

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Bachelor thesis

Markéta KREJČÍ



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

Ve Zlíně, 24. 05. 2005

.....

jméno diplomanta

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou procesu filtrace a promývání, které spadají do předmětu Procesní inženýrství II. Obsahuje teoretické informace týkající se separačního procesu filtrace, kdy rozdělujeme heterogenní směsi na kapalinu a tuhé částice a výpočtové vztahy odvozené pro různé způsoby realizace filtračního procesu. Důraz jsem kladla i na přiblížení postupů, jakým probíhá filtrace na konkrétním filtračním zařízení.

Za cíl jsem si dala zpracovat dostupné informace do podoby přehledného studijního materiálu, který studentům proces filtrace přiblíží populární formou.

Zpracované materiály jsem upravila také do podoby elektronického učebního textu, který bude zveřejněn v systému Moodle, jenž bude sloužit nejen studentům, ale i jako materiál pro přednášejícího.

ANNOTATION

This bachelor thesis concerns in problems of filtration and rinsing which are included in a subject of Process Engineering II. It contains theoretical information referring to separating process of filtration when we separate heterogenous mixture into liquid and solid elements and calculation relations derived for different ways of realization in filtration process. I also emphasized clearing up the procedurs of a course of filtration on factual filtration machinery.

My aim was to elaborate all accessible information to a form of summarized educational material, which would put the process of filtration near to students and by popular method.

I arranged compiled material to a form of electronical textbook, which will be published in the Moodle system, which could serve either students or as a material for lecturer.

OBSAH:

ÚVOD	7
1 ZÁKLADNÍ POJMY	8
1.1 FILTRACE	8
1.1.1 Definice filtrace	8
1.1.2 Princip činnosti filtru	8
1.1.3 Rozdělení suspenzí filtrací	10
1.1.4 Rychlost filtrace	11
1.1.5 Realizace filtrace	12
1.1.6 Stadia filtrace.....	12
1.2 PROMÝVÁNÍ	13
1.3 PROFUKOVÁNÍ	14
2 VÝPOČET FILTRACE	15
2.1 HMOTNOSTNÍ BILANCE FILTRU	15
2.2 TOK TEKUTINY VRSTVOU TUHÝCH ČÁSTIC	16
2.3 DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE RYCHLOSTI FILTRACE.....	20
2.3.1 V případě diskontinuální filtrace při konstantním rozdílu tlaků.....	24
2.3.2 V případě diskontinuální filtrace při konstantní rychlosti filtrace	25
2.3.3 V případě diskontinuální filtrace za použití odstředivého čerpadla.....	27
2.3.4 V případě diskontinuální a kontinuální filtrace v odstředivce.....	29
2.3.5 V případě kontinuální filtrace bubnovým filtrem	30
2.3.6 V případě promývání filtračního koláče	31
3 VOLBA VHODNÉHO FILTRAČNÍHO ZAŘÍZENÍ	33
3.1 HLEDISKA PŘI VÝBĚRU FILTRAČNÍHO ZAŘÍZENÍ	33
3.2 ROZDĚLENÍ FILTRAČNÍCH ZAŘÍZENÍ	33
4 NEJČASTĚJI POUŽÍVANÁ FILTRAČNÍ ZAŘÍZENÍ	35
4.1 NEPŘETRŽITĚ PRACUJÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	35
4.2 PERIODICKY PRACUJÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	37
5 FILTRAČNÍ ZAŘÍZENÍ V PRAXI	48
6 VZOROVÉ ŘEŠENÉ ÚLOHY	52
7 NEŘEŠENÉ ÚLOHY	63

8 VÝZNAMNÉ OSOBNOSTI.....	65
8.1 GEORGE GABRIEL STOKES.....	65
8.2 DANIEL BERNOULLI.....	66
8.3 THEODOR VON KÁRMÁN	67
8.4 REYNOLDS OSBORNE	68
ZÁVĚR.....	69
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	70
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	71
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	75

ÚVOD

Problematiku procesu filtrace jsem si vybrala z důvodu širokého uplatnění této metody rozdělávání směsí v průmyslu. V dnešní době se proces filtrace uplatňuje v odvětvích, která mají vliv na kvalitu našeho každodenního života. Setkáváme se s ní např. ve vodárenství, kdy je třeba dočišťovat pitnou, užitkovou či povrchovou vodu, dále v potravinářství, kdy se filtruje nejen voda, ale i alkohol či džus. Ve farmacii lze filtraci užít při získávání různých vakcín, séra, krevních derivátů apod. Velmi využívaný je filtrační proces v chemických odvětvích, např. při výrobě parfémů, esencí a dalších produktů. Filtrace může mít tedy vliv a dopad nepřímo i na zdraví člověka, a proto se toto téma dotýká i mě.

Předmětem bakalářské práce je nastudování problematiky procesu filtrace a promývání z dostupných materiálů, ve formě skript, odborných článků, referátů apod. a vytvoření podrobného elektronického učebního textu pro zadaný tématický okruh, včetně vzorových příkladů, řešených i neřešených.

Cílem ale není jen zpřístupnit studentům veškeré důležité informace týkající se dané problematiky, ale vytvořit studijní materiál, který studentům proces filtrace přiblíží populární formou.

Do práce jsem zahrnula teoretické informace týkající se separačního procesu filtrace, kdy rozdělujeme heterogenní směsi na kapalinu a tuhé částice. Jmenovala jsem výpočtové vztahy odvozené pro různé způsoby realizace filtračního procesu, a také hlediska, která mají vliv na volbu vhodného filtračního zařízení. Doporučené literatury jsem využila i k získání materiálů o nejužívanějších zařízeních v průmyslu a snažila jsem se popsat postup, jakým probíhá filtrace na konkrétním filtračním zařízení, přičemž snaha byla o maximální zjednodušení schémata filtračního zařízení. Práci jsem doplnila o obrázky skutečných zařízení užívaných v praxi.

1 ZÁKLADNÍ POJMY

1.1 Filtrace

1.1.1 Definice filtrace

Filtrace patří mezi separační procesy. Dochází k rozdělení heterogenních směsí, při němž se na porézní vrstvě (filtrační přepážce) zadrží jedna fáze této směsi a druhá se propustí. Filtrace je hydrodynamický proces, jehož rychlost je přímo úměrná rozdílu tlaků před koláčem a za přepážkou a nepřímo úměrná odporu, který tekutině klade vznikající filtrační koláč a filtrační přepážka.

Je tedy možné napsat : $v = K \frac{\text{hnací síla}}{\text{odpor}}$, přičemž hnací silou je zřejmě rozdíl tlaků.

Rozdíl tlaků zajišťují např. kompresory, vývěvy, pístová nebo odstředivá čerpadla. Rozdílu tlaků je ale možné dosáhnout jen hydrostatickým tlakem rozdělované suspenze.

Při filtraci se nemusí na filtrační přepážce vytvářet přímo vrstva tuhých částic, filtrační koláč. Částice mohou pouze zanášet póry přepážky, což se děje při nízkém obsahu částic, pod 0,1 % objemových. Zanášení se dá zabránit použitím látek, které urychlují filtraci a které se buď zanášejí na filtrační přepážku nebo se přidávají k suspenzi. Nejčastěji se používá křemelina, dále azbest, celulóza apod. [1].

1.1.2 Princip činnosti filtru

Filtr je zařízení, ve kterém dochází k rozdělení heterogenní směsi filtrací. [3].

Přivede-li se na vhodnou filtrační přepážku heterogenní směs (suspenze) a tlak před filtrem bude větší než za přepážkou, na filtrační přepážce se budou zachytávat tuhé částice, bude se tedy tvořit filtrační koláč a tekutina, která projde filtrační přepážkou a koláčem, bude získán filtrát.

V obrázku tlak p_1 odpovídá rozhraní suspenze-koláč, tlak p_2 odpovídá rozhraní koláč-přepážka a p_3 je hodnota tlaku těsně za filtrační přepážkou.

Aby došlo k průtoku filtrátu, musí být zajištěna příslušná difference tlaků.

Na filtračním koláči:

$$\Delta p_1 \equiv p_1 - p_2 > 0 \quad (1.1)$$

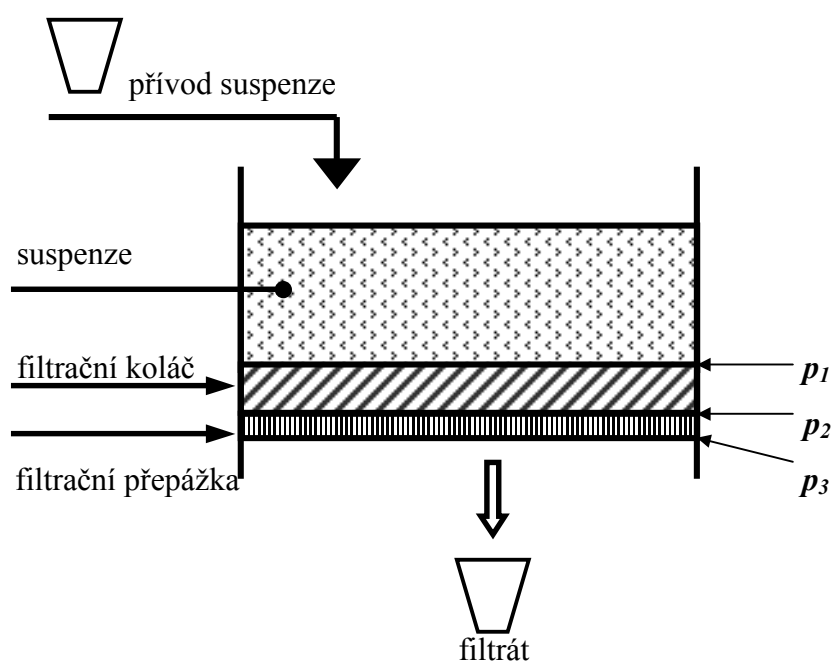
na filtrační přepážce:

$$\Delta p_2 \equiv p_2 - p_3 > 0 \quad (1.2)$$

Celková tlaková difference Δp , což je hnací síla procesu, bude:

$$\Delta p \equiv \Delta p_1 + \Delta p_2 = p_1 - p_3 \quad (1.3)$$

[2]



Obr 1. Princip činnosti filtru.[2].

K procesům filtrace patří:

- Rozdělení aerosolů na plyn a suchý koláč
- Rozdělení suspenzí na kapalinu a vlhký koláč.

Já se budu dále zabývat druhým způsobem - *Rozdělením suspenzí*. [1].

1.1.3 Rozdělení suspenzí filtrací

Suspenze jsou směsi mající kapalně dispersní prostředí, v němž jsou rozptýleny tuhé částice.

Je možné je rozlišit podle množství rozptýlené tuhé fáze.

Obsah tuhé fáze ovlivňuje viskozitu suspenze. Při určité koncentraci se může viskozita stát tak velkou, že suspenze ztrácí vlastnost tekutosti a prakticky přestává být kapalinou.

Dále je možné suspenze rozlišit podle stupně disperze, tj. podle koncentrace a velikosti suspendovaných tuhých částic:

- a) Hrubé suspenze, v nichž jsou rozptýlené částice větší než $10\mu\text{m}$
- b) Jemné suspenze se suspendovanými částicemi velikosti od $10\mu\text{m}$ do přibližně $0,05\mu\text{m}$

Hrubé a jemné suspenze vypadají stejnorodé, ale nejsou. Pod mikroskopem je vidět, že u jemných suspenzí již dochází k Brownovu pohybu (velmi malé částice tuhé fáze se pohybují různými směry působením nárazů molekul kapaliny).
- c) Rmuty, u nich je stupeň disperze velmi vysoký a suspendované částice dosahují rozměru od $0,05$ do $0,001\mu\text{m}$ (tyto částice je možné vidět ultramikroskopem, jejich velikost je stále v mezích viditelnosti).
- d) Koloidní roztoky, velikost suspendovaných částic u nich klesá od $0,001\mu\text{m}$ až do velikosti molekuly. [3].

Účelem rozdělování suspenzí může být buď získání pouze pevné nebo kapalně fáze, přičemž druhá fáze je odpad, nebo také současné získání jak pevné tak kapalně fáze. [1].

Suspenze se oddělují filtrací v případě, kdy nejsou při oddělování suspenze povoleny ztráty kapaliny v usazeném kalu, je-li třeba oddělit tuhous fázi tak, aby měla jen minimální obsah vlhkosti nebo usazují-li se částice velmi špatně

Filtrování je založeno na zadržení tuhých suspendovaných částic na filtrační přepážce (porézní vrstvě), která propouští jen kapalinu. [3].

Jako filtrační přepážky se používají vrstvy písku, křemeliny, uhlí, vrstvy z azbestových nebo bavlněných vláken, bavlněné, vlněné nebo syntetické tkaniny, sítky z kovových vláken, vrstvy šamotu, slinutého skleněného nebo kovového prášku nebo tvrdé gumy. [1].

Na volbu filtrační přepážky mají vliv zejména chemické vlastnosti filtrované kapaliny, tlak, při kterém chceme filtrovat, stupeň disperze tuhých částic ve filtrované směsi a velikost provozu.

Suspenze je při filtraci v přímém styku s povrchem porézní vrstvy. Protože je tlak za vrstvou menší než před ní, protéká kapalina póry vrstvy a hromadí se jako filtrát zbavený suspendovaných částic. Tuhé částice jsou zadržovány porézním povrchem a tvoří vrstvu sedliny (filtrační koláč), která se odstraňuje.

Při filtraci musí kapalina překonávat hydraulický odpor, který klade filtrační přepážka. Velikost pórů a odpor filtrační přepážky mají ale význam jen na začátku filtrování, protože v průběhu pochodu se filtrační přepážka pokrývá vrstvou koláče, který účinkuje jako filtrační médium. Je třeba zajistit co nejnižší hydraulický odpor koláče, proto dochází k pravidelnému či nepřetržitému odstraňování jeho větší části, v některých případech i dodatečným promýváním filtrační přepážky rozpouštědly.

Struktura a tloušťka filtračního koláče má velký vliv na účinnost filtrace, tj. výkonnost filtru a spotřebu energie na protlačení kapaliny filtrem.

Výkonnost filtru je nepřímo úměrná dokonalosti oddělení, tzn. čím větší má být výkonnost filtru, tím nižší bude stupeň oddělování a naopak.

Výkonnost filtru se kvantitativně udává rychlostí filtrace. [3].

1.1.4 Rychlost filtrace

Je závislá na několika faktorech:

Na tlaku, který působí na suspenzi, na tloušťce filtračního koláče a jeho struktuře (vliv tlaku je spjat se strukturou filtračního koláče):

- a) Nestlačitelný filtrační koláč, tj. koláč z nedeformujících se částic, hlavně krystalických:
 - se změnou tlaku se nemění rozložení částic ani velikost pórů, kterými kapalina protéká
 - rychlost filtrace s tlakem vzrůstá a je závislá jen na tloušťce koláče
- b) Stlačitelný filtrační koláč, tj. koláč z deformujících se částic, hlavně amorfních:
 - při zvětšujícím se tlaku se koláč zmenší tím, že se v něm zúží kapilární kanálky
 - změna rychlosti filtrace není úměrná zvýšení tlaku (se zvýšením tlaku je zachováno i zvětšení rychlosti) [3].

Na složení suspenze, na teplotě kapaliny (čím nižší je teplota kapaliny, tím vyšší je viskozita a nižší rychlost filtrace) [3] - pro vyšší výkonnost filtru je tedy výhodné některé filtrované kapaliny ohřívat, přihlídnout se však musí k riziku rozpouštění tuhé fáze při zvýšení teploty a k možným chemickým účinkům na materiál filtru.

Rychlost filtrace se odvíjí také od způsobu realizace filtrace. [1].

1.1.5 Realizace filtrace

Diskontinuální (periodická) filtrace:

- a) probíhající při konstantním rozdílu tlaků (klesá rychlost filtrace, protože dochází k zvětšování vrstvy koláče a tím i jeho odporu) – je možné dosáhnout úplného oddělení fází směsi, naopak při nerovnoměrném tlaku (narázovém), může dojít k proniknutí nejjemnějších částic do filtrátu
- b) probíhající konstantní rychlostí (rozdíl tlaků na filtru se zvětšuje a odpor filtračního koláče roste stejně rychle) - většina filtračních materiálů zachycuje na začátku filtrace částice nedostatečně a při filtrování jemných suspenzí obsahují první podíly filtrátu téměř vždy určité množství suspendovaných částic. Při konstantní rychlosti se však vrstva filtračního koláče přiměřeně zvyšuje a filtr je schopen zachytit i tuhé částice téměř úplně. Začne-li se tedy filtrovat při nižším tlaku, filtrát je čistší. [3].

Filtrace se většinou provádí tak, že se nejdříve filtruje při konstantní rychlosti až do určité hodnoty tlakového rozdílu, při kterém se potom filtruje s rychlostí klesající. [1]

Kontinuální (nepřetržitá) filtrace. [3]

Filtrace probíhá v několika stádiích.

1.1.6 Stadia filtrace

- a) filtrace, kdy dochází k tvorbě filtračního koláče a filtrátu
- b) promývání filtračního koláče
- c) profukování filtračního koláče
- d) příprava filtru na další cyklus - odstranění filtračního koláče z filtrační přepážky, regenerace filtrační přepážky (např. propláchnutím).

Doba přípravy filtru je doba ztrátová t_z . Doba filtrace t_f , doba promývání a profukování t_p . Trvání cyklu t_c je dáno jejich součtem .

$$t_c = t_f + t_p + t_z \quad (1.4)$$

Některé stadium může chybět. Pokud je tekutinou plyn, nepromývá se koláč. Profukování u některých zařízení není vůbec umožněno.

U diskontinuálně pracujícího filtru probíhají stadia v časové posloupnosti, v cyklech. Je tedy nutné po skončení filtrace a případného promývání či profukování připravit filtr k dalšímu cyklu.

U kontinuálně pracujícího filtru probíhají všechna stadia souběžně, ale v různých úsecích kontinuálního filtru. [2].

Ze stadií filtrace je tedy zřejmé, že rozdělení suspenzí obvykle nekončí získáním vlhkého koláče na filtrační přepážce, ale ještě se provádí, dle potřeby, promývání a profukování koláče. [1].

1.2 Promývání

Promývání je nezbytné pro lepší oddělení filtrátu od tuhých částic. Je to vlastně vytěsnění kapaliny, která zůstala po filtraci v pórech koláče, druhou, promývací kapalinou, která se s první mísí.

Promývání koláče je nutné v těch případech, kdy je třeba získat částice čistší nebo když chceme získat všechnen filtrát který je hlavním produktem. [1].

Filtrační koláč se promývá vodou nebo jinou kapalinou. [3].

Promývání filtračního koláče se provádí dvěma způsoby:

- a) Koláč se promývá na filtru, na kterém se vytvořil, tak, že se jím nechá protékat promývací kapalina stejným způsobem jako filtrát [1] - promýváním se filtrát zředí, tím stoupá spotřeba páry na jeho odpařování, má-li být získaný filtrát koncentrovaný.[3]

b) Koláč se přemístí z filtru do zásobníku, kde se míchá s promývací kapalinou a vzniklá suspenze se opět filtruje [1]- provádí se opakované promývání užitím stále zředěnějšího roztoku (filtrát z předchozího promývání), až na závěr se použije čistá voda, předejde se zředění filtrátu. Nejkoncentrovanější roztok se periodicky odebírá a přidává k hlavnímu filtrátu. [3].

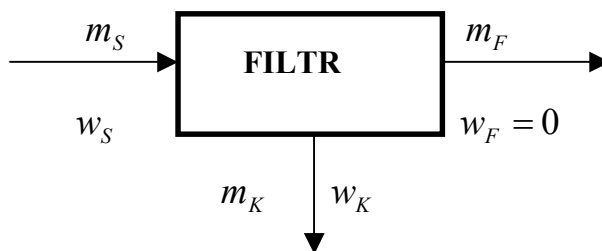
1.3 Profukování

Účelem profukování je co nejvíce zmenšit množství kapaliny, která zůstala v koláči po filtraci nebo promývání. Tato kapalina se vytěsňuje z pórů koláče vzduchem nebo jiným plynem, který může být také ohřátý, takže k hydrodynamickému procesu vytěsňování ještě přistupuje difúzní proces sušení [1].

2 VÝPOČET FILTRACE

Při filtraci nás většinou zajímá objem získaného filtrátu, který je někdy možné změřit, ale někdy je třeba jej spočítat. K tomu je možné využít hmotnostní bilanci filtru.

2.1 Hmotnostní bilance filtru



S = suspenze, F = filtrát, K = koláč

Obr. 2. Schéma pro sestavení hmotnostní bilance filtru.

Platí celková bilance: $m_S = m_K + m_F$ (2.1)

kde m je hmotnost jednotlivých proudů S, F, K .

Při bilanci tuhé fáze se předpokládá, že její koncentrace ve filtrátu je nulová.

Pak platí bilance tuhé fáze: $m_S w_S = m_K w_K$ (2.2)

kde w je hmotnostní zlomek jednotlivých proudů S, K . [6].

Z rovnic (2.1) a (2.2) lze vyjádřit např. m_F , když je známé m_S , w_S a w_K : [1].

$$m_F = m_S \left(1 - \frac{w_S}{w_K} \right) \quad (2.3)$$

Uvažuje se aditivita objemů tuhé a kapalné fáze - $p_S, p_F = konst.$

Objemové vyjádření bilance pak vede ke vztahům:

$$V_S = V_K + V_F \quad (2.4)$$

a

$$V_S x_{V,S} = V_K x_{V,K} \quad (2.5)$$

kde V jsou objemy jednotlivých proudů S, F, K a x_V je objemový zlomek tuhé fáze v proudech S, K .

Analogické vztahy je možné napsat pro hmotnostní bilanci kontinuálního filtru, nahradí-li se v rovnicích (2.1) až (2.4) hmotnost m resp. objem V jednotlivých proudů jejich hmotnostním tokem $\dot{m}$ resp. objemovým tokem $\dot{V}$.

K některým výpočtům je třeba znát fyzikální vlastnosti suspenze, hlavně její hustotu a viskozitu.

Pro hustotu suspenze ρ_S lze na základě předpokladu o aditivitě objemů a hmotností tuhé a kapalné fáze odvodit vztahy:

$$\frac{1}{\rho_S} = \frac{w_S}{\rho_s} + \frac{1-w_S}{\rho_l} \quad (2.6a)$$

$$a \quad \rho_S = \rho_s x_{V,S} + \rho_l (1 - x_{V,S}) \quad (2.6b)$$

kde ρ_S je hustota suspenze, ρ_l je hustota kapalné fáze (za předpokladu, že $w_F = 0$, platí ovšem $\rho_l = \rho_F$, kde ρ_F je hustota filtrátu) a ρ_s je hustota tuhé fáze.

Pro viskozitu suspenze μ_S s malou koncentrací tuhé fáze (do 10 objem.%) platí vztah:

$$\mu_S = \mu_F \cdot (1 + 2,5 x_{V,S}) \quad (2.7)$$

kde μ_F je viskozita filtrátu. [6].

Pokud je nutné znát čas filtrace či výkonnost filtru lze použít při výpočtech diferenciálních rovnic filtrace. Těchto rovnic lze také užít při výpočtu množství filtrátu, zpracované suspenze aj.

Je nutné předem znát vztahy odvozené obecně pro tok tekutiny vrstvou tuhých částic. [1].

2.2 Základní vztahy platící pro tok tekutiny vrstvou tuhých částic

Při filtraci jde o tok tekutiny vrstvou tuhých částic. Tekutiny se dělí na kapaliny a plyny, které se od sebe liší stlačitelností γ a objemovou roztažností β , pro něž platí:

$$\gamma = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T$$

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.8)$$

kde V je objem, p je tlak, T absolutní teplota, ρ hustota. Kapaliny mají malou stlačitelnost ($10^{-10} \div 10^{-7} \text{ (N/m}^2\text{)}^{-1}$) a objemovou roztažnost ($\text{H}_2\text{O} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

Plyny ve srovnání s kapalinami mají velkou stlačitelnost a objemovou roztažnost. Pro plyny řídící se stavovou rovnicí ideálního plynu platí:

$$\gamma = \frac{1}{p} \quad \text{a} \quad \beta = \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

Platí následující vztahy:

Pro výpočet ztráty mechanické energie při proudění tekutiny vrstvou tuhých částic platí

odvozený vztah:
$$e_z = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{l}{d} \cdot v^2 \quad (2.10)$$

Proudí-li tekutina potrubím nekruhového průřezu, musí se ve vztahu (2.10) průměr kruhového potrubí d nahradit tzv. středním ekvivalentním průměrem d_e :

$$d_e = \frac{4S}{O} \quad (2.11)$$

kde S je průtočný průřez a O je smočený obvod. Protože se jejich hodnoty při průtoku tekutiny vrstvou mění podél průtočné dráhy, musí se zavést jejich zprůměrněné hodnoty.

$$S_e = \frac{V_v}{h_n} \quad (2.12)$$

kde S_e je tedy střední ekvivalentní průřez nebo také volný průřez vrstvy, V_v je volný objem mezi částicemi vrstvy (objem tekutiny ve vrstvě), h_n je výška vrstvy.

$$O_e = \frac{A_n}{h_n} \quad (2.13)$$

kde O_e je střední ekvivalentní smočený obvod, A_n je povrch všech částic vrstvy, h_n je výška vrstvy.

Do vztahu (2.11) se dosadí střední hodnoty průtočného průřezu a smočeného obvodu,

pak bude platit:
$$d_e = \frac{4S_e}{O_e} = \frac{4V_v}{A_n} \quad (2.14)$$

Protože podíl $\frac{V_v}{A_n}$ je konstantní pro danou náplň bez ohledu na výšku vrstvy, je možné ho

vztáhnout např. k objemové jednotce vrstvy:

$$d_e = \frac{4 \cdot V_v / V}{A_n / V} = \frac{4\varepsilon}{a} \quad (2.15)$$

kde veličina ε se nazývá mezerovitost a je to podíl volného objemu ku celkovému objemu vrstvy V a veličina a je specifický povrch částic a je to podíl povrchu vrstvy ku celkovému objemu vrstvy V . Mezerovitost ε lze také použít k jinému vyjádření volného průřezu vrstvy:

$$S_e = \frac{V_v}{h_n} = \frac{V_v / V}{h_n / V} = S_c \cdot \frac{V_v}{V} = S \cdot \varepsilon \quad (2.16)$$

kde S_c je průřez celé vrstvy. Zřejmě platí $S_e < S_c$, protože $\varepsilon < 1$.

K výpočtu e_z ze vztahu (2.10) je třeba ještě znát l -délku průtočné dráhy a v_e -střední rychlost průtoku tekutiny vrstvou. Veličina l není přesně známá, ale lze napsat, že je přímo úměrná výšce vrstvy h_n . $l = \text{konst.} \cdot h_n$ (2.17)

Rychlost v_e lze získat touto úvahou: objemový průtok tekutiny vrstvou tuhých částic je stejný jako objemový průtok tekutiny mimo vrstvu, platí tedy rovnice kontinuity nestlačitelné tekutiny:

$$\dot{V} = v \cdot S = v_e \cdot S_e \quad (2.18)$$

kde v je rychlost tekutiny mimo vrstvu (mimovrstvová rychlost), v_e je střední rychlost průtoku tekutiny vrstvou.

Z toho:
$$v_e = v \cdot \frac{S}{S_e} = v \cdot \frac{1}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

Dosazením do vztahu (2.10) pak platí vztah:

$$e_z = \frac{\lambda}{2} \cdot \text{konst.} \cdot \frac{h_n a}{4\varepsilon} \cdot \frac{v^2}{\varepsilon^2} = \lambda_a \cdot \frac{h_n a v^2}{\varepsilon^3} \quad (2.20)$$

kde v hodnotě λ_a jsou zahrnuty všechny konstanty.

Místo veličiny a se k charakteristice částic vrstvy někdy používá veličina a_v -vlastní specifický povrch částic, která udává poměr povrchu částic ku objemu částic.

$$a_v = \frac{A_n}{V_n} \quad (2.21)$$

kde:
$$V_n = V - V_v \quad (2.22)$$

tedy vlastní objem částic V_n je rozdíl celkového objemu vrstvy a volného objemu.

Vzájemný vztah mezi a a a_v je úpravou vztahu (2.21) dán ve tvaru:

$$a_v = \frac{A_n}{V_n} = \frac{A_n}{V - V_v} = \frac{A_n / V}{V / V - V_v / V} = \frac{a}{1 - \varepsilon} \quad (2.23)$$

nebo
$$a = a_v(1 - \varepsilon) \quad (2.24)$$

V ideálním případě lze předpokládat, že částice mají přesně kulový tvar a stejný průměr, pak platí:

$$a_v = \frac{n \cdot \pi \cdot d^2}{n \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6}} = \frac{6}{d} \quad (2.25)$$

kde n -je počet částic ve vrstvě a d -je průměr kulové částice.

Je možné vyjádřit i směrodatný lineární rozměr nekulových částic d_n :

$$d_n = \frac{6}{a_v} \quad (2.26)$$

Nově zavedené veličiny a_v a d_n je možné dosadit do vztahu (2.20) a získat vztah:

$$e_z = \lambda_a \cdot \frac{h_n \cdot a_v(1 - \varepsilon) \cdot v^2}{\varepsilon^3} \quad (2.27)$$

nebo

$$e_z = \lambda_a \cdot \frac{h_n \cdot 6(1 - \varepsilon) \cdot v^2}{d_n \cdot \varepsilon^3} = \lambda_d \cdot \frac{h_n \cdot (1 - \varepsilon) \cdot v^2}{d_n \cdot \varepsilon^3} \quad (2.28)$$

kde součinitel tření λ_d má zřejmě jinou číselnou hodnotu než λ_a , proto je označen jiným symbolem.

Součinitel tření je funkcí Reynoldsova čísla a drsnosti potrubí. Obdobou drsnosti potrubí jsou v tomto případě přímo částice vrstvy, charakteristika „drsnosti“ bude tedy obsažena v hodnotě mezerovitosti a specifickém povrchu, které se objeví přímo ve výrazu pro Reynoldsovo kritérium Re.

$$\text{Re} = \frac{v_e \cdot d_e \cdot \rho}{\mu} = \frac{v}{\varepsilon} \cdot \frac{4\varepsilon}{a} \cdot \frac{\rho}{\mu} = \frac{4 \cdot v \cdot \rho}{a \cdot \mu} \quad (2.29)$$

dosazením a_v za a :

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot v \cdot \rho}{a_v(1 - \varepsilon)\mu} \quad (2.30)$$

za a_v lze také dosadit směrodatný lineární rozměr d_n , pak:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot v \cdot \rho \cdot d_n}{6(1 - \varepsilon)\mu} = \frac{2}{3} \cdot \frac{v \cdot \rho \cdot d_n}{(1 - \varepsilon)\mu} \quad (2.31)$$

Závislost λ na Re je empirický. Pro λ_a lze psát:

$$\lambda_a = \frac{2K}{\text{Re}} + K_1 \quad (2.32)$$

kde K a K_I jsou konstanty, které se liší pro různé tvary částic. Vztah platí v rozsahu Reynoldsových čísel $10 \leq Re \leq 500$. Pro malá Reynoldsova čísla ($Re < 1$) je konstanta K_I zanedbatelná.

Podle rovnice Kármána-Kozeného pro λ_d kdy $Re < 1$ platí:

$$\lambda_d = \frac{150}{Re} \quad (2.33)$$

Podle Burkea-Plumera pro λ_d pro $Re > 1 \cdot 10^4$ platí:

$$\lambda_d = 1,75 \quad (2.34)$$

Ergun z rovnic (2.33) a (2.34) definoval vztah pro celý rozsah Re :

$$\lambda_d = \frac{150}{Re} + 1,75 \quad (2.35)$$

Spíše než ztrátu mechanické energie je nutné při průtoku tekutiny vrstvou tuhých částic znát ztrátu tlaku, kterou je možné vyjádřit z Bernoulliho rovnice jako:

$$\Delta p = \rho \cdot \left[\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + (h_1 - h_2) \cdot g + e_z \right] \quad (2.36)$$

Za předpokladu, že první dva členy pravé strany rovnice jsou zanedbatelné vůči třetímu, po

dosazení za e_z platí:

$$\Delta p = \lambda_a \cdot \frac{h_n}{\varepsilon^3} \cdot a \cdot v^2 \cdot \rho \quad (2.37)$$

[1]

2.3 Diferenciální rovnice rychlosti filtrace

Filtrace je přímo úměrná rozdílu tlaků před koláčem a za filtrem a nepřímo úměrná viskozitě filtrátu a odporu, který tekutině klade vznikající filtrační koláč a přepážka.

Pro snadnější odvození rychlosti filtrace je možné tok filtrátu rozdělit na tok vrstvou tuhých částic koláče a tok přepážkou. Nejdříve se vezme v úvahu rozdíl tlaků pouze před a za vrstvou koláče (označí se např. Δp_1). Následně rozdíl tlaků před a za přepážkou (označí se např. Δp_2).

Za míru rychlosti filtrace je považováno množství (objem) filtrátu získané za jednotku času při filtraci přes jednotkovou plochu filtru. Plocha filtru je totožná s plochou koláče.

Pak pro rychlost filtrace platí vztah:

$$v_f = \frac{dV_F}{S \cdot dt} \quad (2.38)$$

kde V_F je objem filtrátu, t je čas a S je plocha filtru.

Za předpokladu, že jde o nestlačitelnou tekutinu, pak podle rovnice kontinuity musí být rychlost průtoku filtrátu koláčem v určitém okamžiku stejná jako rychlost průtoku filtrátu přepážkou v tomtéž okamžiku.

Pak pro průtok filtrátu koláčem platí vztah:

$$\frac{dV_F}{S \cdot dt} = \frac{\Delta p_1}{\mu \cdot R_1} \quad (2.39)$$

a pro průtok filtrátu přepážkou vztah:

$$\frac{dV_F}{S \cdot dt} = \frac{\Delta p_2}{\mu \cdot R_2} \quad (2.40)$$

kde R_1 a R_2 jsou odpory kladené tekutině koláčem a přepážkou. Odpor R_1 lze vyjádřit pomocí dalších vztahů.

Objem vzniklého koláče je úměrný objemu filtrátu V_F :

$$\frac{V_K}{V_F} = x_0 \quad (2.41)$$

kde V_K je objem koláče a x_0 je konstanta úměrnosti.

Výška vrstvy koláče na přepážce je (např. pro koláč tvaru hranolu):

$$h_n = \frac{V_K}{S} = \frac{V_K}{S} \cdot \frac{V_F}{V_F} = \frac{V_K}{V_F} \cdot \frac{V_F}{S} = x_0 \cdot \frac{V_F}{S} \quad (2.42)$$

Odpor R_1 bude úměrný výšce vrstvy koláče:

$$R_1 = \alpha \cdot h_n = \alpha \cdot x_0 \cdot \frac{V_F}{S} \quad (2.43)$$

konstanta úměrnosti α je specifický odpor koláče (tj. odpor, kladený toku filtrátu koláčem o výšce 1 m).

Odpor R_2 , kladený tekutině filtrační přepážkou, lze vyjádřit, pokud se nahradí ve výpočtech filtrační přepážka vrstvou koláče tak vysokou, aby odpor, který klade tekutině, byl stejný jako odpor kladený přepážkou. Tuto ekvivalentní vrstvu koláče by vytvořil objem V_{Fekv} filtrátu, takže analogicky s rovnicí (2.41) bude:

$$\frac{V_{Kekv}}{V_{Fekv}} = x_0 \quad (2.44)$$

kde V_{Kekv} je ekvivalentní objem koláče.

$$\text{Ekvivalentní výška koláče: } h_{n.ekv} = x_0 \cdot \frac{V_{Fekv}}{S} \quad (2.45)$$

Odpor R_2 lze tedy vyjádřit: $R_2 = \alpha \cdot x_0 \cdot \frac{V_{Fekv}}{S}$ (2.46)

Pro rychlost průtoku filtrátu koláčem a přepážkou tedy po dosazení za R_1 a R_2 platí vztahy:

$$\frac{dV_F}{S \cdot dt} = \frac{\Delta p_1}{\mu \cdot \alpha \cdot x_0 \cdot \frac{V_F}{S}} \quad (2.47)$$

$$\frac{dV_F}{S \cdot dt} = \frac{\Delta p_2}{\mu \cdot \alpha \cdot x_0 \cdot \frac{V_{Fekv}}{S}} \quad (2.48)$$

Při definici vztahu pro specifický odpor koláče α se vychází ze vztahů platících pro tok tekutiny vrstvou tuhých částic, protože tok tekutiny koláčem je tento případ.

Z rovnice (2.29) se dosazením za e_z ze vztahu (2.21) získá vztah:

$$\Delta p_1 = \rho \cdot \lambda_d \cdot \frac{h_n}{d_n} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot v_f^2 \quad (2.49)$$

kde symboly na pravé straně rovnice mají význam definovaný v kapitole 3. a Δp_1 je ztráta tlaku při proudění tekutiny koláčem.

Protože tok filtrátu koláčem je téměř vždy laminární, za λ_d lze dosadit z rovnice (2.33) :

$$\lambda_d = \frac{C}{Re} \quad (2.50)$$

a za Re z rovnice (2.24): $Re = \frac{v_f \cdot \rho \cdot d_n}{(1-\varepsilon)\mu}$ (2.51)

(v tomto případě nebyla zahrnuta číselná konstanta).

Pak: $\Delta p_1 = \rho \cdot \frac{C}{v_f \cdot \rho \cdot d_n} \cdot (1-\varepsilon)\mu \cdot \frac{h_n}{d_n} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot v_f^2$ (2.52)

a po úpravě: $\Delta p_1 = \frac{C \cdot \mu \cdot h_n}{d_n^2 \cdot \varepsilon^3} \cdot (1-\varepsilon)^2 \cdot v_f$ (2.53)

Tato rovnice se porovná se vztahem (2.47), ze kterého je možné vyjádřit Δp_1 :

$$\Delta p_1 = \frac{dV_F}{S \cdot dt} \cdot \mu \cdot \alpha \cdot x_0 \cdot \frac{V_F}{S} \quad (2.54)$$

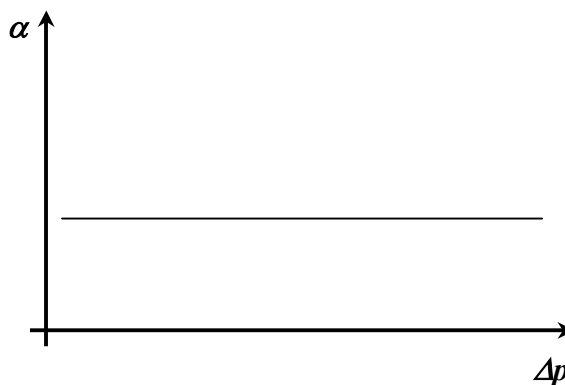
Protože první člen pravé strany je podle (2.38) rychlost v_f , lze získat vztah:

$$\frac{C \cdot \mu \cdot h_n}{d_n^2 \cdot \varepsilon^3} \cdot (1-\varepsilon)^2 \cdot v_f = v_f \cdot \mu \cdot \alpha \cdot x_0 \cdot \frac{V_F}{S} \quad (2.55)$$

a protože z rovnice (2.42) $h_n = x_0 \cdot \frac{V_F}{S}$, platí pro specifický odpor koláče α vztah:

$$\alpha = \frac{C \cdot (1 - \varepsilon)^2}{d_n^2 \cdot \varepsilon^3} \quad (2.56)$$

Je-li specifický odpor konstantní pro daný koláč, jde o **koláč nestlačitelný**.



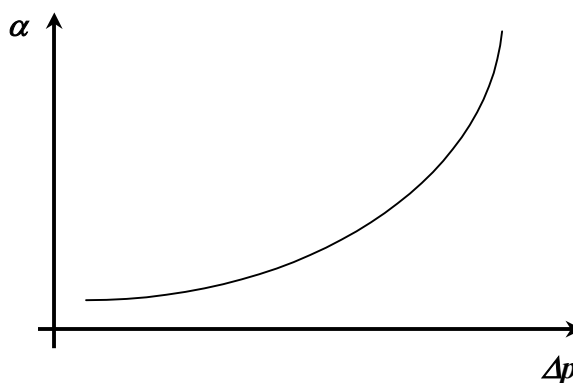
Obr. 3. Graf závislosti specifického odporu nestlačitelného koláče na rozdílu tlaků.

U **stlačitelných koláčů** závisí specifický odpor α na rozdílu tlaků na filtru, jejich mezerovitost se zmenšuje. Mezi stlačitelné koláče patří např. hydroxidy některých kovů ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), jejichž částice už působením nevelkých tlaků mění tvar. Stlačitelný koláč mohou také vytvářet krystalické látky, u nichž dochází ke změně uložení částic.

Závislost α na Δp můžeme zjistit pokusně, nejčastěji má tvar:

$$\alpha = b \cdot (\Delta p)^c \quad (2.57)$$

konstanty b a c se stanoví pokusně.



Obr. 4. Graf závislosti specifického odporu stlačitelného koláče na rozdílu tlaků.

Z rovnic (2.47) a (2.48) je možné vyjádřit Δp_1 a Δp_2 . Součet obou rovnic (součet tlaků) lze na levé straně nahradit veličinou Δp , což je rozdíl tlaků před koláčem a za filtrační

přepážkou:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = \frac{dV_F}{S^2 \cdot dt} \cdot \mu \cdot \alpha \cdot x_0 \cdot (V_F + V_{Fekv}) \quad (2.58)$$

rovnici lze upravit na tvar:

$$\frac{dV_F}{dt} = \frac{\Delta p \cdot S^2}{\mu \cdot \alpha \cdot x_0 \cdot (V_F + V_{Fekv})} \quad (2.59)$$

a zavedením veličiny $\beta = \alpha \cdot x_0$ lze získat **nejpoužívanější tvar rovnice rychlosti filtrace**:

$$\frac{dV_F}{dt} = \frac{\Delta p \cdot S^2}{\mu \cdot \beta \cdot (V_F + V_{Fekv})} \quad (2.60)$$

Veličiny β a V_{Fekv} lze zjistit jen pokusně. Protože je ve většině případů odpor filtrační přepážky mnohem menší než odpor koláče, je možné i V_{Fekv} oproti V_F zanedbat.

Integrace rovnice rychlosti filtrace je závislá na podmínkách, za kterých filtrace probíhá.[1]

2.3.1 V případě diskontinuální filtrace při konstantním rozdílu tlaků

Při tomto způsobu filtrace klesá rychlost procesu, protože dochází ke zvětšování vrstvy koláče a tím i jeho odporu.

Z rovnice rychlosti filtrace (2.60) je možné nahradit všechny konstantní veličiny

konstantou K :

$$K = \frac{\Delta p \cdot S^2}{\mu \cdot \beta} \quad (2.61)$$

a tím ji upravit na tvar:

$$\frac{dV_F}{dt} = \frac{K}{V_F + V_{Fekv}} \quad (2.62)$$

Separací proměnných a integrací v mezích od 0 do t a od 0 do V se získá vztah:

$$\int_0^V (V_F + V_{Fekv}) dV_F = K \cdot \int_0^t dt \quad (2.63)$$

a po integraci a vynásobení rovnice dvěma:

$$V_F^2 + 2 \cdot V_{Fekv} \cdot V_F = 2 \cdot K \cdot t \quad (2.64)$$

Zavedením konstanty K_1 :

$$K_1 = 2 \cdot K \quad (2.65)$$

lze získat **nejpoužívanější tvar rovnice rychlosti filtrace při konstantním rozdílu tlaků**

$$V_F^2 + 2 \cdot V_{Fekv} \cdot V_F = K_1 \cdot t \quad (2.66)$$

ve které je v některých případech výhodné vztáhnout objem filtrátu na jednotku plochy filtru, aby byla vyloučena závislost na jeho velikosti.

Zavedením nové veličiny q_F , která vyjadřuje množství filtrátu získaného z 1 m² plochy,

pro niž platí
$$q_F = \frac{V_F}{S} \quad (2.67)$$

lze vyjádřit V_F
$$V_F = q_F \cdot S \quad (2.68)$$

a odvodit pro V_{Fekv} vztah
$$V_{Fekv} = q_{Fekv} \cdot S \quad (2.69)$$

a
$$dV_F = S \cdot dq_F \quad (2.70)$$

Rovnice rychlosti filtrace (2.60) má potom tvar

$$\frac{dq_F}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu \cdot \beta \cdot (q_F + q_{Fekv})} \quad (2.71)$$

po úpravě
$$\frac{dq_F}{dt} = \frac{K_2}{q_F + q_{Fekv}} \quad (2.72)$$

je-li užita konstanta K_2 , pro niž platí:

$$K_2 = \frac{\Delta p}{\mu \cdot \beta} \quad (2.73)$$

Po integraci (2.72) má rovnice rychlosti filtrace s novými proměnnými tvar:

$$q_F^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot q_F = 2 \cdot K_2 \cdot t \quad (2.74)$$

zavedením další konstanty K_3 , pro niž platí:

$$K_3 = 2 \cdot K_2 \quad (2.75)$$

bude rovnice (2.72) mít tvar:
$$q_F^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot q_F = K_3 \cdot t \quad (2.76)$$

Veličiny q_{Fekv} a K_3 nejsou závislé na velikosti filtru. [1].

2.3.2 V případě diskontinuální filtrace při konstantní rychlosti filtrace

Při filtrování konstantní rychlostí se zvětšuje rozdíl tlaků na filtru a odpor filtračního koláče roste stejnou rychlostí (např. při přivádění suspenze na filtr rotačním čerpadlem).

Platí-li $v_f = \frac{dV_F}{S \cdot dt} = konst$ užívá se pro rychlost filtrace rovnice ve tvaru:

$$v_f = \frac{V_F}{S \cdot t} \quad (2.77)$$

a nejužívanější tvar rovnice rychlosti filtrace (2.60) přejde do tvaru

$$\frac{V_F}{t} = \frac{\Delta p \cdot S^2}{\mu \cdot \beta \cdot (V_F + V_{Fekv})} \quad (2.78)$$

z něj je třeba vyjádřit Δp :

$$\Delta p = \frac{\mu \cdot \beta}{t \cdot S^2} [V_F^2 + V_{Fekv} \cdot V_F] \quad (2.79)$$

po úpravě:

$$\Delta p = \mu \cdot \beta \left[\frac{V_F^2 \cdot t}{t^2 \cdot S^2} + \frac{V_{Fekv} \cdot V_F}{t \cdot S^2} \right] \quad (2.80)$$

Následným dosazením z rovnice (2.77) je odvozen tvar:

$$\Delta p = \mu \cdot \beta \left[v_f^2 \cdot t + \frac{V_{Fekv} \cdot v_f}{S} \right] \quad (2.81)$$

ze kterého je možné při zvolené rychlosti vypočítat dobu, za kterou dosáhne tlakový rozdíl předepsanou hodnotu.

Rovnici (2.79) je možné upravit i na tvar:

$$V_F^2 + V_{Fekv} \cdot V_F = \frac{\Delta p \cdot t \cdot S^2}{\mu \cdot \beta} \quad (2.82)$$

Pokud Δp bude maximální tlakový rozdíl odpovídající konci filtrace při $v_f = konst.$, je

možné ho zahrnout do konstanty K , definované rovnicí $K = \frac{\Delta p \cdot S^2}{\mu \cdot \beta}$ a vztah (2.82) zapsat

ve tvaru

$$V_F^2 + V_{Fekv} \cdot V_F = K \cdot t \quad (2.83)$$

Od rovnice rychlosti filtrace při konstantním rozdílu tlaků (2.64) se liší jen tím, že neobsahuje dva koeficienty 2.

Rovnice filtrace při konstantní rychlosti s novými proměnnými bude ve tvaru:

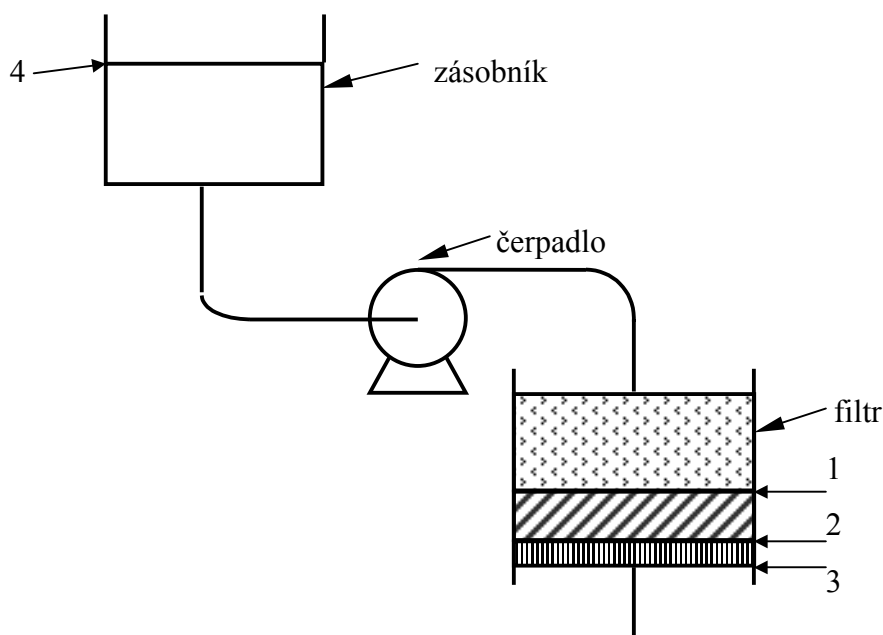
$$q_F^2 + q_{Fekv} \cdot q_F = K_2 \cdot t \quad (2.84)$$

Za předpokladu, že odpor filtrační přepážky je proti odporu koláče zanedbatelný, V_{Fekv} bude téměř rovno nule. Z porovnání rovnic rychlosti filtrace (2.64) a (2.83) plyne, že k získání stejného objemu filtrátu je potřeba při filtraci s konstantní rychlostí dvakrát více času než při filtraci s konstantním rozdílem tlaků.

Pokud odpor filtrační přepážky zanedbat nelze, poměr časů se zmenší. [1].

2.3.3 V případě diskontinuální filtrace za použití odstředivého čerpadla

Suspenze je do filtru dopravována odstředivým čerpadlem, tlak před kalolisek není regulován. Rychlost filtrace a přetlak v kalolise se přitom současně mění. Rovnice potřebné k výpočtu je nutné odvodit společným řešením charakteristiky čerpadla a potrubí.



Obr 5. Schéma filtračního zařízení při použití odstředivého čerpadla.[6] .

Dle schématu je suspenze ze zásobníku dopravována potrubím o průměru d . V potrubí je zařazeno odstředivé čerpadlo, charakteristika čerpadla (měrná práce) W_C je známá. Na konci potrubí je umístěný filtr.

Tok suspenze lze popsat Bernoulliho rovnicí (2.36): $\Delta p = \rho \cdot \left[\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + (h_1 - h_2) \cdot g + e_z \right]$.

Vzhledem k volbě řezů (1 a 2 těsně před a za filtračním koláčem, řez 3 těsně za filtrační přepážkou a řez 4 ve výši hladiny suspenze v zásobníku) lze předpokládat že rychlosti v_3 a v_4 lze zanedbat.

Charakteristika čerpadla i potrubí je závislá na rychlosti filtrace, lze ji zapsat ve tvaru:

$$W_C \cdot \rho_S = f\left(\frac{dV_F}{S \cdot dt}\right) = f\left(\frac{dq_F}{dt}\right) \quad (2.85)$$

Upravená Bernoulliho rovnice pro charakteristiku potrubí s filtrem obsahujícím filtrační koláč a přepážku bude ve tvaru: (2.86)

$$W_L \cdot \rho_S = p_3 - p_4 + (h_3 - h_4) \cdot \rho_S \cdot g + (\Delta p_{L0} + \Delta p)$$

Kde $h_4 - h_3$ je rozdíl geometrických výšek rovin 4 a 3, g je tíhové zrychlení, W_L je měrná práce potřebná k průtoku potrubím s filtrem, který obsahuje filtrační koláč a filtrační přepážku, Δp_{L0} je ztráta tlaku v potrubní lince (tj. včetně filtru, kromě úseku s přepážkou a koláčem) a Δp je pokles tlaku na filtračním koláči a přepážce.

Hodnotu měrné práce, potřebnou k průtoku suspenze linkou s prázdným filtrem, označíme W_{L0} . Za předpokladu, že tlak p_3 je stejný jako při zařazené filtrační přepážce a koláči, platí vztah:

$$W_{L0} \cdot \rho_S = p_3 - p_4 + (h_3 - h_4) \cdot \rho_S \cdot g + \Delta p_{L0} \quad (2.87)$$

po úpravě vztah:

$$W_{L0} \cdot \rho_S = p_3 - p_4 + (h_3 - h_4) \cdot \rho_S \cdot g + \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum_{j=1}^n \zeta_j \right) \rho_S \cdot \frac{v_S^2}{2} \quad (2.88)$$

kde λ je součinitel tření v potrubí, l je délka potrubí, ζ_j jsou koeficienty místních odporů.

Rychlost suspenze v potrubí lze vyjádřit z rychlosti filtrace:

$$v_S = \frac{4\dot{V}_S}{\pi \cdot d^2} = \frac{dV_F}{S \cdot dt} \cdot \frac{4S}{\pi \cdot d^2} \cdot \frac{x_{V,K}}{x_{V,K} - x_{V,S}} \quad (2.89)$$

když z objemové bilance: $\dot{V}_S = \frac{dq_F}{dt} \cdot \frac{S \cdot x_{V,K}}{x_{V,K} - x_{V,S}} \quad (2.90)$

Průsečík charakteristiky čerpadla a potrubí udává pracovní bod čerpadla. Platí pro něj vztah:

$$W_C \cdot \rho_S = W_L \cdot \rho_S \quad (2.91)$$

Z (2.86), (2.87) a (2.91) plyne

$$\Delta p = \rho_S \cdot (W_C - W_{L0}) \quad (2.92)$$

Pro stanovení doby filtrace je třeba vyjádřit vztah mezi $\dot{V}_S$ a q_F .

$$q_F = \frac{V_F}{S} = \frac{K_2}{\frac{dq_F}{dt}} - q_{Fekv} = \frac{K_2 \cdot S}{\dot{V}_S \left(1 - \frac{x_{V,S}}{x_{V,K}} \right)} - q_{Fekv} \quad (2.93)$$

protože však hodnota K_2 závisí na Δp je vhodné rovnici upravit pomocí rovnice (2.92):

$$q_F = \frac{(K'_2 / \Delta p') \cdot S \cdot \rho_S \cdot (W_C - W_{L0})}{\dot{V}_S \left(1 - \frac{x_{V,S}}{x_{V,K}} \right)} - q_{Fekv} \quad (2.94)$$

kde K'_2 a $\Delta p'$ jsou hodnoty veličiny K_2 a Δp při určitém průtoku suspenze $\dot{V}'_S$.

Doba filtrace se vyjádří z rovnice (2.90) pro počáteční podmínky $t = 0$ a $q_F = 0$:

$$t = \frac{S}{1 - \frac{x_{V,S}}{x_{V,K}}} \cdot \int_0^{q_F} \frac{dq_F}{\dot{V}_S} \quad (2.95)$$

Při řešení se postupuje tak, že se vždy zvolí hodnota $\dot{V}_S$, z charakteristiky čerpadla se stanoví W_C a výpočtem se určí W_{L0} a q_F . K numerickému nebo grafickému stanovení hodnoty integrálu v rovnici (2.95) stačí několik dvojic hodnot $\dot{V}_S$ a q_F .

Někdy je možné v určité oblasti průtoku místo grafu charakteristiky čerpadla použít vztah:

$$W_C = a_1 \dot{V}_S^2 + a_2 \dot{V}_S + a_3 \quad (2.96)$$

kde a_i ($i = 1, 2, 3$) jsou empirické konstanty.

Kombinací (2.96) s (2.88), (2.89) a (2.94) lze úlohu řešit rovnicí (2.95) analyticky. [6].

2.3.4 V případě diskontinuální filtrace v odstředivce

Potřebného rozdílu tlaků se dosahuje odstředivou silou.

Filtrační plocha má tvar válce a je funkcí poloměru

$$\text{Vychází se z rovnice (2.54)} \quad \Delta p_1 = \frac{dV_F}{S \cdot dt} \cdot \mu \cdot \alpha \cdot x_0 \cdot \frac{V_F}{S}$$

$$\text{neboli} \quad \Delta p_1 = v_f \cdot \mu \cdot \alpha \cdot h_n$$

$$\text{která se upraví na tvar:} \quad \Delta p_1 = v_f \cdot \mu \cdot \alpha \cdot \Delta r_n \quad (2.97)$$

kde r_n je infinitezimální tloušťka vrstvy koláče.

Ze základního vztahu vyjadřujícího rozdělení tlaků v odstředivce:

$$p - p_0 = \rho \frac{\omega^2}{2} (r^2 - r_0^2) \quad (2.98)$$

kde p je tlak ve vzdálenosti r od osy rotace, r_0 je poloměr válcové hladiny kapaliny v odstředivce a p_0 je tlak působící na tuto hladinu, je tlak před koláčem p_I dán vztahem:

$$p_I = \frac{\omega^2 \cdot \rho_s}{2} (r_1^2 - r_0^2) = 2\pi^2 \cdot n^2 \cdot \rho_s (r_1^2 - r_0^2) \quad (2.99)$$

kde ω je úhlová rychlost a n je frekvence otáčení, ρ_s je hustota suspenze, tlak působící na hladinu kapaliny se zanedbává.

Tlak za filtrační přepážkou je obvykle atmosférický a proto se proti p_I zanedbává.

Při kontinuální filtraci (nepřetržitě) jsou veličiny r_0 , r_I a $dV_F / dt = \dot{V}_F$ konstantní.

Za předpokladu, že vnější poloměr filtračního koláče lze považovat za shodný s poloměrem bubnu (tloušťka filtrační přepážky je zanedbatelná), lze užít vztah:

$$\frac{dV_F}{dt} = \dot{V}_F = \frac{p_I \cdot 2\pi \cdot r_3 \cdot h_n}{\alpha \cdot \mu \cdot (r_3 \cdot \ln \frac{r_3}{r_1} + V_{Fekv})} \quad (2.100)$$

kde r_3 je vnitřní poloměr bubnu, r_I je vnitřní poloměr filtračního koláče, h_n je výška vrstvy koláče, $\dot{V}_F$ je objemový průtok filtrátu.

Při malé koncentraci suspenze vzniká koláč malé tloušťky. Filtrační plocha se v tomto případě mění nepatrně a k výpočtu lze použít vztahy pro filtraci s konstantní filtrační plochou. [6].

2.3.5 V případě kontinuální filtrace bubnovým filtrem

Filtrace probíhá za konstantního rozdílu tlaků, pro výpočet rychlosti filtrace je tedy možné vycházet z rovnice (2.76) $q_F^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot q_F = K_3 \cdot t$, ze které je však nutné vyjádřit dobu, kdy je buben ve styku se suspenzí, tedy kdy se tvoří koláč.

Úsek ponoření bubnu se označí δ , frekvence otáčení bubnu n . Jedna otáčka trvá $1/n$ sekund. [1].

Doba filtrace t_{otb} je rovna době jedné otáčky vynásobené poměrem ponořené části k celkovému povrchu bubnu. [2].

Vztah
$$t_{otb} = \frac{1}{n} \cdot \varphi \quad (2.101)$$

platí za předpokladu, že
$$\varphi = \frac{\delta}{2\pi} \quad (2.102)$$

Rovnice rychlosti filtrace je tedy ve tvaru:

$$q_{Fotb}^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot q_{Fotb} = K_3 \cdot \frac{1}{n} \cdot \varphi \quad (2.103)$$

Kde q_{Fotb} je množství filtrátu z jednotky plochy celého bubnu:

$$q_{Fotb} = \frac{V_{Fotb}}{S_b} \quad (2.104)$$

kde S_b je plocha bubnu a V_{Fotb} je objem filtrátu za jednu otáčku bubnu.

Rovnice (2.103) platí pro jednu otáčku bubnu. Při frekvenci otáčení bubnu n platí pro množství filtrátu z jednotky plochy za jednotku času vztah:

$$\dot{q}_F = n \cdot q_{Fotb} \quad (2.105)$$

dosazením do rovnice (2.103) je dán vztah:

$$\frac{1}{n} \cdot \dot{q}_F^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot \dot{q}_F = K_3 \cdot \varphi \quad (2.106)$$

po úpravě:

$$\dot{q}_F^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot \dot{q}_F \cdot n = K_3 \cdot \varphi \cdot n \quad (2.107)$$

nebo:

$$\dot{q}_F^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot \dot{q}_F \cdot n = 2 \cdot K_2 \cdot \varphi \cdot n \quad (2.108)$$

[1]

2.3.6 V případě promývání filtračního koláče

Koláč se promývá na filtru, na kterém se vytvořil, tak, že se jím nechá protékat promývací kapalina stejným způsobem jako filtrát.

Kapalina protéká vrstvou koláče a přepážkou, lze tedy užít nejužívanější tvar rovnice rychlosti filtrace, s tím rozdílem, že veličiny vztažené k promývací kapalině označíme indexem p .

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{\Delta p_p \cdot S^2}{\mu_p \cdot \beta(V_F + V_{Fekv})} \quad (2.109)$$

Promývá se obvykle při konstantním rozdílu tlaků. Jestliže je tento rozdíl roven rozdílu tlaků při konci filtrace a viskozita promývací kapaliny je rovna viskozitě filtrátu, rychlost promývání je pak stejná jako rychlost filtrace v konci procesu, kdy koláč má maximální tloušťku. Toto ovšem platí jen tehdy, když filtrát i promývací kapalina protékají koláčem stejnou cestou (plocha při promývání je totožná s plochou filtrace).

Je-li při promývání konstantní rozdíl tlaků, pak je dle rovnice (2.109) rychlost promývání

konstantní a lze psát:
$$V_p = \frac{\Delta p_p \cdot S^2}{\mu_p \cdot \beta (V_F + V_{Fekv})} \cdot t_p \quad (2.110)$$

Vztáhne-li se objem promývací kapaliny na jednotku plochy filtru, lze vyloučit závislost na jeho velikosti. Obdobně jako ve vztahu (2.67) se zavede veličina:

$$q_p = \frac{V_p}{S} \quad (2.111)$$

po úpravě:
$$q_p = \frac{\Delta p_p}{\mu_p \cdot \beta (q_F + q_{Fekv})} \cdot t_p \quad (2.112)$$

Zavedením konstanty K_p :
$$K_p = \frac{\Delta p_p}{\mu_p \cdot \beta} \quad (2.113)$$

získáme vztah ve tvaru:
$$q_p = \frac{K_p}{q_F + q_{Fekv}} \cdot t_p \quad (2.114)$$

Mezi konstantami K_p a K_2 : je vztah:

$$K_p = K_2 \cdot \frac{\Delta p_p \mu}{\Delta p \mu_p} \quad (2.115)$$

z čehož plyne, že při $\mu_p < \mu$ je rychlost promývání větší než rychlost filtrace. [1].

Uvedené rovnice promývání platí pro filtr, u kterého je plocha při promývání totožná s plochou filtrace. Při promývání na kalolisu se uplatňuje pouze polovina plochy ve srovnání s plochou využitou při filtraci. Pak platí:

$$S = 2 \cdot S_p \quad (2.116)$$

$$\alpha \cdot h_p = 2 \cdot \alpha \cdot h = 2 \cdot \beta \frac{V_F}{S} \quad (2.117)$$

$$q_p = V_p / S \quad (2.118)$$

$$q_{Fekvp} = 2 \cdot q_{Fekv} \quad (2.119)$$

Z rovnice (2-114) lze dostat:

$$4 \cdot q_p (q_F + q_{Fekv}) = K_p \cdot t_p \quad (2.120)$$

[6]

3 VOLBA VHODNÉHO FILTRAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

Při plánování filtračního procesu je důležité zvolit vhodné filtrační zařízení (filtr).

3.1 Hlediska při výběru filtračního zařízení

Při výběru filtračního zařízení je nutné zvážit několik hledisek.

Především se zjišťuje, zda se při filtraci tvoří filtrační koláč (obsah tuhé fáze v suspenzi je větší než 1 % objem.) nebo zda se při obsahu tuhé fáze menší než 0,1 % objem. jedná pouze o čiření, kdy k tvorbě koláče nedochází.

Při filtraci se získává filtrát, koláč či obojí:

- a) Je-li hlavním produktem koláč, zvolí se filtr, který dovoluje účinné promytí a vysušení koláče.
- b) Má-li být hlavním produktem hodnotný filtrát, zvolí se zařízení, které má minimální schopnost zadržovat kapalinu v koláči, tedy kdy je třeba minimální promývání.

Dalším faktorem výběru je způsob odstraňování koláče vhodný pro dané podmínky. Je-li filtrát jedovatý, těkavý, výbušný, je třeba pracovat ve zcela uzavřeném zařízení.

Na volbu filtračního zařízení mají vliv i jiné faktory, např. volba filtračního materiálu (volí se podle hrubosti suspenze), snadnost obsluhy, objem zařízení, výměna filtrační přepážky apod. [1].

3.2 Rozdělení filtračních zařízení

Filtry se dělí:

Podle způsobu činnosti:

- a) Periodicky pracující filtry – může na nich probíhat filtrace při libovolném režimu. Užíváme je hlavně tam, kde je k rozdělení suspenze třeba velkých tlaků.
- b) Nepřetržitě pracující filtry – uskutečňuje se na nich pouze filtrace za konstantního rozdílu tlaků. Používáme je pro velký objem suspenze. [1].

Podle způsobu vytváření tlakového rozdílu před filtrační přepážkou a za ní:

- a) Filtry pracující pod hydrostatickým tlakem sloupce filtrované kapaliny

- b) Vakuové filtry, u kterých se potřebného podtlaku dosahuje vývěvami [3] - vakuové zařízení pracuje s vakuem za filtrem. Je vhodné pro dobře filtrovatelné suspenze. Dá se použít jen tam, kde není třeba velký tlakový rozdíl, aby nezačal filtrát vřít. [1].
- c) Tlakové filtry (kalolisy), které pracují pod tlakem vyvinutým čerpadly nebo kompresory [3] - tlakové zařízení pracuje s přetlakem před filtrem (před filtrem je tedy tlak větší než za přepážkou). [1].

Podle druhu filtrační přepážky – čím jemnější jsou oddělované částice směsi, tím menší musí být zrna filtračního materiálu:

- a) Filtry se zrnitou (volně uloženou) náplní – jako filtrační materiál se používá jemný křemenný písek, drcený mramor, čistý vápenec, uhlí, strusky, rudy, azbest apod, v závislosti na chemických vlastnostech filtrované suspenze. Užívá se jich hlavně k čištění kapalin s malým obsahem tuhé fáze a také, když je sedlina bezcenná. Nejjednodušším takovým filtrem je nádoba se síťovým dnem.
- b) Tkaninové filtry – filtrační materiál je zhotoven z vláken živočišného původu (vlna, hrubé sukno), rostlinného původu nebo minerálního původu (azbest) nebo z kovového tkaniva (síťka z oceli či niklu), v závislosti na chemických vlastnostech filtrované suspenze. Užívá se jich hlavně v případě kdy je nutné zamezit ztrátě kapaliny, je-li obsah tuhé fáze velký nebo má-li se zužít i oddělená sedlina.
- c) Filtry s tuhou nepohyblivou přepážkou – filtrační materiál z různých keramických materiálů. Přepážky jsou mechanicky dosti pevné. Na jemnou filtraci se používá porcelánových filtrů a filtrů ze speciálních druhů keramiky (průlinčivé filtry).
- d) Filtry s polopropustnou přepážkou. [3].

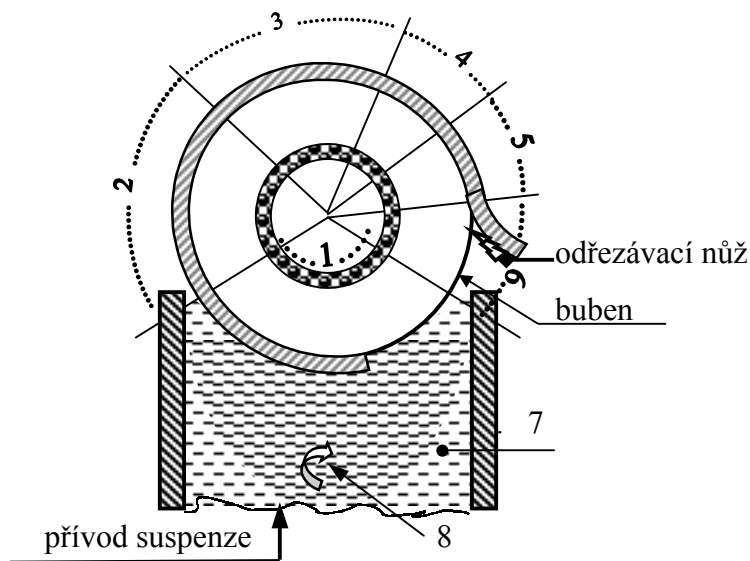
4 NEJČASTĚJI POUŽÍVANÁ FILTRAČNÍ ZAŘÍZENÍ

4.1 Nepřetržitě pracující zařízení

Nejčastěji používaný nepřetržitě (kontinuálně) pracující filtr je bubnový vakuový filtr:

- výhodou je, že filtrace, promývání, sušení a odstraňování koláče probíhá automaticky a nepřetržitě.
- nevýhodou je nemožnost libovolně měnit v širokých mezích dobu trvání jednotlivých operací cyklu, složitost konstrukce - při stejné filtrační ploše zabírají více místa než kalolisy.
- užívají se k filtrování velkého množství suspenze, protože jejich pořizovací náklady jsou vysoké.
- filtrace probíhá s konstantním rozdílem tlaků.
- hlavní součástí je vodorovný buben, na povrchu perforovaný, potažený filtrační tkaninou a částečně ponořený do zásobníku se suspenzí. Buben je rozdělený na sekce (komory), z nich každá je trubicou spojena s rozváděcí hlavou.
- při otáčení bubnu se každá sekce postupně spojuje s částmi hlavy a prochází zónami filtrace, 1.odvodnění, promývání, 2.odvodnění, oddělení koláče a regenerace tkaniny.

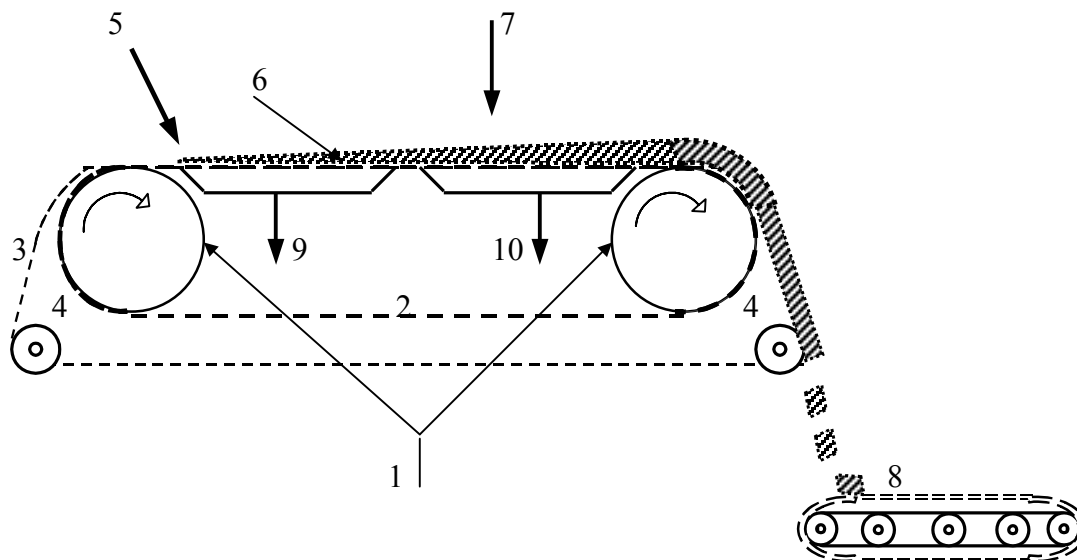
V zóně filtrace (1) se sekce ponoří do suspenze (7), která se pomalu promíchává míchadlem (8) a spojí se se zdrojem vakua. Na tkanině se tvoří koláč a současně se odsává filtrát do bubnu. V oblasti 1.odvodňování (2) se sekce vynoří ze suspenze, zůstává stále spojena s vývěvou, takže se odsaje zbytek filtrátu v suspenzi. Při promývání (3) se koláč sprchuje promývací kapalinou, která se pod tlakem odsává a odvádí. Při 2.odvodňování (4) vzduch opět vytěsňuje z pórů koláče kapalinu. V zóně odfouknutí koláče (5) se sekce spojí se zdrojem stlačeného vzduchu, který odfoukne koláč. Ten se pak odřezává nožem. Regenerace tkaniny (6) se děje profukováním stlačeným vzduchem. [1] .



Obr.6. Schéma činnosti bubnového vakuového filtru. [1].

Často užívaným, kontinuálně pracujícím filtrem je i pásový vakuový filtr:

- výhodou je oproti bubnovým filtrům jednodušší konstrukce a vyšší výkonnost při filtrování nesterodných tuhých fází, protože se na pás nejdříve usazují hrubé částice.
- nevýhodou je malý filtrační povrch a neúplné využití filtrační tkaniny.
- užívají se v chemickém průmyslu. Jsou vhodné k filtrování suspenzí s menším obsahem tuhé fáze. [3].
- pásový filtr se skládá z válců (1) na nichž je napnut děrovaný pás (2), ke kterému je v horní části přitlačena filtrační tkanina (3) pomocí napínacích kladek (4). Děrovaný pás i filtrační tkanina se pohybují v horní části v nezakresleném žlabu, na jehož hloubce je závislé dávkování suspenze (5). Tvoří se filtrační koláč (6), který se promývá v místě (7). V místě (8) se odvodněný koláč dostává na dopravník. Filtrát (9) a promývací kapalina (10) odtéká do zásobníku, který je připojený na vývěvu. Filtrační a promývací pásma je oddělené přepážkou, která brání přetékání suspenze do promývacího pásma. [2].



Obr. 7. Schéma činnosti pásového vakuového filtru. [2].

4.2 Periodicky pracující zařízení

Nejčastěji používaným periodicky (diskontinuálně) pracujícím filtrem s tkaninovou filtrační přepážkou je kalolis:

- výhodou je dlouhá životnost, bezpečný provoz, malé prostorové nároky (tj. maximální filtrační plocha na minimálním prostoru) [7].
- výhodou jsou také malé náklady i amortizace, lze pracovat s vysokými tlaky a se snadno dostupnými filtračními tkaninami.
- nevýhodou je nákladnost obsluhy, opotřebování přepážek tlakem a častým rozebíráním a omezení pracovního cyklu na dobu naplnění rámu nebo komůrky koláčem.
- je vhodný k filtrování suspenzí o malé koncentraci tuhých částic, protože pak ho není třeba tak často rozebírat, což je obtížné. Dále se hodí k rozdělování suspenzí vyšší teploty, které se nesmějí ochladit, aby z nich např. nevypadávali krystaly.
- kalolisy se nedají použít při zpracování těkavých a zdraví škodlivých látek, protože obsluha většinou přichází přímo do styku s koláčem při jeho odstraňování. [1].
- využívá se hlavně ve vodárenství a čistírnách odpadních vod. V průmyslu chemickém, potravinářském. Užívá se i pro odvodnění kalů do polotuhého až tuhého stavu. Umožňuje ekologicky výhodné zneškodnění kalů spalováním, uložením na řízené skládce aj. [8].

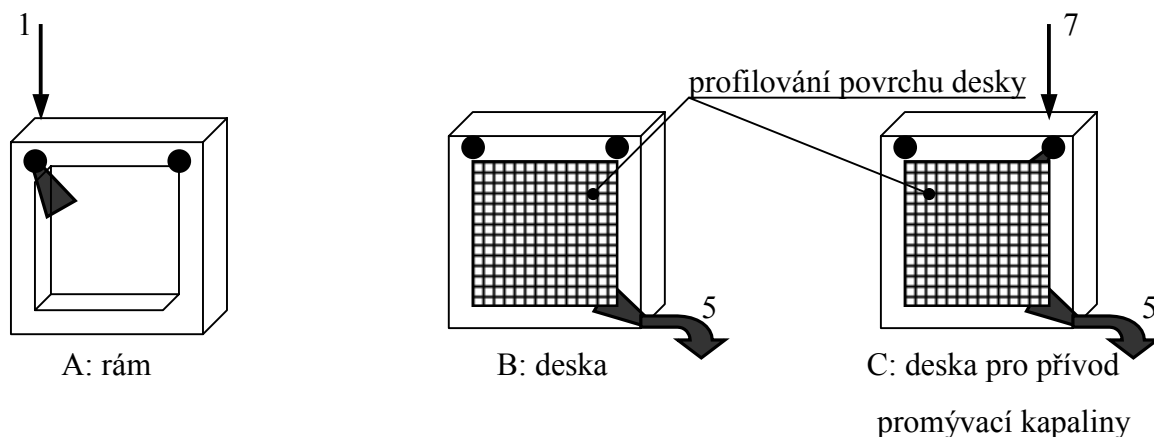
Při volbě vhodného kalolisu je třeba specifikovat jeho:

- materiálové provedení
- velikost a počet filtračních desek (elementů)
- tloušťku filtračního koláče – volí se dle charakteru filtrované suspenze od 15 do 30 mm
- stupeň automatizace jednotlivých operací
- parametry plnicího čerpadla. [7].

Rámový kalolis:

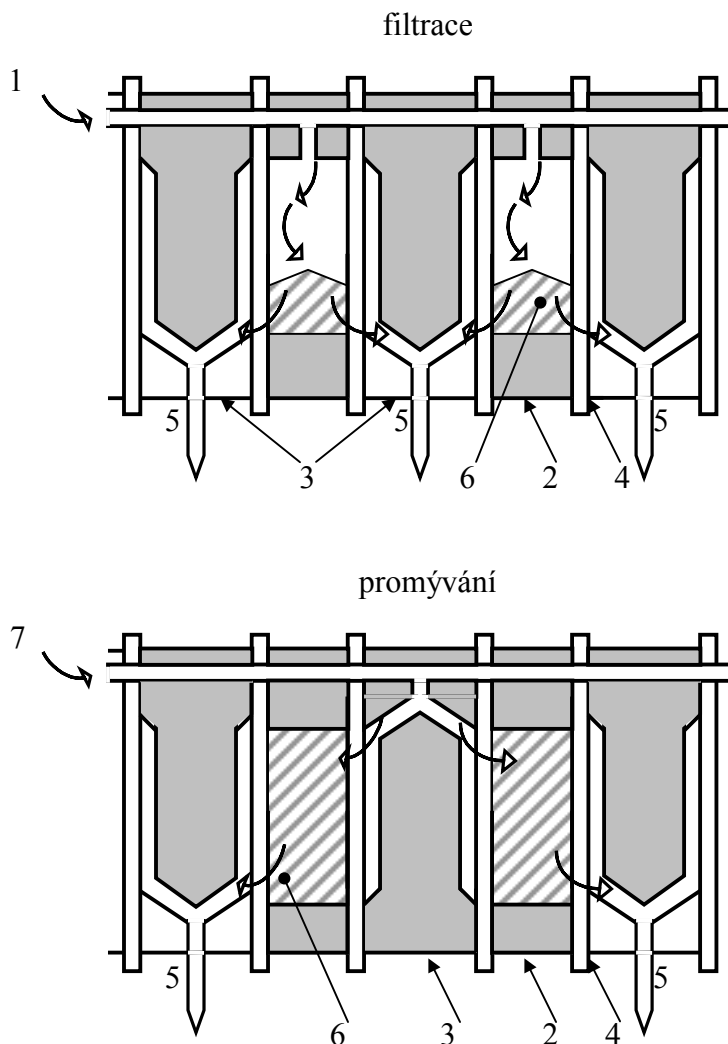
-skládá se ze střídajících se desek a ráků stejných rozměrů, které se držadly zavěšují na vodorovné tyče. Desky jsou rýhované a potažené filtrační tkaninou. Desky i rámy mají otvory, které po sestavení kalolisu tvoří kanály pro průchod suspenze a promývací kapaliny. Do těchto otvorů také zapadají otvory ve filtrační tkanině.

-při filtraci se kanálem (1) přivádí suspenze, která se pak dostává do prostoru (filtrační komora) vytvořeného rámem (2) a dvěma hydraulicky stlačenými sousedními deskami (3) s filtrační tkaninou. Kapalná fáze suspenze prochází filtrační přepážkou (4) a odtéká žlábkem ke kohoutům (5), které jsou na všech deskách a jsou v tomto stádiu všechny otevřeny. Když se prostor vytvořený rámy zcela zaplní koláčem (6), přeruší se dodávání suspenze a následuje promývání. Kanálem (7), který ústí pouze do každé druhé desky, se přivádí promývací kapalina. Polovina výpustních kohoutů na deskách se uzavře tak, aby kapalina postupně protékala jednou filtrační přepážkou, koláčem, druhou přepážkou a odtud ke kohoutu (5). Po skončené filtraci se koláč v kalolisu profukuje stlačeným vzduchem či párou. Dále se uvolní deska, stlačující k sobě všechny části kalolisu, desky a rámy se rozeberou a koláč se ručně či automaticky odstraní. [1].



Obr. 8. Rámy a desky rámového kalolisu. [1].

-při provozu kalolisu tedy nastávají tři fáze – filtrace, promývání a vyprazdňování kalolisu včetně přípravy k novému cyklu. [2].



Obr. 9. Schéma činnosti rámového kalolisu. [4].

Komorový kalolis:

-od rámového se liší menším prostorem pro vytvoření koláče a větším dovoleným tlakem, což umožňuje jeho použití pro obtížně filtrovatelné suspenze. Užívá se u suspenzí, které by zanášely úzké kanálky kalolisu rámového.

-okraje rýhovaných desek jsou zesíleny, takže po stlačení desek mezi nimi vznikne volný prostor. Desky jsou potaženy filtrační tkaninou, která zároveň slouží jako utěsnění. Suspenze se přivádí kanálem uprostřed desek. Průběh filtrace je obdobný jako u rámového kalolisu. [1].

Mezi periodicky pracující filtry s tkaninovou filtrační přepážkou patří také:

Listový filtr (filtr pytlíkový):

- výhodou oproti kalolisům je snadnější manipulace, možnost dobrého promytí koláče a jeho odstranění bez rozebírání filtru. [1].
- nevýhodou je komplikované promývání a odvodňování filtračního koláče, proto se používají hlavně tam, kde tyto operace nejsou nutné. [5].

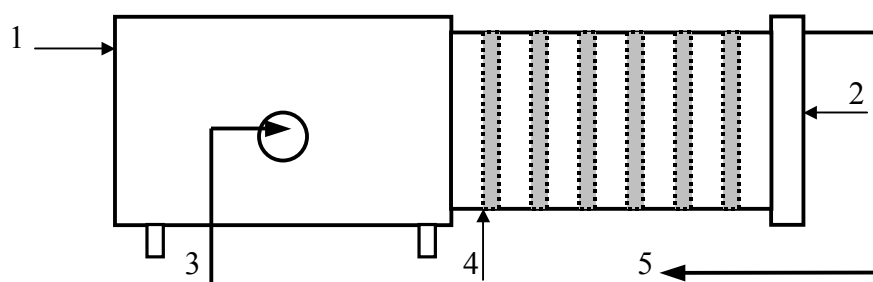
Vakuový listový filtr:

- používá se pro filtrování směsí, které obsahují malé množství tuhé fáze (do 3%)
- filtrační přepážkou je tkaninový pytlík, celý ponořený do směsi. Filtrát se odsává zevnitř pytlíku a kal se usazuje na jeho vnějším povrchu. Aby stěny pytlíku při odsávání filtrátu k sobě nepřilnuly, je tkanina natažena na rám s perforovaným nebo vlnitým povrchem. Tím vzniká uvnitř volný prostor pro odtahování filtrátu ke sběrným otvorům. Listové filtry mají velký filtrační povrch, filtruje se většinou pod vakuem (případně pod malým přetlakem do 1 atp).
- filtr se skládá z velkého počtu listů, upevněných na rámu v jeden článek, který lze zvednout a převážet mostovým jeřábem.
- článek listového filtru je tkaninou povlečený rám s otvory na bočních stěnách. Filtrát vniká do rámu a trubicou se odvádí ke sběrači, který je spojen s vývěvou.
- listy se ponoří do nádrže a vytvoří se v nich určitý podtlak. Kapalina vniká do listů a kal se usazuje na jejich vnějším povrchu. Po vytvoření vrstvy sedliny určité tloušťky se článek přenesení za stálého udržování vakua, aby se neodloupila sedlina, do druhé nádrže, kde se promyje vodou nebo roztokem. Po promytí se sedlina suší prosáváním vzduchem a v třetí nádrži se z listů odstraní opačně působícím proudem vody, vzduchu či páry. Nádrž mívá často míchací zařízení, aby nedošlo k usazování suspenze. [3].

Tlakový listový filtr:

- používá se pro filtrování jemnějších suspenzí, hůře filtrovatelných.
- skládá se z uzavřené horizontální nebo vertikální tlakové nádoby, v níž jsou umístěny, opět horizontálně nebo vertikálně, filtrační listy s pevným rámem, který je z obou stran potažen filtrační tkaninou. Jsou tedy čtyři druhy těchto filtrů.
- suspenze je dávkována do filtrační nádoby (1), která má pohyblivé víko (2), čerpadlem. Tím je zajištěn potřebný tlakový rozdíl filtrace. Vstup suspenze je na obr.10. označen (3).

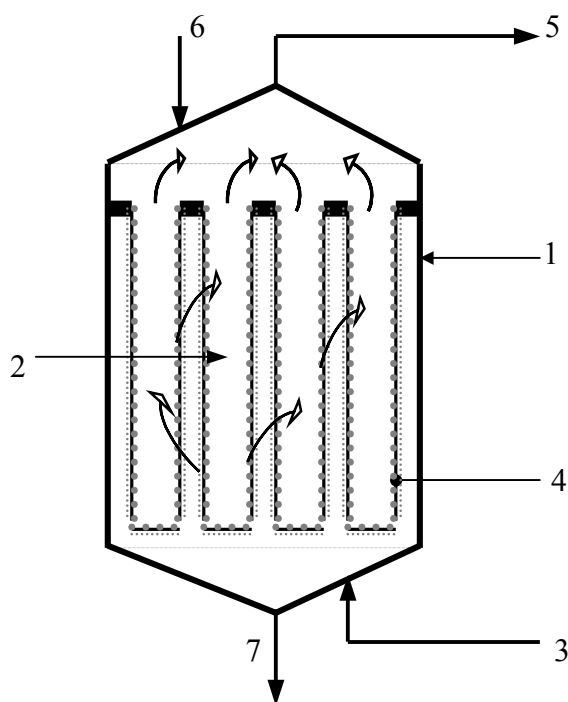
Filtrát proniká dovnitř filtračních listů (4) a na povrchu listů se vytváří filtrační koláč. Filtrát se odvádí drenážním systémem do zásobníku filtrátu (5). Po vytvoření filtračního koláče se přivede do filtru promývací kapalina, jejíž zbytek se z koláče odstraní stlačeným vzduchem. Po skončení filtrace se z tlakové nádoby odčerpá zbytek suspenze, nádoba se otevře a z vyjmutých filtračních listů se odstraní tlakem vzduchu filtrační koláč. [5].



Obr. 10. Tlakový listový filtr. [5].

Svíčkový filtr (zahušťovací filtr):

- využívá se v mnoha odvětvích pro filtraci kapalin a plynů. V potravinářství k filtraci vody, alkoholu, vína, piva, džusu apod. Ve farmacii např. pro získání vakcíny, séra, krevního derivátu. V chemickém průmyslu při výrobě parfémů, esencí apod. [8].
- používá se pro filtraci nepříliš koncentrovaných suspenzí. K částečnému oddělení kapalné fáze, nebo-li k zahuštění suspenze. Lze ho užít také k filtraci zaprášených plynů.
- svíčkové filtry mohou pracovat periodicky, ale také nepřetržitě.
- filtračním elementem je tzv. filtrační svíčka, která je často zhotovená z porézní keramiky.
- vlastní těleso filtru (1) je rozděleno přepážkou s vestavěnými filtračními svíčkami (2) na dvě části. Suspenze se přivádí do vnějšího prostoru svíček potrubím (3) a na svíčkách se vytváří filtrační koláč (4). Čistá kapalina (filtrát) se odvádí z vnitřního prostoru svíček a z filtru potrubím (5). Po zvýšení odporu filtru vytvořeným koláčem nad povolenou mez se filtrace přeruší. Provede se regenerace svíček prací kapalinou, vodní párou nebo tlakovým vzduchem, ve směru opačném pomocí potrubí (6) a (7). [2].

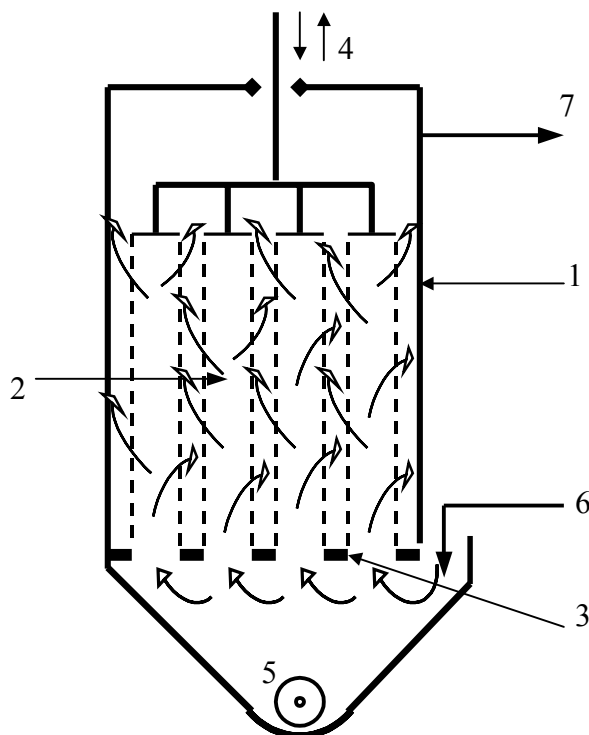


Obr. 11. Svíčkový filtr.[2].

Rukávový filtr:

-používá se na zachycení prachu unášeného plynem, má až 99% účinnost při zachycení velmi jemného prachu. V elektrárnách se používá pro odstranění popílku ze spalín, kde je nutné použít textilní tkaniny snášející vysokou teplotu (tj. 250 °C i více). Jinak hrozí, že zkondenzovaná voda s prachem způsobí zalepení filtrační tkaniny.

-v tělese filtru (1) jsou textilní filtrační rukávy (2), které jsou ve spodní části připevněny k otvorům v dělící ploše (3) a v horní části jsou zavěšeny na konstrukci, která je spojena se střásacím zařízením (4). V nejnižší části filtru je šnekový transportér (5), který slouží k vynášení zachyceného prachu z filtru. Zaprášený plyn vstupuje potrubím (6), zespodu vstupuje do filtračních rukávů, na jejichž povrchu se zachytí prach. Vyčištěný plyn, který prošel přes rukávy, vystupuje z filtru potrubím (7). Pravidelně po určité době je zapnuto střásací zařízení, které střásá prach zachycený v rukávech do spodní části, kde je šnekový dopravník. Místo střásacího zařízení je možné použít tlakového vzduchu.[2].



Obr. 12. Rukávový filtr. [2].

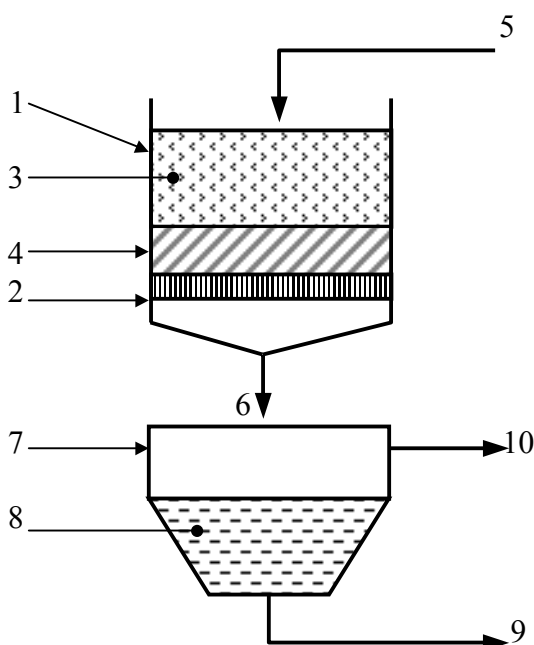
Nejjednodušší periodicky pracující filtr s tkaninovou filtrační přepážkou je filtrační nuč:

Vakuová nuč:

- výhodou je, že se ze sedliny odsaje podstatná část kapaliny, proto se filtrát při promývání příliš nezředí. Nuč je levná a jednoduchá, dá se v provozu snadno řídit a kontrolovat
- nevýhodou jsou rozměry, omezená velikost filtrační plochy a nezbytnost ručního vyprazdňování. Nevýhodou je i malá rychlost filtrace, vlivem nejvyššího dosažitelného rozdílu tlaků, tj. 1 at.
- výkonnost nuče závisí na velikosti povrchu filtrační přepážky, na tloušťce vrstvy sedliny a na velikosti vakua. Filtrační povrch nuče se pohybuje mezi $1\div 6\text{ m}^2$, tloušťka vrstvy koláče mezi $50\div 400\text{ mm}$. V praxi dosažitelné vakuum bývá $500\div 700\text{ mm rt. sl.}$ [3].
- nuč (1) obsahuje filtrační přepážku (2), což je většinou děrovaná deska potažená textilní plachetkou. Do nuče se přivede suspenze tuhých částic (3) a zachycené částice vytvářejí koláč (4). Potrubí (5) slouží k přivedu suspenze ale v případě potřeby i promývací

kapaliny. Filtrát postupuje potrubím (6) z nuče do zásobníku filtrátu (7). Filtrát (8) se periodicky vypouští potrubím (9). Potřebný přetlak se vytváří vakuovou pumpou připojenou potrubím (10).

-postup filtrace je takový, že se nuč naplní suspenzí a filtrace se uskuteční odsáváním filtrátu. Po skončení filtrace se koláč promyje a vyprázdní buď ručně, nebo vyklopením, vyčistí se filtrační přepážka a potom je možné nuč znovu použít. [2].



Obr. 13. Vakuová filtrační nuč se zásobníkem filtrátu.[2].

Krytá nuč:

- užívá se k filtrování kapalin, které tvoří zdraví škodlivé nebo lehce vznětlivé páry.
- pracuje pod tlakem stlačeného vzduchu nebo inertních plynů.
- nevýhodou je obtížné vyprazdňování. Spodní dno nuče je odklopné, montuje se na závěs, je opatřeno protizávažím a přitahuje se odklopnými šrouby. Perforované dno je připevněno ke spodnímu dnu a odklápí se zároveň. Dolní část nuče je s jimačem filtrátu spojena ohebnou trubkou. [3].

Sklopná nuč:

-je uložena v horizontálních ložiskách, proto je možné ji sklopit kolem vodorovné osy. Tím se rychleji a pohodlněji vyprazdňuje. Nuč se sklápí po promytí koláče a odsátí promývací kapaliny. [3].

Nejrozšířenějším filtrem se zrnitým filtračním materiálem je pískový filtr:

-písková filtrace je klasickou metodou oddělování velmi jemných mechanických nečistot z vody, kdy filtračním prostředkem je písek.

-výhodou je jednoduchá obnova pískové vrstvy a nízké náklady na její výměnu.

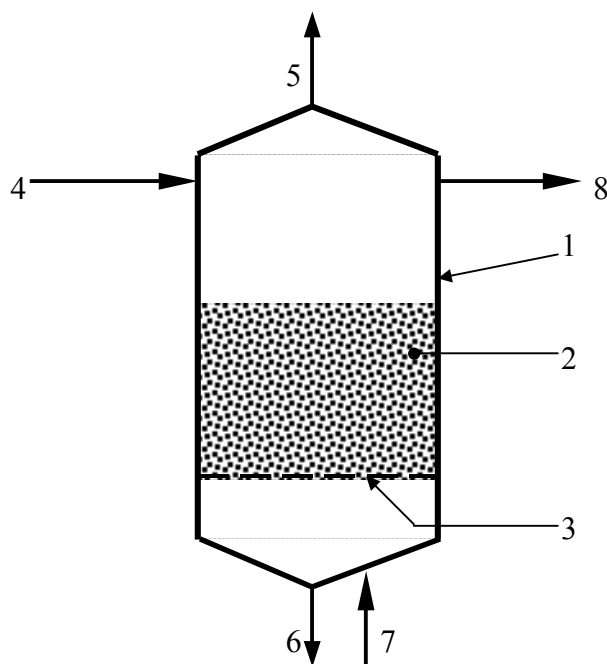
-používá se pro filtraci (čištění) technologických vod v průmyslových provozech, především v energetice, papírenství, dřevozpracujících provozech, chemických závodech, hutnictví a hornictví. Užívá se na dočišťování pitné, užitkové a povrchové vody v úpravárnách užitkových a pitných vod. Dále jako poslední terciální stupeň čištění na čistírnách odpadních vod. [9].

-je to nádrž s několika vrstvami šterku a křemenného písku:

a) otevřená – působí v ní pouze hydrostatický tlak sloupce kapaliny vysokého $1\div 1,5$ m

b) uzavřená (krytá) – pracuje pod tlakem $1,5\div 2$ kg/cm², který vyvíjí většinou čerpadla. [3].

-je to stojatá nádrž (1), filtrační přepážkou je vrstva písku (2) uložená na kloboučkovém dně (3). V dolní části je písek hrubší, v horní části jemnější. V části filtrace se přivádí znečištěná voda potrubím (4). Potrubí (5) slouží k odvodu vzdušného filtru, tj. k zaplnění celého filtru vodou. Voda po filtraci (filtrát) se odvádí potrubím (6), přičemž musí být uzavřeny ventily na potrubích (5), (7), (8). Po naplnění filtru kalem (projeví se snížením průtoku vody filtrem) se uzavřou ventily na potrubí (4) a (6) a filtr se regeneruje promývací vodou, která do filtru vstupuje potrubím (7) a prochází filtrem v opačném směru. Při dostatečné rychlosti promývací vody zrna písku uvolní zachycený kal, který z filtru odchází potrubím (8). Potom je filtr znovu připraven k filtraci. [2].

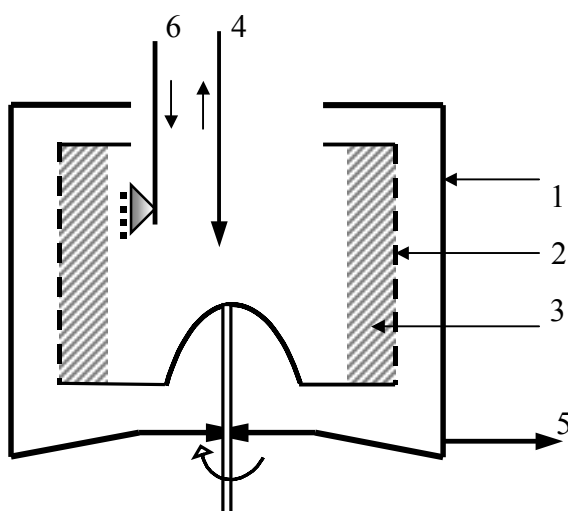


Obr. 14. Uzavřený pískový filtr. [2].

Speciálním periodicky pracujícím filtračním zařízením je filtrační odstředivka :

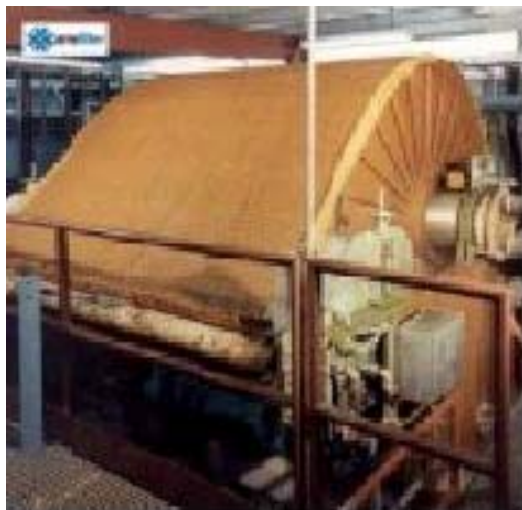
- v praxi se ale můžeme setkat nejen s periodicky pracující ale i s nepřetržitě pracující odstředivkou .
- filtrační odstředivka se používá k oddělování suspenze s krystalickou nebo zrnitou tuhou fází a také k odvodňování kusového, tuhého materiálu.
- filtrační odstředivky mají dírkovaný či plnostěnný buben umístěný v plášti, kde se hromadí filtrát a který je také ochranným obalem při možném roztržení bubnu. Buben se pohání řemenovým převodem nebo elektromotorem. Působením odstředivé síly kapalina proniká otvory dírkovaného bubnu nebo přetéká okraj plnostěnného bubnu, hromadí se v plášti a odvádí se dále do potrubí.
- periodicky pracující odstředivky se konstruují hlavně s vertikální hřídelí. Buben se vyprazdňuje horem nebo spodem, přičemž vhodnější i hygieničtější je vyprazdňování spodem, je však fyzicky náročné. Aby bylo vyprazdňování snadnější, vybavují se odstředivky i snadno řiditelnou škrabkou nebo se samočinně vyprazdňují. [3].

-skládá se z krytu (1), ve kterém je umístěn dírkovaný buben (2) s válcovou nebo kónickou stěnou tvořenou filtrační přepážkou. Buben je spojen s motorem. Na stěně bubnu se tvoří v průběhu cyklu filtrační koláč (3) z přiváděné suspenze (4). Odtok filtrátu je v místě (5). Promytí koláče je umožněno pohyblivým ústrojím (6). Po zakončení filtrace a promývání se odstředivka vyprázdní a připraví k další filtraci. [2].



Obr. 15. Filtrační odstředivka. [2].

5 FILTRAČNÍ ZAŘÍZENÍ V PRAXI



Obr. 16. Bubnový vakuový filtr. [15].

Bubnový filtr se používá pro filtraci suspenze s vysokým obsahem pevné fáze.



Obr. 17. Pásový vakuový filtr. [16].

Pásový filtr se používá ve spalovně komunálních odpadů při zpracování znečištěného popílku. Principem čištění je vymytí těžkých kovů ze surového popílku do roztoku zředěné kyseliny chlorovodíkové a následné promytí čistou vodou, které probíhá právě na pásovém vakuovém filtru. Tím se odstraní nebezpečné rozpustné složky a vyčištěný popílek již nemá nebezpečné vlastnosti.

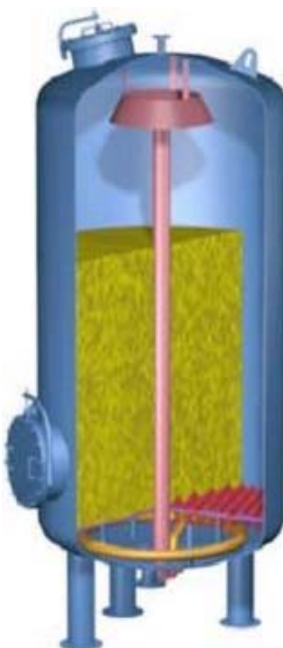


Obr. 18. Kalolis. [17]



Obr. 19. Komorový kalolis [18]

Pro použití např. v potravinářském, chemickém, důlním průmyslu a ve vodním hospodářství pro tlakové oddělení tuhých látek od kapalných kalů nebo suspenzí.



Obr. 20. Uzavřený pískový filtr. [9].

Pískový filtr se používá pro filtraci technologických vod v průmyslových provozech, zejména v energetice, papírenství, v dřevozpracujících provozech, v chemických závodech, v hutnictví a hornictví.



Obr. 21. Naplavovací svíčkový filtr. [19].

Používá se na filtraci kapalin (voda, pivo, víno, olej, emulze), prostřednictvím naplaveného filtračního prostředku na vertikálních filtračních svíčkách.



Obr. 22. Filtrační jednotka s rukávovými filtry. [20].

Filtrační jednotka se používá pro velké objemy vzduchu v řádu $10000 \div 100000 \text{ m}^3$ vzduchu znečištěného prachem, především pro odprášení v provozech cementáren, vápenek apod.



Obr. 23. Filtrační nuč. [21].

Nuče se používají k filtrování kapalin v chemickém a potravinářském průmyslu.

6 VZOROVÉ ŘEŠENÉ ÚLOHY

př. 1. Stanovení filtračních konstant na pokusném filtru a doby filtrace za konstantního rozdílu tlaků:

Vodná suspenze o hustotě 1150 kg m^{-3} , obsahující 14,2 hmotn.% tuhé fáze, se má filtrovat na listovém filtru o ploše 50 m^2 při konstantním rozdílu tlaků 4 at. Na pokusném filtru s plochou 1 m^2 bylo získáno 3,9 l filtrátu za 5 minut a 7,5 l filtrátu za 12 minut. Vlhkost koláče byla 27,0 hmotn.%. Pokusná filtrace byla vedena při konstantním rozdílu tlaků 2 at. Teplota při filtraci na listovém filtru se předpokládá 20°C , stejně jako při filtraci pokusné.

Jak dlouho potrvá filtrace $0,7 \text{ m}^3$ suspenze na listovém filtru (v minutách) a jaké hodnoty mají filtrační konstanty?

Postup:

Doba filtrace se určí ze vztahu (2.74), který se upraví za použití rovnice (2.67) na:

$$t_f = \frac{\left(\frac{V_F}{S}\right)^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot \frac{V_F}{S}}{2 \cdot K_2} \quad (\text{A})$$

Objem filtrátu se vypočítá z hmotnostní bilance pomocí vztahů (2.1) a (2.2):

$$V_F = \frac{V_S \cdot \rho_S - \frac{V_S \cdot \rho_S \cdot w_S}{w_K}}{\rho_F} = \frac{V_S \cdot \rho_S}{\rho_F} \cdot \left(1 - \frac{w_S}{w_K}\right) \quad (\text{B})$$

Ke stanovení filtračních konstant se dále dosadí do upravené rovnice (2.74):

$$V_F^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot V_F \cdot S' = 2 \cdot K_2' \cdot t_f \cdot S'^2 \quad (\text{C})$$

za veličiny V_F a t_f se postupně dosadí pokusné dvojice hodnot (V_{Fi}, t_{fi}) spolu s hodnotami S' a $\Delta p'$ z pokusného filtru. Konstantu K_2' , získanou na pokusném filtru, přepočteme na konstantu K_2 při rozdílu tlaků Δp na filtru listovém:

$$K_2 = K_2' \cdot \frac{\Delta p}{\Delta p'} \quad (\text{D})$$

Výpočet:

Při výpočtu se dosadí: $V_S = 0,7 \text{ m}^3$; $\rho_S = 1150 \text{ kg m}^{-3}$; $\rho_F = 998,2 \text{ kg m}^{-3}$ (teplota vody 20°); $w_S = 0,142$; $w_K = 1 - 0,270 = 0,730$; $\Delta p = 4at = 4 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$; $\Delta p' = 2at = 2 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$; $S = 50 \text{ m}^2$; $S' = 1 \text{ m}^2$; $V_{F1} = 3,9 \text{ l} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$; $V_{F2} = 7,5 \text{ l} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$; $t_{f1} = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$; $t_{f2} = 12 \text{ min} = 720 \text{ s}$.

Nejdříve se vypočítají z rovnic (B), (C) a (D) veličiny potřebné k určení doby filtrace t_f .

Objem filtrátu V_F je podle vztahu (B):

$$V_F = \frac{0,7 \cdot 1150}{998,2} \cdot \left(1 - \frac{0,142}{0,730}\right) = 0,65 \text{ m}^3$$

Dále se dosadí do rovnice (C) postupně dvojice pokusných hodnot (V_{Fi} , t_{fi}):

$$(3,9 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 2 \cdot K'_2 \cdot 300 \cdot 1^2 \quad (\text{Ca})$$

$$(7,5 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 2 \cdot K'_2 \cdot 720 \cdot 1^2 \quad (\text{Cb})$$

Společným řešením rovnic (Ca) a (Cb) se získají filtrační kontanty q_{Fekv} , K_2 :

$$q_{Fekv} = 5,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$K'_2 = 9,44 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Konstanta K'_2 se přepočte na K_2 , tj. pro podmínky při vlastní filtraci dle vztahu (D):

$$K_2 = 9,44 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{4 \cdot 9,81 \cdot 10^4}{2 \cdot 9,81 \cdot 10^4} = 18,9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Z rovnice (A) se pak zjistí doba filtrace t_f :

$$t_f = \frac{\left(\frac{0,65}{50}\right)^2 + 2 \cdot 5,31 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,65}{50}}{2 \cdot 18,9 \cdot 10^{-8}} = 816 \text{ s} \approx 14 \text{ min}$$

Výsledek:

Filtrace potrvá 14 minut. Filtrační konstanty provozního listového filtru jsou $q_{Fekv} = 5,31 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ a $K_2 = 18,9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

př. 2. Stanovení doby filtrace a promývání na kalolisu při konstantním rozdílu tlaků:

Úkolem je filtrovat na kalolisu o ploše 10 m^2 suspenzi, jejíž jedna dávka poskytne 1250 l filtrátu. Při předběžných pokusech na jiném filtru s filtrační plochou $1,2 \text{ m}^2$ byly získány konstanty filtrace: $K_2 = 1,285 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $q_{Fekv} = 12,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Rozdíl tlaků i odpor filtrační přepážky u pokusné i provozní filtrace bude stejný. K promývání se užije voda, jejíž objem má činit 10% objemu filtrátu. Voda má přibližně stejnou viskozitu jako filtrát. Promývání bude probíhat při stejném rozdílu tlaků jako filtrace.

Určete dobu potřebnou k filtraci jedné dávky suspenze a k promytí koláče.

Postup:

Úhrnná doba k filtraci a promytí koláče je t_c :

$$t_c = t_f + t_p \quad (\text{A})$$

Doba filtrace t_f se vypočítá podle rovnice (2.74) do které se dosadí ze vztahu (2.67):

$$t_f = \frac{(V_F/S)^2 + 2 \cdot q_{Fekv} \cdot V_F/S}{2 \cdot K_2} \quad (\text{B})$$

Obdobně se upraví rovnice (2.120) pro dobu promývání t_p :

$$t_p = \frac{4 \cdot (V_p/S) \cdot (V_F/S + q_{Fekv})}{K_p} \quad (\text{C})$$

Vzhledem ke stejnému rozdílu tlaků i stejné viskozitě filtrátu a promývací vody platí vztah:

$$K_p = K_2 \quad (\text{D})$$

Podle zadání je

$$V_p = 0,1 \cdot V_F \quad (\text{E})$$

Rovnice (C) a (D) po spojení se vztahem (D) a (E) přejde na tvar:

$$t_p = \frac{4 \cdot \frac{0,1 \cdot V_F}{S} \cdot \left(\frac{V_F}{S} + q_{Fekv} \right)}{K_2} \quad (\text{F})$$

Výpočet:

Při výpočtu se dosadí: $V_F = 1250 \text{ l} = 1,25 \text{ m}^3$; $S = 10 \text{ m}^2$; $K_2 = K_p = 1,285 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; $q_{Fekv} = 12,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Nejprve se vypočítá z rovnice (B) doba filtrace t_f :

$$t_f = \frac{\left(\frac{1,25}{10}\right)^2 + 2 \cdot 12,72 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,25}{10}}{2 \cdot 1,285 \cdot 10^{-6}} = 7310s$$

a pak ze vztahu (F) doba promývání t_p :

$$t_p = \frac{4 \cdot \frac{0,1 \cdot 1,25}{10} \cdot \left(\frac{1,25}{10} + 12,72 \cdot 10^{-3}\right)}{1,285 \cdot 10^{-6}} = 5360s$$

Čas potřebný k filtraci i k promývání se vypočte z rovnice (A):

$$t_c = 7310 + 5360 = 12670 s \approx 3 \text{ hod } 31 \text{ min.}$$

Výsledek:

Celková doba nutná k filtraci jedné dávky suspenze a k promytí koláče je 3 hod. 31 min..

př. 3. Zjištění výkonnosti kalolisu při diskontinuální filtraci za konstantní rychlosti filtrace:

Ke zpracování suspenze, která vzniká jako odpad, má být využit kalolis s 20 rámy o rozměrech 500x500x25 mm. Suspenze obsahující 7 obj.% kalu byla filtrována na pokusném filtru za stejných podmínek, jaké se předpokládají při použití kalolisu. Byly zjištěny tyto hodnoty konstant: $K_2 = 3,68 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $q_{Fekv} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$. Vlhkost koláče byla 22 obj.%.

Úkolem je zjistit, jaká bude výkonnost kalolisu za 24 hodin, tj. jaké množství suspenze v něm lze za den zpracovat, má-li se koláč promývat vodou v množství 15 % z celkového množství filtrátu (podmínky při promývání jsou stejné jako při filtraci) a trvá-li vyprázdnění a opětné sestavení kalolisu 45 minut. Předpokládejte, že filtrace i promývání budou probíhat konstantní rychlostí. Viskozita filtrátu je 1,3 cP a teplota promývací vody 20 °C.

Postup:

Množství suspenze V_{sc} získané za 24 hodin se určí z počtu cyklů n a množství suspenze V_s zpracované během jednoho cyklu:

$$V_{Sc} = n \cdot V_S \quad (A)$$

Počet cyklů n je dán vztahem:

$$n = \frac{24 \cdot 3600}{t_C} \quad (B)$$

kde t_C je doba jednoho cyklu v sekundách, což je součet času potřebného k filtraci t_f , k promývání t_p a k rozebrání a opětovnému složení kalolisu t_z je:

$$t_C = t_f + t_p + t_z \quad (C)$$

Doba filtrace t_f se vypočítá z rovnice (2.84):

$$t_f = \frac{\left(\frac{V_F}{S}\right)^2 + q_{Fekv} \frac{V_F}{S}}{K_2} \quad (D)$$

Doba promývání t_p je podle rovnice (2.120):

$$t_p = \frac{4 \cdot \frac{V_p}{S} \cdot \left(\frac{V_F}{S} + q_{Fekv}\right)}{K_p} \quad (E)$$

Oba vztahy jsou upraveny za použití vzorce (2.67). Přitom plocha filtru S je:

$$S = 2 \cdot N \cdot b \cdot h \quad (F)$$

kde N je počet rámců, b je šířka rámu a h je jeho výška.

Veličina K_p pro promývání se určí pomocí konstanty K_2 , z rovnic (2.73) a (2.113) plyne vztah (2.115):

$$K_p = K_2 \cdot \frac{\Delta p_p \mu}{\Delta p \mu_p} = K_2 \cdot \frac{\mu}{\mu_p} \quad (G)$$

Objem promývací kapaliny V_p je podle zadání:

$$V_p = 0,15 \cdot V_F \quad (H)$$

Objem suspenze zpracované během jednoho cyklu se spočte z bilance filtru pomocí rovnic (2.4) a (2.5):

$$V_F = V_K \cdot \left(\frac{x_{V,K}}{x_{V,S}} - 1 \right) \quad (I)$$

Objem koláče se V_K určí z počtu a rozměrů rámců:

$$V_K = N \cdot b \cdot h \cdot t \quad (J)$$

kde t je v tomto případě tloušťka rámu.

Výpočet:

Při výpočtu se dosadí: $x_{V,S} = 0,07$; $x_{V,K} = 1 - 0,22 = 0,78$; $N = 20$; $b = 0,5$ m; $h = 0,5$ m; $t = 0,025$ m; $t_z = 45$ min = 2700 s; $\mu = 1,3$ cP = $1,3 \cdot 10^{-3}$ Pa·s; $\mu_p = 1,005$ cP = $1,005 \cdot 10^{-3}$ Pa·s (teplota vody 20° C); $q_{Fekv} = 5,2 \cdot 10^{-3}$ m; $K_2 = 3,68 \cdot 10^{-6}$ m² s⁻¹.

Objem koláče V_K se vypočítá z rovnice (J):

$$V_K = 20 \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,025 = 0,125 \text{ m}^3$$

Vypočtená hodnota V_K se dosadí do vztahu (I), ze kterého se vypočítá objem filtrátu V_F :

$$V_F = 0,125 \cdot \left(\frac{0,78}{0,07} - 1 \right) = 1,267 \text{ m}^3$$

Objem suspenze V_S je pak podle rovnice (2.4):

$$V_S = V_K + V_F = 0,125 + 1,267 = 1,392 \text{ m}^3$$

Filtrační plochu S lze vypočítat ze vztahu (F):

$$S = 2 \cdot 20 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 10 \text{ m}^2$$

Tím jsou známy všechny veličiny potřebné k výpočtu doby filtrace t_f , určenou rovnicí (D):

$$t_f = \frac{\left(\frac{1,267}{10} \right)^2 + 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,267}{10}}{3,68 \cdot 10^{-6}} = 4540 \text{ s}$$

Konstanta pro promývání K_p z rovnice (G) je:

$$K_p = 3,68 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1,3 \cdot 10^{-3}}{1,005 \cdot 10^{-3}} = 4,78 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Objem promývací kapaliny V_p je podle vztahu (H):

$$V_p = 0,15 \cdot 1,267 = 0,19 \text{ m}^3$$

Z rovnice (E) se vypočítá doba promývání t_p :

$$t_p = \frac{4 \cdot \frac{0,19}{10} \cdot \left(\frac{1,267}{10} + 5,2 \cdot 10^{-3} \right)}{4,78 \cdot 10^{-6}} = 2097 \text{ s}$$

Doba trvání jednoho cyklu t_C je z rovnice (C):

$$t_C = 4540 + 2097 + 2700 = 9337 \text{ s}$$

Počet cyklů n ze vztahu (B):

$$n = \frac{24 \cdot 3600}{9337} = 9,25$$

Množství suspenze V_{sc} zpracované za den pak dostaneme z rovnice (A):

$$V_{sc} = 9,25 \cdot 1,392 = 12,87 \text{ m}^3.$$

Výsledek:

Za 24 hodin lze na kalolisu zpracovat $12,87 \text{ m}^3$ suspenze.

př. 4. Určení objemového průtoku filtrátu při filtraci v odstředivce:

Z třídícího kontinuálního krystalizátoru se odtahují spolu s matečným louhem krystaly anorganické soli o hustotě 1590 kg m^{-3} do kontinuální odstředivky s bubnem o průměru 500 mm a výšce 250 mm. Frekvence otáčení bubnu je 14 s^{-1} . Poloměr povrchu hladiny suspenze se udržuje na konstantní hodnotě 100 mm, také tloušťka filtračního koláče je konstantní. Suspenze obsahuje 68 hmotn.% krystalů soli. Hustota matečného louhu je 1360 kg m^{-3} a jeho viskozita činí 7 cP. Odpor filtrační přepážky lze zanedbat a měrný odpor koláče $\alpha = 5.13 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-2}$.

Jaký bude objemový tok filtrátu ($\text{m}^3 \text{ hod}^{-1}$), jestliže odstředivka vyvine odstředivou sílu rovnající se 150 násobku síly gravitační?

Postup:

Objemový tok filtrátu $\dot{V}_F$ se vypočítá podle rovnice (2.100). Po úpravě:

$$\frac{dV_F}{dt} = \dot{V}_F = \frac{p_1 \cdot 2\pi \cdot h_n}{2,3 \cdot \alpha \cdot \mu \cdot \log \frac{r_3}{r_1}} \quad (\text{A})$$

protože odpor filtrační lze podle zadání zanedbat. Vnitřní poloměr povrchu koláče r_1 zjistíme z porovnání odstředivé a gravitační síly F_o a F_g , které působí na povrch koláče.

Podle zadání je:

$$\frac{F_o}{F_g} = \frac{\omega^2 \cdot r_1}{g} = k \quad (\text{B})$$

kde k je udaná hodnota poměru síly odstředivé a gravitační. Z toho plyne:

$$r_1 = \frac{k}{4 \cdot \pi^2 \cdot n^2} \quad (C)$$

Tlak p_I se určí z rovnice (2.99):

$$p_1 = 2\pi^2 \cdot n^2 \cdot \rho_s (r_1^2 - r_0^2) \quad (D)$$

kde hustota suspenze ρ_s plyne ze vzorce (2.6a):

$$\rho_s = \frac{\rho_s \cdot \rho_l}{w_s \cdot \rho_l + (1 - w_s) \cdot \rho_s} \quad (E)$$

Výpočet:

Při výpočtu se dosadí: $\rho_s = 1590 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\rho_l = 1360 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $w_s = 0,68$; $n = 14 \text{ s}^{-1}$; $r_0 = 0,1 \text{ m}$; $h_n = 0,250 \text{ m}$; $r_3 = 0,250 \text{ m}$; $\alpha = 5,13 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-2}$; $\mu = 7 \text{ cP} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; $k = 150$.

Nejdříve se určí podle vztahu (C) vnitřní poloměr povrchu koláče r_I :

$$r_1 = \frac{150 \cdot 9,81}{4 \cdot \pi^2 \cdot 14^2} = 0,1905 \text{ m}$$

Z rovnice (E) se vypočítá hustota suspenze ρ_s :

$$\rho_s = \frac{1590 \cdot 1360}{0,68 \cdot 1360 + (1 - 0,68) \cdot 1590} = 1508 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Tlak p_I se určí dosazením do rovnice (D):

$$p_1 = 2\pi^2 \cdot 14^2 \cdot 1508 \cdot (0,1905^2 - 0,1^2) = 1,534 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Již jsou známy všechny potřebné hodnoty do vzorce (A), a je možné vypočítat objemový tok filtrátu:

$$\dot{V}_F = \frac{1,534 \cdot 10^5 \cdot 2\pi \cdot 0,250}{2,3 \cdot 5,13 \cdot 10^{10} \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot \log \frac{0,250}{0,1905}} = 2,47 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

V požadovaných jednotkách tedy bude $\dot{V}_F = 2,47 \cdot 10^{-3} \cdot 2600 = 8,89 \text{ m}^3 \text{ hod}^{-1}$.

Výsledek:

Objemový tok filtrátu je $8,89 \text{ m}^3 \text{ hod}^{-1}$.

př. 5. Stanovení frekvence otáčení a tloušťky filtračního koláče při filtraci bubnovým vakuovým filtrem:

Suspenze obsahující 15 hmotn.% tuhé fáze je filtrována na bubnovém vakuovém filtru. Vzniklý koláč obsahuje před promýváním 25 hmotn.% matečného louhu. Hustota tuhé fáze a matečného louhu je 2700 kg m^{-3} a 1150 kg m^{-3} . Buben má průměr 2,5 m a šířku 1,2 m. Filtrační úsek je dán středovým úhlem 110° . Filtrace probíhá při rozdílu tlaků 600 Torr. Na pokusném kalolisu se stejnou suspenzí a filtrační přepážkou byly při různé tlakové diferenci Δp (at) zjištěny filtrační konstanty K_2 ($10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) a q_{Fekv} (10^{-3} m) – pro interpolaci hodnot filtračních konstant při pracovním rozdílu tlaků je výhodné vyjádřit závislost q_{Fekv} a K_2 na tlakové diferenci Δp v logaritmických souřadnicích.

Při $\Delta p=0,40$: $K_2=5,50$, $q_{Fekv} = 0,61$; při $\Delta p=0,66$: $K_2=8,25$ a $q_{Fekv} = 0,54$; při $\Delta p=1,0$: $K_2=11,5$ a $q_{Fekv} = 0,50$.

Stanovte potřebnou frekvenci otáčení bubnového filtru (v h^{-1}) a střední tloušťku filtračního koláče (v mm) ke zpracování 6 t h^{-1} suspenze.

Postup:

Frekvence otáčení n bubnového filtru se vypočítá z rovnice (2.108), do které se dosadí za q_F z rovnice (2.67).

$$n = \frac{(\dot{V}_F / S)^2}{2(K_2 \cdot \varphi - q_{Fekv} \dot{V}_F / S)} \quad (\text{A})$$

Hodnota filtračních konstant q_{Fekv} a K_2 pro daný pracovní tlakový rozdíl se zjistí pomocí grafu sestrojeného na základě údajů zjištěných na pokusném kalolisu (interpolací pro zadanou hodnotu Δp). Filtrační plocha je:

$$S = \pi \cdot d \cdot b \quad (\text{B})$$

Kde d je průměr bubnu filtru a b je jeho šířka.

Produkci koláče $\dot{m}_K$ a objemový tok filtrátu $\dot{V}_F$ lze vyjádřit z hmotnostní bilance filtru.

Podle vztahů (2.1) a (2.2) je

$$\dot{m}_K = \frac{\dot{m}_S \cdot w_S}{w_K} \quad (\text{C})$$

$$\text{a } \dot{V}_F = \frac{\dot{m}_S - \dot{m}_K}{\rho_F} \quad (\text{D})$$

a protože platí $\dot{m}_F = \dot{V}_F \cdot \rho_F$. Střední tloušťka vrstvy koláče na bubnovém filtru h se vypočítá ze ztahu:

$$h = \frac{\dot{m}_K / \rho_K}{S \cdot n} \quad (E)$$

protože

$$\dot{V}_K = \frac{\dot{m}_K}{\rho_K} \quad (F)$$

Hustota koláče ρ_K je dána obdobou vzorce (2.6a):

$$\frac{1}{\rho_K} = \frac{w_K}{\rho_s} + \frac{1-w_K}{\rho_l} \quad (G)$$

Výpočet:

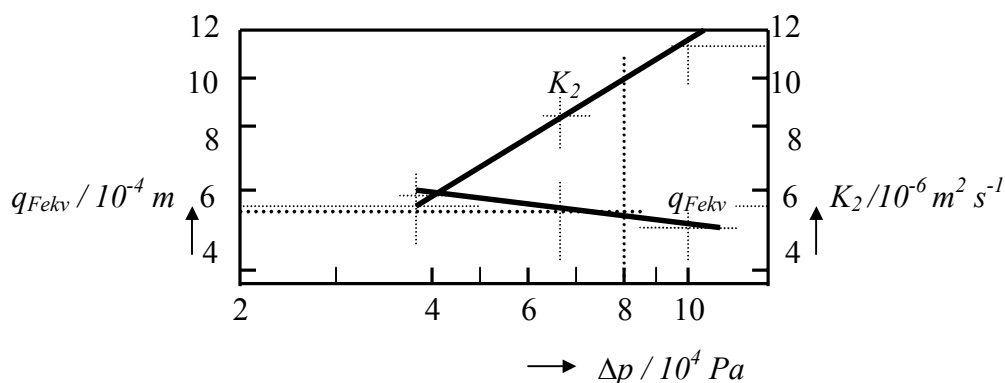
Při výpočtu se dosadí: $d=2,5$ m; $b=1,2$ m; $\varphi = 110/360$; $\dot{m}_S = 6 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1} = 1,665 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$; $w_S=0,15$; $w_K=1-0,25=0,75$; $\rho_F = 1150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\rho_S = 2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\Delta p=600 \text{ Torr} = 8 \cdot 10^4 \text{ Pa}$; $\Delta p_1 = 0,4 \text{ at} = 3,92 \cdot 10^4 \text{ Pa}$; $\Delta p_2 = 0,66 \text{ at} = 6,47 \cdot 10^4 \text{ Pa}$; $\Delta p_3 = 1,0 \text{ at} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$.

Z rovnice (B) se vypočítá filtrační plocha S , z rovnice (C) produkce koláče $\dot{m}_K$ a ze vztahu (D) objemový tok filtrátu $\dot{V}_F$:

$$S = \pi \cdot 2,5 \cdot 1,2 = 9,42 \text{ m}^2$$

$$\dot{m}_K = \frac{1,665 \cdot 0,15}{0,75} = 0,334 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{V}_F = \frac{1,665 - 0,334}{1150} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}.$$



Obr. 24. Graf závislosti filtračních konstant na rozdílu tlaků Δp .

Do grafu s logaritmickými souřadnicemi se vynesou zadané body ($q_{Fekv\ i}$, Δp_i) a (K_{2i} , Δp) a proloží se jimi přímkou. Odečtením pro zadanou hodnotu $\Delta p = 8 \cdot 10^4$ Pa se získají hodnoty $K_2 = 9,23 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$; $q_{Fekv} = 5,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

Ze vztahu (A) je pak možné vypočítat potřebnou frekvenci otáčení bubnového filtru n :

$$n = \frac{(1,16 \cdot 10^{-3} / 9,42)^2}{2 \cdot (9,23 \cdot 10^{-6} \cdot 110 / 360 - 5,22 \cdot 10^{-4} \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} / 9,42)} = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} = 9,9 \text{ h}^{-1}$$

Dále stanovíme hustotu filtračního koláče ρ_K , potřebnou k určení střední tloušťky h dosazením do rovnice (G). Dostaneme vztah:

$$\frac{1}{\rho_K} = \frac{0,75}{2700} + \frac{1 - 0,75}{1150} \Rightarrow \rho_K = 2020 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Vyčíslením rovnice (E) zjistíme střední tloušťku koláče:

$$h = \frac{0,334 / 2020}{9,42 \cdot 2,75 \cdot 10^{-3}} = 6,37 \cdot 10^{-3} \text{ m} \approx 6,5 \text{ mm}.$$

Výsledek:

Potřebná frekvence otáčení bubnového vakuového filtru je $9,9 \text{ h}^{-1}$. Přitom se vytvoří vrstva koláče průměrné tloušťky 6,5 mm. [6].

7 NEŘEŠENÉ ÚLOHY

př. 6. Zjištění doby filtrace při filtrování na kalolisu při konstantním rozdílu tlaků:

V kalolisu s filtrační plochou 25 m^2 se má filtrovat 950 l vodné suspenze o hustotě $1150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Suspenze obsahuje 12 hmotn.% tuhé fáze.

Na pokusném filtru s plochou $1,5 \text{ m}^2$ bylo získáno 5 l filtrátu za 4 minuty a 10 l filtrátu za 10 minut. Vlhkost koláče byla 28 hmotn.%. Filtrace probíhala za konstantního rozdílu tlaků $2,5 \text{ at}$. Teplota při filtraci se předpokládá $20 \text{ }^\circ\text{C}$ – jako při pokusné filtraci.

Určete dobu filtrace.

Při výpočtu se dosadí: $V_S = 950 \text{ l} = 0,95 \text{ m}^3$; $\rho_S = 1150 \text{ kg m}^{-3}$; $\rho_F = 998,2 \text{ kg m}^{-3}$ (teplota vody 20°); $w_S = 0,12$; $w_K = 1 - 0,28 = 0,72$; $\Delta p = 5 \text{ at} = 5 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$; $\Delta p' = 2,5 \text{ at} = 2,5 \cdot 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$; $S = 25 \text{ m}^2$; $S' = 1,5 \text{ m}^2$; $V_{F1} = 5 \text{ l} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$; $V_{F2} = 10 \text{ l} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$; $t_{F1} = 4 \text{ min} = 240 \text{ s}$; $t_{F2} = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$.

Výsledek:

Filtrace potrvá 1 hodinu 16 minut a 38 sekund. Při výpočtu byly zjištěny konstanty kalolisu $18,4 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ a $4,95 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

př. 7. Zjištění doby filtrace při filtrování na kalolisu za konstantní rychlosti:

Na kalolisu o 30 rámech s rozměry $750 \times 750 \times 30 \text{ mm}$ se má filtrovat suspenze o hustotě $1040 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, která obsahuje 10 obj.% kalu. Koláč má vlhkost 30 obj.%. Viskozita filtrátu je 2 cP .

Následně se bude koláč promývat vodou, jejíž množství bude odpovídat 20 % objemu filtrátu. Teplota promývací vody bude $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Filtrace bude probíhat konstantní rychlostí. Podmínky při filtraci i promývání jsou stejné.

Suspenze byla filtrována na pokusném filtru za stejných podmínek, jako předpokládáme při použití kalolisu. Byly zjištěny tyto hodnoty konstant: $K_2 = 0,99 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $q_{\text{Fekv}} = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Určete celkovou dobu filtrace a promývání.

Při výpočtu se dosadí: $x_{V,S} = 0,1$; $x_{V,K} = 1 - 0,3 = 0,7$; $N = 30$; $b = 0,75$ m; $h = 0,75$ m; $t = 0,03$ m; $\mu = 2\text{cP} = 2 \cdot 10^{-3}$ Pa·s; $\mu_p = 1,005$ cP = $1,005 \cdot 10^{-3}$ Pa·s (teplota vody 20° C); $q_{\text{Fekv}} = 7,1 \cdot 10^{-3}$ m; $K_2 = 0,99 \cdot 10^{-7}$ m² s⁻¹.

Výsledek:

Celkový čas filtračního procesu s promýváním bude 34 hodin 22 minut 40 sekund.

př. 8. Stanovení frekvence otáčení a tloušťky filtračního koláče při filtraci bubnovým vakuovým filtrem:

Na bubnovém vakuovém filtru se má za hodinu zfiltrovat 7500 kg suspenze, která obsahuje 13 hmotn.% tuhé fáze. Koláč má před promýváním vlhkost 70 hmotn.%. Hustota tuhé fáze je 1950 kg m⁻³ a filtrátu 1050 kg m⁻³. Buben má průměr 2 m a šířku 1 m. Filtrační úsek je dán středovým úhlem 120°. Filtrace probíhá při rozdílu tlaků 0,8 at.

Na pokusném filtru se stejnou suspenzí a filtrační přepážkou byly při různé tlakové diferenci Δp (at) zjištěny filtrační konstanty K_2 (10⁻⁶ m² s⁻¹) a q_{Fekv} (10⁻³ m) – pro interpolaci hodnot filtračních konstant při pracovním rozdílu tlaků se vyjádří závislost q_{Fekv} a K_2 na tlakové diferenci Δp v logaritmických souřadnicích.

Při $\Delta p = 0,30$: $K_2 = 5$, $q_{\text{Fekv}} = 0,7$; při $\Delta p = 0,5$: $K_2 = 6,5$ a $q_{\text{Fekv}} = 0,6$; při $\Delta p = 0,95$: $K_2 = 10$ a $q_{\text{Fekv}} = 0,45$.

Určete frekvenci otáčení bubnového filtru potřebnou k zfiltrování daného množství suspenze a střední tloušťku filtračního koláče.

Při výpočtu se dosadí: $d = 2$ m; $b = 1$ m; $\varphi = 120/360$; $\dot{m}_s = 7500$ kg·h⁻¹ = 2,083 kg·s⁻¹; $w_S = 0,13$; $w_K = 0,7$; $\rho_F = 1050$ kg·m⁻³; $\rho_s = 1950$ kg·m⁻³; $\Delta p = 0,8$ at = $7,85 \cdot 10^4$ Pa; $\Delta p_1 = 0,3$ at = $2,94 \cdot 10^4$ Pa; $\Delta p_2 = 0,5$ at = $4,91 \cdot 10^4$ Pa; $\Delta p_3 = 0,95$ at = $9,32 \cdot 10^4$ Pa.

Z grafu odečtené hodnoty $K_2 = 9 \cdot 10^{-6}$ m² s⁻¹ a $q_{\text{Fekv}} = 0,53 \cdot 10^{-3}$ m.

Výsledek:

Frekvence otáčení bubnového vakuového filtru potřebná k zfiltrování suspenze je 41,5 h⁻¹. Jedna otáčka bubnu trvá 1 minutu 27 sekund. Doba filtrace během jedné otáčky bubnu je 29 sekund. Přitom se vytvoří vrstva koláče průměrné tloušťky 3,5 mm.

8 VÝZNAMNÉ OSOBNOSTI

8.1 George Gabriel Stokes: 3.8.1819 - 1.2.1903 – irský matematik a fyzik



"Je pravděpodobné, že jevy, které nazýváme zázraky, nebyly způsobeny popřením nebo vypuštěním běžných přírodních zákonů, ale vzbuzením té části přírodního zákona, která je v běžných podmínkách vypnuta"

Narodil se ve Skreenu (hrabství Sligo-Irsko) v nábožensky založené rodině.

V roce 1835 (v 16 letech) odešel studovat do Anglie na Bristol College. Od roku 1837 pokračoval ve studiu na Pembroke College v Cambridgi. Studium ukončil v roce 1841. V Cambridgi založil první fyzikální laboratoř v Anglii. V následujících letech publikoval články o pohybu nestlačitelných kapalin. Stokesovy odborné práce se týkaly matematiky, mechaniky, fyziky, hydrodynamiky, studoval světelné spektrum i polarizaci světla.

V roce 1851 byl zvolen členem královské společnosti v Londýně, v letech 1854-1885 byl jejím tajemníkem a v letech 1885-1890 jejím předsedou.

Zemřel 1. února 1903 v Cambridge. [10].

George Gabriel Stokes je považován za jednoho ze zakladatelů hydrodynamiky.

Roku 1851 publikoval svůj *zákon viskozity*: Princip určení kinematické viskozity podle Stokese spočívá v měření doby pádu kuličky, o dané hustotě a poloměru, spuštěné v přístroji zvaném Stokesův viskozimetr, který je naplněn měřenou kapalinou. Kapalina je zahřátá na určitou teplotu (viskozita se s teplotou mění). Měří se doba pádu kuličky mezi dvěma značkami.

Jeho přínos hydrodynamice byl oceněn tím, že po něm byla pojmenovaná jednotka kinematické viskozity Stokes (*St*). [11].

Odvodil pohybové rovnice skutečné kapaliny.

Je po něm pojmenovaná tzv. *Navier - Stokesova rovnice*, která vyjadřuje rovnováhu sil na elementu kapaliny, která proudí laminárně (tedy s uvažováním třecích sil, které jsou způsobeny viskozitou kapaliny). Rovnici odvodil v roce 1827 Navier a nezávisle na něm Stokes v roce 1845.

Stokesův zákon: popisuje vztah pro velikost odporové síly při laminárním obtékání tělesa ve tvaru koule o poloměru *r*: $F_x = 6\pi\mu r v$

Kde μ je dynamická viskozita, *v* je velikost rychlosti kapaliny vzhledem k tělesu. [12].

8.2 Daniel Bernoulli: 1700 - 17.3.1782 - švýcarský matematik a fyzik



Narodil se v holandském Groningenu, mládí strávil v Basileji a v r. 1721 dokončil studium medicíny. Zemřel 17. března 1782.

Rodina Bernoulliů sehrála v 18. stol. mimořádnou úlohu v rozvoji evropské matematiky a fyziky. Bernoulliiové jako první významně zdokonalili diferenciální počet objevený Newtonem a Leibnizem a využili ho pro řešení nejrůznějších fyzikálních problémů.

Bernoulli významně přispěl k rozvoji newtonovské mechaniky, položil základy hydrodynamiky a vytvořil první kinetickou teorii plynů.

Zasazoval se o rozšíření newtonovské mechaniky v Evropě a sám vyřešil řadu základních fyzikálních problémů. Za své práce obdržel mimo jiné i deset cen francouzské Akademie.

Jeho stěžejní dílo *Hydrodynamica* vyšlo r. 1738. Jsou zde shrnuty výsledky jeho experimentálního i teoretického studia kapalin, včetně proslulé Bernoulliho rovnice, která popisuje proudění tekutin. Tato práce byla základem nového oboru fyziky–hydrodynamiky.

V dodatku ke knize se věnoval i plynům. Jako jeden z mála evropských učenců Bernoulli věřil, že se plyny skládají z částic a vytvořil vůbec první kinetickou teorii plynů. Považoval plyny za pružnou kapalinu z částic a pro jejich popis použil teorii pravděpodobnosti. Poprvé v dějinách vědy se mu tak podařilo odvodit z úvah o mikroskopické struktuře plynů makroskopické rovnice popisující jejich chování při změnách tlaku a teploty. Touto teorií však předstihl svou dobu a nenašel v celé Evropě odezvu. Příčinou byl odpor většiny evropských vědců k částicové atomistické koncepci hmoty. Bernoulliho teorie plynů musela čekat na své znovobjevení dalších 100 let. [13].

Bernoulliho rovnice - je rovnice, která vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené nevířivé proudění ideální kapaliny v uzavřené trubici. (Energie je v rovnici přepočtena na objemovou jednotku kapaliny.)

$$\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 + p = \text{konst.}$$

kde ρ je hustota kapaliny, v je rychlost proudění, p je tlak v kapalině.

První člen ($\frac{1}{2}\rho \cdot v^2$) v Bernoulliho rovnici představuje kinetickou energii, druhý člen (p) představuje tlakovou potenciální energii objemové jednotky kapaliny.

Součet kinetické energie a potenciální energie je ve všech místech trubice stejný.

Jedním z důsledků Bernoulliho rovnice je hydrodynamický paradox. [14].

8.3 Theodor von Kármán: 11.5.1881-7.5.1963 - americký termodynamik



Význačný americký fyzik a matematik (termodynamik) maďarského původu. Profesor na Kalifornské vysoké škole technické. Podstatně přispěl k rozpracování teorie pohybu letadel a raket v atmosféře. Jeden ze zakladatelů americké astronautiky. V letech 1930 - 1949 byl ředitelem leteckých laboratoří Kalifornského technologického institutu, od r.1951 ředitel oddělení pro letecký výzkum NATO. V padesátých letech založil vědní obor - magnetohydrodynamiku. Od roku 1960 první prezident Mezinárodní astronautické akademie (IAA).

Pracoval v aerodynamice, hlavně v teorii vířivých proudů vzdušných. Jeho výsledků a výpočtů se užívá při stavbě letadel (profily trupů letadlových, tvar vrtulí). Zabýval se naukou o pružnosti pevných těles, spolupracoval s M. Bornem. Na základě kvantové teorie vypracoval svou teorii pružnosti zavedením oscilací iontů do úvah a zasáhl také do problému specifických tepel krystalů.

Kármánova vírová stezka:

Při obtékání zejména válcových těles dochází v oblasti určitých Reynoldsových čísel ($Re = 40 - 500$) ke střídavému odtrhávání vírů za válcem. Vzniká tzv. Kármánova vírová stezka. Tento jev je nutno respektovat hlavně u stavebních konstrukcí a dbát na to, aby nedošlo k rezonanci frekvence odtrhávání vírů a vlastní frekvence konstrukce. Střídavé odtrhávání vírů je také příčinou "zpívání" telefonních drátů - tzv. Strouhalův efekt.

Několik příkladů vírových stezek v atmosféře:



Obr. 25. Příklady vírových stezek v atmosféře. [22]

8.4 Reynolds Osborne: 23.8.1842 - 21.2.1912 – britský fyzik a technik



„Má pozornost byla upřena k různým jevům mechaniky. K jejich vysvětlení - jak jsem zjistil - byly potřebné znalosti matematiky.“

Narodil v Belfastu. Pocházel ze vzdělané rodiny. Dědeček byl rektorem a jeho otec zastával vedoucí místa na školách a univerzitách, od ředitele až po rektora. První vzdělání mu poskytl právě jeho otec.

Reynolds měl zájem o studium mechaniky, v 19 letech začal na 1 rok navštěvovat dílny Edwarda Hayese aby získal praktické zkušenosti s výrobou a montáží pobřežních parníků. Tam zjistil, že k vysvětlení různých jevů je potřeba matematika, a tak se ji rozhodl studovat v Oxfordu. Studium ukončil v roce 1867, následně byl zvolen mezi univerzitní členy Queens' College. V roce 1868 byl zvolen do čela strojírenské katedry na Owens College, pozdější The Victoria University v Manchesteru. Tam zůstal až do roku 1905. [23]

Nejdříve se zaměřil na elektromagnetismus. Následně na hydrauliku a hydrodynamiku. Od roku 1873 zkoumal Reynolds dynamiku tekutin, díky které se stal světově uznávaným odborníkem. Zabýval se návrhy a konstrukcemi turbín a čerpadel, šířením zvuku a vln ve vodě, stanovil mechanický ekvivalent tepla.

Reynolds zkoumal změny proudění uvnitř potrubí při přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním.

Reynoldsovo číslo (Re):

-charakterizuje proudění kapaliny v trubici. Reynoldsovo číslo menší než 1000 znamená laminární proudění (částice se pohybují ve vrstvách, obtékané těleso klade malý odpor), při Re vyšším než 1000 se jedná o turbulentní proudění (částice víří).

$$Re = u \cdot r / \nu$$

- u - střední rychlost proudění
- r - je poloměr protékané trubice
- ν - kinematická viskozita: $\nu = \mu / \rho$
- μ - dynamická viskozita,
- ρ - hustota kapaliny. [24]

ZÁVĚR

Předmětem bakalářské práce bylo nastudování problematiky procesu filtrace a promývání z dostupných materiálů a vytvoření podrobného elektronického učebního textu pro zadaný tématický okruh.

Cílem bylo vytvoření studijního materiálu, který obsahuje veškeré důležité informace týkající se dané problematiky a současně takového, aby studentům proces filtrace přiblížil zajímavějším způsobem než bylo prozatím možné ze skript.

Do práce jsem zahrnula teoretické informace týkající se separačního procesu filtrace. Popsala jsem výpočtové vztahy odvozené pro různé způsoby realizace filtračního procesu a pro snazší pochopení jsem vypracovala několik vzorových příkladů při podmínkách, které jsou během filtrace nejčastější. Dále jsem jmenovala hlediska, která mají vliv na volbu vhodného filtračního zařízení. Protože jsem měla zájem vytvořit učební text co nejpřehlednější, zpracovala jsem nejen doporučenou literaturu, ale použila jsem i informace z webových stránek firem, které se zabývají výrobou filtračních zařízení, případně je užívají v různých procesech výroby - např. pásový filtr se používá ve spalovně komunálních odpadů při zpracování znečištěného popílku, pískový filtr v čistírnách odpadních vod, rukávový filtr v provozech cementáren, vápenek apod.. Studentům tak bude možné přiblížit průběh filtrace na nejužívanějších zařízeních v průmyslu. Pro znázornění filtračního zařízení jsem použila jednoduchá schémata a také obrázky skutečných zařízení užitých v praxi, které jsem našla na webových stránkách.

V dnešní době má proces filtrace široké uplatnění v průmyslu. Setkáváme se s ním např. ve vodárenství, kdy je třeba dočišťovat pitnou, užitkovou či povrchovou vodu, dále v potravinářství, kdy se filtruje nejen voda, ale i alkohol či džus. Ve farmacii se tímto separačním procesem získávají různé vakcíny, séra, krevní deriváty apod. Velmi využívaný je filtrační proces v chemických odvětvích, např. při výrobě parfémů, esencí a dalších produktů. Uplatňuje se tedy v odvětvích, která mohou mít vliv nepřímo i na zdraví člověka. To byl důvod, proč jsem si dané téma zvolila.

Výsledkem mé práce je studijní pomůcka, která umožní studentům prohloubit znalosti v této oblasti. Věřím, že se moje snaha projeví ve studijních výsledcích jednotlivých posluchačů fakulty, mezi kterými mohou být i tací, kteří informace vhodně využijí v praxi a docílí dalších inovací ve filtračním procesu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literatura

1. Kolomazník, K.: Teorie technologických procesů II, VUT Brno, FT Zlín, 1.vydání, 1975
2. Míka, V. a kol.: Chemické inženýrství IB., VŠCHT Praha, 1.vydání, 1992
3. Kasatkin, A. G.: Základní pochody a zařízení chemické technologie, Státní nakladatelství technické literatury, Díl I, 2.vydání, 1957
4. Jahoda, M.: Filtrace, pracovní listy, VŠCHT Praha, UCHI, 2003
5. Lecjaks, Z. a kol.: Chemické inženýrství I., Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko-technologická, 2004
6. Míka, V. a kol.: Chemickoinženýrské výpočty I., VŠCHT Praha, 3.vydání, 1996

WWW stránka

7. http://www.cistenivody.cz/odv_kalu.htm
8. <http://www.referat.cz/referaty/referat.asp?id=5896>
9. http://www.inkos.cz/cz/tech_piskova_filtrace.htm
10. <http://www.quido.cz/osobnosti/stokes.htm>
11. <http://www.converter.cz/fyzici/stokes.htm>
12. <http://khzs.fme.vutbr.cz/~vvhal/SKRIPTA/SK9/Sk9.html>
13. <http://www.quido.cz/osobnosti/bernoulli.htm>
14. http://wiki.unas.cz/wikipedia/b/be/bernoulliho_rovnice.html
15. http://www.amafilter.cz/Product_range.htm
16. <http://www.termizo.cz/index.php?sekce=technologie>
17. http://www.jochman-netzsch.sk/ka_druhykalolisov.htm
18. <http://www.vucpraha.cz/filtr>
19. <http://www.filtrace.com/cz/?filtry=naplavovaci>
20. <http://www.filtrace-odsavani.cz/clanek.php?id=68&sekce=9>
21. <http://www.vsk.cz/Realizace.htm>
22. <http://cotoje.webpark.cz/mechanika/karman.html>
23. <http://www.quido.cz/osobnosti/reynolds.htm>
24. <http://www.converter.cz/fyzici/reynolds.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Symbol	Význam	Jednotka
a	- hustota povrchu (specifický povrch částic)	m^{-1}
a_i	- empirické konstanty	1
a_v	- hustota povrchu částice (vlastní specifický povrch částic)	m^{-1}
A_n	- povrch všech částic vrstvy	m^2
b	- šířka	m
b, c	- pokusně zjištěné konstanty pro určení α	1
d	- průměr kruhového potrubí	m
d	- průměr kulové částice	m
d_n	- směrodatný lineární rozměr nekulových částic	m
d_e	- střední ekvivalentní průměr	m
e	- mechanická energie	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
e_z	- ztráta mechanické energie	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
g	- tíhové zrychlení	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
h	- výška	m
h_n	- výška vrstvy koláče	m
K, K_i	- konstanty odporu koláče	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
K'	- hodnota veličiny K při určitém objemovém průtoku suspenze	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
l	- délka průtočné dráhy	m
m	- hmotnost	kg
$\dot{m}$	- hmotnostní průtok	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
n	- počet částic ve vrstvě	1
n	- frekvence otáčení bubnu	s^{-1}
N	- počet	1
O	- smočený obvod	m
p	- tlak	Pa
p_0	- tlak působící na válcovou hladinu kapaliny v odstředivce	Pa
p_1	- tlak na rozhraní suspenze, koláč	Pa
p_2	- tlak na rozhraní koláč, filtrační přepážka	Pa

p_3	-	tlak za filtrační přepážkou	Pa
Δp	-	hnací síla procesu filtrace, celková ztráta tlaku	Pa
Δp_1	-	diference tlaků na filtračním koláči	Pa
Δp_2	-	diference tlaků na filtrační přepážce	Pa
Δp_{L0}	-	ztráta tlaku v potrubní lince	Pa
$\Delta p'$	-	hodnota veličiny Δp při určitém objemovém průtoku suspenze	Pa
q_F	-	množství filtrátu získaného z 1 m ² plochy	m
q_{Fekv}	-	ekvivalentní množství filtrátu – tj. odpor filtrační přepážky	m
q_{Fotb}	-	množství filtrátu z jednotky plochy celého bubnu	m
r	-	poloměr, vzdálenost od osy rotace	m
r_0	-	poloměr válcové hladiny kapaliny v odstředivce	m
r_1	-	vnitřní poloměr filtračního koláče	m
r_3	-	vnitřní poloměr bubnu	m
r_n	-	infinitesimální tloušťka vrstvy koláče	m
Re	-	Reynoldsovo kritérium	1
R_1	-	odpor kladený tekutině filtračním koláčem	m ⁻² ·kg·s ⁻¹
R_2	-	odpor kladený tekutině filtrační přepážkou	m ⁻² ·kg·s ⁻¹
S	-	plocha filtru	m ²
S	-	průtočný průřez	m ²
S_b	-	plocha bubnu	m ²
S_c	-	průřez celé vrstvy	m ²
T	-	absolutní teplota	K
t	-	teplota	° C
t	-	čas	s
t	-	tloušťka	m
t_{otb}	-	doba filtrace za 1 otáčku bubnu	s
v	-	rychlost tekutiny mimo vrstvu	m · s ⁻¹
v_e	-	střední rychlost průtoku	m · s ⁻¹
v_f	-	rychlost filtrace	m · s ⁻¹
V	-	objem	m ³
V	-	celkový objem vrstvy	m ³
V_F	-	objem filtrátu	m ³

V_K	-	objem koláče	m^3
V_S	-	objem suspenze	m^3
V_n	-	vlastní objem částic vrstvy	m^3
V_v	-	volný objem mezi částicemi vrstvy – objem tekutiny ve vrstvě	m^3
$\dot{V}$	-	objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
w	-	hmotnostní zlomek při hmotnostní bilanci filtru	1
W_C	-	měrná práce, charakteristika čerpadla	$m^2 \cdot s^{-2}$
W_L	-	měrná práce potřebná k průtoku potrubím s filtrem	$m^2 \cdot s^{-2}$
W_{L0}	-	měrná práce potřebná k průtoku potrubím s prázdným filtrem	$m^2 \cdot s^{-2}$
x_V	-	objemový zlomek	1
x_0	-	konstanta úměrnosti	1
α	-	specifický odpor koláče	m^{-2}
β	-	objemová roztažnost	K^{-1}
β	-	odpor koláče	m^{-2}
δ	-	úhel, úsek ponoření bubnu při filtraci	°
ε	-	mezerovitost	1
γ	-	stlačitelnost	$(N \cdot m^{-2})^{-1}$
φ	-	poměr ponořené části bubnu k celkovému povrchu bubnu	1
λ	-	součinitel tření	1
μ	-	dynamická viskozita	P; Pa·s
ν	-	kinematická viskozita	St; $m^2 \cdot s^{-1}$
ρ	-	hustota	$kg \cdot m^{-3}$
ω	-	úhlová rychlost	s^{-1}
ζ_j	-	koefficienty místních odporů	1

Index dolní

b	-	vztaženo k bubnu
c	-	celková
C	-	vztaženo k čerpadlu
ekv	-	ekvivalentní
e	-	střední ekvivalentní
F	-	vztaženo k filtrátu

f	-	vztaženo k filtraci
K	-	vztaženo k filtračnímu koláči
l	-	vztaženo ke kapalině
L	-	vztaženo k průtoku potrubím s filtrem
$L0$	-	vztaženo k průtoku potrubím s prázdným filtrem
p	-	vztaženo k promývání, profukování
S	-	vztaženo k suspenzi
s	-	vztaženo k tuhé fázi
z	-	ztrátová

Horní značky

- - tečka nad veličinou značí tok veličiny

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.	Obr. 1. Princip činnosti filtru	- str.9
2.	Obr. 2. Schéma pro sestavení hmotnostní bilance filtru	- str.15
3.	Obr. 3. Graf závislosti specif. odporu nestlačitelného koláče na rozdílu tlaků	- str.23
4.	Obr. 4. Graf závislosti specif. odporu stlačitelného koláče na rozdílu tlaků	- str.23
5.	Obr. 5. Schéma filtračního zařízení při použití odstředivého čerpadla	- str.27
6.	Obr. 6. Schéma činnosti bubnového vakuového filtru	- str.36
7.	Obr. 7. Schéma činnosti pásového vakuového filtru	- str.37
8.	Obr. 8. Rámy a desky rámového kalolisu	- str.38
9.	Obr. 9. Schéma činnosti rámového kalolisu	- str.39
10.	Obr. 10. Tlakový listový filtr	- str.41
11.	Obr. 11. Svíčkový filtr	- str.42
12.	Obr. 12. Rukávový filtr	- str.43
13.	Obr. 13. Vakuová filtrační nuč se zásobníkem filtrátu	- str.44
14.	Obr. 14. Uzavřený pískový filtr	- str.46
15.	Obr. 15. Filtrační odstředivka	- str.47
16.	Obr. 16. Bubnový vakuový filtr	- str.48
17.	Obr. 17. Pásový vakuový filtr	- str.48
18.	Obr. 18. Kalolis	- str.49
19.	Obr. 19 Komorový kalolis	- str.49
20.	Obr. 20 Uzavřený pískový filtr	- str.50
21.	Obr. 21. Naplavovací svíčkový filtr	- str.50
22.	Obr. 22. Filtrační jednotka s rukávovými filtry	- str.51
23.	Obr. 23. Filtrační nuč	- str.51
24.	Obr. 24. Graf závislosti filtračních konstant na rozdílu tlaků Δp	- str.61
25.	Obr. 25. Příklady vírových stezek v atmosféře	- str.67