

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Strojní

Diplomová práce

2021

Bc. Jan Sýkora

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Strojní

Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Hydraulické separační procesy v technologii
úpravy oplachových vod

Červen 2021

Diplomant: Bc. Jan Sýkora

Vedoucí práce: prof. Ing. Tomáš JIROUT, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s pomocí vedoucího práce a použil jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce či jejích částí se souhlasem katedry.

Datum: 01.06.2021

.....

podpis diplomanta

Declaration

I declare that I have elaborated the diploma thesis by myself with the help of my supervisor and I used only the literature mentioned in the thesis. Furthermore, I declare that I have no objection to lending or publishing my thesis or parts thereof with the consent of the Department.

Date: 01.06.2021

.....
podpis diplomanta

Poděkování

Chtěl bych poděkovat prof. Jiroutovi za vedení, rady, čas, a hlavně trpělivost při mé snaze vytvořit následující dílo. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině, blízkým přátelům a kolegům za pomoc a podporu, bez které bych nikdy nezvládl studium úspěšně dokončit. Mé poděkování patří také kantorům a doktorandům, kteří se rozhodli část svého času věnovat mladším generacím.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sýkora** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **424078**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Hydraulické separační procesy v technologii úpravy oplachových vod

Název diplomové práce anglicky:

Hydraulic separation processes in rinse water treatment technology

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte linku pro hydraulické čištění a úpravu oplachových vod vzniklých při těžbě a zpracování nerostných surovin. V rámci práce zpracujte následující dílčí cíle:

1. Na základě literární, průmyslové příp. patentové rešerše vyberte vhodné hydraulické separační procesy pro navrhovanou technologii. Zhodnoťte tyto technologie a vyberte efektivní technologie pro zadanou aplikaci.
2. Pro vybrané separační technologie popište jednotlivá zařízení včetně postupu výpočtu jejich základních procesních a geometrických parametrů.
3. Pro konkrétní vzorek oplachové vody stanovte vlastnosti potřebné pro návrh separačních zařízení v technologické lince.
4. Pro zadané množství oplachové vody navrhněte linku na její hydraulické čištění včetně základních bilancí.
5. Pro všechna zařízení v technologické lince zpracujte aparátové listy a basic-design vyráběných zařízení.

Seznam doporučené literatury:

dle vlastní literární, průmyslové příp. patentové rešerše a doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **31.10.2019** Termín odevzdání diplomové práce: **13.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Pokyny pro přepracování diplomové práce

Osobní a studijní údaje

Příjmení:	Sýkora
Jméno:	Jan
Osobní číslo:	424078
Zadávací ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor	Procesní technika

Údaje k diplomové práci

Název diplomové práce:	Hydraulické separační procesy v technologii úpravy oplachových vod
Název diplomové práce anglicky:	Hydraulic separation processes in rinse water treatment technology
Jméno vedoucího diplomové práce:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Pracoviště vedoucího diplomové práce:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky, FS ČVUT v Praze
Datum zadání diplomové práce	31. 10. 2019
Datum odevzdání neobhájené diplomové práce	7. 2. 2020

Pokyny pro přepracování a doplnění diplomové práce

Komise konstatovala, že student neobhájil diplomovou práci a doporučuje přepracování diplomové práce.

Komise doporučuje přepracování diplomové práce minimálně dle následujících bodů:

- 1) Doplnit údaje o charakteristice zpracovávaného materiálu
- 2) Přepracování látkových a energetických bilancí včetně alespoň ukázky bilancování klíčových zařízení (rovnice, dosazení, výsledek)
- 3) Přepracovat procesní proudové schéma (PFD diagram) podle standardů
- 4) Doplnit aparátové listy navrhovaných zařízení včetně návrhových výpočtů studentem navrhovaných zařízení
- 5) Opravit/doplnit citace převzatých informací

Termín předložení přepracované a doplněné diplomové práce

Termín odevzdání přepracované diplomové práce: **13. 8. 2021**

Přepracovanou diplomovou práci je nutné odevzdat v elektronické podobě do systému KOS a také v tištěné podobě na sekretariátě Ústavu procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT v Praze v daném termínu.

V Praze dne 21. 10. 2020

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
vedoucí Ústavu

Anotace:

Diplomová práce se zabývá problematikou čištění vod od mechanických nečistot. V dané problematice jsem analyzoval již některé existující technologie, sepsal jejich výhody a nevýhody a následně sestavil řešení, z informací takto obsažených, pro reálný projekt.

Klíčová slova:

Sedimentace, voda, čištění, částice, nádrž, separace, flokulace, kal

Anotation:

The thesis deals with a problem of water purification from mechanical impurities. In the following issue I analyzed some already existing technologies, wrote down their advantages and disadvantages and then compiled a solution, from the information so contained, for a real project.

Key words:

Sedimentation, water, purification, particles, tanks, separation, flocculation, sludge

Obsah

Úvod.....	1
1. Informace o nečistotách.....	2
2. Vhodné separační technologie.....	6
Směsi:	6
Heterogenní Směsi:	6
Kapalina/tuhá fáze	6
2.1 Sedimentace	7
2.2 Centrifugace	10
2.3 Flotace	11
Smáčivost	11
Flotační aparáty	12
2.4 Filtrace.....	13
Koláčová (náplavová) filtrace:	13
Hlubková (objemová) filtrace:	13
2.5 Shrnutí separačních technologií	14
2.6 Separace uranu	15
Ionexové technologie.....	15
3 Vybraná zařízení.....	17
3.1 Periodická usazovací nádrž	17
3.2 Polo-kontinuální usazovák (průtočný)	18
3.3 Kontinuální Usazovák	19
3.4 Lamelové usazování.....	20
3.5 Kalolis	21
Komorový kalolis	21
Membránový kalolis.....	22

4	Bilance linky.....	23
5	Výpočet konkrétních zařízení.....	25
5.1	Usazovací rychlosti jednotlivých částic.....	25
5.2	Sedimentační zařízení.....	26
	Minimální plocha usazovacího zařízení.....	26
	Výpočet lamelového usazovacího zařízení.....	26
	Výsledná půdorysná plocha lamel:.....	27
5.3	Rozpouštěcí nádrž.....	28
	Výpočet geometrie nádoby.....	28
	Návrh míchadla rozpouštěcí nádrže.....	29
5.4	Smíchání OV s flokulemi.....	32
	Tlaková ztráta průtokem.....	33
5.5	Konečné usazení/zahuštění kalu.....	35
	Geometrie nádrže.....	35
5.6	Odvodnění kalu.....	38
6	Basic design.....	41
6.1	Lamelový usazovák.....	41
6.2	Rozpouštěcí nádrž.....	41
6.3	Kontinuální usazovák.....	41
6.4	Kalolis.....	42
6.5	Technologické PFD schéma.....	42
7	Závěr.....	43
	Zdroje.....	44
	Seznam příloh.....	46
	Seznam symbolů.....	47

Úvod

Voda je základem všeho. Je nutná nejen pro vznik života, ale i pro jeho následný vývoj. V lidské společnosti zaujímá své místo jako jeden ze základních pilířů naší existence, a to nejen jako spotřební surovina, ale také jako průmyslová komodita. Stala se součástí snad každého průmyslového odvětví, v některých zaujímá nepostradatelnou roli.

Je tedy třeba se o vodu starat jako a každou jinou neobnovitelnou surovinu. Pokud ji průmysl znečistí, musí ji před vypuštěním, či opětovném použití vyčistit. Ve své práci se chci zabírat problematikou průmyslového čištění vody. Přesněji, čištěním oplachové vody z uranového dolu v Příbrami, pro její opětovné využití v daném průmyslu. Je požadováno vyčištění pevných částic, biologické a chemické čištění vody nebude proto obsahem této práce.

V následujících kapitolách se zaměřím na zhodnocení možných technologií. Vysvětlím jejich funkce, výhody, nevýhody a vhodnost pro projekt. Následně vyberu vhodná zařízení, a vysvětlím informace potřebné k zhotovení návrhu projektu. Provedu projektové výpočty, pro již vybraná zařízení a následně sestavím návrh čisticí linky. Součástí mé práce budou i aparátové listy vyráběných zařízení a jejich-basic design.

1. Informace o nečistotách

Příbramské doly se řadí mezi doly hlubinné, což má za následek zaplavení dolu spodní vodou, kterou je nutno odčerpávat. Dále má hlubinné dolování za následek koncentraci velkého množství zbytků rudniny v oblasti dolu. Ukládané rudniny jsou zaříděny jako písek a hlinitý písek. Jemnější frakce (více než 50 %) patří do kategorie prachové hlíny. Do sedimentačního prostoru odkaliště jsou zároveň uloženy neutralizační kaly (60-120 kg na tunu rudniny) vznikající na konci technologického procesu, při neutralizaci roztoku kyseliny sírové a louhu sodného. [18]

<u>Oblast</u>	<u>Objem v tis. m³</u>	<u>Plošný rozsah v tis. m²</u>
Západní Čechy	10 662	641
Severní Čechy	1 302	114
Příbramsko	28 511	1 299
Dolní Rožínka a okolí	2 623	406

Tabulka 1: Rozsah hald po těžbě uranu (2001) [18]

<u>Odkaliště</u>	<u>Plošný rozsah v ha</u>	<u>Objem v tis. m³</u>
Stráž pod Ralskem	187,0	19 236,0
D. Rožínka (GEAM)	90,1	9 827,4
MAPE Mydlovary	292,7	23 969,0
Příbram	44,1	238,3
Západní Čechy	20,1	2 798,0

Tabulka 2: Rozsah a objem odkališť (2001) [18]

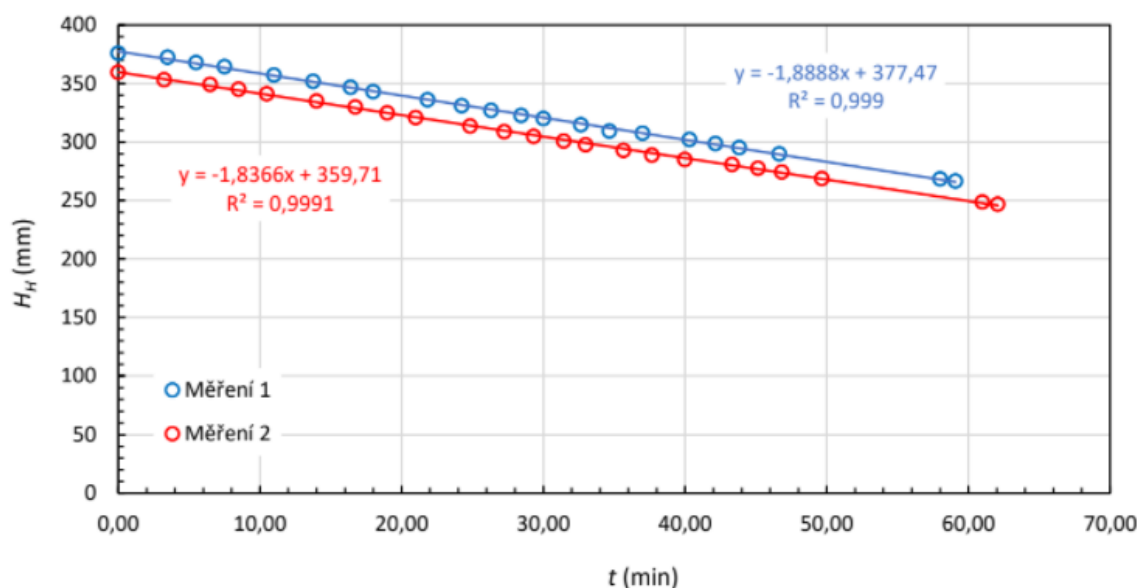
Vzorky znečištěné oplachové vody byly dodány naší fakultě a následně našim doktorandům k analýze. Z jejich výsledné zprávy [11], jsem vyčetl velikosti částic pohybují se v rozmezí od 1 µm do 100 µm.

Nebyla naměřena žádná radioaktivita kalu, což by nasvědčovalo absenci uranu, avšak množství naměřených vzorků není dostatečné k jeho úplnému vyloučení. V březnu 2004 byl firmou SEPARA-EKO[19], s.r.o. v jámě č. 19 proveden zonální odběr vzorků důlních vod, kde naměřili koncentraci 5,5 až 9,6 mg uranu 238 na litr vody. Tabulku s výsledky jejich měření přikládám zde:

pH	7,1 až 7,4	
sírany	1 700 až 2 300	mg/l
železo	10 až 12	mg/l
uran 238	5,5 až 9,6	mg/l
radium 226	0,22 až 1,1	Bq/l
nerozpuštěné látky	6 až 35	mg/l
chloridy	110 až 140	mg/l
hydrogenuhlčitany	440 až 660	mg/l
vápník	370 až 660	mg/l
hořčík	78 až 110	mg/l
mangan	1,8 až 6,2	mg/l

Tabulka 3:složení vzorku důlní vody (2001)[19]

Příkládám výsledky měření naší laboratoře:



Obrázek 1: Výška rozhraní suspenze – čirá kapalina[11]

	A	B
Měření 1	$-2,0569 \pm 0,0029$	$395,16 \pm 0,14$
Měření 2	$-1,9750 \pm 0,0047$	$377,54 \pm 0,19$
Měření 1 – opakované	$-1,888 \pm 0,013$	$377,47 \pm 0,43$
Měření 2 – opakované	$-1,837 \pm 0,012$	$359,71 \pm 0,40$

Tabulka 4: Vyhodnocené parametry

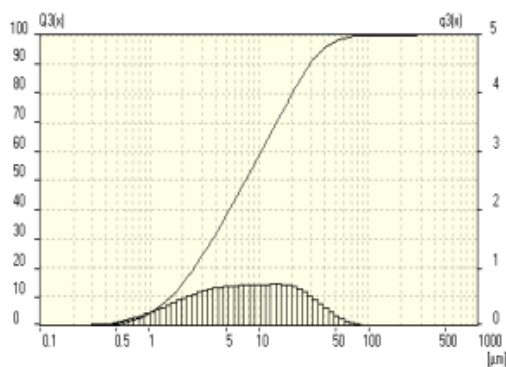
Vyhodnocené parametry popisují rychlost usazování částic pevné fáze dle vztahu:

$$H_H = A \cdot t + B \quad (1.0.1)$$

„Z uvedených výsledků je patrné, že při prvotních měřeních byla rychlost poklesu sledovaného rozhraní přibližně 2 mm/min. U opakovaného měření byla rychlost o něco nižší (cca 1,86 mm/s), což je dáno vyšší koncentrací částic, neboť u opakovaného měření nebyla před jeho započítáním dolita voda, která se odpařila během prvotních měření.“[11]

Příkládám také výsledky měření distribuce částic z naší laboratoře:

Meas.No. 2	Date 12-12-2017	Time 06:45	Operator prof. Jirout	ID 12118	Serial No. 12118			
sedimentace t = 0 min								
Measuring Range	0.31 [µm] - 300.74 [µm]			Pump	100[rpm]			
Resolution	62 Channels (17 mm / 114 mm)			Stirrer	3[rpm]			
Absorption	9.00 [%]			Ultrasonic	100			
Measurement Duration	3 [Scans]							
Modell Independant								
Fraunhofer Calculation selected.								
Interpolation Values... C:\Program Files\la22_32\fritsch\HIMNT_1.FPS								
***** %	<=	0.050 µm	4.3 %	<=	1.000 µm	14.5 %	<=	2.000 µm
23.8 %	<=	3.000 µm	31.5 %	<=	4.000 µm	37.8 %	<=	5.000 µm
58.6 %	<=	10.000 µm	79.9 %	<=	20.000 µm	98.1 %	<=	50.000 µm
100.0 %	<=	100.000 µm	100.0 %	<=	200.000 µm	***** %	<=	300.000 µm
Interpolation Values... C:\Program Files\la22_32\fritsch\10_90.FPV								
10.0 %	<=	1.562 µm	20.0 %	<=	2.568 µm	30.0 %	<=	3.786 µm
40.0 %	<=	5.381 µm	50.0 %	<=	7.529 µm	65.0 %	<=	12.322 µm
70.0 %	<=	14.477 µm	80.0 %	<=	20.075 µm	90.0 %	<=	29.212 µm
100.0 %	<=	94.018 µm						
Mean	Values...							
D43 =	12.1 µm	D42 =	6.81 µm	D41 =	4. µm	D40 =	2.63 µm	
D32 =	3.83 µm	D31 =	2.3 µm	D30 =	1.58 µm			
D21 =	1.38 µm	D20 =	1.02 µm					
D10 =	1.56 µm							
Statistical Means...								
Arithmetic Mean Diameter	12.102 µm	Variance	158.638 µm ²					
Geometric Mean Diameter	7.093 µm	Mean Squire Deviation	12.595 µm					
Quadratic Square Mean Diameter	17.421 µm	Average Deviation	9.378 µm					
Harmonic Mean Diameter	3.828 µm	Coefficiant of Variation	104.076 %					
Statistical Modes...								
Skewness	1.857	Mode	14.959 µm					
Curtosis	4.234	Median	7.521 µm					
Span	3.668	Mean/Median Ratio	1.609					
Uniformity	1.15							
Specific Surface Area	15673.05 cm ² /cm ³							
Density	1. g/cc							
Form Factor	1. g/cc							



Obrázek 2: Výsledky měření distribuce velikosti částic [11]

2. Vhodné separační technologie

V této kapitole se zaměřím na možné separační technologie, sepiši je do podkapitol a na závěr shrnu do přehledné tabulky. V každé podkapitole se pokusím popsat jejich princip, rovnice a výpočty. Separace je proces oddělování jedné nebo více složek ze směsi.

Směsi:

- Homogenní
- Heterogenní
- koloidní

Voda znečištěná půdními částicemi se řadí do Heterogenních směsí. Heterogenní směsi je možno dále dělit dle skupenství složek v ní obsažených.

Heterogenní Směsi:

- plyn/plyn
- plyn/kapalina
- plyn/tuhá fáze
- kapalina/kapalina
- kapalina/tuhá fáze
- tuhá fáze/tuhá fáze

V našem případě se budeme snažit odseparovat tuhou fázi od kapaliny. Zde se již dostáváme na jednotlivé technologie.

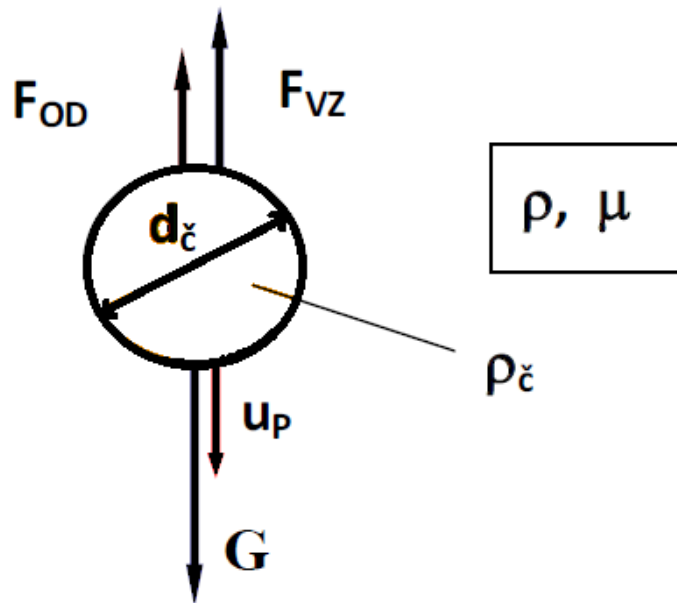
Kapalina/tuhá fáze

- Filtrace
- Flotace
- Krystalizace
- Dekantace
- Centrifugace
- Sedimentace

2.1 Sedimentace

Třídění částic z kapaliny pomocí sedimentace je jedním z nejstarších a nejméně komplikovaných způsobů třídění. Hnací silou procesu je rozdíl gravitačních sil působících na částice a tekutinu, přičemž gravitační síla je přímo úměrná hmotnosti částice, která je přímo úměrná jejich objemu a hustotě. Díky tomu můžeme třídít částice jak na základě rozdílu hustot, tak i na základě rozdílu jejich velikostí. Nevýhodou je dlouhá doba usazování a prostorné rozměry zařízení.

Při výpočtu usazovací rychlosti částice vycházíme z úseku usazování, kde je již pádová rychlost částic u_p konstantní. Díky této podmínce můžeme stanovit nulové zrychlení částic a následně rovnováhu sil působících na částici.



Obrázek 3: Síly působící na částici [1]

Na částici působí hned několik sil: gravitační síla, vztlaková síla z Archimédova zákona a odporová síla kapaliny. Jejich vektorový součet pak dává rovnici (2.1.1).

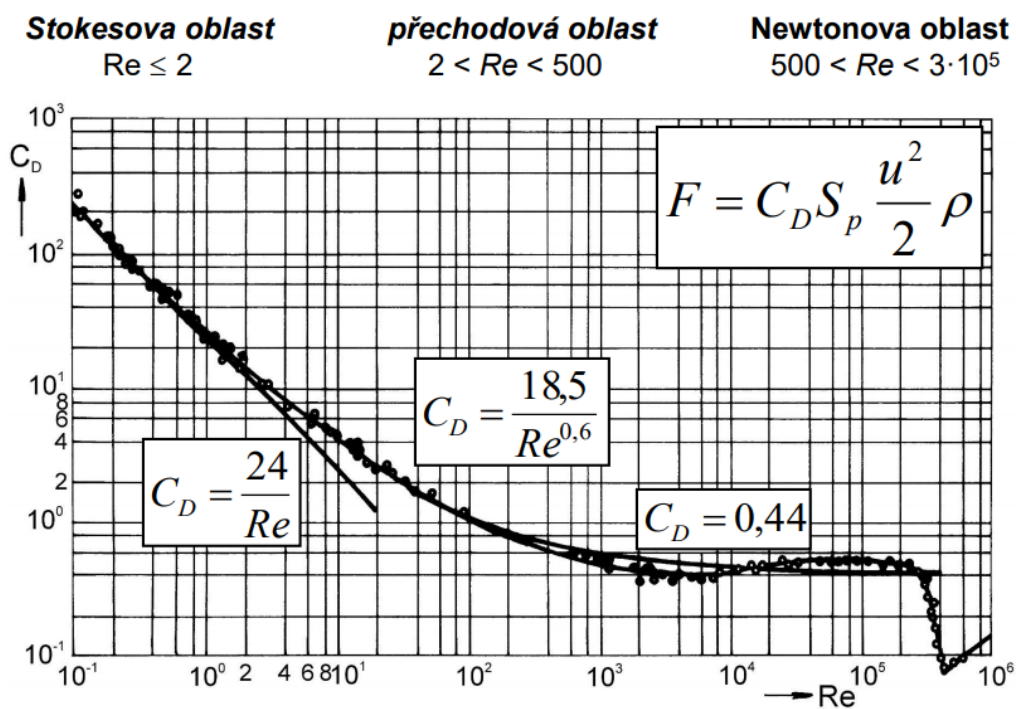
$$G = F_{vz} + F_{OD} \quad (2.1.1)$$

Nyní rovnice pro jednotlivé síly:

Gravitační síla:
$$G = \frac{\pi \cdot d_{\zeta}^3}{6} \cdot \rho_{\zeta} \cdot g \quad (2.1.2)$$

Vztlaková síla:
$$F_{vz} = \frac{\pi \cdot d_{\zeta}^3}{6} \cdot \rho \cdot g \quad (2.1.3)$$

Odporová síla:
$$F_{OD} = C_D \cdot \frac{\pi \cdot d_{\zeta}^2}{4} \cdot \frac{u_p^2}{2} \cdot \rho \quad (2.1.4)$$



Obrázek 4: Odpor při obtékání kulové částice [1]

Po dosazení do rovnice (2.1.1) získáme vztah (2.1.5).

$$\frac{\pi \cdot d_{\zeta}^3}{6} \cdot \rho_{\zeta} \cdot g = \frac{\pi \cdot d_{\zeta}^3}{6} \cdot \rho \cdot g + C_D \cdot \frac{\pi \cdot d_{\zeta}^2}{4} \cdot \frac{u_p^2}{2} \cdot \rho \quad (2.1.5)$$

A po jeho úpravě rovnici (2.1.6) pro výpočet pádové rychlosti částic.

$$u_p^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{d_\xi(\rho_\xi - \rho) \cdot g}{C_D \cdot \rho} \quad (2.1.6)$$

Stanovené rovnice pro odporovou sílu je lehce komplikovanější. Výpočet pracuje s odporovým součinitelem C_D , který je závislý na Reynoldsově čísle, a tím i na pádové rychlosti u_p . Tento problém vyřešíme určením typu oblasti usazování. Sedimentace jemných suspenzí se téměř výhradně pohybuje ve Stokesově oblasti, kde, pro odporový součinitel C_D , platí vztah (2.1.7).

$$C_D = \frac{24}{Re} = \frac{24 \cdot \mu}{u_p \cdot d_\xi \cdot \rho} \quad (2.1.7)$$

Po dosazení vztahu (2.1.7) do rovnice (2.1.6) získáme výslednou rovnici (2.1.8) pro sedimentační rychlost částice u_p .

$$u_p = \frac{d_\xi^2 \cdot (\rho_\xi - \rho) \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (2.1.8)$$

Výpočet sedimentační rychlosti je třeba znát, pro výběr vhodných sedimentačních zařízení. Ty se dělí dle:

- tvaru (obdélníkové, kruhové, mělké, hluboké)
- průtoku (horizontální, radiální, vertikální)
- vestavby (bez vestavby, lamelové, šterbinové)
- způsob práce (kontinuální, periodické, polo-kontinuální)
- účelu (primární kal, zahuštění kalu)

Každé provedení má své výhody a nevýhody, ať už jsou to rozměry zařízení, jeho pořizovací cena, provozní náklady, či účinnost separace.

2.2 Centrifugace

Odstředivá síla se obvykle používá k oddělování velmi jemných částic. Využívá rozdílu hustot jednotlivých složek. Oproti gravitačnímu usazování je odstředivá síla mnohonásobně účinnější ($50 \div 5 \cdot 10^4$, u ultraodstředivek i 10^6), a navíc je ji možno regulovat. Poměr mezi gravitační silou a odstředivou silou se v praxi nazývá dělicí faktor, který je roven Froudovu číslu.[8]

$$\frac{F_o}{G} = F_r \quad (2.2.1)$$

Odstředivou sílu vytváří rotace suspenze, která ji předává částicím. Tato síla je úměrná součinu poloměru rotace, druhé mocnině úhlové rychlosti a hmotnostem jednotlivých částic.

$$F_o = r \cdot \omega^2 \cdot m_\xi \quad (2.2.2)$$

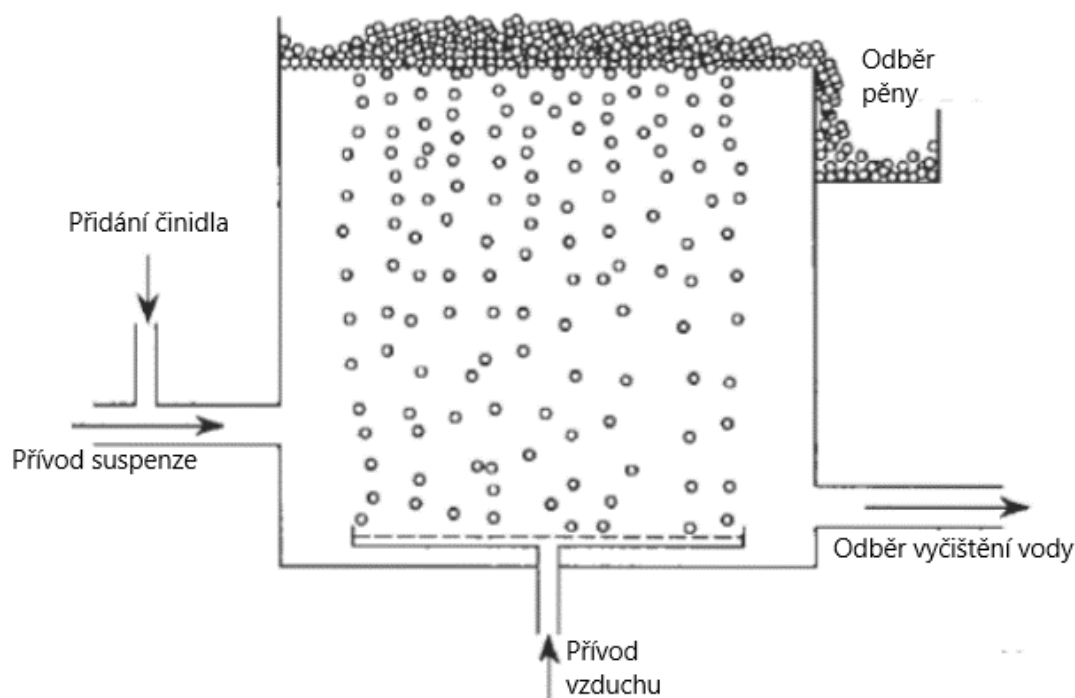
Účinnost oddělování tuhé fáze můžeme tedy zvýšit jak zvětšením poloměru bubny, tak i zvýšením počtu jeho otáček, avšak otáčky mají na odstředivou sílu, oproti poloměru, exponenciální vliv. Z tohoto důvodu je výhodnější regulovat odstředivé síly výhradně otáčkami. Typů odstředivek je nespočet. Dají se třídít kupříkladu pomocí provozních otáček, rozměrů, způsobu odvádění kalu, polohy hřídele a spousty dalších. Pro alespoň přibližnou představu přikládám orientační tabulku 5. Do úvahy při návrhu odstředivek je však nutno brát v potaz i možnou abrazi částic, či konzistenci výsledného kalu.

Typ	Max. výkonnosti [m ³ /h]	tuhá fáze [%obj.]	Ød _{částice} [μm]	F _r
Trubkové	4	< 10	0,1 ÷ 200	(1,5 ÷ 5) · 10 ⁴
Bubnové	15	< 15	15 ÷ 110	(0,3 ÷ 3) · 10 ³
Talířové	150	2 ÷ 10	0,5 ÷ 500	(6 ÷ 12) · 10 ³
Dekanter	30	3 ÷ 60	3 ÷ 10 ⁴	(6 ÷ 12) · 10 ³

Tabulka 5: Provozní parametry usazovacích odstředivek [8]

2.3 Flotace

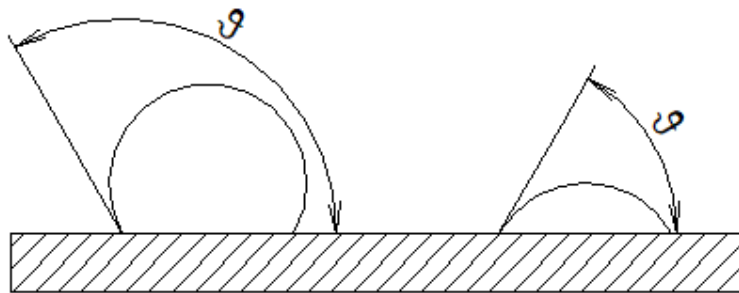
Flotace je fyzikální děj, při kterém dochází k vynášení hydrofobních částic mikrobublinkami plynu k hladině, kde se z nich tvoří kompaktní zahuštěná vrstva, která je následně shrabována a odstraňována z nádrže. Částice, které nejsou odnášeny bublinkami klesají ke dnu ve formě kalu. Hlavními parametry pro separaci jsou smáčivost a velikosti jednotlivých částic, velikost bublin a jejich rychlost stoupání.



Obrázek 5: Schéma Flotace [6]

Smáčivost

Smáčivost je schopnost kapaliny přilnout k povrchu některých pevných látek. Určuje se podle styčného úhlu ϑ k danému povrchu. Dokonale smáčivé kapaliny by měly styčný úhel ϑ nulový, zatímco dokonale nesmáčivé látky by měly $\vartheta = 180^\circ$. [1]



Obrázek 6: Styčný úhel mezi kapalinou a pevnou látkou

Flotační aparáty

Jednotlivé flotační aparáty se dají dělit podle způsobu vytváření bublin:

- Flotátory pneumatické
 - Plyn je mechanicky vháněn zespondu skrze aeračních desky, či talíře.
- Flotátory tlakové:
 - Tlakovým nasycením kapaliny plynem a následným snížením jejího tlaku dojde k uvolnění plynu ve formě bublinek.
- Flotátory vakuové:
 - Dostatečným snížením tlaku nad hladinou suspenze dojde k uvolnění bublinek plynu ze suspenze. Používají se pouze výjimečně.
- Flotátory Mechanické s přívodem plynu:
 - Flotátor je opatřen míchadlem u dna, na které je zespondu přiváděn proud plynu. Bublínky plynu jsou rozměňňovány rotací míchadla.
- Flotátory elektrolytické:
 - Přívodem stejnosměrného proudu do elektrod u dna dochází k elektrolyze vody a tím tvorbě bublin (na katodě se uvolňuje vodík a na anodě kyslík).

2.4 Filtrace

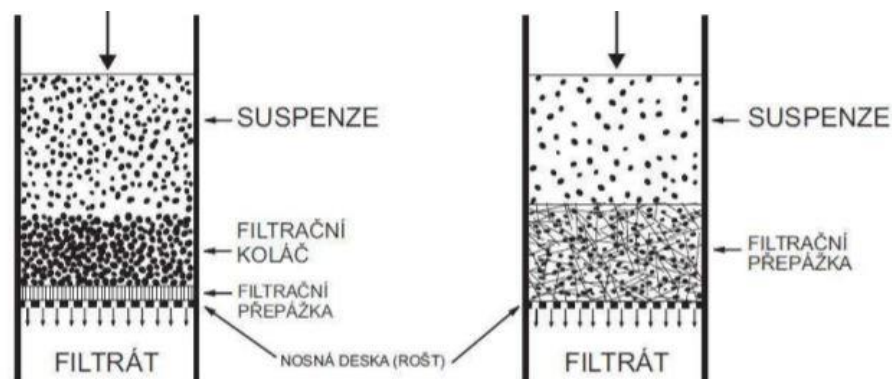
Filtrace je v zásadě průtok suspenze skrze vrstvu porézního materiálu. Cílem je zachytit nežádoucí částice na povrchu porézního materiálu. Filtraci můžeme rozdělit na dva základní typy:

Koláčová (náplavová) filtrace:

Při koláčové filtraci, jak už název napovídá, dochází ke tvorbě vrstvy filtračního koláče na filtračním materiálu, z naplavených kalových částic. Výška koláče během filtrace narůstá, tudíž se účinnost filtrace, stejně tak jako tlaková ztráta, mění během celého procesu. Po naplnění kalové kapacity, či překročení přípustné tlakové ztráty se proces filtrace zastaví, filtrační koláč se mechanicky odstraní a následně se může začít nový filtrační cyklus.

Hloubková (objemová) filtrace:

Filtrační vrstva je tvořena buďto zrnitým materiálem, nebo kompaktním porézním materiálem. Horní filtrační vrstvy zachytávají největší podíl částic, přičemž intenzita zachycování částic v elementární filtrační vrstvě s postupem filtrace roste, dosahuje maxima a následně klesá. S klesající filtrační účinností horních vrstev, roste účinnost spodnějších vrstev. Cyklus filtrace skončí dosáhne-li tlakový odpor filtrace maximální přípustné hodnoty, nebo zaplněním celé výšky filtrační vrstvy. Ideálně optimalizovaná hloubková filtrace je taková filtrace, u které dochází k těmto jevům současně. Znečištěný filtrační materiál je možné regenerovat a znovu použít. Hloubková filtrace se doporučuje pro koncentraci pevné fáze v suspenzi do 0,1 % obj.



Obrázek 7: Schéma Koláčové a Hloubkové filtrace [1]

2.5 Shrnutí separačních technologií

Zde shrnuji informace obsažené v předchozích kapitolách do přehlednějšího vzoru.

<u>Sedimentace</u>		
Zařízení	Výhody	Nevýhody
Pravoúhlý usazovák (PU)	Rovnoměrné rozdělení průtoku	Dlouhá doba zdržení kalu
	Menší zastav. plocha než (KU)	Častější údržba než (KU)
Kruhový usazovák (KU)	Kratší doba zdržení než u (PU)	Možnost zkratového proudění
	Spolehlivý odběr kalu	Citlivé na tvorbu větrných vln
Lamelový usazovák (LU)	Nejmenší zastavěná plocha	Nutná údržba
	Zvýšená účinnost separace	Riziko ucpávání lamel
<u>Centrifugace</u>		
Zařízení	Výhody	Nevýhody
Trubkové	Účinné	Provozně nákladné
Bubnové	Nižší provozní cena	Ruční odběr kalu
Talířové	Možnost kont. provozu	Složitá konstrukce
Dekanter	Velká výkonost	Nízké vyčerení kapaliny
<u>Flotace</u>		
Zařízení	Výhody	Nevýhody
Pneumatické	Menší spotřeba el. energie	Ucpávání přívodů vzduchu
Tlakové	Účinnější než vakuová	Vyšší stavební výška
Mech. s přívodem plynu	Dobré provzdušnění	Horší cirkulace rmutu
elektrolytické	Možní regulovat proudem	Nákladné
<u>Filtrace</u>		
Zařízení	Výhody	Nevýhody
Nuč	Jednoduchost	Náročné vypírání
	Nízká pořizovací cena	Omezená filtrační plocha
Listový filtr	Rychlá výměna plachetek	Nevhodné pro vysoké tlaky
	Maximální využití plochy	Nutné časté vypírání kalu
Kalolis	Robustnost	Vyšší pořizovací náklady
	Univerzálnost	Nutnost obsluhy

Tabulka 6: Shrnutí kapitoly 1

2.6 Separace uranu

Ionexové technologie

Ionexové technologie využívají k odstranění kontaminantů z vod měniče iontů neboli ionexy. Ionexy jsou nerozpustné ve vodě a v běžných anorganických a organických rozpouštědlech. Ve vodě bobtnají, základní skelet se rozpíná, ionex se stává porézním, funkční skupiny disociují a jsou přístupny upravovanému roztoku. Docílení výstupních parametrů, záleží na použitém specifickém kolonovém zatížení, vstupních koncentracích iontově rozpuštěných látek a na výšce ionexové náplně. Zařízení je definováno jako objem roztoku, který proteče kolonou za hodinu, vztažený na objem lože ionexu. Jeho převrácená hodnota vyjadřuje, jak dlouho je roztok během pracovní fáze v kontaktu s ionexem. Obvykle se u standardních typů ionexů pohybuje s v rozmezí 10 až 40 $V/V_0 \cdot h^{-1}$ [20]. Ionexy používáme ve formě perliček či vláken a rozdělujeme je na gelové, či makroporézní. Makroporézní ionexy se používají i pro odstraňování nečistot z nevodného prostředí. Standardní velikost perliček se pohybuje v rozmezí od 300 do 1200 μm [20]. Novější typy ionexů bývají monosferické s úzkým rozmezím velikostí perliček (např. 0,55-0,65 mm)[20].

Princip iontové výměny spočívá v elektrostatické interakci, kde ionty navázané na funkční skupině přitahují opačně nabitý ion z roztoku a místo něho uvolňují ekvivalentní množství jiného iontu do roztoku. Pro výměnu n molů iontů A s nábojem (z) za ionty B platí:

$$z(A) \cdot n(A) = z(B) \cdot n(B) \quad (2.6.1)$$

Ionexy preferují ionty, které mají vyšší náboj, díky tomu lze docílit selektivního odseparování. Při volbě typu ionexu, či sorbentu je nutný rozbor vstupních parametrů vody. Každý ionex obsahuje omezený počet funkčních skupin, proto může vyměnit jen určité množství iontů a poté je nutné ho regenerovat.

V klasickém kolonovém uspořádání mluvíme o tzv. pracovním cyklu ionexu, který se skládá ze čtyř fází [22]:

1. Vlastní výměna

V této fázi dochází k vlastnímu zachycení iontů. Z kolony vytéká voda (eluát) se sníženou koncentrací vyměňovaného iontu, a naopak zvýšenou koncentrací původního protiiontu ionexu.

2. Praní a kypření

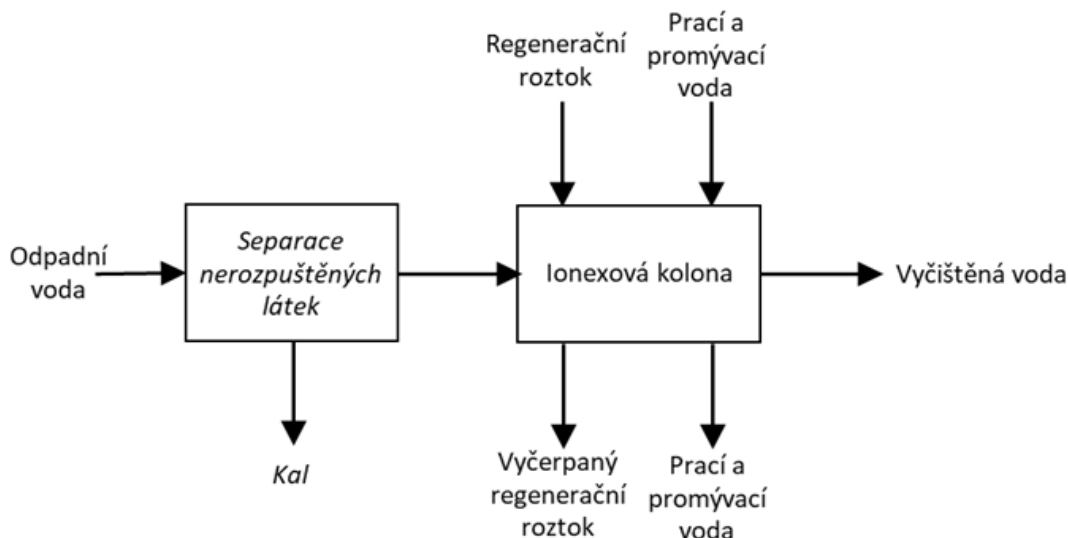
Po skončení iontové výměny je ionexové lože propráno vodou, případně směsí vody a vzduchu.

3. Regenerace

Při regeneraci je ionex promýván regeneračním roztokem s vysokou koncentrací původních protiiontů. „Např. v energetice se používá pro regeneraci silně kyselého katexu kyselina chlorovodíková, kyselina sírová a kyselina dusičná. Kyselina sírová se používá z obavy před korozi korozivzdorných částí v parovodním okruhu, zejména v parogenerátoru. Kyselina dusičná se používá výlučně v jaderných elektrárnách na úpravu vnitřního okruhu chlazení v primárním okruhu.“[22]

4. Vymývání

Ionex se promyje vodou.



Obrázek 8: Schéma běžného zapojení Ionexové kolony [22]

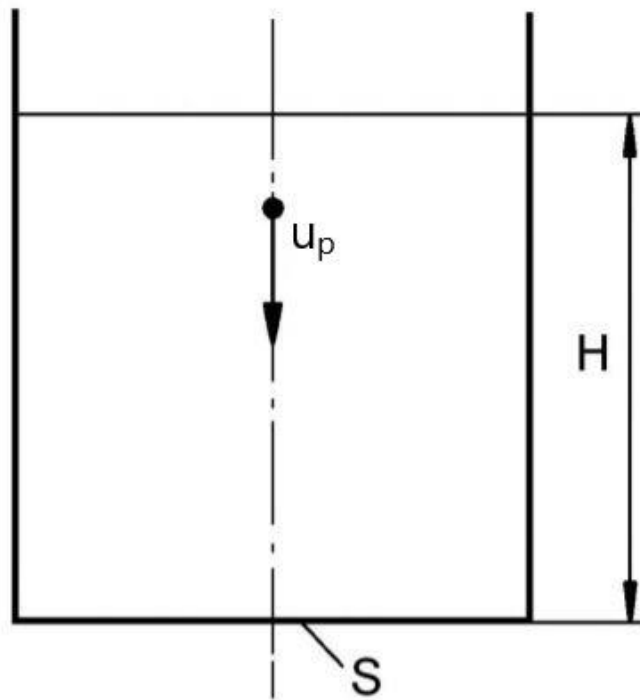
Komerčně dostupné ionexy jsou obvykle na bázi polymerních pryskyřic, vyráběné ve formě zrn o průměru desetin mm až po cca 1,5 mm [22].

3 Vybraná zařízení

V této kapitole se pokusím popsat informace a funkce zařízení, která jsem vybral jako nejvhodnější.

3.1 Periodická usazovací nádrž

Vsádkové usazování se používá nejčastěji v případech malého množství částic v suspenzi. Jedná se pravděpodobně o nejjednodušší zařízení pro danou problematiku. Sestavuje se pouze z nádrže, do které se přivede suspenze, která se nechá následně usadit. Po potřebné době k usazení se vyčištěná kapalina odčerpá a ze dna se vybere kal. Vybrání kalu se může provádět každý pracovní cyklus, nebo až po několika, záleží na koncentraci pevné fáze v přiváděné suspenzi.



Obrázek 9: Periodický usazovák[1]

Množství suspenze, které je zařízení schopné zpracovat závisí tedy přímo na jeho geometrii a usazovací rychlosti.

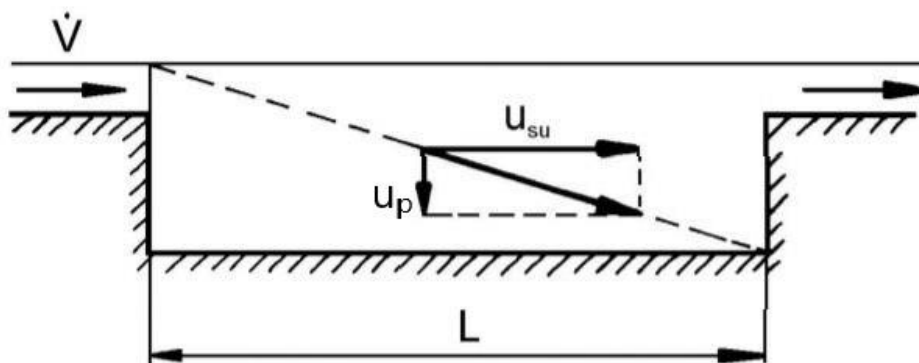
$$\dot{V} = \vec{u}_p \cdot S = \frac{H \cdot S}{t} \quad (3.1.1)$$

Kde \vec{u}_p je nejmenší usazovací rychlost částic a S půdorysná plocha nádrže. Dalším důležitým faktorem je tzv. manipulační doba t_m (odčerpání, čištění, napouštění). Po jejím započtením získáváme přesnější rovnici pro výkonnost zařízení (3.1.2).

$$\dot{V}_R = \frac{S \cdot H}{t + t_m} \quad (3.1.2)$$

3.2 Polo-kontinuální usazovák (průtočný)

Hlavní rozdíl mezi vsádkovým a průtočným usazovákem je v přívodu suspenze. U vsádkového se přivede určité množství, které se následně nechá usadit, zatímco u průtočného je suspenze přiváděna kontinuálně a zároveň se kontinuálně odvádí i vyčištěná kapalina. Tento proces trvá až do naplnění kalové kapacity, kdy se proces zastaví, doodčerpá se vyčištěná kapalina a vybere se kal z kalového prostoru. Jedná se o nádrže obdélníkového, čtvercové či kruhové průřezu. Vtok musí být uzpůsoben tak, aby nedocházelo k vyplavování již usazených částic.



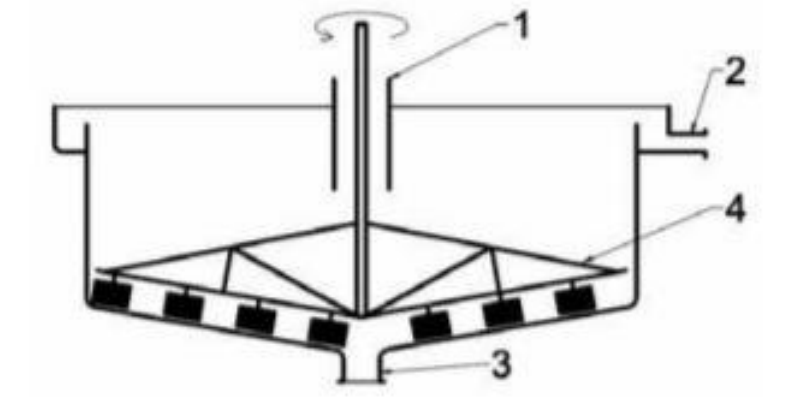
Obrázek 10: Polo-kontinuální usazovák[1]

Při návrhu polo-kontinuálního usazováku se vychází z rychlosti usazování částic \vec{u}_p , délky usazovacího zařízení L a rychlosti průtoku suspenze \vec{u}_{su} . Je potřeba zajistit, aby se i nejmenší a nejlehčí částice usadily, čehož se dá docílit návrhem dostatečné délky usazováku L . Výpočet minimální délky usazováku tedy vypočteme pomocí rovnice (3.2.1), kde H je potřebná hloubka usazení částic.

$$L_{min} = H \frac{u_{su}}{u_p} \quad (3.2.1)$$

3.3 Kontinuální Usazovák

Jedná se o zařízení, kde je dosaženo jak kontinuálního přívodu suspenze (1), tak kontinuálního odvodu kalu (3) a vyčištěné kapaliny (2). Kal se shromažďuje v kalové jámce, ať už samovolně působením gravitace, či je mechanizačně shrabován (4). K odstraňování usazeného kalu z jámky se pak mohou použít kupříkladu kalová čerpadla.

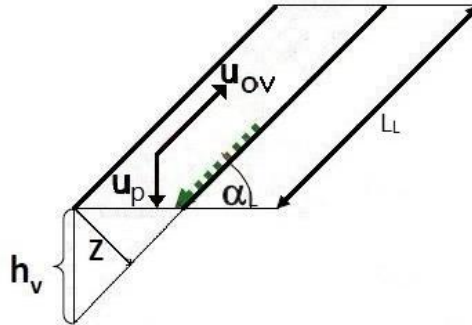


Obrázek 11: Dorrův kontinuální usazovák [1]

Výpočet je obdobný jako u předchozích případů, s rozdílem kruhové půdorysné plochy a zanedbatelné manipulační doby. Ta bude stále potřebná k údržbě zařízení, avšak do výpočtu výkonnosti ji zde nebudu uvažovat. Objemová výkonnost je tedy dána pouze plochou k usazování a rychlostí sedimentace částic dle rovnice (3.1.1).

3.4 Lamelové usazování

Jak jsem již zmínil v kapitole jedna, hlavní výhodou lamelového usazování je snížení potřebné půdorysné plochy zařízení. Přidávám toto zařízení tedy pro případ, že by předchozí usazovací zařízení nebyla rozměrově vyhovující.



Obrázek 12: Průtok lamelami

Při návrhu lamel je třeba aby částice překonala vzdálenost h_v rychlostí sedimentace u_p dříve, než urazí vzdálenost L_L průměrnou rychlostí u_{OV} vyvolanou proudem OV.

$$L_{Lmin} = h_v \frac{u_{OV}}{u_p} \quad (3.4.1)$$

$$\cos \alpha_L = \frac{z}{h_v} \quad (3.4.2)$$

$$\dot{V} = u_{OV} \cdot i_L \cdot b_L \cdot z \quad (3.4.3)$$

Úhel sklonu α a vzdálenost mezi lamelami je třeba volit s ohledem na možné ucpávání lamel během chodu. Počet lamel i_L a jejich šířku b pak volíme na základě vhodného poměru stran půdorysu a potřebného objemového výkonu \dot{V} .

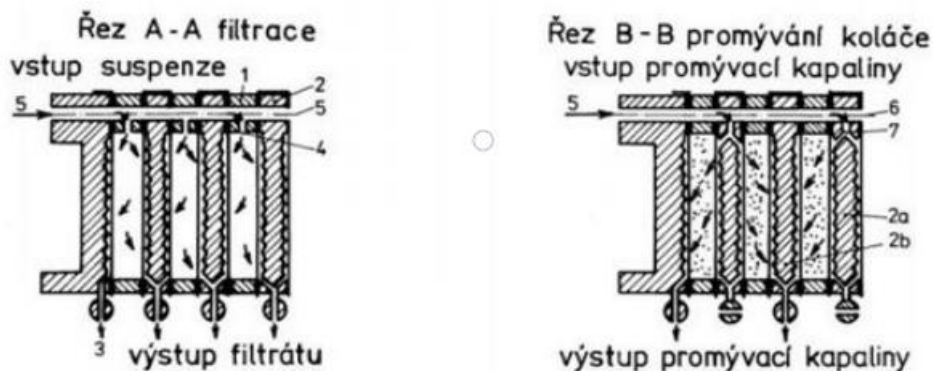
Spojením rovnic (3.4.1), (3.4.2) a (3.4.3) získáme rovnici (3.4.4) pro výpočet maximálního průtoku, který by dosazená geometrie zvládla.

$$\dot{V} = i_L \cdot b_L \cdot L_L \cdot u_p \cdot \cos \alpha_L \quad (3.4.4)$$

3.5 Kalolis

Běžné jsou dva základní typy kalolisu, a to komorové a membránové. Membránové kalolisy dosahují až dvojnásobného výkonu ve srovnání s odpovídajícími komorovými kalolisy [23]. Velkou výhodou kalolisů je možnost jejich automatizace. Jako filtrační látka se používá nejčastěji polypropylen omezující přilnavost filtračního koláče k filtrační látce.

Cílem je dosažení maximální sušiny v pevné fázi při dosažení co nejvyšší čistoty kapalné fáze. Pracovní prostor je tvořen komorami filtračních desek, které mají v pracovní části drenážní systém potažený filtrační tkaninou. Suspenze prochází přes filtrační tkaninu a pevné částice jsou na této vrstvě zachyceny, čímž dochází k tvorbě filtračního koláče, který je, na konci pracovního cyklu po otevření kalolisu, z kalolisu odstraněn a odfiltrovaná kapalina je drenážním systémem odvedena.



Obrázek 13: Schéma procesu kalolisu [24]

Komorový kalolis

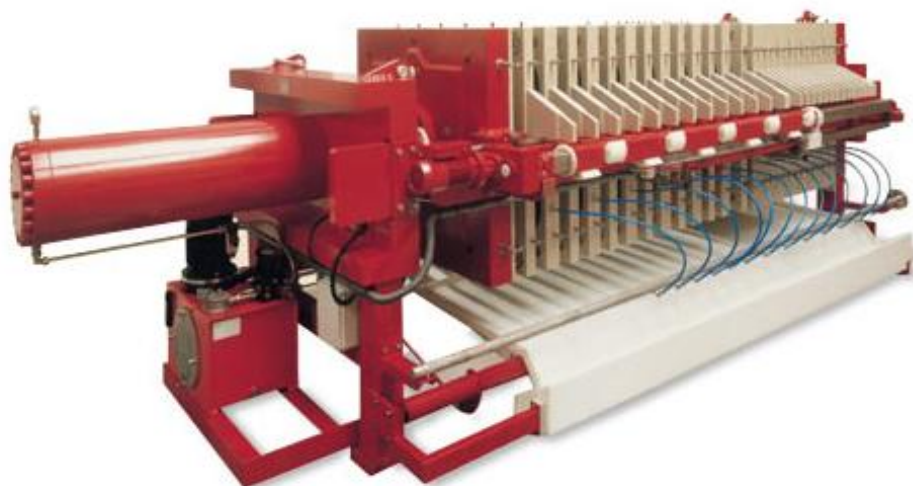
Filtrace probíhá v prostoru vytvořeném stlačením filtračních desek s drenáží pro sběr a odvod kapaliny. Na filtrační desky je položena filtrační tkanina (plachetka), která při filtraci zachytává pevné částice filtrované suspenze, avšak kapalinu propouští dále. Kapalina prostupuje přes tkaninu a je odváděna drenáží filtrační desky. Pevná fáze, zachycená na filtrační tkanině, vytváří filtrační koláč, který s časem narůstá a zvyšuje odpor filtrace. Filtrace proto vyžaduje neustálé zvyšování plnicího tlaku, aby byl odpor překonán a proces pokračoval. Název komorová filtrace je odvozen od komor vytvořených svazkem desek.



Obrázek 14: Komorový kalolis [23]

Membránový kalolis

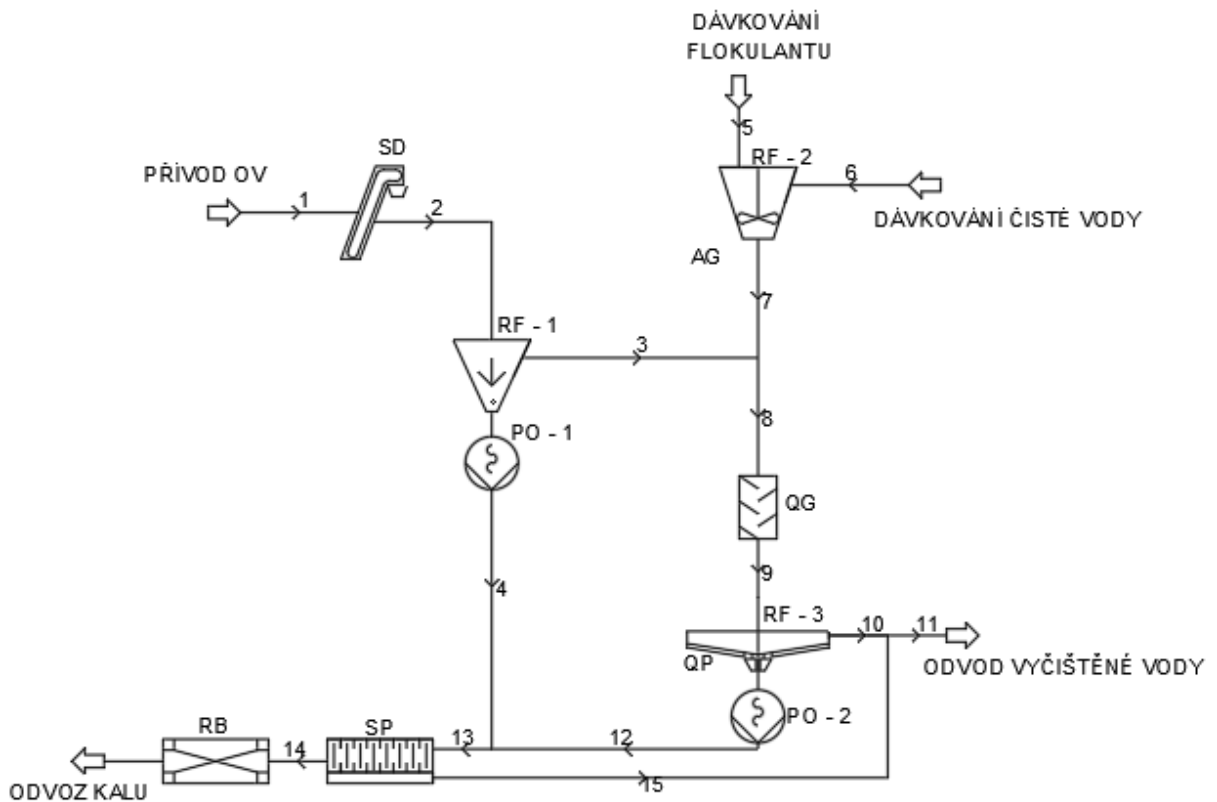
Modernější verze kalolisu, kde je drenáž filtrační desky na pohyblivé membráně. Membrána slouží k stlačení filtrační vrstvy a tím k částečnému odvodnění filtračního koláče. Proces je tedy stejný jako u komorového kalolisu, s přidáním odvodňovací fáze. Jako pomocné tlakové médium je nejčastěji používána voda nebo vzduch.



Obrázek 15: Membránový kalolis [23]

4 Bilance linky

Na začátek linky doporučuji umístit česle. V případě, že již příchozí OV prošla tímto základním čištěním, česle nebudou třeba. OV bude následně samospádem svedena do lamelového usazovacího zařízení, kde by se oddělily ty největší částice. Takto předčištěná voda bude smíchána s flokulantem, připraveným v rozpouštěcí nádrži, pomocí statického směšovače KÉNICS a následně vpuštěna do kontinuálního usazovacího zařízení Dorr. V zařízení Dorr dojde k zahuštění a oddělení kalu, který bude následně čerpán na odvodnění do kalolisu. Do kalolisu bude také vpuštěn sediment z lamelového usazováku. Odvodněný kal bude skladován v kontejnerech a odvážen. Vyčištěná voda z kalolisu a z usazovacího zařízení Dorr by měla splňovat požadavky na její vyčištění, bude tedy čerpána opět k použití v technologii.



Obrázek 16: Schéma linky

<u>Tabulka proudů</u>			
Č.	Název proudu	Množství	Jednotky
1	Přívod OV do SD	150	[m ³ /hod]
2	Odvod OV z SD	150	[m ³ /hod]
3	Vyčištěná voda z RF - 1	142,5 ÷ 150	[m ³ /hod]
4	Kal z RF - 1	0 ÷ 7,5	[m ³ /hod]
5	Dávkování flokulantu do RF - 2	1,2	[kg/hod]
6	Dávkování pitné vody do RF - 2	1,2	[m ³ /hod]
7	Výstup rozpuštěného flokulantu z RF - 2	~1,2	[m ³ /hod]
8	Spojení potrubní větve 3 a 7 do QG	143,7 ÷ 151,2	[m ³ /hod]
9	Odvod smíchaných flokulí s OV z QG do RF - 3	143,7 ÷ 151,2	[m ³ /hod]
10	Odvod vyčištěné vody z RF - 3	~100	[m ³ /hod]
11	Spojení větve 10 a 15	130 ÷ 134,5	[m ³ /hod]
12	Odvod kalu z RF - 3	~50	[m ³ /hod]
13	Spojení větve 4 a 12 do SP	50 ÷ 57,5	[m ³ /hod]
14	Odvod kalu z SP do RB	20 ÷ 23	[m ³ /hod]
15	Odvod vyčištěné vody z SP	30 ÷ 34,5	[m ³ /hod]

Tabulka 7: Bilanční tabulka proudů

5 Výpočet konkrétních zařízení

V této kapitole navrhu a spočítám již jednotlivá zařízení výsledné čisticí linky.

Na začátek linky umístím usazovací nádrž pro oddělení všech částic nad $100 \mu m$ v průměru. OV se bude převážně skládat z půdních částic, proto jako první spočítám usazovací rychlosti jednotlivých možných složek.

5.1 Usazovací rychlosti jednotlivých částic

$$\vec{u}_i = \frac{2 r_i^2 [\rho_i - \rho] \vec{g}}{9 \mu} \quad (5.1.1)$$

$$r_i = 50 \mu m$$

$$\rho = 998,1 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,001 \text{ Pa} \cdot s$$

$$\rho_{uran} = 19\,000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{uranová\ ruda} = 8\,000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{oxidy\ uranu} = 2\,000 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{křemík} = 2\,500 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{písek/hlína} = 1\,500 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{křemenné\ části} = 2\,000 \text{ kg/m}^3$$

Výpočet rychlostí sedimentace provádím pomocí rovnice (2.1.6). Postupným dosazením hustot jednotlivých složek se dopracuji k výsledným rychlostem každé složky.

Výsledné usazovací rychlosti:

$$\mathbf{u}_{uran} = \mathbf{0,098 \text{ m/s}}$$

$$\mathbf{u}_{uranová\ ruda} = \mathbf{0,038 \text{ m/s}}$$

$$\mathbf{u}_{oxidy\ uranu} = \mathbf{0,006 \text{ m/s}}$$

$$\mathbf{u}_{křemík} = \mathbf{0,008 \text{ m/s}}$$

$$u_{\text{písek/hlína}} = 0,003 \text{ m/s}$$

$$u_{\text{křemenné části}} = 0,006 \text{ m/s}$$

Při sedimentaci se však částice navzájem ovlivňují, a to jejich sedimentační rychlost výrazně zvyšuje. Ve zprávě [11] byl popsán experiment pro měření rychlosti poklesu rozhraní suspenze v dané oplachové vodě. Při zahrnutí dat z této zprávy, stanovuji výpočtovou usazovací rychlost u_p na 2 mm/s.

5.2 Sedimentační zařízení

Nyní když znám nejmenší rychlosti usazování, můžu spočítat minimální potřebnou plochu usazovacího zařízení.

Minimální plocha usazovacího zařízení

$$S_{min} = \frac{\dot{V}}{u_p} = \frac{150}{3,6 \cdot 2} = 20,83 \text{ m}^2 \quad (5.2.1)$$

Výsledná potřebná půdorysná plocha vychází cca 21 m^2 . Sedimentační nádrž o tak prostorné půdorysné ploše je příliš velká. Snížím tedy potřebnou půdorysnou plochu pomocí lamelového usazování.

Výpočet lamelového usazovacího zařízení

Spojením rovnic (3.4.4) a (5.2.1) získám rovnici (5.2.2), která mi udává vztah mezi pracovní plochou lamel a parametry lamelového usazováku.

$$S_L = i_L \cdot L_L \cdot b_L \cdot \cos \alpha_L \quad (5.2.2)$$

i_L = počet lamel

L_L = délka lamely

b_L = šířka lamely

α_L = úhel sklonu lamel

Cílem je získat lamelový usazovák s pracovní plochou větší než 21 m^2 . Postupnou iterací, zohledňujíc zároveň doporučené hodnoty z literatury, jsem se dopracoval k následujícím hodnotám:

$$i_L = 20$$

$$L_L = 1,2 \text{ m}$$

$$b_L = 1,4 \text{ m}$$

$$\alpha_L = 50^\circ$$

Pracovní plocha pro tyto parametry vychází $21,6 \text{ m}^2$

$$S_L = 20 \cdot 1,2 \cdot b_L \cdot \cos\left(50 \cdot \frac{\pi}{180}\right) = 21,6 \text{ m}^2 \quad (5.2.3)$$

Výsledná půdorysná plocha lamel:

Pro zjištění, kolik půdorysné plochy jsem lamelami ušetřil, jsem určil vztah (5.2.4) pro půdorysnou plochu, které budou lamely zabírat.

$$S_{Lp} = b_L \cdot \left(i_L \cdot \frac{z}{\sin(\alpha_L)} + L_L \cdot \cos(\alpha_L) \right) \quad (5.2.4)$$

Kde z je vzdálenost mezi lamelami rovnající se $0,25 \text{ m}$.

Po dosazení,

$$S_{Lp} = 1,4 \cdot \left(20 \cdot \frac{0,25}{\sin\left(50 \cdot \frac{\pi}{180}\right)} + 1,2 \cdot \cos\left(50 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \right) \quad (5.2.5)$$

dostávám půdorysnou plochu lamelové vestavby $S_{Lp} = 10,22 \text{ m}^2$. Zde je vidět, že snížení potřebného prostoru, oproti běžné sedimentaci, je znatelné.

5.3 Rozpouštěcí nádrž

Pro přípravu flokulantu bude třeba navrhnout míchací zařízení, schopné držet krok s množstvím OV vycházející z lamelového usazováku. Při návrhu budu vycházet z dat mi poskytnutých v doktorské zprávě [12] a [27].

Flokulant je třeba nejprve připravit rozmícháním v čisté vodě, při poměru 1 g na 1 litr vody. Rozmíchání flokulantu potřebuje dostatek času, cca $20 \div 60 \text{ min}$ [27]. Dále je třeba znát dávkování flokulí. Ze zprávy [27], volím z diagramů jako vhodné dávkování 8 litrů flokulí na m^3 OV. Nyní jsem schopný stanovit potřebnou objemovou výkonnost míchací nádrže,

$$\dot{V}_f = \dot{V}_l \cdot 8 = 150 \cdot 8 = 1200 \text{ l/hod} \quad (5.3.1)$$

kde \dot{V}_l je objemový tok OV vystupující z lamelového usazováku. Pro výpočet volím $\dot{V}_l = \dot{V}$ pro případ, že mi lamelový usazovák nic nezachytí.

Pro osmihodinovou pracovní směnu, bude výhodnější provozovat dvě míchací nádoby. Nádoby navrhuji kruhové se čtyřmi narážkami a šesti-lopatkovým míchadlem. Jedna nádoba tedy bude muset minimálně připravit flokule o objemovém výkonu \dot{V}_{fmin} .

$$\dot{V}_{fmin} = \frac{\dot{V}_f}{2} = 0,6 \text{ m}^3/\text{hod} \quad (5.3.2)$$

Výpočet geometrie nádoby

Při výpočtu válcových nádob se vše odvíjí od průměru nádoby d_f . Nechceme mít čerpadlo příliš hluboko, aby došlo k homogennímu promíchání suspenze, ale také nechceme průměr nádoby příliš velký, jelikož nám roste příkon na míchadlo s pátou mocninou jeho průměru (viz. 5.3.7). Optimální výška hladiny v napuštěné nádobě se pohybuje někde kolem výsledku rovnice (5.3.3).

$$H_f = 1,2 \cdot d_f \quad (5.3.3)$$

Průměr nádoby se bude odvíjet od potřebného objemu. Pokud stanovíme potřebnou dobu míchání na 60 minut, pak by bylo potřeba aby zařízení pojmul 0,6 m³ suspenze. Při zohlednění manipulační doby, stanovuji minimální objem zařízení na cca 1 m³. Iteračně pak volím průměr nádoby 1 metr, při kterém výška nádoby pak vychází 1,2 m

$$H_f = 1,2 \cdot 1 = 1,2 \text{ m} \quad (5.3.4)$$

a objem nádoby 1,2 m³.

$$V_f = H_f \cdot d = 1,2 \cdot 1 = 1,2 \text{ m}^3 \quad (5.3.5)$$

Pro rychloběžné míchadlo umístěné centricky, je vhodné instalovat 4 svislé narážky o šířce S_{Nf} .

$$S_{Nf} = 0,1 \cdot d_f = 0,1 \text{ m} \quad (5.3.6)$$

Naše nádoba tedy bude kruhová o průměru 1 m, výšce 1,2 m a objemu 1,2 m³.

Návrh míchadla rozpouštěcí nádrže

Při návrhu a optimalizace míchadla nás zajímá jeho příkon, potřebný k dostatečnému promíchání suspenze. K tomu nám bude sloužit rovnice (5.3.7) určená pro výpočet bezrozměrného příkonového čísla.[8]

$$Po = \frac{P}{\rho \cdot n_m^3 \cdot d_m^5} \quad (5.3.7)$$

Z rovnice je patrné, že průměr míchadla bude mít největší dopad na potřebný příkon. Pro jeho správnou funkčnost je však potřeba, aby byl průměr míchadla alespoň třetinový, pro rychloběžná míchadla a poloviční, pro pomaloběžná míchadla, vůči průměru nádoby [8].

$$d_m \geq \frac{1}{3} d_f \quad (5.3.8)$$

Pro stanovení výkonu bude dostatečné držet se již doporučených výkonů pro šesti-lopatková míchadla, které jsou v rozmezí $150 \div 590 \text{ W/m}^3$ [8]. Pro rozpouštěcí nádrže je měrný příkon cca $250 \div 300 \text{ W/m}^3$ [8].

Pro stanovení příkonového čísla vycházím z rovnice (5.3.9) ze skript [8]. Koeficienty získám z tabulky 7.

$$Po = \left[\left(\frac{A_1}{Re} \right)^{A_2} + \frac{A_3}{Re^{A_4} Re^{A_5}} + A_6 \right]^{\frac{1}{A_2}} \quad (5.3.9)$$

K výpočtu bude zapotřebí znát Reynoldsovo číslo ve tvaru používaném v teorii míhání.

$$Re = \frac{n_m \cdot d_m^2 \cdot \rho}{\mu} \quad (5.3.10)$$

Pokud vše dosadím do rovnice (5.3.9) získám rovnici (5.3.10) o jedné neznámé a to otáčkách n_m . Pro lopatkové míchadlo jsou doporučené otáčky řádově v desítkách za minutu ($20 \div 150 \text{ ot/min}$) [8].

$$\left[\left(\frac{A_1}{Re} \right)^{A_2} + \frac{A_3}{Re^{A_4} Re^{A_5}} + A_6 \right]^{\frac{1}{A_2}} = \frac{P}{\rho \cdot n_m^3 \cdot d_m^5} \quad (5.3.11)$$

Pokud za hustotu a viskozitu dosadím parametry vody, pak se postupnou iterací dostanu na hodnoty:

- Průměr míchadla $d_m = 0,4 \text{ m}$
- Otáčky míchadla $n_m = 120 \text{ ot/min}$
- Příkon míchadla $P = 250 \text{ W}$

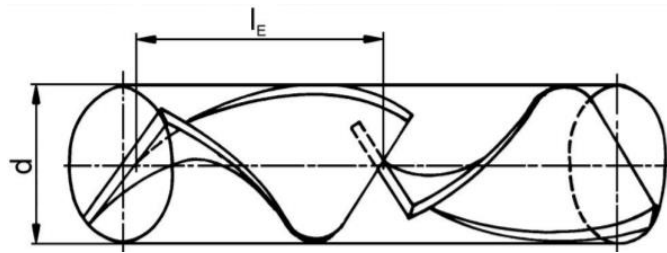
Do rozpouštěcí nádrže je však přimíchávána krystalická látka, která vlastnosti směsi ovlivňuje.

Poř. č.	Název míchadla norma	A₁	A₂	A₃	A₄	A₅	A₆
1	kotvové míchadlo CVS 69 1014	180	1,463	20,80	0,438	0	0
2	šroubové míchadlo CVS 69 1028	233	1,799	24,53	0,410	0	0
3	šroubové míchadlo excentrické	154	1,151	4,574	0,116	0	0
4	listové míchadlo CVS 69 1016	115	1,619	91,88	0,457	0	0
5	pásové míchadlo CVS 69 1029	296	1,234	8,743	0,397	0	0
6	čtyřnásobné lopatkové míchadlo	138	1,648	0	0	0	6,009
7	turbínové míchadlo s dělicím kotoučem CVS 69 1021	73,1	1,595	-6,510	$3,24 \cdot 10^{-5}$	1	13,44
8	turbínové míchadlo bez dělicího kotouče	73,1	1,549	-2,68	$6,25 \cdot 10^{-3}$	0,5	8,56
9	šestilopatkové míchadlo se šikmými lopatkami CVS 69 1020	64,0	0,836	-5,500	0,617	0	1,56
10	vrtulové míchadlo CVS 69 1019	40	0,640	-0,906	0,365	0	0,511
11	zubové míchadlo CVS 69 1038.1	67,0	0,526	-1,500	0,386	0	0,764
12	zubové míchadlo CVS 69 1038.2	67,0	0,420	-1,090	0,258	0	0,681
13	třílopatkové míchadlo se šikmými lopatkami CVS 69 1025.3	47,5	1,074	-0,214	$3,145 \cdot 10^{-8}$	1,609	1,108

Tabulka 8: Hodnoty parametrů pro vybrané typy míchadel [8]

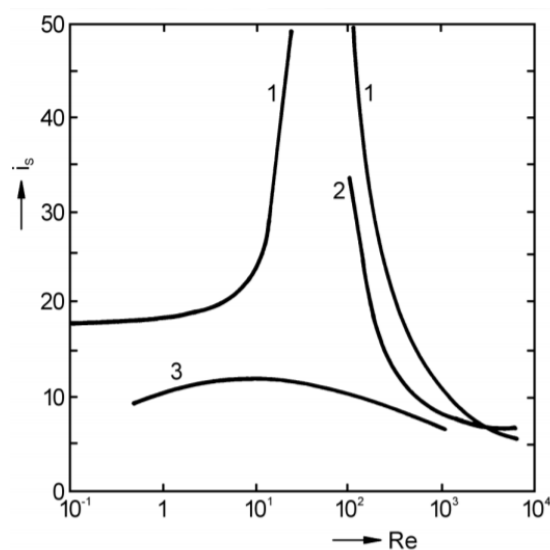
5.4 Smíchání OV s flokulemi

Pro smíchání flokulí s OV jsem se rozhodl sáhnout po statickém směšovači KÉNIC S. Firma FLOWSERVICE [25] vytvořila experimentální modely pro míchání flokulantu, pomocí statických směšovačů, které mají pozitivní výsledky. Zrání flokulí bud eprobíhat až v následující technologii. Jako statický směšovač volím šroubový směšovač se střídavě instalovanými pravotočivými a levotočivými elementy svírající vůči sobě úhel 180°. Poměr jejich délky l_E vůči průměru potrubí se pohybuje mezi $1,24 \div 2,5$ [8].



Obrázek 17: Schéma statického směšovače Kénics[8]

Pro stanovení potřebného množství prvků statického směšovače je třeba znát jeho charakteristiku zadanou výrobcem. Kde i_s je počet elementů a Re je Reynoldsovo číslo.



Obrázek 18: Závislost počtu elementů potřebných k homogenizaci Re
1- šroubový směšovač; 2- diskový směšovač; 3- lamelový směšovač.[8]

Pro výpočet Reynoldsova čísla použijeme vztah (5.4.1) kde hustotu a dynamickou viskozitu budu považovat vlastnostmi za vodu.

$$Re = \frac{u \cdot \rho \cdot d}{\mu} \quad (5.4.1)$$

Rychlosti kapalin v potrubí jsou ideální kolem 1,2 m/s. Z objemového množství protékající suspenze \dot{V}_s , která je součet OV a rozmíchaných flokulí.

$$\dot{V}_s = \dot{V}_l + \dot{V}_f = 150 + 1,2 = 151,2 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5.4.2)$$

Průměr potrubí d_p , tedy stanovíme z rovnice (5.4.3).

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_s}{u \cdot \pi}} \cong 0,2 \text{ m} \quad (5.4.3)$$

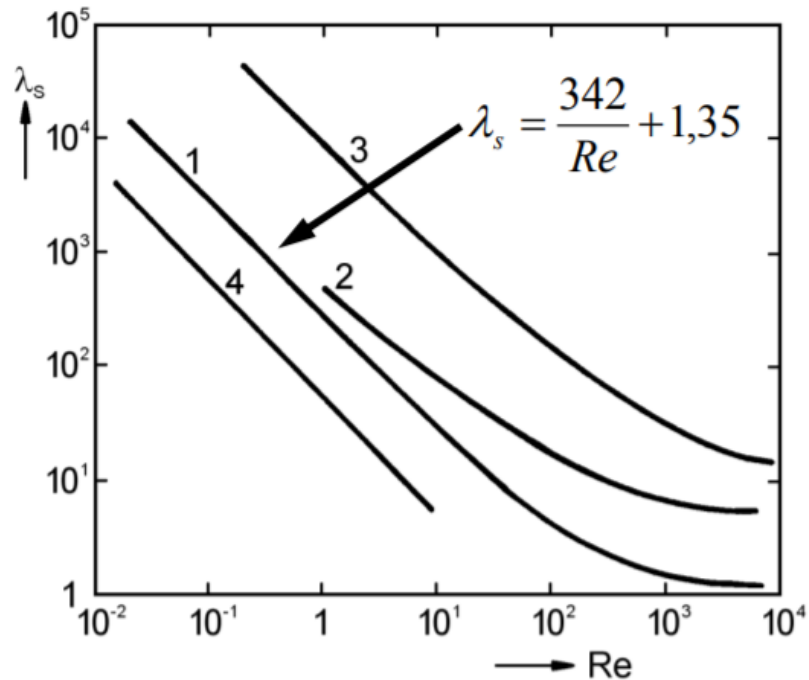
Při DN200 vychází Reynoldsovo číslo $2,4 \cdot 10^5$, což by (při zanedbání, že Šírova kolerace platí pouze pro Re od 10^{-2} do 10^4) odpovídalo na 5 elementů. Při poměru $l_E/d = 2$ bude mít jeden statických směšovač délku 0,4 m, a tím pádem celý řetězec bude 2 m dlouhý.

Tlaková ztráta průtokem

Určení tlakové ztráty vychází z Darcy-Weissbachovy rovnice pro výpočet tlakové ztráty průtokem potrubí,

$$e_z = \lambda_s \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (5.4.4)$$

kde tlakový součinitel λ_s je funkcí geometrie směšovače a Reynoldsova čísla. Pro směšovač KENICS, při poměru $l_e/d=2$, navrhl Šír korelaci na obrázku 19.[8]



Obrázek 19: Závislost ztrátového součinitele na Re[8]

Vypočteme tedy ztrátový součinitel

$$\lambda_s = \frac{342}{Re} + 1,35 \cong 1,35 \quad (5.4.5)$$

A následně můžeme vypočíst měrnou ztrátu mechanické energie.

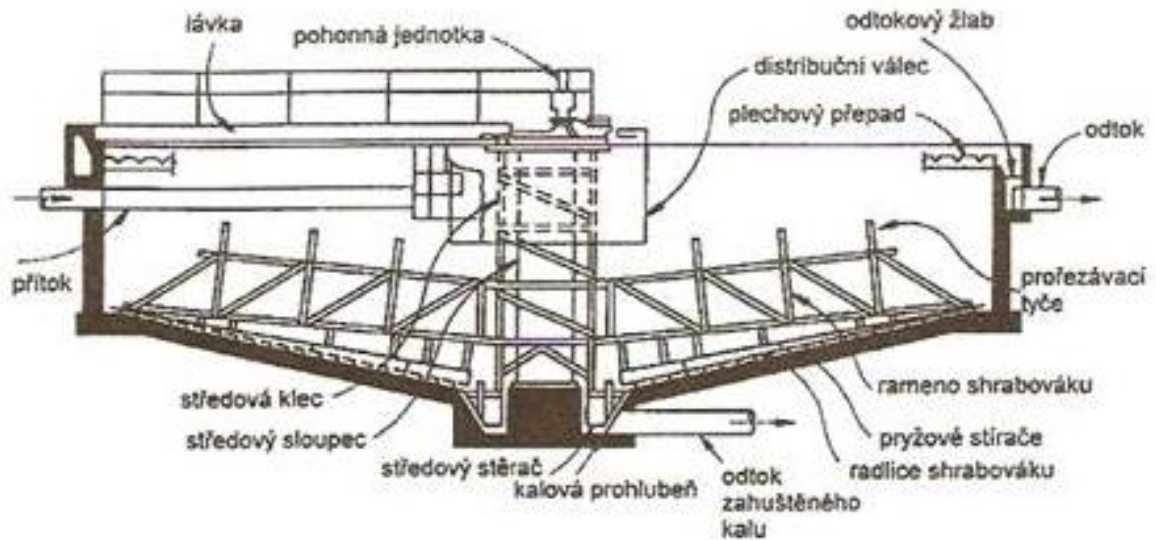
$$e_z = 1,35 \frac{2}{0,2} \frac{1,2^2}{2} = 9,73 \text{ J/kg} \quad (5.4.6)$$

Tlaková ztráta pak bude 9730 Pa, což je zanedbatelné.

$$\Delta p = e_z \cdot \rho = 9,73 \cdot 1000 = 9730 \text{ Pa} \quad (5.4.7)$$

5.5 Konečné usazení/zahuštění kalu

Jako zařízení pro finální usazení volím kontinuální usazovák Dorr. Jedná se o zařízení, kde je dosaženo jak kontinuálního přívodu suspenze (1), tak kontinuálního odvodu kalu (3) a vyčištěné kapaliny (2). Kal se shromažďuje v kalové jínce, ať už samovolně působením gravitace, či je mechanizačně shrabován (4).



Obrázek 20: Schéma usazovací nádrže [23]

Shrabovací zařízení těchto usazováků se otáčí velmi pomalu, od 2,5 do 20 otáček za hodinu.

Geometrie nádrže

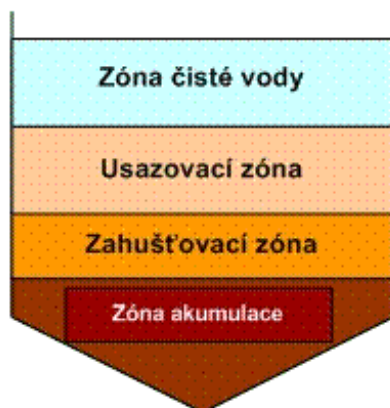
Nejprve vypočtu stanovím minimální objem nádrže. Použiji k tomu objem, který přitéká ze statických směšovačů a dobu zdržení v nádrži.

$$V_{dmin} = \dot{V}_s \cdot t_z \quad (5.5.1)$$

Kde \dot{V}_s je přítok suspenze ze statického směšovače a t_z je doba zdržení suspenze v nádrži.

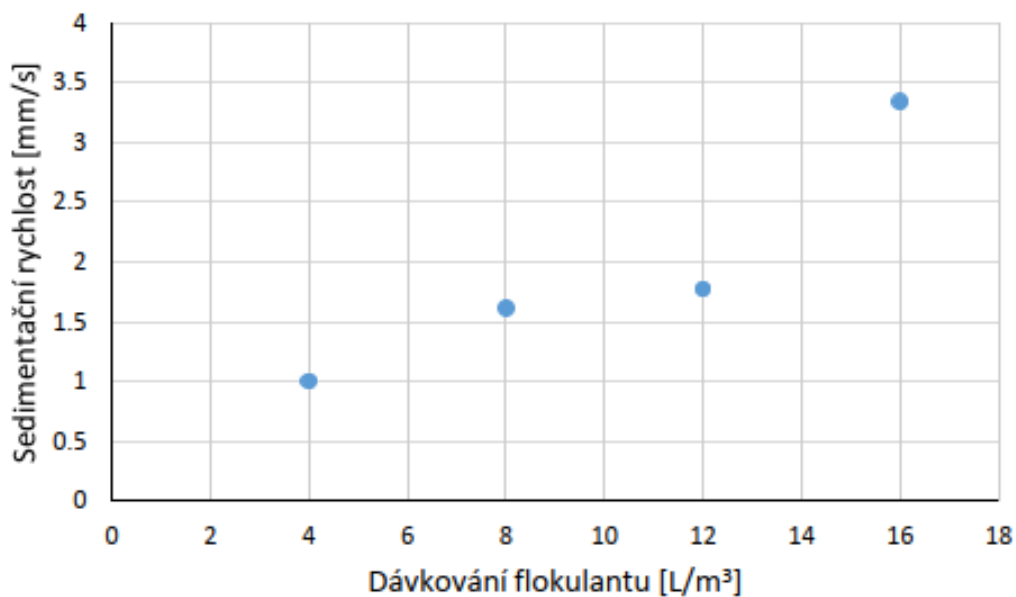
Flokule potřebují pár minut na dozrání, ale zároveň by neměla být doba zdržení příliš dlouhá, aby nedocházelo k anaerobnímu rozkladu látek.

Usazovací nádrž má několik zahušťovacích zón, a pro jejich správnou funkčnost by, dle [23], neměla mít hloubku nádrže menší jak 3 m.



Obrázek 21: Zóny v zahušťovací nádrži [23]

Ze zprávy [27] získávám data o sedimentačních rychlostech v závislosti na dávkování flokulí.



Obrázek 22: Závislost sedimentační rychlosti na množství flokulantu [27]

Z ní získávám, že se průměrná sedimentační rychlost suspenze, pro dávkování 8 litrů flokulantu na 1 m³ suspenze, pohybuje nad 1,5 mm/s.

Pro stanovení minimálního průměru nádrže existuje vztah (5.5.2) [1],

$$R_{min} = \sqrt{R_1^2 + \frac{\dot{V}_s}{\pi \cdot u_f}} \quad (5.5.2)$$

Kde R_1 je poloměr vstupního potrubí a u_f je sedimentační rychlost částic. Průměr vstupního potrubí bude stejný jako průměr potrubí statického směšovače, tedy 0,2 m.

$$R_{min} = \sqrt{0,1^2 + \frac{151,2}{3,6 \cdot \pi \cdot 1,5}} = 2,99 \text{ m} \quad (5.5.3)$$

Výpočet (4.6.3) nám stanovil minimální poloměr nádrže, aby částice nebyla odnesena na přelivnou hranu, kde se má nacházet pouze již vyčištěná voda.

Dle doby zdržení, musí mít nádrž minimální objem, aby byla schopná pojmout množství suspenze za tuto dobu vyprodukovanou. Ze správy [12] zjišťuji, že potřebná doba zdržení je řádově v minutách. Při zvolení doby zdržení 30 minut, získám minimální objem zařízení:

$$V_{dmin} = 151,2 \cdot \frac{30}{60} = 75,6 \text{ m}^3 \quad (5.5.4)$$

Pokud se budu držet doporučené hodnoty pro minimální hloubku nádrže 3 m, pak získám průměr nádrže d_d :

$$d_d > \sqrt{\frac{4 \cdot V_{dmin}}{h_{dmin} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 75,6}{3 \cdot \pi}} = 5,7 \text{ m} \quad (5.5.5)$$

Navrhuji tedy nádrž o průměru 6 m a hloubky 3 m.

5.6 Odvodnění kalu

Pro odvodnění kalu volím komorový kalolis. Velikost lisu je charakterizována počtem filtračních desek a délkou jejich hrany. Kalolisy se vyrábí až se 130 deskami o maximálních velikostech 2x2 metrů, s filtračním povrchem až 800 m². Materiál filtračních desek je ve většině případů homogenní polypropylen [23].

Dále je kalolis vybaven hydraulickým systémem nutným pro sevření svazků filtračních desek s plachetkami. Sestává se z vysokotlakého hydraulického válce a hydraulického agregátu, který je zdrojem tlaku pro pohyb pístu hydraulického válce, uzavření a otevření zařízení. Systém po celou dobu filtrace vytváří přednastavenou sílu na svazek desek tak, aby byl pracovní prostor pro filtraci maximálně těsný.

K výpočtu filtru potřebuje znát dobu filtrace a objem suspenze. Pokud budeme vycházet ze zprávy [27] kde vychází množství kalu po flokulaci přibližně 50 m³ za hodinu, pak musí celková plocha filtru být schopná odfiltrovat za směnu:

$$V_k = 8 \cdot 50 = 400 \text{ m}^3 \quad (5.6.1)$$

Při filtraci je hnací silou rozdíl mezi tlakem před a za filtrační přepážkou. Rychlost filtrace u_k je poměr rozdílu těchto tlaků ku odporu.

$$u_k = \frac{\Delta p}{R} \quad (5.6.2)$$

Filtrace probíhá buď za konstantní rychlosti (zvyšuje se rozdíl tlaků s narůstající tloušťkou filtračního koláče), nebo za konstantního rozdílu tlaků (filtrace se průběžně zpomaluje s rostoucím odporem)

Filtrační rovnice při konstantním tlaku [26]:

$$q_F^2 + q_F \cdot q_M - K_F \cdot \tau_F = 0 \quad (5.6.3)$$

Filtrační rovnice při konstantní rychlosti [26]:

$$q_F^2 + 2 \cdot q_M \cdot q_F - 2 \cdot K_F \cdot \tau_F = 0 \quad (5.6.4)$$

Kde q_F vyjadřuje objem filtrátu, který protekl filtrační plochou jednotkové velikosti, τ_F zastupuje dobu trvání filtrace a K_F a q_M jsou filtrační konstanty. q_M je daná vlastnostmi filtrační přepážky a K_F je závislá na rozdílu tlaků a viskozitě filtrátu.

Bez experimentů nebude přesný výpočet pomocí těchto rovnic možný. Přistoupím tedy k jinému řešení.

Pracovní cyklus kalolisu si rozložím na několika po sobě jdoucích fází:

- Uzavření kalolisu a vytvoření filtračních komor
- Plnění + tvorba filtračního koláče
- Ukončení plnění, otevření kalolisu a jeho vyprázdnění

Pokud budeme uvažovat, že manipulační doba bude zaobírat přibližně 2 hodiny práce, pak můžeme odhadnout, že čas samotné filtrace kalolisu bude při osmihodinové směně přibližně 5 hodin. Tento čas odpovídá běžným dobám filtrace. Během této doby bude muset být schopný pojmout suspenzi vyprodukovanou za celou směnu V_k

Což tedy znamená přibližně 80 m^3 suspenze každou hodinu.

$$\dot{V}_{ks} = \frac{V_k}{5} = \frac{400}{5} \cong 80 \text{ m}^3/\text{hod} \quad (5.6.5)$$

Běžné filtrační rychlosti, které se mi podařilo dohledat pro případy s podobnými počátečními podmínkami, se pohybují od 0,7 do 1,5 m³ za hodinu na jednotku plochy 1 m²[26].

Pokud budu požadovat filtrační rychlost 1 m³/hod/m² pak bude potřebná celková filtrační plocha:

$$S_{kmin} = \frac{80}{1} = 80 \text{ m}^2 \quad (5.6.6)$$

Filtrační plochu kalolisu tvoří plochy filtračních desek:

$$S_k = i_r \cdot S_r \quad (5.6.7)$$

kde i_r je počet rámců kalolisu a S_r je plocha jedné desky. Ta se dá snadno spočítat z jejich rozměrů.

$$S_r = 2 \cdot b_k \cdot h_k \quad (5.6.8)$$

Kde b_k ; h_k ; jsou šířka a hloubka jedné desky kalolisu. Volím normovaný rám desky kalolisu 1000x1000x30 mm [17].

Potřebný počet rámců je tedy:

$$i_r = \frac{S_k}{S_r} = \frac{80}{(2 \cdot 1^2)} = 40 \text{ ks} \quad (5.6.9)$$

Výsledný kalolis se bude tedy skládat ze 40 rámců o velikost 1000x1000x30 mm.

Tento rozměr odpovídá běžným rozměrům zařízení.

Obsah sušiny v kalolisu bývá v desítkách procent. V našem případě předpokládám vyšší objem sušiny, cca 40%. Výsledný objem kalu za směnu V_{sk} tedy bude:

$$V_{sk} = 0,4 \cdot V_k = 160 \text{ m}^3 \quad (5.6.10)$$

6 Basic design

6.1 Lamelový usazovák

Lamelový usazovák bude kovové konstrukce. Doporučil bych nechat si ho vyrobit a dovézt zkušenou firmou, kupříkladu firma HUTIRA CCW má v nabídce vyhovující lamelový usazovák LS-5.

Typ	Účinná usazovací plocha (m ²)	Délka (m)	Šířka (m)	Výška (m)	Hmotnost (t)	Objem vody (m ³)
LS-1	2,4	1,4	3,1	3,5	2,1	7
LS-2	5,4	2,1	4,2	4,3	3,9	18,5
LS-3	10,1	2,7	5,3	4,6	6,3	30
LS-4	15,9	4,4	6,6	4,9	11,4	53
LS-5	22,2	4,4	7,6	4,9	14	71
LS-6	31,8	8,7	6,6	4,9	19,5	111
LS-7	44,4	8,7	7,6	4,9	23,8	146
LS-9	63,5	14,9	6,6	4,9	35,4	209
LS-10	88,9	14,9	7,6	4,9	43,1	271

Tabulka 9: Technické parametry lamelových usazováků HUTIRA CCW (2021)

6.2 Rozpouštěcí nádrž

Rozpouštěcí nádrž je možno buďto si nechat dodat, či si nechat na míru vyrobit.

Aparátový list zařízení přikládám jako přílohu č.1

6.3 Kontinuální usazovák

Kontinuální usazovák dorr se staví na míru na místě.

Aparátový list nádrže přikládám jako přílohu č.2.

6.4 Kalolis

Kalolis bude nevhodnější si nechat vyrobený dodat firmou. Kupříkladu firma Xinxiang Remont Machinery Co.,LTD. Dodává vhodný kalolis XAZ80/1000-30U

Model	Filter Area(m2)	Plate Size(mm)	Cake Thickness	Filter Chamber Volume	Plate No.	Motor Power
XAZ30/870-30U	30	870*870/ 800*800	30mm	460L	23 pcs	2.2 kw
XAZ40/870-30U	40			595L	30 pcs	
XAZ50/870-30U	50			748L	38 pcs	
XAZ60/870-30U	60			902L	46 pcs	
XAZ70/870-30U	70			1056L	54 pcs	
XAZ80/870-30U	80			1210L	62 pcs	
XAZ50/1000-30U	50	1000*1000		736L	28 pcs	4.0 kw
XAZ60/1000-30U	60			889L	34 pcs	
XAZ70/1000-30U	70			1041L	40 pcs	
XAZ80/1000-30U	80			1193L	46 pcs	
XAZ100/1000-30U	100			1475L	57 pcs	
XAZ120/1000-30U	120			1777L	69 pcs	

Tabulka 10: Kalolisy od firmy Xinxiang Remont Machinery Co.,LTD.:

6.5 Technologické PFD schéma

- Příloha č.3

7 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo navrhnout linku pro hydraulické čištění a úpravu oplachových vod vzniklých při těžbě a zpracování nerostných surovin. Teorie k diplomové práci je zpracována v první a druhé kapitole. V první kapitole jsem shrnul informace o médiu. Ve druhé pak možné technologie a jejich fyzikální principy. Na závěr konci kapitoly jsem vše shrnul do přehledné porovnávací tabulky a přidal podkapitolu o Ionexových technologiích, které by se daly využít pro odseparování uranu z OV. Od kapitoly 3 jsem se již zaměřil na určitá zařízení, která jsem se rozhodl použít pro návrh dané linky. Pro přehlednost jsem je rozebíral postupně tak, jak na sebe technologicky navazují. Vzhledem k možnému umístění linky jsem při výběru technologie bral ohled především na její robustnost a spolehlivost. Následovala bilance linky a výpočet jednotlivých zařízení. Možným ekonomickým zlepšením by mohla být změna geometrie usazovacího zařízení dorr v závislosti na dávkování flokulantu, či úplná změna zařízení Dorr za jiné usazovací zařízení, kupříkladu odstředivky..

Zdroje

- [1] Hydromechanické procesy I.; prof. Ing. František Rieger, DrSc., doc. Ing. Václav Novák, CSc., Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.; nakladatelství ČVUT, 2007.
- [2] Úprava vody pro průmyslové účely; Ing. Pavel Hübner, CSc. a kolektiv; Praha 2006.
- [3] Vodárenství – Úprava vody+ prof. Ing. Igor Tesařík, DrSc. České Vysoké Učení Technické v Brně 1982.
- [4] Vodní hospodářství obcí 1 – Úprava a čištění vody. ;Ing. Kateřina Slavičková, Ph.D., ing. Marek Slaviček, Ph.D.; Nakladatelství ČVUT 2006.
- [5] Hovorka F.; Technologie chemických látek 1.; Vysoká škola chemicko-technologická v Praze; Praha 2005.
- [6] [online] 911Metallurgist; <https://www.911metallurgist.com/blog/froth-flotation-process>
- [7] Vysoké Učení Technické v Brně; Separace Pevných Částic z Heterogenní Suspenze – Bakalářská práce; Ondřej Prax; 2009
- [8] Hydromechanické Procesy II.; prof. Ing. František Rieger, DrSc., doc. Ing. Václav Novák, CSc., Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.; nakladatelství ČVUT, 2007.
- [9] [online] HST Hydro-systémy <http://www.hydrosystemy.cz/>; © 2020 hydrosystemy.cz
- [10] [online] Huber CS spol. s.r.o. <https://www.hubercs.cz/cz.html>; © 2020 Huber CS spol s.r.o.
- [11] SEDIMENTAČNÍ TEST VZORKU OPLACHOVÉ VODY A STANOVENÍ VELIKOSTI ČÁSTIC V SUSPENZI; Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D., Ing. Jiří Moravec, Ph.D.; ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY; Praha 30. 3. 2018
- [12] ZHODNOCENÍ CHEMICKÉ PŘEDÚPRAVY OPLACHOVÉ VODY PRO NÁSLEDNÉ SEPARAČNÍ PROCESY; Ing. Petr Procházka, Doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.; ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY; Praha 30. 3. 2018
- [13] [online] Učebnice chemie pro 8. ročník ZŠ; Autor neznámý; <http://www.zschemie.euweb.cz/smesi/smesi2.html>
- [14] Posouzení dosazovací nádrže pomocí matematického modelu a měření; Bc. Petr Chmátal; ČVUT Stavební fakulta; 2014/15

- [15] Stirring: Theory and Practice; Marko Zlokarnik; John Wiley & Sons, 11. 7. 2008
- [16] Využití flotace ve vodohospodářství; Přemysl Moučka; Bakalářská práce 2008; Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně; Fakulta technologická
- [17] [online] Envites - ENVITES <http://www.envites.cz>
- [18] [online] Tomas, J. Sanace území po těžbě a úpravě uranu v České republice a posuzování vlivů těchto činností na ŽP. Ministerstvo životního prostředí. 2001. <http://slon.diamo.cz/hpvt/2001/sekce/sanace/01/S01.htm>
- [19] [online] Technologie čištění důlních vod (diamo.cz)
<https://slon.diamo.cz/hpvt/2004/Z/Z11.htm>
- [20] [online] 27-Parschová, IONEXOVÉ A SORPČNÍ TECHNOLOGIE V ÚPRAVĚ VODY; (wet-team.cz)
- [21] [online] Komplexní řešení ÚPRAVY VODY | BKG - úprava vody a.s.; www.bkg.cz
- [22] [online] Technologie pro recyklaci vody; VSCHT; <http://recyklace-voda.vscht.cz/technologie>
- [23] [online] Zpracování kalů; Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů; <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/postupy.html>
- [24] Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů; INOVACE ZAŘÍZENÍ PRO SEPARACI TUHÉ A KAPALNÉ FÁZE Z PRŮMYSLOVÉHO KALU; DIPLOMOVÁ PRÁCE; Bc. Jiří Suchánek; 2014
- [25] [online] FLOQSERVICE; Statické mísiče FlowMix Série S;
<https://www.flowservice.cz/cerpadla/staticke-misice-flowmix-serie-s/>
- [26] VYOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE; CHEMICKÉ INŽENÝRSTVÍ I; Doc. Ing. Pavel Hasal, CSc.; profIng. Igor Schreiber, CSc.; Doc. Ing. Dalimil Šnita, CSc. A kolektiv.; Praha 2007
- [27] Čištění odpadních vod z proplachu hlušin; Ing. Petr Procházka; Praha 2019; ČVUT Fakulta strojní

Seznam příloh

Příloha č.1 – Aparátový list rozpouštěcí nádrže

Příloha č.2 – Aparátový list usazovacího zařízení Dorr

Příloha č.3 – PFD schéma výrobní linky

Seznam symbolů

Symbol	Název	Jednotky
F_i	Síla	[N]
d_i	Vzdálenostní průměr	[m]
ρ_i	Hustota	[kg/m ³]
μ_i	Dynamická viskozita	[Pa · s]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
ω_i	Úhlová rychlost	[°s ⁻¹]
m_i	Hmotnost	[kg]
r_i	Poloměr	[m]
e_z	Měrná tlaková ztráta	[Pa · m ³ /k]
H_i	Výška	[m]
L_i	Délka	[m]
\dot{V}_i	Objemový tok	[m ³ /s]
S_i	Plocha	[m ²]
t_i	čas	[s]
u_i	Rychlost	[m/s]

Δp	Tlakový rozdíl	[Pa]
λ_i	Tlakový součinitel	[-]
C_D	Odporový součinitel	[-]
b_i	Šířka	[m]
i_i	Počet	[ks]
α_i	Úhel	[°]
H_i	Výška	[m]
P_i	Výkon	[W]
A_i	Konstanta	[-]
n_i	Otáčky	[ot/s]