

10 Usazování

Hlavní cíle kapitoly: Definovat pojem usazování, uvést technický význam tohoto procesu a typické případy jeho technické realizace, vysvětlit princip činnosti některých zařízení využívajících usazování. Kvantitativně popsat usazování jednotlivé částice pomocí rovnic uvedených v rozměrové i bezrozměrové formě a uvést postupy k výpočtu rychlosti usazování kulové částice. Ukázat vliv tvaru částice a koncentrace částic na usazování. Odvodit vztahy pro výpočet parametrů kontinuálního gravitačního usazováku a vysvětlit způsob navrhování cyklónů.

Požadované znalosti: Archimédův zákon, Newtonovy pohybové zákony, pojmy turbulentní a laminární proudění, disipace mechanické energie, gravitační, odstředivá, elektrostatická a magnetická síla.

10.1 Základní pojmy

Usazování čili sedimentaci definujeme jako proces, při němž dochází vlivem působení objemové (hmotnostní) síly k oddělení dispergovaných částic od tekutiny, tj. od disperzního prostředí.

Běžně budeme předpokládat, že objemová síla je vyvolána *gravitačním* nebo *odstředivým zrychlením*. Potom je nutnou podmínkou, aby došlo k usazování, rozdíl hustot dispergovaných částic (pevná fáze, kapalina, plyn) a disperzního prostředí (kapalina, plyn). Při nulovém rozdílu těchto hustot se částice v tekutině volně vznášejí a k usazování nedojde (V případě působení magnetické nebo elektrostatické síly musí existovat rozdíl v magnetických nebo elektrostatických vlastnostech částic a prostředí.)

Pro usazování přicházejí v úvahu tyto disperze:

Disperze	Dispergovaná fáze	Disperzní prostředí
suspenze	pevná fáze (částice)	kapalina, plyn
emulze	kapalina (kapky)	kapalina ^{*)}
mlha	kapalina (kapky)	plyn
aerovaný systém (disperze)	plyn (bubliny)	kapalina

Pevné částice buď nemění svoji velikost a tvar, nebo naopak mění tvar a velikost vlivem dalšího souběžně probíhajícího procesu (např. krystalizace, sublimace, rozpouštění, chemická reakce). Kapalné a plynné částice (kapky, bubliny) se snadno deformují a dochází k jejich koalescenci (spojování) nebo ke štěpení, takže v průběhu jejich usazování nastává zpravidla změna jejich tvaru a velikosti.

^{*)} Dispergovaná a disperzní fáze jsou nemísitelné kapaliny.

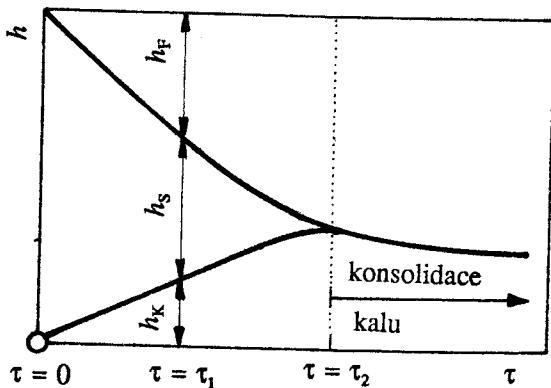
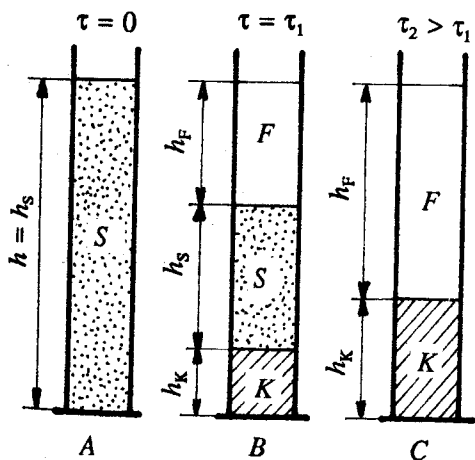
Pro jednoduchost se v dalším orientujeme na případ, kterým je *usazování pevných částic neměnného tvaru a velikosti*, rozptýlených v kapalině nebo plynu. V principu však platí dále uvedené zákonitosti (část 10.3) i ve složitějších případech.

Jsou-li v suspenzi obsaženy částice různých velikostí, hustot nebo tvarů, jejich rychlost usazování je zpravidla odlišná. To bývá využíváno ke vzájemnému *roztřídění částic* různých vlastností. Tento proces se též nazývá *klasifikace* nebo *rozdružování*.^{*)}

Technickým účelem usazování je

- vyčištění tekutiny od suspendovaných částic,
- získání suspendovaných částic separací od tekutiny,
- získání vyčištěné tekutiny současně se získáním oddělených částic,
- roztřídění částic různých vlastností, tj. různých velikostí, hustot nebo tvarů.

Proces usazování ilustrujeme jednoduchým pokusem, jehož jednotlivé fáze jsou ukázány na obr.10.1. Pevné částice o hustotě ρ_s jsou suspendovány ve vodě o hustotě ρ_f . Platí $\rho_s > \rho_f$. Suspenze se nachází ve vertikálním válci a na částice působí pouze gravitační zrychlení. V čase $\tau = 0$ (případ A) jsou částice rovnoměrně rozptýleny v suspenzi S. Vlivem rozdílu hustoty částic a tekutiny a působící gravitační síly dojde k usazování pevných částic. V čase $\tau_1 > 0$ (případ B) jsou vytvořeny 3 vrstvy: F - vyčištěná tekutina, S - suspenze, K - kal (nebo těž sediment)^{**)}. V čase $\tau_2 > \tau_1$ je usazování v podstatě skončeno, neboť



Obr.10.1. Ilustrace procesu usazování pevných částic s hustotou ρ_s větší, než má tekutina v gravitačním poli

Obr.10.2. Časový průběh jednoduchého pokusu ilustrovaného na obr.10.1

^{*)} V úpravnictví se těmto pojmům přisuzuje speciální význam. Za třídění se považuje rozdělování částic pouze podle velikosti a za rozdružování pouze podle hustot. Zde nebudeme tyto speciální termíny rozlišovat.

^{**) Zde jsou použity stejné symboly pro obdobné soustavy jako v případě filtrace, kde bylo F - filtrát, S - suspenze, K - filtrační koláč.}

vymizela suspenze. Ve skutečnosti může ještě probíhat zhutňování neboli konsolidace kalu, tj. klesá dále výška kalové vrstvy.

Obr.10.2 ukazuje časový průběh jednoduchého pokusu ilustrovaného na obr.10.1. Na obr.10.2 je vynesena závislost výšky jednotlivých vrstev suspenze h_s , vyčištěné tekutiny h_F a kalu h_K na čase τ . Jsou zde též vyznačeny fáze A, B, C z obr.10.1. Z obr.10.2 je vidět, že v čase $\tau > 0$ se začínou z původní suspenze S vytvářet vrstvy čisté tekutiny F a kalu K. V čase τ_2 vymizí suspenze S a pro čas $\tau > \tau_2$ se dále poněkud snižuje výška h_K (konsolidace kalu) a zvyšuje se výška h_F .

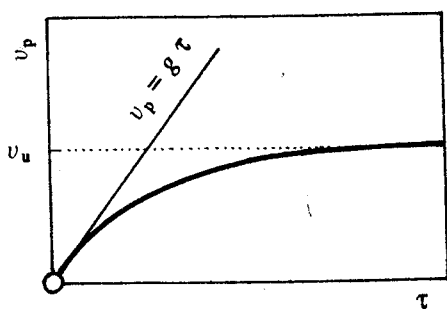
Po skončeném usazování částic se oddělí vyčištěná tekutina F od kalu K. Kal se může podrobit filtraci a promývání nebo se kal rozmíchá v promývací kapalině (obdoba repulpace při filtraci) a nechá se znovu usadit. Tento proces se nazývá *dekantace*.

Vysvětlíme si nyní pojem *rychlost usazování* v_u . Představme si, že vložíme pevnou částici, jejíž hustota je ρ_s , do klidné reálné tekutiny o hustotě $\rho_f < \rho_s$ a že jedinou měrnou objemovou silou je gravitační zrychlení g . Částice se začne pohybovat ve směru působícího gravitačního zrychlení, tj. dolů, a její rychlost v_p se zvyšuje. Pro rovnoměrně zrychlený pohyb je ve fyzice (např. [37], str.39) uváděna rovnice

$$v_p = g\tau + v_{p0} \quad (10-1)$$

Protože v našem případě je počáteční rychlost částice nulová, tj. $v_{p0} = 0$, je vztah (10-1) vyjádřen v obr.10.3 přímkou procházející počátkem a mající směrnici g . Rov.(10-1) byla odvozena za předpokladu, že na pohyb částice nemá vliv odpor prostředí (tekutiny), tj. že se částice pohybuje buď ve vakuu, nebo v ideální tekutině.

Při pohybu v *reálné tekutině* se však uplatňuje s rostoucí hodnotou rychlosti částice rostoucí *odpor prostředí proti pohybu částice*. Rychlost částice v_p se pak nemění podle rov.(10-1), ale podle křivky v obr.10.3. Po dosažení rovnováhy sil působících na částici se částice pohybuje konstantní rychlostí v_u , kterou nazýváme *rychlost usazování*. Lze ukázat (např. [9], str.112 nebo [38], str.33), že 99 % této rychlosti je dosaženo ve velmi krátké době, která u běžných technických případů činí zlomek sekundy. Tomu odpovídá velmi krátký úsek počáteční dráhy.



Obr.10.3. K definici rychlosti usazování částice v_u

Jestliže je *usazování částice v klidné tekutině* rychlostí v_u vyvoláno gravitačním nebo odstředivým zrychlením, je směr pohybu částice určen v souladu s Archimedovým zákonem znaménkem rozdílu hustot ($\rho_s - \rho_f$). Je-li

$$\text{sign}(\rho_s - \rho_f) = +1 \quad (10-2a)$$

pohybuje se částice po dosažení rychlosti v_u ve směru působící objemové síly a $v_u > 0$ ^{*)}.
Pokud

$$\text{sign}(\rho_s - \rho_f) = -1 \quad (10-2b)$$

pohybuje se opačným směrem, tj. $v_u < 0$. Při usazování částic křemenného písku v nepohybující se vodě ($\rho_s > \rho_f$) klesají písková zrna ke dnu ($v_u > 0$), což odpovídá našemu jednoduchému pokusu podle obr.10.1 a 10.2. Naopak při usazování kapiček tuku rozptýlených ve vodě (hustota tuku je menší než hustota vody) dochází k pohybu tukových částic k hladině (srovnejte s tvorbou smetany u hladiny mléka) a $v_u < 0$.

Uvedené směry usazování byly vysvětleny na případech, kdy se částice usazuje v nepohybující se tekutině a kdy je rychlost částice v_p rovna rychlosti usazování v_u . Pokud se disperzní prostředí pohybuje rovnoběžně vůči působící objemové síle rychlostí v_f , je třeba uvažovat rychlost usazování v_u relativně vůči tekutině.

Hodnota usazovací rychlosti v_u se tím nezmění. Změní se však hodnota rychlosti pohybu částice v_p vůči vnějšímu pozorovateli, vůči němuž se rovněž uvažuje rychlost tekutiny v_f .

Na obr.10.4 jsou znázorněny různé případy usazování částice pro $\rho_s > \rho_f$ a $\rho_s < \rho_f$ v gravitačním poli. Je zde graficky vyjádřen vztah mezi rychlostí usazování v_u , tekutiny v_f a částice v_p pro $v_f < 0$, $v_f = 0$ a $v_f > 0$. Všechny dílčí obrázky vyjadřují skutečnost, že rychlost pohybu částice v_p je dána součtem rychlosti tekutiny v_f a rychlosti usazování v_u , tj. platí ^{*)}

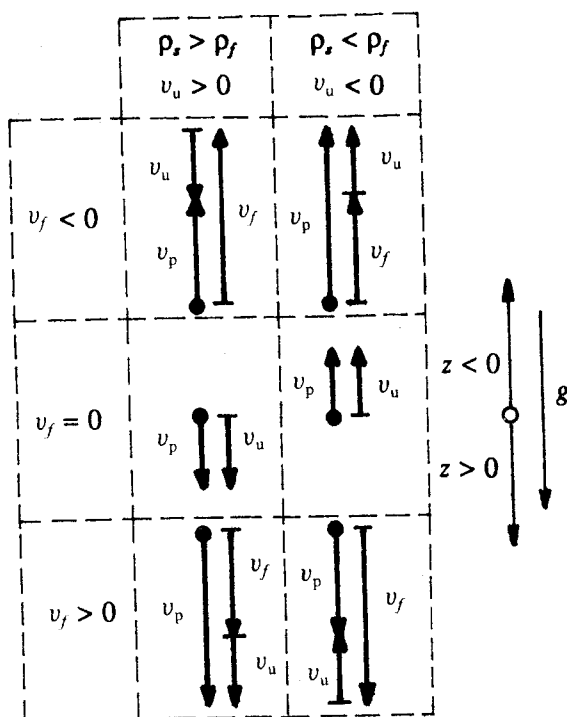
$$v_p = v_f + v_u \quad (10-3)$$

Z obr.10.4 a z rov.(10-3) je patrné, že rychlost usazování při tzv. paralelním pohybu je dána rozdílem rychlosti částice v_p a rychlosti tekutiny v_f . Např. pro částice s hustotou větší, než má tekutina (viz obr.10.4), tj. pro $\rho_s > \rho_f$, se při vertikálním pohybu tekutiny rychlostí v_f směrem nahoru (v gravitačním poli) částice zpožďují za tekutinou (propadávají se) rychlostí v_u , které se proto někdy říká *skluzová rychlost*. Tato situace nastává ve vertikálních úsecích pneumatické nebo hydraulické dopravy zrnitého materiálu nebo v pneumatických či hydraulických třídičích směsi částic různých vlastností. Při sestupném toku tekutiny částice tekutiny předbíhají rychlostí v_u . Pro případ $\rho_s < \rho_f$ je situace obrácená

Jestliže se tekutina pohybuje jiným směrem, než působí hmotnostní síla, je situace složitější. Tak např. při pohybu tekutiny kolmo na směr gravitační síly je sice částice unášena tekutinou rychlostí v_f , ale současně se usazuje rychlostí v_u ve směru gravitačního zrychlení g , neboť zde působí měrná objemová síla

^{*)} Za kladný směr je zvolen směr působící objemové síly. Např. působí-li gravitační síla jako jediná, je kladným směrem vertikální osy z směr shora dolů.

^{**)} Rovnice (10-3) je podmíněna tím, že pohyb částice je rovnoměrný ($v = \text{konst}$) a směr pohybu tekutiny je paralelní vůči směru výsledné objemové síly.



Obr.10.4. Grafické znázornění souvislosti mezi rychlostí usazování částice v_u , rychlostí částice v_p a rychlostí tekutiny v_f při paralelním pohybu tekutiny vzhledem k působící gravitační síle

$$f = g \quad (10-4a)$$

Jiným příkladem je *usazování vlivem odstředivé síly*. Při rotaci systému konstantní úhlovou rychlostí ω je v radiálním směru ve vzdálenosti r od středu křivosti^{*)} odstředivé zrychlení

$$f = \omega^2 r \quad (10-4b)$$

nebo

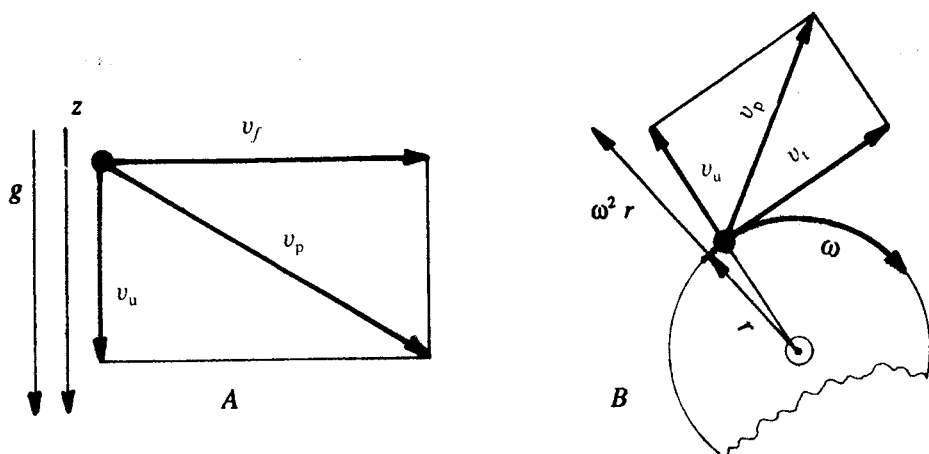
$$f = v_t^2 / r \quad (10-4c)$$

kde v_t je obvodová (tečná) rychlost křivočarého pohybu ve vzdálenosti r . Mezi veličinami ω a v_t platí vztah

$$v_t = r \omega \quad (10-5)$$

Oba příklady různého směru pohybu tekutiny a působení objemové síly jsou ilustrovány na obr.10.5A a 10.5B. Situace ilustrovaná obr.10.5A nastává v usazovacích s horizontálním prouděním suspenze a v horizontálních úsecích pneumatické a hydraulické dopravy zrnitých materiálů.

^{*)} Podrobně je problematika křivočarého pohybu popsána v knize [37] na str.40 - 47.



Obr.10.5. Ilustrace pohybu částice rychlostí v_p při rychlosti usazování v_u a při odchylných směrech proudění tekutiny rychlostí v_f , působí-li měrná objemová síla f
A) $f = g$, B) $f = \omega^2 r$

K situaci ilustrované obr.10.5B dochází v usazovacích odstředivkách, v cyklónech a v jiných odlučovačích nebo třídících využívajících ke zvýšení účinku změnu směru, jako jsou např. žaluziové odlučovače (viz část 10.2). Kromě toho tato situace nastává též při změně směru pneumatické a hydraulické dopravy zrnitých materiálů, tj. v kolenech potrubní linky.

Vliv změny směru na pohyb částice lze vysvětlit také *setrvačností*: Pevné částice s hustotou $\rho_s > \rho_f$ mají větší setrvačnost než tekutina a snaží se setrvat v původním směru pohybu. Naproti tomu se tekutina snáze přizpůsobuje změně směru.

Z obr.10.5 je patrné, že obdobu rov.(10-3), avšak pro *nezávislé směry* pohybu tekutiny a působení výsledné hmotnostní síly, zapíšeme univerzální vektorovou rovnicí

$$\mathbf{v}_p = \mathbf{v}_f + \mathbf{v}_u \quad (10-6)$$

Z ilustrací, které jsme uvedli, je vidět, že na usazování částic má vliv tok suspenze v usazovacím nebo třídícím zařízení. Proto v části 10.2 nejprve uvedeme principy činnosti nejčastějších usazováků a třídíčů. Jejich výpočet se zakládá (stejně jako výpočet filtrů) na hmotnostní bilanci odlučovaného materiálu a na kinetickém vztahu, který umožňuje výpočet rychlosti usazování.

Rychlost usazování v_u je však funkcí mnoha faktorů, mezi které patří tvar, velikost a hustota částic, jejich koncentrace v suspenzi, vlastnosti tekutiny a vliv stěn zařízení. V části 10.3 uvedeme vztahy vyjadřující rychlost usazování jednotlivé kulové částice v neomezeném prostoru.

10.2 Principy činnosti některých zařízení na usazování a třídění částic

V technické praxi se setkáváme s nejrůznějšími zařízeními na *odlučování částic ze suspenze* nebo na *třídění částic usazováním*. Nejjednodušší jsou sedimentační nádrže nebo kanály vybudované v terénu mimo vlastní provoz. Komplikovanější jsou zpravidla zařízení, u nichž dochází k rotaci suspenze vlivem rotace zařízení (usazovací odstředivky) nebo vlivem tvaru zařízení a tangenciálního přívodu suspenze (cyklóny).

V případě rotačního pohybu v usazovacích s rotací suspenze je dosahované odstředivé zrychlení podstatně větší než zrychlení gravitační. To se projevuje jednak zvýšením intenzity procesu usazování, jednak zmenšením velikosti částic, které lze v těchto zařízeních odloučit usazováním. U gravitačních usazováků je minimální velikost odlučovaných částic řádově 10 μm , kdežto u cyklónů a odstředivek řádově 1 μm (ovšem za cenu vložené energie). U elektrostatických a mokrých odlučovačů částic z plynných suspenzí je minimální velikost odloučených částic přibližně 0,1 μm .

Usazovací zařízení můžeme rozdělit zhruba do těchto kategorií:

1. gravitační usazovákы kontinuální i diskontinuální s horizontálním nebo vertikálním prouděním suspenze
2. gravitační usazovákы se změnou směru proudění suspenze
3. usazovákы s rotací suspenze
4. mokré odlučovače plynných suspenzí
5. elektrostatické odlučovače
6. magnetické separátory

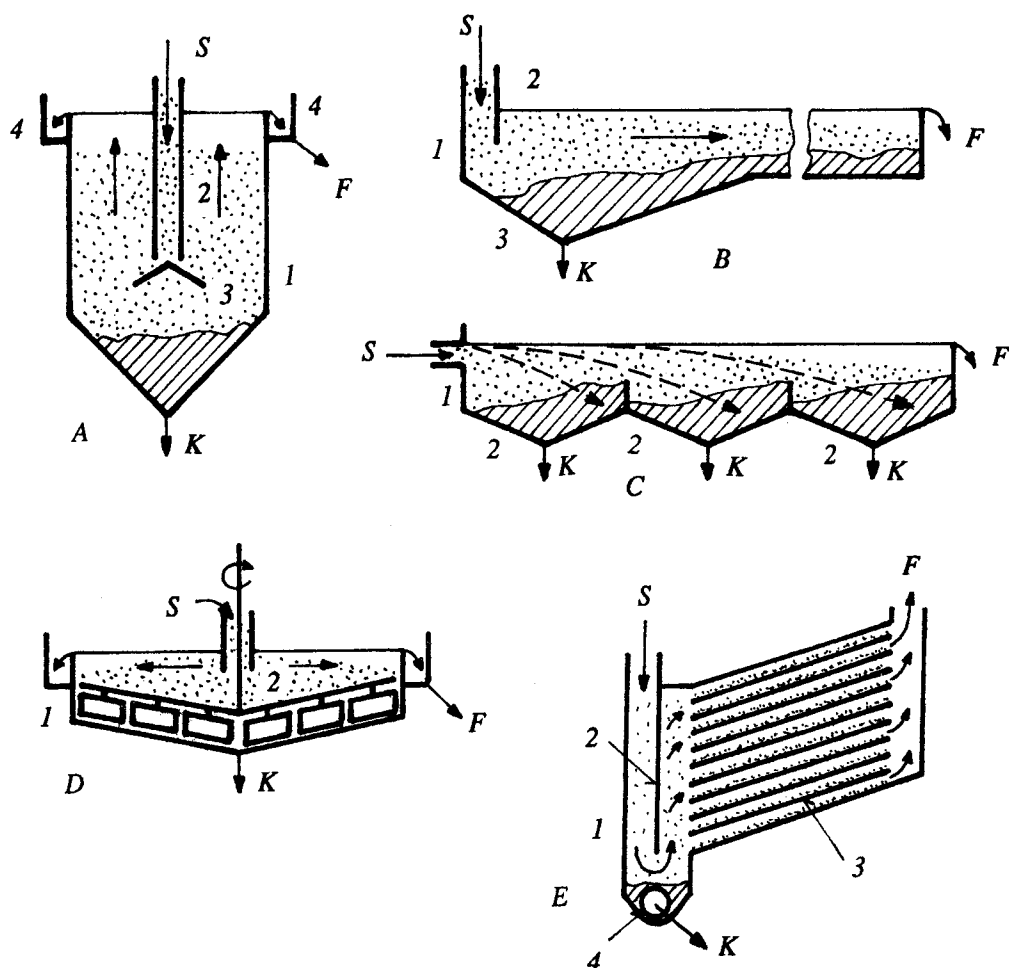
Mezi usazovací zařízení zahrnujeme i třídíče založené na usazování. Postupně si ukážeme principy činnosti často se vyskytujících usazovacích zařízení spadajících do jednotlivých kategorií.

10.2.1 Gravitační usazovákы

Na obr.10.6A až E jsou ukázány principy nejběžnějších gravitačních usazováků pracujících převážně kontinuálně, tj. s kontinuálním tokem suspenze, vyčištěné tekutiny i usazeniny, tj. kalu, případně s cyklickým odstraňováním usazených částic.

Válcový usazovák s vertikálním tokem suspenze je znázorněn na obr.10.6A. Do válcové skříně 1 s kónickým dnem je přiváděna suspenze S centrální trubkou 2. Usměrňovač suspenze 3 zabraňuje rozvířování usazených částic a zajišťuje rozvod suspenze po průřezu. Sběrný kanál 4 odvádí vyčištěnou kapalinu F.

Pravoúhlý usazovák s horizontálním tokem suspenze je ukázán na obr.10.6B. Skříň usazováku 1 je v podstatě pravoúhlého průřezu a tvoří kanál, v němž probíhá horizontální tok



Obr.10.6. Gravitační usazovák

A - válcový usazovák s vertikálním tokem suspenze: 1 - skříň usazováku, 2 - přívod suspenze, 3 - usměrňovač, 4 - sběrný kanál; B - pravoúhlý usazovák s horizontálním tokem suspenze: 1 - skříň usazováku, 2 - usměrňovací přepážka, 3 - odvod kalu; C - plavící žlab: 1 - skříň třídiče, 2 - odvod frakcí; D - Dorrův usazovák: 1 - skříň usazováku, 2 - hrablo s usměrňovacími lopatkami pro odsun kalu; E - odprašovací (prašná) komora: 1 - skříň, 2 - usměrňovací přepážka, 3 - usazovací plochy, 4 - šnekový dopravník

suspenze. Suspenze S se přivádí na jedné straně kanálu, kde je umístěna usměrňovací přepážka 2. Na druhém konci odtéká vyčištěná tekutina F. Kal K, jehož hlavní podíl se usazuje v počátečním úseku kanálu, se odtahuje z prohloubeného dna 3.

Plavící žlab ilustrovaný na obr.10.6C slouží k třídění suspendovaných částic podle jejich rychlosti usazování. Suspenze S se přivádí do žlabu 1, který se ve směru toku rozšiřuje. Tím se postupně zmenšuje rychlost proudění suspenze, a zvyšuje se tak progresivně doba

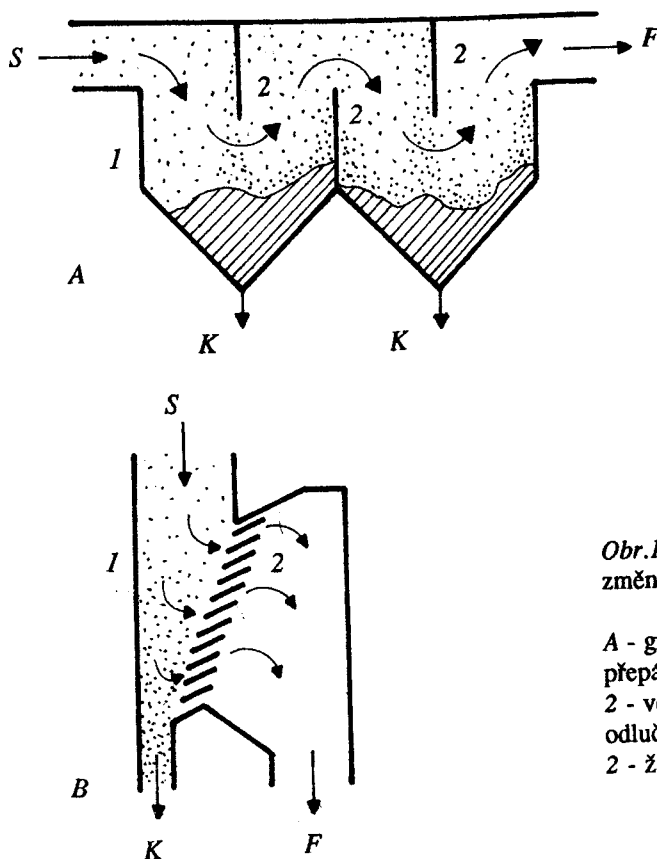
prodlení tekutiny v zařízení. Žlab je podélně rozdělen na úseky (v našem případě 3) označené 2, z nichž jsou odebírány usazené částice K. V prvním úseku se odloučí nejhrubší částice, v posledním nejjemnější. Existuje celá řada variant tohoto třídiče.

Dorrův usazovák (obr.10.6D) je představitelem válcových usazováků s horizontálním prouděním suspenze, tj. usazováků dosti mělkých. Používá se pro čištění odpadní vody a bývá vybudován v terénu, neboť jeho průměr je až 200 m. Těleso usazováku 1 má mírně kónické dno, po němž se velmi pomalu pohybuje hrablo 2 opatřené lopatkami. Lopatky jsou natočeny šikmo k radiálnímu směru tak, aby docházelo ke shrabování usazeného kalu K směrem k jeho odvodu z usazováku.

Odprašovací (prašná) komora ukázaná na obr.10.6E slouží k zachycení částic z plynné suspenze. Ve skříní 1 je usměrňovací přepážka 2 pro rovnoměrné rozdělení suspenze mezi šikmo umístěné přihrádky 3, které představují usazovací plochy. Cyklicky jsou tyto přihrádky podrobeny vibraci. Usazené částice padají do dolní části skříně, odkud jsou transportovány např. šnekovým dopravníkem 4. Existuje celá řada variant konstrukce odprašovacích komor.

10.2.2 Gravitační usazováký se změnou směru proudění suspenze

Gravitačních usazováků využívajících ke zvýšení odlučovacího efektu setrvačnost hmotných částic je celá řada typů. Zde uvádíme dva příklady těchto odlučovačů částic na obr.10.7A a B, kde je náhlou změnou směru proudění v gravitačním poli dosaženo zvýšené



Obr.10.7. Gravitační usazováký se změnou směru proudění suspenze

A - gravitační usazovák s vertikálními přepážkami: 1 - skříň usazováku, 2 - vertikální přepážky; B - žaluziový odlučovač: 1 - skříň odlučovače, 2 - žaluzie

intenzity odlučování pevných částic (hlavně z plyných suspenzí).

Gravitační usazovák s vertikálními přepážkami je ukázán na obr.10.7A. Ve skříní 1 jsou instalovány vertikální přepážky 2, které způsobují náhlou změnu směru proudění suspenze. Vlivem setrvačnosti pevných částic a gravitace tak dochází k odklonu dráhy částic od dráhy tekutiny, která postupuje směrem k výstupu ze zařízení. Částice K se zachycují v jednotlivých odděleních usazováku, odkud se kontinuálně nebo periodicky odvádějí.

Žaluziový odlučovač je vyobrazen na obr.10.7B. Ve skříní 1 jsou umístěny žaluzie 2, což je soustava paralelních přepážek zajišťujících prudkou změnu směru proudění. Z plyné suspenze S pak projde žaluziemi zejména plyn, kdežto částice převážně zůstanou v prostoru před žaluziemi, odkud odcházejí ve formě zkoncentrované suspenze K. Tekutina F se sníženým obsahem částic opouští odlučovač z prostoru žaluzií. Žaluziových odlučovačů je celá řada typů. Jsou velmi jednoduché a vhodné pro předčišťování suspenze od hrubších částic před užitím náročnějších odlučovačů, jako jsou např. filtry nebo elektrostatické odlučovače.

10.2.3 Usazovák s rotací suspenze

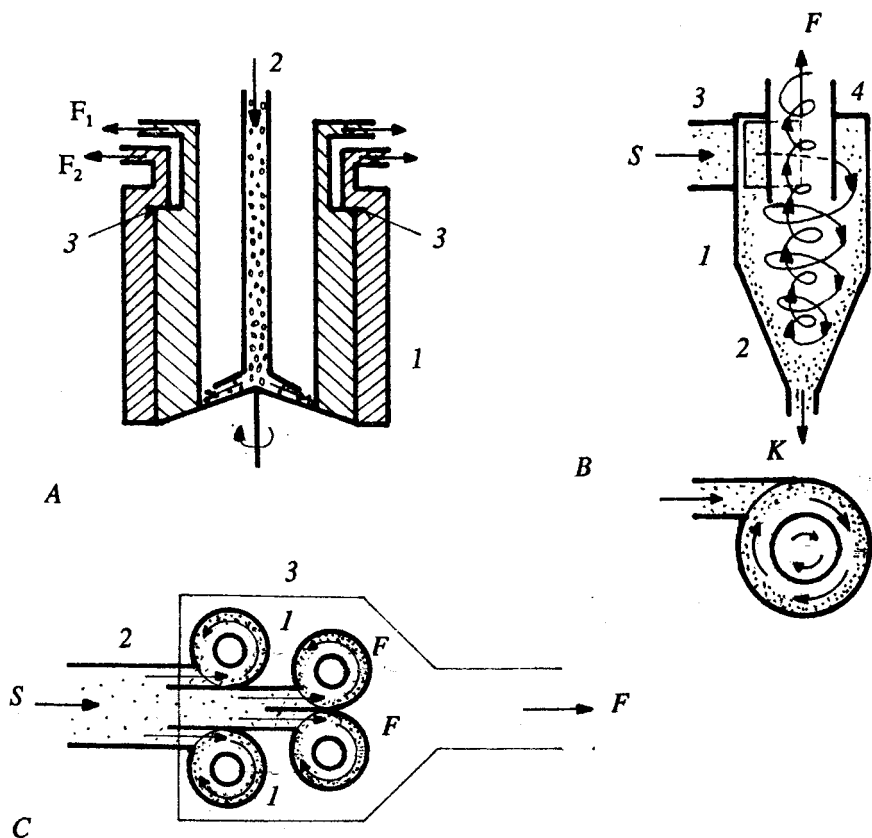
V podstatě dochází k rotaci suspenze buď proto, že rotuje zařízení, nebo proto, že je do nepohyblivého se válcového zařízení tangenciálně přiváděna suspenze. K prvnímu typu patří odstředivky, k druhému cyklóny (plynné suspenze) a hydrocyklóny (kapalné suspenze). Vedle termínu cyklón se též používají termíny aerocyklón nebo vírový článek.

Usazovací odstředivka znázorňuje obr.10.8A. Pro jednoduchost je zde zakreslena odstředivka pro separaci dvou nemísitelných kapalin, tvořících emulzi (např. tukové kapičky v mléce). Základem odstředivky je rotující buben 1, k jehož dnu se přivádí emulze potrubím 2. Vlivem odstředivého pole se usazuje kapalina o větší hustotě ρ_{I2} u stěny bubnu a kapalina o nižší hustotě ρ_{I1} postupuje směrem k ose rotace ($\rho_{I2} > \rho_{I1}$). Na výstupu z bubnu je přepážka 3, umožňující odtok oddělených kapalin F_1 a F_2 . Na stejném principu je založena vertikální usazovací odstředivka na suspenzi s periodickým vyprazdňováním kalu nebo horizontální odstředivka s kontinuálním odstraňováním kalu.

Jednoduchý cyklón v bokorysu i půdorysu ukazuje obr.10.8B. Hydrocyklón má v podstatě stejný tvar a stejný princip činnosti. Cyklón má válcový plášť 1 a kónický spodek 2. Do dolní části válcového pláště je potrubím 3 tangenciálně přiváděna suspenze S. Centrálně umístěná trubka 4 slouží k odvodu vyčištěné tekutiny F. Vlivem tangenciálního přívodu se suspenze v cyklónu pohybuje po šroubovici. Rotační složka pohybu působí na částice, které postupují ke stěně a vlivem gravitace klesají do kónické části a opouštějí cyklón.

Obr.10.8C ukazuje v půdorysu *řazení cyklónů do baterie*. K tomuto řešení přistupujeme, máme-li čistit větší množství plynu s prachem, než je výkonost jednotlivého cyklónu. Uspořádání jednotlivých vírových článků 1 je paralelní, tj. společné přírodní potrubí na suspenzi S se rozdělí do jednotlivých článků a výstupy plynu se opět spojí do společného výstupního potrubí 3.

Dalšími důležitými cyklónovými odlučovači jsou cyklóny vestavěné do jiného aparátu a multicyklóny, na které odkazujeme (viz např. [39, 40]).



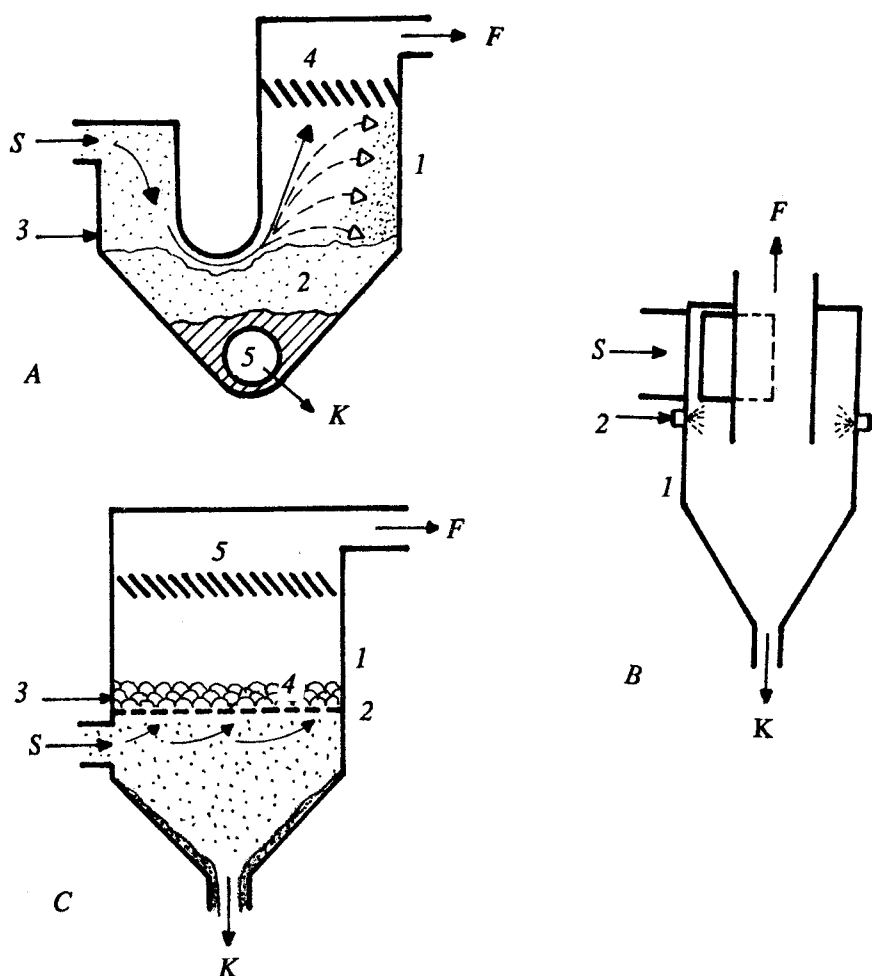
Obr.10.8. Usazováky s rotací suspenze

A - usazovací odstředivka na separaci nemísitelných kapalin: 1 - rotující těleso odstředivky, 2 - přívod emulze, 3 - oddělovací přepážka; B - cyklón (vířový článek): 1 - válcový plášť cyklónu, 2 - kónický spodek cyklónu, 3 - přívodní potrubí, 4 - odvodní potrubí; C - baterie cyklónů: 1 - jednotlivé cyklóny, 2 - přívod suspenze, 3 - odvod vyčištěné tekutiny

10.2.4 Mokré odlučovače částic z plynných suspenzí

Na obr.10.9A až C jsou ukázány tři různé mokré odlučovače částic z plynných suspenzí.

Hladinový odlučovač (obr.10.9A) má tvarovanou skříň 1, která má sestupnou část pro vstup plynu, dolní část naplněnou kapalinou 2 a opatřenou doplňováním kapaliny 3 a vzestupnou část pro odloučení kapek unášených vystupujícím plynem pomocí žaluziového odlučovače 4. Plyn obsahující prach se dostává do kontaktu s kapalinou při průchodu zařízením. Změna směru proudění plynu a smočení částic kapalinou zajišťují jejich zachycení.



Obr.10.9. Mokré odlučovače částic z plyných suspenzí

A - hladinový odlučovač: 1 - skříň odlučovače, 2 - kapalná náplň, 3 - doplňování kapaliny, 4 - žaluziový odlučovač kapek, 5 - vyprazdňování kalu; B - zkrápněný cyklón: 1 - skříň cyklónu, 2 - přívod kapaliny a trysky; C - pěnová pračka: 1 - skříň pračky, 2 - prokapový rošt, 3 - přívod prací kapaliny, 4 - vrstva pěny, 5 - žaluziový odlučovač kapek

Usazené částice jsou obvykle periodicky odstraňovány ve formě kalu K transportním zařízením 5. Při zachycování částic rozpustných v kapalině je vznikající roztok obměňován.

Zkrápněný cyklón (obr.10.9B) má skříň 1 tvarovanou v podstatě stejně jako suchý cyklón popsáný v části 10.2.3. Rozdíl spočívá v tom, že zkrápněný cyklón je vybaven přívodem kapaliny 2, jejím rozvodem po obvodu válcového pláště a tryskami, kterými se dostane kapalina do kontaktu se suspendovanými částicemi. Na stěně cyklónu se vytvoří kapalný film, který odplavuje částice ze zařízení. Tento typ cyklónu je vhodný pro částice,

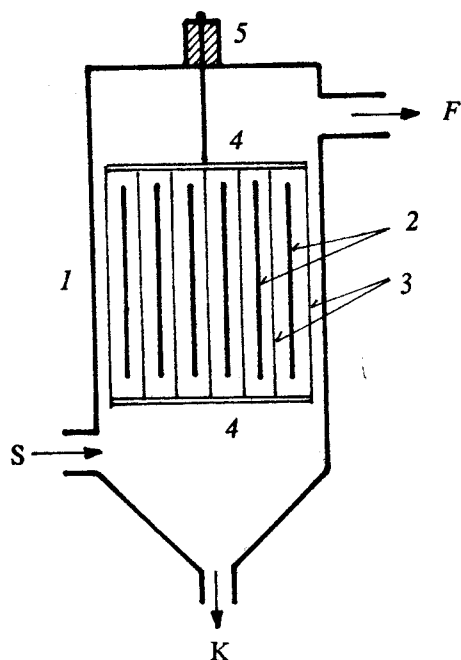
které by se na stěnu suchého cyklónu lepily. Pokud jsou částice v kapalině rozpustné, odtéká z cyklónu roztok (např. cukerný prach - voda).

Pěnová pračka (obr.10.9C) má ve skříni 1 rošt 2 umožňující průchod plynu nahoru i kapaliny dolů (prokapový rošt). Na rošt je přiváděna prací kapalina, která vytváří spolu s procházejícím plynem vrstvu pěny 4 s velkým mezifázovým povrchem kapalina-plyn. To se projevuje vysokou odlučovací účinností částic, které ve formě kapalně suspenze K odcházejí z pračky spodem. Únosu kapek, postupujících spolu s vyčištěným plynem, zabraňuje žaluziový odlučovač 5. Pro zvýšení účinnosti odlučování částic může být pračka vybavena více rošty umístěnými nad sebou. Při zachycování částic rozpustných v kapalině odtéká z pračky roztok (např. cukerný prach - voda).

10.2.5 Elektrostatické odlučovače

Elektrostatické odlučovače jsou vybaveny trubkami nebo deskami, mezi nimiž proudí zaprášený plyn. Kovové stěny trubek nebo desek představují obvykle anodu, tj. kladnou elektrodu. V trubkách nebo mezi deskami jsou nataženy dráty tvořící katodu, tj. zápornou elektrodu. Mezi katodou a anodou bývá stejnosměrné napětí 30 až 80 kV. Dochází k ionizaci plynu, který svítí. Proto se mluví o vytváření koróny. Pevné částice se v koróně nabíjejí a jsou přitahovány k anodě. Zde se vybíjejí a padají podél stěny dolů. Elektrostatické odlučovače mají téměř 100%ní odlučivost.

Příklad deskového elektrostatického odlučovače ukazuje obr.10.10. Ve skříni 1 jsou vestavěny vertikální desky, které tvoří anody, a mezi deskami jsou ve formě drátů umístěny katody natažené v rámu 4. Celý rám je zachycen v odlučovači pomocí izolátoru 5.



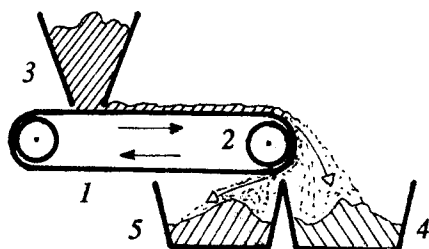
Obr.10.10. Deskový elektrostatický odlučovač

1 - skříň odlučovače, 2 - deskové anody, 3 - drátové katody, 4 - rám s katodami, 5 - izolátor

10.2.6 Magnetické separátory

Pro značný význam a časté použití jsme do této kapitoly zařadili i magnetický separátor zrnitého materiálu na nemagnetovatelné a magnetovatelné částice.

Obvyklý magnetický separátor je ukázán na obr.10.11. Hlavní součástí zařízení je pásový dopravník 1 vybavený bubnem 2 ve formě elektromagnetu nebo permanentního magnetu. Zrnitý materiál postupuje ze zásobníku 3. Nemagnetovatelné částice padají do zásobníku 4, magnetovatelné do zásobníku 5. Popsaný separátor se používá např. v cukrovarnictví k oddělení kovových úlomků od krystalového cukru nebo ke zvýšení koncentrace manganové či železné rudy separací od hlušiny.



Obr.10.11 Magnetický separátor

1 - pásový dopravník, 2 - magnet, 3 - zásobník zrnitého materiálu, 4 - zásobník nemagnetovatelného materiálu, 5 - zásobník magnetovatelného materiálu

10.3 Kvantitativní popis usazování izolované částice

Jak jsme se již zmínili, omezíme se na popis *usazování pevných částic*, které nemění ani tvar, ani velikost, ani hustotu.

Zatím předpokládáme, že suspenze má natolik *nízkou koncentraci částic*, že se částice vzájemně neovlivňují, tj. že se chovají jako izolované. Dále předpokládáme, že usazování není ovlivněno tzv. *stěnovým efektem*, tj. že vzdálenost stěn zařízení je mnohem větší, než je průměr částice^{*)}.

Na částici, která se pohybuje v reálné tekutině, působí objemová síla F_v a plošná síla F_A . Pokud není rychlost částic v_p konstantní, nejsou síly F_v a F_A v rovnováze a výslednice obou sil je dána součinem hmotnosti m_p a zrychlení částice $d v_p / d \tau$:

$$F_v + F_A = m_p \frac{d v_p}{d \tau} \quad (10-7)$$

Při dosažení konstantní hodnoty rychlosti částice je výslednice sil rovna nule, tj. je dosaženo rovnováhy objemové a plošné síly. Rovnice (10-7) potom přejde na

^{*)}Vliv stěn a koncentrace částic v suspenzi na rychlost usazování je popsán v části 10.4.

$$F_V + F_A = 0$$

[ROVNOVÁHA SIL]

(10-8)

a částice se usazuje konstantní rychlostí v_u .

Protože rychlost usazování má směr rovnoběžný se směrem působící objemové (hmotnostní) síly, můžeme přejít na skalární rovnici popisující usazování částice. Plošnou sílu můžeme rozložit na dvě dílčí plošné síly, a to na sílu vztlaku neboli *Archimedovu sílu* F_A , a na *sílu odporu* proti obtékání částice tekutinou F_R , tj.

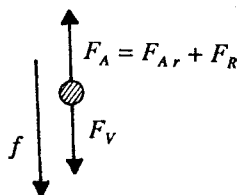
$$F_A = F_{Ar} + F_R \quad (10-9)$$

Skalární obdoba vektorové rovnice (10-8) má vzhledem k rovnici (10-9) tvar

$$F_V + F_{Ar} + F_R = 0 \quad (10-10)$$

Je zřejmé, že jak objemová síla F_V , tak i Archimedova síla F_A , nezávisí na rychlosti usazování v_u (na rozdíl od síly odporu F_R) a že plošná síla F_A musí mít opačné znaménko než objemová síla F_V .

Opačné působení sil F_A a F_V na částici při ustáleném usazování ukazuje obr.10.12.



Obr.10.12. Ilustrace působení objemové síly F_V a plošné síly F_A v poli měrné objemové síly f na částici při ustáleném usazování

V obr.10.12 je zavedena měrná objemová síla f . Zde uvažujeme f podle rovnic (10-4a,b,c) buď jako gravitační zrychlení, nebo jako zrychlení při rotaci odstředivky nebo při rotaci suspenze v cyklónu.

Jednotlivé síly F_V , F_{Ar} a F_R v rovnici (10-10) nyní vyjádříme pro částici objemu V_p s hustotou ρ_s usazující se rychlostí v_u v tekutině o hustotě ρ_f . Vyjádření objemové síly F_V a vztlakové síly F_{Ar} dané Archimedovým zákonem nepotřebují komentář. Obě síly působí v opačném směru. Vyjádříme je vzorci:

$$F_V = f \rho_s V_p \quad (10-11)$$

$$F_{Ar} = -f \rho_f V_p \quad (10-12)$$

Výslednice objemové a vztlakové síly

$$F_V + F_{Ar} = f (\rho_s - \rho_f) V_p$$

je při rovnováze sil rovna podle rov.(10-10) záporně vzaté síle hydraulického odporu, tj. $(-F_R)$. Síla odporu při toku tekutiny koná práci, která se podle rov.(4-8) přemění nevratně v přírůstek vnitřní energie tekutiny [viz rov.(4-8)]. Obdobně jako při toku tekutin v potrubí [viz rov.(5-18)] vyjádříme měrnou ztrátu mechanické energie

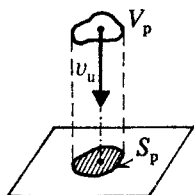
$$e_{\text{dis}} = \zeta_u \frac{v_u^2}{2}$$

která je úměrná měrné kinetické energii tekutiny $v_u^2 / 2$. Součinitelem úměrnosti je součinitel odporu ζ_u . Násobením e_{dis} hustotou tekutiny ρ_f dostaneme tlakovou ztrátu

$$\Delta p_{\text{dis}} = \zeta_u \rho_f \frac{v_u^2}{2}$$

kterou převedeme na sílu odporu F_R násobením plochou průmětu částice S_p do roviny kolmé na směr usazování. (Veličina S_p je ilustrována obr.10.13.) Síla odporu působí proti pohybu částice, což vyjádříme opačným znaménkem, než má rychlost usazování: - sign (v_u) . Sílu odporu vyjádříme tedy vzorcem:

$$F_R = - \text{sign}(v_u) \zeta_u S_p \rho_f v_u^2 / 2 \quad (10-13)$$



Obr.10.13. Ilustrace plochy průmětu částice S_p do roviny kolmé na směr usazování

Z předchozího výkladu plyne, že znaménko síly odporu je opačné vůči znaménku rychlosti usazování. Víme, že usazování probíhá při $(\rho_s - \rho_f) > 0$ ve směru objemové síly, a síla odporu má tedy opačný směr než objemová síla. Při $(\rho_s - \rho_f) < 0$ probíhá usazování ve směru opačném vůči působící objemové síle. Síla odporu má potom stejné znaménko jako působící objemová síla. Je zřejmé, že platí

$$\text{sign}(v_u) = \text{sign}(\rho_s - \rho_f) \quad (10-14)$$

Popis usazování jsme dosud nevázáli na určitý tvar částice. Ten však značně ovlivňuje průběh usazování, jak je ukázáno v části 10.4. Zatím se pro jednoduchost omezíme na popis usazování kulové částice o průměru d_p . Pro tento základní tvar částice je v literatuře k dispozici velké množství informací.

Za objem a průmět částice V_p a S_p dosadíme do rov.(10-11) a (10-12):

$$V_p = \frac{\pi}{6} d_p^3 \quad S_p = \frac{\pi}{4} d_p^2$$

a z rov.(10-10) pak dostaneme

$$\frac{\pi}{6} f d_p^3 (\rho_s - \rho_f) = \text{sign}(\rho_s - \rho_f) \frac{\pi}{4} \zeta_u d_p^2 \rho_f \frac{v_u^2}{2} \quad (10-15)$$

Člen na levé straně rovnice představuje tíhu částice zmenšenou o vztlak.

Abychom se zbavili dvojznačného výsledku v rovnici (10-15), zavedeme nadále absolutní hodnotu rozdílu hustot $|\rho_s - \rho_f| \equiv \Delta \rho$.*) Z rov.(10-15) pak dostaneme vyjádření rychlosti usazování:

$$v_u^2 = \frac{4}{3} \frac{f d_p}{\zeta_u} \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \quad (10-16)$$

$$\Delta \rho \equiv |\rho_s - \rho_f| \quad (10-16a)$$

Abychom však rychlost usazování v_u mohli z rov.(10-16) vypočítat, musíme mít informaci o *součiniteli odporu*. Definici součinitele odporu při usazování kulové částice lze zapsat na základě rov.(10-16)

$$\zeta_u \equiv \frac{4}{3} \frac{f d_p}{v_u^2} \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \quad (10-16b)$$

Snadno se přesvědčíme, že součinitel odporu je bezrozměrový, tj.

$$[\zeta_u] = 1 \quad (10-16b)$$

Pozorováním bylo zjištěno, že součinitel odporu je funkcí Reynoldsova kritéria Re_u :

$$\zeta_u = \zeta_u(Re_u) \quad (10-17)**$$

kde *Reynoldsovo kritérium pro usazování* je definováno vzorcem

*) Platí $|\rho_s - \rho_f| = (\rho_s - \rho_f) / [\text{sign}(\rho_s - \rho_f)]$.

**) Vztah (10-17) je bezrozměrový (viz kap.6). Představuje *kritériální rovnici*, která popisuje chování *podobných systémů* se sníženým počtem proměnných (ve srovnání se vztahem mezi rozměrovými veličinami).

$$Re_u \equiv \frac{v_u d_p \rho_f}{\eta} \quad (10-18)^*)$$

Konkrétní tvar funkce (10-17) byl pokusně nalezen pro kulovou částici. Tvar této funkce je znázorněn v dvojitéch logaritmických souřadnicích na obr.10.14. Průběh funkce (10-17) je rozdělen do čtyř oblastí.

1. *Stokesova oblast* je oblast velmi pomalého (tzv. nesetřvačného nebo též plíživého proudění) a je podoblastí laminární oblasti. Pro Stokesovu oblast se podařilo určit průběh závislosti funkce (10-17) analyticky** ve tvaru

$$\zeta_u = 24 / Re_u \quad [Re_u \leq 0,2] \quad (10-19)$$

V grafu na obr.10.14 má tato funkce vzhledem k logaritmickým souřadnicím přímkový průběh. Vidíme, že hyperbolický tvar funkce (10-19) je stejný jako tvar závislosti součinitele tření na Reynoldsově kritériu při laminárním proudění tekutiny trubkou a nehybnou vrstvou zrnitého materiálu, které jsme uvedli v kapitolách 5 a 8 - viz rov.(5-8) a (8-24). Horní ohraničení platnosti rovnice (10-19) $Re_{u, kr} = 0,2$ bylo zjištěno pokusně pro relativní odchylku 4 % mezi teoretickou a pokusnou hodnotou. Dolní mez platnosti rovnice (10-19) je dána velikostí částic, od které je usazování významně narušováno Brownovým pohybem (molekulární pohyb tekutiny).

2. *Allenova oblast* je vymezena hodnotami: $Re_u \in < 0,2 ; 10^3 >$. Pro tuto oblast spolu se Stokesovou oblastí byla nalezena závislost

$$\zeta_u = \frac{24}{Re_u} [1 + 0,125 Re_u^{0,72}] \quad [Re_u \leq 10^3] \quad (10-20)$$

kteřá vystihuje velmi dobře průběh pokusných dat.

3. *Newtonova oblast* je vystižena konstantní hodnotou součinitele odporu

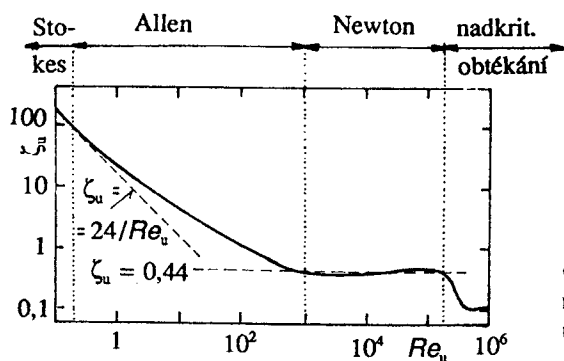
$$\zeta_u = 0,44 \quad [Re_u \in < 5 \cdot 10^2 ; 1,5 \cdot 10^5 >] \quad (10-21)$$

4. Následuje *oblast nadkritického obtékání*, kde součinitel odporu ζ_u je zhruba poloviční oproti Newtonově oblasti. To se vysvětluje změnou charakteru obtékání částice při $Re_u = 1,5 \cdot 10^5$, jak ukazuje obr.10.14.

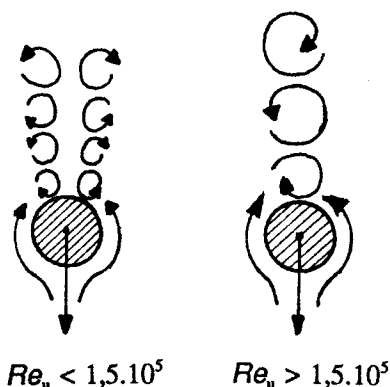
Z obr.10.15 je vidět, že po překročení kritické hodnoty $Re_{u, kr} = 1,5 \cdot 10^5$ se již za částici vejdou pouze jednotlivé víry. Současně dojde ke snížení součinitele odporu. Podrobněji se touto oblastí nezabýváme, protože pro využití k usazování prakticky nepřichází v úvahu.

* Do Reynoldsova kritéria a dalších kritérií dosazujeme *absolutní hodnotu rychlosti* v_u . Odkazujeme na kap.6, ve které je ukázáno, že do kritérií vstupují charakteristické veličiny, mající význam měř veličin téhož druhu. Tyto *míry nejsou nikdy záporné* (např. hodnota v_u je mírou všech rychlostí včetně lokální rychlosti tekutiny).

** Integraci Navierovy - Stokesovy pohybové rovnice tekutiny ve sférických souřadnicích.



Obr. 10.14. Závislost součinitele odporu ζ_u na Reynoldsově kritériu Re_u pro usazování kulové částice



Obr. 10.15. Změna charakteru obtékání částice tekutinou při překročení kritické hodnoty Re_u odchylnou tvorbou vírů za částicí

V praxi se nejčastěji počítá rychlost usazování v_u ze známého průměru částice d_p nebo průměr částice d_p z pokusně stanovené rychlosti usazování v_u . Přímý výpočet těchto veličin je možný pouze v případech, že usazování probíhá ve Stokesově nebo Newtonově oblasti.

Ve *Stokesově oblasti* je průběh usazování vyjádřen rovnicí (10-19). Dosadíme-li do této rovnice za ζ_u a Re_u z definičních vztahů (10-16b) a (10-18), dostaneme po úpravě

$$v_u = \frac{f \Delta \rho}{18 \eta} d_p^2 \quad [Re_u \leq 0,2] \quad (10-22a)^*)$$

nebo

$$d_p = \left(\frac{18 \eta v_u}{f \Delta \rho} \right)^{0,5} \quad [Re_u \leq 0,2] \quad (10-22b)^{**})$$

V *Newtonově oblasti* je usazování popsáno rovnicí (10-21). Dosazením za ζ_u z rovnice (10-16b), dostaneme

*) Z rovnice se vypočte absolutní hodnota rychlosti v_u .

**) Do rovnice se dosazuje absolutní hodnota v_u .

$$v_u = \left(\frac{f d_p}{0,33} - \frac{\Delta \rho}{\rho_f} \right)^{0,5} \quad [Re_u \in < 5 \cdot 10^2 ; 1,5 \cdot 10^5 >] \quad (10-23a)^*)$$

nebo

$$d_p = \frac{0,33 \rho_f v_u}{f \Delta \rho} \quad [Re_u \in < 5 \cdot 10^2 ; 1,5 \cdot 10^5 >] \quad (10-23b)$$

Nedostatek postupu výpočtu spočívá v tom, že jednotlivé oblasti jsou vymezeny Reynoldovým kritériem Re_u , které obsahuje hledanou veličinu: buď v_u , nebo d_p . Proto nelze na základě vstupních dat určit, ve které oblasti usazování probíhá. Potom musíme postupovat tak, že podle zadaných dat odhadneme, že usazování probíhá buď ve Stokesově, nebo v Newtonově oblasti. Z příslušného vzorce vypočteme hledanou veličinu, kterou dosadíme do definice Re_u . Vypočtená hodnota nám potvrdí, nebo zamítne volbu oblasti. Ve druhém případě výpočet opakujeme na základě rovnic platných pro jinou oblast a opět se přesvědčíme dodatečným výpočtem Re_u o správnosti volby oblasti.

Komplikace se zvýší, probíhá-li usazování v *oblasti Allenově*, kde doporučujeme použití rovnice (10-20). Tato rovnice neumožňuje explicitní vyjádření ani v_u , ani d_p . Proto musíme užít *iteračního postupu*.

Potíže při výpočtu v_u nebo d_p na základě funkce (10-17), které jsme právě uvedli, lze odstranit vhodnou transformací proměnných ζ_u a Re_u , která vyplývá z teorie podobnosti (viz kap.6). Nejčastěji hledaná rozměrová proměnná je rychlost usazování v_u , vyskytující se v obou bezrozměrových proměnných, jak plyne z rovnic (10-16a) a (10-18):

$$\zeta_u \sim v_u^{-2} \quad Re_u \sim v_u$$

Z těchto relací je vidět, že součin $\zeta_u Re_u^2$ neobsahuje rychlost usazování v_u . Tento součin představuje tedy novou bezrozměrovou veličinu, kterou upravíme s přihlédnutím k definici ζ_u [rov.(10-16b)] násobením konstantou 3/4, aby nové kritérium neobsahovalo číselnou konstantu. Nové kritérium se nazývá *Archimedovo kritérium* Ar a je definováno rovnicí

$$Ar \equiv \frac{3}{4} \zeta_u Re_u^2 \quad (10-24)$$

Spojením rovnic (10-24), (10-16b) a (10-18) dostaneme vzorec pro výpočet Archimedova kritéria na základě vstupních dat:

$$Ar \equiv \frac{f d_p^3 \rho_f \Delta \rho}{\eta^2} \quad (10-25)$$

Bezrozměrový vztah (10-17) mezi veličinami ζ_u a Re_u můžeme nyní pomocí rovnice (10-24) upravit na vztah mezi Re_u a Ar , tj.

*) Z rovnice se vypočte absolutní hodnota rychlosti v_u .

$$Re_u = Re_u (Ar) \quad (10-26)$$

který je vhodný pro výpočet rychlosti usazování v_u na základě zadaného průměru částice d_p .

Konkrétní tvar funkce (10-26) dostaneme z rovnic (10-19), (10-20) a (10-21) transformací souřadnic pomocí rovnice (10-24). Tuto úpravu nyní ukážeme na rovnici (10-19), tj. pro Stokesovu oblast:

$$\zeta_u = 24 / Re_u \quad [Re_u \leq 0,2] \quad (10-19)$$

Z rovnice (10-24) plyne

$$\zeta_u = \frac{4}{3} \frac{Ar}{Re_u^2} \quad (10-24a)$$

Spojením obou rovnic dostaneme

$$Re_u = Ar / 18 \quad (10-27)$$

Abychom však pomocí hodnoty Ar mohli rozhodnout, zda probíhá usazování ve Stokesově oblasti, musíme určit *kritickou hodnotu* Ar odpovídající kritické hodnotě $Re_u = 0,2$. Dosazením do právě odvozené rovnice (10-27) dostaneme

$$Ar = 18 Re_u = 18 \cdot 0,2 = 3,6$$

Stokesova oblast usazování je tedy v souřadnicích (Re_u, Ar) popsána vztahem

$$Re_u = Ar / 18 \quad [Ar \leq 3,6] \quad (10-27)$$

Stejným postupem upravíme rovnice (10-20) a (10-21) a určíme mezní hodnoty Ar . Výsledné rovnice jsou uvedeny v *Příkladech* (kap.6) a v knize [8] (kap.12).

Pokud potřebujeme vypočítat průměr částice d_p na základě známé hodnoty rychlosti usazování v_u , jsou rovnice vyjadřující konkrétní průběh funkce Re_u a Ar nevýhodné (nutno užít iteračního postupu). Z definičních rovnic Re_u a Ar , tj. z rovnic (10-18) a (10-25), vyplývají relace

$$Re_u \sim d_p^{-1} \quad Ar_u \sim d_p^3$$

z nichž je vidět, že průměr d_p lze eliminovat zavedením nové bezrozměrové proměnné vytvořené např. jako poměr Re_u^3 / Ar . Tato nová bezrozměrová proměnná se nazývá *Ljaščenkovo kritérium* Ly :

$$Ly \equiv \frac{Re_u^3}{Ar} \quad (10-28)$$

Z rov.(10-18) a (10-25) dostáváme

$$Ly \equiv \frac{v_u^3}{f \eta} \frac{\rho_f^2}{\Delta \rho} \quad (10-28a)$$

Průběh usazování budeme nadále s výhodou popisovat funkcí

$$Ly = Ly(Ar) \quad (10-29)$$

nebo funkcí inverzní

$$Ar = Ar(Ly) \quad (10-29a)$$

podle toho, zda vstupní data umožňují výpočet Ar , nebo Ly . Hlavní výhoda proměnných Ly a Ar spočívá v tom, že každá obsahuje jen jednu z nejčastěji hledaných veličin v_u a d_p , tj. že jsou tyto proměnné vzájemně separovány.

Rovnice (10-28) umožňuje transformaci proměnných v rovnicích typu (10-26) a výpočet mezních hodnot Ly . Dostaneme tak pro jednotlivé oblasti usazování tyto rovnice:

Stokesova oblast :

$$Ly = \frac{Ar^2}{5,83 \cdot 10^3} \quad [Ar \leq 3,6] \quad (10-30)$$

$$Ar = 76,4 Ly^{0,5} \quad [Ly \leq 2,22 \cdot 10^{-3}] \quad (10-30a)$$

Allenova a Stokesova oblast, tj. pro $Ar \leq 3,43 \cdot 10^5$ a $Ly \leq 2,92 \cdot 10^3$:

$$Ar^{2/3} = 18 Ly^{1/3} [1 + 0,125 (Ly Ar)^{0,24}] \quad (10-31)$$

Tato forma rovnice neumožňuje explicitní vyjádření Ar a Ly . Rovnice musí být proto řešena iteračně.

Newtonova oblast:

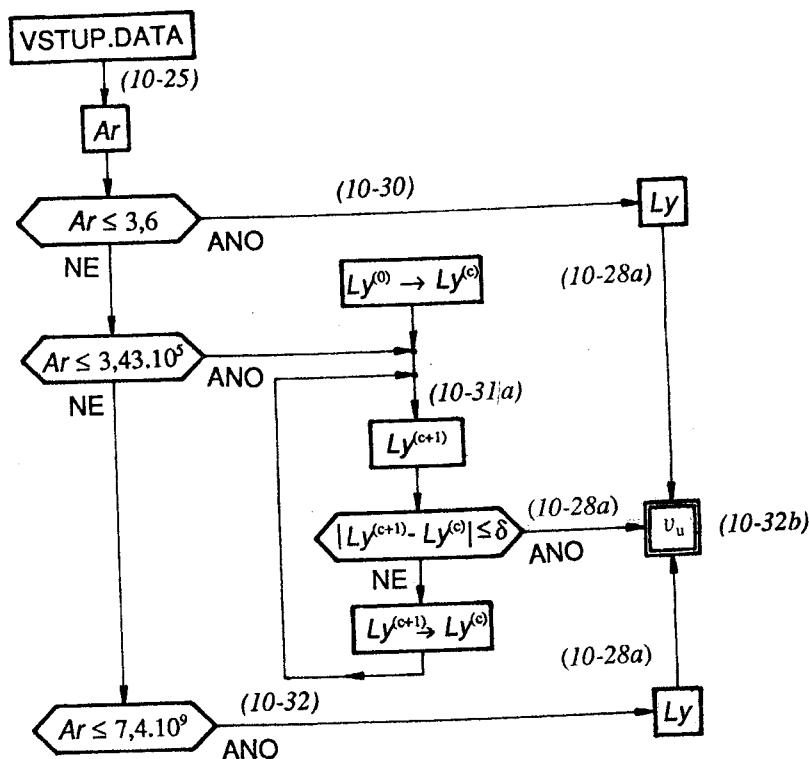
$$Ly = 5,27 Ar^{0,5} \quad [Ar \in <8,4 \cdot 10^4 ; 7,4 \cdot 10^9>] \quad (10-32)$$

$$Ar = 3,60 \cdot 10^2 Ly^2 \quad [Ly \in <1,5 \cdot 10^3 ; 4,6 \cdot 10^5>] \quad (10-32a)$$

Výpočet v_u ze známé hodnoty d_p a dalších vstupních dat uskutečníme pomocí sady rovnic typu (10-29), tj. pomocí rovnic (10-30), (10-31) a (10-32). Pro účely iterace si však nejprve upravíme rov.(10-31):

$$Ly = \frac{Ar^2}{5,83 \cdot 10^3 [1 + 0,125 (Ly Ar)^{0,24}]^3} \quad (10-31a)$$

Nyní lze uplatnit algoritmus výpočtu (10-32b):



Počítáme-li d_p ze známé hodnoty v_u , vycházíme z rovnic typu (10-29a), tj. z rovnic (10-30a), (10-31) a (10-32a). Napřed však upravíme rov.(10-31):

$$Ar = \{5,83 \cdot 10^3 Ly [1 + 0,125 (Ly Ar)^{0,24}] \}^{1/2}$$

K výpočtu se použije obdobný algoritmus jako (10-32b).

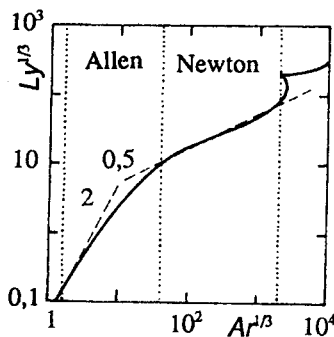
K rychlejšímu, avšak méně přesnému výpočtu může sloužit dále uvedený grafický nebo numerický postup. Takto získané výsledky mohou být též použity k získání hodnoty nulté aproximace $Ly^{(0)}$ pro algoritmus (10-32b).

K výpočtu jak v_u , tak i d_p je možno užít grafu, v němž je funkce (10-29) zakreslena v souřadnicích $Ly^{1/3}$, $Ar^{1/3}$, neboť z definice Ly a Ar plyne

$$Ly^{1/3} \sim v_u \quad Ar^{1/3} \sim d_p$$

Tento graf je ukázán na obr.10.16. Graf vhodný k odečítání hodnot je obr.6-4 v *Příkladech*. Poznamenejme, že graf na obr.10.16 vznikl transformací souřadnic z grafu na obr.10.14.

Pro výpočty za použití obr.10.16 je výhodné zavést pomocnou veličinu β (viz knihu [8]).



Obr.10.16. Závislost $Ly^{1/3} = \beta v_u$ na $Ar^{1/3} = d_p \rho_f / (\beta \eta)$ pro usazování izolované kulové částice

$$Ly^{1/3} = Ar^{2/3} / 18 \quad [Ar^{1/3} \leq 1,5; Ly^{1/3} \leq 0,13]$$

$$Ly^{1/3} = Ar^{2/3} / \{18 [1 + 0,125 (Ly^{1/3} Ar^{1/3})^{0,72}]\} \quad [Ar^{1/3} \leq 70; Ly^{1/3} \leq 14]$$

$$(Ly^{1/3})^2 = Ar^{1/3} / 0,33 \quad [Ar^{1/3} \in \langle 44; 1,95 \cdot 10^3 \rangle; Ly^{1/3} \in \langle 11; 77 \rangle]$$

$$\beta \equiv \left(\frac{\rho_f^2}{f \eta \Delta \rho} \right)^{1/3} \quad (10-33)$$

Potom je možno psát^{*)}

$$Ly^{1/3} = v_u \beta \quad (10-33a)$$

a

$$Ar^{1/3} = \frac{d_p \rho_f}{\beta \eta} \quad (10-33b)$$

K rychlému numerickému výpočtu v_u nebo d_p lze užít rovnici z knihy [41] popisující usazování izolované částice sice méně přesně, avšak platící pro všechny tři oblasti bez omezení:

$$Re_u = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} \quad (10-34)$$

$$Ly = \frac{Ar^2}{(18 + 0,61\sqrt{Ar})^3} \quad (10-34a)$$

Je zřejmé, že rov.(10-34), resp.(10-34a) pro velmi malé hodnoty Ar přechází na rov.(10-27), resp.10-30), a pro velmi vysoké hodnoty Ar se blíží k rovnici založené na rov.(10-31), resp. k rov.(10-32).

^{*)} Veličinu β je výhodné použít i k numerickým výpočtům, při kterých neuplatňujeme graf na obr.10.16, ale rovnice v legendě k obr.10.16 či rov.(10-30a), (10-31), (10-32), (10-32a) a (10-34a).

10.4 Vliv různých faktorů na průběh usazování

Vztahy, které jsme uvedli v části 10.4, jsou vázány na kulový tvar částice a na podmínku, že se částice vzájemně neovlivňují, tj. že jejich koncentrace v suspenzi je malá. Rovněž jsme neuvažovali vliv stěn a usazování souboru různě velkých částic (polydisperzní soubor). Postupně uvedeme vliv stěn zařízení (10.4.1), tvaru částic (10.4.2), koncentrace částic (10.4.3) a polydisperzity částic v suspenzi (10.4.4) na průběh usazování.

10.4.1 Vliv stěn zařízení

Vliv stěn zařízení na rychlost usazování kulové částice o průměru d_p v zařízení o průměru D vede ke *snížení rychlosti usazování*, kterou označíme $v_{u,D}$ (na rozdíl od rychlosti usazování izolované částice v_u v neomezeném prostředí, tj. bez vlivu stěn). Na příkladu *ideální tekutiny* snadno prokážeme, že vliv stěn na snížení rychlosti usazování je pro $\rho_s \rightarrow \rho_f$ dán vzestupnou rychlostí tekutiny. Tato vzestupná rychlost tekutiny vzniká vytlačováním tekutiny usazující se částicí a tokem průřezem zařízení o průměru D zmenšeném o průřez částice. Odvodíme tak rovnici

$$\frac{v_{u,D}}{v_u} = 1 - (d_p / D)^2 \quad [\text{IDEÁLNÍ TEKUTINA}] \quad (10-35)$$

Stupeň snížení rychlosti usazování je však ve skutečnosti různý podle charakteru obtékání částice reálnou tekutinou. Relativně větší vliv na usazování částice se projevuje ve Stokesově oblasti než v oblasti Newtonově, kdy je vyvinuta turbulence tekutiny. Autoři [42] uvádějí dvě empirické rovnice pro výpočet rychlosti usazování $v_{u,D}$ ovlivněné stěnami zařízení.

Ve Stokesově oblasti:

$$\frac{v_{u,D}}{v_u} = (1 - d_p / D)^{2,25} \quad [\text{STOKES}] \quad (10-35a)$$

V Newtonově oblasti:

$$\frac{v_{u,D}}{v_u} = 1 - (d_p / D)^{1,5} \quad [\text{NEWTON}] \quad (10-35b)$$

Z obou rovnic se snadno přesvědčíme, že významný vliv stěn na rychlost usazování se může projevit nejvýše u laboratorního zařízení, zatímco u průmyslového zařízení nepřichází v úvahu.

10.4.2 Vliv tvaru částice

Sféricita, kterou jsme použili pro vyjádření vlivu tvaru částice na ztrátu měrné mechanické energie při proudění tekutiny vrstvou nekulového zrnitého materiálu (kap.8), není vhodnou veličinou pro vyjádření vlivu tvaru částice na její usazování.

Při usazování, na rozdíl od proudění tekutiny nehybnou vrstvou zrnitého materiálu, je dosaženo rovnováhy sil. Navíc se izolovaná částice při usazování orientuje již od velmi nízkých hodnot $Ar > 10^{-3}$ do nejstabilnější polohy bez ohledu na to, jak byla do tekutiny vložena. V nejstabilnější poloze je průmět nekulové částice S_p (viz.obr. 10.13) do roviny kolmé na směr rychlosti usazování v_u maximální a hodnota v_u je minimální, neboť součinitel odporu takto orientované částice je maximální. Podle tohoto zjednodušeného výkladu tedy podlouhlé a ploché částice při usazování leží. Ve skutečnosti konají kývavý pohyb kolem této nejstabilnější polohy (viz např. padání listů ze stromu).

Z našeho výzkumu [43] vyplývá, že vhodnou charakteristikou vlivu tvaru na usazování nekulové částice je *dynamický tvarový faktor* φ_{Ar} definovaný rovnicí

$$\varphi_{Ar} \equiv (Ly / Ly_o)^{1/3} = v_u / v_{uo} \quad [Ar = Ar_o] \quad (10-36)$$

kde veličiny týkající se kulové částice mají dolní index o . Ljaščenkovo kritérium a Archimedovo kritérium je definováno rovnicemi (10-25) a (10-28). Pro nekulové částice dosazujeme za veličinu d_p průměr ekvivalentní koule daný vzorcem

$$d_p = \left(\frac{6}{\pi} \right)^{1/3} V_p^{1/3} \quad [V_p = V_{po}] \quad (10-37)$$

Objem nekulové částice je tedy roven objemu kulové částice o průměru d_p . Z definiční rovnice (10-36) plyne, že dynamický tvarový faktor *kulové částice* je

$$\varphi_{Ar_o} = 1 \quad (10-36a)$$

a že pro *nekulové částice*, které se usazují ve stabilizované poloze, je

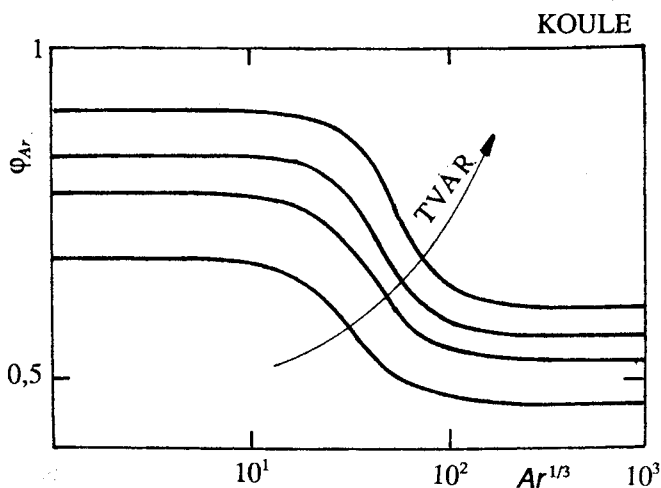
$$\varphi_{Ar} < 1 \quad [Ar > 10^{-3}] \quad (10-36b)$$

Dynamický tvarový faktor je pro daný geometrický tvar částice funkcí Archimedova kritéria. Tuto závislost jsme vyjádřili kvantitativně jako funkci

$$\varphi_{Ar} = \varphi_{Ar} (Ar^{1/3} ; \text{TVAR}) \quad (10-38)$$

jejíž průběh je pro několik tvarů částice ilustrován na obr. 10.17.

Jednotlivé parametrické křivky představují průběh dynamického tvarového faktoru při určitém tvaru částice. Je patrné, že vliv tvaru částice je při nízkých hodnotách Ar (přibližně ve Stokesově oblasti) malý a silně se zvyšuje při turbulentním obtékání částice. Tento jev lze přirovnat ke zvýšenému vlivu drsnosti potrubí při turbulentním proudění tekutiny (viz kap.5). Křivky pro tvar více odchylný od koule leží níže.



Obr.10.17. Závislost dynamického tvarového faktoru φ_{Ar} na $Ar^{1/3}$ pro několik tvarů částic přibližujících se ve směru šipky ke kouli

Zde zatím neuvádíme kvantitativní vyjádření parametru TVAR. Tento parametr může být u pravidelných tvarů uveden slovně, případně s doplněním dalších geometrických charakteristik: např. krychle, pravidelný osmistěn, válec s poměrem výšky ku průměru 2:5, kvádr s poměrem hran 5:2:1, rotační elipsoid s poměrem poloos 3:2 atd. U nepravidelných částic je výstižná kvantitativní charakteristika tvaru podstatně náročnější. Postup výpočtu rychlosti usazování v_u nekulové částice vychází z rovnice (10-36):

$$v_u = \varphi_{Ar} v_{uo} [Ar = Ar_o] \quad (10-36c)$$

Nejprve tedy vypočteme pro danou nekulovou částici a danou tekutinu Archimedovo kritérium Ar a z něho postupem uvedeným v části 10.3 rychlost usazování kulové částice v_{uo} . Tuto hodnotu přepočteme na rychlost usazování nekulové částice v_u pomocí dynamického faktoru φ_{Ar} který je pro daný tvar částice a hodnotu Ar určen funkcí (10-38). Z rov.(10-36c) plyne, že nekulová částice se usazuje pomaleji než částice kulová.

Bližší podrobnosti o vlivu tvaru částice na rychlost usazování a postup výpočtu jsou uvedeny v příloze A8.

10.4.3 Vliv koncentrace částic v suspenzi

Vliv zvýšené koncentrace částic na usazování představuje složitý jev. Částice se vzájemně ovlivňují, a proto se mluví o *rušeném usazování*. Představíme-li si částice umístěné ve sloupci nad sebou, dojde ke zvýšení rychlosti usazování ve srovnání s izolovanou částicí. Naproti tomu horizontálně uspořádané částice se vzhledem k izolované částici usazují pomaleji. Hlavním důvodem je proud tekutiny vznikající vytěsňováním usazujícími se částicemi a postupující v opačném směru, než probíhá usazování (viz část 10.4.1). Tím dochází k brzdění usazujících se částic. Který z protichůdných vlivů usazování horizontálně a vertikálně uspořádaných částic na rychlost usazování suspenze převládne, bylo určeno pokusně.

Kniha [41] obsahuje rovnici, která byla sestavena na základě pokusných dat zjišťovaných při expanzi rovnoměrné fluidní vrstvy stejně velkých kulových částic o stejné hustotě (viz kap.11) a která současně popisuje usazování suspenzí:

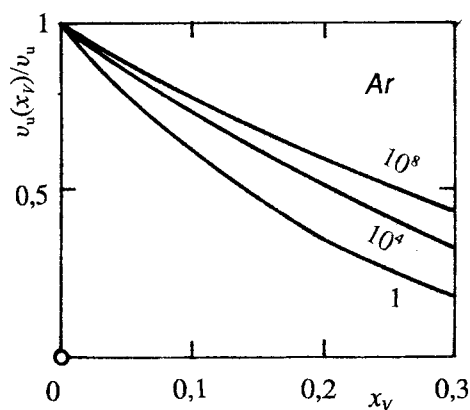
$$Re_u = \frac{Ar (1-x_v)^{4,75}}{18 + 0,6 [Ar (1-x_v)^{4,75}]^{0,5}} \quad (10-39)$$

nebo

$$Ly^{1/3} = \frac{Ar^{2/3} (1-x_v)^{4,75}}{18 + 0,6 (Ar^{1/3})^{1,5} (1-x_v)^{2,38}} \quad (10-40)$$

V obou rovnicích x_v je objemový zlomek pevných částic v suspenzi.

Pro ilustraci byl vliv koncentrace vypočten z rovnice (10-40) jako poměr rychlosti usazování při vlivu koncentrace částic $v_u(x_v)$ a rychlosti usazování izolované částice v_u . Poměr $v_u(x_v) / v_u$ je ukázán na obr.10.18 v závislosti na x_v pro tři hodnoty $Ar = 1; 10^4; 10^8$. Z obrázku je vidět, že vliv koncentrace částic na rychlost usazování je značný, zejména ve Stokesově oblasti. Je zřejmé, že při větší koncentraci částic v suspenzi je rychlost usazování menší.



Obr.10.18. Vliv koncentrace částic x_v a Archimedova kritéria Ar na poměr $v_u(x_v) / v_u$

Při hodnotách $x_v < 0,01$ je možno s chybou nejvýše 5 % považovat usazování za nerušené a částice v suspenzi pro výpočet rychlosti usazování za izolované.

10.4.4 Usazování polydisperzního souboru částic

Průběh usazování se zatím týkal monodisperzních částic, tj. částic stejné velikosti a stejných vlastností. Nyní si ukážeme, jak lze popsat usazování polydisperzního souboru částic, které přichází v praxi často v úvahu.

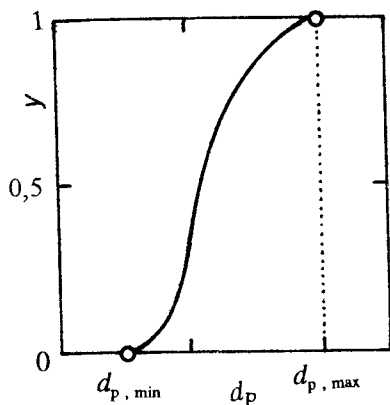
Pro jednoduchost budeme zatím uvažovat kulové částice stejné hustoty a lišící se pouze

velikostí.^{*)} Uvažujme polydisperzní soubor částic nacházející se v rozpětí průměru $d_{p, \min}$ až $d_{p, \max}$. Zastoupení jednotlivých velikostí částic v souboru je možno vyjádřit *distribuční funkcí* velikosti částic v souboru, vyjádřené jako hmotnostní zlomek $y(d_p)$ částic o průměru $d_{p, \min}$ až d_p :

$$y(d_p) \equiv m(d_p) / m \quad (10-41)$$

kde $m(d_p)$ je hmotnost částic o průměru $d_{p, \min}$ až d_p a m je hmotnost celého souboru.

Předpokládejme, že soubor tvoří tak velký počet částic, že lze tuto distribuční funkci považovat za spojitou. Příklad takové distribuční funkce je ukázán na obr.10.19. Průběh $y(d_p)$ pro



Obr.10.19. Příklad distribuční funkce velikosti částic $y(d_p)$

určitý polydisperzní soubor lze stanovit některou z metod granulometrické analýzy, jako je např. síťová analýza, mikroskopická analýza a moderní počítačová analýza obrazu.

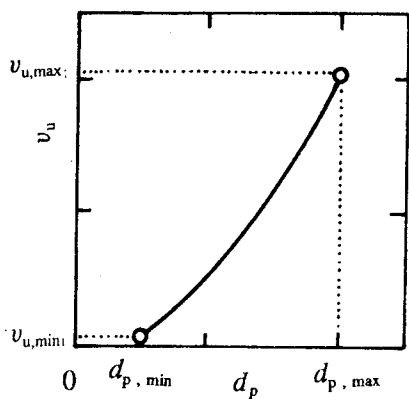
Z daného polydisperzního souboru vytvoříme nyní v kapalině suspenzi o dostatečně nízké koncentraci, abychom mohli považovat částice za izolované.^{**)} Potom z křivky na obr.10.19 vypočteme na základě vztahů v části 10.3 pro jednotlivé rozměry d_p a danou tekutinu rychlost usazování v_u . Dostaneme tak nejprve závislost rychlosti usazování v_u na průměru částice d_p , tj. funkci $v_u = v_u(d_p)$ (viz obr.10.20). Poté vyjádříme *distribuční funkci rychlosti usazování*

$$y(v_u) \equiv m(v_u) / m \quad (10-42)$$

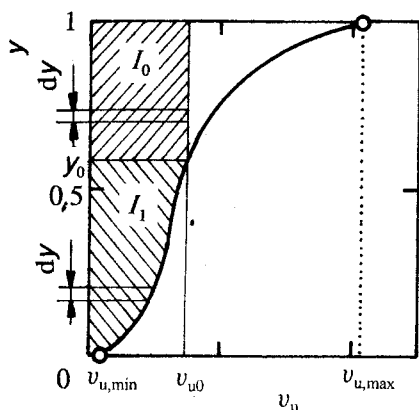
kde $m(v_u)$ je hmotnost částic s rychlostí usazování v rozmezí $v_{u, \min}$ až v_u . Tato distribuční funkce je ukázána na obr.10.21.

^{*)}Postup lze však použít i pro částice odlišných tvarů a hustot v souboru.

^{**)} Obdobně lze postupovat i v případě vyšší koncentrace suspendovaných částic s tím rozdílem, že uplatníme korekci způsobenou zvýšenou koncentrací (viz část 10.4.3).



Obr. 10.20. Závislost rychlosti usazování v_u na průměru částic d_p pro daný polydisperzní soubor v dané tekutině



Obr. 10.21. Příklad distribuční funkce rychlosti usazování částic $y(v_u)$ s vyznačením integrálů I_0 a I_1

Představme si nyní, že jsme suspenzi s rovnoměrně rozptýlenými částicemi v čase $\tau = 0$ naplnili válec. V hloubce H pod hladinou budeme sledovat proces sedimentace.*)

Poskytneme-li suspenzi pro usazování čas τ_u , pak úsek od hladiny do hloubky H urazí částice o průměru d_{p0} s rychlostí usazování v_{u0} , pro kterou platí

$$v_{u0} = H / \tau_u \quad (10-43)$$

Těmto částicím odpovídá hmotnostní zlomek

$$y_0 = m_0 / m \quad (10-44)$$

*) Proces sedimentace lze sledovat sedimentační analýzou. V hloubce H pod hladinou může být umístěna miska sedimentačních vah, které registrují množství usazených částic v čase nebo při Andreasenově sedimentační analýze je zjišťován obsah pevné fáze ve vzorcích pipetovaných z hloubky H v řadě časů. Zjištěný průběh sedimentace rovněž odpovídá situaci v usazováku v hloubce H pod hladinou (viz část 10.5).

kde m_0 je hmotnost částic v polydisperzním souboru, jejichž rychlost usazování je $v_{u, \min}$ až v_{u0} .

Všechny částice, pro které platí $v_u > v_{u0}$, jsou v čase τ pod úrovní H , resp. usazeny. Naproti tomu z částic, pro které je $v_u < v_{u0}$, se usadí jen část. Jsou to ty částice, které se v čase $\tau = 0$ nacházejí nejvýše na vertikálním úseku h nad rovinou v hloubce H ($h < H$). Pro určité částice vyplývá úsek h ze vzorce

$$h = \tau_u v_u \quad (10-45)$$

Naopak tyto částice, nacházející se na úseku $(H - h)$ pod hladinou, se tedy v čase τ_u z důvodu nízké rychlosti usazování $v_u < v_{u0}$ nedostanou pod úroveň H , tj. neusadí se, neboť pro dosažení hloubky H potřebují čas delší než τ_u .

Snadno ukážeme, že plocha obdélníku

$$I = \int_0^1 v_{u0} dy = v_{u0} \quad (10-46)$$

je úměrná hmotnosti m všech částic, které se nacházejí v úseku H v čase $\tau = 0$. Násobíme-li celou rovnici (10-46) poměrem m / v_{u0} , dostaneme

$$m = m I / v_{u0} \quad (10-46a)$$

neboť poměr $I / v_{u0} = 1$, jak plyne z rov.(10-46).

Hmotnost částic m_u usazených v čase τ_u se skládá z částic, které se usadí všechny ($v_u \geq v_{u0}$) a mají hmotnost m_{u0} , a z částic, které se usadí jen z části ($v_u < v_{u0}$), jak plyne z rovnice (10-44), a mají hmotnost m_{u1} :

$$m_u = m_{u0} + m_{u1} \quad (10-47)$$

Hmotnost m_{u0} je úměrná ploše (integrálu) I_0 a hmotnost m_{u1} ploše (integrálu) I_1 v obr.10.21, přičemž

$$I_0 = \int_{y_0}^1 v_{u0} dy = v_{u0} (1 - y_0) \quad (10-48a)$$

$$I_1 = \int_0^{y_0} v_u dy \quad (10-48b)$$

Geometrickou představu o fyzikálním významu integrálů I_1 a I_0 si lze udělat z obr.10.21, kde jsou odpovídající plochy vyšrafovány. Násobením I_0 a I_1 poměrem m / v_{u0} dostaneme

$$m_u = (I_0 + I_1) m / v_{u0} = m (1 - y_0) + m \int_0^{y_0} (v_u / v_{u0}) dy$$

Poměr hmotnosti částic usazených v čase τ_u a všech částic v úseku H v čase $\tau = 0$ je potom dán rovnicí:

$$m_u / m = 1 - y_0 + \int_0^{y_u} (v_u / v_{u0}) dy \tag{10-48c}$$

Z dosavadního výkladu je jasné, že při $v_{u0} \leq v_{u, \min}$, tj. pro $\tau_u \geq H / v_{u, \min}$ se usadí všechny částice, které byly v čase $\tau = 0$ v úseku H , tj. $m_u / m = 1$

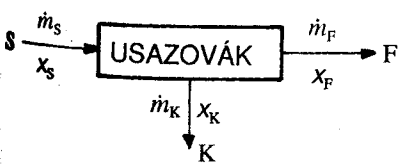
Při návrhu usazováků se obvykle požaduje, aby byly odstraněny prakticky všechny suspendované částice, a aby tedy usazovák opouštěla čistá tekutina. Potom se výpočet orientuje na částice s nejmenší hodnotou rychlosti usazování $v_{u, \min}$, tj. s největší dobou usazování částic $\tau_{u, \max}$. Z distribuční funkce $y(v_u)$ na obr.10.21 je vidět, že zastoupení těchto částic v polydisperzním souboru je malé. Proto je jejich koncentrace rovněž malá a jejich rychlost usazování můžeme spolehlivě počítat z rovnic v části 10.3 (usazování izolované částice).

10.5 Výpočet usazováků

Do této části jsme zařadili jednak kontinuální gravitační usazováky s horizontálním a vertikálním prouděním suspenze, jednak velmi rozšířené cyklónové odlučovače, ve kterých dochází k usazování vlivem odstředivé síly^{*)}.

Výpočet usazováků se zakládá hlavně na bilanci hmotnosti pevné fáze a na rovnici vyjadřující rychlost usazování částic.

Nejprve sestavíme *hmotnostní bilanci*, která je univerzální pro všechny typy usazováků. Obr.10.22 představuje bilanční schéma, v němž x_s , x_K , x_F jsou hmotnostní zlomky suspendovaných částic v jednotlivých proudech a $\dot{m}_s$, $\dot{m}_K$, $\dot{m}_F$ jsou hmotnostní toky těchto proudů. Na rozdíl od obdobného bilančního schématu pro filtraci zde obecně uvažujeme nenulovou hodnotu koncentrace částic x_F . Situace $x_F \neq 0$ nastává jednak u usazováků s nižší účinností odlučování, jednak tehdy, když usazovák slouží k třídění částic. Získané vztahy lze snadno upravit pro $x_F = 0$.



Obr.10.22. Bilanční schéma usazováku
S - suspenze, K - kal (usazenina, sediment), F - vyčištěná tekutina nebo tekutina se sníženým obsahem suspendovaných částic

^{*)} Pojednání o usazovacích odstředivkách lze najít v knize [8], str. 256.

Ze schématu na obr.10.22 plynou pro *ustálený stav* dvě bilanční rovnice (celková a složková bilance):

$$\dot{m}_S = \dot{m}_K + \dot{m}_F \quad (10-49)$$

$$x_S \dot{m}_S = x_K \dot{m}_K + x_F \dot{m}_F \quad (10-50)$$

Z obou rovnic dostaneme vztah mezi hmotnostními toky $\dot{m}_F$ a $\dot{m}_S$:

$$\dot{m}_F = \frac{x_K - x_S}{x_K - x_F} \dot{m}_S \quad (10-51)$$

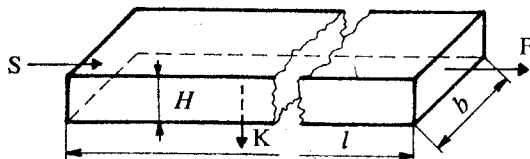
Jestliže opouští usazovák zcela vyčištěná tekutina, z rovnice (10-51) dostáváme

$$\dot{m}_F = \left(1 - \frac{x_S}{x_K} \right) \dot{m}_S \quad [x_F = 0] \quad (10-51a)$$

Obdobné rovnice lze sestavit i pro vsádkově pracující usazovák.

10.5.1 Gravitační usazovák s horizontálním tokem suspenze

Uvažujeme gravitační usazovák ($f = g$) typu *pravoúhlého usazováku* (obr.10.6B) nebo plavicího žlabu (obr.10.6C), jejichž schéma zjednodušíme, jak ukazuje obr.10.23^{*)}. Veličinu H představuje buď umístění dna pod hladinou při stálém odstraňování usazených částic, nebo hloubku pod hladinou, kde se nachází sediment, nebo hloubku horní hrany svislé přepážky pod hladinou u plavicího žlabu.



Obr.10.23. Zjednodušený pravoúhlý usazovák s horizontálním prouděním suspenze s konstantním průtočným průřezem $S = bH$ a s usazovací plochou $A = bl$

^{*)} Protože uvažujeme volnou hladinu suspenze v usazováku, jde samozřejmě o kapalnou suspenzi. Odvození však platí i pro plynné suspenze, kde výška H je určena výškou průtočného kanálu.

Další postup je založen na těchto zjednodušujících předpokladech :

1. Usazování probíhá v prostoru, který je vymezen na obr.10.23.
2. Suspenze je ve vstupním průřezu ($l = 0$) rovnoměrně rozptýlená.
3. Proudění tekutiny má charakter pístového toku a usazování probíhá podle obr.10.5A.
4. Suspendované částice mají úhrnný objem mnohem menší než tekutina.

Aby se v usazováku stačily usadit částice, jejichž rychlost a potřebná doba usazování jsou v_u a τ_u , musí jim být poskytnuta střední doba pobytu tekutiny

$$\bar{\tau} \geq \tau_u \quad (10-52)$$

Doba usazování τ_u je dána částicemi, které mají usazovací rychlost v_u a jsou v čase $\tau = 0$, tj. ve vstupním průřezu ($l = 0$) na hladině. Pro $h = H$ dostáváme z rov.(10.45):

$$\tau_u = H / v_u \quad (10-45a)$$

Střední doba prodlení tekutiny v zařízení je dána obdobou rovnice (1-1)

$$\bar{\tau} = V / \dot{V} \quad (1-1a)$$

kde V je aktivní objem zařízení a $\dot{V}$ je objemový tok tekutiny.

Vzhledem k obr.10.23 a přijatým předpokladům platí

$$V = A H = b l H \quad (10-53)$$

Opouští-li usazovák tekutina se zanedbatelným množstvím částic ($x_f \doteq 0$), můžeme přijmout rovnost $\dot{V} = \dot{V}_F$ a spojením s rovnicí (1-1a) pak dostaneme

$$\bar{\tau} = \frac{A H}{\dot{V}_F} = \frac{b l H}{\dot{V}_F} \quad (10-54)$$

Spojením rovnic (10-45a) a (10-54) pro krajní situaci podle rov.(10-52), tj. pro

$$\bar{\tau} = \tau_u \quad (10-52a)$$

dostaneme výkonnost usazováku vyjádřenou jako objemový tok vyčištěné tekutiny^{*)}

$$\dot{V}_F = A v_u \quad (10-55)$$

Výkonnost usazováku vyjádřenou pomocí hmotnostního toku suspenze dostaneme spojením rov.(10-55) s rovnicí hmotnostní bilance (10-51a) pro $\dot{m}_F = \dot{V}_F \rho_f$:

^{*)} Pro vsádkový usazovák bychom obdobně dostali $\dot{V}_F = A v_u \tau_u$, kde τ_u je doba nezbytná pro usazování částic majících rychlost usazování v_u a vyskytujících se v čase $\tau = 0$ na hladině.

$$\dot{m}_s = \frac{A v_u \rho_f x_K}{x_K - x_s} \quad [x_F = 0] \quad (10-56)$$

Z rovnic (10-55) a (10-56) plyne důležitý poznatek, že *výkonnost usazováku nezávisí na jeho výšce*, ale je úměrná usazovací ploše. Proto se staví mělké usazováky (např. usazovací nádrže a kanály) nebo se zvětší usazovací plocha v usazováku patrovým uspořádáním usazovacích ploch (např. v prašné komoře - obr.10.6E).

Řada zjednodušujících předpokladů, které jsme uvedli, je v praxi splněna jen přibližně. Skutečné proudění v usazováku se liší od pístového toku. U hladiny je větší rychlost než u dna. Tento nesoulad se silně zvyšuje v blízkosti přepadové hrany na konci usazováku. Proto je skutečná výkonnost podle rov.(10-55) a (10-56) asi o 40 % nižší než vypočtená a potřebná usazovací plocha A je přibližně o 70 % větší než vypočtená, což řešíme dodatečnou korekcí výpočtů.

Všimněme si ještě krátce *kontinuálního válcového usazováku s horizontálním tokem suspenze*. Příkladem takového usazováku je Dorrův usazovák (obr.10.6D). I když má tento usazovák kónické dno, pro další postup jej zjednodušíme na válec, v němž je H výška hladiny nade dnem (výška přepadové hrany pro vyčištěnou tekutinu F). Přijmeme rovněž obdobné zjednodušující předpoklady, které jsme uvedli v souvislosti s pravoúhlým gravitačním usazovákem. Navíc zanedbáme průměr trubky na přívod suspenze S proti průměru usazováku D .

Vyjdeme z rovnice (10-52a). Střední doba prodlení tekutiny $\bar{\tau}$ je opět dána rov.(1-1a), v níž aktivní objem je

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 H = A H \quad (10-53a)$$

takže opět dospějeme k rovnicím (10-55) a (10-56), ovšem $A = \pi D^2 / 4$.

10.5.2 Gravitační usazovák s vertikálním prouděním suspenze

Obr.10.6A ukazuje *kontinuální válcový usazovák s vertikálním prouděním suspenze*. Z axiálně umístěné trubky pro přívod suspenze vystupuje suspenze v hloubce H pod hladinou. Částice se usazují směrem dolů ($\rho_s > \rho_f$) a tekutina teče směrem nahoru. Přijímají se opět některé zjednodušující předpoklady :

1. V hloubce H pod hladinou je suspenze rovnoměrně rozptýlena.
2. Vertikální proudění tekutiny má charakter pístového toku.
3. Průměr trubky na přívod suspenze je zanedbatelný proti průměru usazováku.

Protože tekutina teče vzhůru mimovrstvovou rychlostí $v_f < 0$ (viz definice kladného směru v části 10.1), plyne z rovnice (10-3) mezní rychlost usazování částic v daném usazováku

$$v_u = -v_f \quad [v_p = 0] \quad (10-57)$$

při níž postupná rychlost mezních částic v_p je nulová. Za těchto podmínek se v usazováku zachytí všechny částice, které mají rychlost usazování větší, než je rychlost daná rovnicí (10-57).

U tohoto typu usazováku platí, že průtočná plocha S je rovna usazovací ploše A , tj. $S = A$. Protože

$$-v_f = \dot{V}_F / A \quad (10-58)$$

dostaneme z rovnice (10-57)

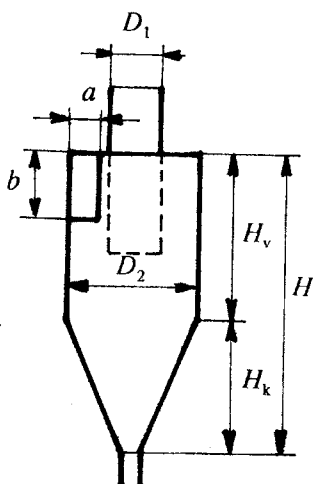
$$v_u = \dot{V}_F / A$$

což je po úpravě rovnice (10-55), kterou jsme odvodili pro gravitační usazovák s horizontálním prouděním suspenze. Je zřejmé, že pro gravitační usazovák s vertikálním tokem suspenze platí rovněž rovnice (10-56).

Vzhledem k odchylkám skutečného průběhu děje od výchozích předpokladů lze doporučit korekce výpočtů uvedené v závěru části 10.5.1.

10.5.3 Usazování v cyklónových odlučovačích

Uvažujeme *cyklón* nebo *hydrocyklón*, jehož činnost byla vysvětlena v části 10.2 a který je ukázán na obr.10.8B. Zde ukážeme přibližný kvantitativní popis usazování částice ($\rho_s > \rho_f$) v cyklónu, jehož hlavní rozměry ukazuje obr.10.24. Rozměry sériově vyráběných cyklónů jsou určeny normami, např. [44]. Podrobnější informace lze též získat v knihách [40] a [45].



Obr.10.24. Cyklón s vyznačením hlavních rozměrů

Suspenze vstupuje vstupním průřezem o velikosti ab tangenciálně do meziválcového prostoru cyklónu, jehož šířka je $(R_2 - R_1) = (D_2 - D_1) / 2$. Na této šířce předpokládáme rovnoměrné rozptýlení částic na vstupu do cyklónu. Rychlost ve vstupním průřezu je v_t .

Vlivem tangenciálního vstupu a válcového tvaru cyklónu dojde k *rotaci suspenze*, takže na částici nacházející se v radiální vzdálenosti r od osy rotace působí podle rovnice (10-4c) měrná odstředivá síla

$$f = v_t^2 / r \quad (10-4c)$$

Střední rychlost ve vstupním průřezu vypočteme z objemového toku $\dot{V}_S \approx \dot{V}_F$ za předpokladu, že tekutina neuniká v proudu K a že koncentrace částic ve vstupující suspenzi je malá:

$$v_t = \dot{V}_F / (ab) \quad (10-59)$$

Za úsek, v němž může dojít v cyklónu k odloučení částice, považujeme válcovou část o výšce H_v . V tomto úseku dochází nejen k rotaci suspenze, ale současně i k postupnému pohybu. Výsledkem je pohyb po šroubovici. V závislosti na výšce H_v a na výšce vstupního průřezu b je počet závitů šroubovice

$$n = H_v / b \quad (10-60)$$

Vlivem odstředivé síly se částice současně pohybuje ke stěně. Radiální složka rychlosti částice je rychlost usazování v_u vlivem odstředivé síly. Z rovnice (10-4c) plyne, že rychlost usazování, definovaná vztahem

$$v_u \equiv \frac{dr}{d\tau_u} \quad (10-61)$$

je funkcí poloměru r , tj. $v_u = v_u(r)$. Z této funkce vyjádřené pro dané podmínky (viz část 10.3) lze získat dobu usazování τ_u .

V cyklónu se odloučí ještě ta částice, která za dobu τ_u dosáhne válcové stěny cyklónu. Střední dráha l , kterou částice při n závitech šroubovice přibližně vykoná, je

$$l = \pi (D_1 + D_2) n / 2 \quad (10-62)$$

Dráha l je pro mezní odlučované částice dána současně vztahem

$$l = v_t \tau_{u0} \quad (10-63)$$

Dobu usazování τ_{u0} určíme na základě vztahu pro výpočet rychlosti usazování v_u . Vzhledem k tomu, že cyklón slouží k odlučování velmi jemných částic, předpokládáme usazování ve Stokesově oblasti podle rovnice (10-22a):

$$v_u = \frac{f \Delta \rho}{18 \eta} d_p^2 \quad [Re_u \leq 0,2] \quad (10-22a)$$

Přihlédneme-li k rovnici (10-61), obdržíme z rovnic (10-22a) a (10-4c)

$$\int_0^{\tau_{u0}} d\tau_u = \frac{18 \eta}{v_t^2 \Delta \rho d_{p0}^2} \int_{R_1}^{R_2} r dr$$

Po integraci a úpravě dostaneme

$$\tau_{u0} = \frac{9}{4} \frac{\eta (D_2^2 - D_1^2)}{v_t^2 \Delta \rho d_{p0}^2} \quad (10-64)$$

Spojíme-li nyní rovnice (10-60), (10-62), (10-63) a (10-64), dostaneme vzorec pro mezní velikost částice d_{p0} :

$$d_{p0} = 1,20 \left[\frac{\eta (D_2 - D_1) b}{v_t \Delta \rho H_v} \right]^{0,5} \quad (10-65)$$

Všechny částice větší než hodnota d_{p0} vypočtená z rovnice (10-65) by se měly v cyklónu beze zbytku odloučit. Částice menší než d_{p0} se odloučí jen zčásti. Z těchto částic se odloučí jen ty částice, které se na vstupu do cyklónu nacházejí dostatečně blízko k válcové stěně cyklónu, aby tuto stěnu dostihly po proběhnutí n závitů šroubovice. Bližší rozbor tzv. *frakční odlučivosti* částic je v principu stejný, jako jsme uvedli v části 10.4.4 při usazování polydisperzní směsi.

Z rovnice (10-65) je zřejmé, že mezní velikost odlučovaných částic d_{p0} klesá se vzrůstající vstupní rychlostí v_t a s počtem závitů šroubovice $n = H_v / b$ a s klesající hodnotou $(D_2 - D_1)$. Proto vykazují štíhlé cyklóny s vysokou vstupní rychlostí vysokou odlučivost částic.

Zvyšování vstupní rychlosti v_t však musí být v relaci s přijatelnou tlakovou ztrátou Δp_{dis} , která se vyjadřuje jako tlaková ztráta na místním odporu se součinitelem odporu ζ , tj. podle rovnice

$$\Delta p_{\text{dis}} = \zeta \frac{v_t^2}{2} \rho_f \quad (10-66)$$

Obvykle je *tlaková ztráta* v cyklónech pro odlučování částic z plynných suspenzí v rozmezí 400 až 1 000 Pa.

Hodnota *součinitele odporu cyklónu* je závislá především na jeho konstrukci. Lze ji určit pokusně nebo vyplývá např. z norem [44], podle kterých je přibližně 20. Kniha [45], str.361 uvádí podle konstrukčních parametrů cyklónů součinitel odporu od 5 do 24. Rov.(10-66) umožňuje nejen určení hodnoty Δp_{dis} , ale i interpolaci dat v normách [44] a přepočet tlakové ztráty při změně hustoty ρ_f , buď vlivem tlaku a teploty, nebo změnou složení plynu.

KONTROLNÍ ÚLOHY

- 10.2. Jakou výhodu může přinést, předřadíme-li usazování před filtraci místo bezprostřední filtrace určité suspenze?
- 10.13. Odvoďte rovnice (10-22a) a (10-22b).
- 10.14. Odvoďte rovnice (10-23a) a (10-23b).
- 10.18. Určete maximální odchylku výpočtu v_u ve Stokesově oblasti při použití rovnic (10-27) a (10-34) a v Newtonově oblasti při použití rovnice typu (10-26) v porovnání s rov. (10-34).
- 10.21. Z rovnic (10-35a, b) vypočítejte, kolikrát větší musí být průměr zařízení D než průměr částice d_p , aby rychlost usazování při ovlivnění stěnami byla aspoň 99 % rychlosti usazování bez vlivu stěn. Výsledky porovnejte s výpočtem pro ideální tekutinu pomocí rov.(10-35).
- 10.23. V textu je uvedeno, že se ploché částice usazují ve skutečnosti tak, že vykonávají kývavý pohyb kolem své nejstabilnější polohy. Posuďte, zda a jak se liší rychlost usazování při kývavém pohybu od rychlosti usazování v nejstabilnější poloze a uveďte, který z nabídnutých výroků je správný a proč.
Rychlost usazování při kývavém pohybu je: a) stejná, b) větší, c) menší.
- 10.24. Odvoďte vzorec vyjadřující vliv koncentrace částic x_v v suspenzi na rychlost usazování odpovídající obr.10.18.
- 10.25. Vyjádřete objemový tok tekutiny vstupující do usazováku v proudu zpracovávané suspenze pomocí relativních hmotnostních zlomků částic v původní suspenzi a v sedimentu (v kalu). Předpokládejte, že veškeré částice přejdou ze vstupující suspenze do sedimentu.
- 10.26. Odvoďte obdobu rov.(10-56) pro vyjádření výkonnosti vsádkového usazováku.
- 10.27. Vypočítejte, oč větší odstředivá síla působí na částici v cyklónu oproti síle gravitační za těchto podmínek:
a) Cyklón má průměr válcové části $D_2 = 1,00$ m.
b) Cyklón má průměr válcové části $D_2 = 0,160$ m.

V obou případech bude vstupní rychlost $v_t = 12 \text{ m s}^{-1}$ a poměr $D_1 / D_2 = 2/5$, kde D_1 je průměr centrální roury pro odtok tekutiny z cyklónu.

10.28. Odvoďte rovnici (10-65).