

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY

PNEUMATICKÁ DOPRAVA PRÁŠKOVÉHO MATERIÁLU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Bc. Matouš BOLEK

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bolek** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **437725**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Pneumatická doprava práškového materiálu

Název diplomové práce anglicky:

Pneumatic conveying of powder material

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte literární rešerši se zaměřením na vlastnosti práškových materiálů a pneumatickou dopravu práškových materiálů.

Na základě poznatků z rešerše:

- Navrhněte pneumatickou dopravu práškového materiálu pro daný přepravní výkon.
- Proveďte výpočty potřebných zařízení.
- Na základě provedených výpočtů proveďte basic design hlavních aparátů.
- Zakreslete schéma zapojení zařízení.
- Při návrhu linky a aparátů zohledněte bezpečnostní požadavky pro manipulaci s práškovým materiálem.

Seznam doporučené literatury:

Dle pokynů vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2020**

doc. Ing. Radek Šulc, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Radka Šulce, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Matouš Bolek

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Radku Šulcovi, Ph.D. za pomoc a ochotu se mnou konzultovat mé dotazy, za udávání směru a celkové vedení mojí diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům, kteří mi byli během mého studia vždy oporou.

Anotační list

Jméno autora: Matouš

Příjmení autora: Bolek

Název práce česky: Pneumatická doprava práškového materiálu

Název práce anglicky: Pneumatic conveying of powder material

Rozsah práce: počet stran: 101
počet obrázků: 48
počet tabulek: 38
počet příloh: 4

Akademický rok: 2019/2020

Jazyk práce: český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Strojní inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Radek Šulc Ph.D.

Klíčová slova: Práškový materiál, pneumatická doprava, odlučování částic

Key words: Particular material, pneumatic conveying, particle separation

Anotace česky:

Tato práce je zaměřená na návrh pneumatické dopravy práškového materiálu pro daný přepravní výkon. V teoretické části jsou zpracovány základy manipulace s práškovými materiály, základy pneumatické dopravy práškových materiálů a její hlavní zařízení a zásady pro ochranu linky výbuchem. V praktické části práce je vypracován návrh pneumatické dopravy pro práškový materiál, provedeny výpočty hlavních zařízení a proveden basic design hlavních aparátů.

Abstract:

The main goal of this thesis is design of pneumatic conveying of particular material for given transport output. Range of this design is starting from the selection of appropriate type of transport to the industrial line till the material is poured into the mixing tank. The theoretical part of the thesis is focused on basics of manipulation with particular material, basics of pneumatic conveying and its main equipment and main rules for explosion protection. In the second part of this thesis the pneumatic conveying of particular material is designed, the calculation of main equipment is made and the basic desing of main apparatuses is done.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	10
1. Úvod	16
2. Charakterizace sypkých částic.....	17
2.1. Definice	17
2.2. Důležité mechanické vlastnosti	17
2.2.1. Zrnitost	17
2.2.2. Vlhkost.....	19
2.2.3. Měrná, objemová a sypaná hmotnost	19
2.2.4. Sypaný úhel	19
2.2.5. Úhel vnitřního a vnějšího tření.....	20
2.3. Výbušnost	20
2.3.1. Definice.....	20
2.3.2. Chemický výbuch.....	21
2.3.3. Meze výbušnosti.....	21
2.3.4. Podstatné vlivy na výbušnost prachu.....	22
2.3.5. Ochrana proti výbuchu.....	22
3. Průmyslová sůl	26
4. Principy a zařízení pneumatické dopravy	27
4.1. Režimy pneumatické dopravy	28
4.1.1. Doprava materiálu ve vznosu	28
4.1.2. Doprava materiálu v posuvné vrstvě	29
4.2. Rozdělení podle uspořádání	30
4.2.1. Otevřený systém	30
4.2.2. Uzavřený systém	30

4.3.	Rozdělení podle tlaku	31
4.3.1.	Podtlaková pneumatická doprava.....	31
4.3.2.	Přetlaková pneumatická doprava	32
4.3.3.	Kombinovaná pneumatická doprava	33
4.4.	Mobilní pneumatické systémy	34
4.4.1.	Silniční doprava	34
4.4.2.	Železniční doprava.....	34
5.	Hlavní části zařízení pro pneumatickou dopravu se sypkými materiály.....	35
5.1.	Zdroje stlačeného vzduchu.....	35
5.1.1.	Ventilátory.....	35
5.1.2.	Dmychadla.....	35
5.1.3.	Kompresory	36
5.2.	Sušiče vzduchu.....	37
5.2.1.	Kondenzační sušení	37
5.2.2.	Sušení adsorpcí.....	38
5.2.3.	Sušení absorpcí.....	39
5.2.4.	Membránové sušení.....	40
5.3.	Směšovače	41
5.3.1.	Komorové podavače.....	42
5.3.2.	Ejektorové podavače	43
5.3.3.	Šnekové podavače.....	43
5.3.4.	Rotační podavače	44
5.4.	Dopravní potrubí	45
5.5.	Odlučovače	45
5.5.1.	Usazovací komory	45
5.5.2.	Vírové odlučovače	45
5.5.3.	Látkové filtry.....	46

6.	Opotřebení.....	50
6.1.	Erozivní opotřebení v pneumatické dopravě	50
6.2.	Opotřebení potrubního systému.....	50
6.2.1.	Využití geometrie	50
6.2.2.	Využití materiálu	52
6.2.3.	Opotřebovací metody	52
6.2.4.	Využití statických směšovačů	53
7.	Skladování.....	54
7.1.	Skladování v jednotlivých obalech.....	54
7.2.	Skladování v zásobnících	54
7.2.1.	Hmotový tok.....	54
7.2.2.	Jádrový tok	55
7.2.3.	Tvorba vzpěrné klenby	56
8.	Návrh pneumatické dopravy práškového materiálu	57
8.1.	Specifikace linky.....	57
8.2.	Funkční návrh linky	58
8.3.	Vlastnosti dopravovaného materiálu	58
8.4.	Návrh velkokapacitního sila.....	59
8.4.1.	Výpočtové vztahy pro návrh sila	60
8.4.2.	Výsledky pro návrh sila.....	62
8.5.	Návrh denního zásobníku	63
8.6.	Návrh dopravy materiálu do velkokapacitního sila.....	64
8.6.1.	Vykládání kamionu do sila.....	64
8.6.2.	Návrh dopravy materiálu ve vznosu	65
8.7.	Návrh dopravy ze sila do denního zásobníku	73
8.7.1.	Pneumatická doprava v pístové vrstvě	74
8.7.2.	Pneumatická doprava v hromadné vrstvě	78

8.8.	Návrh cyklónového odlučovače za silem.....	87
8.9.	Návrh filtru sila	95
8.10.	Návrh filtru denního zásobníku.....	98
8.11.	Návrh šnekového dopravníku	99
9.	Závěr.....	101
10.	Seznamy	102
10.1.	Seznam grafů.....	102
10.2.	Seznam obrázků	103
10.3.	Seznam tabulek.....	104
10.4.	Seznam příloh	107
10.5.	Seznam zdrojů.....	108

Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Popis	Jednotka
a_{ξ}	Minimální rozměr strany čtvercového výpustného otvoru	m
A_{ξ}	Průřez kruhového výpustného otvoru zásobníku	m ²
A_d	Průřez kruhového výpustného otvoru zásobníku	m ²
A_{ID}	Průřez potrubí	m ²
a	Delší strana vstupního otvoru cyklónu	m
AtC	Měrné zatížení filtrační textilie	m/min
B_p	Bezrozměrný parametr	-
B	Průměr výstupního otvoru cyklónu	m
b	Kratší strana vstupního otvoru cyklónu	m
C_D	Součinitel odporu	-
C_{ξ}	Korekční součinitel šnekového dopravníku	-
c	Rychlost posuvné vrstvy materiálu	m/s
D_c	Průměr cyklónu	m
D_D	Průměr dopravníku	m
D_e	Průměr přepadové trubky cyklónu	m
d_k	Průměr výstupního otvoru cyklónu	m
d_z	Průměr výstupního otvoru	m
d	Vypočtený průměr výpustného otvoru	m
D	Průměr komory	m
e_z	Tlaková ztráta místními odpory	Pa
F_{fw}	Třecí síly mezi plynem a stěnou	Pa/m
f_g	Třecí faktor plynu	-
f_p	Třecí faktor mezi částicemi a ocelí	-
F_{pw}	Třecí síly mezi materiálem a stěnou	Pa/m

Fr_{fo}^*	Froudeho číslo pro usazovací rychlost	-
Fr	Froudeho číslo pro plyn	-
f	Součinitel vnitřního tření	-
g	Tíhové zrychlení	m/s^2
G	Hustota hmotového toku	$kg/(m^2 \cdot s)$
H_0	Rozměr cyklónu	m
h_1	Výška komory	m
h_2	Výška kuželové výsypky	m
H_c	Celková výška sila	m
h_k	Výška sypného kužele	m
h_s	Výška soli v komoře bez sypného kužele	m
H_s	Celková výška soli	m
h^m	Výška středové osy cyklónu	m
ΔH	Bezrozměrný parametr	-
h	Výška válcové části cyklónu	m
H	Výška cyklónu	m
ID	Vnitřní průměr trubky	m
k_1	Bezpečnostní součinitel	-
K	Bezrozměrný parametr	-
L_b	Délka kolene	m
L_{oh}	Délka ohebné hadice	m
L	Délka potrubí	m
m_d	Množství soli v dávce	kg/dávka
\dot{m}_f	Hmotnostní průtok plynu	kg/s
\dot{m}_p	Hmotnostní průtok materiálu	kg/s
\dot{m}_f	Hmotnostní průtok vzduchu	kg/s

m_k	Kapacita kamionu	kg/s
\dot{m}_{pf}	Hmotnostní průtok materiálu dopadajícího na filtr	kg/s
\dot{m}_s	Hmotnostní průtok soli	kg/s
\dot{m}_{sd}	Spotřeba soli denně	kg/den
m	Hmotnost materiálu	kg
n_d	Počet dávek za hodinu	dávka/hod
n_k	Počet kamionů potřebný pro naplnění sila	-
n_b	Počet kolen	-
n	Otáčky	ot/s
p_1	Tlak na vstupu	Pa
p_2	Tlak na výstupu	Pa
Δp_{1p}	Tlaková ztráta přes metr vertikální trubky	Pa/m
Δp_{af}	Tlaková ztráta způsobená zrychlením plynu	Pa
Δp_{ap}	Tlaková ztráta způsobená zrychlením materiálu	Pa
Δp_b	Tlaková ztráta přes všechna kolena v potrubním systému	Pa
Δp_d	Celková tlaková ztráta potrubního systému	Pa
Δp_{ff}	Tlaková ztráta způsobená třením plynu	Pa
Δp_{fp}	Tlaková ztráta způsobená třením materiálu	Pa
Δp_{gf}	Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou plynu	Pa
Δp_{gp}	Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou materiálu	Pa
Δp_{oh}	Tlaková ztráta ohebné trubky	Pa
Δp_{bf}	Tlaková ztráta třením plynu v koleni	Pa
Δp_{bp}	Tlaková ztráta třením částic v koleni	Pa
Δp	Tlaková ztráta	Pa
Q_m	Potřebný výkon dopravníku	m ³ /hod
Q_v	Objemový výkon dopravníku	m ³ /hod

R_b	Rádus kolene	m
Re_p	Reynoldsovo číslo častice	-
r	Plynová konstanta vzduchu	J/(kg · K)
Re	Reynoldsovo číslo	-
S_1	Průřez vstupního otvoru cyklónu	m ²
S_e	Průřez přepadové trubky cyklónu	m ²
S_F	Odlučovací plocha filtru	m ²
s	Délka zapuštění přepadové trubky cyklónu	m
s_{ξ}	Stoupání šnekovnice	m
t_s	Denní směna	hod
t_u	Vykládací čas kamionu	s
t	Čas	s
T	Teplota	K
U_1	Rychlost plynu ve vstupním hrdle	m/s
U_e	Rychlost plynu v přepadové trubce	m/s
U_f	Intersticiální rychlost plynu	m/s
U_p	Rychlost materiálu	m/s
U_{SALT}	Saltační rychlost	m/s
U_{SLIP}	Skluzová rychlost	m/s
U_T	Usazovací rychlost častice	m/s
U_T^m	Usazovací rychlost častice, která se odloučí z 50 %	m/s
U_{tmax}	Maximální tangenciální rychlost častice	m/s
U	Rychlost vzduchu	m/s
V_s	Objem soli	m ³
V_{ss}	Objem soli bez sypného kužele a kuželové výsyvky	m ³
V_k	Objem sypného kužele soli	m ³

V_v	Objem kuželové výsypky	m^3
\dot{V}_f	Objemový průtok vzduchu	m^3/s
v	Dopravní rychlost	m/s
x_{MAX}	Maximální průměr zrna	m
x	Průměrná velikost zrna	m
z	Výška kuželové části cyklónu	m

Řecké symboly

λ_c	Třecí faktor cyklónu	-
λ_{c1}	Třecí faktor v komoře cyklónu	-
λ_{ce}	Třecí faktor v přepadové trubce cyklónu	-
λ_c^*	Třecí faktor cyklónu (geometrie)	-
λ_z^*	Ztrátový součinitel třením částic	-
λ	Třecí součinitel	-
ρ_f	Hustota vzduchu	kg/m^3
ρ_p	Hustota materiálu	kg/m^3
ρ_s	Sypná hustota	kg/m^3
ρ_v	Objemová hustota	kg/m^3
ρ_α^*	Prachová koncentrace v plynu	g/m^3
φ_h	Sypný úhel	$^\circ$
φ_d	Dynamický sypný úhel	$^\circ$
φ_i	Frakční odlučivost	-
φ_f	Úhel vnitřního tření	$^\circ$
φ_v	Úhel vnějšího tření	$^\circ$
ψ_ξ	Součinitel plnění šneku	-
α_c	Bezrozměrný parametr	-
α	Úhel sklonu kuželové výsypky od vertikální osy	$^\circ$

β_p	Bezrozměrný parametr	-
β	Úhel sklonu kuželové výsypky od horizontální osy	°
δ	Parametr v rovnici (8.6-3)	-
ε	Porozita materiálu	-
ζ	Parametr pro odečet z grafu 8.1	-
Γ	Hustotní poměr	
η_c	Účinnost cyklónu	-
η	Dynamická viskozita vzduchu	Pa. s
κ	Parametr v rovnici (8.6-3)	-
μ	Směšovací poměr	-
θ	Úhel trajektorie potrubí	°

Horní a dolní indexy

H	Horizontální orientace
Z	Denní zásobník
S	Silo
V	Vertikální orientace

1. Úvod

Pneumatická doprava je v dnešní době často využívaným prostředkem pro dopravu práškových materiálů ve všech procesních odvětvích. Využívá se v ní usměrněného proudu plynu, nejčastěji vzduchu, který předává svoji kinetickou energii částicím tuhého materiálu, čímž je dopravuje na požadované místo. Pneumatická doprava nabízí oproti jiným dopravním systémům spoustu výhod, mezi které patří např. minimální prašnost, možnost dopravy po jakékoliv trajektorii, rozsáhlou možnost automatizace aj. Jelikož optimalizace a bezpečnost hrají v dopravě partikulárních materiálů zásadní roli, je nutné vědět o širokých možnostech, které pneumatická doprava nabízí a znát jejich výhody a nevýhody.

Cílem této práce je se obecně seznámit se základními principy a zařízeními, které jsou používané v pneumatické dopravě a v praktické části navrhnout linku pro dopravu práškového materiálu.

2. Charakterizace sypkých částic

2.1. Definice

Partikulární látky jsou složené ze vzájemně se dotýkajících pevných částic, přičemž prostor mezi pevnými částicemi je vyplněn kapalnou či plynnou fází. Tento prostor mezi částicemi je nazýván vnější póry. Dále existují i póry porézních částic, které se dělí na povrchové (otevřené) nebo vnitřní (uzavřené). Povrchové póry zvětšují povrch pevné fáze. [1]

Jeden ze způsobů klasifikace pro kusové materiály vypracovala FEM (Fédération Européenne de la Manutention), v citaci dle Poláka a spol. [1].

Dle této klasifikace se sypká hmota charakterizuje pěti údaji:

- a) zrnitostí;
- b) soudružností;
- c) chováním během dopravy;
- d) objemovou hmotností;
- e) teplotou;

Zrnitost udává velikost zrna a jejich tvar. Soudružnost značí tekutost materiálu a jeho sypný úhel. Teplota se udává ve °F nebo ve °C. Chování materiálu během dopravy obsahuje 10 skupin vlastností, které jsou při dopravě důležité. Jsou to:

1. abrazivní materiály (např. koks, křemen);
2. korozivní (např. kuchyňská sůl);
3. rozbitelný, křehký (např. mýdlové vločky);
4. explozivní (např. uhelný prach);
5. hořlavý (např. dřevěné hobliny, třísky);
6. prachovitý (např. cement);
7. vlhký;
8. lepkavý (např. vlhká hlína);
9. hygroskopický (např. sádra, kuchyňská sůl);
10. páchnoucí (např. odpadky);

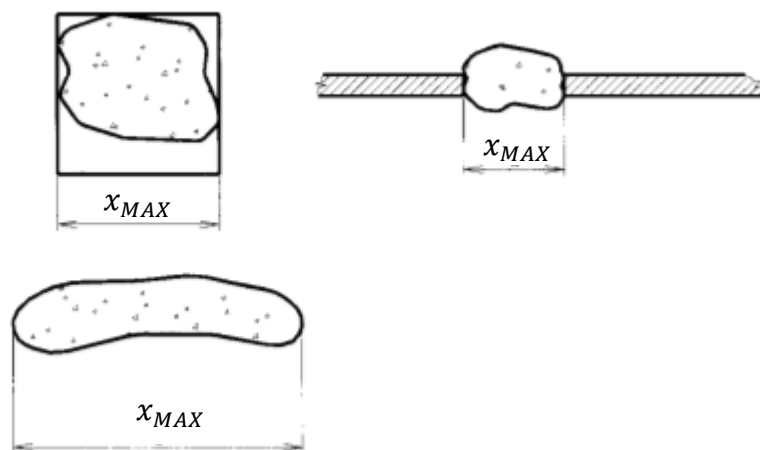
Klasifikací kusových materiálů se zabývá i česká norma ČSN 26 0070. Normalizovanými vlastnostmi jsou např. prašnost, zápalnost, výbušnost, škodlivost tvorbou plynů a par, obsah tuků a olejů a řada dalších vlastností. Další přílohy této normy obsahují návod k třídění sypkých hmot. [1]

2.2. Důležité mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti sypkých látek úzce souvisí s jejich strukturou, proto se výrazně liší od chování spojitého materiálu. Pro návrh zařízení pro přepravování a ukládání sypkých materiálů uvádím tyto důležité mechanické vlastnosti materiálu a jejich definice.

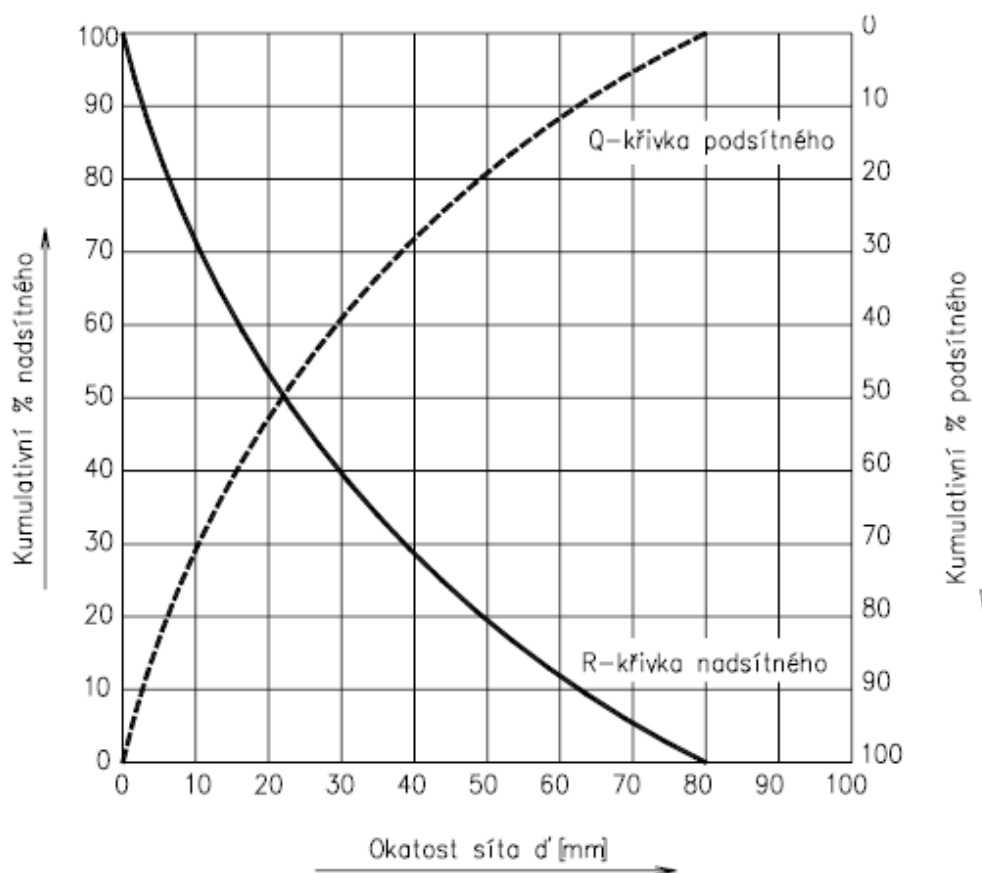
2.2.1. Zrnitost

Zrnitost je poměrná skladba zrn jednotlivých velikostí, ze kterých je látka složena. Velikost zrna je definována jako velikost otvoru, kterým tato částice právě projde. Běžně se bere v potaz největší rozměr zrna (viz Obr. 2.1). Avšak nejvíce používaný je průměr pomyslné částice-koule, který by měla kulová část o stejném objemu jako má skutečné zrno. Výchylku od kulovitosti pak vyjadřuje součinitel odklonu od sféricity. [1]



Obr. 2.1. Stanovení velikosti částice (zrna) jako velikost průměru ekvivalentní koule nebo pro nepravidelný tvar zrna jako největšího rozměru [1]

K měření zrnitosti se využívá síťového rozboru. Síťovým rozbořem se sypká hmota rozdělí na frakce s různým zrnitostním rozmezím. Toto rozdělení se provádí na soustavě vibrujících sít, jejichž oka se postupně zmenšují. Výsledkem postupného prosévání je soubor dílčích zbytků zachycených na jednotlivých sítích. Výsledný rozbor je znázorněn na tzv. rozsévacích křivkách, které je možno vidět na Grafu 2.1. [1]



Graf 2.1. Rozsévací křivky [1]

Pokud je zapotřebí číselného vyjádření tohoto rozboru, jsou použity Rossin – Ramlerovy rovnice. Ty udávají analytické vyjádření rozsévových křivek jako kumulativní procenta nadsítného a podsítného v závislosti na velikosti sít. [1]

2.2.2. Vlhkost

Vlhkost vody v materiálu se udává jako obsah vody ve vzorku v procentech hmotnosti. Obsah vody se v průběhu dopravy, skladování a celkovém procesu neustále mění. Vlhkost vody je důležitá především z důvodu nalepování, či namrzávání sypké hmoty na dopravních skladovacích systémech. Pokud je partikulární materiál vlhký a začne se lepit, je jeho doprava pneumatickou dopravou nemožná.

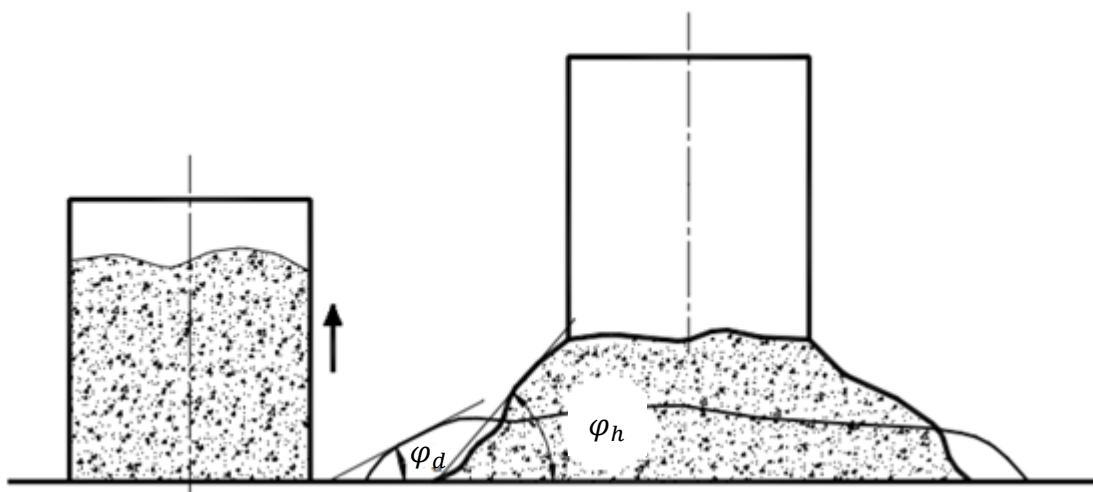
2.2.3. Měrná, objemová a sypná hmotnost

Objemová hmotnost udává podíl hmotnosti materiálu obsaženém v určitém objemu. U partikulárních materiálů určených pro dopravu a skladování se používá většinou sypná hmotnost. Ta je určena pomocí laboratorního měření, při kterém se měří hmotnost volně sypaného materiálu do nádoby o známém objemu. [1]

- Měrná hmotnost (hustota) $\rho_p [kg/m^3]$ = hmotnost objemové jednotky zrn materiálu bez dutin a pórů a bez mezer mezi zrny.
- Objemová hmotnost $\rho_v [kg/m^3]$ = hmotnost objemové jednotky materiálu v rostlém stavu, tj. s jeho dutinami a póry, ale bez mezer mezi zrny.
- Sypná hmotnost $\rho_s [kg/m^3]$ = hmotnost objemové jednotky rozpojeného, volně sypaného materiálu včetně dutin, pórů a mezer mezi zrny.

2.2.4. Sypný úhel

Sypný úhel se používá k určení sypnosti materiálu. Přírozený sypný úhel φ_h je úhel, který svírá tečna ke svahu volně nasypného materiálu na vodorovnou plochu (viz Obr. 2.2). Tento úhel je obvykle tvořen sypkým materiálem, protékajícím přes násypku o kruhovém průměru na vodorovnou plochu. Pokud podložka kmitá, dochází ke zmenšení sypného úhlu. V tomto případě vzniká tzv. dynamický úhel φ_d (viz Obr. 2.2). Sypný úhel úzce souvisí se vzájemným třením částic, vznikajícím při pohybu mezi pohybujícími se částicemi. [1]



Obr. 2.2. Znáznornění měření úhlu přirozeného svahu sypké hmoty vysypáváním z válcové nádoby [1]

2.2.5. Úhel vnitřního a vnějšího tření

Úhel vnitřního tření φ_f vyjadřuje tření mezi jednotlivými zrny materiálu. U téhož materiálu závisí na normálovém tlaku a na míře konsolidace materiálu. [1]

Úhel vnějšího tření φ_v vyjadřuje úhel, při kterém začíná sypký materiál klouzat po podložce. Výrazně závisí na typu podkladového materiálu. [1]

2.3. Výbušnost

2.3.1. Definice

Výbuch je fyzikální jev, při kterém dochází k rychlému uvolnění energie. Uvolněná energie se mění na mechanickou práci, která se projevuje deformací okolí. Výbuchy je možné rozdělit na fyzikální, chemické a nukleární.

- Fyzikální výbuch je způsoben změnou hybnosti nebo změnou skupenství dané látky. Při fyzikálním výbuchu dochází většinou k překročení určitého parametru (např. tlaku) nad povolenou mez, při které dojde k destrukci zařízení.
- Chemický výbuch je způsoben extrémně rychlou chemickou reakcí. Při chemickém výbuchu dochází ke změnám vazeb mezi atomy a chemické přeměně vstupujících látek na produkty.
- Nukleární výbuch je způsoben nekontrolovanou jadernou reakcí.

V běžném průmyslu jsou nejčastější výbuchy fyzikální a chemické.

Aby došlo k hoření je nutné, aby byly splněny podmínky tzv. požárního trojúhelníku (viz Obr. 2.3). Tyto podmínky říkají, že musí být na jednom místě a ve stejném čase přítomný hořlavý materiál, oxidační prostředí a dostatečně silný iniciační zdroj. [2]



Obr. 2.3. Požární trojúhelník [2]

K iniciaci výbuchu jsou potřeba ke třem předchozím podmínkám další dvě, které určuje tzv. výbuchový pentagon (viz Obr. 2.4). První podmínka říká, že se jemně rozptýlená hořlavá látka smíchá s plynem (většinou vzduchem) v mezích výbušnosti. Druhá podmínka omezuje předchozí podmínku v určitém omezeném prostoru, ve kterém musí proběhnout. [2]



Obr. 2.4. Výbuchový pentagon (pro prachovzduchové směsi) [2]

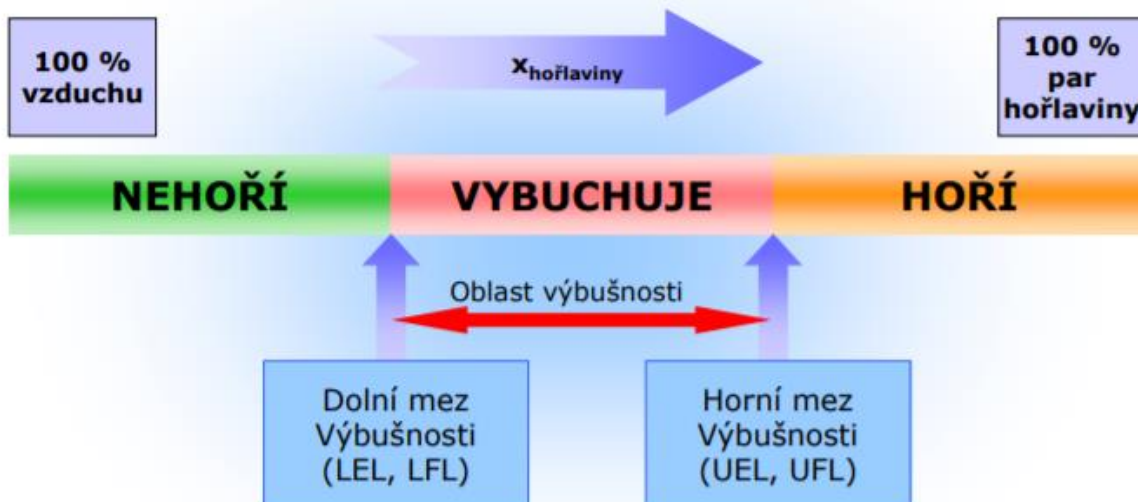
2.3.2. Chemický výbuch

Chemický výbuch získává svou energii z rychlé chemické reakce. Základní mechanismy výbušné přeměny spojené s uvolněním chemické energie jsou:

- **Explozivní hoření (deflagrace)** - vyznačuje se rychlostí hoření od mm/s až po desítky m/s a nízkým tlakem. Jelikož jsou hodnoty rychlosti hoření poměrně malé, tlaková vlna předbíhá tlakové pásmo.
- **Přechod mezi hořením a detonací** – rychlost děje se pohybuje až ve stovkách m/s a tlaky dosahují stovek MPa .
- **Detonace** – rychlost hoření přesahuje $1000 m/s$ a okamžitý nárůst tlaku až na desítky GPa , s rázovou vlnou v čele tlakového pole. Iničiací reakce je prudké stlačení látky rázovou vlnou. Reakční pásmo tedy ihned následuje rázovou vlnou. [3]

2.3.3. Meze výbušnosti

Dolní mez výbušnosti udává minimální koncentraci prachu v oxidační atmosféře, která umožňuje explozivní hoření. Horní mez výbušnosti je maximální koncentrace prachu v oxidační atmosféře, při které je možné oxidační hoření bez přístupu vzduchu z okolí, jak je možno vidět na Obr. 2.5. Meze výbušnosti soustav jsou ovlivněné velkým počtem proměnných jako je např. druh prachu, velikosti částic, vlhkost prachu a síla iničiace. Jako základní měrnou veličinu pro výbušnost plynů je dolní mez výbušnosti, podle které se stanovují prostředí s nebezpečím výbuchu, jelikož překročení horní meze výbušnosti je spíše vzácné. [3,4]



Obr. 2.5. Meze výbušnosti [4]

2.3.4. Podstatné vlivy na výbušnost prachu

Pokud nepočítáme fyzikální vlastnosti prachu jako velikost částic, vlhkost apod. je výbušnost prachu závislá i na dalších vlivech jako např.:

- **Minimální iniciační energie** je minimální energie jiskry, která je schopna zapálit disperzi rozvířeného prachu a nosného plynu. Rostoucí iniciační energie ovlivňuje meze výbušnosti směsí.
- **Počáteční teplota** má vliv na rozsah meze výbušnosti v obou směrech. Snižuje tedy minimální hodnoty meze výbušnosti a zvyšuje maximální hodnotu horní meze výbušnosti.
- **Počáteční tlak v okamžiku iniciace** má vliv hlavně na horní mez výbušnosti. Čím menší je tlak, tím je rozsah meze výbušnosti menší. U některých směsí dokonce mez výbušnosti mizí a při určitém podtlaku tak vůbec nedochází při dané iniciační energii k výbuchu.
- **Limitní obsah kyslíku** je definován jako maximální koncentrace kyslíku ve směsi, při které není výbuch možný. [3]

2.3.5. Ochrana proti výbuchu

K ochraně proti explozi je možné přistupovat mnoha způsoby. Jejich hlavní rozdělení je následující:

- minimalizace možnosti vzplanutí a prevence před vzplanutím;
- nechat explozi volný průběh, ale zaručit, aby proběhla bezpečně jejím odlehčením;
- detekce a potlačení exploze;

Na zvolení vhodné metody má vliv mnoho proměnných např. celkový design linky, ekonomika, výbušnost materiálu apod. [5,6]

Prevence

Jako první krok v každém protivýbuchovém programu je minimalizace a eliminace všech možných příčin vzplanutí. Jakákoliv možnost vzniku jiskry musí být brána v úvahu. Hlavně u rizikových součástí, jako jsou např. ložiska v rotačním podavači. Jakékoliv svářečské a další operace s vysokým rizikem vzniku jiskry se nesmí provádět, pokud je linka v provozu.

Jednou z možností, jak snížit riziko vzplanutí je využití inertních plynů, jako je dusík. Tím je možné buď přímo dopravovat požadovaný materiál nebo ho vstříkovat do dopravního vzduchu, čímž se sníží kyslík přítomný ve vzduchu pod limitní obsah kyslíku potřebného k iniciaci exploze. [6]

Odlehčení výbuchu

Jedna z možností, jak přímo čelit výbuchu, je nechat ho volně proběhnout, ale zaručit, aby se tak stalo bezpečně. Za běžných podmínek je únikový otvor překrytý klapkami, membránami, dveřmi nebo ventily. Při překročení maximálního tlaku uvnitř zařízení, dojde k protržení membrány, otevření ventilu apod. a tím uvolnění tlaku do ohroženého prostoru (viz Obr. 2.6). Zařízení je tak vystaveno nižšímu tlaku a nedojde k jeho destrukci. Tento způsob ochrany se používá nejčastěji v případech, ve kterých je možnost výbuchu minimální. [5,6]



Obr. 2.6. Schéma instalace zařízení pro odlehčení výbuchu na odlučovači prachu od RSBP spol. s.r.o. [5]

Potlačení výbuchu

Systém na potlačení výbuchu je hasící technika. Do chráněného zařízení je vnášené hasivo, pomocí speciálních teleskopických trysek, které zajistí rozptýlení hasiva do celého chráněného prostoru (viz Obr. 2.7). Samotná detekce a vstříknutí hasiva musí proběhnout v řádu milisekund, aby se včas snížil výbuchový tlak na tzv. maximální redukováný výbuchový tlak, jak je možné vidět na Grafu 2.2. Celkový systém na potlačení výbuchu je možné vidět na Obr. 2.8. [5,6]

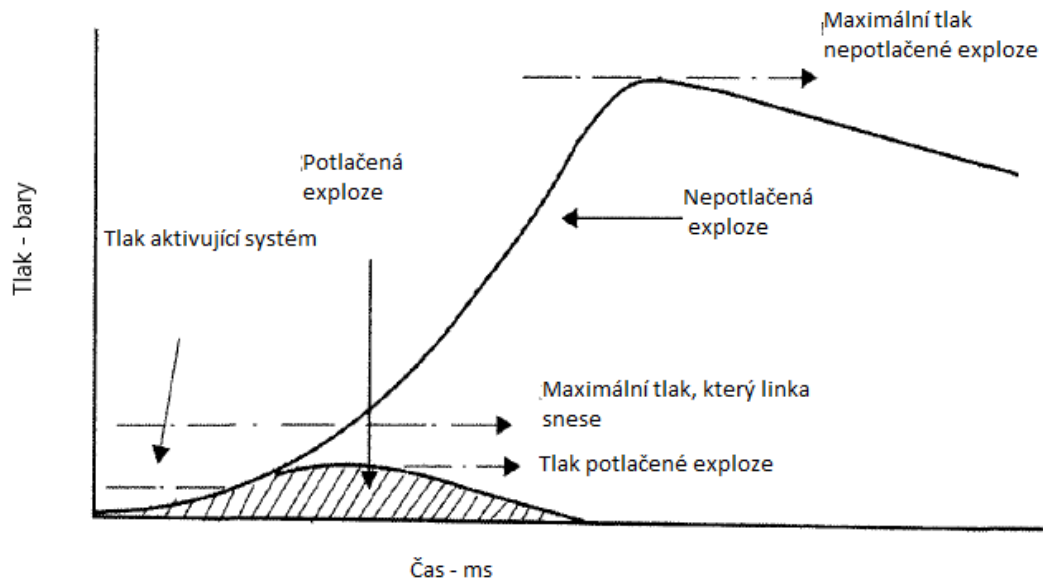
V systémech pro dopravu práškového materiálu se používají především tlakové detektory z důvodu nízké viditelnosti. [5]



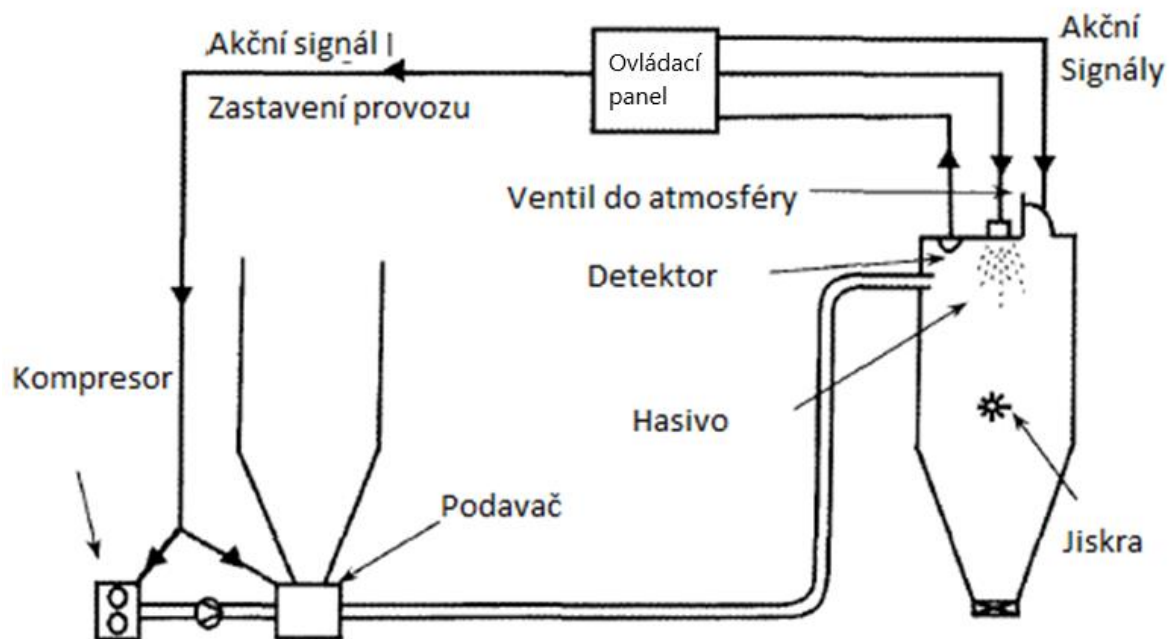
1. Detektor výbuchu
2. Ventilátor
3. Rotační podavač
4. Řídicí ústředna
5. HRD akční člen
6. Filtr



Obr. 2.7. Schéma instalace zařízení pro potlačení výbuchu systému na odlučovacím zařízení od RSBP spol. s.r.o. [5]



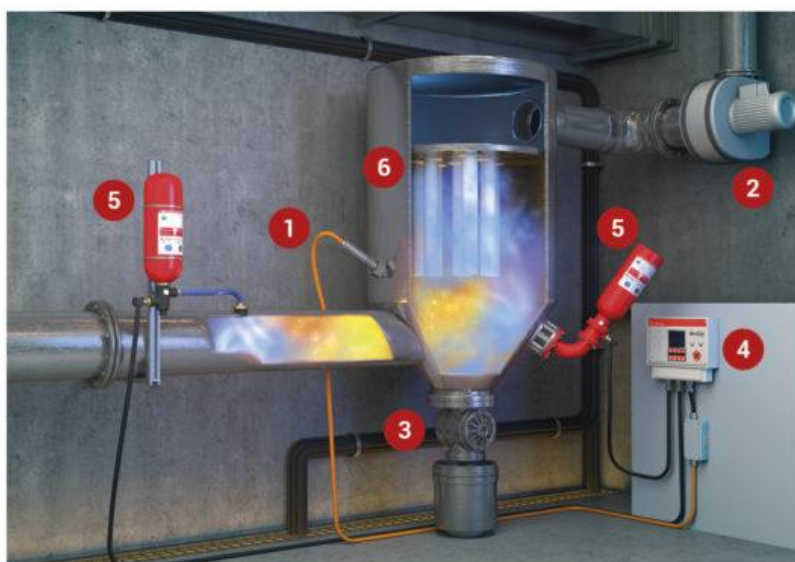
Graf 2.2. Porovnání průběhů tlaků při potlačené a nepotlačené explozi [6]



Obr. 2.8. Schéma systému pro detekci a potlačení výbuchu [6]

Protiplamenné bariéry

Protiplamenné bariéry se instalují do potrubí vedoucích do filtrů, cyklónů apod., ve kterých může být vedena jiskra vzniklá v předchozím zařízení, nebo se jimi šíří čelo plamene při explozi. Tato varianta ochrany zabraňuje, aby do určitých zařízení nevnikl účinný iniciační zdroj. Stejně jako v předchozím případě se používá detektoru a hasiva (viz Obr. 2.9). [5]



1. Detektor
2. Ventilátor
3. Rotační podavač
4. Řídicí ústředna
5. HRD akční členy
6. Filtr



Obr. 2.9. Schéma instalace protiplamenné bariéry na odlučovači prachu RSBP spol. s r.o. [5]

3. Průmyslová sůl

Sůl je jednou ze základních surovin pro potravinářský a chemický průmysl. Obsahuje cca 40 % sodíku, 60 % chloru a dále různé příměsi jako je např. chlorid vápenatý. Sůl je v čisté formě čirá a bezbarvá látka dobře rozpustná ve vodě. K jejímu těžení se používají tři hlavní způsoby:

- Kamenná sůl se těží z podzemních přírodních ložisek.
- Mořská sůl se získává odpařováním mořské vody.
- Vakuová sůl je získávána vakuovým odpařováním nasyceného roztoku soli neboli solanky získaných z přírodních ložisek.

V chemickém průmyslu se spotřebuje okolo 60 % z celkové produkce soli. Důvod takovéto spotřeby tkví převážně ve využití soli v mnoha odvětvích chemického a potravinářského průmyslu. Sůl je nezbytnou surovinou pro výrobu celé řady dalších látek. Jedním z hlavních průmyslových konzumentů soli je výroba chloru. Chlor je jedna z nejvýznamnějších surovin chemického průmyslu, jelikož je využívána k výrobě dnes tak rozšířeného PVC. Dále se sůl používá jako surovina pro výrobu detergentů, skla, v petrochemii apod. [7]



Obr. 3.1. Vakuová těžba soli [7]

4. Principy a zařízení pneumatické dopravy

V pneumatické dopravě se využívá usměrněného proudu plynu, nejčastěji vzduchu, který předává svoji kinetickou energii částicím tuhého materiálu. Její využití můžeme nalézt v mnoha průmyslových odvětvích. Vhodná je zejména pro dopravu nelepivých, suchých, práškovitých nebo zrnitých materiálů. Klasické uspořádání pneumatické dopravy je možné vidět na Obr. 4.1.



Obr. 4.1. Systém pro pneumatickou dopravu materiálu [8]

Při návrhu dopravy sypkého materiálu by měla být snaha o co nejkratší a nejjednodušší trajektorii potrubí. Čím větší je dopravovaná vzdálenost materiálu a složitější trajektorie potrubí, tím více stoupají kapitálové investice, energetická náročnost, zastavěná plocha, segregace apod. Hlavní zařízení pneumatické dopravy jsou prezentována na Obr. 4.2. [6,9]

Jednou ze základních veličin pro správný návrh pneumatické dopravy je směšovací poměr μ . Směšovací poměr vyjadřuje poměr hmotnostního toku materiálu \dot{m}_p (kg/s) ku hmotnostnímu toku plynu \dot{m}_f (kg/s). [6]

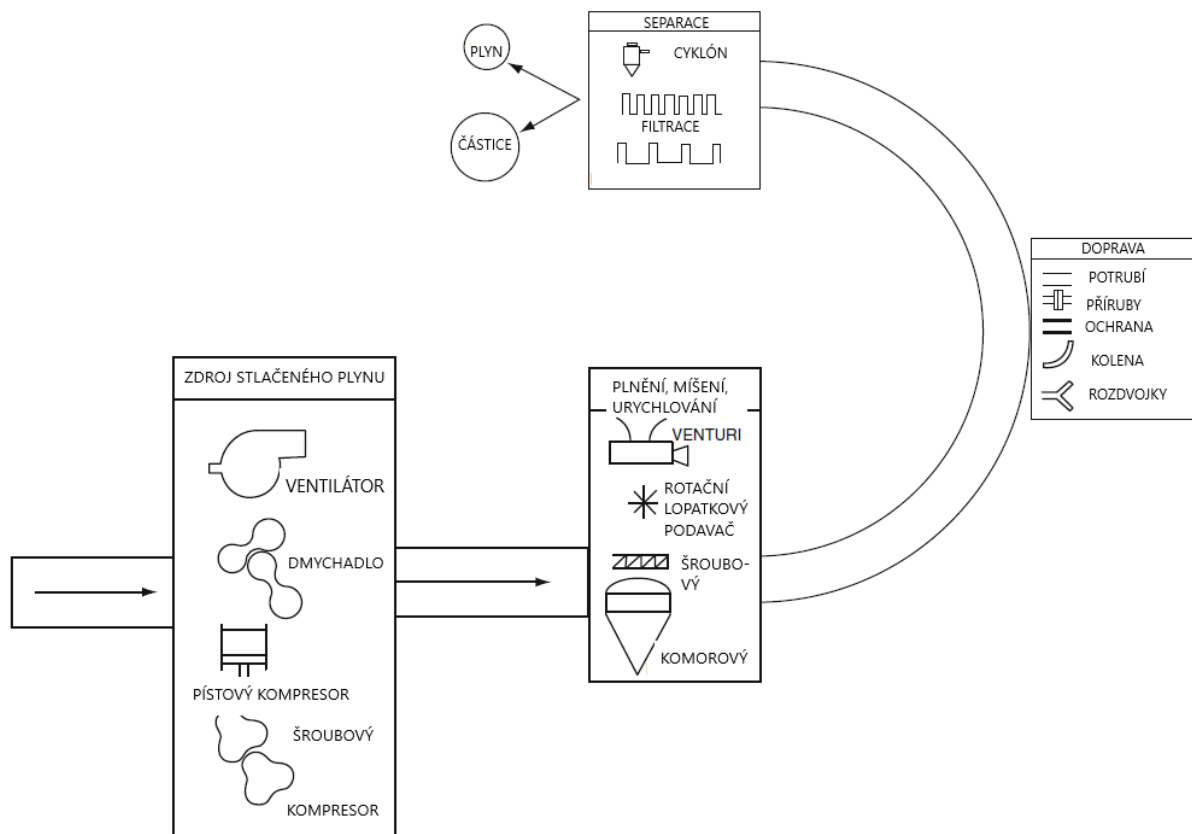
$$\mu = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_f} \quad (2.3-1)$$

Výhody pneumatické dopravy:

- Rozsáhlá možnost automatizace a nízké náklady na údržbu a spolehlivost zařízení, díky malému počtu pohybujících se částí v systému.
- Pomocí jednoho zařízení je možné dopravovat materiál všemi směry (horizontálním, vertikálním i šikmým).
- Flexibilita, jelikož je možné s tímto systémem sledovat téměř jakoukoliv trajektorii a dopravní délka se dá jednoduše nastavit.
- Hygiena. Transport probíhá bez prašnosti do okolí, protože je celý systém uzavřený.
- Během dopravy je možná realizace dalších operací jako např. chlazení, ohřev, okysličení apod. [6,9]

Nevýhody pneumatické dopravy:

- Energetická náročnost je větší oproti mechanickému transportu.
- Odírání a změna distribuce velikosti dopravovaných částic z důvodu vysokých rychlostí v potrubí.
- Většinou je jednoúčelová s malou možností změny dopravovaného média.
- Má větší spotřebu měrné energie v porovnání s jinými prostředky pro dopravu práškových materiálů. [6,9]



Obr. 4.2. Schéma hlavních součástí a aparátů pneumatického systému [9]

4.1. Režimy pneumatické dopravy

Pneumatickou dopravu můžeme rozdělit podle několika režimů. Základním rozdělením se zdá být rozdělení na dopravu materiálu ve vznosu (anglicky dilute phase) a dopravu materiálu v posuvné vrstvě (anglicky dense phase). Ještě nedávno se pneumatická doprava uskutečňovala pouze dopravou materiálu ve vznosu, při které je jen malý podíl materiálu pohybující se trubkou. Za posledních několik let se ale rozšířil zájem o dopravu materiálu v posuvné vrstvě, při které se dosahuje vysokých směšovacích poměrů. [6,9]

4.1.1. Doprava materiálu ve vznosu

Materiál rozptýlený v plynu vyplňuje celý průřez potrubí. Rychlost plynu se pohybuje okolo 20 m/s. Rychlost materiálu se pohybuje okolo 70 – 80 % rychlosti vzduchu s ohledem na horizontální nebo vertikální orientaci trubky. Díky vysokým rychlostem je tento režim nevhodný k dopravě abrazivních nebo naopak křehkých materiálů. Tento režim je velmi energeticky náročný. [6,9]

Využití dopravy materiálu ve vznosu se využívá zejména při:

- vykládání materiálu z nákladních aut do sil;
- dopravování produktů, které nepůsobí abrazivně;

Rizikové faktory u pneumatické dopravy materiálu ve vznosu jsou:

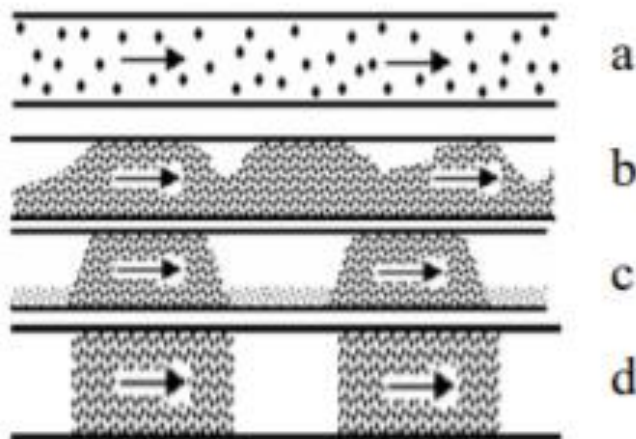
- Kvalita a kvantita vzduchu: Jelikož je při dopravě materiálu ve vznosu potřeba velké množství dopravního vzduchu, nemusí být tento systém ekonomicky výhodný z provozního pohledu. Je také možné, že z důvodu velkého množství vzduchu v trubkách, bude nemožné zajistit dostatečnou kvalitu, množství a objem potřebného vzduchu pro dopravu některých materiálů.
- Opatření trubek: Jelikož v tomto režimu proudí vzduch a materiál o vysokých rychlostech, je důležité dbát zvýšené pozornosti na abrazi trubek. [6,9]

4.1.2. Doprava materiálu v posuvné vrstvě

Materiál se při nízkých rychlostech pohybuje po dně trubky, nebo zaplňuje část nebo celý objem potrubí. Materiál se pohybuje v potrubí v podobě „zátky“, která je posouvána o nízké rychlosti, nebo je po vrstvách posouván po dně potrubí (viz Obr. 4.3). Tento způsob dopravy může být jak diskontinuální, tak kontinuální. [9,10]

Ještě se nenašla přesná definice dopravy materiálu v posuvné vrstvě, která by byla univerzálně akceptována. Je mnoho možností, jak tento režim definovat např. podle tlakové ztráty Δp , či dle minimálního směšovacího poměru μ apod. V této práci volím jedno z možných stanovení, které určuje, zda se jedná o režim v posuvné vrstvě. Touto podmínkou je, že rychlost částice U_p pohybující se v potrubí je menší než její saltační rychlost U_{SALT} .

Saltační rychlost U_{SALT} je hraniční rychlost částice, při které se částice pohybují skoky po povrchu trubky. Při zvýšení rychlosti proudění nosného plynu by se již dosáhlo vznosu částic.



Obr. 4.3. Režimy pneumatické dopravy [10]

- a) Doprava materiálu ve vznosu, b) Doprava materiálu ve fluidizované vrstvě, c) Doprava materiálu v hromadné vrstvě, d) Doprava materiálu v pístové vrstvě

Režim dopravy materiálu v posuvné vrstvě je vhodný pro materiály, které jsou křehké a je potřeba zachovat strukturu jejich částic. Dále je vhodný pro materiály, které by ve vysokých rychlostech působily abrazivně na potrubí. [6]

Výhody dopravy materiálu v posuvné vrstvě oproti dopravě ve vznosu jsou:

- menší energetická náročnost;
- jemné zacházení s částicemi a menší opotřebení potrubí;
- potřeba menšího množství dopravního vzduchu;

Nevýhody dopravy materiálu v posuvné vrstvě jsou:

- složitý design a instalace;
- vysoká pořizovací cena;
- riziko ucpání trubky; [6,9]

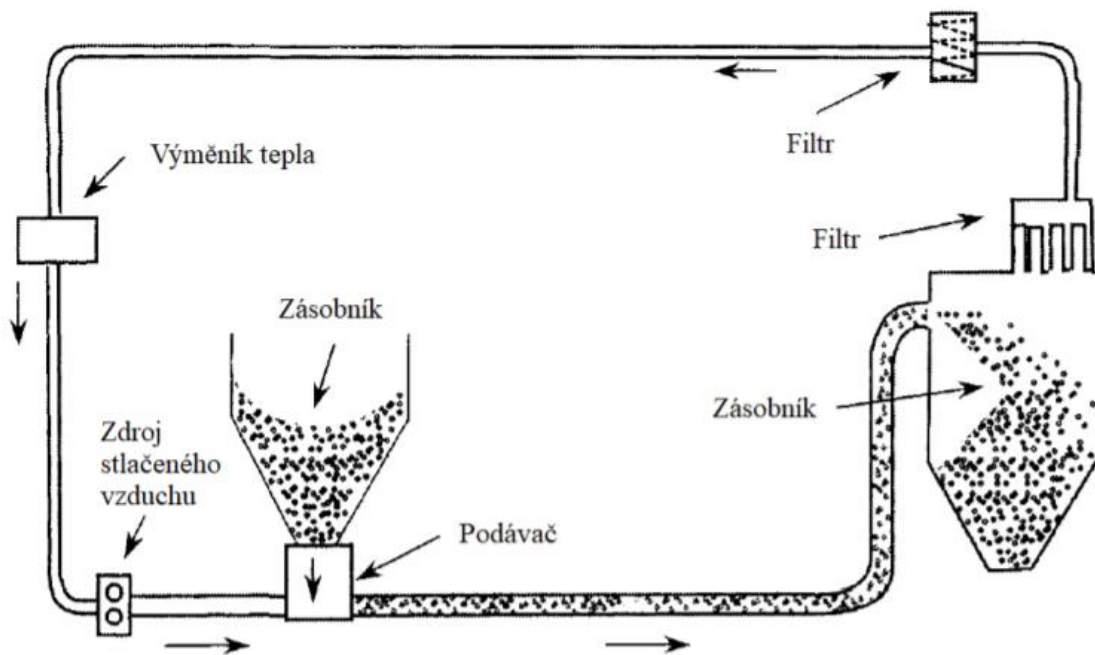
4.2. Rozdělení podle uspořádání

4.2.1. Otevřený systém

U otevřených systémů se dopravní plyn nasává z atmosféry a po vykonání dopravní funkce se opět vyfukuje do atmosféry. Použití tohoto systému je nemožné, pokud se dopravují toxické, radioaktivní nebo hořlavé materiály. Otevřené systémy jsou mnohem běžnější než uzavřené, díky jejich nižší pořizovací ceně. Tyto systémy mohou pracovat jak za přetlaku, tak za podtlaku. Schémata obou systémů jsou uvedena na Obr. 4.5 a Obr. 4.6.

4.2.2. Uzavřený systém

V uzavřených systémech dopravní plyn neustále obíhá. V jedné části systému vykonává dopravní funkci a poté je vrácen zpětným potrubím na začátek dopravního zařízení. Tento systém je využíván pouze výjimečně, jen pokud se jedná o dopravu toxických, radioaktivních nebo hořlavých materiálů. Jako dopravní látka v tomto případě neslouží vzduch, ale inertní plyn. Na Obr. 4.4 je znázorněno schéma uzavřeného systému. Na schématu je možné vidět, že jsou v systému přítomny dva filtry. Jeden z filtrů je záložní, protože přetlakové kompresory jsou velmi náchylné k poškození prachem. Jelikož je možné, že při průchodu kompresorem se bude plyn ohřívat, je v takovém případě nutné, aby byl do systému přidán výměník tepla, který zamezí neustálému ohřívání vzduchu. [6,9]



Obr. 4.4. Schéma uzavřeného pneumatického systému [6]

4.3. Rozdělení podle tlaku

4.3.1. Podtlaková pneumatická doprava

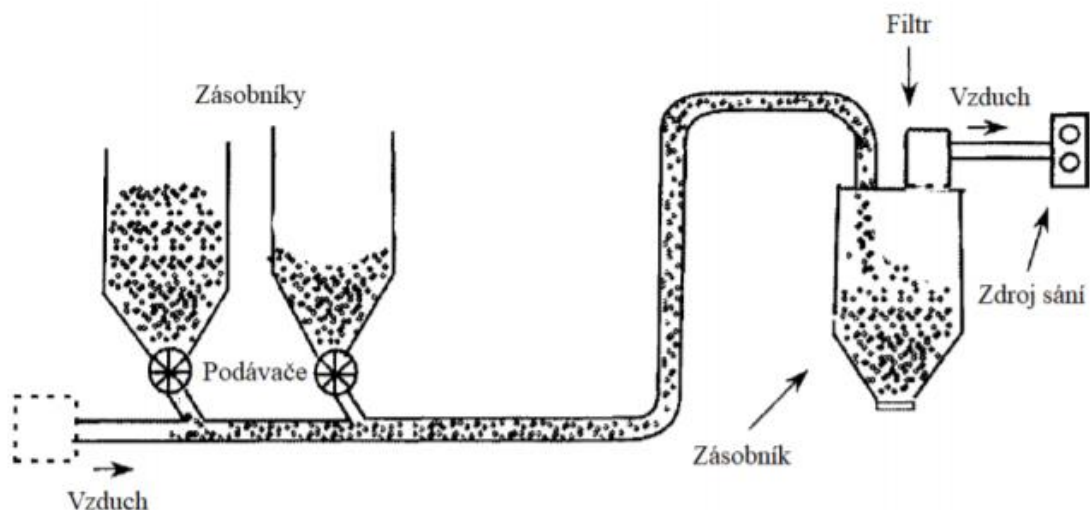
U podtlakové pneumatické dopravy je udržován tlak v potrubí nižší než tlak atmosférický. Minimální tlak při, kterém je možné, aby systém fungoval je 50 kPa . Pokud by byl tlak nižší, nebylo by v systému dostatek dopravního plynu a dopravovaný materiál by sedimentoval a ucpával potrubí. Uspořádání podtlakové dopravy je takové, že zdroj sání je umístěn za odlučovačem na konci dopravní trasy, jak je možné vidět na Obr. 4.5. Dpravovaný materiál je do systému nasáván sací hubicí nebo je do potrubí dávkován pomocí podavače. [6,9]

Výhody podtlakového systému:

- možnost dopravy z více míst na jedno místo určení;
- snadné podávání materiálu do proudu vzduchu;
- nemožnost úniku nežádoucích látek do okolí;

Nevýhody podtlakového systému:

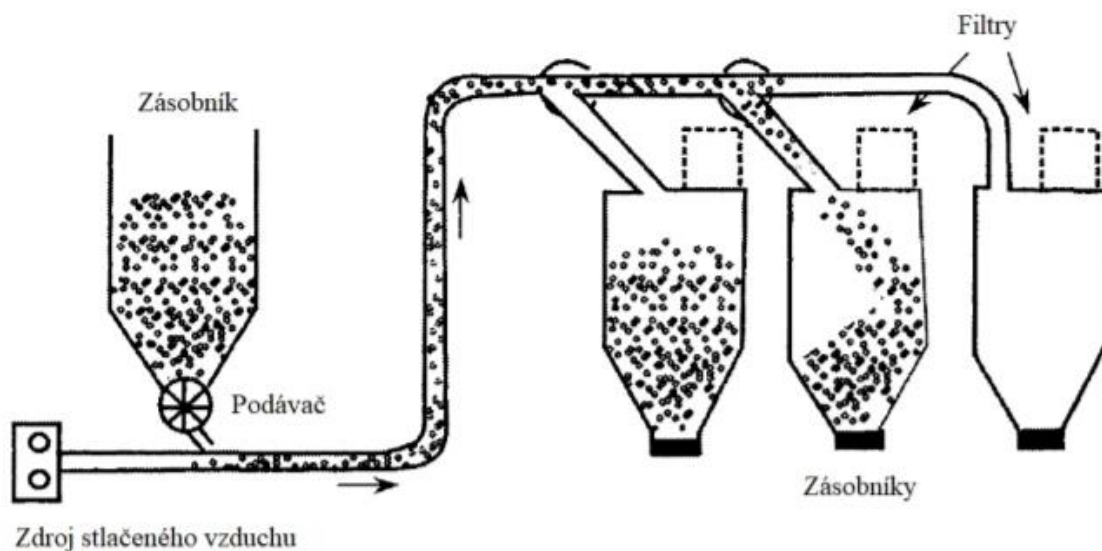
- omezený dosažitelný tlakový spád;
- koncový odlučovač je namáhaný na podtlak;



Obr. 4.5. Schéma podtlakového pneumatického systému [6]

4.3.2. Přetlaková pneumatická doprava

Pracovní tlak v přetlakové pneumatické dopravě je vyšší než atmosférický, obvykle do 1 MPa . Toto uspořádání je vhodné pro netoxické látky, jelikož v netěsnostech uniká přepravovaný materiál do okolního prostředí. Přepravovaný materiál je dávkován z násypky do dopravního potrubí, kde je uváděn do pohybu stlačeným vzduchem dodávaným kompresorem (viz Obr. 4.6). Výhodou tohoto uspořádání je možnost dopravovat materiál z jednoho místa na více míst. Naopak nevýhodou je nutnost řešit podavač materiálu jako speciální, složité zařízení. [6,9]



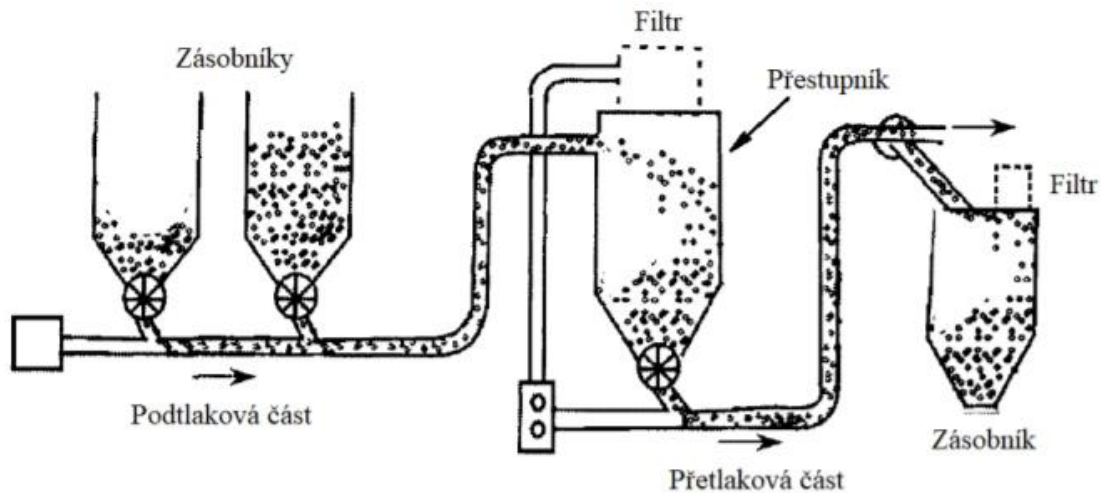
Obr. 4.6. Schéma přetlakového pneumatického systému [6]

4.3.3. Kombinovaná pneumatická doprava

Kombinací obou předchozích systémů vzniká systém pro kombinovanou pneumatickou dopravu. Dopravní trasa se skládá z podtlakové a přetlakové části. První polovinu zařízení tvoří podtlakový systém. Materiál odloučený v odlučovacím zařízení podtlakového systému se podává podavačem do směšovače přetlakového systému (viz Obr. 4.7). Podavač materiálu musí udržet přetlak ve směšovači oproti podtlaku v odlučovacím zařízení. [6,9]

Tento systém spojuje výhody obou předchozích systémů, tj:

- Je možné dopravovat materiál z více míst na více míst.
- Jednoduché podávání materiálu do proudu vzduchu.



Obr. 4.7. Schéma kombinovaného pneumatického systému [6]

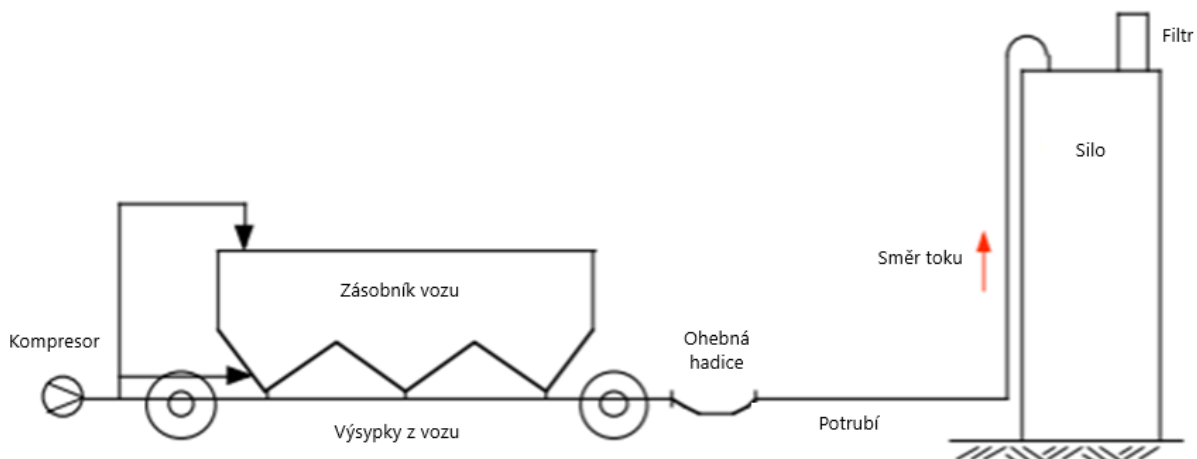
4.4. Mobilní pneumatické systémy

Mnoho partikulárních materiálů je dopravováno na delší vzdálenosti po silnicích, mořích nebo železnicích. Jedna z možností dopravy práškového materiálu je v jednotlivých obalech např. velkokapacitních vacích. Další možnost je dopravovat partikulární materiál pomocí systémů navržených přesně pro tento účel. Tyto systémy jsou schopné samotného vyskladnění a naskladnění materiálu.

4.4.1. Silniční doprava

Pro přepravu partikulárních materiálů jsou velmi často využívány cisternové kamiony. Kamiony jsou využívány zejména pro přepravu: soli, cukru, mouky, uhlí, prachu, cementu apod. K přepravě materiálu z kamionu do sila se většinou používá přetlakového systému se zdrojem vzduchu instalovaným přímo za kabinou vozidla, díky čemuž jsou soběstačné ve vykládání svého nákladu (viz Obr. 4.8).

Návrh pro vyložení nákladu z kamionu do sila většinou směřuje k tomu, aby mohl kamion zaparkovat co nejbližší u sila, díky čemuž je minimalizovaná dopravní trasa i vykládací doba. Pro kamiony o kapacitě 25 tun je přibližná vykládací doba okolo 1 až 2 hodin [11]. Silo kamionu je nejčastěji vyrobeno z uhlíkové oceli nebo nerezové oceli v závislosti na druhu přepravovaného materiálu. [11]



Obr. 4.8. Vykládání kamionu do sila [11]

4.4.2. Železniční doprava

Vlaky většinou nejsou tak nezávislé jako kamiony, tudíž je potřeba samostatného systému potrubí pro vyložení vagonů na každém místě. Kvůli jejich délce je nutné mít po celé délce vagonů více bodů, ze kterých se materiál odsává. Vagóny jsou většinou navrhované na větší množství dopravního vzduchu než kamiony, díky čemuž je jejich vykládací doba kratší. [6]

5. Hlavní části zařízení pro pneumatickou dopravu se sypkými materiály

5.1. Zdroje stlačeného vzduchu

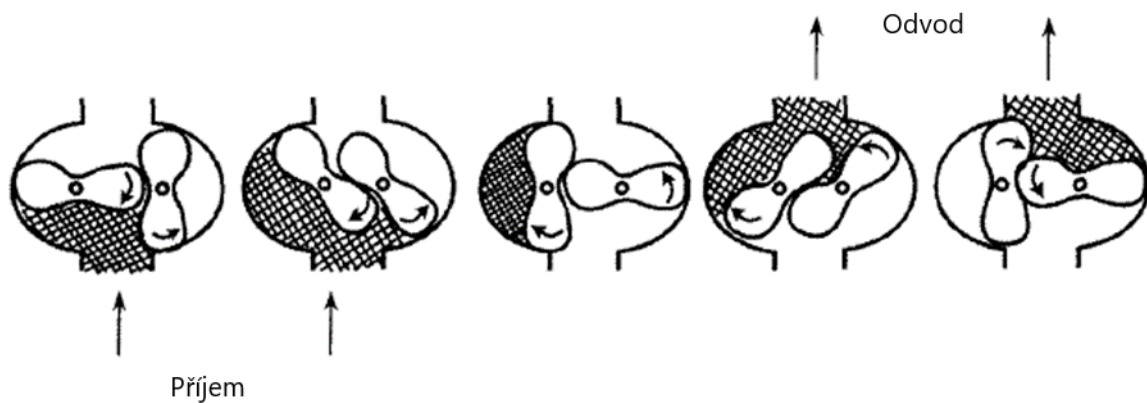
Hlavní parametry pro výběr zdroje dopravního plynu jsou požadovaná velikost tlakového spádu a objemový průtok plynu.

5.1.1. Ventilátory

V pneumatické dopravě jsou ventilátory nejčastěji používané pro dopravu materiálu ve vzhledu na krátkou vzdálenost, při které je malá šance na ucpání potrubí. Můžou být použity jak v přetlakové, podtlakové i kombinované dopravě. Podtlaková pneumatická doprava s ventilátorem se používá nejčastěji k odsávání prachem znečištěných vzdušín z pracovních prostorů. [6]

5.1.2. Dmychadla

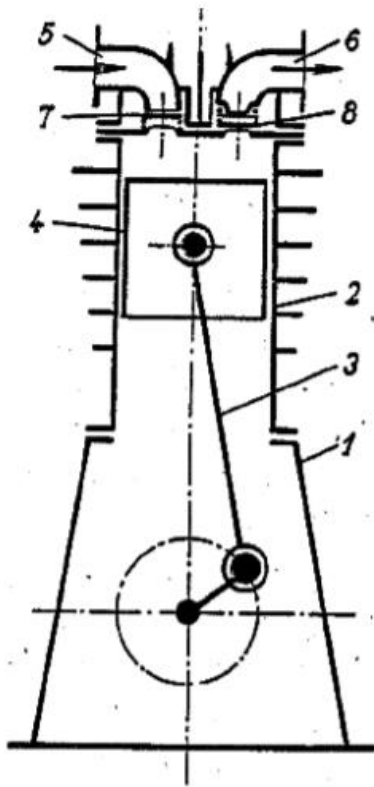
Dmychadla se většinou používají pro středotlaké systémy. Jsou pravděpodobně nejrozšířenějším zdrojem stlačeného vzduchu pro pneumatické systémy s dopravou materiálu ve vzhledu. Mezi výhody dmychadel patří jejich malé rozměry, malá hmotnost a možnost napojit dmychadlo přímo na pohon. Nevýhodou je jejich náchylnost ke znečištění. Princip funkce používaného Rootsova dmychadla je možné vidět na Obr. 5.1. [6]



Obr. 5.1. Princip funkce Rootsova dmychadla [6]

5.1.3. Kompresory

Kompresory se používají převážně pro vysokotlaké pneumatické systémy. Jejich dělení spočívá dle způsobu stlačování na objemové a dynamické. U objemových kompresorů dochází ke zvýšení tlakové energie zmenšením pracovního prostoru ve válci. U dynamických kompresorů se pracovní prostor nemění. Kinetická energie plynu se zvyšuje v oběžném kole, která se poté mění ve statoru na tlakovou. Jednotlivé části pístového kompresoru jsou popsány na Obr. 5.2. [6,12]



1- kliková skříň

2- válec

3 – ojnice

4 – píst

5 - sací hrdlo

6 - výtlačné hrdlo

7 - sací ventil

8 - výtlačný ventil

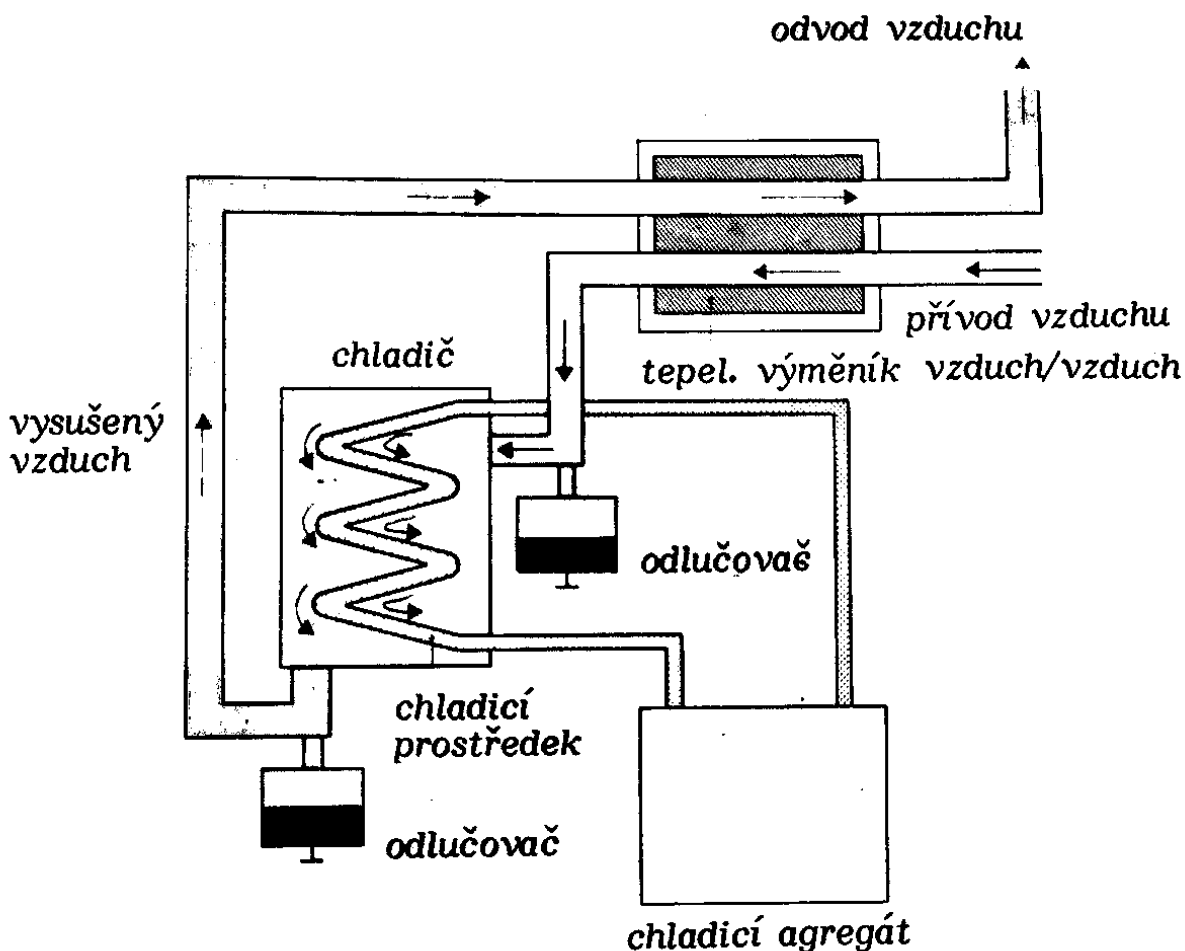
Obr. 5.2. Schéma pístového kompresoru [12]

5.2. Sušiče vzduchu

Často je pro pneumatickou dopravu požadován suchý vzduch, aby nedošlo k znehodnocení materiálu a celkovému ztížení jeho dopravy. Další komplikace by mohly nastat v případě kondenzace vlhkosti v potrubním systému a zdrojích stlačeného vzduchu. K odstranění vlhkosti ze vzduchu se používá především jeho zchlazení, sorpce a difúze.

5.2.1. Kondenzační sušení

Kondenzační sušení je nejpoužívanějším způsobem sušení stlačeného vzduchu. Tento způsob je nejúčinnější, když je vzduch teplý a vlhkost vzduchu vysoká. Tato zařízení fungují na principu ochlazení proudu tlakového vzduchu na teplotu tlakového rosného bodu. Kondenzační sušiče vzduchu mají většinou dvě fáze tepelné výměny. V první fázi je teplý vzduch předchlazěn odcházejícím studeným suchým vzduchem. Ve druhé fázi vstupuje do tepelného výměníku, kde je pomocí chladiva ochlazen na požadovaný rosný bod (viz Obr. 5.2). Při ochlazování vzduchu se jeho relativní vlhkost zvětšuje, dokud nedosáhne 100 %. Ochlazováním plynu za tento bod se dosáhne kondenzace a měrná vlhkost vzduchu se začne snižovat. Po odstranění kondenzátu a opětovném ohřátí plynu zůstane měrná vlhkost vzduchu konstantní, zatímco relativní vlhkost vzduchu se sníží. Omezením je v ideálním případě pouze teplota tlakového rosného bodu 0 °C. Ve skutečném provozu je možné dosáhnout tlakového rosného bodu jen okolo 2 °C, ten je však pro většinu provozů dostačující. [6,13,14]

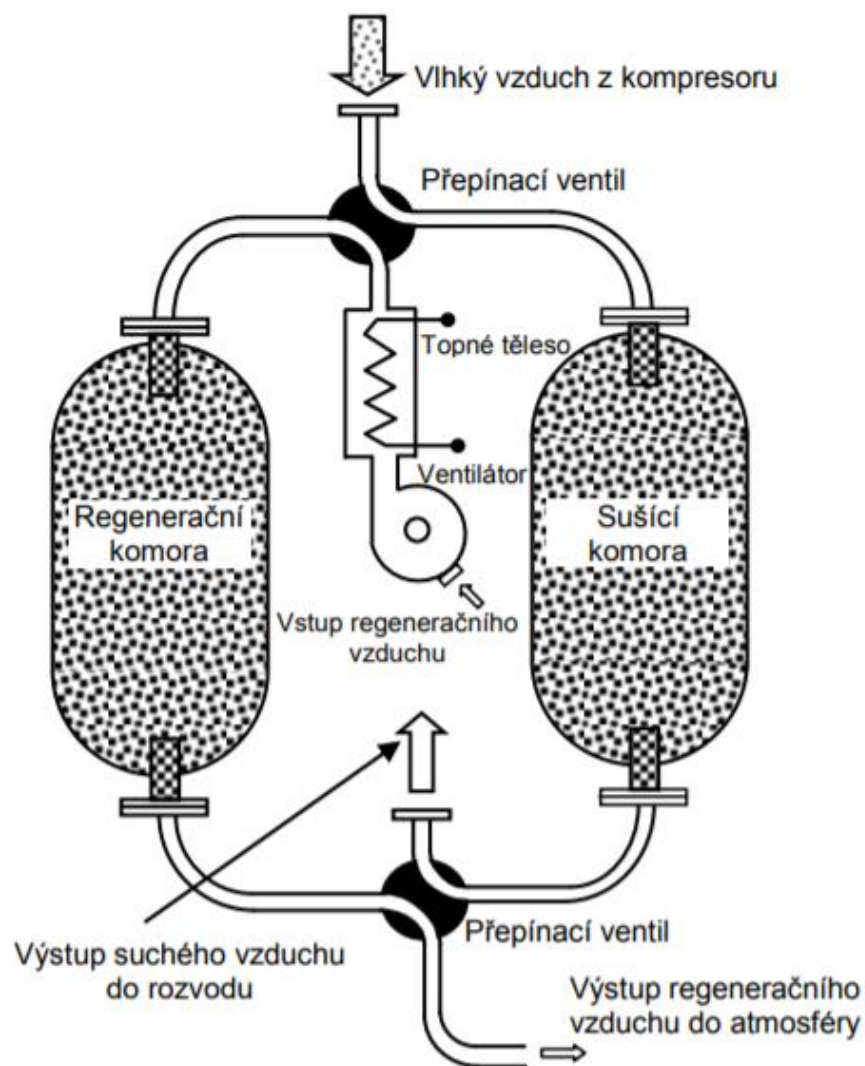


Obr. 5.3. Schéma kondenzačního sušení vzduchu [13]

5.2.2. Sušení adsorpcí

Sušení adsorpcí je na rozdíl od sušení chlazením, neefektivnější při nízké vlhkosti ve vzduchu i jeho teplotě. Adsorpční sušiče jsou používány k dosažení, co nejsuššího dopravního vzduchu, jelikož jsou schopné snížit vlhkost vzduchu na úplné minimum. Nedoporučuje se jimi sušit vlhký teplý vzduch z důvodu jejich provozních nákladů. Stlačený vzduch v sušiči proudí přes pevný porézní adsorbent, přičemž se molekuly vodní páry v plynu váží pomocí adhezních sil na povrch adsorbentu. Ten musí být následně regenerován.

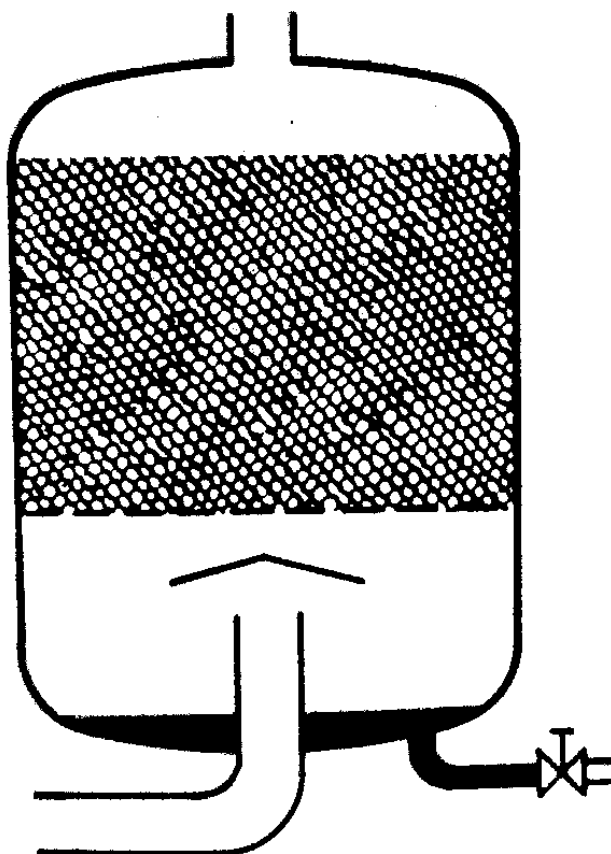
Adsorpční sušiče dosahují tlakového rosného bodu až $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Většinou se adsorpční sušička skládá ze dvou nádob naplněných adsorbentem. V jedné nádobě probíhá sušení vzduchu, zatímco v druhé se tlak sníží na atmosférický a náplň se regeneruje (viz obr. Obr. 5.4). [14]



Obr. 5.4. Adsorpční sušička vzduchu [14]

5.2.3. Sušení absorpcí

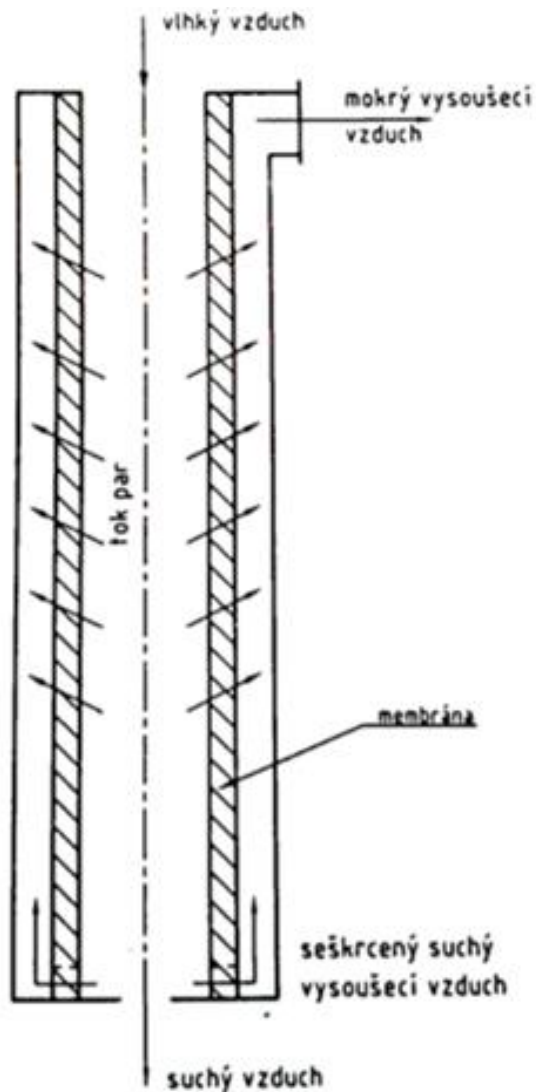
Sušení absorpcí je málo využívaný postup, při kterém se vysušení vzduchu dosáhne pohlčením vodní páry hygroskopickým prostředkem. Hygroskopický prostředek může být buď rozpustný (např. chlorid lithný) nebo kapalný (např. kyselina sírová, fosforečná). Sušičky tohoto typu dosahují tlakového rosného bodu okolo $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při absorpčním sušení vstupuje stlačený vzduch do nádoby hrdlem umístěným na jejím dně nebo její dolní části. Dále prochází sítím umístěným v nádobě, na kterém je nasypán rozpustný sušící prostředek, jenž pohlcuje vlhkost ze vzduchu. Rozpustný prostředek se po styku s vodou stává kapalným a stéká přes síto na dno nádoby, odkud je odváděn (viz Obr. 5.5). [13]



Obr. 5.5. Absorpční vysoušení [13]

5.2.4. Membránové sušení

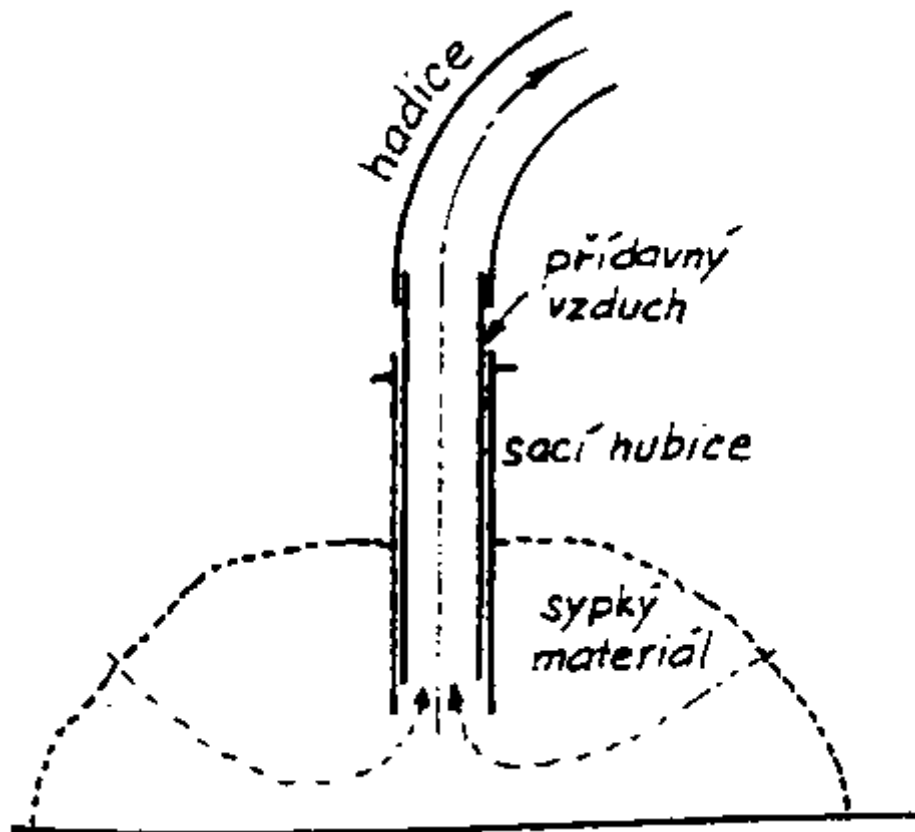
Membránové sušení využívá dutých vláken z makromolekulární membrány s vysokou afinitou k vodní páře, jejichž vnitřkem proudí stlačený vzduch. Při průchodu vlhkého vzduchu vláknem vodní pára migruje na opačnou stranu stěny membrány, na které je menší tlak. Část vysušeného vzduchu je poté využita na odvod vlhkosti z vnější strany vlákna do atmosféry. Tato vlákna se většinou sdružují do tlakové soustavy. [15]



Obr. 5.6. Membránové sušení [15]

5.3. Směšovače

Důležitým členem podtlakového pneumatického systému jsou směšovače. Směšovač je zařízení, ve kterém dochází k mísení plynu a materiálu. V podtlakové pneumatické dopravě se nejvíce využívá tzv. sacích hubic. Ve spodní části hubice vytváří plášť a odsávací trubka štěrbinovou trysku. Dopravní vzduch proudí mezi pláštěm a odsávací tryskou, čímž strhává materiál do odsávací trubky. Zde se urychluje a pokračuje dále do potrubí (viz Obr. 5.7). Hubice může být opatřena regulačními převody. Jedním z převodů se reguluje množství vzduchu proudícího do štěrbinové trysky a tím i množství odvedeného materiálu. Druhým se reguluje průměr štěrbinové trysky. Dále je možné regulovat směšovací poměr a dopravní rychlost materiálu pomocí otvorů v trubce, které jsou překryté válcovým prstencem. [6,15]



Obr. 5.7. Sací hubice [15]

5.3.1. Komorové podavače

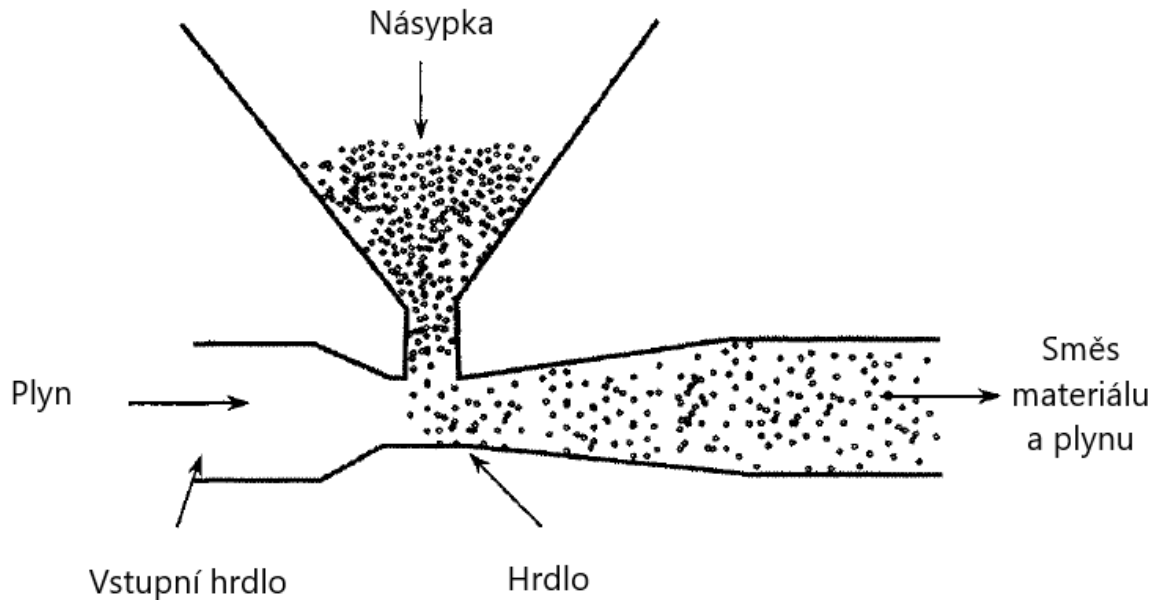
Pro vysokotlakou dopravu jsou nejvíce vhodné komorové podavače. Podavač se skládá z tlakové nádoby v horní části opatřené násypným hrdlem (viz Obr. 5.8). Po vsypaní materiálu do podavače se nádoba uzavře a materiál se vytlačí do dopravního potrubí. Po vyprázdnění se nádoba odvzdušní a znovu se naplní materiálem otevřeným násypným otvorem. Z principu funkce komorového podavače je zřejmé, že podavač nepracuje kontinuálně. Jeho pracovní cyklus je složen ze dvou procesů – plnění a vyprazdňování. Pokud by bylo potřeba dosáhnout téměř kontinuálního dodávání materiálu do potrubí, je nutné spojit dva komorové podavače. [6,9]



Obr. 5.8. Vysokotlaký komorový podavač [17]

5.3.2. Ejektorové podavače

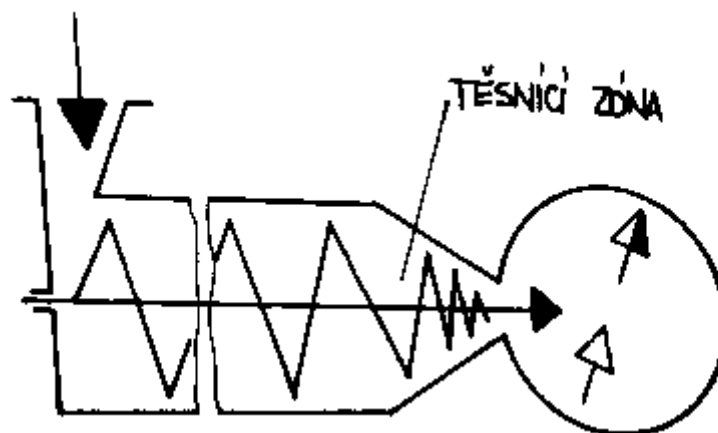
Ejektor přisává práškový materiál do rychle proudícího plynu. Změnou rychlosti proudění vzduchu je měněno množství přisávaného materiálu. Princip podavače je založen na přeměně statického tlaku dopravního vzduchu na pohybovou energii, která je využita k urychlení podávaného materiálu. Schéma ejektorového podavače je možné vidět na Obr. 5.9. [6]



Obr. 5.9. Schéma ejektorového podavače [6]

5.3.3. Šnekové podavače

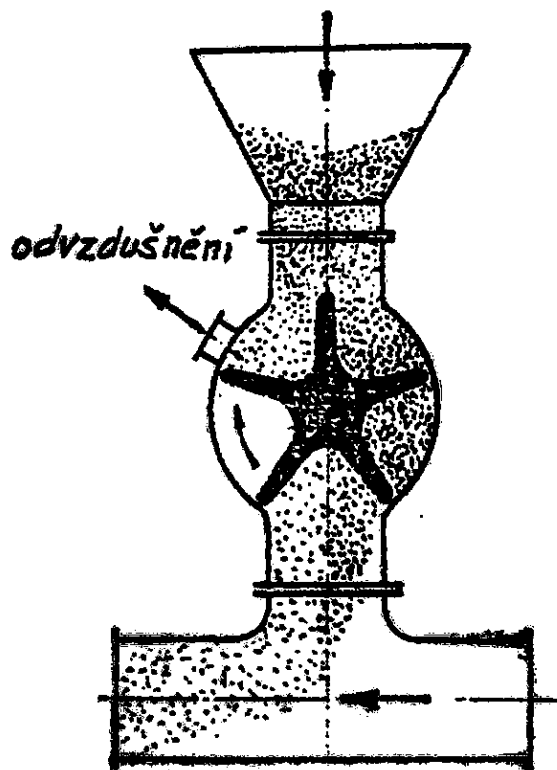
Šnekový podavač je obdobou šnekového dopravníku. Je určen k rovnoměrnému a regulovanému podávání nebo objemovému dávkování sypkých jemné zrnitých materiálů ze zásobníku. Energetická ztráta pro vytvoření tlakového uzávěru je tvořena energií potřebnou pro pohon šnekové hřídele. Jeho schéma je možné vidět na Obr. 5.10. [16]



Obr. 5.10. Schéma šnekového podavače [16]

5.3.4. Rotační podavače

Rotační podavače se používají pro podávání a dávkování sypkého materiálu do potrubí. Rotační podavač se skládá z bubny s otočnou hvězdicí na vodorovné hřídeli. Materiál vstupuje do podavače horním otvorem a opouští ho spodním výsypem (viz Obr. 5.11). Plynulé dávkování materiálu zajišťují při otáčení volné prostory ve hvězdicí. Změnou otáček podavače se reguluje jeho výkon. [6,15]



Obr. 5.11. Schéma rotačního podavače [15]

5.4. Dopravní potrubí

Dopravní potrubí je většinou složeno z ocelových nerezových trubek s přivařenými přírubami. K spojení jednotlivých trubek se nejčastěji využívá přírubového spoje ve výjimečných případech spoje svarového. Při montáži dopravního potrubí je důležité dbát na sousost trubek z důvodu opotřebení materiálu.

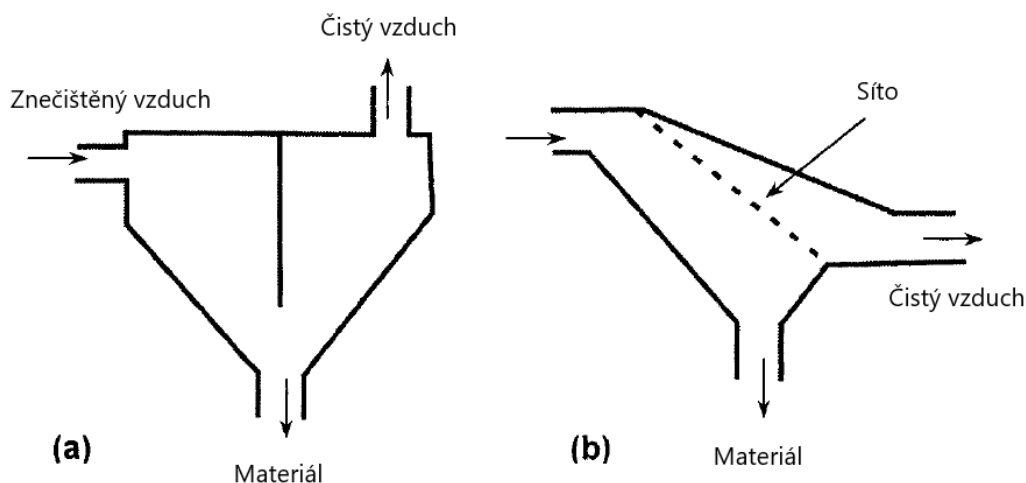
Jedním z nejproblematictějších prvků v potrubí jsou kolena. Nejenže jsou zdrojem značného zvýšení tlakových ztrát, ale jsou také místem mechanického opotřebení. Možnosti ochrany proti jejich opotřebení jsou více rozebrány v kapitole 6.2. [18]

5.5. Odlučovače

Pro oddělení dopravovaného materiálu od dopravovaného plynu se používá tzv. odlučovačů. Na odlučivost odlučovačů je kladen velký důraz, protože úlet z odlučovače znečišťuje okolí a zhoršuje ekonomické a ekologické parametry pneumatické dopravy.

5.5.1. Usazovací komory

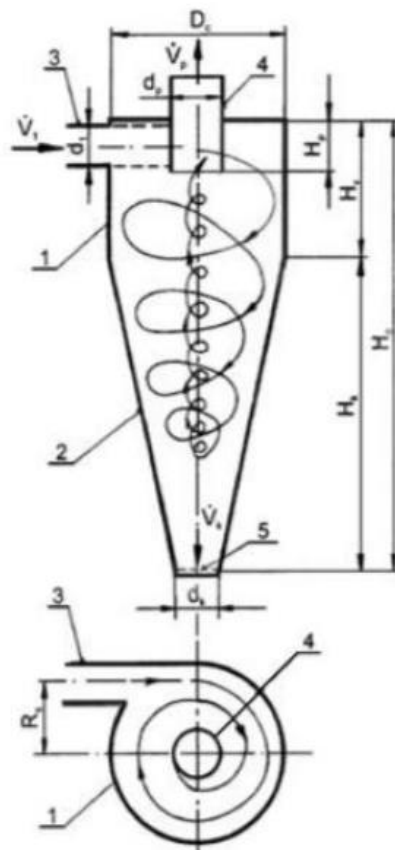
Usazovací komory se používají především pro hrubozrnné materiály. Představují nejjednodušší typ odlučovačů využívajících gravitační princip odlučování. Proud plynu a materiálu vstupuje do komory o velkém objemu. To vede ke snížení rychlosti směsi a těžší částice klesají díky gravitaci ke dnu. Účinnost těchto zařízení není příliš vysoká, pohybuje se okolo 50 %. K jejímu zvýšení se může použít instalace např. vnitřní přepážky nebo síta (viz Obr. 5.12). [9,19]



Obr. 5.12. Usazovací komory a) jednoduchý systém, b) systém využívající síto [9]

5.5.2. Vírové odlučovače

Cyklóny jsou nejrozšířenějším a nejpoužívanějším mechanickým odlučovačem. To je dáno především tím, že jsou díky své konstrukci relativně levné a díky absenci pohyblivých mechanických částí, jsou téměř bezporuchové. Využívají odstředivých sil vyvolaných otáčivým pohybem tekutiny, které způsobují radiální usazovací pohyb částic o větší hustotě směrem ke stěně. Rozdílnou velikostí odstředivých sil působících na částice se dosáhne k oddělení pevných částic od tekutiny. Pevné částice se odlučují po obvodu cyklónu, odkud se odvádí do kuželové násypky, přičemž odlučivost prudce klesá s klesajícím objemem prachových částic. Nejčastěji jsou cyklóny provedeny tak, že směs je přiváděna tečně na válcovou komoru (viz Obr. 5.13), odkud je poté vzduch odváděn svisle vzhůru do přepadové trubky, zatímco separované tuhé částice jsou odváděny kuželem dolů. Využívají se především pro hrubší práškový materiál. [6,9,19]



Obr. 5.13. Schéma vírového odlučovače [19]

1) válcová část, 2) kuželová část, 3) vstupní trubka, 4) přepadová trubka 5) výstup odloučené fáze

5.5.3. Látkové filtry

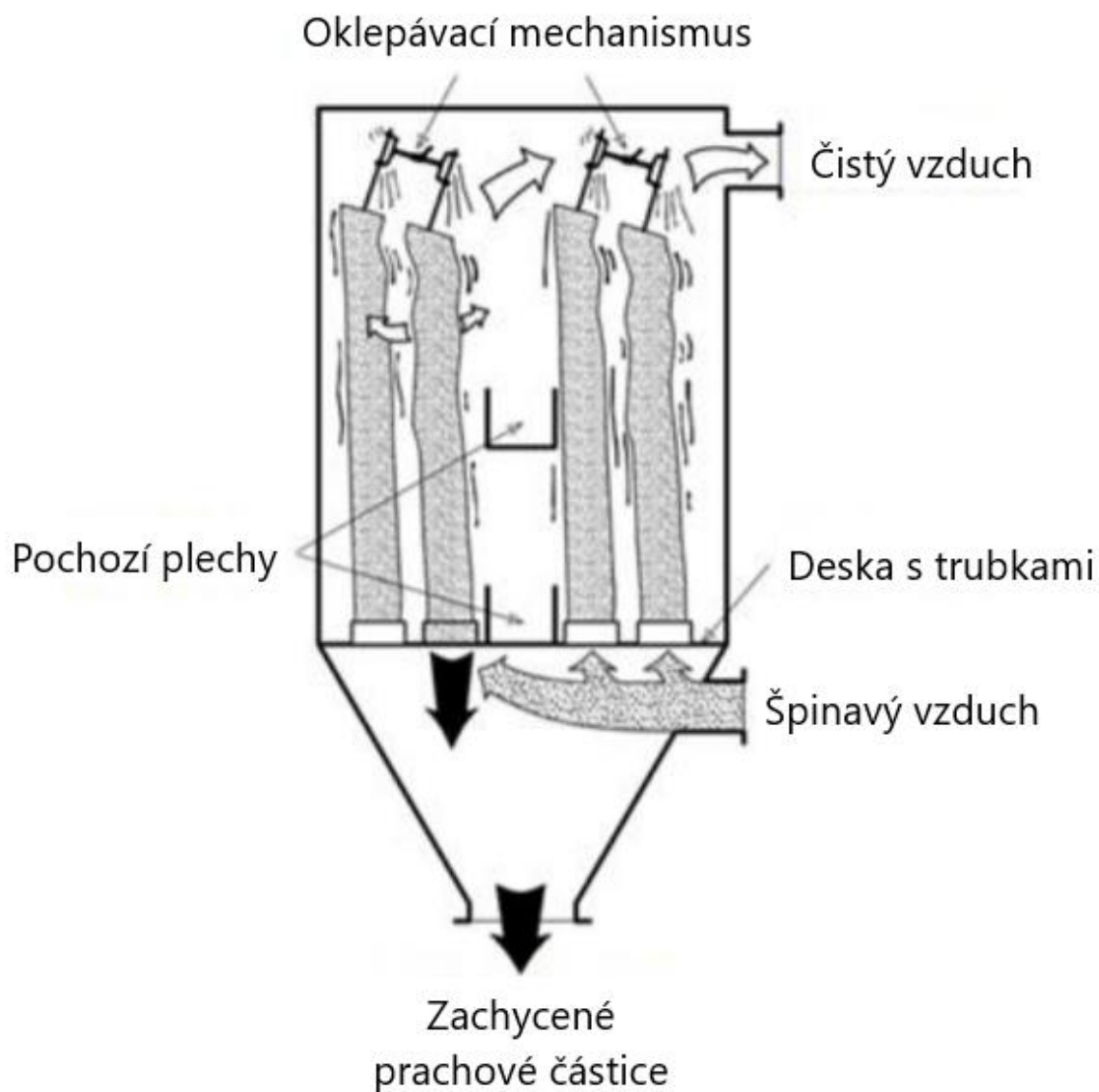
Látkové a mokré filtry jsou nevhodnějším odlučovačem pro velmi jemné částice. U látkových filtrů probíhá odlučování hlavně na síťovém principu. Vzduch procházející přes vrstvu filtračního média je poháněn zdrojem stlačeného vzduchu. Účinnost látkových filtrů dosahuje až 99,99 %. Tkanina použitá na výrobu filtru musí mít určité parametry jako je tepelná, fyzikální a chemická odolnost. Na hadice se používá především flanel a látky vlněné nebo polovlněné. U látkových filtrů je při vyšších teplotách nebezpečí vzplanutí, proto jsou používány jen pro nízké provozní teploty.

V průběhu odlučování se odlučované částice usazují na povrchu filtru, čímž dochází ke zvyšování tlakové ztráty. Látkové filtry mají kvůli tomuto jevu krátkou životnost, a tudíž je potřeba je pravidelně vyměňovat. Jejich životnost se dá prodloužit pomocí tzv. regenerace filtru. Ta může probíhat buď mechanickým oklepáním nebo tlakovým pulsem vzduchu. Nevýhodou těchto filtrů je jejich vysoká pořizovací cena a značná tlaková ztráta (asi 500 až 1500 Pa). [6,15,20]

Mechanické oklepávání

U mechanicky oklepávaných filtrů jsou filtrační pytly trubkového tvaru připevněny ke spodku filtru a zavěšené na oklepávacím mechanismu v jeho horní části, jak je možné vidět na Obr. 5.14. Kontaminovaný vzduch proudí do spodní části filtru a prochází skrz filtrační pytly, na jejichž vnitřním povrchu se zachytávají nečistoty. Čištění těchto filtrů je dosaženo pomocí třesení oklepávacího mechanismu. Při čisticím procesu je důležité, aby ve filtračních pytlích nebyl přetlak. Pro tento systém je nutný diskontinuální chod, jelikož je nutné oklepat filtrační pytly.

Mezi výhody mechanického oklepávání patří jeho jednoduchost a nízká pořizovací cena. Co se týče nevýhod, jsou to: nízké měrné zatížení filtrační textilie, velká zastavěná plocha, potřeba hodně filtračních pytlů a diskontinuální chod. [6,20]

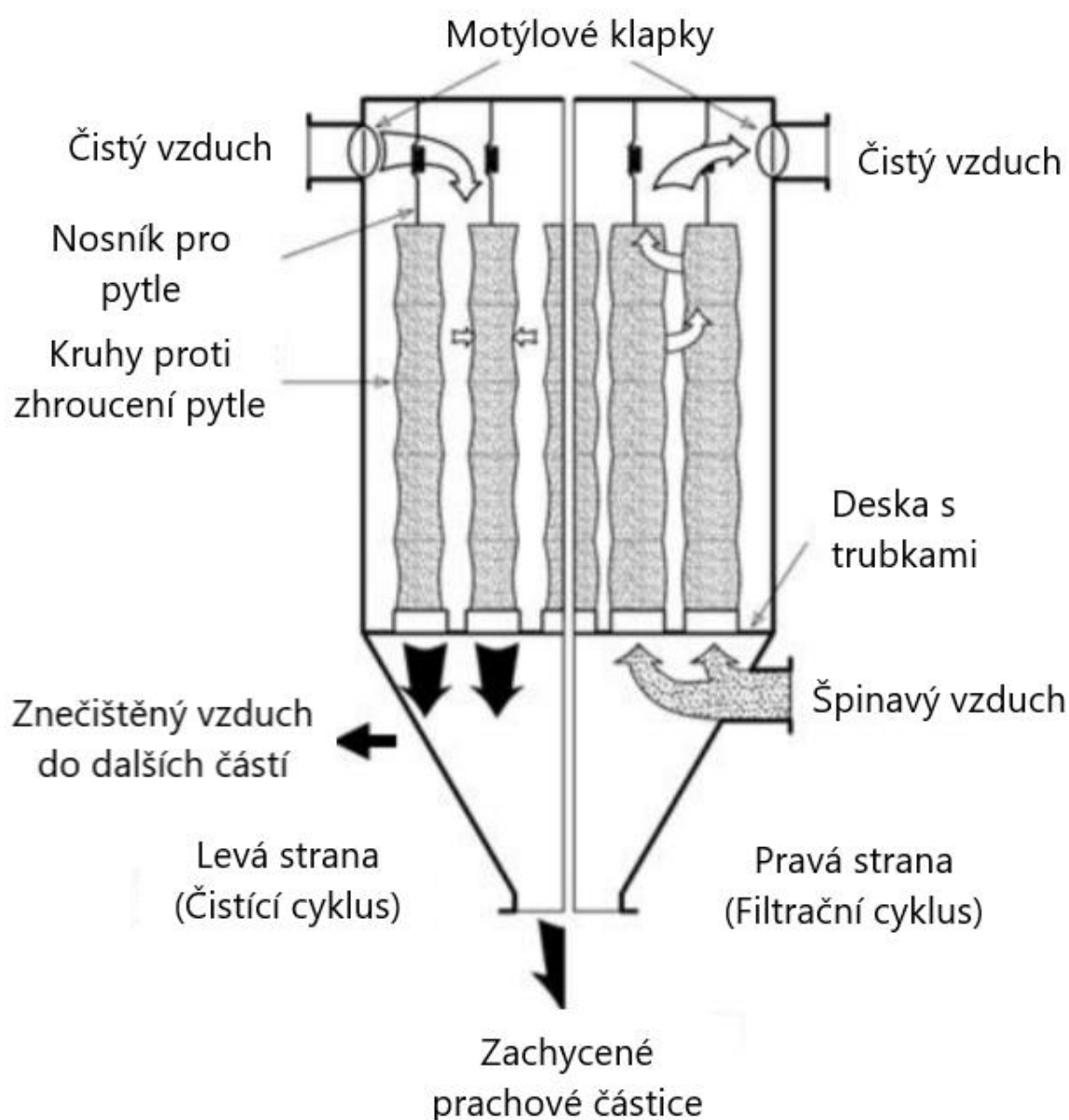


Obr. 5.14. Filtr s mechanickým oklepáváním [20]

Protiproud vzduchu

Ve filtrech s reverzním proudem vzduchu jsou pytle připevněny ke spodku filtru (viz Obr. 5.15), stejně jako u mechanicky oklepávaných filtrů. V horní části filtru jsou filtrační pytle zavěšeny na rámu. Kontaminovaný vzduch proudí přes filtrační pytle, na jejichž vnitřku se zachytávají nečistoty ze vzduchu. Pytle jsou čištěny pomocí čistého vzduchu, proudícím v opačném směru než při filtraci. Tlak vyvolaný tímto vzduchem způsobí, že se filtrační pytle částečně zhroutlí, čímž se dosáhne porušení jejich povrchu a následného odloupení filtračního koláče.

Požadavky na potřebnou zastavěnou plochu jsou podobné jako u mechanicky oklepávaných filtrů, hlavní výhodou filtrů s reverzním vzduchem je jejich menší náročnost na údržbu. [6,20]

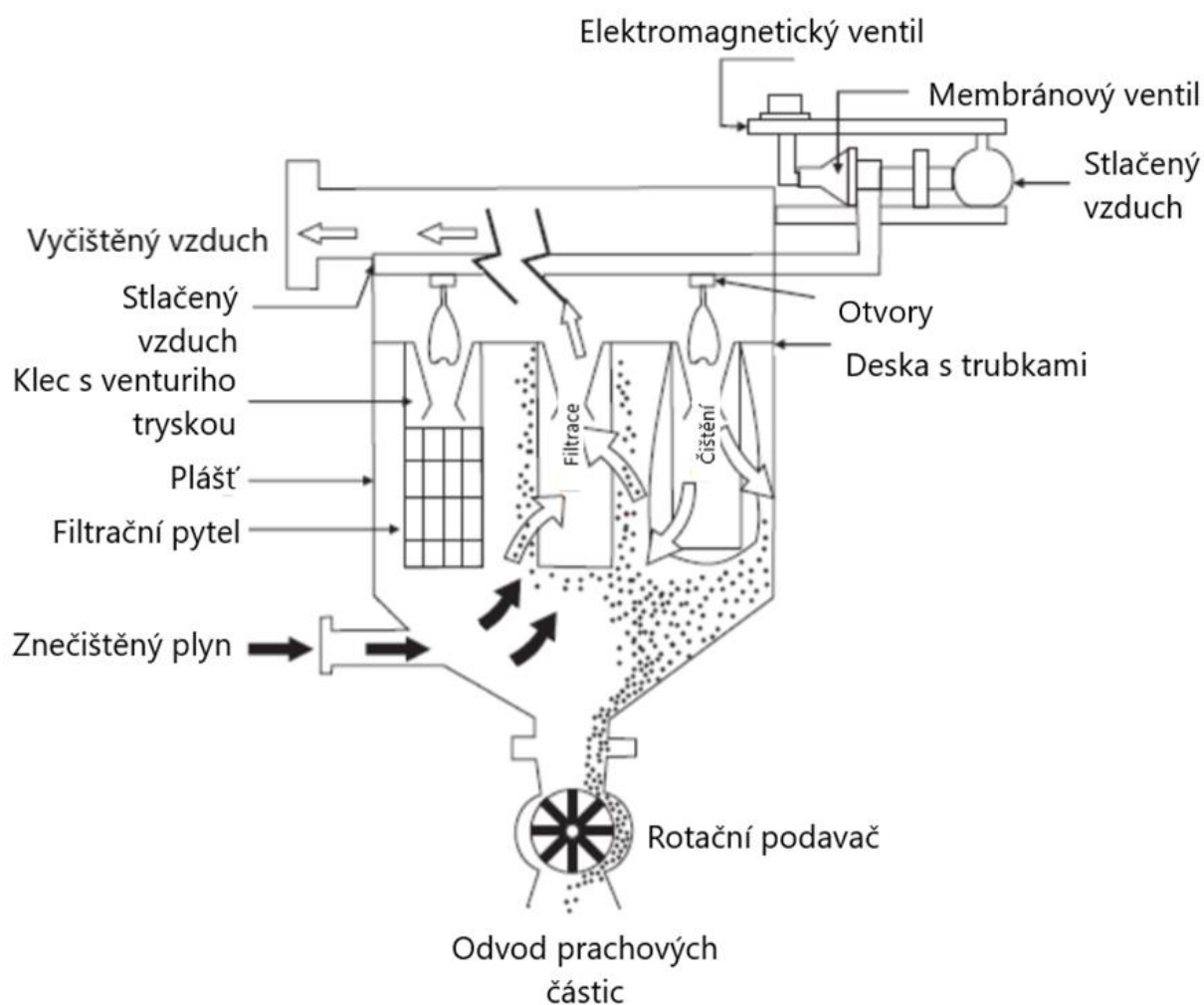


Obr. 5.15. Filtr s protiproudem vzduchu [20]

Tlakový pulz vzduchu

U filtrů s tlakovým pulzem vzduchu jsou pytle připevněny k ocelové mřížce v horní části filtru (viz Obr. 5.16). Kontaminovaný vzduch proudí filtrem odspodu nahoru stejně jako u předchozích variant, ale do pytlů vstupuje jejich vnějším povrchem. Ocelová mřížka uvnitř pytlů zabraňuje jejich zhroucení. Čistící proces je uskutečněn krátkým pulzem stlačeného vzduchu. Ten je urychlen pomocí Venturiho trysky, instalované v horní části pytle. Díky rychlosti vstřiku se stlačený vzduch chová jako bublina, procházející filtrem, napínající jeho povrch, čímž se dosáhne narušení filtračního koláče, který spadává do výsypky.

Mezi hlavní výhody těchto filtrů patří jejich účinnost, vysoké měrné zatížení filtrační textilie, kontinuálnost a menší nároky na zastavěnou plochu. Nevýhodou je potřeba suchého stlačeného vzduchu a vyšší pořizovací cena. [6,20]



Obr. 5.16. Filtr s tlakovým pulzem vzduchu [20]

6. Opotřebení

Mnoho sypkých materiálů, které jsou dopravovány pneumatickou dopravou, mají nežádoucí abrazivní účinky. V důsledku toho jsou potrubí, kolena a další komponenty zatěžovány otěrem směsí plynu a materiálu proudící v potrubí. Je běžné, že nejvíce zatěžované části potrubí vydrží tyto účinky pouze několik hodin. Tyto účinky není možné naprosto eliminovat při dopravě abrazivních částic, ale je možné je zredukovat na přijatelnou úroveň. Té se dosáhne správnou volbou konstrukce dopravního systému, jeho designem a zvolenými dopravními podmínkami. [6]

6.1. Erozivní opotřebení v pneumatické dopravě

Erozivní opotřebení je způsobeno kontaktem mezi dvěma povrchy. Nejproblémovější situace při manipulaci se sypkými materiály, co se erozivního působení týče, je vykládání materiálů, přivádění materiálu do cyklónů, nakládání a vykládání do násypek, skluzů, dopravníku apod.

V pneumatické dopravě jsou nejvíce problémovými oblastmi kolena, rozvaděče a celkově všechny součásti, na které materiál dopadá. Tudiž i samotné potrubí je erozivně namáháno. Dalšími problémovými oblastmi jsou ty, které jsou vystavené tlakové diferenci, jako konkrétní příklad mohou posloužit např. podavače, které dávkuje materiál do přetlakového potrubí. [6]

6.2. Opotřebení potrubního systému

Opotřebení kolen je v pneumatické dopravě problém, se kterým se počítá a je nemožné ho odstranit. Jedinou možností je zredukovat erozivní účinky a prodloužit životnost kolene na přijatelnou úroveň. Pro výběr vhodného způsobu ochrany potrubí před abrazivními účinky se musí vzít v potaz mnoho faktorů, které souvisí s dopravovaným materiálem a se samotným systémem dopravy.

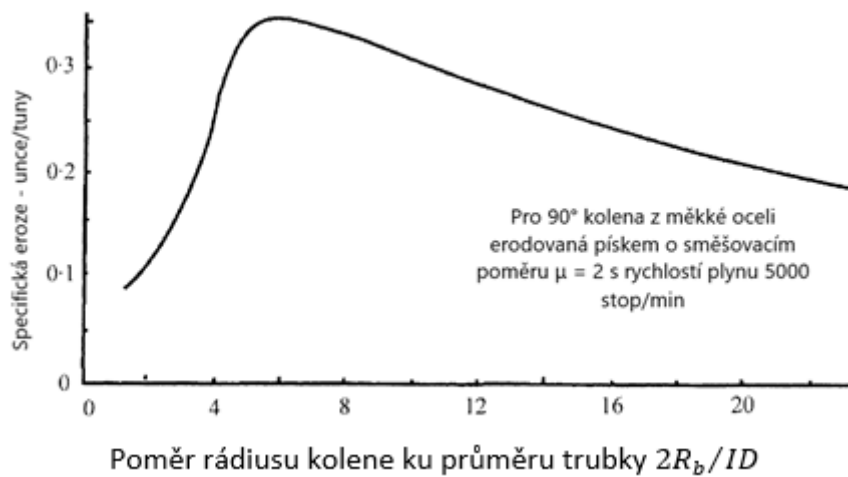
Pro ochranu potrubí před erozivními účinky hraje při jejím návrhu největší roli samotný objemový průtok a velikost potrubí, ze kterých vyjde přijatelná rychlost vzduchu. Hlavním problémem při takovém návrhu je ten, že je vzduch stlačitelný a jeho vlastnosti se mění s tlakem. To je na obtíž při návrhu vysokotlakých systémů, kde může být tlaková ztráta 100 až 300 *kPa*, na začátku potrubí až po atmosférický tlak na jeho konci. To způsobuje mnohonásobné zvýšení rychlosti vzduchu na konci potrubí, a tudíž i větší erozivní účinek. Tím se kolena na konci potrubní sítě opotřebovávají mnohem rychleji než kolena na jejím začátku. [6]

6.2.1. Využití geometrie

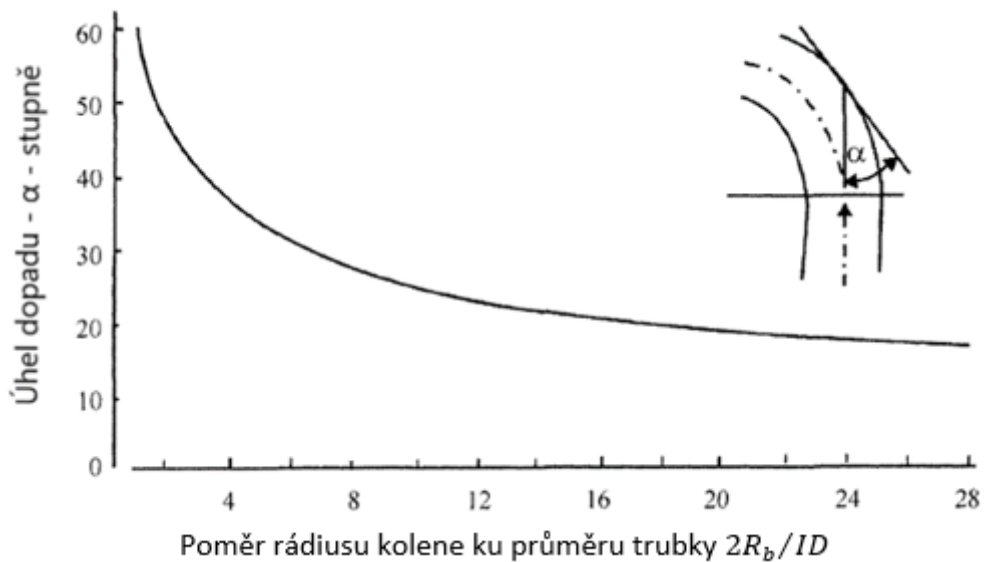
Už ze samotné podstaty pneumatické dopravy je zřejmé, že použité potrubí bude náchylné k otěru při dopravě abrazivního materiálu. Nejvíce namáhané bude při dopravě materiálu ve vlnosku, jelikož směs vzduchu a materiálu musí být udržována ve vysoké rychlosti, aby nedocházelo k ucpávání potrubí. Největší problém představují právě kolena, jelikož částice narážejí pod velkým úhlem na jejich stěny z důvodu změny směru potrubí.

Kolena jsou vyráběna o různých velikostech a geometriích. U potrubních kolen se nejčastěji udává jejich průměr ID a rádius kolene R_b . Jelikož kolena jsou velice náchylná k erozivnímu opotřebení, bylo provedeno mnoho zdokonalení a inovací k eliminaci tohoto problému.

Veliký dopad na opotřebení kolen má jejich rádius. Jak je možné vidět na Grafu 6.1, u kolen s větším rádiusem dochází k menšímu opotřebení. To je způsobeno tím, že částice dopadají na koleno pod menším úhlem. Vliv úhlu dopadu na opotřebení kolene je možné vidět na Grafu 6.2. [6]



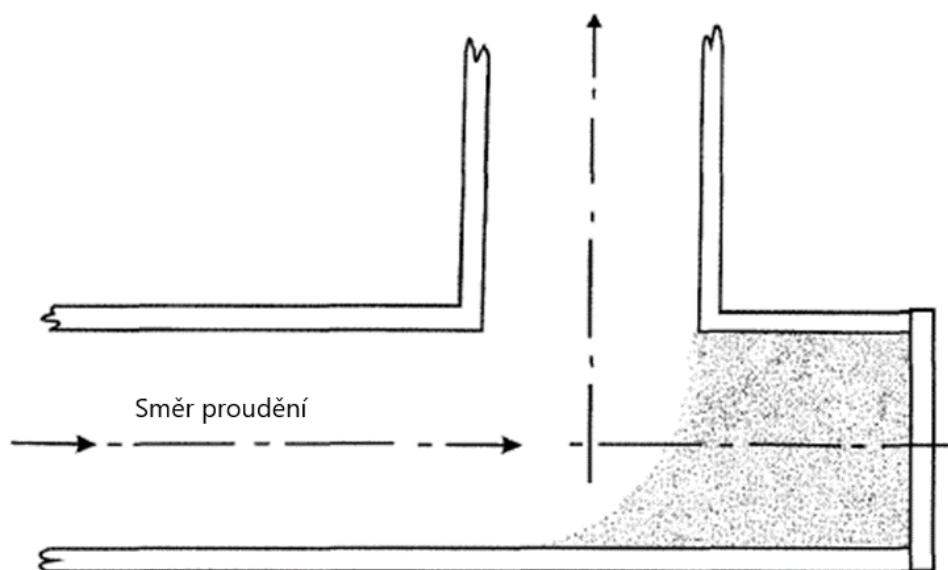
Graf 6.1. Vliv geometrie kolene na jeho opotřebení [6]



Graf 6.2. Vliv geometrie kolene na úhel dopadu částice [6]

Z tohoto důvodu se využívá kolen o velkých rádiusech, díky kterým materiál dopadá na stěnu kolene o malém úhlu, a tím je sníženo opotřebení kolene. Tato kolena se většinou skládají z několika segmentů, díky čemuž je s nimi lehčí manipulace. Další výhodou je namáhání pouze některých částí kolene, které je možné samostatně vyměnit místo výměny celého kolene. [6]

Dalším levným a jednoduchým způsobem jsou kolena o nulovém rádiu, vyrobená z normalizované trubky. Potrubí je prodlouženo v původním směru, čímž vytvoří tzv. torbu. Materiál se v torbě nahromadí a napěchuje. Tímto způsobem se částice otírají pouze sami o sebe, jak je vidět na Obr. 6.1. [6,16]



Obr. 6.1. Koleno o nulovém rádiu [6]

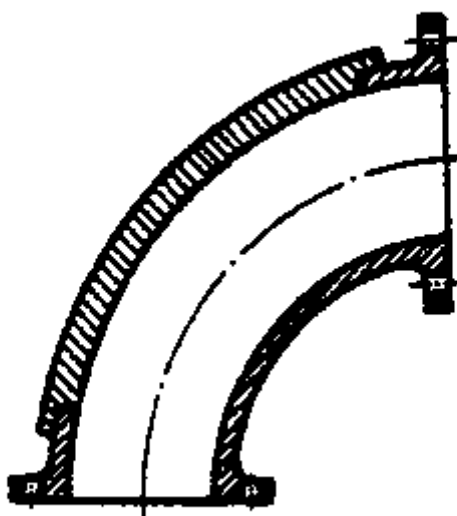
6.2.2. Využití materiálu

Další z možností, jak co nejvíce snížit opotřebení potrubí, je zvolení vhodného materiálu, který bude odolávat nárazům a otěru částic. V takovýchto případech se nabízí dvě možnosti:

- **Tvrdé materiály** např. keramika nebo čedič, jsou nanesené na problémové části potrubí. Díky jejich tvrdosti se zpomalí abrazivní působení materiálu a potrubí.
- **Pružné materiály** např. guma nebo polyuretan, jsou často využívané materiály k zabránění abrazivních účinků. Přesto, že jejich tvrdost je mnohem menší než tvrdost dopravovaného materiálu, jejich výhoda je v absorbování veliké části energie nárazu bez trvalého poškození.

6.2.3. Opatřovací metody

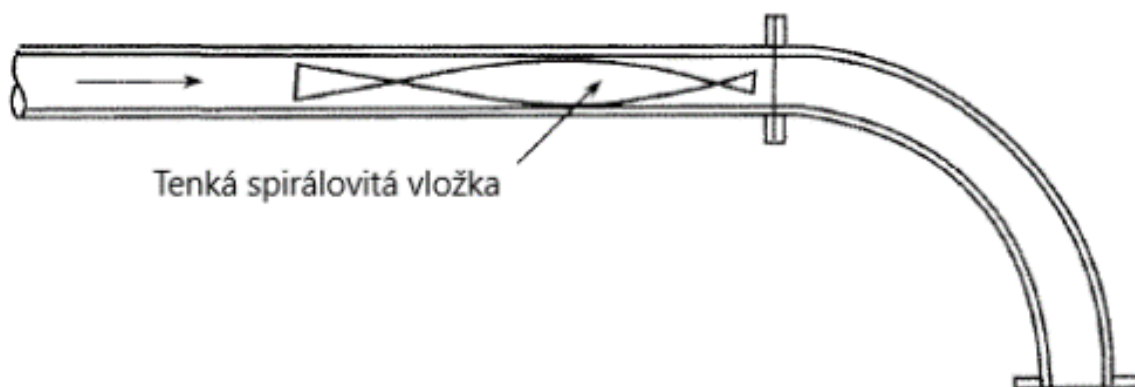
Opatřovací metody jsou jednou z nejlevnějších a zároveň nejefektivnějších metod pro potlačování eroze kolene. Nejjednodušší metodou je vyrobit koleno se zesíleným nebo vyměnitelným hřbetem (viz Obr. 6.2). Další možností je plech přivařený k zadní straně potrubí, který se naplní betonem. Pokud se stěna původního ocelového kolene poruší, beton prodlouží životnost kolene o nezanedbatelnou provozní dobu. Problém, který u této metody nastává, je že po přerušení oceli se začne materiál odrážet od betonu na vnitřní stranu kolene. To způsobí erozi kolene na kratší vnitřní straně mnohem dříve, než materiál naruší betonovou část. [6,16]



Obr. 6.2. Koleno s vyměnitelným pancéřovým hřbetem [16]

6.2.4. Využití statických směšovačů

Statické směšovače se dají využít pro redukci opotřebení tím, že se nainstalují těsně před koleno, jako je možné vidět na Obr. 6.3. Směšovač vyrobený z tenkého plechu zkrouceným o 180° navede proud směsi plynu a materiálu rovnoměrně do kolene, místo toho, aby materiál narážel pouze na jeho zadní stěnu. [6]



Obr. 6.3. Statický směšovač [6]

7. Skladování

Skladování sypkých hmot je možné realizovat dvojím způsobem:

- skladování v jednotlivých obalech (velkokapacitní pytle, sudy);
- skladování v zásobnících nebo volně ložené;

7.1. Skladování v jednotlivých obalech

Skladování v jednotlivých obalech se využije většinou tam, kde je potřeba snadná a častá manipulace s materiálem. Pro partikulární materiály se často používají velkokapacitní vaky, anglicky big-bagy (viz Obr. 7.1). Ty jsou vyráběny z polypropylenových materiálů o různém objemu, nejčastěji 500 až 2000 l. Tvar vaku je pravoúhlý kvádr se závěsnými poutky ve čtyřech rozích. Použité vaky jsou většinou z velké části recyklovatelné. Výhodou velkokapacitních vaků oproti sudům je možnost jejich složení a tím ušetření místa při skladování a přepravě.



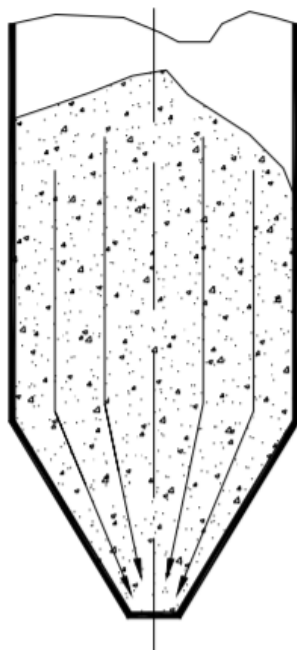
Obr. 7.1. Velkokapacitní vak [21]

7.2. Skladování v zásobnících

Další možností skladování sypkých materiálů je v silech a zásobnících. Jejich konstrukce může být buď kruhová s kuželovou výsypkou, nebo obdélníková s jehlanovou výsypkou. V zásobnících se nejčastěji vyskytují dva druhy toku materiálu – hmotový nebo jádrový. [22]

7.2.1. Hmotový tok

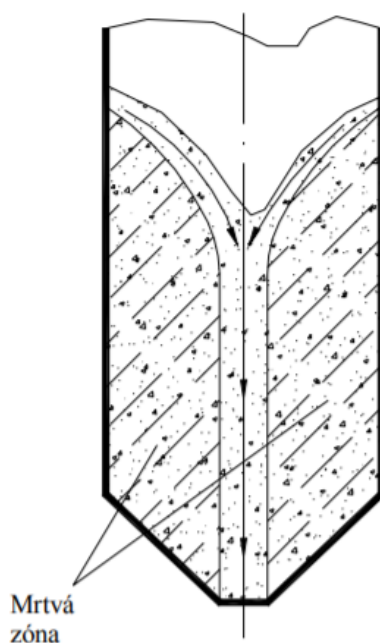
Hmotový tok je ideální pohyb sypké hmoty v zásobníku. Jednotlivé vrstvy materiálů jsou v průběhu vyprazdňování neustále rovnoběžné a odtékají v pořadí nasypávání. Po otevření výsypky se materiál uvede do pohybu a začne klouzat po stěnách (viz Obr. 7.2). [16,22]



Obr. 7.2. Hmotový tok [22]

7.2.2. Jádrový tok

Při jádrovém toku první nasypaná vrstva sypké hmoty odtéká ze zásobního sila jako poslední. Tok materiálu probíhá hlavně nad výpustným otvorem. Hmota přiléhající na stěny zůstává nehybná a tvoří nežádoucí tzv. mrtvou zónu (viz Obr. 7.3). Tato zóna se uvede do pohybu, až když se k ní přiblíží hladina. Zásobníky s tímto stylem vyprazdňování mají mnoho nevýhod. Při vysypávání může docházet k velké segregaci, k tvorbě kleneb, znehodnocení materiálu apod. [16,22]



Obr. 7.3. Jádrový tok [22]

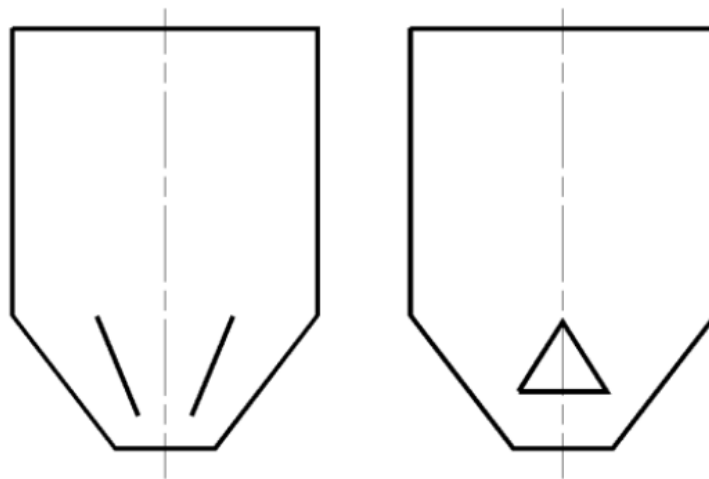
7.2.3. Tvorba vzpěrné klenby

Jeden z nejčastějších problémů, který komplikuje skladování sypkých hmot v zásobnících je vznik vzpěrné klenby. Vzpěrná klenba vzniká především v přechodové části mezi výsypkou a komorou zásobníku. Její odstraňování může být příčinou zranění obsluhy, která se snaží narušit klenbu, nebo může dojít k samovolnému uvolnění a následnému zahlcení zařízení umístěného pod výsypkou.

Z těchto důvodů je snaha eliminovat tvorbu vzpěrné klenby správnou konstrukcí zásobníku nebo jeho správným provozním režimem. U sypkých nesoudržných materiálů je hlavním důvodem vzniku vzpěrné klenby změna jeho soudružnosti na částečnou soudružnost. To je způsobeno vlivem např. vlhkosti přítomné v zásobníku. Vzpěrná klenba se tvoří převážně u výsypného otvoru zásobníku. Je způsobena tím, že se vlastní tíha sypkého materiálu přenáší do stěn výsypky a žádná síla nepůsobí na spodní vrstvy materiálu.

Pro eliminaci tvorby vzpěrné klenby a dalších nežádoucích jevů jako je např. komínování je potřeba docílit toho, aby se materiál pohyboval hmotovým tokem. Hmotový tok jde zajistit nejlépe, pokud je úhel vnějšího tření co nejmenší a současně s ním je co nejmenší úhel sklonu výsypky. Proto je vhodné navrhovat zásobníky se strmými a hladkými stěnami výsypek, díky kterým jde zajistit hmotový tok.

Pokud byl zásobník špatně navrhnut a je u něj vysoké riziko vzniku vzpěrné klenby, je možné instalovat zařízení podporující tok materiálu. Tyto zařízení mohou ovlivňovat tok materiálu buď pasivně nebo aktivně. Pasivní prvky mají vliv na potencionální energii materiálu, čímž ovlivňují plynulost a bezpečnost toku. Do pasivních prvků patří např. vnořená výsypka nebo rozrážecí prvky, které je možné vidět na Obr. 7.4. Aktivní prvky přenášejí energii do zásobníku zvenčí, čímž zvyšují potencionální energii na energii kinetickou, která podporuje tok materiálu. Tyto prvky mohou být vibrační, pneumatické nebo mechanické. [16,18,22]



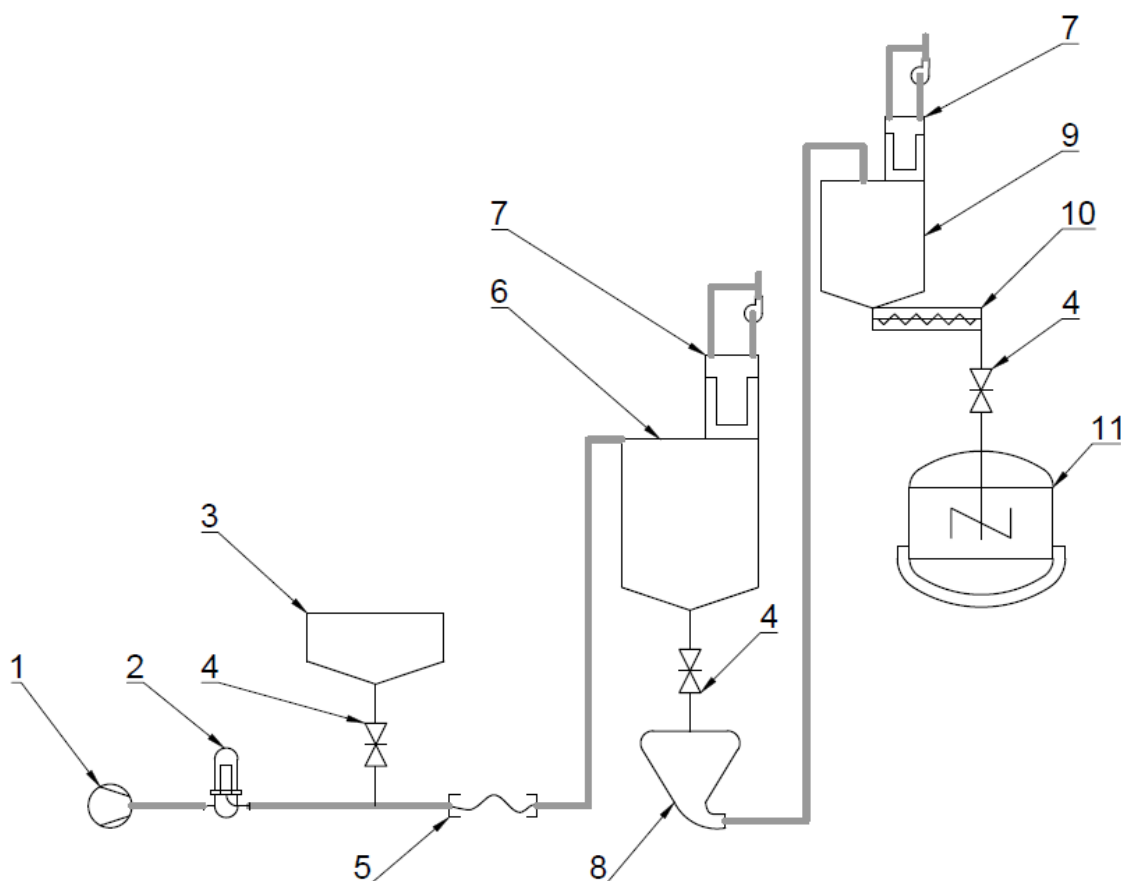
Obr. 7.4. Pasivní prvky (vnořená výsypka – vlevo, rozrážecí kužel – vpravo) [16]

8. Návrh pneumatické dopravy práškového materiálu

8.1. Specifikace linky

Vymezení řešené části:

- počáteční bod: přípojné místo ke kamionu;
- koncový bod: vstup přepravovaného materiálu do míchaného tanku;



Obr. 8.1. Schéma pneumatické dopravy

Schéma navržené pneumatické dopravy je možné vidět na Obr. 8.1. Vzduch stlačený **zdrojem stlačeného vzduchu (1)** prochází **sušičkou vzduchu (2)**. Za ním je do vysušeného vzduchu proudícího trubkou podávaná sůl přes **šoupátkový uzávěr (4)** z **výsypek instalovaných na kamionu (3)**. Trubka umístěná pod kamionem je řídicím napojena na potrubí vedoucí do **velkokapacitního sila (6)** pomocí **ohebné hadice (5)**. Sůl je následně pomocí stlačeného vzduchu dopravována do **velkokapacitního sila (6)**, odkud odchází vzduch obsahující částice soli **látkovým filtrem (7)** do atmosféry. Sůl je ze sila dávkována do potrubí vedoucího do **denního zásobníku (9)** pomocí **komorového podavače (8)**, který zároveň dopravuje materiál do **denního zásobníku (9)**. Vzduch odchází z **denního zásobníku (9)** **látkovým filtrem (7)** do atmosféry. Z **denního zásobníku (9)** je sůl přepravovaná **šnekovým dopravníkem (10)** do **míchané rozpouštěcí nádoby (11)**.

8.2. Funkční návrh linky

Návrh linky byl proveden pro pneumatickou dopravu soli na výrobu detergentu o výkonu 0,5 tuny v dávce, s předpokládaným objemem výroby 10 dávek za hodinu. Denní směna je 8 hodin.

Množství soli v dávce:

$$m_d = 0,5 \text{ t/dávka} = 500 \text{ kg/dávka} \quad (8.2-1)$$

Hmotnostní průtok soli za hodinu:

$$\dot{m}_s = m_s \cdot n_d = 500 \cdot 10 = 5000 \text{ kg/hod} \quad (8.2-2)$$

Spotřeba soli denně:

$$\dot{m}_{sd} = \dot{m}_s \cdot t_s = 5000 \cdot 8 = 40\,000 \text{ kg/den} \quad (8.2-3)$$

8.3. Vlastnosti dopravovaného materiálu

Předpokládá se doprava technické soli, u které dodavatel deklaruje následující frakční složení, které je možné vidět v Tabulce 8.1 (viz Příloha 1).

Tabulka 8.1. Dpravovaný materiál – distribuce velikosti částic (Příloha 1)

Velikost částic [mm]	Procentuální zastoupení [%]
<0,125	<8
0,125 – 1	>91
1 – 1,7	<1

Hustota krystalu soli [23]:

$$\rho_p = 2140 \text{ kg/m}^3$$

Sypná hustota soli (Příloha 1):

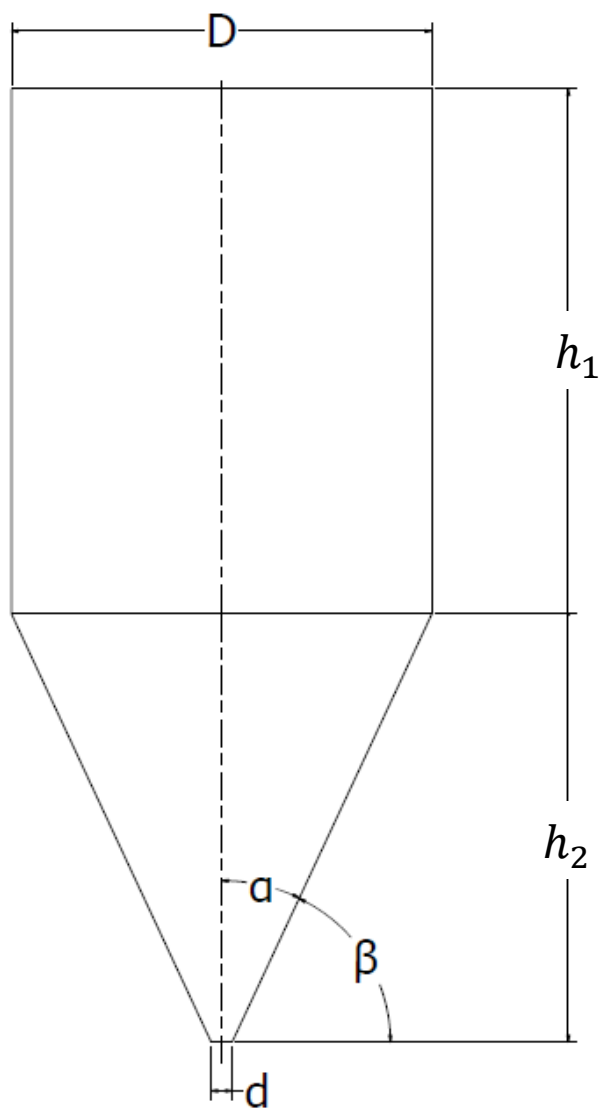
$$\rho_s = 1250 \text{ kg/m}^3$$

Sypný úhel soli [24]:

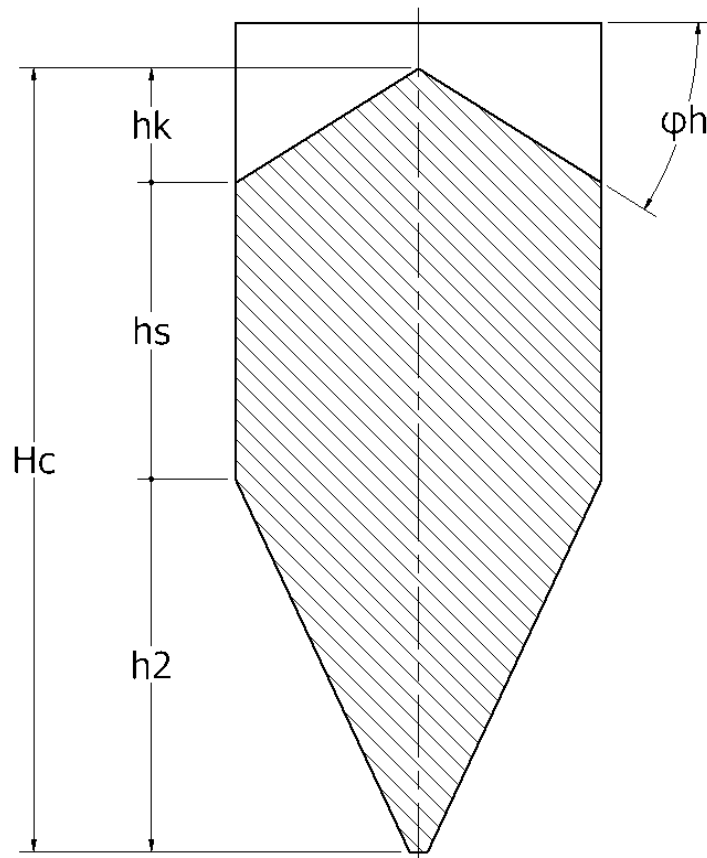
$$\varphi_h = 32^\circ$$

8.4. Návrh velkokapacitního sila

Kapacitu velkokapacitního sila (6) pro sůl volím na 2 provozní dny.



Obr. 8.2. Schéma sila/zásobníku



Obr. 8.3. Schéma soli v zásobníku/sile

Výpočet základních rozměrů sila (viz Obr. 8.2) a soli (viz Obr. 8.3.) probíhá iteračně. Parametr, který je nutno zvolit před samotnými výpočty, je průměr sila D_S . Nejprve jsem provedl prvotní odhad, který jsem dosazoval do níže uvedených návrhových vztahů, dokud nebylo silo vyhovující s ohledem na zastavěnou plochu a výšku. Jako nejvhodnější průměr sila vyšel rozměr:

$$D_S = 4 \text{ m}$$

8.4.1. Výpočtové vztahy pro návrh sila

Kapacita sila na 2 dny:

$$m_S = \dot{m}_{sd} \cdot t \quad (8.4-1)$$

Objem soli:

$$V_s = \frac{m_S}{\rho_s} \quad (8.4-2)$$

Doporučený úhel sklonu kuželové výsypky musí splnit následující podmínku [18]:

$$\beta > \varphi_h + (5 \div 10)^\circ \quad (8.4-3)$$

Zároveň jsem s ohledem na bezpečnost a snahu dosáhnout hmotového toku zvolil úhel sklonu kuželové výsypky dle Dušátka [25], který doporučuje úhel kuželové výsypky v rozmezí:

$$\alpha = 15 \div 25^\circ \quad (8.4-4)$$

Výpočet pro minimální rozměr strany čtvercového výpustného otvoru uvádí Medek [16]:
(Jako průměr zrna jsem zvolil v rámci bezpečnosti maximální průměr zrna.)

$$a_{\xi} = k_1(x_{MAX} + 80)tg \varphi_h \quad (8.4-5)$$

Průřez čtvercového výpustného otvoru [16]:

$$A_{\xi} = a_{\xi}^2 \quad (8.4-6)$$

Průřez kruhového výpustného otvoru [16]:

$$A_d = 0,85 \cdot A_{\xi} \quad (8.4-7)$$

Průměr kruhového výpustného otvoru:

$$d = \sqrt{\frac{4A_d}{\pi}} \quad (8.4-8)$$

Výška výsyvky:

$$tg \alpha = \frac{\frac{D}{2} - \frac{d}{2}}{h_2} \rightarrow h_2 = \frac{\frac{D}{2} - \frac{d}{2}}{tg \alpha} \quad (8.4-9)$$

Objem kuželové výsyvky:

$$V_v = \frac{1}{3}\pi h_2 \left(\frac{D^2}{4} + \frac{Dd}{4} + \frac{d^2}{4} \right) \quad (8.4-10)$$

Výška sypného kužele:

$$tg \varphi_h = \frac{h_k}{\frac{D}{2}} \rightarrow h_k = \frac{D}{2} tg \varphi_h \quad (8.4-11)$$

Objem sypného kužele soli:

$$V_k = \frac{1}{3}\pi D^2 h_k \quad (8.4-12)$$

Objem soli bez sypného kužele a kuželové výsyvky:

$$V_{SS} = V_s - V_k - V_v \quad (8.4-13)$$

Výška soli v komoře bez sypného kužele:

$$h_s = \frac{4 \cdot V_{SS}}{\pi \cdot D^2} \quad (8.4-14)$$

Celková výška soli:

$$H_s = h_k + h_s + h_2 \quad (8.4-15)$$

8.4.2. Výsledky pro návrh sila

Pomocí vzorců uvedených výše a vstupních parametrů v Tabulce 8.2, jsem vypočetl základní rozměry sila, které jsou uvedeny na Obr. 8.2. Vypočtené parametry pro návrh sila jsou uvedené v Tabulce 8.3.

Tabulka 8.2. Návrh sila – vstupní parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Spotřeba soli denně	\dot{m}_{sd}	40 000	kg/den
Sypný úhel soli	φ_h	32	°
Bezpečnostní součinitel [16]	k_1	2,6	-
Maximální průměr zrna	x_{MAX}	1,7	mm

Tabulka 8.3. Návrh sila – vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Hmotnost soli v silu	m_{sS}	80 000	kg
Objem soli v silu	V_{sS}	64	m^3
Úhel sklonu kuželové výsypky sila	α_S	25	°
Průměr sila	D_S	4,00	m
Vypočtený minimální průměr výstupního otvoru sila	d_S	0,18	m
Zvolený průměr výstupního otvoru sila	d_{zS}	0,20	m
Vypočtená výška kuželové výsypky sila	h_{2S}	4,07	m
Objem kuželové výsypky sila	V_{vS}	17,96	m^3
Výška sypného kužele soli	h_{kS}	1,25	m
Objem sypného kužele soli v silu	V_{kS}	5,25	m^3
Objem soli bez sypného kužele a kuželové výsypky sila	V_{sSS}	40,78	m^3
Vypočtená výška soli bez kužele a kuželové výsypky sila	h_{sS}	3,25	m
Celková výška soli v silu	H_{sS}	8,57	m
Zvolená celková výška sila	H_{cS}	9,00	m
Výška komory	h_{1S}	4,93	m

Celková výška soli v silu vyšla 8,57 m. Po zvážení potřebné rezervy pro uskladnění soli jsem celkovou výšku sila zvolil 9 m.

8.5. Návrh denního zásobníku

Denní zásobník bude průběžně doplňován ze sila pomocí pneumatické dopravy. Kapacitu soli potřebnou v denním zásobníku volím 8 m^3 . Kapacita zásobníku je navržena tak, aby bylo možné průběžné naplňování a vyprazdňování během dne s dostatečnou rezervou. Čím by byl zásobník větší, sůl by byla potřeba dopravovat v delších intervalech ale za cenu větší zastavěné plochy zásobníku. Výpočtové vztahy a postup výpočtu jsou stejné jako pro návrh sila v kapitole 8.4.1.

Tabulka 8.4. Návrh denního zásobníku – vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Objem soli v zásobníku	V_{sZ}	8	m^3
Úhel sklonu kuželové výsypky zásobníku	α_Z	25	$^\circ$
Průměr zásobníku	D_Z	2,00	m
Vypočtený minimální průměr výstupního otvoru zásobníku	d_Z	0,18	m
Zvolený průměr výstupního otvoru zásobníku	d_{zZ}	0,20	m
Výška kuželové výsypky zásobníku	h_{zZ}	1,93	m
Objem kuželové výsypky zásobníku	V_{vZ}	2,24	m^3
Výška sypného kužele soli	h_{kZ}	0,62	m
Objem sypného kužele soli zásobníku	V_{kZ}	0,65	m^3
Objem soli bez sypného kužele a kuželové výsypky zásobníku	V_{sZ}	5,10	m^3
Vypočtená výška soli bez kužele a kuželové výsypky v zásobníku	h_{sZ}	1,62	m
Celková výška soli v zásobníku	H_{sZ}	4,18	m
Zvolená celková výška zásobníku	H_{cZ}	4,50	m
Výška komory zásobníku	h_{1Z}	2,57	m

Celková výška soli v zásobníku vyšla $4,18 \text{ m}$. Po zvážení potřebné rezervy k uskladnění soli jsem výšku denního zásobníku zvolil $4,5 \text{ m}$.

Jak na denní zásobník, tak na velkokapacitní silo je potřeba umístit explozní membránu (viz kapitola 2.3.5), jelikož v obou případech nastává při plnění riziko vzniku výbušné atmosféry.

8.6. Návrh dopravy materiálu do velkokapacitního sila

8.6.1. Vykládání kamionu do sila

Předpokládám, že materiál je do továrny dopravován pomocí nákladních kamionů. Další předpoklady, které jsem v tomto případě učinil, byly založeny na poznacích dle Cabre Jose a spol. [11] a Schwartze [26]. První předpoklad je, že kamiony pro dopravu soli mají kapacitu $m_k = 25 \text{ tun}$. Odpovídající hodnoty této kapacity kamionu je možné najít i u dodavatelů průmyslové soli jako např. firma Solsan, a.s [27]. Dále je možné se v těchto zdrojích dočíst, že celkový čas na vyložení jednoho kamionu je cca 1 až 2 hodiny [11] [26]. Vykládací čas tedy volím jednu hodinu.

Zvolená kapacita kamionu

$$m_k = 25 \text{ tun} = 25\,000 \text{ kg}$$

Zvolený vykládací čas kamionu

$$t_u = 1 \text{ hod}$$

Počet kamionů potřebný pro naplnění sila

$$n_k = \frac{m_S}{m_k} = \frac{80\,000}{25\,000} = 3,2 \text{ kamionu} \quad (8.6-1)$$

Z tohoto výpočtu je patrné, že pokud bude silo doplňováno průběžně každý den, je zapotřebí každý den 1 kamion a jednou za 5 dní 2 kamiony.

Předpokládám, že kamion bude možné zaparkovat poblíž sila. Maximální horizontální vzdálenost potrubí od kamionu k silu bude $L_H = 15 \text{ m}$. Potřebnou horizontální výšku potrubí volím $L_V = 20 \text{ m}$ vzhledem k výšce sila z kapitoly 8.4.2, pod kterým bude ještě komorový podavač a potrubí (viz Obr. 8.1). Počet kolen potřebných v potrubní trase volím s ohledem na zvolenou trajektorii $n_b = 4$.

Pro přepravu materiálu jsem zvolil nízkotlakou dopravu materiálu ve vznosu, jelikož je dopravovaná vzdálenost od kamionu k silu natolik malá, že by se instalace samostatného vysokotlakého systému nevyplatila. Dále z tohoto důvodu, že kamiony rozvázející sypké materiály mají většinou vlastní zdroj stlačeného vzduchu. Jako příklad mohu uvést firmu HR Blowers UK Ltd [28], která je dodavatelem zdrojů stlačeného vzduchu připevněných přímo na kamionu. Tyto zdroje pracují s tlaky a objemovými průtoky vzduchu určenými k dopravě materiálu ve vznosu. Jako další důvod, proč je pro tento úkon vhodná doprava materiálu ve vznosu, je malý počet kolen v potrubním systému. Nebude tedy docházet k takovému abrazivnímu opotřebení, jako při dopravě po složitějších trajektoriích.

Jelikož je materiál dopravován pomocí dopravy materiálu ve vznosu, bude nutné kolena opatřit některými ze způsobů ochrany vůči abrazivnímu opotřebení, které jsou uvedeny v kapitole 6. K abrazivnímu opotřebení bude docházet zejména kvůli abrazivním vlastnostem dopravovaného materiálu a vysoké rychlosti, kterou je potřeba v dopravě materiálu z kamionu do sila vyvinout.

8.6.2. Návrh dopravy materiálu ve vznosu

Pro dopravu materiálu do velkokapacitního sila jsem zvolil dopravu materiálu ve vznosu. Návrh pneumatické dopravy materiálu ve vznosu je proveden podle následujících vztahů dle Rhodese [29].

Tento výpočet probíhá iteračně. Nejdříve je potřeba provést prvotní odhad vnitřního rozměru trubky ID , který se bude dosazovat do výpočtů. Po dokončení výpočtu je nutné zkontrolovat výsledky s ohledem na dostupný zdroj dopravního plynu nebo abrazivní vlastnosti materiálu, a popřípadě změnit rozměr trubky a znovu přepočítat hodnoty. Veškerou změnu teploty vzduchu při průchodu potrubím zanedbávám a uvažuji, že jeho teplota je 20°C .

Pro prvotní odhad jsem zvolil trubku dle normy *ANSI/ASME B36.19* o normovaném průměru $DN\ 125$, která má vnitřní průměr $ID = 128,2\ \text{mm}$. Po dosazení několika objemových průtoků vzduchu do výpočtu jsem došel k závěru, že je potřeba zvýšit vnitřní průměr trubky, jelikož při ponechání stávající trubky přesahovala rychlost plynu vždy $35\ \text{m/s}$, což jsem považoval vzhledem k abrazivním vlastnostem dopravovaného materiálu za nevyhovující. Z tohoto důvodu jsem zvolil trubku $DN\ 150$, která má vnitřní průměr $ID = 154,08\ \text{mm}$. Tomuto průměru odpovídá objemový průtok vzduchu $\dot{V}_g = 1960\ \text{m}^3/\text{hod}$ a rychlost plynu $U = 29,2\ \text{m/s}$.

Vstupní parametry jsou uvedeny v Tabulce 8.5.

Pro prvotní výpočet, pro který neznám ještě rychlost vzduchu v trubce U , odhadnu tuto rychlost pomocí saltační rychlosti. Pro dopravu materiálu ve vznosu musí být rychlost plynu vyšší, než je saltační rychlost. Rhodes [29] doporučuje volit rychlost plynu $1,5$ krát vyšší než saltační rychlost.

$$U = 1,5 \cdot U_{SALT} \quad (8.6-2)$$

Saltační rychlost U_{SALT} se vypočte dle vztahu:

$$U_{SALT} = \left[\frac{4G10^{\kappa} g^{\delta} ID^{\left(\frac{\delta}{2}-2\right)}}{\pi\rho_f} \right]^{\frac{1}{\delta+1}} \quad (8.6-3)$$

Parametr κ v rovnici (8.6-3):

$$\kappa = 1440x + 1,96 \quad (8.6-4)$$

Parametr δ v rovnici (8.6-3):

$$\delta = 1100x + 2,5 \quad (8.6-5)$$

Při zpětném dosazení, kdy již znám objemový průtok vzduchu \dot{V}_f , vypočítám rychlost plynu v trubce pomocí rovnice (8.6-6) a zkontroluji, zda stále platí $U_{SALT} < U$:

$$U = \frac{\dot{V}_f}{\frac{\pi ID^2}{4}} \quad (8.6-6)$$

Tabulka 8.5. Doprava do sila – vstupní parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Hmotnostní průtok soli	\dot{m}_p	25000	kg/hod
Tíhové zrychlení	g	9,81	m/s ²
Průměrná velikost zrna	x	0,58	mm
Hustota vzduchu	ρ_f	1,2	kg/m ³
Hustota částice	ρ_p	2140	kg/m ³
Sypná hustota materiálu	ρ_s	1250	kg/m ³
Dynamická viskozita vzduchu	η	0,0000184	Pa. s
Horizontální délka potrubí	L_H	15	m
Vertikální délka potrubí	L_V	20	m
Počet kolen	n_b	4	-
Objemový průtok vzduchu	\dot{V}_f	1960	m ³ /hod

Tabulka 8.6. Doprava do sila – vypočtené rychlosti

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Saltační rychlost	U_{SALT}	22,16	m/s
Parametr κ	κ	2,79	-
parametr δ	δ	3,13	-
Rychlost vzduchu	U	29,20	m/s

Horizontální část potrubí

Celkovou tlakovou ztrátu potrubí je možné vyjádřit jako:

$$p_1 - p_2 = \underbrace{\frac{1}{2} \varepsilon \rho_f U_{fH}^2}_{(1)} + \underbrace{\frac{1}{2} \rho_p (1 - \varepsilon_H) U^2}_{(2)} + \underbrace{F_{fw} L}_{(3)} + \underbrace{F_{pw} L}_{(4)} + \underbrace{\rho_p L (1 - \varepsilon) g \sin \theta}_{(5)} + \underbrace{\rho_f L \varepsilon g \sin \theta}_{(6)} \quad (8.6-7)$$

Z této rovnice je možné vidět, že celkový tlakový spád je ovlivněn několika faktory:

- (1) Tlaková ztráta způsobena zrychlením plynu;
- (2) Tlaková ztráta způsobena zrychlením materiálu;
- (3) Tlaková ztráta způsobena třením plynu s potrubím;
- (4) Tlaková ztráta způsobena třením materiálu s potrubím;
- (5) Tlaková ztráta způsobena tíhovou silou materiálu;
- (6) Tlaková ztráta způsobena tíhovou silou plynu;

Beru v úvahu, že původní akcelerace plynu a materiálu začíná v horizontální části (viz Obr. 8.1). Díky tomu jsou členy rovnice (1) a (2) nenulové. Pro horizontální potrubí platí, že členy (5) a (6) jsou nulové, jelikož $\sin \theta = 0$. Tím dostaneme:

$$\Delta p_H = \frac{\rho_f \varepsilon_H U_{fH}^2}{2} + \frac{\rho_p (1 - \varepsilon_H) U^2}{2} + \frac{2 f_g \rho_f U^2 L_H}{D} + \frac{2 f_p \rho_p (1 - \varepsilon_H) U_{pH}^2 L_H}{D} \quad (8.6-8)$$

Kde index H vyjadřuje, že se jedná pouze o horizontální sekci potrubí.

Pro výpočet rychlosti materiálu U_{pH} se nabízí několikero korelací, které jsou v literatuře uvedeny. Všechny tyto korelace jsou shrnuty v článku od Weie [30]. Většina z těchto korelací je spolehlivá pouze za určitých podmínek.

Hinkleova korelace [31], použitá v ukázkovém příkladu Rhodesem [29], korelace nevyhovuje z hlediska hustoty materiálu jelikož: $1048 \text{ kg/m}^3 < \rho_p < 1808 \text{ kg/m}^3$.

$$U_{pH} = U(1 - 0,0638x^{0,3}\rho_p^{0,5}) \quad (8.6-9)$$

Arastoopour a spol. korelace [32] má stejné podmínky jako Hinkle:

$$U_{pH} = U(1 - 0,044x^{0,3}\rho_p^{0,5}) \quad (8.6-10)$$

IGT korelace [33] (bez uvedených podmínek):

$$U_{pH} = U(1 - 0,68x^{0,92}\rho_p^{0,5}\rho_f^{-0,2}ID^{-0,54}) \quad (8.6-11)$$

Klinzingova korelace [34]. nevyhovuje z hlediska hustoty materiálu jelikož: $2395 \text{ kg/m}^3 < \rho_p < 5004 \text{ kg/m}^3$.

$$U_{pH} = (U - U_t^{0,71})ID^{0,019} \quad (8.6-12)$$

Hongova korelace [35] nevyhovuje, jelikož je určena pro vysoké hodnoty směšovacího poměru.

$$U_{pH} = U \left(1 - 0,533 \left(\frac{1000\rho_f}{\rho_p} \right)^{1,093} \left(\frac{ID}{100x} \right)^{-0,721} \right) \quad (8.6-13)$$

I přesto, že některé tyto korelace nevyhovují podmínkám tohoto příkladu, vypočetl jsem podle každé z nich rychlost materiálu v potrubí.

Tabulka 8.7. Návrh dopravy materiálu ve vlnosku – odhad rychlosti částice

KORELACE	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
HINKLE	U_{pH}	20,01	m/s
ARASTOOPOUR	U_{pH}	22,86	m/s
IGT	U_{pH}	27,86	m/s
KLINZING	U_{pH}	24,36	m/s
HONG	U_{pH}	25,14	m/s

Jak je možné vidět z Tabulky 8.7, hodnota rychlosti dle Hinkleovy korelace vychází jednoznačně nejmenší. Jelikož s menší rychlostí materiálu stoupá tlaková ztráta, zůstávám na straně bezpečnosti a výpočet provedu dle Hinkleho korelace (viz rovnice (8.6-9)).

Hustota hmotového toku materiálu:

$$G = \rho_p(1 - \varepsilon_H)U_{pH} = \dot{m}_p/A_{ID} \quad (8.6-14)$$

Z hustoty hmotového toku se následně vypočte porozita vrstvy materiálu a intersticiální rychlost plynu v horizontální trubce:

$$\varepsilon_H = 1 - \frac{G}{\rho_p U_{pH}} \quad (8.6-15)$$

$$U_{fH} = \frac{U}{\varepsilon_H} \quad (8.6-16)$$

Reynoldsovo číslo částice v horizontální sekci:

$$Re_{pH} = \frac{\rho_f (U_{fH} - U_{pH}) x}{\eta} \quad (8.6-17)$$

Součinitel odporu C_D se vypočte dle hodnoty Reynoldsova čísla částice vypočteného dle rovnice (8.6-17) dle vztahů v rovnicích (8.6-18) až (8.6-20):

$$Re_p < 1 \rightarrow C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (8.6-18)$$

$$1 < Re_p < 500 \rightarrow C_D = 18,5 Re_p^{-0,6} \quad (8.6-19)$$

$$500 < Re_p < 2 \cdot 10^5 \rightarrow C_D = 0,44 \quad (8.6-20)$$

Hinkleova rovnice [31] pro třecí součinitel (Fanningův) mezi částicemi a trubkou:

$$f_p = \frac{3 \rho_f ID}{8 \rho_p x} C_D \left(\frac{U_f - U_p}{U_p} \right)^2 \quad (8.6-21)$$

Třecí součinitel (Fanningův) plynu:

$$f_g = 0,079 \cdot Re^{-0,25} \quad (8.6-22)$$

Reynoldsovo číslo pro proudění v trubce:

$$Re = \frac{U \rho_f ID}{\eta} \quad (8.6-23)$$

Tlaková ztráta způsobená zrychlením plynu:

$$\Delta p_{afH} = \frac{\rho_f \varepsilon_H U_{fH}^2}{2} \quad (8.6-24)$$

Tlaková ztráta způsobená zrychlením materiálu:

$$\Delta p_{apH} = \frac{\rho_p (1 - \varepsilon_H) U_{pH}^2}{2} \quad (8.6-25)$$

Tlaková ztráta způsobená třením plynu:

$$\Delta p_{ffH} = \frac{2 f_g \rho_f U^2 L_H}{ID} \quad (8.6-26)$$

Tlaková ztráta způsobená třením materiálu:

$$\Delta p_{fpH} = \frac{2f_p \rho_p (1 - \varepsilon_H) U_{pH}^2}{ID} \quad (8.6-27)$$

Celková tlaková ztráta v horizontální sekci:

$$\Delta p_H = \Delta p_{afH} + \Delta p_{apH} + \Delta p_{ffH} + \Delta p_{fpH} \quad (8.6-28)$$

Tabulka 8.8. Doprava do sila – horizontální sekce potrubí – vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Skutečná rychlost materiálu	U_{pH}	20,01	m/s
Hustota hmotového toku materiálu	G	372,44	kg/(m ² .s)
Porozita vrstvy materiálu	ε_H	0,99	-
Intersticiální rychlost	U_{fH}	29,46	m/s
Reynoldsovo číslo – samotná částice	Re_p	354	-
Parametr $C_D Re^2$	$C_D Re^2$	18 851	-
Součinitel odporu	C_D	0,547	-
Třecí faktor materiálu	f_p	0,0069	-
Třecí faktor plynu	f_g	0,0034	-
Reynoldsovo číslo plynu	Re	293 414	-
Tlaková ztráta způsobená zrychlením plynu	Δp_{afH}	516	Pa
Tlaková ztráta způsobená zrychlením materiálu	Δp_{apH}	3 726	Pa
Tlaková ztráta způsobená třením plynu	Δp_{ffH}	676	Pa
Tlaková ztráta způsobená třením materiálu	Δp_{fpH}	9 958	Pa
Celková tlaková ztráta – horizontální část	Δp_H	14 876	Pa

Vertikální část potrubí

Pro tlakovou ztrátu ve vertikální sekci jsou členy rovnice (1) a (2) nulové, jelikož jsem určil, že iniciační akcelerace plynu a materiálu bude v horizontální sekci. Pro člen (4) je použita modifikovaná Konno Saitova korelace. Pro vertikální potrubí platí $\theta = 90^\circ$ ve členech (5) a (6).

$$\Delta p_v = 2 \frac{f_g \rho_f U^2 L_V}{ID} + 0,057 G L_V \sqrt{\frac{g}{ID}} + \rho_p (1 - \varepsilon_V) g L_V + \rho_f \varepsilon_V g L_V \quad (8.6-29)$$

Rychlost částice ve vertikální části:

$$U_{pV} = \frac{U}{\varepsilon_V} - U_T \quad (8.6-30)$$

Součinitel C_D potřebný pro výpočet usazovací rychlosti částice dle (8.6-32) se vypočte dle vztahů (8.6-18) až (8.6-20). Oblast se určí pomocí parametru $C_D Re^2$ [36]:

$$C_D Re^2 = \frac{4 x^3 (\rho_p - \rho_f) \rho_f g}{3 \eta^2} \quad (8.6-31)$$

Pro oblast Stokesovu ($Re < 2, C_D = 24/Re$) platí: $C_D Re^2 < 48$

Pro oblast přechodovou platí: $48 < C_D Re^2 < 1,1 \cdot 10^5$

Pro oblast Newtonovu ($500 < Re < 3 \cdot 10^5, C_D = 0,44$) platí: $1,1 \cdot 10^5 < C_D Re^2 < 4 \cdot 10^5$ [36]

Po určení oblasti již můžeme vypočítat usazovací rychlost:

Usazovací rychlost částice pro Stokesovu oblast [36]:

$$U_T = \frac{x^2(\rho_p - \rho_f)g}{18\eta} \quad (8.6-32)$$

Usazovací rychlost částice pro přechodovou oblast [36]:

$$U_T = 0,153 \frac{x^{1,14}(\rho_p - \rho_f)^{0,71} g^{0,71}}{\rho_f^{0,29} \eta^{0,43}} \quad (8.6-33)$$

Usazovací rychlost částice pro Newtonovu oblast [36]:

$$U_T = 1,74 \sqrt{\frac{x(\rho_p - \rho_f)g}{\rho_f}} \quad (8.6-34)$$

Hustota hmotového toku materiálu:

$$G = \rho_p(1 - \varepsilon_V)U_{pV} \quad (8.6-35)$$

Kombinací rovnic (8.6-30) a (8.6-35) dostaneme kvadratickou rovnici, ze které vyjde pouze jeden reálný kořen pro porozitu materiálu ve vertikální sekci:

$$\varepsilon_V^2 U_T - \left[U_T + U + \frac{G}{\rho_p} \right] \varepsilon_V + U = 0 \quad (8.6-36)$$

Tlaková ztráta způsobená třením plynu:

$$\Delta p_{ffV} = \frac{2f_g \rho_f U^2 L_V}{ID} \quad (8.6-37)$$

Tlaková ztráta způsobená třením materiálu:

$$\Delta p_{fpV} = 0,057 \cdot GL_V \sqrt{\frac{g}{ID}} \quad (8.6-38)$$

Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou materiálu:

$$\Delta p_{gpV} = \rho_p(1 - \varepsilon_V)gL_V \quad (8.6-39)$$

Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou plynu:

$$\Delta p_{gfV} = \rho_f \varepsilon_V g L_V \quad (8.6-40)$$

Celková ztráta ve vertikální sekci potrubí:

$$\Delta p_V = \Delta p_{ffV} + \Delta p_{fpV} + \Delta p_{gpV} + \Delta p_{gfV} \quad (8.6-41)$$

Tabulka 8.9. Doprava do sila – vertikální sekce potrubí – vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Usazovací rychlost částice	U_T	3,74	m/s
Porozita vrstvy materiálu	ε_V	0,99	-
Tlaková ztráta způsobená třením plynu	Δp_{afV}	902	Pa
Tlaková ztráta způsobená třením materiálu	Δp_{apV}	3 388	Pa
Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou materiálu	Δp_{gfV}	2 847	Pa
Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou plynu	Δp_{gpV}	234	Pa
Celková tlaková ztráta – vertikální část	Δp_V	7 371	Pa

Kolena

Tlakovou ztrátu v každém 90° kolenu volím dle Rhodese [29] jako ekvivalent tlakové ztráty na 7,5 m vertikální trubky.

Tlaková ztráta na 1 m délky vertikálního potrubí:

$$\Delta p_{1pV} = \frac{\Delta p_V}{L} \quad (8.6-42)$$

Tlaková ztráta n_b kolen v potrubním systému:

$$\Delta p_b = 7,5 \cdot \Delta p_{1pV} \cdot n_b \quad (8.6-43)$$

Ohebná hadice

Předpokládám, že je kamion připojen k potrubí vedoucího do velkokapacitního sila ohebnou hadicí o délce 2 m. Hall [37] ve své práci píše, že se tlaková ztráta ohebné hadice může určit stejně jako u kolen v předchozím případě. Použije se ekvivalentní délky vertikální trubky, která je dle Halla [37] pro ohebné hadice $4 \cdot \Delta p_{1pV}$.

$$\Delta p_{oh} = 4 \cdot \Delta p_{1pV} \cdot L_{oh} \quad (8.6-44)$$

Celková tlaková ztráta potrubního systému:

$$\Delta p_d = \Delta p_H + \Delta p_b + \Delta p_V + \Delta p_{oh} \quad (8.6-45)$$

Tabulka 8.10. Doprava do sila – celková ztráta potrubního systému – vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Tlaková ztráta na metr vertikální trubky	Δp_{1pV}	369	Pa
Tlaková ztráta kolen v potrubním systému	Δp_b	11 056	Pa
Tlaková ztráta v ohebné hadici	Δp_{oh}	2 948	Pa
Celková tlaková ztráta – horizontální část	Δp_H	14 876	Pa
Celková tlaková ztráta – vertikální část	Δp_V	7 371	Pa
Celková tlaková ztráta potrubního systému	Δp_d	36 251	Pa

Celková tlaková ztráta potrubního systému vyšla $\Delta p_d = 36,2 \text{ kPa} = 0,362 \text{ bar}$. Dále jsem dopočítal objemový průtok vzduchu a směšovací poměr (viz Tabulka 8.11) a ověřil, zda je dmychadlo HRBV613 (Příloha 2) o objemovém průtoku $\dot{V}_g = 1960 \text{ m}^3/\text{hod}$ vyhovující. Jak je možné vidět v Příloze 2 tento kompresor dokáže pokrýt tlakovou ztrátu až $\Delta p_d = 0,5 \text{ bar}$, tudíž vyhovuje požadavkům, potřebným pro dopravu materiálu z kamionu do velkokapacitního sila s rezervami na tlakovou ztrátu cyklónu, filtru a sušiče vzduchu.

Rychlost plynu je vyšší než saltační rychlost, tj. je splněna podmínka pro dopravu materiálu vzosem. Poměr rychlosti plynu a saltační rychlosti je cca 1,32, což je stále dostačující pro dopravu materiálu ve vzosu. Nejdůležitější parametry tohoto dopravního systému je možné vidět v Tabulce 8.11.

Směšovací poměr:

$$\mu = \frac{\dot{m}_p}{\rho_f \dot{V}_f} \quad (8.6-46)$$

Tabulka 8.11. Doprava do sila – vybrané vypočtené parametry

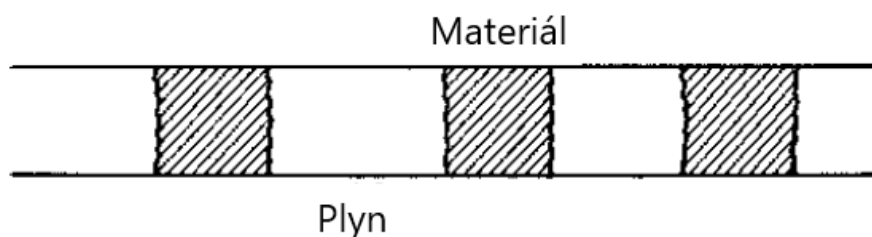
VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Tlaková ztráta kolen v potrubním systému	Δp_b	11 056	Pa
Tlaková ztráta v ohebné hadici	Δp_{oh}	2 948	Pa
Celková tlaková ztráta v horizontální sekci	Δp_H	14 876	Pa
Celková ztráta ve vertikální sekci potrubí	Δp_V	7 371	Pa
Celková tlaková ztráta potrubního systému	Δp_d	36 251	Pa
Průměr trubky	ID	154,08	mm
Objemový průtok vzduchu	\dot{V}_f	1 960	m^3/hod
Směšovací poměr	μ	10,63	-
Rychlost vzduchu	U	29,20	m/s

8.7. Návrh dopravy ze sila do denního zásobníku

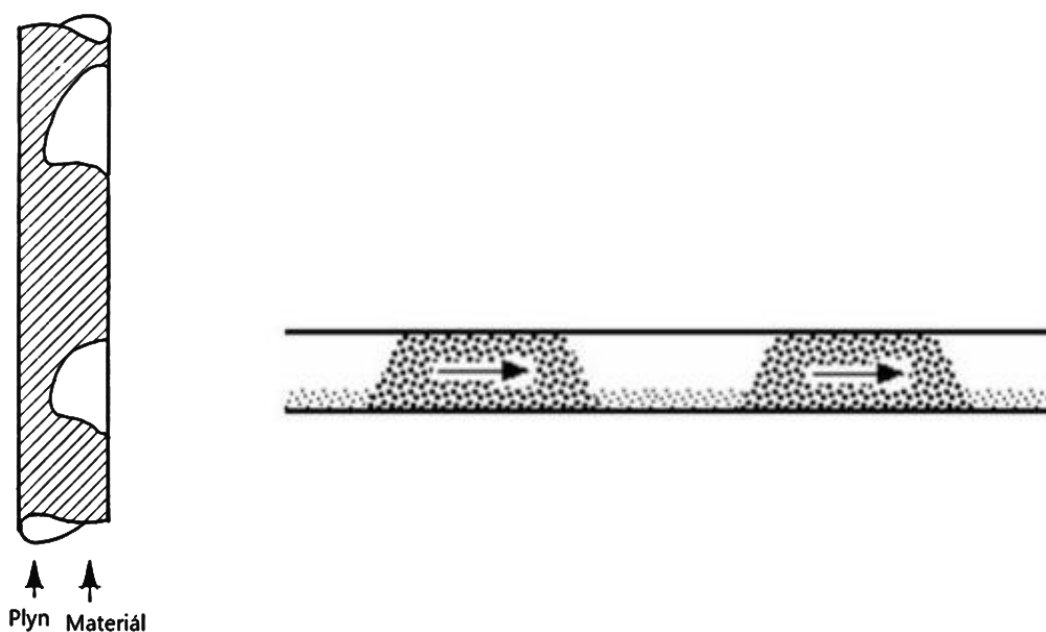
Pro pneumatickou dopravu ze sila do denního zásobníku volím pneumatickou dopravu v posuvné vrstvě. Tento režim je šetrný jak k dopravovanému materiálu, tak k potrubí díky malým rychlostem, kterými se materiál pohybuje. Jelikož je sůl velice abrazivní materiál a dopravovaná vzdálenost je velká, volím tento režim jako nejvhodnější, jelikož by při vysokých dopravních rychlostech došlo k rozsáhlé degradaci potrubí.

Bohužel pro teoretický návrh pneumatické dopravy v tomto režimu je velmi omezené množství informací. Většinou jsou systémy pneumatické dopravy v tomto režimu navrhovány pomocí experimentálních dat získaných v laboratorní stanici. Z těchto dat je následně možné zjistit chování materiálu v trubce při nízkých rychlostech, díky čemuž je možné zvolit optimální režim, průměr trubky a průtok vzduchu.

Režim dopravy materiálu v posuvné vrstvě je ještě možné rozdělit do dvou variant dle pohybu materiálu v trubce. První varianta je doprava materiálu v pístové vrstvě (anglicky plug flow), při které materiál zabírá celý průřez a je posouván vzduchem v jednotlivých shlucích (viz. Obr. 8.4). Druhá varianta je doprava materiálu v hromadné vrstvě (anglicky slug flow), při které je materiál posouván po dně trubky a není zcela oddělen na jednotlivé shluky (viz. Obr. 8.5). [9]



Obr. 8.4. Doprava materiálu v pístové vrstvě [9]



Obr. 8.5. Doprava materiálu v hromadné vrstvě ve vertikální trubce (vlevo) [9], v horizontální trubce (vpravo) [38]

Provedl jsem tedy návrh dopravy pro oba výše uvedené režimy. Výpočet pro režim pístové vrstvy jsem provedl podle Klinzinga a spol. [9]. Výpočet pro režim hromadné vrstvy jsem provedl dle Marcuse a spol [39].

8.7.1. Pneumatická doprava v pístové vrstvě

Návrhový výpočet uvedený níže je proveden metodou uvedenou v práci Webera [40]. Tato metoda je aplikována a vysvětlena na příkladu v práci Klinzinga a spol. [9] pro horizontální orientaci potrubí. Výpočet pro vertikální potrubí v této práci uveden není. Proto při tomto výpočtu předpokládám, že silo a komorový podavač jsou přibližně na stejné vertikální úrovni.

Hmotnostní průtok materiálu je rovnice (8.2-2).

$$\dot{m}_p = 5000 \text{ kg/hod}$$

Zvolená dopravovaná horizontální vzdálenost:

$$L_H = 150 \text{ m}$$

Hodnotu usazovací rychlosti částice jsem použil z kapitoly 8.6, kterou jsem vypočetl pomocí rovnice (8.6-32).

$$U_T = 3,74 \text{ m/s}$$

Na výstupu volím tlak atmosférický.

$$p_2 \cong 0,1 \text{ MPa}$$

Tabulka 8.12. Doprava do denního zásobníku – režim pístové vrstvy – vstupní parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Hmotnostní průtok materiálu	\dot{m}_p	5 000	kg/hod
Tíhové zrychlení	g	9,81	m/s ²
Průměrná velikost zrna	x	0,575	mm
Hustota vzduchu	ρ_f	1,2	kg/m ³
Hustota částice	ρ_p	2140	kg/m ³
Sypná hustota materiálu	ρ_s	1250	kg/m ³
Dynamická viskozita vzduchu	η	0,0000184	Pa . s
Plynová konstanta vzduchu	r	287	J/kg . K
Horizontální délka	L_H	150	m
Usazovací rychlost částice	U_T	6,83	m/s
Tlak na výstupu	p_2	0,1	MPa

Odvození těchto výpočtových vztahů je možné najít v práci Klizlinga a spol. [9].

Froudeho číslo pro usazovací rychlost částice:

$$Fr_{fo}^* = \frac{U_T}{\sqrt{gID}} \quad (8.7-1)$$

Směšovací poměr:

$$\mu = \frac{\dot{m}_p}{\rho_f \dot{V}_f} \quad (8.7-2)$$

Dopravní rychlost plynu:

$$U = \frac{\dot{V}_f}{A} \quad (8.7-3)$$

Froudeho číslo pro plyn:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gID}} \quad (8.7-4)$$

Hustotní poměr je možné vypočítat jako:

$$\Gamma = 0,5(\rho_1 + \rho_2)/\rho_b \quad (8.7-5)$$

Při odvození se získá sloučený parametr $\mu\Gamma$, který je závislý na vstupním p_1 a výstupním p_2 tlaku.

$$\mu\Gamma = 0,5\mu\rho_1(1 + p_1/p_2)/\rho_b \quad (8.7-6)$$

Dále se zavede parametr ζ :

$$\zeta = 4 \frac{\lambda_z^* B_p Fr^5 \Gamma}{\pi \beta_p Fr_{fo}^2} \quad (8.7-7)$$

Pro aplikaci rovnice (8.7-7) je třeba znát parametry λ_z^* , β a B . Weber [40] uvádí následující experimentálně zjištěné hodnoty parametrů:

$$\lambda_z^* \cong 0,75; \beta_p \cong 0,6; B_p = 10^{-3}$$

Závislosti parametrů $\mu\Gamma$, ζ a poměru rychlostí U_p/U jsou vyjádřeny graficky v Grafu 8.1.

Výpočet tlakové ztráty

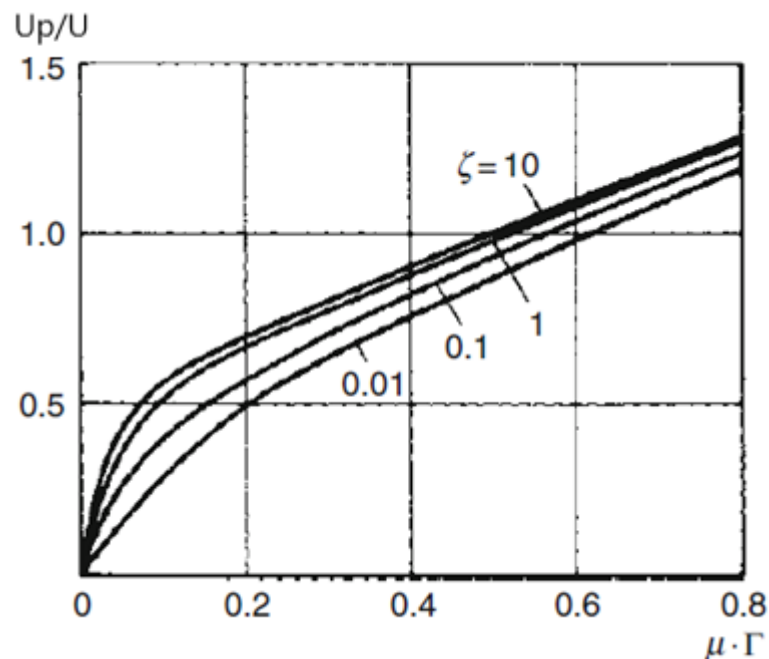
$$\frac{p_1}{p_2} = \exp\left(\frac{\beta_p \mu g L_H U}{r T U_p}\right) \quad (8.7-8)$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (8.7-9)$$

Výpočet tlakové ztráty je proveden iteračním způsobem, jelikož poměr rychlostí U_p/U je funkcí parametru $\mu\Gamma$ a ζ (viz Graf 8.1) a současně parametr $\mu\Gamma$ závisí na poměru vstupního a výstupního tlaku (p_1/p_2).

Nejdříve jsem zvolil průtok vzduchu a průměr trubky a poměr tlaků na vstupu a výstupu p_1/p_2 . Díky známým vzorcům, které jsou vypsány výše v této kapitole, mohu vypočítat parametr ζ a $\mu\Gamma$. Následně z Grafu 8.1 odečtu poměr rychlostí U_p/U , ze kterého budu moci vypočítat

pravou stranu rovnice (8.7-8). Volené hodnoty objemového průtoku vzduchu \dot{V}_f a průměru vnitřního průměru trubky ID měním tak, aby se pravá a levá strana rovnice (8.7-8) rovnaly a zároveň, aby tlaková diference a směšovací poměr vycházely v hodnotách určených pro dopravu materiálu v posuvné vrstvě.



Graf 8.1 - Závislosti parametrů U_p/U , $\mu\Gamma$ a ζ [9]

Objemový průtok vzduchu \dot{V}_f dostupný při 100 kPa a 20°C a vnitřní průměr trubky ID jsem zvolil tak, aby rychlost vzduchu U vycházela menší jak saltační rychlost U_{SALT} a aby směšovací poměr μ odpovídal hodnotám pro dopravu materiálu v posuvné vrstvě $\mu > 30$ [39]:

$$\dot{V}_f = 110 \text{ m}^3/\text{hod}$$

Vnitřní průměr trubky volím podle normy ANSI/ASME B36.19 DN 50.

$$ID = 52,48 \text{ mm}$$

Tabulka 8.13. Doprava do denního zásobníku – režim pístové vrstvy – vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Froudeho číslo pro usazovací rychlost	Fr_{fo}^*	10,13	-
Froudeho číslo pro plyn	Fr	19,69	-
Objemový průtok vzduchu	\dot{V}_f	110	m^3/hod
Vnitřní průměr trubky	ID	52,48	m
Směšovací poměr	μ	37,9	-
Rychlost vzduchu	U	14,1	m/s

Tabulka 8.14. Doprava do denního zásobníku – režim pístové vrstvy – iterační výpočet tlakové ztráty

PS					LS
p_1/p_2	Γ	$\mu\Gamma$	ζ	U_p/U	$\exp\left(\frac{\beta_p \mu g L_H U}{RT_c}\right)$
4,85	0,002808	0,106363636	0,025	0,25	4,90
4,86	0,0028128	0,106545455	0,025	0,25	4,90
4,87	0,0028176	0,106727273	0,025	0,25	4,90
4,88	0,0028224	0,106909091	0,026	0,25	4,90
4,89	0,0028272	0,107090909	0,026	0,25	4,90
4,9	0,002832	0,107272727	0,026	0,25	4,90
4,91	0,0028368	0,107454545	0,026	0,25	4,90
4,92	0,0028416	0,107636364	0,026	0,25	4,90
4,93	0,0028464	0,107818182	0,026	0,25	4,90
4,94	0,0028512	0,108	0,026	0,25	4,90
4,95	0,002856	0,108181818	0,026	0,25	4,90
4,96	0,0028608	0,108363636	0,026	0,25	4,90
4,97	0,0028656	0,108545455	0,026	0,25	4,90
4,98	0,0028704	0,108727273	0,026	0,25	4,90

PS = Pravá strana rovnice (8.7-8), LS = Levá strana rovnice (8.7-8)

Jelikož je na výstupu z potrubí tlak atmosférický, je možné z rovnice (8.7-9) a poměru p_1/p_2 vypočítat tlak na vstupu p_1 . Výsledky viz Tabulka 8.15.

Po dosazení hodnot z Tabulek 20 a 21 do rovnice (8.6-3) pro výpočet saltační rychlosti U_{SALT} , vyjde hodnota $U_{SALT} = 16,81 \text{ m/s}$. Dopravní rychlost pro vzduchu pro případ v posuvné vrstvě vyšla $U = 14,1 \text{ m/s}$. Zde je možné vidět, že rychlost vzduchu pro dopravu materiálu v posuvné vrstvě je menší než saltační rychlost, což je minimální rychlost pro dopravu materiálu ve vlnosku. Rychlost materiálu vyšla $U_p = 3,525 \text{ m/s}$. Z tohoto je patrné, že materiál se „posouvá“ po dně trubky.

Tabulka 8.15. Doprava do denního zásobníku – režim pístové vrstvy – vypočtené parametry pro výběr transportéru

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Poměr tlaků	p_1/p_2	4,96	-
Tlaková ztráta	Δp_d	396	kPa

Pro tento typ dopravy jsem vybral z katalogu výrobce na základě tlakové ztráty, dopravovaném materiálu a maximální dopravní kapacity transportér pro pneumatickou dopravu. Konkrétně Transportér TPA, jehož parametry je možné vidět v Příloze 3. Transportér v sobě integruje zdroj tlakového vzduchu a podavače materiálu.

8.7.2. Pneumatická doprava v hromadné vrstvě

Problematikou návrhu dopravy v hromadné vrstvě a aplikací na konkrétní příklad se zabýval Marcus a spol [39]. Níže jsou uvedené vztahy potřebné pro výpočet tlakové ztráty pro dopravu materiálu v hromadné vrstvě dle Marcuse [39], Klinzinga a spol. [9].

Trubku volím stejnou jako v předchozím příkladě *ANSI/ASME B36.19 DN 50*:

$$ID = 52,48 \text{ mm}$$

Rychlost vzduchu volím menší, než je saltační rychlost:

$$U_{SALT} = 16,81 \text{ m/s}$$

$$U = 10 \text{ m/s}$$

Horizontální délku potrubí volím:

$$L_H = 150 \text{ m.}$$

Vertikální délku potrubí volím:

$$L_V = 40 \text{ m.}$$

Počet kolen volím:

$$n_b = 15.$$

Tabulka 8.16. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – vstupní parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Hmotnostní průtok materiálu	\dot{m}_p	5000	kg/hod
Tíhové zrychlení	g	9,81	m/s ²
Průměrná velikost zrna	x	0,575	mm
Hustota vzduchu	ρ_f	1,2	kg/m ³
Hustota částice	ρ_p	2140	kg/m ³
Sypná hustota materiálu	ρ_s	1250	kg/m ³
Dynamická viskozita vzduchu	η	0,0000184	Pa. s
Rychlost vzduchu	U	10	m/s
Vnitřní průměr trubky	ID	52,48	mm
Objemový průtok vzduchu	\dot{V}_f	77,87	m ³ /hod
Horizontální délka	L_H	150	m
Vertikální délka	L_V	40	m
Počet kolen	n_b	15	-
Tlak na výstupu	p_2	0,1	MPa

Dle Marcuse [39] a Klinzinga a spol. [9] je možné vypočítat tlakovou ztrátu pomocí rychlosti materiálu U_p (Varianta A) nebo pomocí skluzové rychlosti U_{SLIP} (Varianta B). V literatuře týkající se pneumatické dopravy materiálu je více používána Varianta A, jelikož je velmi obtížné dosáhnout přesných naměřených hodnot porozity vrstvy materiálu a skluzové rychlosti, potřebných k výpočtu Varianty B. Právě kvůli obtížnosti těchto měření je problém určit správné korelace pro součinitel tření materiálu λ_Z^* . I přesto, že se výpočty pomocí skluzové rychlosti (Varianta B) jeví jako lepší přístup k této problematice, je tato metoda limitována malou databází dat, potřebnou ke správnému určení součinitele tření materiálu. Při návrhových výpočtech

pomocí korelací součinitele materiálu λ_z^* je proto nutné dbát zvýšené pozornosti na to, jaký typ rychlosti byl pro tyto korelace použit, tj. zda rychlost materiálu U_p nebo skluzová rychlostí U_{SLIP} . [39]

Níže jsou uvedené návrhové výpočty a výsledky pro dopravu materiálu v hromadné vrstvě pro obě varianty řešení.

Varianta A – výpočtové vztahy na bázi U_p

Rovnice pro celkovou tlakovou ztrátu v potrubí, ve které je zanedbána ztráta akcelerací plynu a materiálu.

$$\frac{\Delta p}{L} = \underbrace{2f_g \frac{\rho_f \varepsilon U^2}{ID}}_{(1)} + \underbrace{\lambda_z^* \frac{\rho_p (1 - \varepsilon) U^2}{2ID}}_{(2)} + \underbrace{\rho_p (1 - \varepsilon) g}_{(3)} + \underbrace{\rho_f \varepsilon g}_{(4)} \quad (8.7-10)$$

- (1) Tlaková ztráta způsobena třením plynu s potrubím.
- (2) Tlaková ztráta způsobena třením materiálu s potrubím.
- (3) Tlaková ztráta způsobena tíhovou silou materiálu.
- (4) Tlaková ztráta způsobena tíhovou silou plynu.

Reynoldsovo číslo pro proudění vzduchu v trubce:

$$Re = \frac{U \rho_f ID}{\eta} \quad (8.7-11)$$

Hinkleova (IGT) korelace pro rychlost částice:

$$U_p = U(1 - 0,68 \cdot x^{0,92} \rho_p^{0,5} \rho_f^{-0,2} ID^{-0,54}) \quad (8.7-12)$$

Porozita vrstvy materiálu:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{m}_p}{A_{ID} \cdot \rho_p \cdot U_p} \quad (8.7-13)$$

Směšovací poměr:

$$\mu = \frac{\dot{m}_p}{\rho_f \dot{V}_g} \quad (8.7-14)$$

Třecí faktor (Fanningův) vzduchu:

$$f_g = 0,0014 + 0,125 Re^{-0,32} \quad (8.7-15)$$

A1. Varianta A – horizontální část potrubí

Pro horizontální potrubí platí, že členy (3) a (4) jsou nulové, jelikož není třeba překonávat tíhové síly materiálu ani plynu.

Konno a Saitova korelace pro tlakovou ztrátu třením materiálu:

Zde je nutné podotknout, že v práci od Marcuse [39] je v této korelaci na několika místech chyba. Proto zde uvádím rovnici z původního zdroje Konno a Saita [41]:

$$\frac{\lambda_z^*}{4} = \frac{0,0285}{U_p} \sqrt{gID} \quad (8.7-16)$$

Tlaková ztráta způsobená třením plynu – člen (1):

$$\frac{\Delta p_{ffH}}{L_H} = 2f_g \frac{\rho_f \varepsilon U^2}{ID} \quad (8.7-17)$$

Tlaková ztráta způsobená třením materiálu – člen (2):

$$\frac{\Delta p_{fpH}}{L_H} = \lambda_z^* \frac{\rho_p (1 - \varepsilon) U_p^2}{2ID} \quad (8.7-18)$$

Celková tlaková ztráta v horizontální sekci potrubí

$$\frac{\Delta p_H}{L_H} = \frac{\Delta p_{ffV} + \Delta p_{fpV}}{L_H} \quad (8.7-19)$$

Tabulka 8.17. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta A – horizontální část

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Reynoldsovo číslo plynu	Re	62 976	-
Rychlost částice	U_p	8,40	m/s
Porozita vrstvy materiálu	ε	0,964	-
Směšovací poměr	μ	53,51	-
Třecí faktor vzduchu	f_g	0,00504	-
Třecí faktor materiálu	λ_z^*	0,00974	-
Tlaková ztráta třením plynu	$\Delta p_{ff}/L_H$	22	Pa/m
Tlaková ztráta třením materiálu	$\Delta p_{fp}/L_H$	500	Pa/m
Tlaková ztráta na 1 m délky	$\Delta p/L_H$	523	Pa/m
Celková tlaková ztráta – horizontální část	Δp_H	78 392	Pa
Celková tlaková ztráta – horizontální část	Δp_H	0,78	bar

A2. Varianta A – vertikální část potrubí

Pro vertikální část potrubí se členy (1) a (2) v rovnici (8.7-10) vypočítají stejně jako v horizontální části dle rovnic (8.7-17) a (8.7-18), akorát se k nim přičtou ještě členy zohledňující tíhovou sílu plynu (3) a materiálu (4).

Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou materiálu – člen (3):

$$\frac{\Delta p_{gfV}}{L_V} = \rho_p(1 - \varepsilon)g \quad (8.7-20)$$

Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou plynu – člen (4):

$$\frac{\Delta p_{ggV}}{L_V} = \rho_f \varepsilon g \quad (8.7-21)$$

Celková tlaková ztráta ve vertikální sekci potrubí

$$\frac{\Delta p_V}{L_V} = \frac{\Delta p_{ffV} + \Delta p_{fpV} + \Delta p_{gpV} + \Delta p_{gfV}}{L_V} \quad (8.7-22)$$

Tabulka 8.18. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta A – vertikální část

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Reynoldsovo číslo plynu	Re	62 976	-
Rychlost částice	U_p	8,44	m/s
Porozita materiálu	ε	0,964	-
Směšovací poměr	μ	53,51	-
Třecí faktor vzduchu	f_g	0,005040609	-
Třecí faktor materiálu	λ_z^*	0,009686839	-
Tlaková ztráta třením plynu	$\Delta p_{ff}/L_V$	22	Pa/m
Tlaková ztráta třením materiálu	$\Delta p_{fp}/L_V$	500	Pa/m
Tlaková ztráta tíhové síly materiálu	$\Delta p_{gf}/L_V$	746	Pa/m
Tlaková ztráta tíhové síly plynu	$\Delta p_{gp}/L_V$	11	Pa/m
Tlaková ztráta na 1 m délky potrubí	$\Delta p/L_V$	1 280	Pa/m
Celková tlaková ztráta – vertikální část	Δp_V	51 335	Pa
Celková tlaková ztráta – vertikální část	Δp_V	0,51	bar

Zde je možné si povšimnout velkého příspěvku tlakové ztráty na vertikální překonání tíhové síly materiálu.

A3. Varianta A – kolena

Koleno volím dle normy ASME B 16.9 DN 50. Normalizovaný rádius toho kolene je:

$$R_b = 76,2 \text{ mm}$$

Tlaková ztráta třením plynu v rovném potrubí o stejné délce jako koleno:

$$\Delta p_{ff} = 2f_g \frac{\rho_f \varepsilon U^2}{ID} L_b \quad (8.7-23)$$

Tlaková ztráta třením materiálu v rovném potrubí o stejné délce jako koleno:

$$\Delta p_{fp} = \lambda_z^* \frac{\rho_p (1 - \varepsilon) U_p^2}{2ID} L_b \quad (8.7-24)$$

Délka kolene:

$$L_b = \frac{\pi R_b}{2} \quad (8.7-25)$$

Schuchartova analýza pro tlakovou ztrátu třením částic v koleni uvádí vztah:

$$\Delta p_{bp} = 210 \left(\frac{2R_b}{ID} \right)^{-1,15} \cdot \Delta p_{fp} \quad (8.7-26)$$

Tlaková ztráta třením plynu v koleni:

$$\Delta p_{bf} = 20 \cdot \Delta p_{ff} \quad (8.7-27)$$

Celková ztráta kolene:

$$\Delta p_{1b} = \Delta p_{bp} + \Delta p_{bf} \quad (8.7-28)$$

Znamé veličiny pro výpočet kolene jsou stejné jako v Tabulce 8.16.

Tabulka 8.19. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta A – kolena

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Rádius kolene	R_b	76,2	mm
Délka kolene	L_b	0,12	m
Tlaková ztráta třením plynu v rovném potrubí	Δp_{ff}	2,759	Pa
Tlaková ztráta třením materiálu v rovném potrubí	Δp_{fp}	60	Pa
Tlaková ztráta třením plynu v koleni	Δp_{bf}	62	Pa
Tlaková ztráta materiálu plynu v koleni	Δp_{bp}	3 691	Pa
Celková tlaková ztráta kolene	Δp_{1b}	3 746	Pa
Tlaková ztráta kolen	Δp_b	56 194	Pa
Tlaková ztráta kolen	Δp_b	0,56	bar

A4. Varianta A – celková tlaková ztráta potrubí

Tabulka 8.20. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta A – celková tlaková ztráta potrubí

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Tlaková ztráta v horizontální sekci	Δp_H	0,79	bar
Tlaková ztráta ve vertikální sekci	Δp_V	0,51	bar
Tlaková ztráta kolen	Δp_b	0,56	bar
Celková tlaková ztráta potrubního systému	Δp_d	1,87	bar

Celková tlaková ztráta potrubního systému pro Variantu A vyšla 1,87 bar.

Varianta B – výpočtové vztahy na bázi U_{SLIP}

V této variantě výpočtu se počítá se skluzovou rychlostí U_{SLIP} , která se dá vyjádřit jako:

$$U_{SLIP} = \frac{U}{\varepsilon} - U_p \quad (8.7-29)$$

Rovnice pro celkovou tlakovou ztrátu v potrubí, ve které je zanedbána ztráta akcelerací plynu a materiálu.

$$\frac{\Delta p_d}{L} = \underbrace{2f_g \frac{\rho_f \varepsilon (U/\varepsilon)^2}{ID}}_{(1)} + \underbrace{\lambda_z^* \frac{\rho_p (1 - \varepsilon) U_{SLIP}^2}{2ID}}_{(2)} + \underbrace{\rho_p (1 - \varepsilon) g}_{(3)} + \underbrace{\rho_f \varepsilon g}_{(4)} \quad (8.7-30)$$

- (1) Tlaková ztráta způsobena třením plynu s potrubím.
- (2) Tlaková ztráta způsobena třením materiálu s potrubím.
- (3) Tlaková ztráta způsobena tíhovou silou materiálu.
- (4) Tlaková ztráta způsobena tíhovou silou plynu.

Výpočtové vztahy a hodnoty jsou pro Variantu B stejné jako pro Variantu A pro parametry:

Reynoldsovo číslo pro proudění v trubce: rovnice (8.7-11);

Hinkleova (IGT) korelace pro rychlost částice: rovnice (8.7-12);

Porozita vrstvy materiálu: rovnice (8.7-13)

Směšovací poměr: rovnice (8.7-14)

Třecí faktor (Fanningův) vzduchu: rovnice (8.7-15)

Mathur a Klinzingova korelace [39] pro součinitel tření materiálu:

$$\lambda_z^* = 0,395(U_{SLIP})^{-1,65} \quad (8.7-31)$$

B1. Varianta B – horizontální část potrubí

Pro horizontální potrubí platí, že členy (3) a (4) jsou nulové, jelikož není třeba překonávat tíhové síly materiálu ani plynu.

Tlaková ztráta způsobená třením plynu – člen (1):

$$\frac{\Delta p_{ffH}}{L_H} = 2f_g \frac{\rho_f \varepsilon (U/\varepsilon)^2}{ID} \quad (8.7-32)$$

Tlaková ztráta způsobená třením materiálu – člen (2):

$$\frac{\Delta p_{fpH}}{L_H} = \lambda_z^* \frac{\rho_p (1 - \varepsilon) U_{SLIP}^2}{2ID} \quad (8.7-33)$$

Celková tlaková ztráta v horizontální sekci potrubí

$$\frac{\Delta p_H}{L_H} = \frac{\Delta p_{ffV} + \Delta p_{fpV}}{L_H} \quad (8.7-34)$$

Tabulka 8.21. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta B – horizontální část

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Reynoldsovo číslo plynu	Re	34 226	-
Rychlost částice	U_p	8,44	m/s
Porozita vrstvy materiálu	ε	0,96	-
Směšovací poměr	μ	54	-
Skuzová rychlost	U_{SLIP}	1,92	m/s
Třecí faktor vzduchu	f_g	0,00583	-
Třecí faktor materiálu	λ_z^*	0,53655	-
Tlaková ztráta třením plynu	$\Delta p_{ff}/L_H$	27,62	Pa/m
Tlaková ztráta třením materiálu	$\Delta p_{fp}/L_H$	1 439	Pa/m
Tlaková ztráta na 1 m délky	$\Delta p/L_H$	1 467	Pa/m
Celková tlaková ztráta – horizontální část	Δp_H	220 044	Pa
Celková tlaková ztráta – horizontální část	Δp_H	2,20	bar

B2. Varianta B – vertikální část potrubí

Pro vertikální potrubí se členy (1) a (2) v rovnici (8.7-30) vypočítají stejně jako v horizontální části, jen se k nim přičtou ještě členy zohledňující tíhovou sílu plynu (3) a materiálu (4).

Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou materiálu – člen (3):

$$\frac{\Delta p_{gfV}}{L_V} = \rho_p(1 - \varepsilon)g \quad (8.7-35)$$

Tlaková ztráta způsobená tíhovou silou plynu – člen (4):

$$\frac{\Delta p_{gg}}{L_V} = \rho_f \varepsilon g \quad (8.7-36)$$

Celková tlaková ztráta ve vertikální sekci potrubí

$$\Delta p_V = \Delta p_{ffV} + \Delta p_{fpV} + \Delta p_{gpV} + \Delta p_{gfV} \quad (8.7-37)$$

Tabulka 8.22. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta B – vertikální část

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Reynoldsovo číslo plynu	Re	34 226	-
Rychlost částice	U_p	8,44	m/s
Porozita vrstvy materiálu	ε	0,964	-
Směšovací poměr	μ	53,51	-
Třecí faktor vzduchu	f_g	0,005825	-
Třecí faktor materiálu	λ_Z^*	0,0096868	-
Tlaková ztráta třením plynu	$\Delta p_{ff}/L_V$	28	Pa/m
Tlaková ztráta třením materiálu	$\Delta p_{fp}/L_V$	1 439	Pa/m
Tlaková ztráta tíhové síly materiálu	$\Delta p_{gf}/L_V$	746	Pa/m
Tlaková ztráta tíhové síly plynu	$\Delta p_{gp}/L_V$	11,4	Pa/m
Tlaková ztráta na 1 m délky potrubí	$\Delta p/L_V$	2 224	Pa/m
Celková tlaková ztráta – vertikální část	Δp_V	88 970	Pa
Celková tlaková ztráta – vertikální část	Δp_V	0,89	bar

B3. Varianta B – kolena

Koleno volím dle normy ASME B 16.9 DN 50. Normalizovaný rádius tohoto kolene je:

$$R_b = 76,2 \text{ mm}$$

Tlaková ztráta třením plynu v rovném potrubí o stejné délce jako koleno:

$$\Delta p_{ff} = 2f_g \frac{\rho_f \varepsilon (U/\varepsilon)^2}{ID} L_b \quad (8.7-38)$$

Tlaková ztráta třením materiálu v rovném potrubí o stejné délce jako koleno:

$$\Delta p_{fp} = \lambda_z^* \frac{\rho_p (1 - \varepsilon) U_{SLIP}^2}{2ID} L_b \quad (8.7-39)$$

Dále se postupuje podle rovnic (8.6-26) až (8.6-29).

Tabulka 8.23. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta B – kolena

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Rádus kolene	R_b	76,2	mm
Délka kolene	L_b	0,119	m
Tlaková ztráta třením plynu v rovném potrubí	Δp_{ff}	3,428	Pa
Tlaková ztráta třením materiálu v rovném potrubí	Δp_{fp}	172	Pa
Tlaková ztráta třením plynu v koleni	Δp_{bf}	62	Pa
Tlaková ztráta materiálu plynu v koleni	Δp_{bf}	10 617	Pa
Celková tlaková ztráta kolene	Δp_{1b}	10 686	Pa
Tlaková ztráta kolen	Δp_b	160 289	Pa
Tlaková ztráta kolen	Δp_b	1,60	bar

B4. Varianta B – celková tlaková ztráta potrubí

Tabulka 8.24. Tlakové ztráty – Varianta B – Vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Celková tlaková ztráta – horizontální část	Δp_H	2,20	bar
Celková tlaková ztráta – vertikální část	Δp_V	0,89	bar
Tlaková ztráta kolen	Δp_b	1,60	bar
Celková tlaková ztráta potrubního systému	Δp_d	4,69	bar

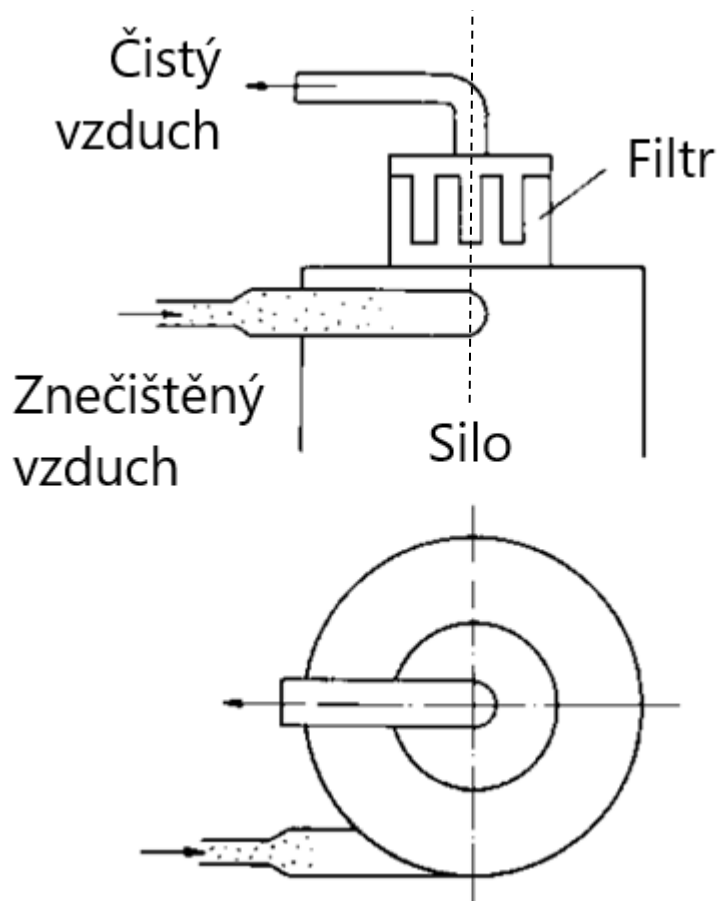
Vypočtená celková tlaková ztráta potrubního systému pomocí vztahů založených na skluzové rychlosti (Varianta B) je 4,69 bar.

Je možné si povšimnout, že při výpočtu se vztahy s rychlostí materiálu (Varianta A) je celková tlaková ztráta cca 2,5x menší, než při výpočtu se vztahy se skluzovou rychlostí (Varianta B). To je dáno rozdílností přístupu obou formátů výpočtu k dané problematice a nedostatkem experimentálních dat, které by zpřesnily korelace použité pro výpočty tlakové ztráty. Proto zůstanu na straně bezpečnosti a zdroj stlačeného vzduchu vybírám podle Varianty B. Pro překonání tlakové ztráty a požadovaný režim dopravy materiálu v hromadné vrstvě volím Transportér TPA, jehož parametry je možné vidět v Příloze 3.

Dále si je možné povšimnout rozdílů oproti dopravě materiálu ve vznosu. Jsou to především nižší dopravní rychlosti, pohybující se pod hranicí saltační rychlosti. Z toho vyplývají menší potřebný objemový průtok vzduchu, větší směšovací poměr a vyšší pracovní tlaky.

8.8. Návrh cyklónového odlučovače za silo

Cyklónový odlučovač je jednou z možností, jak odseparovat částice soli ze vzduchu ještě před dopadem na látkový filtr. Tím se zmírní opotřebení filtru, díky čemuž je možné ušetřit na filtračním materiálu. Jedna z možností je postavit před filtr cyklón, na kterém by se odloučily velké částice a neodloučené nejmenší částice by byly následně zachyceny ve filtru. Druhou velmi používanou variantou, jak odlehčit filtru pomocí odstředivých sil, je nainstalovat vstupní otvor do sila excentricky, čímž se samotné silo stane cyklónovým odlučovačem. Pro ilustraci uvádím Obr. 8.6.



Obr. 8.6. Tangenciální zavedení trubky do sila [9]

Vstupní tlak volím jako tlak atmosférický, zvýšený o tlakovou ztrátu v pneumatické dopravě materiálu ve vznosu.

$$p_1 = 137 \text{ kPa}$$

Jelikož zanedbávám teplotní změny vzduchu, ponechávám teplotu vzduchu na teplotě:

$$T = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K}$$

Hustota vzduchu při této teplotě:

$$\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

Hmotnostní průtok soli a objemový průtok plynu jsou známe z kapitoly 8.4.:

$$\dot{m}_p = 25\,000 \text{ kg/hod}$$

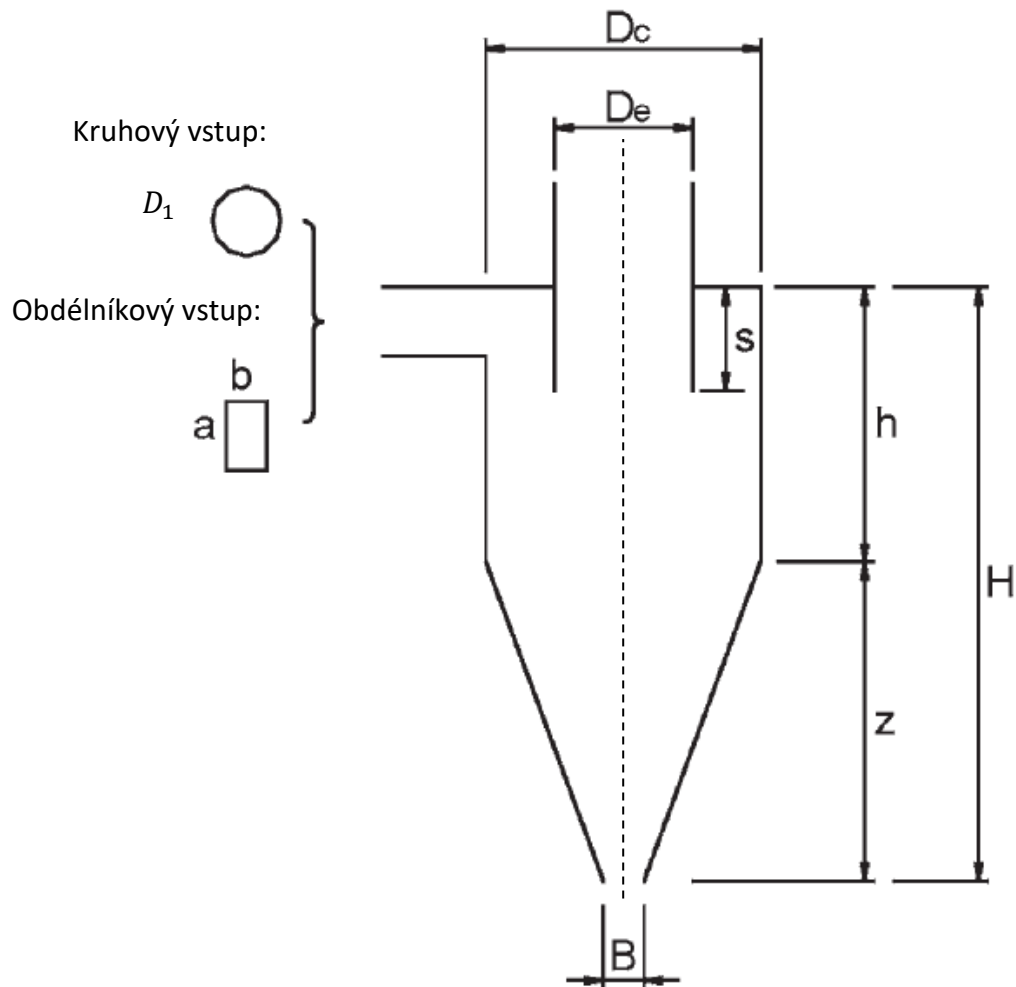
$$\dot{V}_f = 1960 \text{ m}^3/\text{hod}$$

Dynamická viskozita plynu:

$$\eta = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

Výpočtové vztahy pro návrh cyklónového odlučovače

Pro návrhový výpočet cyklónového odlučovače jsem nejdříve použil výpočtové vztahy dle Novák a kol. [19]. Bohužel v těchto skriptech nejsou návrhové vztahy pro výpočet cyklónového odlučovače o vyšším směšovací poměru. Použil jsem tedy návrhové výpočty dle Klinzinga a spol. [9] a Wanga [42].



Obr. 8.7. Geometrie cyklónového odlučovače [42]

Tabulka 8.25. Návrh cyklónového odlučovače – vstupní parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Vstupní tlak	p_1	137	kPa
Teplota	T	293,15	K
Hustota vzduchu	ρ_f	1,2	m^3/hod
Hmotnostní průtok materiálu	\dot{m}_p	25 000	kg/hod
Objemový průtok plynu	\dot{V}_f	1960	m^3/hod
Dynamická viskozita vzduchu	η	0,0000184	Pa.s
Směšovací poměr	μ	10,63	-

Design cyklónu je většinou založený na bezrozměrných geometrických relacích mezi rozměry jednotlivých částí cyklónu uvedenými na Obr. 8.7. Tyto relace jsou většinou založené na poměru hlavních rozměrů cyklónu ku jeho průměru D_c . Wang [42] ve své práci „Air pollution control engineering“ v Tabulce 1 na str. 101 uvádí několik variant bezrozměrných poměrů pro návrh geometrie cyklónu pro různé požadavky na funkci. Pro tento výpočet jsem vybral z této tabulky Lappleho cyklón, pro který jsou relace pro geometrii cyklónu následující:

Tabulka 8.26. Návrh cyklónového odlučovače – bezrozměrná geometrie [42]

SYMBOL	POMĚR
\dot{V}_f/D_c^2 (m^3/hod)	6,860
a/D_c	0,5
b/D_c	0,25
H/D_c	4
h/D_c	2
D_e/D_c	0,5
B/D_c	0,25
S/D_c	0,625

Vypočtené rozměry cyklónu je možné vidět v Tabulce 8.27.

Tabulka 8.27. Návrh cyklónového odlučovače – geometrie

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Průměr cyklónu	D_c	0,534	m
Delší strana vstupního otvoru	a	0,267	m
Kratší strana vstupního otvoru	b	0,066	m
Výška cyklónu	H	2,138	m
Výška válce	h	1,069	m
Průměr přepadové trubky	D_e	0,267	m
Průměr výstupního otvoru	B	0,133	m
Délka zapuštění	S	0,334	m

Následující výpočet frakční odlučivosti provedu podle Wanga [42], který pro výpočet využívá Barthova modelu.

Hmotnostní průtok plynu:

$$\dot{m}_f = \dot{V}_f \cdot \rho_f \quad (8.8-1)$$

Rychlost vzduchu ve vstupním otvoru:

$$U_1 = \frac{\dot{V}_f}{S_1} \quad (8.8-2)$$

Průřez vstupního otvoru:

$$S_1 = ab \quad (8.8-3)$$

Průřez přepadové trubky:

$$S_e = \frac{\pi D_e^2}{4} \quad (8.8-4)$$

Rychlost vzduchu v přepadové trubce:

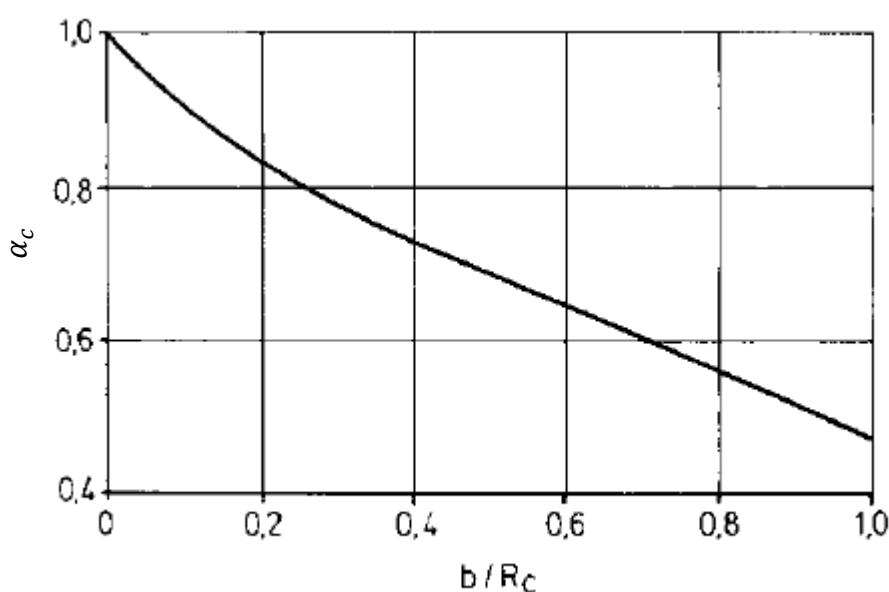
$$U_e = \frac{\dot{V}_f}{S_e} \quad (8.8-5)$$

Maximální tangenciální rychlost:

$$U_{tmax} = U_e \left[\frac{(D_e/2)(D_c - b)\pi}{2ab\alpha_c + h^m(D_c - b)\pi\lambda} \right] \quad (8.8-6)$$

Parametr α_c v této rovnici můžeme určit buď pomocí Grafu 8.2. nebo pomocí rovnice:

$$\alpha_c = 1 - 1,2(b/D_c) \quad (8.8-7)$$



Graf 8.2. Graf pro určení součinitele α [9]

Výška h^m pro $D_e \geq B$:

$$h^m = \frac{(H - h)(D_c - D_e)}{D_c - B} + (h - S) \quad (8.8-8)$$

Výška h^m pro $D_e < B$:

$$h^m = H - S \quad (8.8-9)$$

Wang [42] doporučuje v rovnici (8.8-6) pro třecí součinitel hodnotu $\lambda = 0,02$. Tato hodnota, ale nezohledňuje vliv směšovacího poměru, resp. předpokládá velmi malé hodnoty charakteristické pro čištění vzdušin. Proto místo této doporučené hodnoty použijí pro určení hodnoty třecího součinitele λ , vzorec dle Klinzinga a spol. [9], který v sobě zahrnuje i vliv směšovacího poměru:

$$\lambda = 0,005(1 + 3\mu^{1/2}) \quad (8.8-10)$$

Poměr U_T/U_T^m je poměr usazovací rychlosti částice ku usazovací rychlosti částice, která se odloučí z 50 %. Tento poměr se dá vyjádřit jako:

$$\frac{U_T}{U_T^m} = \frac{\pi h^m \rho_p U_{tmax}^2 x_i^2}{9\eta \dot{V}_f} \quad (8.8-11)$$

Díky tomuto poměru mohou vypočítat frakční odlučivost cyklónu:

$$\varphi_i = \frac{1}{[1 + (U_T/U_T^m)^{-3,2}]} \quad (8.8-12)$$

A kritický průměr částice, který se odloučí z 50 %:

$$x_{50} = \left(18 \frac{\eta}{\rho_p} \frac{(U_e/\pi h^m) x_i}{U_{tmax}^2} \right)^{1/2} \quad (8.8-13)$$

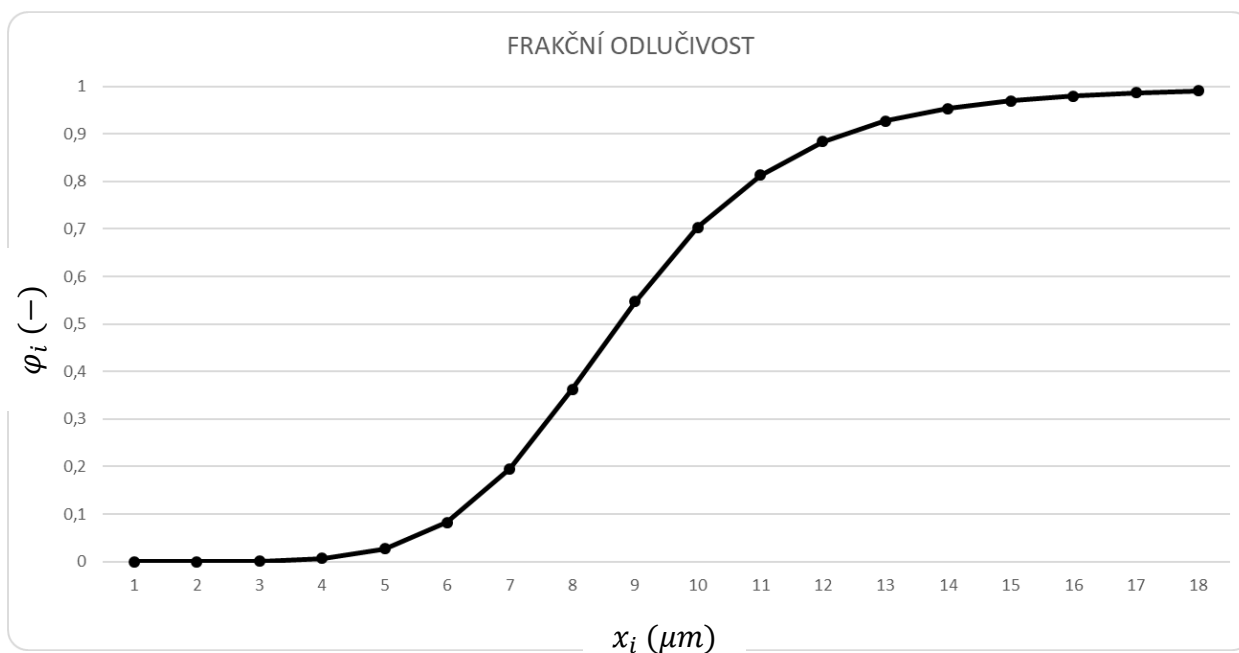
Hodnoty závislosti frakční odlučivosti φ_i na rozměru částice x_i je možné najít v Tabulce 8.29. Tato závislost je vynesena do grafické podoby, kterou je možné vidět na Grafu 8.3. Pro vypočtené rychlosti v cyklónu a kritický průměr viz Tabulka 8.28.

Tabulka 8.28. Návrh cyklónového odlučovače – kritický průměr – vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Hmotnostní průtok plynu	\dot{m}_f	2 352	kg/s
Rychlost vzduchu ve vstupním otvoru	U_1	15,24	m/s
Průřez vstupního otvoru	S_1	0,0357	m ²
Průřez přepadové trubky	S_e	0,0561	m ²
Rychlost vzduchu v přepadové trubce	U_0	9,7	m/s
Maximální tangenciální rychlost	U_{tmax}	11,02	m/s
Parametr α_c	α_c	0,7	-
Výška h^m	h^m	1,448	m
Třecí součinitel	λ	0,054	-
Kritický průměr	D_{50}	8,738	μm

Tabulka 8.29. Návrh cyklónového odlučovače – průběh frakční odlučivosti

x_i (μm)	φ_i (-)
3	0,001066995
4	0,006688355
5	0,027316767
6	0,082739088
7	0,19479715
8	0,362498901
9	0,547178451
10	0,703408946
11	0,813599299
12	0,883956439
13	0,927082606
14	0,953336537
15	0,969485421
16	0,979599959
17	0,986068934
18	0,990295549
19	0,993114642
20	0,995031845



Graf 8.3. Průběh frakční odlučivosti cyklónu

Dále je potřeba vypočítat tlakovou ztrátu cyklónu. Tu nejprve provedu podle Wanga [42] pouze pro vzduch bez prachových částic, který proudí cyklónovým odlučovačem.

Tlaková ztrátu cyklónu:

$$\Delta p = \frac{\rho_f U_1^2}{2} \Delta H \quad (8.8-14)$$

V rovnici (8.8-14) je ΔH bezrozměrný parametr, který závisí na geometrii cyklónu. Wang [42] uvádí 3 možnosti, jak tento parametr vypočítat:

První možností je výpočet pomocí Sheperd and Lappleovy korelace [42]:

$$\Delta H_1 = 16 \left(\frac{ab}{D_e^2} \right) \quad (8.8-15)$$

Druhou možností je výpočet pomocí upravené Sheperd and Lappleovy korelace [42]:

$$\Delta H_2 = 11,3 \left(\frac{ab}{D_e^2} \right) \quad (8.8-16)$$

Třetí možností je korelace získaná statisticky [42]:

$$\Delta H_3 = 20 \left(\frac{ab}{D_e^2} \right) \left[\frac{S/D_c}{(H/D_c)(h/D_c)(b/D_c)} \right] \quad (8.8-17)$$

Tabulka 8.30. Návrh cyklónového odlučovače – tlaková ztráta cyklónu – vzduch

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Parametr ΔH	ΔH_1	8	-
Parametr ΔH	ΔH_2	6,155	-
Parametr ΔH	ΔH_3	6,786	-
Tlaková ztrátu cyklónu	Δp_1	1 115	Pa
Tlaková ztrátu cyklónu	Δp_2	858	Pa
Tlaková ztrátu cyklónu	Δp_3	946	Pa

Pro ilustraci jsem provedl výpočet (viz Tabulka 8.30) pro všechny tři možnosti uvedené výše. Tlaková ztráta vyšla největší pro první možnost, nejméně přesnou variantu výpočtu. I tak, by se tato tlaková ztráta jednoduše pokryla z rezerv na zdroji stlačeného vzduchu vypočítaném v kapitole 8.6.

Jelikož se dle Wanga [42] tlaková ztráta cyklónu snižuje se vzrůstajícím směšovací poměrem, výpočtem provedeným výše zůstávám na straně bezpečnosti. I přes to jsem se pokusil vypočítat tlakovou ztrátu, která by zahrnovala i směšovací poměr. Tento výpočet je proveden dle Klinzinga a spol. [9]

Tlaková ztráta cyklónu se skládá především z tlakových ztrát, způsobených třením v komoře cyklónu a přepadové trubce. Třecí faktor pro tuto ztrátu:

$$\lambda_c = \lambda_{c1} + \lambda_{ce} \quad (8.8-18)$$

Třecí faktor v komoře:

$$\lambda_{C1} = \frac{D_e}{D_C} \left[\left(1 - \frac{U_{tmax}}{U_1} \frac{h^m}{D_e/2} \lambda \right)^{-2} - 1 \right] \quad (8.8-19)$$

Třecí faktor v přepadové trubce, ve které je doporučená hodnota parametru $K = 4,4$ dle Klinzinga [9]:

$$\lambda_{Ce} = \frac{K}{(U_{tmax}/U_i)^{2/3}} + 1 \quad (8.8-20)$$

Třecí faktor, ve kterém je zahrnuta geometrie cyklónu:

$$\lambda_C^* = \lambda_C \left(\frac{U_{tmax}}{U_i} \right)^2 \left(\frac{S_1}{S_e} \right)^2 \quad (8.8-21)$$

Celková tlaková ztráta cyklónu:

$$\Delta p = \lambda_C^* \frac{\rho}{2} U_{ip}^2 \quad (8.8-22)$$

Tabulka 8.31. Návrh cyklónového odlučovače – tlaková ztráta cyklónu – vzduch/částice

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Třecí faktor	λ	0,054	-
Třecí faktor v komoře	λ_{C1}	3,90	-
Třecí faktor v přepadové trubce	λ_{Ce}	5,04	-
Třecí faktor – geometrie	λ_C^*	4,67	-
Celková tlaková ztráta cyklónu	Δp	263	Pa

Jak je možné vidět v Tabulce 8.31, celková tlaková ztráta cyklónu je menší s větším směšovacím poměrem. To je způsobeno tím, že větší částice narážejí do menších částic a posouvají je směrem ke stagnační zóně blízko stěny cyklónu. [42]

V dnešní době je více používanou variantou než instalace samotného cyklónu, přivést to do sila nebo zásobníku směs vzduchu a částic excentricky, čímž budou na částice působit odstředivé síly podobně jako v cyklónu. Samotné silo tedy zastoupí funkci cyklónového odlučovače, který již není třeba instalovat. [6,9]

8.9. Návrh filtru sila

Objemový průtok vzduchu, proudící filtrem umístěným na síle, je stejný jako v kapitole 8.6, ve které jsem vypočítal potřebný objemový průtok pro dopravu materiálu ve vlnosu.

$$\dot{V}_f = 1960 \text{ m}^3/\text{hod}$$

Hmotnostní průtok materiálu:

$$M_p = 25\,000 \text{ kg/hod}$$

Hustota vzduchu při 20°C:

$$\rho_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

Průměrná velikost částice je stejná jako v předchozích kapitolách:

$$x = 0,575 \text{ mm}$$

Pro návrh předpokládám, že částice větší jak 0,125 mm jsou v cyklónu zcela odloučeny. Ve filtru jsou odlučovány částice menší jak 0,125 mm a při výpočtu předpokládám maximální množství částí menších jak 0,125 mm dle distribuce frakčního složení soli (viz Tabulka 8.1).

Předpokládám nejnepříznivější stav, kdy částice menší než 0,125 mm nejsou odlučovány v cyklónu, tj. relativní odstraněné množství soli v cyklónu odpovídá hodnotě:

$$\eta_c = 0,92$$

Výpočtové vztahy pro návrh filtru

Hmotnostní průtok materiálu dopadajícího na filtr:

$$\dot{m}_{pf} = M_p(1 - \eta_c) \quad (8.9-1)$$

Prachová koncentrace v plynu:

$$\rho_\alpha^* = \frac{\dot{m}_{pf}}{\dot{m}_f} \quad (8.9-2)$$

Odlučovací plocha filtru (Chybě uvedeno Klinzingem a spol. [9]. Opraveno na $\dot{m}_f \rightarrow \dot{V}_f$):

$$S_F = \frac{\dot{V}_f}{AtC} \quad (8.9-3)$$

Pro určení hodnoty měrného zatížení filtrační textilie AtC jsem použil tři způsoby, kterými se dá k této hodnotě dojít. Všechny tři varianty jsou i s výpočty uvedeny a popsány níže.

Měrné zatížení filtrační textilie – Varianta A – doporučené hodnoty dle Coopera [43]

Při použití prvního způsobu jsem k výpočtu použil doporučených hodnot měrného zatížení filtrační textilie pro filtry s mechanickým oklepáváním nebo pro filtry s proudem reverzního vzduchu pro sůl dle Coopera [40]. Poté jsem dosadil do rovnice (8.9-3), ze které jsem vypočítal potřebnou filtrační plochu.

Tabulka 8.32. Návrh filtru sila – Varianta A – dle Coopera [43]

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Vstupní parametry			
Objemový tok vzduchu	\dot{V}_f	32,67	m ³ /min
Doporučené měrné zatížení filtrační textilie	AtC	3,00	stopa/min
Doporučené měrné zatížení filtrační textilie	AtC	0,9144	m/min
Vypočtené parametry			
Odlučovací plocha filtru	S_F	35,7	m ²

Měrné zatížení filtrační textilie – Varianta C – doporučené hodnoty dle Turnera [44]

Druhou možností je vypočítat potřebnou filtrační plochu pomocí tabulkových hodnot v Příloze 4 pro měrné zatížení filtrační textilie pro filtry s mechanickým oklepáváním.

Měrné zatížení filtrační textilie pro filtry s mechanickým oklepáváním získám z rovnice uvedené níže. Konstanty A, B, C se určí dle Turnera [44] (viz Příloha 4).

$$AtC = A \cdot B \cdot C \quad (8.9-4)$$

Nejdříve potřebuji zjistit hodnotu parametru A pro materiál, v mém případě volím sůl.

$$A = 3$$

Další je hodnota parametru B, který se řídí velikostí částice. Velikost částice je známá z Tabulky 9.

$$B = 1,2$$

Parametr C, na který má vliv směšovací poměr, jsem vypočetl v Tabulce 8.11.

$$C = 1$$

Výsledné měrné zatížení filtrační textilie získám z rovnice (8.9-4), díky čemuž mohu vypočítat potřebnou filtrační plochu z rovnice (8.9-3).

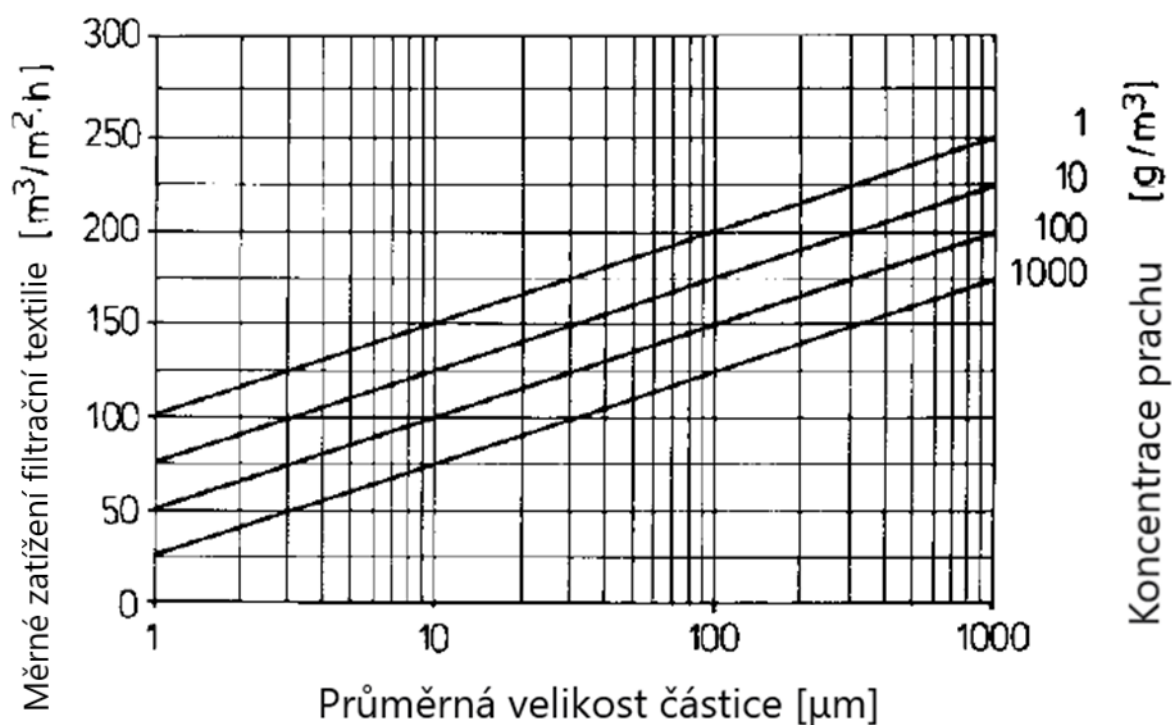
Tabulka 8.33. Návrh filtru sila – Varianta B – dle Turnera [44]

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Vstupní parametry			
Objemový tok vzduchu	\dot{V}_f	1960	m ³ /hod
Průměrná velikost částice	x	575	μm
Účinnost cyklónu	η_s	0,92	-
Vypočtené parametry			
Hmotnostní průtok prachu filtrem	M_p	2000	kg/hod
Koncentrace prachu	c	445,91	gr/ft ³
Parametr A	A	3	-
Parametr B	B	1,2	-
Parametr C	C	0,85	-
Měrné zatížení filtrační textilie	AtC	3,06	stopa/min
Odlučovací plocha filtru	S_F	377	stop
Odlučovací plocha filtru	S_F	35	m ²

Návrh filtru sila – Varianta C – dle Klinzing a spol. [9]

Poslední způsob, který jsem použil, bylo odečtení z grafu a následný výpočet z výše uvedených návrhových výpočtů podle Klinzing a spol. [9].

Zatížení filtrační textilie AtC určím z Grafu 8.4:



Graf 8.4 - Závislosti koncentrace prachu, průměrné velikosti částice a měrné zatížení filtrační textilie [9]

Pozn.: Z výpočtu uvedeného v Klinzing a spol. [9] je patrné, že je v tomto grafu v originální práci chyba v jednotkách u koncentrace prachu ($mg/m^3 \rightarrow g/m^3$); v Grafu 8.4.

Tabulka 8.34. Návrh filtru sila – Varianta C – dle v Klinzing a spol. [9]

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Vstupní parametry			
Průměrná velikost částice	x	575	μm
Hmotnostní průtok prachu filtrem	\dot{m}_{pf}	2000	kg/hod
Objemový tok vzduchu	\dot{V}_f	1960	m^3/hod
Vypočtené parametry			
Prachová koncentrace v plynu	ρ_α^*	1020	g/m^3
Měrné zatížení filtrační textilie	AtC	115	m/hod
Měrné zatížení filtrační textilie	AtC	1,917	m/min
Odlučovací plocha filtru	S_F	17	m^2

Jelikož prvními dvěma způsoby vyšly hodnoty pro odlučovací plochu filtru téměř totožné a jsou navíc na straně bezpečnosti, volím filtr s reverzním proudem vzduchu o odlučovací ploše minimálně $36 m^2$.

8.10. Návrh filtru denního zásobníku

Hustota vzduchu a průměrná velikost částice zůstanou stejné, jako v kapitole 8.9.

Objemový průtok vzduchu volím z kapitoly 8.7.1, ve které jsem vypočítal potřebný objemový průtok pro dopravu materiálu v posuvné vrstvě.

$$\dot{V}_f = 110 \text{ m}^3/\text{hod}$$

Pro tento výpočet jsem použil pouze způsob s doporučeným měrným zatížením filtrační textilie dle Coopera [43], jelikož jsou tyto hodnoty velmi malé a přesahují dimenze jak grafů, tak tabulek u dalších variant řešení.

Tabulka 8.35 – Návrh filtru denního zásobníku – vstupní a vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Vstupní parametry			
Objemový tok vzduchu	\dot{V}_f	1,83	m ³ /min
Doporučené měrné zatížení filtrační textilie	AtC	3,00	stopa/min
Doporučené měrné zatížení filtrační textilie	AtC	0,9144	m/min
Vypočtené parametry			
Odlučovací plocha filtru	S_F	2,2	m ²

Jak je možné vidět z Tabulky 8.35, odlučovací plocha pro filtr denního zásobníku je pouze 2,2 m². Filtr s mechanickým oklepáváním by se tedy umístil přímo na denní zásobník.

Dále bych na filtr velkokapacitního sila i filtr denního zásobníku umístil explozní membránu, jelikož je v nich možnost vzniku výbušné atmosféry.

8.11. Návrh šnekového dopravníku

Výpočet šnekového dopravníku je proveden dle návrhového výpočtu dle Gajdůška a spol. [45].

Jestliže uvažuji 1 dávku obsahující 500 kg, kterou je potřeba dopravit do míchané nádoby během 1 minuty, vychází potřebný výkon dopravníku:

$$Q_m = 30\,000 \text{ kg/hod}$$

Návrhový výpočet šnekového dopravníku

Objemový výkon dopravníku:

$$Q_v = 3600 \cdot \frac{D_D^2 \pi}{4} \cdot s \cdot \psi \cdot n \cdot C_H \quad (8.11-1)$$

Doporučené hodnoty parametrů pro výpočet objemového dopravníku, součinitel plnění šneku, otáčky šneku a obvodovou rychlost šneku, jsou uvedeny v Tabulce 8.36.

Tabulka 8.36. Doporučené parametry pro návrh šnekového dopravníku [45]

Základní vlastnosti materiálu	Příklad	ψ	n [ot.s ⁻¹]	v [m.s ⁻¹]
neabrazivní, lehký práškovitý nebo zrnitý	uhelný prach, mouka zrní, prášk. vápno	0,45	2 až 4	0,5
neabrazivní zrnitý a práškovitý abrazivní	drobné uhlí, hrubozrnné sůl, cement, písek	0,30	1 až 2	0,2 až 0,4
velmi abrazivní, hrubě kusovitý, lepkavý	drobný koks, hrubozrnné vápno	0,15	0,2 až 1	0,1

Součinitel plnění šneku volím dle Tabulky 8.36:

$$\psi_s = 0,3$$

Doporučenou hodnotu pro otáčky šneku určím dle Tabulky 8.36.

$$n = 1 \text{ ot/s}$$

Stoupání šnekovnice volí se:

$$s_s \approx D.$$

Korekční součinitel šnekového dopravníku je pro horizontální orientaci:

$$C_{sH} = 1$$

Tabulka 8.37. Návrh šnekového dopravníku – vstupní parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Sypná hustota	ρ_b	1 250	kg/m ³
Potřebný výkon dopravníku	Q_m	30 000	kg/hod
Součinitel plnění žlabu	ψ_ξ	0,3	-
Otáčky šneku	n	1	ot./s
Korekční součinitel	$C_{\xi H}$	1	-

Objemový výkon dopravníku:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho_b} \quad (8.11-2)$$

Dopravní rychlost:

$$v = n \cdot s_\xi \quad (8.11-3)$$

Úpravou rovnice (8.11-2) se dostane vzorec pro výpočet průměru šnekovnice:

$$D_D = \sqrt[3]{\frac{4Q_v}{3600 \cdot \pi \cdot \psi \cdot n \cdot C_{\xi H}}} \quad (8.11-4)$$

Tabulka 8.38 - Návrh šnekového dopravníku – vypočtené parametry

VELIČINA	SYMBOL	HODNOTA	JEDNOTKA
Objemový výkon	Q_v	24	m ³ /hod
Dopravní rychlost	v	0,305	m/s
Průměr dopravníku	D_D	0,305	m

Jak je možné vidět v Tabulce 8.38, výsledný minimální průměr dopravníku vyšel $D_D = 305 \text{ mm}$. Dopravní rychlost materiálu vychází v doporučených mezích.

9. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout pneumatickou dopravu práškového materiálu pro daný přepravní výkon a provést výpočty potřebné k návrhu hlavních zařízení a následně na základě provedených výpočtů provést basic design hlavních aparátů.

Byla zpracována literární rešerše se zaměřením na vlastnosti, skladování, manipulaci, pneumatickou dopravu práškových materiálů a bezpečností opatření při těchto úkonech.

Dále byl navržen způsob dopravy od dodavatele materiálu k průmyslové lince. Zde se zvolil způsob dopravy práškového materiálu pomocí cisternového kamionu. Poté bylo možné vybrat komponenty potřebné pro správný chod linky pro dopravu práškového materiálu a zakreslení schématu zapojení zařízení.

Následně byly provedeny potřebné výpočty pro návrh velkokapacitního sila a denního zásobníku s ohledem na zastavěnou plochu těchto zařízení a potřebný objem materiálu, který je nutno uskladnit. Zároveň byla v tomto případě zvolena ochrana těchto zařízení před výbuchem.

Pro přepravu materiálu z cisternového kamionu do velkokapacitního sila byl vybrán vhodný režim pneumatické dopravy, odhadnutá přibližná dopravovaná vzdálenost a následně byl proveden návrhový výpočet pro dopravu materiálu ve zvoleném režimu. Díky návrhovému výpočtu byl vybrán vhodný zdroj stlačeného vzduchu, potřebný pro pohyb materiálu v trubce.

Pro přepravu materiálu z velkokapacitního sila do míchané rozpouštěcí nádoby byl také vybrán vhodný režim, který byl variantně spočítán podle volby rychlosti. Pro každou možnost byl proveden návrhový výpočet a vybrán vhodný zdroj stlačeného vzduchu.

Na základě návrhových výpočtů pneumatické dopravy, velkokapacitního sila a denního zásobníku byl vybrán vhodný druh pro odloučení částic od vzduchu, než bude vzduch vypuštěn do atmosféry. Pro každé odlučovací zařízení byl proveden návrhový výpočet a vybrán vhodný druh ochrany před výbuchem.

V poslední části této práce byl proveden návrhový výpočet pro šnekový dopravník, který dopravuje materiál z denního zásobníku do míchané rozpouštěcí nádoby.

10. Seznamy

10.1. Seznam grafů

Graf 2.1. Rozsévové křivky [1]	18
Graf 2.2. Porovnání průběhů tlaků při potlačené a nepotlačené explozi [6].....	24
Graf 6.1. Vliv geometrie kolene na jeho opotřebení [6]	51
Graf 6.2. Vliv geometrie kolene na úhel dopadu částice [6]	51
Graf 8.1 - Závislosti parametrů Up/U , $\mu\Gamma$ a ζ [9].....	76
Graf 8.2. Graf pro určení součinitele α [9]	90
Graf 8.3. Průběh frakční odlučivosti cyklónu	92
Graf 8.4 - Závislosti koncentrace prachu, průměrné velikosti částice a měrné zatížení filtrační textilie [9]	97

10.2. Seznam obrázků

Obr. 2.1. Stanovení velikosti částice (zrna) jako velikost průměru ekvivalentní koule nebo pro nepravidelný tvar zrna jako největšího rozměru [1]	18
Obr. 2.2. Znázornění měření úhlu přirozeného svahu sypké hmoty vysypáváním z válcové nádoby [1]	19
Obr. 2.3. Požární trojúhelník [2]	20
Obr. 2.4. Výbuchový pentagon (pro prachovzduchové směsi) [2]	21
Obr. 2.5. Meze výbušnosti [4]	22
Obr. 2.6. Schéma instalace zařízení pro odlehčení výbuchu na odlučovači prachu od RSBP spol. s.r.o. [5]	23
Obr. 2.7. Schéma instalace zařízení pro potlačení výbuchu systému na odlučovacím zařízení od RSBP spol. s.r.o. [5]	24
Obr. 2.8. Schéma systému pro detekci a potlačení výbuchu [6]	25
Obr. 2.9. Schéma instalace protiplamenné bariéry na odlučovači prachu RSBP spol. s r.o. [5] ...	25
Obr. 3.1. Vakuová těžba soli [7]	26
Obr. 4.1. Systém pro pneumatickou dopravu materiálu [8]	27
Obr. 4.2. Schéma hlavních součástí a aparátů pneumatického systému [9]	28
Obr. 4.3. Režimy pneumatické dopravy [10] a) Doprava materiálu ve vznosu, b) Doprava materiálu ve fluidizované vrstvě, c) Doprava materiálu v hromadné vrstvě, d) Doprava materiálu v pístové vrstvě	29
Obr. 4.4. Schéma uzavřeného pneumatického systému [6]	31
Obr. 4.5. Schéma podtlakového pneumatického systému [6]	32
Obr. 4.6. Schéma přetlakového pneumatického systému [6]	32
Obr. 4.7. Schéma kombinovaného pneumatického systému [6]	33
Obr. 4.8. Vykládání kamionu do sila [11]	34
Obr. 5.1. Princip funkce Rootsova dmyhadla [6]	35
Obr. 5.2. Schéma pístového kompresoru [12]	36
Obr. 5.3. Schéma kondenzačního sušení vzduchu [13]	37
Obr. 5.4. Adsorpční sušička vzduchu [14]	38
Obr. 5.5. Absorpční vysoušení [13]	39
Obr. 5.6. Membránové sušení [15]	40
Obr. 5.7. Sací hubice [15]	41
Obr. 5.8. Vysokotlaký komorový podavač [17]	42

Obr. 5.9. Schéma ejektorového podavače [6].....	43
Obr. 5.10. Schéma šnekového podavače [16].....	43
Obr. 5.11. Schéma rotačního podavače [15].....	44
Obr. 5.12. Usazovací komory a) jednoduchý systém, b) systém využívající síto [9]	45
Obr. 5.13. Schéma vírového odlučovače [19] 1) válcová část, 2) kuželová část, 3) vstupní trubka, 4) přepadová trubka 5) výstup odloučené fáze	46
Obr. 5.14. Filtr s mechanickým oklepáváním [20]	47
Obr. 5.15. Filtr s protiproudem vzduchu [20]	48
Obr. 5.16. Filtr s tlakovým pulzem vzduchu [20].....	49
Obr. 6.1. Koleno o nulovém rádiu [6]	52
Obr. 6.2. Koleno s vyměnitelným pancéřovým hřbetem [16].....	53
Obr. 6.3. Statický směšovač [6]	53
Obr. 7.1. Velkokapacitní vak [21]	54
Obr. 7.2. Hmotový tok [22]	55
Obr. 7.3. Jádrový tok [22]	55
Obr. 7.4. Pasivní prvky (vnořená výsypka – vlevo, rozrážecí kužel – vpravo) [16].....	56
Obr. 8.1. Schéma pneumatické dopravy	57
Obr. 8.2. Schéma sila/zásobníku	59
Obr. 8.3. Schéma soli v zásobníku/sile	60
Obr. 8.4. Doprava materiálu v pístové vrstvě [9]	73
Obr. 8.5. Doprava materiálu v hromadné vrstvě ve vertikální trubce (vlevo) [9], v horizontální trubce (vpravo) [38]	73
Obr. 8.6. Tangenciální zavedení trubky do sila [9]	87
Obr. 8.7. Geometrie cyklónového odlučovače [42]	88

10.3. Seznam tabulek

Tabulka 8.1. Dopravovaný materiál – distribuce velikosti částic (Příloha 1)	58
Tabulka 8.2. Návrh sila – vstupní parametry.....	62
Tabulka 8.3. Návrh sila – vypočtené parametry.....	62
Tabulka 8.4. Návrh denního zásobníku – vypočtené parametry	63
Tabulka 8.5. Doprava do sila – vstupní parametry.....	66
Tabulka 8.6. Doprava do sila – vypočtené rychlosti.....	66
Tabulka 8.7. Návrh dopravy materiálu ve vznosu – odhad rychlosti částice	67
Tabulka 8.8. Doprava do sila – horizontální sekce potrubí – vypočtené parametry	69

Tabulka 8.9. Doprava do sila – vertikální sekce potrubí – vypočtené parametry.....	71
Tabulka 8.10. Doprava do sila – celková ztráta potrubního systému – vypočtené parametry	71
Tabulka 8.11. Doprava do sila – vybrané vypočtené parametry	72
Tabulka 8.12. Doprava do denního zásobníku – režim pístové vrstvy – vstupní parametry	74
Tabulka 8.13. Doprava do denního zásobníku – režim pístové vrstvy – vypočtené parametry ...	76
Tabulka 8.14. Doprava do denního zásobníku – režim pístové vrstvy – iterační výpočet tlakové ztráty	77
Tabulka 8.15. Doprava do denního zásobníku – režim pístové vrstvy – vypočtené parametry pro výběr transportéru	77
Tabulka 8.16. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – vstupní parametry...	78
Tabulka 8.17. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta A – horizontální část	80
Tabulka 8.18. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta A – vertikální část	81
Tabulka 8.19. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta A – kolena .	82
Tabulka 8.20. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta A – celková tlaková ztráta potrubí.....	83
Tabulka 8.21. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta B – horizontální část	84
Tabulka 8.22. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta B – vertikální část	85
Tabulka 8.23. Doprava do denního zásobníku – režim hromadné vrstvy – Varianta B – kolena .	86
Tabulka 8.24. Tlakové ztráty – Varianta B – Vypočtené parametry.....	86
Tabulka 8.25. Návrh cyklónového odlučovače – vstupní parametry	89
Tabulka 8.26. Návrh cyklónového odlučovače – bezrozměrná geometrie [42]	89
Tabulka 8.27. Návrh cyklónového odlučovače – geometrie	89
Tabulka 8.28. Návrh cyklónového odlučovače – kritický průměr – vypočtené parametry	91
Tabulka 8.29. Návrh cyklónového odlučovače – průběh frakční odlučivosti.....	92
Tabulka 8.30. Návrh cyklónového odlučovače – tlaková ztráta cyklónu – vzduch	93
Tabulka 8.31. Návrh cyklónového odlučovače – tlaková ztráta cyklónu – vzduch/částice	94
Tabulka 8.32. Návrh filtru sila – Varianta A – dle Coopera [43].....	96
Tabulka 8.33. Návrh filtru sila – Varianta B – dle Turnera [44].....	96
Tabulka 8.34. Návrh filtru sila – Varianta C – dle v Klinzing a spol. [9]	97

Tabulka 8.35 – Návrh filtru denního zásobníku – vstupní a vypočtené parametry	98
Tabulka 8.36. Doporučené parametry pro návrh šnekového dopravníku [45]	99
Tabulka 8.37. Návrh šnekového dopravníku – vstupní parametry	100
Tabulka 8.38 - Návrh šnekového dopravníku – vypočtené parametry	100

10.4. Seznam příloh

Příloha 1 – Průmyslová sůl

Příloha 2 – Dmychadlo

Příloha 3 – Transportér

Příloha 4 – Měrné zatížení filtrační textilie

10.5. Seznam zdrojů

- [1] POLÁK, J., J. PAVLISKA a A. SLÍVA. *Dopravní a manipulační zařízení*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2001. ISBN 80-248-0043-8.
- [2] ŠIMONÍKOVÁ, I. *Způsoby ochrany před výbuchem – část 1: Primární protivýbuchová ochrana* [online]. 2014, Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz>
- [3] ČERNÍN, M. a spol. *Protivýbuchová ochrana staveb*. Profesis [online]. Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě, 2008, Dostupné z: <https://www.profesis.cz/>
- [4] *Hořlavé a výbušné látky* [online]. [cit. 2020-07-28]. Praha, Dostupné z: <http://old.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/bchv-p-002/prezentace.pdf>
- [5] RSBP SPOL. S R.O. *Požární a výbuchová ochrana* [online]. In: Dostupné z: <https://www.rsbp.cz/>
- [6] MILLS, D., J., M. G., & AGARWAL, V. K. *Handbook of pneumatic conveying engineering*. New York: Marcel Dekker. 2004. ISBN 0-8247-4790-9
- [7] SEDIVÝ, V. M., et al. *Processing of salt for chemical and human consumption*. In: 9th International Symposium on Salt. 2009.
- [8] *What is a pneumatic conveying system?* In: Bulk inside [online]. 2019 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://bulkininside.com/>
- [9] KLINZING, G. E., RIZK, F., & MARCUS, R. D. LEUNG, L.S. *Pneumatic conveying of solids a theoretical and practical approach (3. ed.)*. Dordrecht: Springer, 2010. ISBN 978-90-481-3608-7
- [10] *Doprava tuhých látek* [PDF Dokument]. Dostupné z: <http://fzp.ujep.cz/ktv/>
- [11] CABREJOS, F. J. a Thomas G. TROXEL. *Unloading pressure discharge trucks* [online]. San Luis Obispo CA, USA [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: www.ienike.com
- [12] SMOLEK, J. *Kontrola pístového kompresoru* [online]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/>. Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola technická Brno.
- [13] Úvod do pneumatiky: učebnice Festo Didactic. Postgraduální studium. 1. vyd. Praha: Ediční středisko Českého vysokého učení technického, 1989.
- [14] KOLARČÍK, K.; KAMINSKÝ, J.; VRTEK, M. *Kompresory*. Ostrava: VŠB, 2012.
- [15] LIŠKA, A. a P. NOVÁK. *Technika stlačeného vzduchu*. Praha: České vysoké učení technické, 1999. ISBN 80-01-01947-0.
- [16] MEDEK, J. *Mechanické pochody*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [17] Amteco. In: *Amteco spol. s r. o.* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <http://www.amteco.cz/>
- [18] DRAŽAN, F. a K. JEŘÁBEK. *Manipulace s materiálem*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1979. Česká matice technická.
- [19] NOVÁK, V., F. RIEGER a K. VAVRO. *Hydraulické pochody v chemickém a potravinářském průmyslu*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00144-7.
- [20] SHAH, K. P. Working, Design Considerations and Maintenance of Bag Type Fabric Filters [online]. Dostupné z: <https://practicalmaintenance.net/>
- [21] *Velkoobjemový vak Big Bag* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <https://www.hornbach.cz/>
- [22] POLÁK, Jaromír a Aleš SLÍVA. *Dopravní a manipulační zařízení III*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0963-X.
- [23] *Chloridy* [online]. In.: [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/repository/látky/chloridy.pdf>

- [24] Salt Institute. *The salt storage handbook: a practical guide for storing and handling deicing salt*. Alexandria, VA. 1997, Dostupné z: <https://idot.illinois.gov/Assets/uploads/files/Transportation-System/Manuals-Guides-&-Handbooks/T2/L016%20The%20Salt%20Storage%20Handbook.pdf>
- [25] DUŠÁTKO, A. *Bezpečnost práce při skladování sypkých hmot v zásobnících*. Výzkumný ústav bezpečnosti práce [online]. Jeruzalémská 9, Praha 1, 2010 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://vubp.cz/>
- [26] SCHWARTZ, L. *Material handling in power plants focusing on truck unloading* [online]. In: Clyde Bergemann Power Group, 2012, Dostupné z: <http://www.mcilvainecompany.com/>
- [27] *Solsan, a.s.* [online]. [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: www.solsan.cz
- [28] *HR Blowers UK Ltd* [online]. In: Dostupné z: <https://hrblowers.co.uk/>
- [29] RHODES, M. J. (ed.). *Introduction to particle technology*. John Wiley & Sons, 2008.
- [30] WEI, W., et al. *Experimental study on the solid velocity in horizontal dilute phase pneumatic conveying of fine powders*. Powder Technology, 2011, 212.3: 403-409.
- [31] HINKLE, B. L. *Acceleration of particles and pressure drops encountered in horizontal pneumatic conveying*. 1953. PhD Thesis. Georgia Institute of Technology.
- [32] ARASTOPOUR, H., et al. *Review of design equations for dilute phase gas-solids horizontal conveying systems for coal and related materials*. Institute of Gas Technology, Chicago, IL, Chicago, IL, 1979.
- [33] KLINZING, G. E., et al. *Pneumatic transport—a review (generalized phase diagram approach to pneumatic transport)*. Powder technology, 1987, 51.2: 135-149.
- [34] KLINZING, G. E., et al. *A simplified correlation for solids friction factor in horizontal conveying systems based on Yang's unified theory*. Powder technology, 1989, 58.3: 187-193.
- [35] HONG J., SHEN Y.S. *Flow characteristics of high density continuous conveying of solids*, Engineering Chemistry and Metallurgy 15 (1994) 122–128 (in Chinese).
- [36] RIEGER, F., V. NOVÁK a T. JIROUT. *Hydromechanické procesy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03286-8.
- [37] HALL, S. *Rules of thumb for chemical engineers. 5th ed.* Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 0123877857.
- [38] BHATIA, A. *Pneumatic Conveying Systems*. Continuing Education and Development, Inc., Stony Point, NY, 2019, 10980: 57.
- [39] MARCUS, R. D. *Pneumatic conveying of solids*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [40] WEBER, M.: *Stromung-Fordertechnik*. Krausskopf Verlag, Mainz (1973)
- [41] KONNO, H.; SAITO, S. *Pneumatic conveying of solids through straight pipes*. Journal of chemical engineering of Japan, 1969, 2.2: 211-217.
- [42] WANG, Lawrence K., et al. (ed.). *Air pollution control engineering*. Totowa, NJ: Humana press, 2004.
- [43] COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. *Air pollution control: A design approach*. Waveland Press, 2010.
- [44] TURNER, J. H., et al. *Fabric filters*. Pollution prevention regional information center, 1998.
- [45] GAJDŮŠEK, J.; ŠKOPÁN, M. *Teorie dopravních a manipulačních zařízení*. 1. vyd. Brno: rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1988. 277 s.
- [46] ŠTENGL, L. *Studie středotlaké pneumatické dopravy popílku* [online]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jiří Hemerka, CSc.

- [47] WYPYCH, P. a D. HASTIE. *Theoretical Modelling of Rotary Valve Air Leakage for Pneumatic Conveying Systems* [online]. 2002, Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/273461637>
- [48] Čištění plynů [online]. In.: Fakulta životního prostředí UJEP v Ústí nad Labem, Dostupné z: <https://www.fzp.ujep.cz/>
- [49] WENDT, D, T STONE a D SCHROEDER. *Salt pile stability: a mathematical model* [online]. Moorhead, MN 56560. U.S.A., 1987, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>. Department of Mathematics, Moorhead State University. Vedoucí práce R. M. JEPPSON.
- [50] *Transportér TPA pro pneumatickou dopravu*. In: Sklenář, s. r. o. [online]. Dostupné z: <https://www.sklenar-technologie.cz/>