

Usazování, odstřed'ování- elektronický učební text

Jiří Mikel

Bakalářská práce

2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

RESUMÉ

Ve své bakalářské práci se zabývám procesem usazování. Cílem práce je zpracovat přehledný a srozumitelný učební text především pro studenty studující obor Chemické a procesní inženýrství.

V úvodní části práce je podrobně popsána jak metoda usazování, tak i jednotlivá usazovací zařízení. V další části je vysvětlen proces usazování v odstředivém poli-odstředování.

Práce je doplněna několika názornými, základními typy řešených příkladů, což umožní studentům lépe zvládnout probíranou tematiku.

.

SUMMARY

My bachelor`s thesis deals with the sedimentation process. The aim of my thesis is offer a comprehensive teaching text for students of Chemical and process engineering.

The introductory part describes the sedimentation method as well as the particular sedimentation devices. Next part explains the sedimentation process in centrifugal field-centrifugation.

Last part of my theses contains examples of basic problems that should provide the students with a deep insight into the given topic.

Rád bych chtěl velmi poděkovat vedoucí své bakalářské práce paní doc. Ing. Dagmar Janáčkové, CSc., za odborné vedení a spolupráci, která mi byla vydatnou pomocí při tvorbě mé práce.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo podle uvážení vedoucího bakalářské práce, ředitele ústavu a institutu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 02. 06. 2005

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD.....	6
1 TEORETICKÁ ČÁST	7
1.1 USAZOVÁNÍ	7
1.1.1 Usazování a dekantace	7
1.1.2 Kapalně heterogenní směsi	7
1.1.3 Rychlost usazování.....	10
1.1.4 Výkonnost usazováků	17
1.1.5 Konstrukce usazováků	20
1.2 ODSŘEĐOVÁNÍ	28
2 VÝPOČTOVÁ ČÁST.....	41
2.1 ŘEŠENÉ ÚLOHY	41
2.2 NEŘEŠENÉ ÚLOHY	47
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	51
SEZNAM TABULEK.....	53
SEZNAM OBRÁZKŮ	54

ÚVOD

Usazování je v oblasti průmyslu důležitý proces a je součástí mnoha technologických procesů. Z vlastní zkušenosti jsem se o významu a četnosti využití tohoto procesu ve výrobě přesvědčil na školní exkurzi. Dále jsem se s tímto tématem setkával v předmětech organická, anorganická, fyzikální chemie, procesní inženýrství I, II a v laboratorních cvičeních těchto předmětů. V průmyslové výrobě je třeba zpracovávat množství suspenzí pomocí usazovacích zařízení, protože se jedná o levnou separační metodu.

Cílem této bakalářské práce vytvořit podrobný, jednoduchý a názorný učební text, který by měl sloužit širokému okruhu studentů a především studentům oboru „Chemické a procesní inženýrství“.

V první části své práce se věnuji podrobnému výkladu samotného procesu usazování, ve kterém se snažím srozumitelně popsat například rychlost usazování a také výkonnost samotných usazováků. Důležitou částí je také seznámení s možnostmi usazováků a jejich průmyslovém využití. Nejsou opomenuty matematické vyjádření rychlosti usazování a rozměrů jednotlivých usazováků.

Druhá část práce je zaměřena na proces odstředování. Stejným postupem jako v první části se snažím přiblížit jednotlivé problematiky odstředování jako například odstředování dvou nemísitelných kapalin nebo kontinuální odstředování emulzí.

Ve výpočtové části jsem vybral názorné, základní případy řešených příkladů, pomocí nichž studenti pochopí řešenou problematiku. Dále jsou uvedeny neřešené příklady, které by měly sloužit pro procvičení a kontrolu znalostí studentů.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Usazování

1.1.1 Usazování a dekantace

U nestejnorodých kapalinných systémů s více méně hrubými částicemi dispergované fáze dochází k samovolnému oddělování působením tíže. Je-li hustota dispergované fáze větší než hustota dispersního prostředí, usazují se suspendované částice na dně nádoby a naopak, je-li hustota prostředí větší, stoupají rozptýlené částice k povrchu. Shlukování suspendovaných tuhých částic působením tíže se nazývá *usazováním* /sedimentací/. Rychlost usazování závisí na hustotě částic a také na jejich velikosti, při čemž usazování probíhá tím pomaleji, čím menší jsou částice suspendované fáze a čím menší je rozdíl hustot obou fází. V praxi se používá usazování dekantace hlavně k oddělování hrubých suspenzí.

1.1.2 Kapalné heterogenní směsi

Rozeznávají se tři druhy kapalných heterogenních směsí:

- směsi, mající kapalně disperzní prostředí, v němž jsou rozptýleny tuhé částice, se nazývají suspenzemi
- směsi, mající kapalně disperzní prostředí, v němž jsou rozptýleny částice jedné nebo více jiných kapalin, těmito směsím se říká emulze
- směsi, mající kapalně disperzní prostředí, v němž jsou rozptýleny bubliny plynu, zvané pěny

Suspenze: v technické praxi se z vyjmenovaných druhů směsí nejčastěji setkáváme se suspenzemi.

Suspenze se můžou rozlišovat podle množství rozptýlené tuhé fáze a podle stupně disperze, tj. podle koncentrace a velikosti suspendovaných tuhých částic.

Zvýšení obsahu tuhé fáze způsobuje zvýšení viskozity, až se při určité koncentraci viskozita může stát tak velikou, že suspenze ztrácí vlastnost tekutosti a prakticky přestává být kapalinou.

Nevyskytují-li se na rozhraní tuhých částic a kapalného disperzního prostředí povrchové jevy, jako adsorpce apod., je možno viskozitu suspenze vyjádřit vztahem (1).

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi). \quad (1)$$

který lze použít při koncentracích tuhé fáze, při kterých je suspenze ještě tekutá.

Když koncentrace tuhé fáze překročí tuto mez, sbližují se tuhé částice do té míry, že nastává možnost jejich dotyku. To pak způsobuje, že kromě vnitřního tření kapaliny, která vyplňuje prostor mezi částicemi, dochází i k tření částic o sebe a hydraulický tok pak přechází v plastický, pro který vzorec (1) již neplatí.

Mezi hydraulickým a plastickým tokem existuje určitá hranice, která charakterizuje přechod jednoho toku v druhý. Při hydraulickém proudění množství kapaliny, vytékající z trouby jakýmkoliv tlakem, je přímo úměrné tomuto tlaku, souhlasně s rovnicí

$$V_{sek} = \left(\frac{\pi \cdot R^4 \cdot (p_1 - p_2)}{8 \cdot \mu \cdot l} \right), \quad (2)$$

bez ohledu na viskozitu kapaliny, kromě toho, je-li kapalina homogenní, ustálí se hladiny ve spojitých nádobách ve stejné výši. Teoreticky stačí pro uskutečnění hydraulického toku jen nepatrný přetlak.

Při plastickém toku působí kromě odporů tření i mezimolekulární koheze částic, proto, není-li vnější síla dosti velká, způsobí pouze pružnou deformaci a k přemísťování nedojde. Sílu nebo tlak, při jehož působení daný materiál začíná téci, nazýváme kritickým.

Plastický tok je možný dokud je prostor mezi jednotlivými částicemi vyplněn kapalinou nebo plynem, což snižuje odpor vzájemného tření částic.

Podle velikosti částic dispergované fáze se rozlišují:

Hrubé suspenze, v nichž jsou rozptýlené částice větší než $100 \mu m$.

Jemné suspenze se suspendovanými částicemi velikosti od $100 \mu m$ do přibližně $0,5 \mu m$.

Na vzhled vypadají tyto suspenze velmi stejnorodé, avšak již obyčejným mikroskopem se můžeme přesvědčit, že tomu tak není. V jemných suspenzích již dochází k tzv. Brownovu pohybu, tj. velmi malé částice tuhé fáze se pohybují různými směry působením nárazů molekul kapaliny.

Rmuty, u kterých stupeň disperze je velmi vysoký a suspendované částice dosahují rozměru $100 \mu m$. Velikost částic je ještě v mezích viditelnosti, můžeme je vidět ultramikroskopem. V rmutech suspendované částice se pohybují velmi intenzivně /Brownův pohyb/ a neusazují se působením tíže.

Koloidní roztoky, u kterých velikost suspendovaných částic klesá v mezích od $100 \mu m$ až do velikosti molekuly.

V praxi se při provádění technologických procesů setkáváme se všemi druhy suspenzí, ve většině případů však jsou suspendované částice velmi různých velikostí.

Emulze jsou nestejnorodé systémy, skládající se ze dvou kapalných fází, se vyznačují některými zvláštnostmi. Emulze jsou málo stálé a při určitých velikostech suspendovaných částic se poměrně rychle rozvrstvují. Kritická velikost suspendovaných částic, pod kterou je emulze stálá a nedochází k rozvrstvení, je asi $0,4-0,5 \mu m$.

Zvýšení stálosti emulzí se dosáhne, přidají-li se do směsi tzv. emulgátory. Jsou to většinou alkalické soli mastných kyselin /mýdla/.

Emulgátory vytvářejí kolem jednotlivých kapiček rozptýlené fáze jakýsi ochranný obal, který zabraňuje jejich vzájemnému splývání, čímž se emulze stává stálou. Použitím emulgátorů můžeme získat emulze o velmi vysoké koncentraci dispergované fáze.

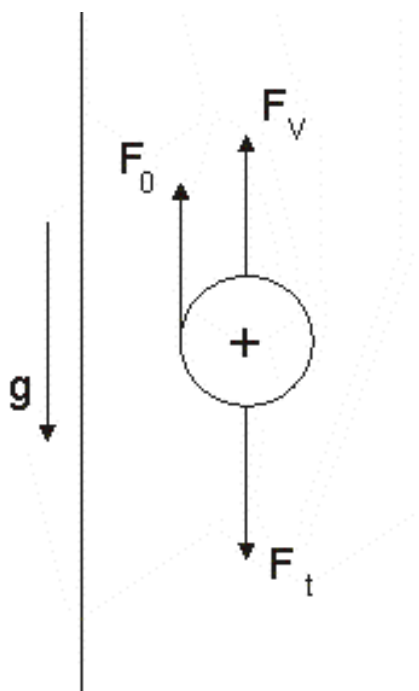
Stálost emulzí závisí ve značné míře na koncentraci, emulze s ochranným obalem emulgátoru zvyšováním koncentrace postupně houstnou a vytvářejí hustou vrstvu o vysokém obsahu dispergované fáze, která se umístí podle specifické váhy rozptýlených částic buď na povrchu, nebo na dně nádoby.

Podstatným rozdílem mezi emulzí a suspenzí je možnost záměny fází u emulzí. Tato zvláštnost emulzí spočívá v tom, že zvyšováním koncentrace rozptýlené fáze vzniká možnost přímého dotyku jednotlivých kapek, které pak splývají a vytvoří souvislý systém, ve kterém jsou rozptýlenými částicemi částice původního disperzního prostředí. Zvyšování koncentrace emulzí vede takto k záměně fází: disperzní prostředí přechází v dispergovanou fázi a ta naopak v disperzní prostředí.

Vnitřní tření neboli viskozita emulzí závisí, stejně jako u suspenzí, na koncentraci, při čemž viskozita je největší za koncentrace, při které dochází k záměně fází.

1.1.3 Rychlost usazování

Předpokládá se, že usazovaná částice je neporézní kulička, u které při pádu v tekutině nedochází k deformaci, je dostatečně vzdálena od stěn nádoby i od ostatních částic. Částice se tedy chová tak, jako kdyby byla v tekutině sama, /tj. nerušené usazování/. Stačí se tedy zabývat pouze chováním jedné částice.



Obr. 1. Gravitační usazování

Z toho vyplývá, že vztlaková F_v síla je dána rovnicí :

$$F_v = -\frac{\pi d^3}{6} \rho_2 \cdot g, \quad (3)$$

gravitační síla F_t :

$$F_t = -\frac{\pi d^3}{6} \rho_1 \cdot g, \quad (4)$$

odporová síla F_0 :

$$F_0 = \zeta S \rho_2 \frac{v^2}{2}, \quad (5)$$

kde ζ je součinitel odporu, S plocha průmětu částice, v^2 usazovací rychlost.

Výslednice všech sil na částici působících jí udělí určité zrychlení:

$$-\frac{\pi d^3}{6} \rho_1 g + \frac{\pi d^3}{6} \rho_2 g + \zeta \frac{\pi d^2}{4} \rho_2 \frac{v^2}{2} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_1 \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

Po úpravě přejde rovnice (6) na tvar:

$$-\frac{\pi d^3}{6} g (\rho_1 - \rho_2) + \zeta \frac{\pi d^2}{4} \rho_2 \frac{v^2}{2} = \frac{\pi d^3}{6} \rho_1 \frac{dv}{dt} \quad (7)$$

Se zvětšující se rychlostí částice vzroste po určité, obvykle velmi krátké době odpor proti pohybu natolik, že výslednice sil na částici působících bude nulová. I zrychlení částice bude nulové.

Částice se začne pohybovat rovnoměrně určitou rychlostí v_u , což je rychlost usazování.

$$-\frac{\pi d^3}{6} g (\rho_1 - \rho_2) + \zeta \frac{\pi d^2}{4} \rho_2 \frac{v_u^2}{2} = 0 \quad (8)$$

Vyjádřením usazovací rychlosti v_u se dostane rovnice

$$v_u = \sqrt{\frac{4d \cdot g(\rho_1 - \rho_2)}{3\zeta \cdot \rho_2}} \quad (9)$$

Součinitel odporu ζ se stanovuje empiricky a závisí na tvaru, rozměru a hustotě částic a na hustotě a viskozitě tekutiny, případně je ovlivněn i blízkostí částice u stěn nádoby.

Při velmi malých rychlostech pádu částice v kapalině ji proudové čáry obtékají bez vírů, / tj. laminárním pádem/. Pak lze sílu odporu F_o vyjádřit Stokesovým zákonem:

$$\zeta \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \rho_2 \frac{v_u^2}{2} = 3\pi d\mu v_o \quad (10)$$

Úpravou se dostane

$$\zeta = \frac{24 \cdot \mu}{v_u \cdot d \cdot \rho_2} = \frac{24}{Re} \quad (11)$$

Pro $0,2 < Re < 500$ (přechodná oblast) aproximuje Kasatkin [4] součinitel odporu vztahem

$$\zeta = \frac{18,5}{Re^{0,6}} \quad (12)$$

V turbulentní oblasti pro $500 < Re < 1,5 \cdot 10^5$ je nezávislé na Re (úsečka rovnoběžná s osou úseček) a je podle Newtona $\zeta = 0,44$ [5]

Jestliže se kulička pohybuje v laminární oblasti dostaneme Stokesův vzorec pro rychlost usazování při laminárním pohybu

$$v_u = \frac{d^2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2)}{18 \cdot \mu} \quad (13)$$

Jestliže neznáme rychlost usazování, nemůžeme spočítat ani Re , pak je výhodné vztah

$$v_u = \sqrt{\frac{4 \cdot d \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2)}{3 \cdot \zeta \cdot \rho_2}} \quad (14)$$

vynásobit zlomkem

$$\frac{d^2 \cdot \rho_2^2}{\mu^2} \quad (15)$$

Tím se dostane rovnice

$$\zeta \cdot \frac{v_u^2 \cdot d^2 \cdot \rho_2^2}{\mu^2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3 \cdot g \cdot \rho_2^2}{\mu^2} \cdot \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_2} \quad (16)$$

Archimédovo kritérium potom je

$$Ar = \frac{d^3 g}{\mu^2} \rho_2 (\rho_1 - \rho_2) \quad (17)$$

Pro laminární oblast pak platí

$$24 \cdot Re = \frac{4}{3} \cdot Ar \quad (18)$$

$$Ar = 18 Re \quad (19)$$

$$Ar = 18 \cdot 0,2 = 3,6. \quad (20)$$

Je-li známa rychlost usazování a hledáme-li průměr částice, lze vyjádřit jiné bezrozměrné kritérium tzv , volného pádu částice - Ljaščenkovo kritérium Ly .

$$\zeta \cdot Re^2 = \frac{4}{3} \cdot Ar \quad (21)$$

Rovnice (21) se vydělí hodnotou Re^3

$$\frac{\zeta}{Re} = \frac{4 \cdot Ar}{3 \cdot Re^3} = \frac{4}{3 \cdot Ly} \quad (22)$$

Ljaščenkovo kritérium potom je

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{v_o^3 \cdot \rho_2^2}{\mu g(\rho_1 - \rho_2)} \quad (23)$$

Pro laminární oblast platí

$$\frac{24}{Re^2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{Ly} \quad (24)$$

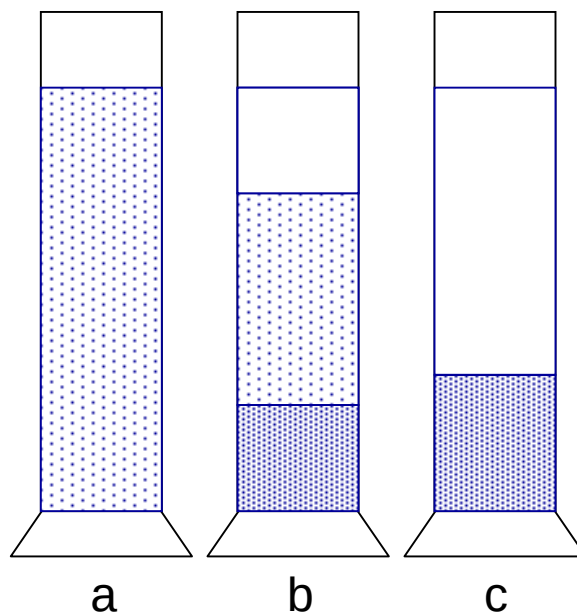
$$Ly = \frac{0,2^2}{18} = 2,22 \cdot 10^{-3} \quad (25)$$

Výše uvedené vzorce dávají výsledky blízké skutečnosti pouze v případech, kdy jednotlivé částice se usazují nezávisle na sobě, tj. při volném pádu, to je však možné jen v zředěných suspenzích.[5]

Při volném usazování suspenzí s částicemi různých velikostí probíhá usazování postupně: nejdříve klesají ke dnu větší částice a menší vytvoří rmut, který se usazuje pomaleji. V koncentrovaných suspenzích dochází k vzájemnému povrchovému působení částic, spojují se a tvoří shluky, takže menší částice jsou strhovány většími.

V koncentrovaných suspenzích nastává tedy usazování rušené, při němž se různě velké částice usazují společně. Při tomto způsobu usazování se postupně zvětšuje vrstva čiré kapaliny.

Při usazování se tvoří dva druhy usazenin. Hrubé suspenze tvoří usazeniny, v kterých se hrubozrnné částice ukládají na dno v hutných vrstvách. Mezi vrstvou usazeniny a čirou kapalinou je ostré rozhraní.[4]



Obr. 2. Usazování suspenze

Jemné suspenze tvoří usazeniny jiného druhu, při usazování těchto suspenzí se v dolní části usazováku pouze zvyšuje koncentrace a v zahuštěné vrstvě jsou suspendované tuhé částice odděleny od sebe kapalinou. Mezi usazeninou a čistou kapalinou není ostrého rozhraní, nýbrž postupný přechod od koncentrovanějších vrstev k méně koncentrovaným.

V složitých směsích čili v tzv. polydisperzních suspenzích, /tj. v suspenzích s částicemi různé velikosti/, tvoří se obojí druh usazeniny, na dně se usadí hutná vrstva větších částic a nad ní je kal.

Při volném usazování suspenze s různě velkými částicemi vznikne několik vrstev postupně menších částic. Odtahováním horních vrstev můžeme usazeninu jako by frakcionovat, /tj. oddělit velké částice od malých/. Na této vlastnosti polydisperzních suspenzí je založeno plavení, kterého se používá k třídění směsí tuhých látek různé specifické hmotnosti a různé velikosti zrn. Pro zvýšení stálosti jemných suspenzí přidávají se k nim někdy elektrolyty. Takovým způsobem se oddělují od hlíny zrna písku, vápence, pyritu, živce a slídy, jako elektrolytu se používá sody nebo hydroxidu sodného.

Koncentrace usazeniny je zcela závislá na jejich struktuře a na velikosti částic. Hutné krystalické usazeniny, které se usazují na dně nádoby v spojitě vrstvě, dosahují někdy a 60 % koncentrace, obvykle však koncentrace nepřevyšuje 40 %. U jemných suspenzí a kalů se netvoří skutečná usazenina, nýbrž, jak již bylo řečeno, dojde jen k zahuštění suspenze, tedy k určitému zvýšení koncentrace.

Přípustná koncentrace tuhých částic v usazenině je taková, aby ji bylo ještě možno dopravovat potrubím.

V některých případech se hledí při usazování roztřídit tuhou fází na zrna o stejné rychlosti pádu. Takové oddělování se provádí v tekoucím proudu vody, a proto se nazývá *mokrým /hydraulickým/ tříděním*. [4]

Slavní vědci, kteří významně přispěli k rozvoji hydrodynamiky

George Gabriel Stokes

Narodil se v roce 1819 ve Skreenu (hrabství Sligo, Irsko). Jeho otec Gabriel Stokes byl pastorem. Byl nejmladší ze šesti dětí a jeho 3 starší bratři se stali duchovními. George Stokes byl jedním z nejvýznamnějších irských vědců. Je považován za jednoho ze zakladatelů hydrodynamiky.

V roce 1832 opustil Stokes Skreen a začal chodit do školy v Dublinu. V roce 1835 (bylo mu 16 let) odjel Stokes do Anglie a začal studovat Bristol College. Následně studoval v Cambridge. V roce 1851 se Stokes stal členem Královské společnosti. Ve stejném roce publikoval George Gabriel Stokes svůj zákon viskozity.

Jeho přínos hydrodynamice byl oceněn tím, že po něm byla pojmenovaná jednotka kinematické viskozity. Je po něm pojmenovaná tzv. *Navier - Stokesova rovnice*.

George Gabriel Stokes zemřel 1. února 1903 v Cambridge [15]

Osborne Reynolds

Britský vědec a inženýr se narodil 23. srpna 1842 v irském Belfastu. Jeho otec byl ředitelem kolejní školy v Belfastu a pastor anglikánské církve. Osborne Reynolds začal navštěvovat školu v Dedhamu, kde byl jeho otec ředitelem této essexské školy. Ve vzdělání pokračoval za pomoci soukromých učitelů. Po ukončení středního vzdělání nepokračoval přímo na univerzitu. Nejprve se vyučil u strojírenské firmy Edward Hayes. Po ukončení praxe začal studovat matematiku na univerzitě v Cambridge. Během studia navštěvoval stejné přednášky jako Rayleigh, který byl o ročník výše. Univerzitu ukončil v roce 1867 jako sedmý nejlepší v ročníku.

Stejně jako otec získal Osborne Reynolds stipendium na Queens' College. Opět získal místo u strojírenské firmy (John Lawson of London), kde působil rok jako inženýrský praktikant.

V roce 1868 se Reynolds stal prvním profesorem strojírenství na univerzitě v Manchesteru (Owens College). Toto místo zastával do roku 1905.

Reynolds začal nejprve bádát v oboru elektromagnetismu. Brzy se zaměřil na hydrauliku a hydrodynamiku. Od roku 1873 zkoumal Reynolds dynamiku tekutin, díky které se stal světově uznávaným odborníkem. Reynolds zkoumal změny proudění uvnitř potrubí při přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním.

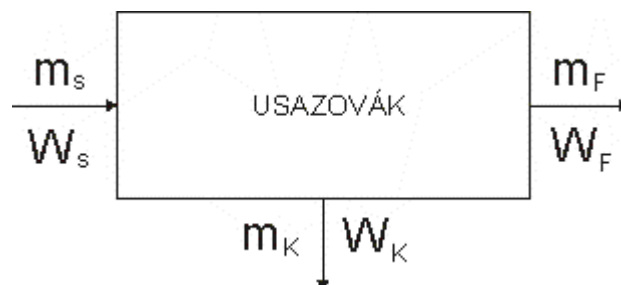
V roce 1883 publikoval dílo *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels*, ve kterém zavedl pojem později známý jako **Reynoldsovo číslo**.

I když se Reynolds velmi zajímal o vzdělávání studentů, nebyl příliš významný přednášející. Jeho přednášky byly jen obtížně pochopitelné. Často měnil témata, která na sebe příliš nevázala. V roce 1877 se Osborne Reynolds stal členem Královské společnosti. V roce 1884 získal čestný doktorát na University of Glasgow.

V roce 1888 získal Královskou medaili.

Na počátku 20. století se Reynoldsův zdravotní stav (fyzický i psychický) zhoršil. V roce 1905 byl Reynolds penzionován. Osborne Reynolds zemřel 21. února 1912 ve Watchet (Anglie). [14]

1.1.4 Výkonnost usazováků



Obr. 3. Bilanční schéma usazováku [3]

S suspenze

F vyčištěná tekutina

K kal.

Hmotnostní bilance:

$$\dot{m}_S = \dot{m}_F + \dot{m}_K \quad (26)$$

Bilance pevné fáze:

$$\dot{m}_S \cdot w_S = \dot{m}_F \cdot w_F + \dot{m}_K \cdot w_K \quad (27)$$

$$\Downarrow$$

$$\dot{m}_F = \frac{w_K - w_S}{w_K - w_F} \cdot \dot{m}_S \quad (28)$$

Výkonnost gravitačního usazováku:

periodický usazovák:

$$V = A \cdot v_u \cdot \tau \quad (29)$$

kontinuální usazovák

$$\dot{V}_F = A \cdot v_u \quad (30)$$

kde V je objem usazováku, $\dot{V}_F$ je objemový tok tekutiny vystupující z usazováku, A průřez usazováku, v_u usazovací rychlost částic, τ je doba usazování.

Nedochází-li k ztrátám kapaliny, platí rovnice:

$$V_0 = V_1 + V_2 \quad (31)$$

Je-li výška vrstvy čiré kapaliny h , může se vyjádřit hodinová výkonnost usazováku v m^3 vyřešené kapaliny rovnicí

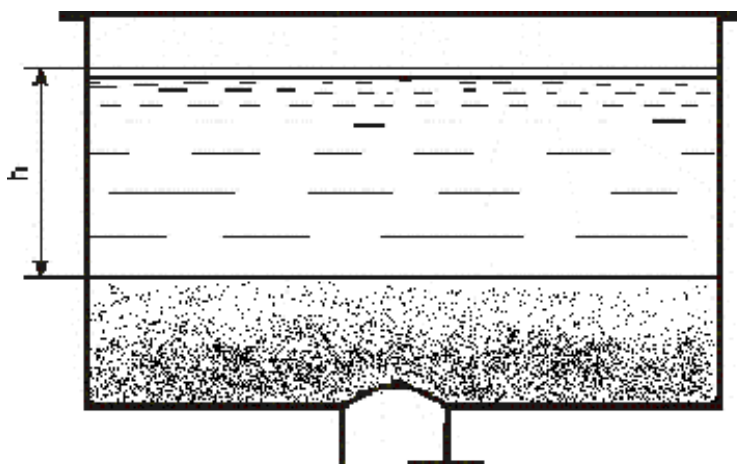
$$V_1 = \frac{S_0 h}{\tau} \quad (32)$$

při čemž doba usazování τ závisí při dané výšce vrstvy kapaliny na rychlosti usazování ω_0 :

$$\tau = \frac{h}{3600 v_u} \quad (33)$$

Dosazením za τ do předešlé rovnice se dostane

$$V_1 = \frac{S_0 h}{3600 v_u} = 3600 v_u F_0 \quad (34)$$



Obr. 4. K výpočtu výkonnosti usazováku [4]

Z rovnice (34) je vidět, že výkonnost usazováku nezávisí na jeho výšce a že závisí pouze na rychlosti usazování a na volném průřezu usazováku. Proto u dnešních konstrukcí usazováků vidíme, že mají velkou usazovací plochu a jen malou výšku.

Usazovací plochu, potřebnou pro získání V_1 m³/hod. vyčištěné kapaliny při daných koncentracích x_0 a x_2 , nalezneme z rovnice (34). Dosazením do rovnice $V_1 = V_0 - V_2$ a řešením pro S_0 se dostane

$$S_0 = \frac{V_0 - V_2}{3600 v_u}. \quad (35)$$

Nedochází-li k ztrátám, pak veškeré množství suché látky původně obsažené v suspenzi přejde do usazeniny, což lze vyjádřit rovností

$$V_0 \rho_1 x_0 = V_2 \rho_1 x_2, \quad (36)$$

z toho pak plyne

$$V_2 = V_0 \frac{x_0}{x_2} \quad (37)$$

Dosazením za V_2 do rovnice pro usazovací plochu platí

$$S_0 = \frac{V_0 - V_0 \frac{x_0}{x_2}}{3600v_u} \quad (38)$$

nebo

$$S_0 = V_0 \frac{x_2 - x_0}{3600v_u} \quad (39)$$

Vztahu (39) lze použít při nepřetržitém přívodu suspenze a odvodu čiré kapaliny, nezáleží na tom, odstraňuje-li se usazenina nepřetržitě nebo periodicky.

Rovnice pro usazovákky byly po prvé odvozeny B.A.Burdakovem roku 1931

1.1.5 Konstrukce usazováků

Usazování se provádí v zařízeních s periodickým, s nepřetržitým nebo i s kombinovaným provozem.

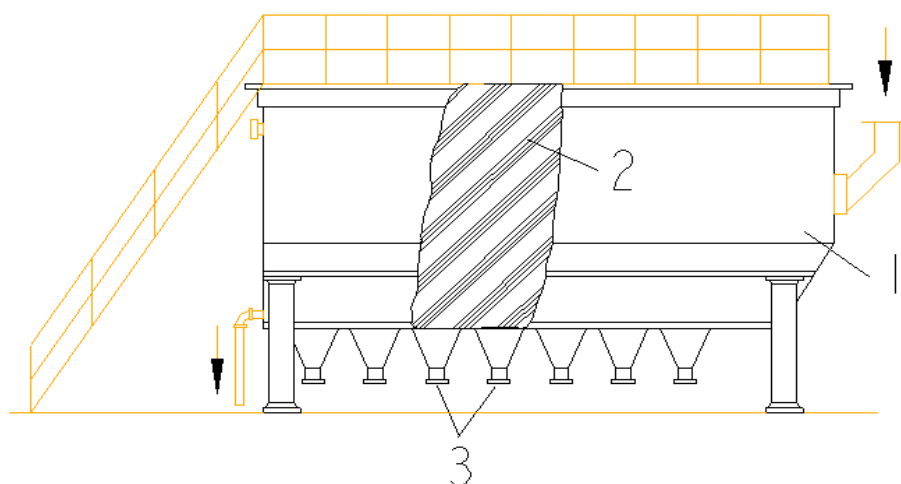
V zařízení s periodickým provozem se suspenze napustí do nádrže, ve které zůstává v klidu po dobu potřebnou k usazení částic na dno, pak se vrstva čiré kapaliny dekantuje, /tj. odtažuje násoskou nebo kohouty, umístěnými nad hladinou usazeniny/. Usazenina se vypouští spodním kohoutem nebo se usazovák vyprazdňuje ručně.

V usazovacích s nepřetržitým chodem je přívod suspenze i odpouštění čiré kapaliny a usazeniny nepřetržité.

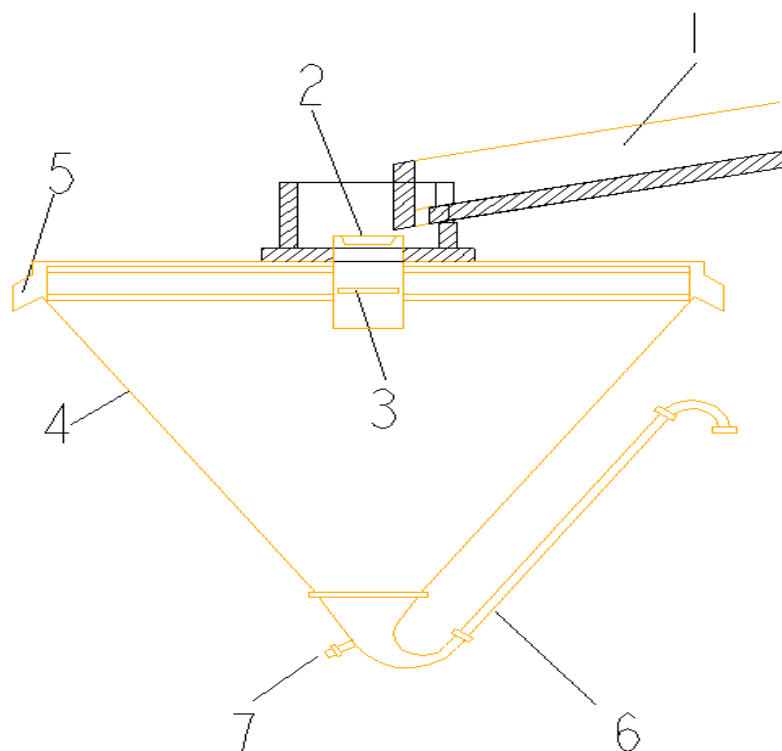
V aparátech s kombinovaným chodem protéká suspenze nepřetržitě nádrží malou rychlostí, rychlost toku má být taková, aby se částice usadily, než kapalina odteče z nádrže. Na dně se postupně hromadí usazenina, která se po dekantaci periodicky odstraňuje.

Rozměry a tvar zařízení pro periodické usazování závisí na koncentraci suspenze, na rychlosti usazování a na době trvání jednotlivých period procesu.

Čím větší jsou částice a čím větší je jejich hustota, tím menší mohou být rozměry zařízení.



Obr. 5. Usazovák pro čištění vody [4]: 1 těleso
2 šikmé přepážky
3 kuželovitá dna pro usazeninu



Obr. 6. Usazovací nálevka [4]: 1 žlab pro přívod suspenze
2 malá nálevka
3 plovoucí prstenec
4 kužel
5 žlábek pro odkalenou kapalinu
6 trubka pro odvádění kapaliny
7 hrdlo pro přívod promývací vody

Na rychlost usazování má podstatný vliv teplota, s níž se značně mění viskozita suspenze.

Rychlost usazování je přímo úměrná viskozitě suspenze, která se zmenšuje se stoupající teplotou, ohříváním suspenze tedy urychlujeme usazování. Ohřívací elementy musí být konstruovány a umístěny tak, aby nevznikaly vertikální proudy kapaliny, které by rušily usazování.

Nejvýhodnější je umístit ohřívací elementy, vertikálně po celé výšce usazováku, čímž se dosáhne rovnoměrné teploty, a tedy i stejné hustoty kapaliny po celé výšce aparátu.

Pro nevelká množství suspenze se používá usazováku tvaru stojatých válců s konickým dnem, jsou opatřeny několika kohouty v různých výškách pro odtahování kapaliny a ve dně kohoutem nebo výpustí pro usazeninu.

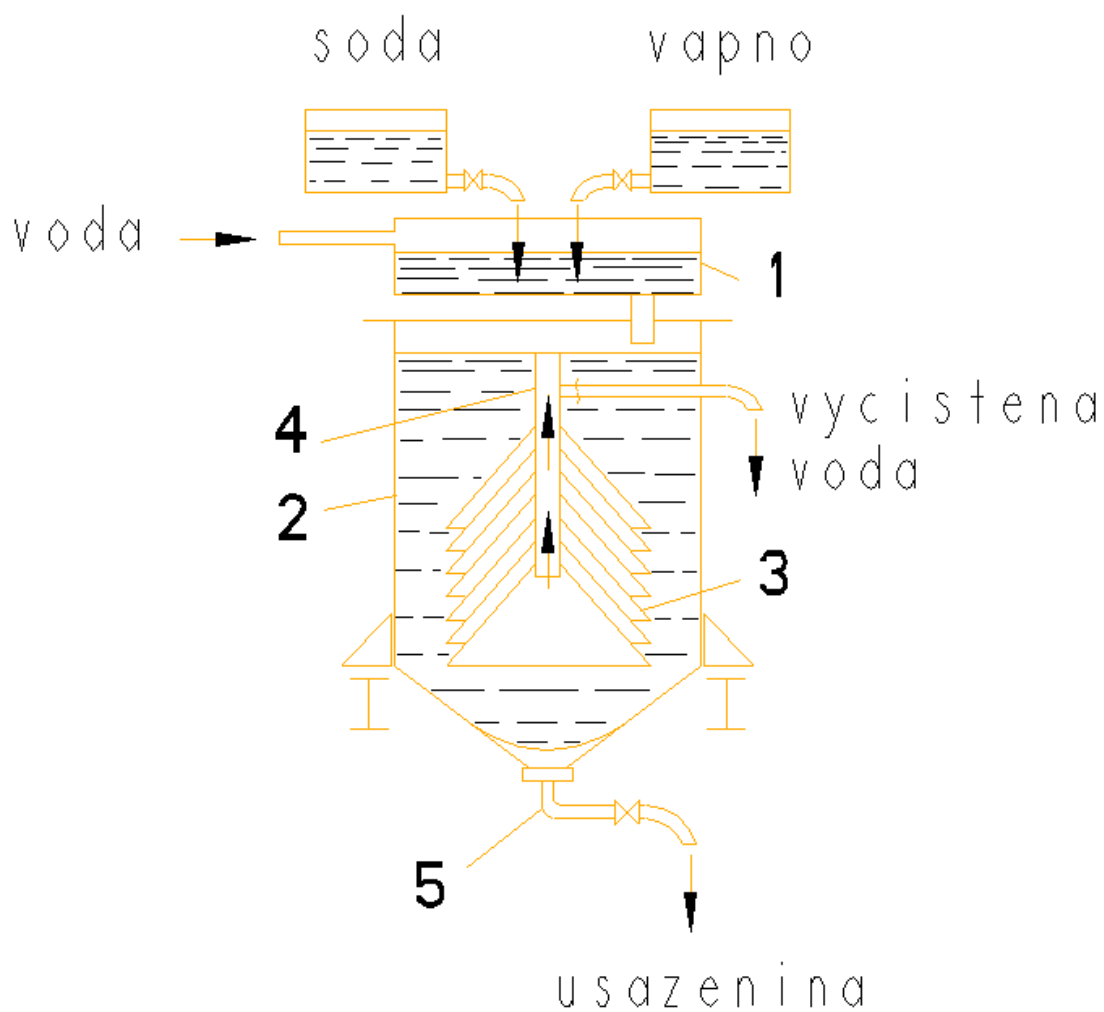
Pro zpracování velikých množství kapaliny, na příklad pro čištění odpadních nebo užitkových vod apod., se používá velkých betonových bazénů nebo několika za sebou spojených reservoárů, které pracují kombinovaným způsobem: /kapalina přitéká nepřetržitě a usazenina se odstraňuje periodicky/.

Kompaktnějším zařízením je usazovák (obr. 5.) pro kotelní vody. Skládá se z hranaté ocelové nádrže 1, přepažené šikmými přepážkami 2, které usměrňují tok střídavě nahoru a dolů. Usazenina se hromadí v kuželovitých dnech 3, odtud se periodicky vypouští kohouty.

Pro suspenze s velkou koncentrací tuhých částic nebo v případech, kdy se usazenina dále zpracovává, je třeba i usazeninu vypouštět nepřetržitě.

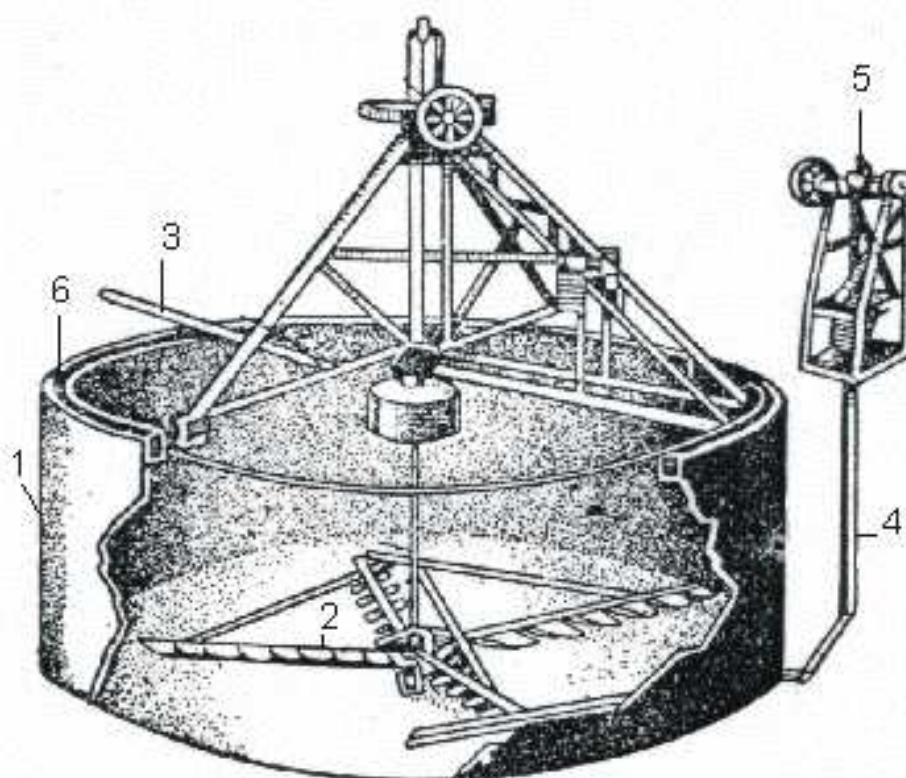
Pro suspenze s velkou koncentrací tuhých částic nebo v případech, kdy se usazenina dále zpracovává, je třeba i usazeninu vypouštět nepřetržitě.

Jednodušším typem nepřetržitě pracujícího usazováku je tzv. usazovací nálevka (obr. 6), velmi používaná pro mokré třídění rud. Je to kuželovitá nádrž s úhlem sklonu stěn 60° . Suspenze přitéká žlabem 1 do malé nálevky 2, z níž pak vtéká klidně /pomocí plovoucího prstence 3/ do usazovací nálevky 4. suspendované částice se usazují ke dnu a odkalená kapalina odtéká přepadem 5.



Obr. 7. Několikapatrový nepřetržitě pracující usazovák pro vodu [4]:

- 1 nádrž
- 2 těleso usazováku
- 3 kuželové přepážky
- 4 trouba pro odvod čisté vody
- 5 hrdlo pro odvod usazeniny



Obr. 8. Nepřetržitě pracující usazovák (zahušťovač) s hřebly[4]:

- 1 nádrž
- 2 hřeblo
- 3 žlab pro přívod suspenze
- 4 potrubí pro odvod usazeniny
- 5 membránové čerpadlo
- 6 žlab pro odkalenou kapalinu

Usazenina se hromadí v dolní části kužele a odvádí se troubou 6. k nátrubku 7 je připojeno tlakové potrubí pro promývání nálevky při možném ucpání usazeninou.

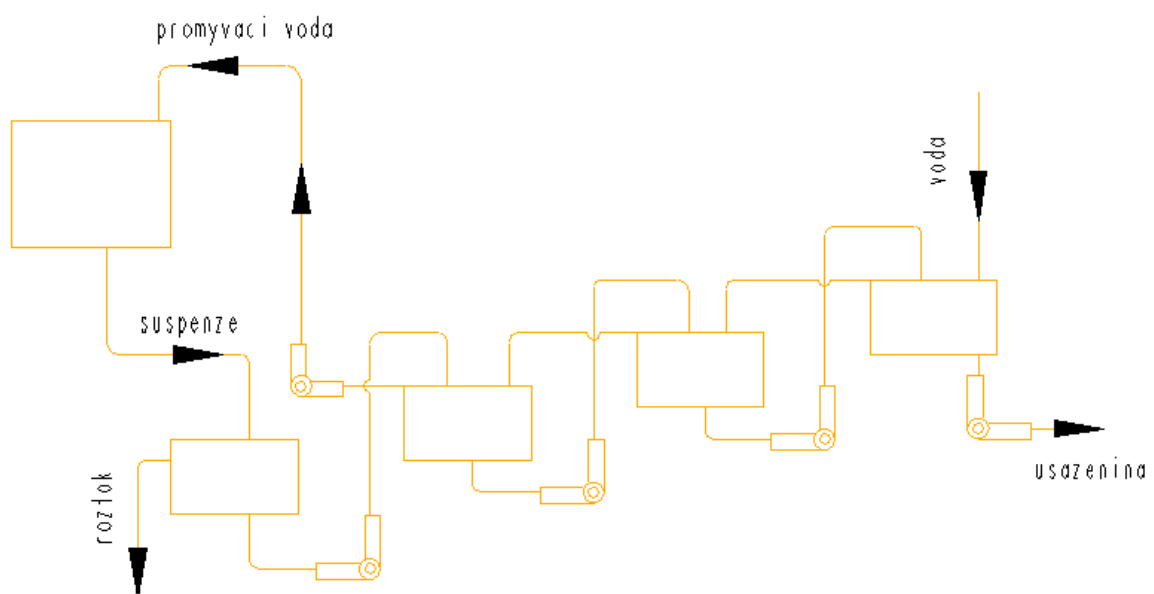
Nejčastěji se nálevek užívá v bateriích několika členů spojených za sebou. Na (obr. 7) je schéma několikapatrového nepřetržitě pracujícího usazováku pro čištění vody. V nádrži 1 se přidává do vody soda a vápno a tato směs pak postupuje do vlastního usazováku 2, v kterém jsou kuželovité přepážky 3, umístěné nad sebou. Každá přepážka pracuje jako

samostatný usazovák. Očištěná voda postupuje nahoru troubou 4, umístěnou uprostřed. Usazenina, která se usazuje na přepážkách, sesouvá se po nich dolů a odstraňuje se pak hrdlem 5. Úhel sklonu přepážek musí být větší než úhel statického tření usazeniny. Usazenina, hromadící se na dně nádrže, odvádí se periodicky spolu s malým množstvím vody.

Nejvíce užívaným usazovacím zařízením na nepřetržitý chod je zahušťovač s hřebly (obr 8). Je to válcovitá nádrž 1 s plochým nebo mírně kuželovitým dnem. Visutý svislý hřídel je opatřen nakloněnými radiálními rameny, ke kterým jsou připevněna krátká ocelová hřebla 2. hřebla shrnují usazený kal do středu, kde je ve dně vypouštěcí otvor.

Za minutu vykonají hřebla 0,5 až 0,025 otáčky, otáčejí se tedy tak pomalu, že neruší usazování. Suspenze se přivádí nepřetržitě žlabem 3, usazený kal se odvádí potrubím 4 a odčerpává membránovou pumpou 5.

Hřídel je poháněn šnekovým a řemenovým převodem od transmise, převod je opatřen signalizačním zařízením, které ukazuje přetížení aparátu. Protože po zastavení usazený kal rychle sléhá, je zahušťovač vybaven zvláštním zařízením pro zvednutí hřebel. Celý obvod horního okraje nádrže je opatřen žlabem 6, do kterého přetéká odkalená voda. Stupeň zahuštění usazeného kalu závisí na původní koncentraci suspenze a někdy dosahuje až 50 %.



Obr. 9. Schéma nepřetržité dekantace s protiproudovým promýváním[4]

Zahušťovače tohoto typu mají průměr do 100 m a výkonnost až 3000 t usazeniny za 24 hodin.

Při usazování suspenze v jednom usazováku dochází k značným ztrátám kapaliny odváděné v usazenině, což si vyžaduje další filtrace. Zamezit ztrátám a oddělit téměř veškerou kapalinu je možno promýváním.

Zahuštěný kal z prvního usazováku se převádí do druhého, kde se promývá a zředí čerstvou kapalinou.

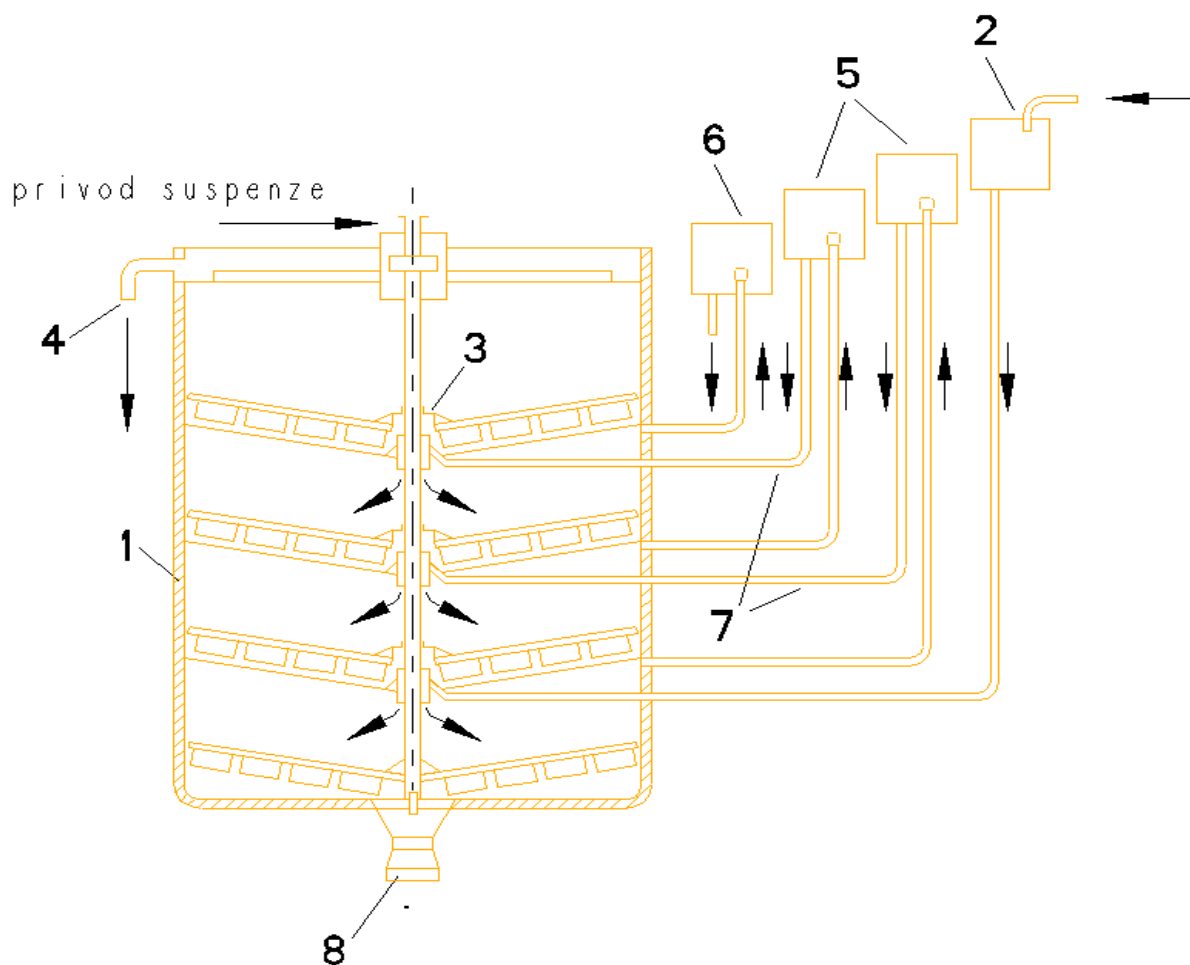
Usazenina vytvořená v druhém usazováku obsahuje totéž množství kapalného roztoku jako v prvním, avšak roztok je značně zředěný. Promyje-li se usazenina ještě v třetím usazováku, odstraní se z ní původní kapalina téměř úplně. Použitím baterie tří nebo čtyř usazováků je možno oddělit 97-98 % původní kapaliny.

Promývací kapalina se zužitkuje k přípravě čerstvé suspenze, a aby se předešlo spotřebě velkých množství promývací kapaliny, pracuje se protiproudě, usazený kal prochází postupně všemi usazovákami směrem od prvního k poslednímu, kdežto čerstvá promývací kapalina se uvádí do posledního usazováku, z něho pak do předposledního atd., až projde všemi nádržemi ve směru opačném.

Na (obr. 9) je vyobrazeno schéma zařízení pro nepřetržitou dekantaci s protiproudým promýváním.

Metoda nepřetržitého usazování s opakovaným promýváním je výhodnější než promývání na filtru, protože není zapotřebí energie na protlačení veškeré kapaliny filtračním médiem.

Aby základová plocha zařízení byla menší, stavějí se usazovákы v několika patrech nad sebou.



Obr. 10. Několikapatrový usazovák s promýváním sedliny[4]

- 1 těleso
- 2 nádržka pro čerstvou promývací kapalinu
- 3 jímka
- 4 potrubí pro odkalenou kapalinu
- 5-6 nádržky pro promývací kapalinu
- 7 potrubí pro promývací kapalinu
- 8 hrdlo pro odvod usazeniny

Na (obr. 10) je vidět několikapatrový usazovák, zařízení na promývání kalu. Suspenze se přivádí nepřetržitě do horního patra. Čerstvá promývací kapalina přitéká z nádržky 2 do spodní části předposledního patra. Odkalená kapalina přetéká do žlabu na horním okraji usazováku, odkud se odvádí potrubím 4. Zahuštěný kal se hromadí v jímce 3. Do jímky se také přivádí promývací kapalina z nižšího patra příslušnou nádržkou 5 a trubicí 7.

Promývací kapalina vyplachuje kal z jímky do nižšího patra, kde se znovu usazuje, promývá atd.

Téměř dokonale promytý kal se nakonec odvádí hrdlem 8, umístěným ve dně spodního patra. Promývací kapaliny z horního patra se používá k přípravě čerstvé suspenze nebo k jiným účelům. Obecným nedostatkem usazováků, i nepřetržitě pracujících, je jejich velká půdorysná plocha. Daleko kompaktnější, i když konstrukčně složitější, jsou filtry. [1]

1.2 Odstřed'ování

Při dělení heterogenních směsí je možné využít intenzity gravitačního pole. V řadě případů však intenzita gravitačního pole nestačí a k dělení heterogenních směsí je třeba použít intenzivnějšího silového pole. Pro dělení heterogenních kapalných směsí je velmi účinné odstřed'ování, které je založeno na intenzitě odstředivého silového pole. V tomto případě se dělení směsí provádí v odstředivce, což je ve své podstatě rotující válec, ve kterém se nachází odstřed'ovaná směs. Heterogenní směsi se mohou dělit v odstředivkách usazováním nebo filtrací. Při usazování jsou stěny válce plné, při filtraci má válec perforovaný plášť, který je potažen filtrační plachetkou. Při usazování se materiál shromáždí u stěn válce, přičemž přímo u stěny bude materiál s největší hustotou. Při filtraci pevné částice vytvoří na stěně válce filtrační koláč, kterým prochází kapalina do perforované stěny.

Vlivem tření se rotační pohyb nádoby přenáší na kapalinu, která se pohybuje pak s rotující nádobou jako jeden celek. Vzhledem ke stěně otáčejícího se válce je tedy kapalina v relativním klidu, a proto se na odstřed'ování mohou aplikovat zákonitosti odvozené při chování kapaliny v klidu, /tj. vztahy odvozené v hydrostatice/.

$$-\nabla p + \rho \cdot \vec{f} = 0 \quad (40)$$

Kde p je napětí normálových sil, ρ hustota, $\vec{f}$ intenzita objemových sil.

Orientujeme-li rotující válec s kapalinou tak, že jeho osa je totožná s osou (z) souřadnicového systému, pak vektor intenzity objemových sil se dá rozložit do směru poloměru válce r jako složka intenzity odstředivých sil a do směru osy válce (z), kde je složka intenzity sil gravitačních.

Pro intenzitu objemových sil gravitačního pole platí:

$$f_z = -g \quad (41)$$

A pro intenzitu objemových sil odstředivého pole platí:

$$f_r = \omega^2 \cdot r \quad (42)$$

Kde ω je úhlová rychlost, pro kterou platí

$$\frac{d\varphi}{dt} = \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (43)$$

n je frekvence otáček, /tj. počet otáček za jednotku času/.

Je třeba vyjádřit rozložení tlaku v rotující. V hydrostatice se násobí rovnice (40) skalárně elementem dráhy $d\vec{l}$, pro který v cylindrických souřadnicích platí:

$$d\vec{l} = \vec{i} dr + \vec{j} r d\varphi + \vec{k} dz \quad (44)$$

Uvažovaný skalární součin gradientu napětí normálových sil a intenzity objemových sil s vektorem dráhy $d\vec{l}$ je pak dán následujícími vztahy:

$$\nabla p \cdot d\vec{l} = \left[\left(\cos \varphi \cdot \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\sin \varphi}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) \cdot \vec{i} + \left(\sin \varphi \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\cos \varphi}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \varphi} \right) \cdot \vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \cdot \vec{k} \right] \cdot [\vec{i} dr + \vec{j} r d\varphi + \vec{k} dz] = dp$$

$$\vec{f} \cdot d\vec{l} = (\omega^2 \cdot r \cdot \vec{i} - \vec{k} \cdot g) \cdot (\vec{i} dr + \vec{j} r d\varphi + \vec{k} dz) = \omega^2 \cdot r dr - g dz \quad (45)$$

Takže výsledek násobení vektorové rovnice (40) skalárně vektorem $d\vec{l}$ je

$$\rho \cdot \omega^2 \cdot r dr - \rho \cdot g dz = dp . \quad (46)$$

Integrací se dostane

$$\frac{\omega^2 \cdot r^2}{2} - gz = \frac{p}{\rho} + k . \quad (47)$$

Integrační konstanta se určí z okrajových podmínek, kde se jednotlivé proměnné označí podle hladiny kapaliny v rotujícím válci.

$$r = 0, z = z_0 \Rightarrow p = p_0 \quad (48)$$

$$-g \cdot z_0 = \frac{p_0}{\rho} + K \quad (49)$$

$$K = -\frac{p_0}{\rho} - gz_0 \quad (50)$$

dosazením za integrační konstantu do rovnice (47) se úpravou dostane

$$\frac{p - p_0}{\rho} = \frac{\omega^2 \cdot r}{2} + g \cdot (z_0 - z) \quad (51)$$

Rovnice (51) udává závislost rozložení tlaku v rotující kapalině. Na povrchu kapaliny je všude stejný tlak $p = p_0$, takže z rovnice (51) lze odvodit rovnici pro povrch rotující kapaliny.

$$z = z_0 + \frac{\omega^2 \cdot r_0}{2 \cdot g} , \quad (52)$$

což je rovnice paraboloidu.

Hodnota konstanty z_0 závisí na frekvenci otáček a pro zvyšující se otáčky přechází do záporných hodnot. Při praktickém provozu většiny odstředivek je frekvence tak vysoká, že hladina kapaliny je prakticky rovnoběžná se stěnou válce. Za tohoto stavu můžeme zanedbat intenzitu gravitačních sil odstředivého pole a diferenciální rovnice odstředované kapaliny se zjednoduší:

$$\frac{dp}{\rho} = \omega^2 \cdot r dr \quad (53)$$

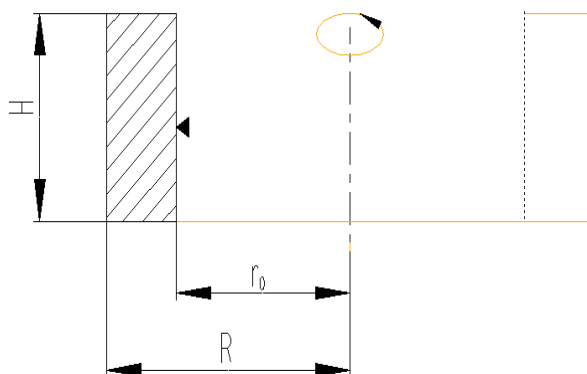
$$\frac{p}{\rho} = \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2} + K_1 \quad (54)$$

Pro případ velké frekvence je r_0 konstantní a proto platí:

$$r = r_0, p = p_0, \quad (55)$$

z čehož určíme integrační konstantu K_1 , takže rovnice pro rozložení tlaků v ultracentrifuze /odstředivka s vysokými otáčkami/ má tvar

$$p = p_0 + \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} \cdot (r^2 - r_0^2). \quad (56)$$



Obr.11 Kapalina v ultracentrifuze[2]

Zatížení stěn ultracentrifugy F se vypočte pomocí rovnice (56)

$$F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H \cdot p_R, \quad (57)$$

kde p_R je tlak na stěny odstředivky, pro který platí

$$p_R = p_0 + \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} (R^2 - r_0^2). \quad (58)$$

V řadě případů je možné p_0 v rovnici (58) zanedbat proti dalšímu členu a pro tlak na stěnu možno psát

$$p_R = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} (R^2 - r_0^2) \quad (59)$$

a pro zatížení dna

$$F = R \cdot H \cdot \omega^2 \cdot (R^2 - r_0^2). \quad (60)$$

Při odstředování dvou nemísitelných kapalin tvořících emulzi se v odstředivce vytvoří vlivem velké intenzity sil odstředivého pole rozhraní mezi lehčí a těžší kapalinou r_m .

Za předpokladu malého tlaku na povrchu lehčí hladiny se vypočítá tlak na rozhraní lehčí kapaliny (hustota ρ_l) a těžší kapaliny (hustota ρ_t) a tlak na stěnu válce (p_R):

$$p_R = p_m + \rho_t \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot (R^2 - r_m^2). \quad (61)$$

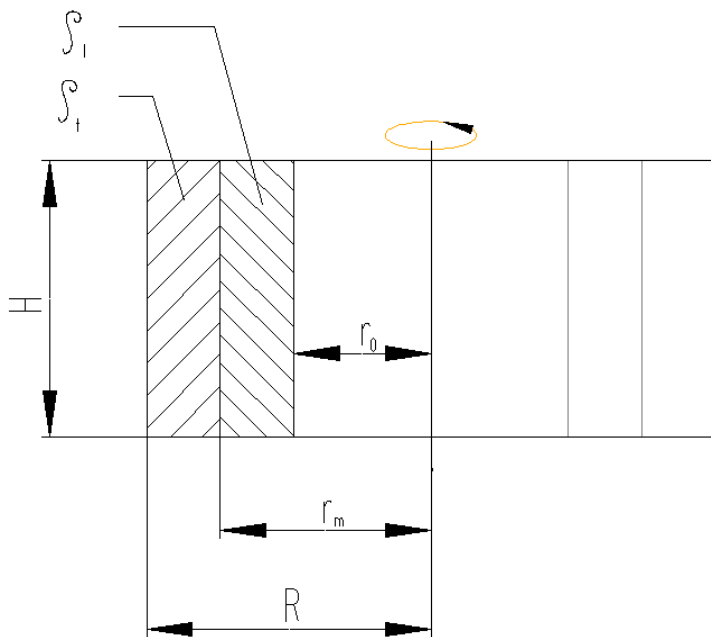
Pro p_m platí (tlak na rozhraní):

$$p_m = \rho_l \frac{\omega^2}{2} \cdot (r_m^2 - r_0^2). \quad (62)$$

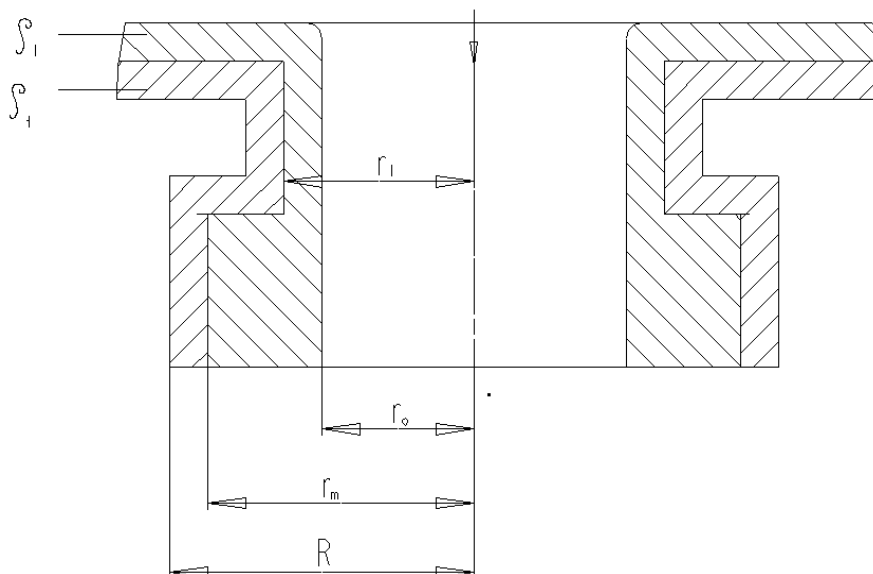
Zatížení stěny F je opět dáno součinem plochy stěny a tlaku na stěnu

$$F = R \cdot H \cdot \omega^2 \cdot [\rho_t \cdot (R^2 - r_m^2) + \rho_l \cdot (r_1^2 - r_0^2)] . \quad (63)$$

Všechny uvedené vztahy byly odvozovány za předpokladu ustáleného stavu a že odstředivka tvoří uzavřený systém, tj. kapalina se do odstředivky nepřivádí ani neodvádí, což je důsledkem toho, že se kapalina nachází v relativním klidu. Při kontinuálním dělení heterogenních směsí do odstředivky se neustále přivádí směs a stejné množství směsi se z ní odvádí. Kapalina se tudíž nenachází v relativním klidu, neboť složka rychlosti ve směru souřadnice z není nulová. K odvození rozložení tlaku je tedy třeba uvažovat třecí síly, avšak vzhledem k jejich malé hodnotě vzhledem k odstředivým silám je možné tření zanedbat a pro kontinuálně pracující odstředivky možno použít vztahů, které byly původně odvozeny pro periodicky pracující systémy. Jedno z nejstarších použití kontinuálně pracujících odstředivek je při dělení emulzí, co je schematicky naznačeno na (obr. 13).



Obr.12 Odstřed'ování dvou nemísitelných kapalin[2]



Obr.13 Kontinuální odstředování emulzí[2]

Pro tlak na stěnu p_s platí

$$P_s = \frac{\omega^2}{2} \cdot [\rho_t \cdot (R^2 - r_m^2) + \rho_l \cdot (r_m^2 - r_o^2)] = \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho_t \cdot (R^2 - r_1^2) \quad (64)$$

Odtud pro polohu rozhraní platí

$$r_m = \sqrt{\frac{r_1^2 - \left(\frac{\rho_t}{\rho_l}\right) \cdot r_o^2}{1 - \left(\frac{\rho_l}{\rho_t}\right)}} \quad (65)$$

Změnou r_1 a r_o se dá měnit tloušťka vrstev těžší (ρ_t) a lehčí (ρ_l) kapaliny a tím i doba zdržení kapaliny v odstředivce, což má význam pro kinetiku dělení, která se hlavně uplatňuje v odstředivkách při usazování.

Při usazování působením sil gravitačního pole byla odvozena rychlost nerušeného usazování (v_u)

$$v_u^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d_s \cdot (\rho_s - \rho_l)}{\zeta \cdot \rho_l}, \quad (66)$$

Kde g je intenzita gravitačních sil, d_s je ekvivalentní průměr usazované částice, ρ_s její hustota, ρ_l je hustota kapaliny a ζ součinitel odporu, pro který, vzhledem k tomu, že při usazování v odstředivkách je jeho rychlost malá, můžeme předpokládat platnost Stokesova zákona, tj.

$$\zeta = \frac{24 \cdot \mu}{\rho_l \cdot v_u \cdot d_s}, \quad (67)$$

kde μ je dynamická viskozita kapaliny.

Protože se částice nachází v poli odstředivých sil, pak intenzita objemových sil gravitačního pole musí být nahrazena intenzitou objemových sil pole odstředivého a pro rychlost usazování v odstředivce bude platit

$$v_u = \frac{\omega^2 \cdot r \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot d_s^2}{18 \cdot \mu}. \quad (68)$$

Rychlost je možné vyjádřit jako první derivaci dráhy r podle času t , takže rovnici (68) je možné přepsat

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\omega^2 \cdot r \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot d_s^2}{18 \cdot \mu}, \quad (69)$$

což je rovnice, ze které za předpokladu narušeného usazování a částic stejného ekvivalentního průměru může se vypočítat dobu potřebnou pro usazování dané částice

$$dt = \frac{18 \cdot \mu}{\omega^2 \cdot d_s^2 \cdot (\rho_s - \rho_l)} \cdot \frac{dr}{r} . \quad (70)$$

Odtud integrací plyne

$$t = \frac{18 \cdot \mu \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{\omega^2 \cdot d_s^2 \cdot (\rho_s - \rho_l)} . \quad (71)$$

Jestliže je tloušťka usazovací vrstvy malá nebo poloměr odstředivky velký, může se zanedbat změna průřezu s poloměrem usazované vrstvy a pro čas potřebný k usazení částic platí

$$t = \frac{18 \cdot \mu \cdot (r - r_0)}{\omega^2 \cdot d_s^2 \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot R} = \frac{18 \cdot \mu \cdot s}{\omega^2 \cdot d_s^2 \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot R} , \quad (72)$$

kde s je tloušťka vrstvy v odstředivce.

K tomu, aby se částice v odstředivce usadila, musí platit nerovnost

$$t_U \ll t_S , \quad (73)$$

kde t_U je čas potřebný pro usazení, pro který platí rovnice (71), respektive (72). čas zdržení t_Z určíme z objemu vrstvy a objemové rychlosti suspenze protékající odstředivkou

$$t_Z = \frac{V_l}{\dot{V}_l} \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot H \cdot s}{\dot{V}_l} , \quad (74)$$

kde H je výška vrstvy v odstředivce.

Využije-li se rovnice (73), pak dosazením za t_Z ze vztahu (74) bude pro maximální kapacitu odstředivky pracující jako usazovák platit následující vztah:

$$V_l = \frac{\omega^2 \cdot d_s^2 \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot R \cdot V_l}{18 \cdot \mu \cdot s} \approx \frac{\omega^2 \cdot d_s^2 \cdot (\rho_s - \rho_l) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H}{9 \cdot \mu} \quad (75)$$

Dále se může použít odstředivka jako filtr. Při odvození vztahů pro kapacitu filtrační odstředivky se vychází z rovnice filtrace

$$\frac{dV}{S dt} = \frac{\Delta p}{\alpha \cdot \mu \cdot h_n} , \quad (76)$$

kde S je filtrační plocha, V objem filtrátu, t čas, Δp rozdíl tlaku před a za filtračním koláčem, α měrný odpor filtračního koláče, h_n tloušťka vrstvy koláče.

Filtrační plocha S se však podél tloušťky filtračního koláče mění, proto se pro rovnici filtrace v odstředivce uvažuje její diferenciální hodnota ve směru poloměru odstředivky.

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot H} \cdot \frac{dV}{dt} = - \frac{dp}{\alpha \cdot \mu \cdot dr} , \quad (77)$$

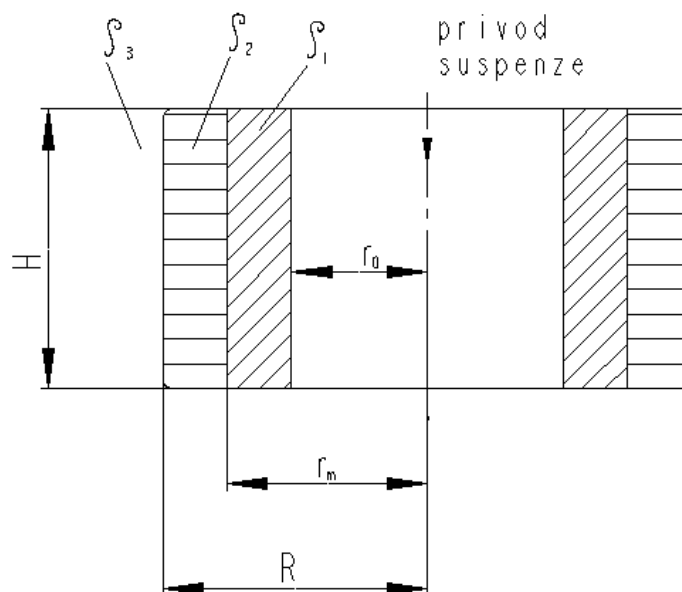
kde se za S dosadila rovnice

$$S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot H . \quad (78)$$

Integrací rovnice (77) za konstantní rychlosti filtrace se obdrží

$$p_1 - p_2 = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{\alpha \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot H} \cdot \ln \frac{R}{r_m} \quad (79)$$

Význam jednotlivých členů v rovnici (78) je na následujícím obrázku (14).



Obr.14 Filtrace v odstředivce[2]

Obdobně jako tomu bylo při filtraci, odpor filtrační přepážky se vyjádří ekvivalentní tloušťkou filtračního koláče (h_{ekv}) a pro rozdíl tlaků před a za filtrační přepážkou se píše rovnice (80):

$$p_2 - p_3 = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{\mu \cdot \alpha \cdot h_{ekv}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot H} \quad (80)$$

Sečtením rovnic (79) a (80) a úpravou se dostane

$$p_1 - p_3 = \frac{dV}{dt} \cdot \frac{\alpha \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot H} \left(\ln \frac{R}{r_m} + \frac{h_{ekv}}{R} \right) \quad (81)$$

V řadě případů je možné odpor přepážky vzhledem k odporu filtračního koláče zanedbat, tj.

$$\frac{h_{ekv}}{R} \ll \ln \frac{R}{r_1} \quad , \quad (82)$$

takže pro rychlost filtrace možno napsat:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(p_1 - p_3) \cdot 2 \cdot \pi \cdot H}{\alpha \cdot \mu \cdot \ln \frac{R}{r_m}} \quad (83)$$

Při dostatečně velké frekvenci otáček je tlak za filtrační přepážkou p_2 zanedbatelný proti tlaku p_1 , pro který je možno použít přibližného vyjádření

$$p_1 \approx \frac{\omega^2 \cdot \rho_l}{2} \cdot (R^2 - r_m^2) \quad (84)$$

a pro rychlost filtrace za uvedených předpokladů možno použít následujícího vztahu

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\omega^2 \cdot \rho_l \cdot \pi \cdot H \cdot (R^2 - r_m^2)}{\alpha \cdot \mu \cdot \ln \frac{R}{r_m}} \quad (85)$$

K integraci rovnice (85) je třeba znát závislost tloušťky filtračního koláče, která je ekvivalentní množství filtrátu V , na poloze rozhraní r_m .

Tuto závislost lze určit v konkrétním případě na základě geometrických tvarů dané odstředivky a látkové bilance.

Při filtraci ve velkých odstředivkách, kdy lze změnu filtrační plochy s poloměrem odstředivky zanedbat a pro výpočet kapacity filtrační odstředivky možno použít rovnici obyčejné filtrace:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(p_1 - p_3) \cdot S^2}{\beta \cdot \mu \cdot (V + V_{ekv})} \quad (86)$$

Za stejných předpokladů, které se uvedly při odvození rovnice možno pro rychlost rovinné odstředivky uvést následující rovnici:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot H^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho_l \cdot (R_2 - r_0^2)}{2 \cdot \beta \cdot \mu \cdot V} \quad (87)$$

Integrací rovnice (87) se pak dostane pro kapacitu filtrační odstředivky [2]:

$$V^2 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2 \cdot (R^2 - r_0^2) \cdot H^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho_l \cdot t}{\beta \cdot \mu} \quad (88)$$

2 VÝPOČTOVÁ ČÁST

2.1 Řešené úlohy

Pro snazší pochopení probíraného téma jsem vypracoval jednodušší a nejčastěji řešené úlohy.

Př. 1

Příklad je zaměřen na výpočet průměru částice:

Materiál o hustotě $2,65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ dvou různých průměrů se usazuje ve vodě při teplotě 20°C . Při usazování vzorku usadila první částice svislou vzdálenost 15 cm za 5 minut 23 sekund, druhá částice vzdálenost 90 cm za 30 sekund.

Určete průměry obou částic.[12]

Výpočet:

Usazovacím dobám $t_1 = 5 \text{ min } 23 \text{ s}$ a $t_2 = 30 \text{ s}$ a drahám $h_1 = 15 \cdot 10^{-2} \text{ m}$, $h_2 = 90 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ odpovídají usazovací rychlosti

$$\begin{aligned} v_{u1} &= \frac{h_1}{t_1} & v_{u1} &= \frac{15 \cdot 10^{-2}}{323} = 4,644 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ v_{u2} &= \frac{h_2}{t_2} & v_{u2} &= \frac{90 \cdot 10^{-2}}{30} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (89)$$

Dosadí-li se tyto hodnoty do rovnice Ly_1 spolu s hustotou vody $\rho = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (tab. teplota 20°C), její viskozitou $\eta = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [12], hustotou materiálu $\rho_s = 2,65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ a s tíhovým zrychlením $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, vypočte se Ljaščenkovo kritérium[48]

$$Ly_1 = \frac{v_{u1}^3 \cdot \rho^2}{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot \eta} \quad Ly_1 = \frac{(4,644 \cdot 10^{-4})^3 \cdot 998,2}{9,81 \cdot (2650 - 998,2) \cdot 1,007 \cdot 10^{-6}} = 6,13 \cdot 10^{-6} \quad (90)$$

a

$$Ly_2 = \frac{v_{u2}^3 \cdot \rho^2}{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot \eta} \quad Ly_2 = \frac{(3 \cdot 10^{-2})^3 \cdot 998,2}{9,81 \cdot (2650 - 998,2) \cdot 1,007 \cdot 10^{-6}} = 1,65 \quad (91)$$

Jelikož $Ly_1 < 2,22 \cdot 10^{-4}$, probíhá usazování prvního vzorku ve Stokesově oblasti. Reynoldsovo kritérium Re_1 tedy vypočteme: [48]

$$Re_1 = \sqrt{18 \cdot Ly} \qquad Re_1 = \sqrt{18 \cdot 6,13 \cdot 10^{-6}} = 1,05 \cdot 10^{-2} \qquad (92)$$

Usazování druhého vzorku probíhá v přechodné oblasti ($Ly_2 \in \langle 1,66 \cdot 10^{-2}; 1,5 \cdot 10^3 \rangle$). Hodnotu Reynoldsova kritéria Re_2 proto vypočteme z rovnice [48]:

$$Re_2 = (13,9 \cdot Ly)^{0,625} \qquad Re_2 = (13,9 \cdot 1,65)^{0,625} = 7,08 \qquad (93)$$

Ze získaných hodnot Reynoldsova kritéria vypočteme podle rovnice $d_{1,2}$ průměry obou materiálů:

$$d_1 = \frac{Re_1 \cdot \nu}{v_1} \qquad d_1 = \frac{1,05 \cdot 10^{-2} \cdot 1,007 \cdot 10^{-6}}{4,644 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{2,28 \cdot 10^{-5} m}} \qquad (94)$$

$$d_2 = \frac{Re_2 \cdot \nu}{v_2} \qquad d_2 = \frac{7,08 \cdot 1,007 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-2}} = \underline{\underline{2,37 \cdot 10^{-4} m}} \qquad (95)$$

Výsledek:

Průměr částic materiálu je u prvního vzorku $22,8 \mu m$ a u druhého $223 \mu m$. [3]

Př. 2

Cílem příkladu je ukázat názorně výpočet výkonnosti usazováku, což je v praxi častá úloha.

V gravitačním válcovém usazováku o průměru 3 m se usazuje kal ve vodě $20^\circ C$ teplé.

Obsah kalu je 15 hm. % a usazenina obsahuje 60 hm. % suchého kalu. Průměr částic je $50 \mu m$, hustota $3 g \cdot cm^{-3}$. Obsah kalu v odcházející vodě je zanedbatelný. Kolik tun suspenze zpracuje usazovák za hodinu? [3]

Výpočet:

Výkonnost kontinuálního gravitačního usazováku je dána rovnicí [3]

$$A = \frac{v_u \cdot S \cdot \rho \cdot X_s}{X_s - X_F} \quad (96)$$

Dosadí-li se do rovnice Ar za tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, průměr částic $d = 50 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, jejich hustotu $\rho_s = 3000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, hustotu vody $\rho_f = 998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a její viskozitu $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. teplota 20°C), [12] dostane se

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\nu^2 \cdot \rho_f} \quad Ar = \frac{9,81 \cdot (5 \cdot 10^{-5})^3 \cdot (3000 - 998,2)}{(1,007 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 998,2} = 2,42 \quad (97)$$

Jelikož $Ar < 3,6$, odpovídá této hodnotě Ljaščenkovo kritérium podle rovnice [48]

$$Ly = \frac{Ar^2}{5832} \quad Ly = \frac{2,42^2}{5832} = 1,008 \cdot 10^{-3} \quad (98)$$

Rychlost usazování je v tomto případě

$$v_u = \left[\frac{Ly \cdot g \cdot \nu \cdot (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (99)$$

Vyčíslením rovnice se dostane

$$v_u = \left[\frac{1,008 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 1,007 \cdot 10^{-6} \cdot (3000 - 998,2)}{998,2} \right]^{\frac{1}{3}} = 2,713 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (100)$$

Průměru usazováku $D = 3 \text{ m}$ odpovídá usazovací plocha S .

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \qquad S = \frac{3,142}{4} \cdot 3^2 = 7,0695 m^2 \qquad (101)$$

Po dosazení hodnoty S spolu s koncentrací suspendované látky v usazenině $X_s = 0,6$ a v surovině $X_F = 0,15$ do rovnice A se zjistí výkonnost usazováku:

$$A = \frac{2,713 \cdot 10^{-3} \cdot 7,0695 \cdot 998,2 \cdot 0,6}{(0,6 - 0,15)} = \underline{\underline{25,53 kg \cdot s^{-1}}} \Rightarrow A = 25,53 \cdot 3600 = \underline{\underline{91,9 t \cdot h^{-1}}} \quad (102)$$

Výsledek:

Výkonnost usazováku je $91,9 t \cdot h^{-1}$. [3]

Př. 3

Cílem příkladu je ukázat názorně výpočet usazovací rychlosti:

Pro návrh usazovacích nádrží je třeba vypočítat usazovací rychlost ve vodě částicek písku o průměru

- a) $d = 2,5 \cdot 10^{-3} cm$
- b) $d = 2,5 \cdot 10^{-2} cm$
- c) $d = 3 \cdot 10^{-1} cm$

Konstanty: hustota písku $\rho_s = 2,65 g \cdot cm^{-3}$

hustota vody $\rho_1 = 1,00 g \cdot cm^{-3}$

kinematická viskozita vody $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ [12]

Předpokládáme kulový tvar částic.

$$a) \quad d = 2,5 \cdot 10^{-3} cm = 2,5 \cdot 10^{-5} m$$

Dosadí-li se do rovnice Ar za tíhové zrychlení $g = 9,81 m \cdot s^{-2}$, průměr částic $2,5 \cdot 10^{-5} m$, jejich hustotu $\rho_s = 2,65 g \cdot cm^{-3}$, hustotu vody $\rho_1 = 1,00 g \cdot cm^{-3}$ a její viskozitu $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ (tab. teplota $20^\circ C$), dostane se [12]

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_s - \rho_l)}{\nu^2 \cdot \rho_l} \quad Ar = \frac{9,81 \cdot (2,5 \cdot 10^{-5})^3 \cdot (2650 \cdot 1000)}{(1,007 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1000} = 0,25 \quad (103)$$

Jelikož $Ar < 3,6$, odpovídá této hodnotě Reynoldsovo kritérium podle rovnice (85)

$$Re = \frac{Ar}{18} \quad (104)$$

Z rovnice Reynoldsova kritéria se dostane vztah pro usazovací rychlost:

$$Re = \frac{v_u \cdot d}{\nu} = \frac{v_u \cdot d \cdot \rho_l}{\eta} \Rightarrow v_u = \frac{Re \cdot \eta}{d \cdot \rho_l} \quad (105)$$

Vyčíslením obou rovnic se zjistí usazovací rychlost:

$$Re = \frac{0,25}{18} = 0,014 \quad v_u = \frac{0,014 \cdot 1,007 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = \underline{\underline{5,58 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}} \quad (106)$$

$$b) \quad d = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Dosadí-li se do rovnice Ar za tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, průměr částic $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, jejich hustotu $\rho_s = 2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, hustotu vody $\rho_l = 1,00 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a její viskozitu $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. teplota 20°C), dostane se [12]

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_s - \rho_l)}{\nu^2 \cdot \rho_l} \quad Ar = \frac{9,81 \cdot (2,5 \cdot 10^{-4})^3 \cdot (2650 - 1000)}{(1,007 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1000} = 249 \quad (107)$$

Jelikož $Ar \in \langle 3,85; 8,33 \cdot 10^4 \rangle$, odpovídá této hodnotě Reynoldsovo kritérium podle rovnice

$$Re = \left(\frac{Ar}{13,9} \right)^{0,714} \quad Re = \left(\frac{249}{13,9} \right)^{0,714} = 7,86 \quad (108)$$

Rovnice pro usazovací rychlost:

$$v_u = \frac{\text{Re} \cdot \nu}{d} \quad v_u = \frac{7,86 \cdot 1,007 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{3,16 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}} \quad (109)$$

c) $d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Dosadí-li se do rovnice Ar za tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, průměr částic $d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, jejich hustotu $\rho_s = 2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, hustotu vody $\rho_l = 1,00 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a její viskozitu $\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (tab. teplota 20°C), dostane se [12]

$$Ar = \frac{g \cdot d^3 \cdot (\rho_s - \rho_l)}{\nu^2 \cdot \rho_l} \quad Ar = \frac{9,81 \cdot (3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (2650 \cdot 1000)}{(1,007 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1000} = 430980,7 \quad (110)$$

Jelikož $Ar \in \langle 3,43 \cdot 10^5; 7,4 \cdot 10^9 \rangle$, odpovídá této hodnotě Reynoldsovo kritérium podle rovnice

$$\text{Re} = 1,73 \cdot Ar^{0,5} \quad \text{Re} = 1,73 \cdot 430980,7^{0,5} = 1135,7 \quad (111)$$

Rovnice pro usazovací rychlost:

$$v_u = \frac{\text{Re} \cdot \nu}{d} \quad v_u = \frac{1135,7 \cdot 1,007 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{0,38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}} \quad (112)$$

Výsledek:

Usazovací rychlost ve vodě částeczek písku je a) $v_u = \underline{\underline{5,58 \cdot 10^{-4} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]}}$

b) $v_u = \underline{\underline{3,16 \cdot 10^{-2} [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]}}$

c) $v_u = \underline{\underline{0,38 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]}} \quad [12]$

2.2 Neřešené úlohy

Př. 1

V diskontinuálním usazováku tvaru stojatého válce se usazuje 1250 kg vodné suspenze o teplotě 20°C obsahující 14 hm. % tuhé fáze o hustotě $4000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Sediment obsahuje 65 hm. % vody. Po 10 minutách byla vyčeřená kapalina odtažena a bylo zjištěno, že obsahuje 1 hm. % neusazených částic o průměru menším než $60 \mu\text{m}$.

Určete: a) výšku usazováku

b) průměr usazováku

$$\left[a)h = 5,713\text{m}; \quad b)D = 12,245\text{m} \right]$$

Př. 2

V diskontinuálním válcovém usazováku o výšce 0,3 m se usazuje 12 tun vodné suspenze o teplotě 10°C obsahující 16 hm. % tuhé fáze o hustotě $3900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Po 30 minutách je vyčeřená kapalina odpuštěna a obsahuje 4 hm. % neusazených částic.

a) určete průměr částic, které se ještě usadí

b) určete průměr usazováku

c) do jaké výšky v usazováku musíte umístit otvor pro odtažení vyčeřené kapaliny, aby nedošlo k únosu sedimentu?

$$\left[a)d = 1,17 \cdot 10^{-5} \text{m}; \quad b)D = 6,7\text{m}; \quad c)h_s = 31,5 \cdot 10^{-3} \text{m} \right]$$

Tab. 1. Empirické vztahy pro vyjádření sedimentace izolované částice [3]

Oblast	Vztah	Platnost vztahu
Stokesova	$\zeta = 24/\text{Re}$ $\text{Re} = \text{Ar}/18$ $\text{Re} = \sqrt[3]{(18 \text{ Ly})}$ $\text{Ly} = \text{Ar}^2/5832$	$\text{Re} \leq 0,2$ $\text{Ar} \leq 3,6$ $\text{Ly} \leq 2,22 \cdot 10^{-4}$
Stokesova a přechodná	$\text{Ar} = 18 \text{ Re} (1 + 0,125 \text{ Re}^{0,72})$ $\text{Ar}^{2/3} = 18 \text{ Ly}^{1/3} \cdot [1 + 0,125 (\text{Ar} \cdot \text{Ly})^{0,24}]$ $\zeta = \frac{24}{\text{Re}} \cdot (1 + 0,125 \cdot \text{Re}^{0,72})$ $\text{Ly} = \frac{\text{Re}^2}{18 \cdot (1 + 0,125 \cdot \text{Re}^{0,72})}$	$\text{Re} \leq 10^3$ $\text{Ar} \leq 3,43 \cdot 10^5$ $\text{Ly} \leq 2,91 \cdot 10^3$
turbulentní	$\zeta = 0,44$ $\text{Re} = 1,73 \text{ Ar}^{0,5}$ $\text{Re} = 0,33 \text{ Ly}$ $\text{Ar} = 3,59 \cdot 10^{-2} \text{ Ly}^2$	$\text{Re} \in \langle 10^3 ; 1,5 \cdot 10^5 \rangle$ $\text{Ar} \in \langle 3,43 \cdot 10^5 ; 7,4 \cdot 10^9 \rangle$ $\text{Ly} \in \langle 2,91 \cdot 10^3 ; 4,5 \cdot 10^5 \rangle$
přechodná*)	$\zeta = 18,5 \text{ Re}^{-0,6}$ $\text{Re} = (13,9 \text{ Ly})^{0,625}$ $\text{Ar} = 138,6 \text{ Ly}^{0,875}$ $\text{Re} = \left(\frac{\text{Ar}}{13,9} \right)^{0,714}$	$\text{Re} \in \langle 0,4 ; 500 \rangle$ $\text{Ar} \in \langle 3,85 ; 8,33 \cdot 10^4 \rangle$ $\text{Ly} \in \langle 1,66 \cdot 10^{-2} ; 1,5 \cdot 10^3 \rangle$

*) menší přesnost vztahů

ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo napsat ucelený, srozumitelný studijní text, zaměřený na usazování. Snažil jsem se o návaznost jednotlivých textů, aby byl celkový výklad srozumitelný, názorný a jednoduchý k pochopení, ze kterého by čtenář získal podrobné informace o oblasti usazování. V každé kapitole jsem se snažil vysvětlit jednotlivé důležité vztahy, obrázky a definice.

V první kapitole jsem se zaměřil na základní popis procesu usazování a základní vlastnosti suspendovaných tuhých částic. Snažil jsem se objasnit rozdělení kapalných heterogenních směsí. Dále jsou vysvětleny pojmy jako například hrubá a jemná suspenze. V další části jsem se zaměřil na rychlost usazování. V odvozování vztahů pro rychlost usazování jsem se opíral například o Stokesův zákon. Dále jsem popisoval oblast výkonnosti usazováku doplněnou o ukázky konstrukcí jednotlivých usazováku, které jsou podrobně popsány.

Ve druhé kapitole jsem podrobně rozepsal další část procesu usazování a to odstředování. Odvozoval jsem vztahy například pro závislost rozložení tlaku v rotující kapalině.

V poslední části práce jsem vybral, vypočítal a ověřil několik jednodušších řešených i neřešených úloh, pomocí nichž si může student ověřit znalosti z nastudované látky.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Perry R. H., Chilton C. H.: Chemical Engineer's handbook 5th ed. Mc Graw/hill Copany, New York, 1973
- [2] Kolomazník, K.: Teorie technologických procesů II, VUT Brno, FT Zlín, 1975
- [3] Míka, V. a kol.: Chemickoinženýrské výpočty I, II, VŠCHT Praha, III. Vydání, 1996
- [4] Kasatkin, A. G.: Základní pochody a přístroje chemické technologie, část I, SNTL Praha, 1958
- [5] Jahoda, M.: Usazování, výukové listy k přednáškám, VŠCHT Praha, UCHI, 2003
- [6] Slavíček E.: Chemické inženýrství I. Skriptum VŠCHT, SNTL Praha, 1965
- [7] Pilař A.: Chemické inženýrství I/1, SNTL Praha, 1959
- [8] Kossaczky E., Surový J.: Chemické inženieerstvo I, Alfa Bratislava, 1968
- [9] Becker H. A.: Can. J. Chem. Eng. 37, 85, 1959
- [10] Hougen O. H., Watson K. M.: Chemical rocess Principles. Wiley, New York, 1959
- [11] Spravočnik chemika I, III, V. Chimija, Moskva 1956
- [12] Dykij . a kol.: Fyzikálně chemické tabulky I, II. SNTL, Praha 1953.
- [13] Holeček O., Turnaj J.: Chemicko-inženýrské tabulky, Praha 1995
- [14] <http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Reynolds.html>
- [15] <http://www.converter.cz/fyzici/stokes.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

d	průměr materiálu	[m]
d_s	ekvivalentní průměr usazovací části	[m]
F	Zatížení stěny	[N]
g	intenzita gravitačních sil	[m.s ⁻²]
h	výška vrstvy čiré kapaliny	[m]
H	Výška vrstvy v odstředivce	[m]
h_n	tloušťka vrstvy koláče	[m]
n	frekvence otáček	[1]
Nu	Nusseltovo číslo	[1]
p	napětí normálových sil	[N]
p_R	tlak na stěny odstředivky	[Pa]
Δp	rozdíl tlaku	[Pa]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
r_m	poloha rozhraní	[m]
s	tloušťka vrstvy v odstředivce	[m]
S	filtrační plocha	[m ²]
S_0	usazovací plocha nebo průřez nádrže	[m ²]
t_u	čas potřebný pro usazení	[s]
t_z	čas zdržení	[s]
v_0	rychlost usazování	[m/sek]
V_0	množství kapalné fáze v suspensi	[m ³ /hod.]
V_1	množství čiré kapaliny	[m ³ /hod]
V_2	množství kapalné fáze v usazenině	[m ³ /hod]
V	objem filtrátu	[m ³]

α	měrný odpor filtračního koláče	
η	dynamická viskozita	$[N.s.m^{-2}]$
ρ	hustota	$[kg.m^{-3}]$
ρ_s	hustota usazovací částice	$[kg.m^{-3}]$
ρ_l	hustota lehčí kapaliny	$[kg.m^{-3}]$
ρ_t	hustota těžší kapaliny	$[kg.m^{-3}]$
μ	dynamická viskozita suspenze	$[N.s.m^{-2}]$
ν	kinematická viskozita	$[m^2.s^{-1}]$
τ	doba usazování	$[hod]$
ω	úhlová rychlost	$[Rad.s^{-1}]$
ζ	součinitel odporu	$[1]$

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Empirické vztahy pro vyjádření sedimentace izolované částice.....	48
---	----

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1- Gravitační usazování	10
Obr. 2- Usazování suspenze	15
Obr. 3- Bilanční schéma usazováku	17
Obr. 4- K výpočtu výkonnosti usazováku	19
Obr. 5- Usazovák pro čištění vody	21
Obr. 6- Usazovací nálevka	21
Obr. 7- Několikapatrový nepřetržitě pracující usazovák pro vodu	23
Obr. 8- Nepřetržitě pracující usazovák (zahušťovač) s hřebly	24
Obr. 9- Schéma nepřetržité dekantace s protiproudovým promýváním	25
Obr.10- Několikapatrový usazovák s promýváním usedliny	27
Obr.11- Kapalina v ultracentrifuze	31
Obr.12- Odstřed'ování dvou nemísitelných kapalin	33
Obr.13- Kontinuální odstřed'ování emulzí	34
Obr.14- Filtrace v odstředivce	38

