesností na 4 cifry dostáváme výsledné hodnoty po osmé iteraci:

$$w'' = 57,34 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1},$$

$$\varepsilon'' = 0,8879.$$

Mezerovitost fluidní vrstvy na výstupu z dopravní trasy ε_e je dána celkovým množstvím protékajících fází, tj. toky V_s a $\dot{V}_f$. Vyjdeme z definičního vzorce veličiny ε a upravíme jej tak, abychom mohli přímo dosazovat hodnotu poměru $\dot{V}_f/V_s = 2$:

$$\varepsilon_e = \dot{V}_f/(\dot{V}_f + \dot{V}_s) = (\dot{V}_f/\dot{V}_s)/[(V_f/\dot{V}_s) + 1] = 2/(2 + 1) = 0,67.$$

DISKUSE

Jak je vidět z výsledků ilustrativního příkladu, liší se značně mezerovitosti vrstvy (a tím i koncentrace pevné fáze) ve vzestupném i sestupném úseku trasy a na výstupu ze zařízení. Vzhledem k hodnotě na výstupu je mezerovitost ve vzestupném úseku o 25 % nižší (koncentrace částic je zde o 52 % vyšší) a v sestupném úseku o 33 % vyšší (koncentrace je o 67 % nižší). Tyto rozdíly jsou dány odchýlnými hodnotami postupné rychlosti pevných částic a tekutiny při vertikálním toku. Bez použití vztahů (1) nebo (1a) nebo (6) a (7) nebo (8) nebo (11) nelze tedy z poměru objemových toků fází $\dot{V}_s/\dot{V}_f$ spolehlivě usuzovat na koncentraci zrnitého materiálu v postupující fluidní vrstvě. Proto také nelze nezávisle volit poměr objemových, popř. hmotnostních toků zrnitého materiálu a dopravní tekutiny. Mohli bychom se tak dostat do sporu s fyzikální skutečností, neboť při volbě vysoké hodnoty tohoto poměru by mohla být odpovídající vypočtená koncentrace fluidní vrstvy vyšší, než má volně nasypaná vrstva, tj. mimo reálný rozsah. Dostali bychom se do podmínek, za kterých dochází k ucpání zařízení.

K získání obecnějších představ o významu rovnice (1) pro řešení technických úkolů byl pomocí této rovnice sestrojen na obr. 2 graf závislosti u_c na ε a w_f v rozsahu existence fluidní vrstvy ($0,4 \leq \varepsilon < 1$). Graf byl vytvořen na základě fyzikálních dat z ilustrativního příkladu.

Jak je vidět z obr. 2, lze pro $\rho_s > \rho_f$ rozlišit tyto typické případy:

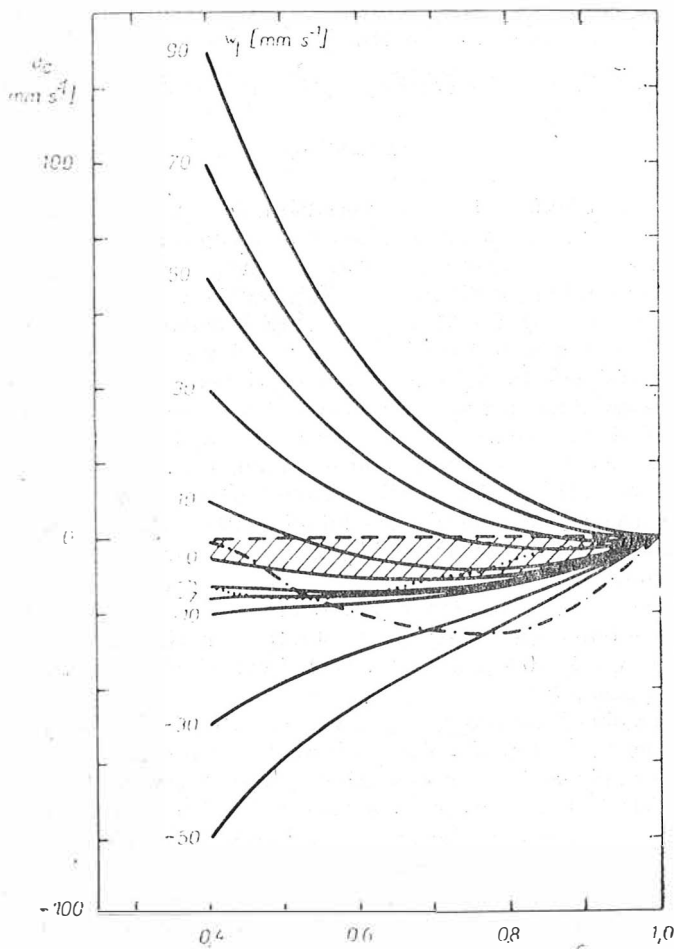
1. $u_c > 0$, $w_f > w$: Jde o oblast souproutně uspořádané postupující fluidní vrstvy s pohybem pevných částic a tekutiny v kladném směru. (Oblast nad úrovní A v obr. 1.) Závislost (1) má pro $w_f = \text{konst}$ s rostoucí hodnotou ε klesající průběh. Maximální tok pevných částic je dosažen při hodnotě mezerovitosti, odpovídající prahu fluidace, tj. volně sypané vrstvě.

2. $u_c = 0$, $w_f = w$: Tento případ odpovídá nepostupující fluidní vrstvě. (Úroveň A v obr. 1.) Pro $\varepsilon \rightarrow 1$ platí při všech uspořádáních postupující fluidní vrstvy $u_c \rightarrow 0$, je-li hodnota w konečná.

3. $u_c < 0$, $0 < w_f < w$: Jde o postupující fluidní vrstvu protiproudě uspořádanou s postupem pevných částic v záporném směru a s postupem tekutiny ve směru kladném. (Oblast mezi úrovněmi A a B v obr. 1.) Tato oblast je na obr. 2 vyznačena šrafováním. Z obr. 2 je vidět, že závislost (1a) není v této oblasti monotónní a vykazuje minimum.

4. $u_c < 0$, $w_f = 0$: Zde jde o postupující fluidní vrstvu, která je dělicí hranicí mezi protiproudým a soupproudým uspořádáním. (Úroveň B v obr. 1.) Tento stav lze také považovat za sedimentaci v nepostupující tekutině.

5. $u_c < 0$, $w_f < 0$: Jde o postupující fluidní vrstvu soupproudě uspořádanou s pohybem materiálu a tekutiny v záporném směru. (Oblast pod úrovní B v obr. 1.) Snižujeme-li v této oblasti rychlost tekutiny w_f od hodnoty $w_f = 0$, objevuje se na jednotlivých křivkách $u_c = u_c(\varepsilon)$ při $w_f = \text{konst}$ vedle minima ještě inflexní bod, popř. i maximum. Při dalším snižování rychlosti w_f se rozdíl mezi maximem a minimem veličiny u_c zmenšují a oba extrémní body se přibližují k bodu inflexnímu, kde zaniknou.



Obr. 2. Vztah mezi mimovrstvovou rychlostí tekutiny w_f (voda 23 °C), postupnou rychlostí kompaktní vrstvy zrnitého materiálu u_c (křemičitý písek hustoty $\rho_s = 2624 \text{ kg m}^{-3}$ a ekvivalentního průměru zrn $d_e = 0,619 \text{ mm}$) a mezerovitostí suspenze ε (objemový zlomek tekutiny ve fluidní vrstvě);

— $w_f = \text{konst}$, — — — nepostupující fluidní vrstva, průběh extrémních hodnot, — . — . — průběh inflexních hodnot, ||||| oblast protiproudu.

Průběh extrémních hodnot u_c je v obr. 2 vyznačen tečkovanou křivkou, průběh bodů inflexních je znázorněn křivkou čerchovanou. Průsečík křivek extrémů a inflexů dělí extrémy na oblast minim (pravá větev tečkované křivky) a na oblast maxim (levá větev tečkované křivky).

Minima na křivkách $u_c(\varepsilon; w_f)$, vyskytující se v oblasti protiproudu a částečně i v souproudu ($u_c, w_f < 0$), vyznačují rozmezí podmínek, za kterých musí být použito nosného roštu (vpravo od minima — vyšší mezerovitost ε). V oblasti protiproudu vyznačují minima situaci, kdy je při dané rychlosti w_f dosaženo maximální absolutní hodnoty u_c , aniž by byly pevné částice unášeny ve směru toku tekutiny. Tento stav je možno označit zahlcením zařízení.

Podobnou problematikou se zabývali i autoři [14], kteří pro případ protiproudého uspořádání postupující fluidní vrstvy monodisperzních částic vypracovali zobecněné grafy pro možnost určení extrémních hodnot jednotlivých veličin. Pomocí těchto grafů lze např. určit maximální možnou rychlost tekutiny a maximální možnou koncentraci pevných částic, při kterých se tuhé částice začínají vynášet ze zařízení.

ZÁVĚR

Uvedený popis postupující rovnoměrné fluidní vrstvy umožňuje určit podmínky pro spolehlivou funkci zařízení na fluidní dopravu (hydrotransport) zrnitých látek, na jejich třídění či jinou úpravu ve fluidní vrstvě. Práce je zaměřena na monodisperzní materiály, tj. na úzké frakce částic téže hustoty a tvaru. Přes toto zjednodušení je vytvořený výpočtový postup použitelný k řešení řady praktických problémů silikátového průmyslu po vyjádření vlastností částic středními hodnotami.

Symbols

Ar	Archimedovo kritérium definované rovnicí (9)
a	empirická konstanta v rovnici (7)
b	empirická konstanta v rovnici (7)
c	objemový zlomek pevné fáze v suspenzi (ve fluidní vrstvě), definovaný rovnicí (3)
D	průměr zařízení
d_e	ekvivalentní průměr pevných částic
g	gravitační zrychlení
Ly	Ljaščenkovo kritérium definované rovnicí (12)
Re	Reynoldsovo kritérium definované rovnicí (10)
S	příčný průřez zařízení
u	postupná rychlost částic vůči stěnám zařízení
u_c	střední postupná rychlost kompaktní vrstvy pevných částic ($\varepsilon = 0$), definovaná rovnicí (4)
V	objem
$\dot{V}$	objemový tok
w	střední relativní mimovrstvová rychlost tekutiny vůči částicím
w_f	střední mimovrstvová rychlost tekutiny
$w_{f\varepsilon}$	mezerová rychlost tekutiny ve vrstvě
w_0	pádová rychlost částice v neomezeném prostředí

- ε mezerovitost fluidní vrstvy (objemový zlomek tekutiny ve vrstvě) definovaná rovnici (3)
 ρ hustota
 ν kinematická viskozita
Dolní indexy
 e vztaženo k výstupu ze zařízení
 f tekutina
 s pevná fáze
Horní indexy
 x' veličina x ve vzestupném proudu
 x'' veličina x v sestupném proudu

Literatura

- [1] Kwauk M.: *Scientia Sinica* 12, 587 (1962).
- [2] Lapidus L., Elgin J. C.: *AICHE Journal* 3, 63 (1957).
- [3] Gasparjan A. M., Zaminjan A. A.: *Dokl. Akad. nauk Arm. SSR* 28, č. 3, 127 (1959).
- [4] Gasparjan A. M., Zaminjan A. A.: *Dokl. Akad. nauk Arm. SSR* 31, č. 3, 153 (1960).
- [5] Kolář V.: *Coll. Czech. Chem. Commun.* 28, 1326 (1963).
- [6] Hrdina M., Neužil L.: *Coll. Czech. Chem. Commun.* 39, 3228 (1974).
- [7] Hrdina M., Neužil L.: *Coll. Czech. Chem. Commun.* 39, 3631 (1974).
- [8] Hrdina M., Neužil L.: *Sborník VŠCHT Praha, chemické inženýrství*, K 10, 85 (1976).
- [9] Neužil L.: *Fluidace polydispersního materiálu*. Kandidátská disertační práce. VŠCHT, Praha 1959.
- [10] Aerov M. E., Todes O. M.: *Gidravličeskije i teplovye osnovy raboty apparatov so stacionarnym i kipjaščim slojem*. Chimija, Leningrad (1968).
- [11] Neužil L.: Kapitola 13, „Fluidace“ v knize Míka V.: *Základy chemického inženýrství*. SNTL, Praha 1977.
- [12] Beňa J., Ilavský J., Kossaczky E., Neužil L.: *Coll. Czech. Chem. Commun.* 28, 293 (1963).
- [13] Razumov I. M.: *Pneumo- i gidrotransport v chimičeskoj promyšlennosti*. Chimija, Moskva 1979.
- [14] Sieniutycz S., Klukaczewski Z.: *Prace Inst. inž. chem.* 1, 323 (1972).

ДВИЖУЩИЙСЯ ПСЕВДООЖИЖЕННЫЙ СЛОЙ VI

Расчет параметров равномерно движущегося псевдоожигенного слоя узких фракций зернистого материала

Любомир Неужил, Милослав Грдина*

Химико-технологический институт, Прага

**Научно-исследовательский институт минерального сырья, Кутна Гора*

В предлагаемой работе авторами исследуются определенные свойства вертикального текущей суспензии зернистого материала, т. е. движущегося псевдоожигенного слоя. На практике такой случай встречается в виде вертикально гидравлического перемещения материала и при гидравлическом разделении, например, песка. Для упрощения рассматривается транспорт узкой фракции, которая при расчетах считается монодисперсной, с постоянной плотностью и формой зерен. Предполагается равномерно псевдоожигенный слой, т. е. суспензия зернистого вещества в жидкости с равномерно распределенными частицами твердой фазы.

Разрабатывается система уравнений, на основании которых можно проводить расчет разных важных параметров текущей суспензии: скорость жидкости, скорость зернистой фазы, пустотность суспензии или концентрации частиц в суспензии, объемный поток твердой фазы и необходимое сечение установки. Предлагаемый способ расчета иллюстрируется рассчитанным примером.

Из результатов иллюстрирующего расчета видно, что концентрация зернистого материала в вертикальном гидротранспорте отличается от величины, которая рассчитывается на основании отношения объемных потоков зернистого материала и транспортной жидкости. Отлична также концентрация твердых частиц в суспензии, текущей в направлении вверх или вниз. Если плотность зернистого материала выше плотности

транспортной жидкости, то концентрация суспензии, текущей вверх, также выше. Это необходимо учитывать, чтобы предотвратить пробку или засорение трасы транспорта.

Приводимый график на рисунке 2 показывает взаимоотношение между скоростью жидкости w_f (вода), поступательной скоростью зернистого материала u_c (подобранная фракция силикатного песка) и между пустотностью суспензии ϵ . Из рисунка следует, при каких условиях проходит приток твердой и жидкой фаз в направлении вверх ($w_f = 0, u_c > 0$), когда приток в направлении вниз ($w_f = 0, u_c = 0$), т. е. осаждение зернистого материала в жидкости, текущей в направлении вверх, что важно для сепараторов.

Рис. 1. Схематическое изображение разных случаев упорядочения тока зернистого материала и жидкости; u — средняя скорость движения частиц, w_f — средняя скорость жидкости в пустотах между частицами, ρ_s и ρ_f — плотность частиц и жидкости.

Рис. 2. Отношение между скоростью жидкости вне слоя w_f (вода 23 °C), поступательной скоростью компактного слоя зернистого материала u_c (кварцевый песок плотностью $\rho_s = 2624 \text{ кг м}^{-3}$ с эквивалентным диаметром $d_e = 0,619 \text{ мм}$) и между пустотами суспензии ϵ (объемная доля жидкости в суспензии);
 ————— $w_f = \text{const.}$, — — — — — неподвижный псевдооживленный слой,
 ход экстремальных величин, —.—.—.— ход перегиба величин,
 ||||| область противотока.

MOVING FLUIDIZED BED VI

Calculation of Parameters For a Moving Uniform Fluidized Bed Comprising Narrow Grain Size Fractions of Granular Material

Lubomír Neužil, Miloslav Hrdina*

Institute of Chemical Technology, Prague

* Institute of Mineral Raw Materials, Kutná Hora

The study is concerned with some properties of a vertically moving suspension of granular material, i.e. a moving fluidized bed. The case arises in practice in the form of vertical hydraulic transport of materials and in hydraulic classification, e.g. of sand. For the purpose of simplification, transport of a narrow fraction, which is regarded as monodisperse and having a constant density and grain shape, is considered. A uniform fluidized bed is assumed, i.e. a suspension of granular substance in a fluid with uniformly dispersed solid phase particles.

A system of equations has been suggested which allow to calculate several significant parameters of the flowing suspension: fluid velocity, granular phase velocity, suspension porosity or concentration of particles in suspension, volume flow of solid phase and the required cross section area. The suggested calculation procedure is illustrated by an example.

The results of the illustrative calculation indicate that the concentration of granular material during vertical hydrotransport differs from the value calculated from ratios of volume flows for the granular material and for the transport fluid. Concentration of solid particles in suspension flowing upwards or downwards also shows differences. When the density of the granular material exceeds that of the transport fluid, concentration of a suspension flowing upwards is also higher. This should be taken into account in order to prevent the conveying equipment from clogging.

The diagram in Fig. 2 shows the relationship between velocity w_f of the fluid (water), superficial velocity of granular material u_c (a quartz sand fraction) and suspension porosity ϵ . The diagram indicates under which conditions there occurs a co-current of solid and liquid phase upwards ($w_f > 0, u_c > 0$), when a co-current downwards ($w_f < 0, u_c < 0$) and when a counter-current arises ($w_f > 0, u_c < 0$) i.e. settling of the granular material in the upwards flowing fluid (important in classifying or separating plants).

Fig. 1. Schematic illustration of various types of flow of a granular material and liquid; u — mean velocity of particles, w_f — mean velocity of fluid through intergranular spaces, ρ_s and ρ_f — density of particles and fluid, respectively.

Fig. 2. Relationship between superficial fluid velocity w_f (water 23 °C) vs. superficial velocity of a compact bed of granular material u_c (quartz, sand, density $\rho_s = 2624 \text{ kg m}^{-3}$, equivalent grain diameter $d_e = 0.619 \text{ mm}$) and suspension porosity ϵ (volume fraction of fluid in suspension); ————— $w_f = \text{const.}$, — — — — — stationary fluidized bed, the course of extreme values, —.—.—.— the course of inflexion values, ||||| counter-current region.