

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**STUDIE STŘEDOTLAKÉ PNEUMATICKÉ DOPRAVY
POPÍLKU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Jiřímu Hemerkovi, CSc. vedoucímu mé diplomové práce, za jeho cenné rady, pomoc a odborné vedení při jejím vypracování.

SOUHRN

Cílem této diplomové práce je uvést rozdělení systémů pneumatické dopravy a popsat teoretické základy potřebné pro výpočet tlakové ztráty dopravní trasy a volbu optimálních parametrů při pneumatické dopravě. Tyto teoretické poznatky jsou následně aplikovány na výpočet tlakové ztráty zadané dopravní trasy, která slouží k dopravě popílku od výsypky elektrického odlučovače do zásobníkového sila v Teplárně Kolín. Po výpočtu tlakové ztráty je následně zvolen optimální průměr potrubí dopravní trasy a dopravní rychlost s ohledem na investiční a provozní náklady. Nakonec je proveden přepočet tlakové ztráty s optimalizovanými parametry a zvolen vhodný podávač materiálu.

Klíčová slova: pneumatická doprava, tlaková ztráta dopravní trasy, doprava popílku, metoda aditivnosti, podávač materiálu.

SUMMARY

This thesis' goal is to introduce division of pneumatic conveying systems and to describe theoretical basis needed for calculating pressure drop of conveying path and choice of optimal pneumatic conveying parameters. This theoretical knowledge is applied for pressure drop calculating of ash conveying path from electrical separator hopper to receiver in Heating plan Kolín. After the pressure drop calculation optimal diameter of conveying path and conveying velocity is chosen with regard to cost of investment and running cost. In consequence new pressure drop calculation with optimal parameters is made and suitable material feeder is chosen.

Key words: pneumatic conveying, pressure drop of conveying path, conveying of ash, method of additivity, material feeder.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Studie středotlaké pneumatické dopravy popílků“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Hemerky, CSc., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 28. 6. 2017

Bc. Libor Štengl

.....

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A JEDNOTEK	4
1. ÚVOD	6
2. PNEUMATICKÁ DOPRAVA	6
2.1 Rozdělení systémů pneumatické dopravy	7
2.2 Rozdělení z hlediska styku materiálu se vzduchem.....	7
2.2.1 Otevřený systém	8
2.2.2 Uzavřený systém.....	8
2.3 Rozdělení z hlediska tlaku v potrubí.....	8
2.3.1 Přetlakový systém	8
2.3.2 Podtlakový systém	9
2.3.3 Smíšený systém.....	10
2.4 Rozdělení z hlediska velikosti tlakové ztráty.....	11
2.4.1 Nízkotlaký systém.....	11
2.4.2 Středotlaký systém	11
2.4.3 Vysokotlaký systém	12
2.5 Rozdělení z hlediska časového režimu provozu	12
2.6 Vlastnosti dopravovaného materiálu.....	12
2.6.1 Velikost.....	12
2.6.2 Vlhkost.....	12
2.6.3 Tvrdost	13
2.6.4 Hořlavost.....	13
2.6.5 Toxicita a radioaktivita	13
2.7 Podáváče materiálu	14
2.7.1 Rotační podáváč.....	14
2.7.2 Šnekový podáváč	15
2.7.3 Ejektorový (Venturiho) podáváč	15

2.7.4	Komorový podávač.....	16
2.7.5	Průtokový podávač	16
3.	VÝPOČET TLAKOVÝCH ZTRÁT PŘI PNEUMATICKÉ DOPRAVĚ	18
3.1	Rovnice tlakového spádu při pneumatické dopravě.....	18
3.2	Pohybová rovnice částice a její řešení pro ustálenou šikmou dopravu.....	19
3.2.1	Alternativa pohybové rovnice částice pro ustálenou šikmou dopravu	20
3.2.2	Součinitel tření dopravovaného materiálu	21
3.2.3	Poměrná rychlost $\beta = u / v$	21
3.2.4	Volba dopravní rychlosti	21
3.3	Součinitel dopravy	21
4.	VÝPOČET STŘEDOTLAKÉ PNEUMATICKÉ DOPRAVY	23
4.1	Metoda aditivnosti.....	23
4.1.1	Princip aditivnosti	24
4.2	Modifikovaná metoda aditivnosti	24
4.2.1	První varianta modifikované metody aditivnosti.....	25
4.2.2	Druhá varianta modifikované metody aditivnosti	25
4.3	Urbanova metoda	25
5.	NÁVRH OPTIMÁLNÍCH PARAMETRŮ PNEUMATICKÉ DOPRAVY	26
5.1	Volba průměru dopravní trasy s ohledem na provozní náklady	26
5.2	Volba optimální dopravní rychlosti	27
6.	VÝPOČET TLAKOVÉ ZTRÁTY DOPRAVNÍ TRASY POUŽITÍM MODIFIKOVANÉ METODY ADITIVNOSTI.....	29
6.1	Vstupní parametry	29
6.2	Postup výpočtu	30
6.2.1	Výpočet tlaku na konci úseku.....	30
6.2.2	Výpočet tlaku na konci úseku - 1. iterace.....	38
7.	OPTIMALIZACE PNEUMATICKÉ DOPRAVY.....	42

7.1	Optimalizace průměru potrubí dopravní trasy	42
7.2	Volba dopravní rychlosti.....	44
7.3	Souhrn parametrů pneumatické dopravy	45
8.	VÝPOČET TLAKOVÉ ZTRÁTY TRASY PNEUMATICKÉ DOPRAVY PO OPTIMALIZACI PARAMETRŮ	45
9.	VOLBA VHODNÉHO PODÁVAČE MATERIÁLU.....	46
9.1	Návrh výšky gravitační komory průtokového podávače	46
10.	ZÁVĚR	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
	SEZNAM PŘÍLOH.....	50

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A JEDNOTEK

Označení	Jednotka	Název veličiny
A	[m ²]	plocha průřezu potrubí
c ₀	[J/kg·K]	měrná tepelná kapacita plynu před podávčem materiálu
c _m	[J/kg·K]	měrná tepelná kapacita materiálu
C _α	[1]	korekce na úhel oblouku
d	[m]	vnitřní průměr potrubí
d _{opt}	[m]	optimální vnitřní průměr potrubí
dp	[Pa]	diferenciál tlaku
ds	[m]	diferenciál délky dráhy
dt	[s]	diferenciál času
du	[m/s]	diferenciál rychlosti dopravovaného materiálu
dv	[m/s]	diferenciál rychlosti dopravního plynu
F _a	[N]	aerodynamický odpor částice
F _g	[N]	gravitační síla působící na částici
Fr	[1]	Froudeho číslo potrubí
Fr _č	[1]	Froudeho číslo částice
Fr _s	[1]	převrácená hodnota Froudeho čísla
F _T	[N]	odporová síla proti pohybu částice v potrubí
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
h	[m]	převýšení dopravní trasy
H _g	[m]	výška sloupce provzdušněného materiálu
k	[1]	Gasterstädtův součinitel dopravy
l	[m]	délka dopravní trasy
l _o	[m]	délka oblouku dopravní trasy
\dot{M}	[kg/s]	hmotnostní tok plynu
M _č	[kg]	hmotnost částice
\dot{M}_m	[kg/s]	hmotnostní tok materiálu
p	[Pa]	tlak
p ₀	[Pa]	tlak na počátku dopravní trasy
p _b	[Pa]	barometrický tlak
p _d	[Pa]	dynamický tlak
p _f	[Pa]	hydrostatický tlak sloupce materiálu
r	[J/kg·K], [m]	měrná plynová konstanta, poloměr oblouku potrubí
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	plocha průřezu dopravní trasy
T	[K]	termodynamická teplota dopravované směsi
T ₀	[K]	termodynamická teplota nasávaného vzduchu

Označení	Jednotka	Název veličiny
t_0	[°C]	teplota nasávaného vzduchu
t_m	[°C]	teplota dopravovaného materiálu
u	[m/s]	rychlost dopravovaného materiálu
u_{vz}	[m/s]	rychlost vznosu částic
V	[m ³]	objem plynu
\dot{V}	[m ³ /s]	objemový tok
v	[m/s]	dopravní rychlost plynu
v_0	[m/s]	počáteční dopravní rychlost plynu
v_{min}	[m/s]	minimální dopravní rychlost plynu
Δp	[Pa]	rozdíl tlaků
Δp_{m1}	[Pa]	tlaková ztráta způsobená třením materiálu
Δp_{m2}	[Pa]	tlaková ztráta způsobená zdvihem materiálu
Δp_{m3}	[Pa]	tlaková ztráta způsobená místními odpory při průchodu materiálu
$\Delta p_{u,m}$	[Pa]	tlaková ztráta na urychlení materiálu
$\Delta p_{u,v}$	[Pa]	tlaková ztráta na urychlení plynu
Δp_{v1}	[Pa]	tlaková ztráta způsobená třením plynu
Δp_{v2}	[Pa]	tlaková ztráta způsobená zdvihem plynu
Δp_{v3}	[Pa]	tlaková ztráta způsobená místními odpory při průchodu plynu
Δp_z	[Pa]	tlaková ztráta
α	[°]	úhel oblouku
β_v	[1]	poměrná rychlost
γ	[1]	součinitel polohy oblouku
ε	[1]	poréznost
ζ	[1]	ztrátový součinitel oblouku
η	[Pa·s]	dynamická viskozita
λ	[1]	třecí součinitel
μ	[1]	směšovací poměr
ν	[m ² /s]	kinematická viskozita
ξ_y	[1]	základní hodnota součinitele odporu materiálu
π	[1]	Ludolfovo číslo
ρ	[kg/m ³]	hustota plynu
ρ_f	[kg/m ³]	sypná hmotnost provzdušněného materiálu
ρ_m	[kg/m ³]	hustota materiálu
ρ_s	[kg/m ³]	sypná hmotnost materiálu
τ	[Pa]	tečné napětí na stěně vlivem proudění plynu
τ_m	[Pa]	tečné napětí na stěně vlivem proudění materiálu
υ	[°]	sklon úseku dopravní trasy

1. ÚVOD

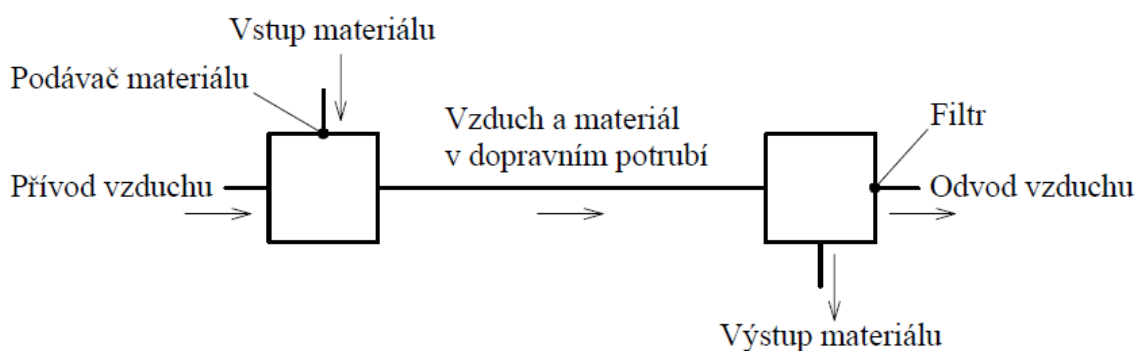
Tato práce se zabývá výpočtem a optimalizací parametrů středotlakého systému pneumatické dopravy, který slouží k dopravě popílku v elektrárně od výsypky elektrického odlučovače do zásobníkového sila. V teoretické části práce je nejdříve uvedeno rozdělení a popis systémů pneumatické dopravy z různých hledisek. Následuje teoretický popis metod výpočtu tlakové ztráty při pneumatické dopravě, který je doplněn metodami pro optimalizaci a volbu parametrů pneumatické dopravy. V praktické části práce je proveden výpočet tlakové ztráty při pneumatické dopravě zvolenou metodou a dále je provedena optimalizace vstupních parametrů dopravy, tedy volba vhodného vnitřního průměru potrubí a dopravní rychlosti. Na základě těchto parametrů je vypočtena celková tlaková ztráta trasy, která slouží pro výpočet parametru zvoleného podáváče materiálu.

2. PNEUMATICKÁ DOPRAVA

Pneumatické dopravní systémy slouží k dopravování práškových a zrnitých materiálů na delší vzdálenosti. Systémové požadavky na pneumatickou dopravu jsou stlačený plyn, nejčastěji vzduch, zařízení na přívod dopravovaného materiálu, potrubní trasa a zásobník, do kterého potrubní trasa ústí. Výhodou pneumatické dopravy je možnost vedení dopravní trasy uvnitř, kde je vedení trasy přizpůsobeno vnitřnímu uspořádání budovy, i vně budovy. Je možné dopravovat vodorovně, šikmo i svisle. Nevýhody pneumatické dopravy jsou většinou spojeny s některými vlastnostmi materiálů, které jsou popsány v kapitole 2.6 a také vyšší spotřeba energie v porovnání s mechanickou dopravou. Využití pneumatické dopravy je široké. Můžeme se s ní setkat např. v továrnách, ve výrobních a zpracovatelských podnicích, v elektrárnách, v zemědělství, v dřevozpracujících provozech a dále. Jejím prostřednictvím se dopravují různé materiály jako např.:

- stavební materiály – cement, vápno, vápenec
- zemitá ruda
- uhlí a popílek
- v potravinářském průmyslu – zrní, slad, chmel, cukr, mouka
- v dřevozpracujícím průmyslu piliny, hobliny

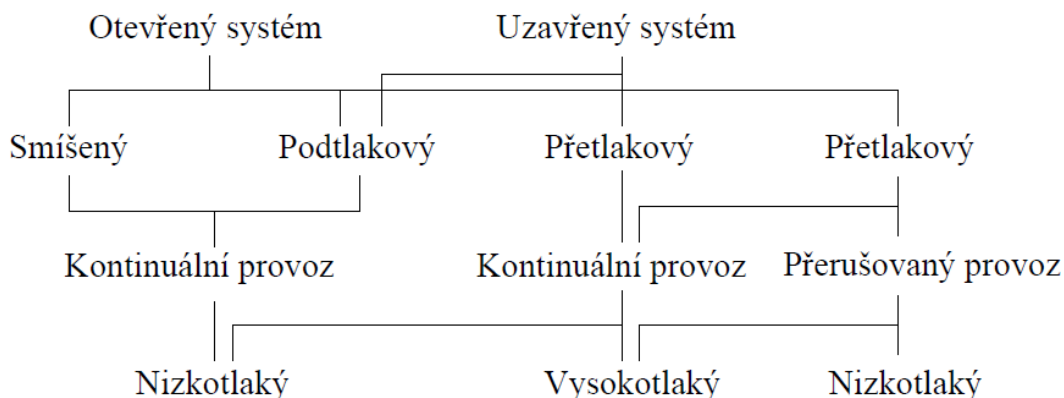
Na obr. 2.1 je schéma základního uspořádání systému pneumatické dopravy.



Obr. 2.1 Základní prvky pneumatického dopravního systému

2.1 Rozdělení systémů pneumatické dopravy

Systémy pneumatické dopravy se rozdělují podle různých hledisek, které závisejí především na druhu dopravovaného materiálu, jeho množství a dopravní vzdálenosti. Většinu z nich tvoří otevřené systémy s kontinuálním provozem. K dopravování materiálů je možné využívat podtlak, přetlak nebo jejich kombinaci. Variabilita volby dopravního systému je zobrazena na obr. 2.2, na kterém je znázorněno rozdělení systémů pneumatické dopravy.



Obr. 2.2 Rozdělení systémů pneumatické dopravy [2]

2.2 Rozdělení z hlediska styku materiálu se vzduchem

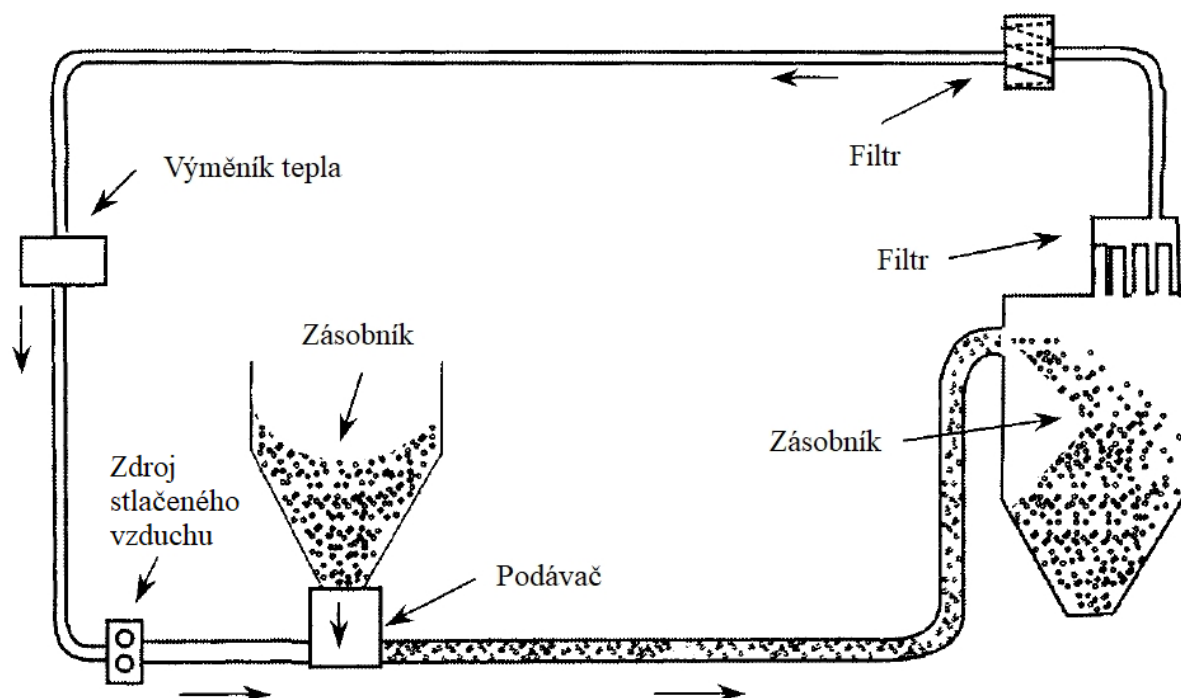
Toto dělení je podle způsobu nakládání s dopravním plynem.

2.2.1 Otevřený systém

Otevřené systémy jsou používány pro dopravu většiny druhů materiálu. Na začátku dopravní trasy je vzduch nasáván a na konci je po odloučení dopravovaného materiálu vypouštěn. Použití tohoto systému je možné, pokud se nedopravují toxické, radioaktivní nebo hořlavé materiály. Schéma tohoto systému je zobrazeno např. na obr. 2.4.

2.2.2 Uzavřený systém

Uzavřené systémy jsou používány jen ve výjimečných případech pro dopravu toxických, radioaktivních nebo hořlavých materiálů s nebezpečím výbuchu během dopravy. Jako dopravní látka v tomto systému neslouží vzduch ale inertní plyn, např. dusík. Schéma uzavřeného systému je na obr. 2.3.



Obr. 2.3 Schéma uzavřeného systému pneumatické dopravy [2]

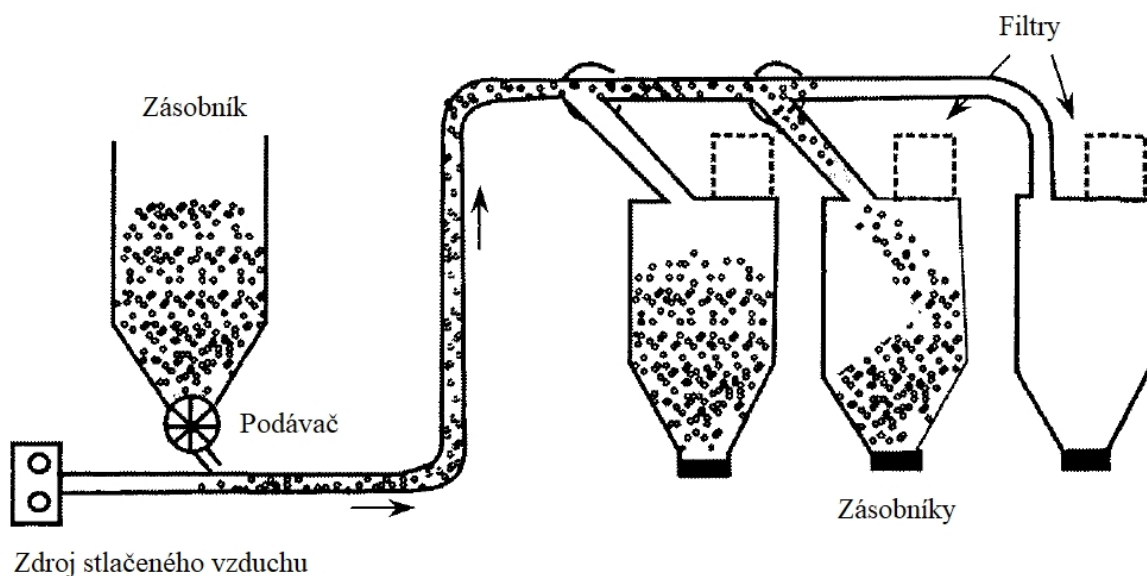
2.3 Rozdělení z hlediska tlaku v potrubí

Podle tlaku v potrubí vůči barometrickému tlaku okolí se pneumatická doprava dělí na podtlakové, přetlakové a smíšené systémy.

2.3.1 Přetlakový systém

Přetlakové systémy jsou nejčastěji používanými systémy v pneumatické dopravě. Zdroj dopravního vzduchu je umístěn před místem podávání materiálu na začátku dopravní

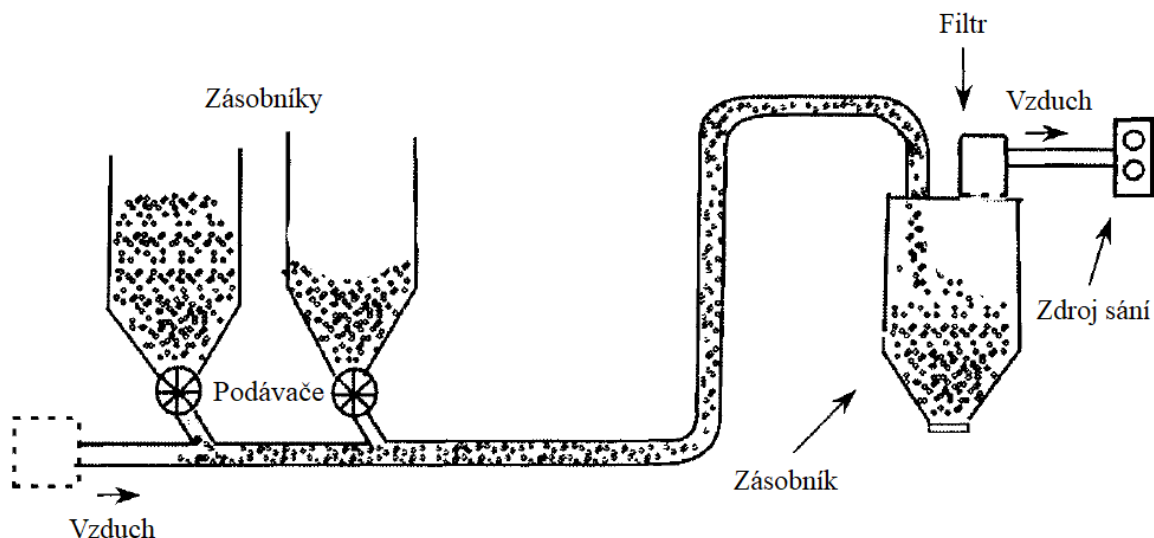
trasy. V dopravním potrubí je přetlak vůči okolí. Výhodou tohoto systému je možnost dopravovat materiál z jednoho místa na více míst, jak je znázorněno na obr. 2.4. Nevýhodou přetlakové dopravy je složitější řešení podáváče materiálu. Nicméně je k dispozici množství podáváčů, které je možno použít jako např. šnekový podáváč, průtokový podáváč nebo komorový podáváč. [1]



Obr. 2.4 Schéma přetlakového systému pneumatické dopravy [2]

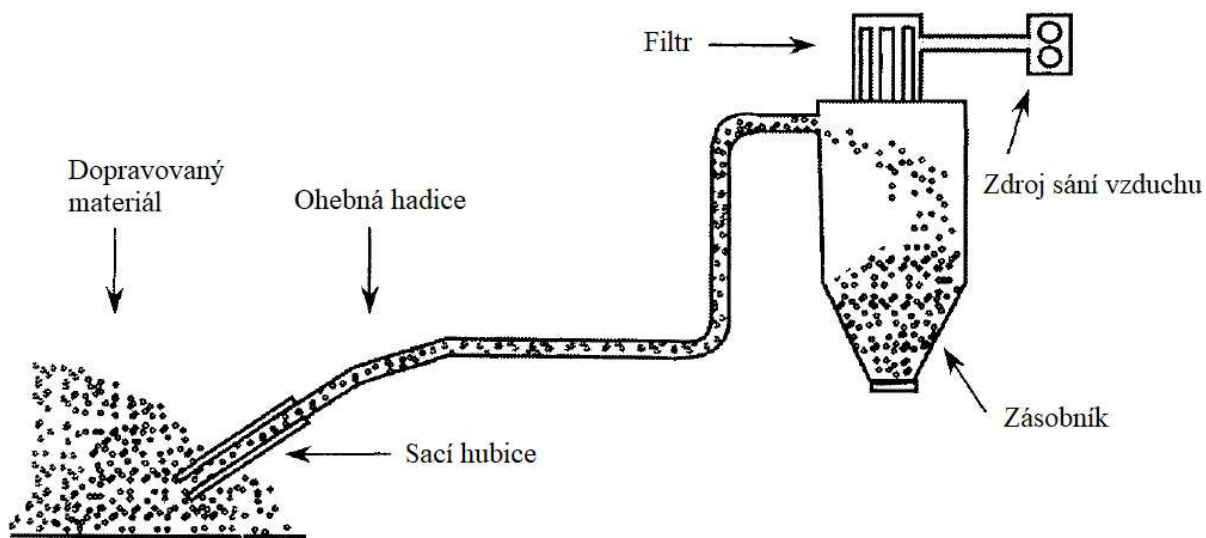
2.3.2 Podtlakový systém

V podtlakovém systému je zdroj sání umístěn za odlučovačem na konci dopravní trasy a po celé délce dopravní trasy je v potrubí vůči okolí podtlak. Schéma uspořádání je na obr. 2.5. Toto uspořádání je vhodné především pro dopravování škodlivých materiálů, kdy nehrozí vzhledem k podtlaku v potrubí únik do okolí dopravní trasy. Mezi výhody patří možnost dopravy materiálu z více míst do jednoho zásobníku a také bezproblémové podávání materiálu. Nevýhodou je omezený dosažitelný tlakový spád na dopravu (vakuum). [1]



Obr. 2.5 Schéma podtlakového systému pneumatické dopravy [2]

Podtlaková doprava se také nejčastěji používá k dopravě materiálu z otevřeného úložiště, odkud je materiál nasáván sací hubicí a dopravován na místo určení. Uspořádání tohoto systému je na obr. 2.6.

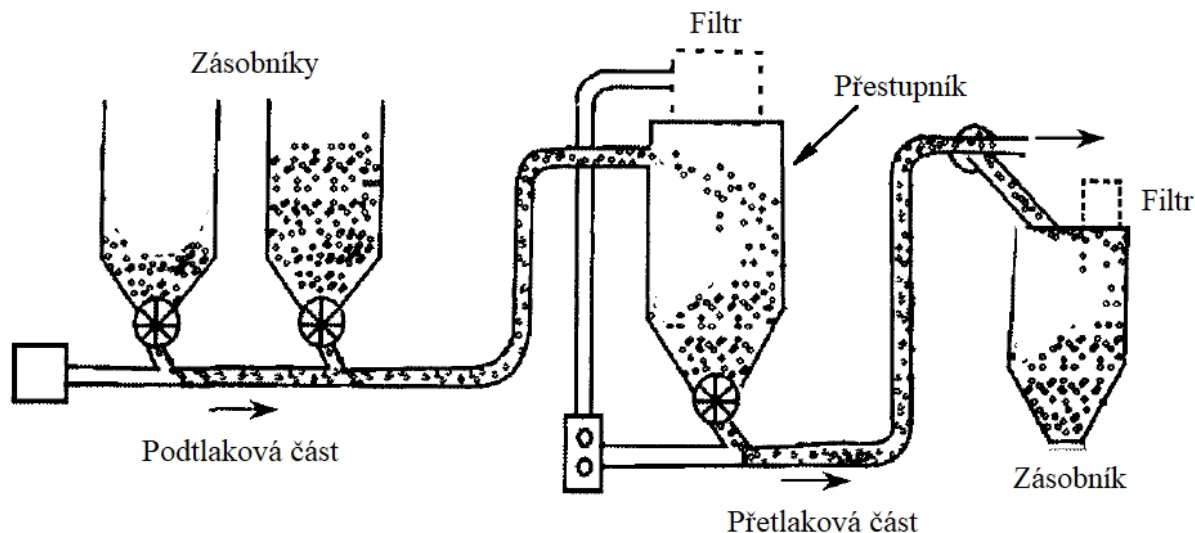


Obr. 2.6 Schéma podtlakového systému s otevřeným úložištěm materiálu [2]

2.3.3 Smíšený systém

Tento systém, viz obr. 2.7, se skládá z podtlakové a přetlakové části. Zdroj dopravního tlaku se v tomto případě nachází uprostřed dopravní trasy. Výhodou tohoto uspořádání je možnost dopravy materiálu z více zásobníků do více zásobníků a bezproblémové

podávání materiálu na začátku trasy. Přestup materiálu z podtlakové do přetlakové části trasy zajišťuje tzv. „přestupník“, což je odlučovač s rotačním podávatelem sloužícím jako tlakový uzávěr. [1]



Obr. 2.7 Schéma smíšeného systému pneumatické dopravy [2]

2.4 Rozdělení z hlediska velikosti tlakové ztráty

Podle velikosti tlakové ztráty se systémy pneumatické dopravy dělí na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké.

2.4.1 Nízkotlaký systém

U nízkotlaké pneumatické dopravy se dosahuje tlakové ztráty do 10 kPa. Zdrojem dopravního plynu je většinou ventilátor nebo ejektorový podáváč. Nízkotlaká doprava může být podtlaková i přetlaková a při výpočtech tlakové ztráty se zanedbává změna hustoty dopravního plynu. [1]

2.4.2 Středotlaký systém

U středotlaké pneumatické dopravy se dosahuje tlakové ztráty od 10 do 50 kPa. Zdrojem dopravního vzduchu je dmychadlo. Stejně jako u nízkotlakého systému může být středotlaká doprava podtlaková i přetlaková a při výpočtech tlakové ztráty je nutné počítat se změnou hustoty dopravního plynu. [1]

2.4.3 Vysokotlaký systém

U vysokotlaké pneumatické dopravy se dosahuje tlakové ztráty nad 50 kPa. Zdrojem dopravního vzduchu je pro tlak 80 až 100 kPa dmychadlo, pro tlak nad 100 kPa kompresor. Tato doprava může být pouze přetlaková. [1]

2.5 Rozdělení z hlediska časového režimu provozu

Výše zmíněné systémy pneumatické dopravy pracují v kontinuálním provozu. V některých případech je ale potřeba např. z důvodu omezené kapacity zásobníku nebo v návaznosti na požadovanou technologii provoz přerušovat v pravidelných intervalech. Takový systém se nazývá diskontinuální.

2.6 Vlastnosti dopravovaného materiálu

Vlastnosti dopravovaného materiálu zásadně ovlivňují volbu systému a provoz pneumatické dopravy. Každý materiál má určitá omezení pro jeho dopravu. Na projektantovi je, aby navrhl vhodný systém a provozní podmínky, které minimalizují nežádoucí vliv vlastností materiálu na dopravu.

2.6.1 Velikost

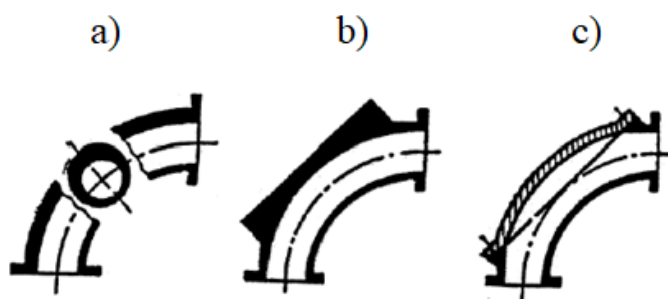
Na velikosti dopravovaného materiálu závisí rychlost vnosu částic, s kterou úzce souvisí střední rychlosti částic a střední rychlost proudu plynu v potrubí. Dopravování příliš jemných materiálů s sebou nese riziko zvýšeného zanášení potrubní trasy, zejména v obloucích. U dopravování zrnitých materiálů při příliš vysokých dopravních rychlostech zase hrozí drcení materiálu v místech změny směru proudění dopravy a tím snížení kvality dopravovaného materiálu. Jako příklad takového materiálu je možné uvést krystalový cukr.

2.6.2 Vlhkost

Vysoká vlhkost dopravovaného materiálu způsobuje jeho lepivost, která následně způsobuje problémy při dávkování materiálu podavačem do potrubí, při samotné dopravě a také při vyprazdňování zásobníku na konci dopravní trasy. Vlivem přilnavosti materiálu ke stěnám potrubí dochází k jeho zanášení, především v obloucích potrubní trasy a hrozí její ucpání.

2.6.3 Tvrdost

Při dopravování tvrdého materiálu, dochází k abrazi součástí potrubí v nejvíce namáhaných místech. Těmi jsou místa změny směru proudění materiálu jako oblouky dopravního potrubí a podáváče materiálu. Největší vliv na abrazi potrubí má dopravní rychlost. Je proto nutné při dopravě tvrdých a sypkých materiálů, kdy hrozí zvýšená abraze potrubí, volit nižší dopravní rychlost. Jako ochrana potrubí slouží vyztužení nebo zesílení stěny oblouků, jak je znázorněno na obr. 2.8. Obr. a) znázorňuje zesílení potrubní stěny oblouku, obr. b) vyztužení oblouku betonem a obr. c) zesílenou a vyměnitelnou část oblouku, která je abrazi nejvíce namáhaná.



Obr. 2.8 Příklady vyztužení oblouku dopravního potrubí [7]

2.6.4 Hořlavost

U mnoho materiálů může dojít k samovznícení, pokud jsou jemně rozptýleny v plynu o vyšší teplotě. Mezi takové materiály patří potraviny jako např. cukr, mouka, kakao, syntetické materiály, chemikálie, farmaceutické suroviny a paliva jako dřevo nebo uhlí. Pokud je k dopravě používán uzavřený systém, doporučuje se použít jako dopravní látku dusík místo vzduchu. V případě otevřeného systému je nutné, aby byla potrubní trasa opatřena bezpečnostními prvky jako např. přetlakové pojistné ventily.

2.6.5 Toxicita a radioaktivita

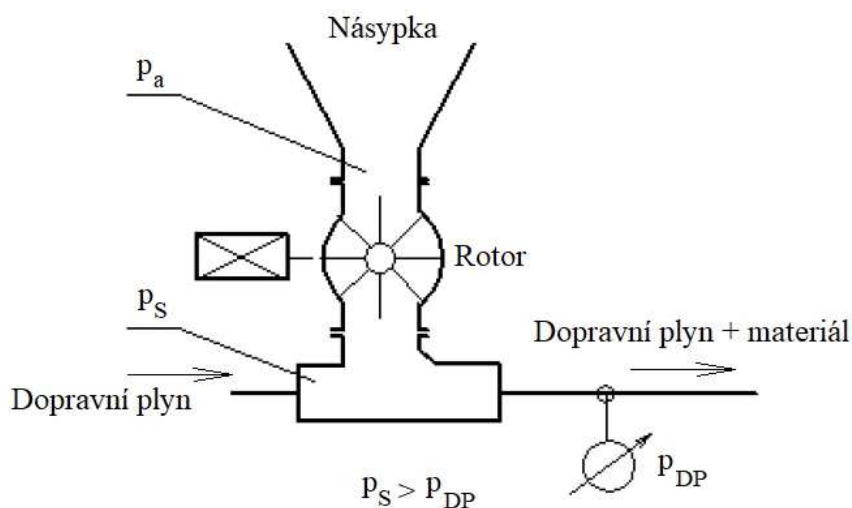
Při dopravování toxického materiálu je třeba zajistit, aby nedošlo k jeho úniku do okolí. Z tohoto důvodu se pro dopravu zmíněných materiálů používají podtlakové systémy. Pokud lze dopravní vzduch po filtraci vypouštět do okolí, je možné použít otevřený systém. V opačném případě je nutné použít uzavřený systém. Pro dopravu radioaktivních materiálů lze použít výhradně uzavřený, podtlakový systém dopravy.

2.7 Podáváče materiálu

Každý podáváč pneumatické dopravy má za úkol podat dopravovaný materiál v požadovaném množství do dopravního potrubí. V podtlakových systémech je materiál jednoduše přidáván do potrubí při barometrickém tlaku okolí a nehrozí tak žádný únik materiálu nebo další problémy způsobené s přetlakem v místě podáváče. V přetlakových systémech je potřeba řešit několik problémů a zvolit vhodný podáváč pro konkrétní zadání. Při návrhu je potřeba uvažovat únik dopravního vzduchu podáváčem, tlakovou ztrátu, vlastnosti dopravovaného materiálu a údržbu. Podáváč slouží v systému pneumatické dopravy zároveň jako tzv. tlakový uzávěr, který překonává tlak daný odporem dopravního potrubí při dopravě. Každý podáváč vykazuje určitou ztrátu energie potřebnou pro vytvoření tlakového uzávěru. Existuje několik druhů podáváčů, které se svou konstrukcí, funkcí a použitím liší. Pro kontinuální pneumatickou dopravu slouží rotační, šnekový, ejekční a průtokový podáváč. Pro diskontinuální dopravu se používá podáváč komorový.

2.7.1 Rotační podáváč

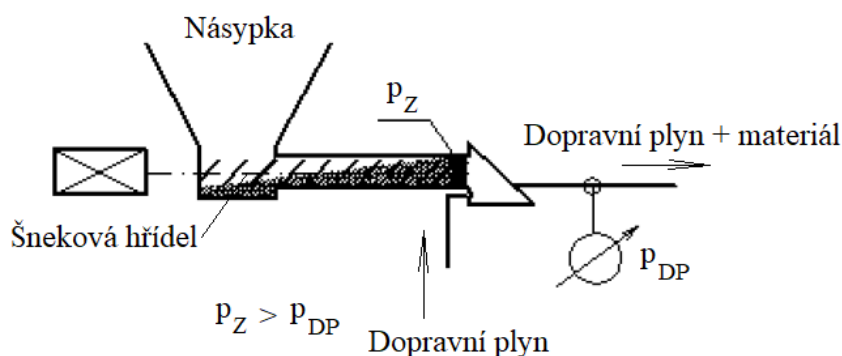
Schéma rotačního podáváče je na obr. 2.9. Jako tlakový uzávěr zde slouží odpor rotoru podáváče. Ztráta energie na vytvoření tlakového uzávěru je u tohoto podáváče tvořena energií spotřebovanou na pohon rotoru podáváče a také ztrátou tlakového vzduchu, který z podáváče uniká netěsnostmi ve skříni rotoru a je vynášen jeho kapsami. [8]



Obr. 2.9 Schéma rotačního podáváče [8]

2.7.2 Šnekový podávač

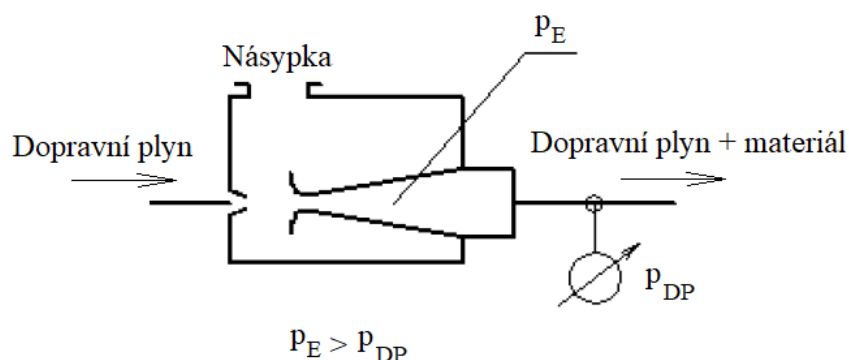
Schéma šnekového podávače je na obr. 2.10. Zde slouží jako tlakový uzávěr odpor materiálové zátky vytvořené šnekem podávače. Energetická ztráta pro vytvoření tlakového uzávěru je u tohoto podávače tvořena energií potřebnou pro pohon šnekové hřídele. [8]



Obr. 2.10 Schéma šnekového podávače [8]

2.7.3 Ejektorový (Venturiho) podávač

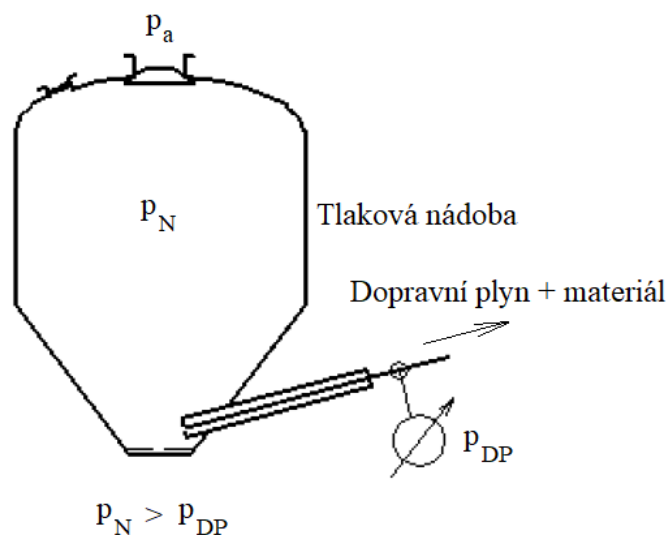
Schéma ejektorového podávače je na obr. 2.11. Jako tlakový uzávěr zde slouží ejekční účinek proudu dopravního plynu. U ejektorového podávače je energetická ztráta k vytvoření tlakového uzávěru tvořena energií potřebnou k vytvoření ejekčního účinku proudu vzduchu. [8]



Obr. 2.11 Schéma ejekčního podávače [8]

2.7.4 Komorový podávač

Schéma komorového podávače je na obr. 2.12. Tento podávač se používá hlavně v diskontinuálních provozech pneumatické dopravy. Jako tlakový uzávěr zde slouží tlaková nádoba. Energetická ztráta pro vytvoření tlakového uzávěru je u tohoto podávače tvořena odvodušněním nádoby podávače na atmosférický tlak při fázi plnění z plného provozního tlaku při fázi dopravy. [8]



Obr. 2.12 Schéma komorového podávače [8]

2.7.5 Průtokový podávač

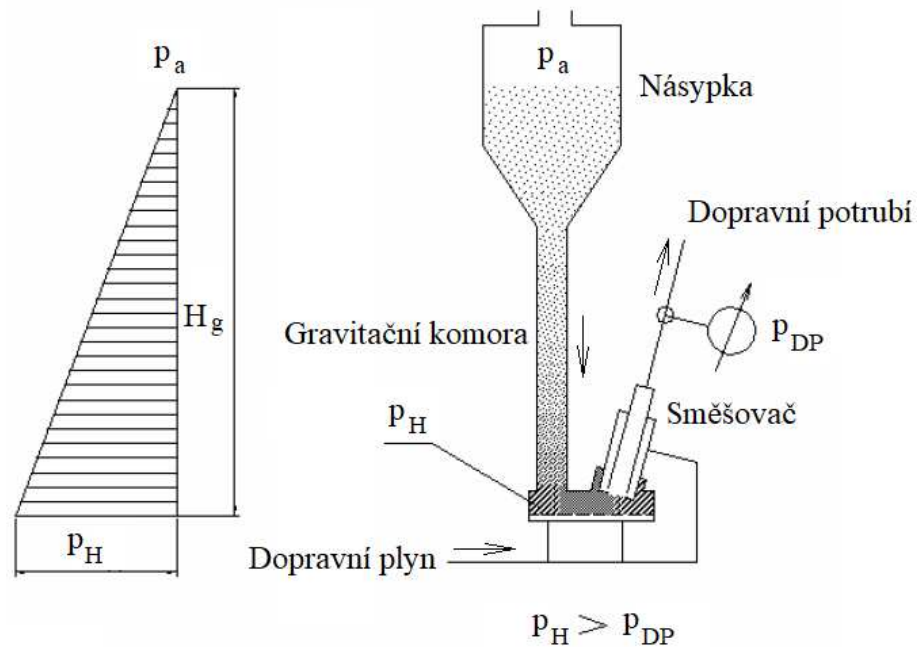
Tento typ podávače využívá k vytvoření tlakového uzávěru potenciální energii shromážděného materiálu. Odpadají zde tedy ztráty energie, které jsou uvedeny u ostatních druhů podávačů. Z tohoto důvodu je tento podávač energeticky výhodnější než ostatní. Princip dopravy materiálu průtokovým podávačem je znázorněn na obr. 2.13. Tlakový uzávěr je tvořen hydrostatickým tlakem p_f [Pa] sloupce provzdušněného materiálu o hustotě ρ_f [kg/m³] v gravitační komoře podávače. Hydrostatický tlak je zhruba úměrný výšce sloupce provzdušněného materiálu H_g [m] podle vzorce

$$p_f = H_g \cdot \rho_f \cdot g \quad (2.1)$$

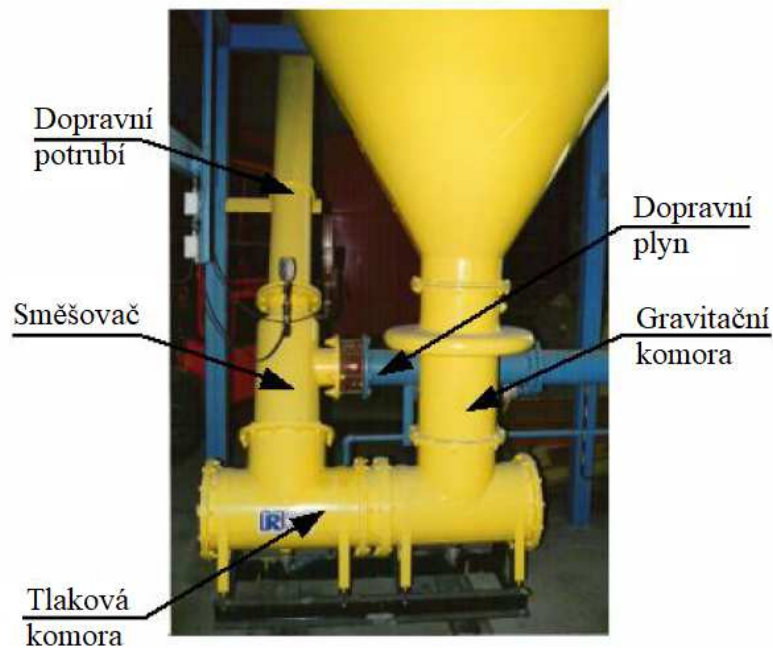
, kde g [m/s²] je tíhové zrychlení. Výška musí být taková, aby byl vytvořený hydrostatický tlak v rovnováze s odporem dopravního potrubí, tedy aby se rovnal celkové tlakové ztrátě dopravní trasy

$$p_f = \Delta p_z \quad (2.2)$$

Potřebná výška fluidní vrstvy a tedy výška gravitační komory je závislá na tlakové ztrátě dopravní trasy, dispozičním řešením dopravní trasy, sypné hmotnosti provzdušněného materiálu a na průměru potrubí dopravní trasy. [8]



Obr. 2.13 Schéma průtokového podáváče [8]



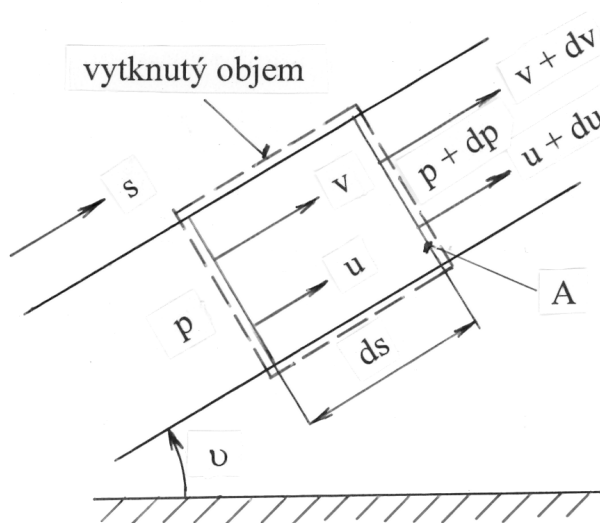
Obr. 2.14 Průtokový podáváč [8]

Výhodou průtokového podávače oproti ostatním je jeho dlouhá životnost a nízké náklady na údržbu. Neobsahuje žádné pohyblivé součásti, které přicházejí do styku s dopravovaným materiálem. Tím nedochází k jejich opotřebení a odpadá nutnost pravidelné údržby, jak je tomu u šnekových nebo rotačních podávačů. [8]

3. VÝPOČET TLAKOVÝCH ZTRÁT PŘI PNEUMATICKÉ DOPRAVĚ

3.1 Rovnice tlakového spádu při pneumatické dopravě

Rovnice tlakového spádu slouží k výpočtu tlakového spádu, následně tlakové ztráty úseku a celkové tlakové ztráty potrubní trasy pneumatické dopravy. Rovnice tlakového spádu vychází z aplikace věty o změně hybnosti ve vytknutém kontrolním objemu potrubí podle obr. 3.1, která uvádí, že změna hybnosti proudící směsi na počátku a na konci kontrolního objemu je rovna součtu působících sil na kontrolní objem.



Obr. 3.1 Vytknutý kontrolní objem [1]

Výsledná rovnice je ve tvaru

$$\dot{M} dv + \dot{M}_m du = -A dp - \pi d ds (\tau + \tau_m) - A ds C_M g \sin \nu - A ds \varepsilon \rho g \sin \nu \quad (3.1)$$

kde na levé straně rovnice je součet změn hybnosti proudu plynu a materiálu, na pravé straně jsou jednotlivé výsledné síly působící na kontrolní objem – tlaková síla, třecí síla, gravitační síla způsobená hmotností materiálu a gravitační síla způsobená hmotností

plynu. Po dílčích úpravách rovnice (3.1) dostaneme rovnici tlakového spádu v konečném tvaru

$$-\frac{dp}{ds} = \lambda \frac{1}{d} \frac{v^2}{2} \rho \left(1 + \frac{\tau_m}{\tau} \right) + \left(\frac{\varepsilon \rho \mu}{\beta} + \varepsilon \rho \right) g \sin \nu + \varepsilon \rho \frac{1}{2} \frac{d(v^2)}{ds} + C_M \frac{1}{2} \frac{d(u^2)}{ds} \quad (3.2)$$

Rovnice (3.2) se nazývá obecná diferenciální rovnice tlakového spádu. Na pravé straně rovnice jsou uvedeny členy, které vyjadřují tlakový spád třením plynu a materiálu, tlakový spád zdvihem plynu a materiálu, tlakový spád urychlením plynu a tlakový spád urychlením materiálu. V rovnici se vyskytuje neznámá veličina $\beta = u / v$. Tuto veličinu lze vypočítat z řešení pohybové rovnice částice nacházející se v dopravním potrubí. [1]

3.2 Pohybová rovnice částice a její řešení pro ustálenou šikmou dopravu

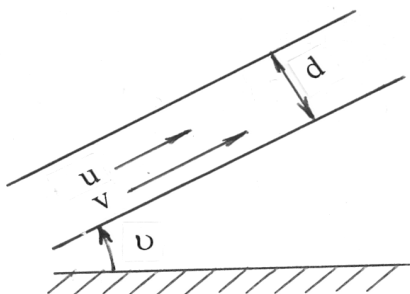
Pohyb částice, která se nachází v šikmém dopravním potrubí znázorněným na obr. 3.2, je popsán obecnou vektorovou pohybovou rovnicí

$$M_c \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F}_a + \vec{F}_g + \vec{F}_T \quad (3.3)$$

, kde \vec{F}_a [N] – aerodynamický odpor částice;

\vec{F}_g [N] – gravitační síla;

\vec{F}_T [N] – odporová síla proti pohybu částice v potrubí, vyvolanou nárazy částice na stěny potrubí a vzájemnými nárazy mezi částicemi.



Obr. 3.2 Šikmé dopravní potrubí [1]

Dílčími úpravami rovnice (3.3) získáme pohybovou rovnici

$$\frac{du}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{(v-u)^2}{u_{vz}^2} g - g \sin \nu - \xi_v \frac{1}{d} \frac{u^2}{2} \quad (3.4)$$

V této rovnici se vyskytuje důležitá veličina v pneumatické dopravě a to rychlost vznosu částic u_{vz} [m/s]. Rychlost vznosu je definována jako rychlost proudění dopravního plynu v [m/s] ve vertikálním dopravním potrubí při které se částice dané velikosti a koncentrace, která odpovídá reálným podmínkám v potrubí, v proudu vzduchu vznáší ($u = 0$ m/s). [1]

3.2.1 Alternativa pohybové rovnice částice pro ustálenou šikmou dopravu

Jako alternativu k obecné vektorové pohybové rovnici (3.3) je možné použít úpravu a doplnit ji o člen F_v [N], což je síla potřebná k tomu, aby částice zůstala ve vznosu. Podle [4] je vyjádření této síly

$$F_v = M_\varepsilon g \frac{u_{vz}}{v} \cos^2 \nu \quad (3.5)$$

Alternativní pohybovou rovnici k původnímu tvaru (3.4) je pak možné vyjádřit ve tvaru

$$0 = \frac{(v-u)^2}{u_{vz}^2} g - g \left(\sin \nu + \frac{u_{vz}}{v} \cos^2 \nu \right) - \xi_y \frac{1}{d} \frac{u^2}{2} \quad (3.6)$$

, kde je odporová síla F_T [N] vztažena na základní hodnotu součinitele tření ξ_y [1], kterou lze přímo nalézt v literatuře v závislosti na dopravovaném materiálu. Řešení rovnice (3.6) vede ke složitému vyjádření poměru rychlosti u / v [4]

$$\beta = \frac{u}{v} = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\xi_y}{2} Fr_s\right) \left(1 - \frac{u_{vz}^2}{v^2} \sin \nu - \frac{u_{vz}^3}{v^3} \cos^2 \nu\right)}}{1 - \frac{\xi_y}{2} Fr_s} \quad (3.7)$$

V rovnici (3.7) je Fr_s [1] převrácená hodnota Froudeho čísla podle následujícího vztahu

$$Fr_s = \frac{1}{Fr_\varepsilon} = \frac{u_{vz}^2}{g d} \quad (3.8)$$

Ke stanovení skutečné hodnoty poměrné rychlosti $\beta = u / v$ je potřeba znát návrhovou rychlost proudu v [m/s] a rychlost vznosu částice u_{vz} [m/s]. Dále také hodnotu Froudeho čísla Fr_s [1] vyjádřeným podle vztahu (3.8) a základní hodnotu součinitele tření dopravovaného materiálu ξ_y [1]. [1]

3.2.2 Součinitel tření dopravovaného materiálu

Součinitel tření dopravovaného materiálu se zjišťuje experimentálně a jeho hodnoty jsou pro různé materiály uvedeny v literatuře [5]. Pokud nemáme bližší informace o dopravovaném materiálu, lze podle doporučení vedoucího diplomové práce počítat s hodnotou $\xi_y = 0,005$.

3.2.3 Poměrná rychlost $\beta = u / v$

Uvedeným postupem je možné teoreticky stanovit hodnotu poměrné rychlosti β [1]. Základní veličinou pro její stanovení je rychlost vznosu částice u_{vz} [m/s], kterou je možné zjistit empiricky nebo stanovit na základě zkušeností. Pro stanovení poměrné rychlosti existují vedle teoretického výpočtu také praktická doporučení v podobě jednoduchých vztahů, která umožňují vyhnout se složitému teoretickému výpočtu a jsou uvedeny v literatuře [6].

3.2.4 Volba dopravní rychlosti

Dopravní rychlost je základním parametrem pneumatické dopravy. Teoretické doporučení minimální dopravní rychlosti udává vztah $v > \cong 1,1 u_{vz}$. Kromě této podmínky je volba dopravní rychlosti závislá především na zkušenostech projektanta a při jejím stanovení je třeba řídit se obecnými doporučeními na základě praktických zkušeností s provozem pneumatické dopravy. Při jejím stanovení je třeba brát v úvahu také orientaci pneumatické dopravy (horizontální, vertikální nebo šikmá) a druh dopravovaného materiálu. Špatně zvolená dopravní rychlost může mít za následek ucpání potrubí a lokální abrazi materiálu potrubí v místech změny směru toku v dopravním potrubí. Dopravní rychlost ovlivňuje také zejména spolehlivost provozu, dále pak provozní a investiční náklady.

3.3 Součinitel dopravy

V obecné diferenciální rovnici tlakového spádu (3.2) je tlakový spád způsobený třením vyjádřen pomocí tečného napětí plynu na stěně potrubí τ [Pa] a tečného napětí vlivem dopravovaného materiálu τ_m [Pa]. Poměr těchto napětí je možné vyjádřit pomocí závislosti na směšovací poměru μ [1] rovnicí

$$\frac{\tau_m}{\tau} = k \mu \quad (3.9)$$

kde k [1] je konstanta úměrnosti, která je pojmenovaná podle autora jako Gasterstädtův součinitel dopravy. Tento součinitel je závislý na druhu dopravovaného materiálu a úhlu dopravy, klesá s růstem rychlosti dopravního vzduchu a roste se zvětšováním průměru dopravního potrubí. Bez jeho znalosti nelze přesně stanovit tlakový spád způsobený třením, který je v pneumatické dopravě zásadní. Dosazením do obecné rovnice tlakového spádu (3.2) za poměr napětí na stěně τ_m/τ vyjádření (4.3-1) dostaneme následující tvar rovnice tlakového spádu

$$-\frac{dp}{ds} = \lambda \frac{1}{d} \frac{v^2}{2} \rho (1 + k \mu) + \left(\frac{\varepsilon \rho \mu}{\beta} + \varepsilon \rho \right) g \sin \nu + \varepsilon \rho \frac{1}{2} \frac{d(v^2)}{ds} + C_M \frac{1}{2} \frac{d(u^2)}{ds} \quad (3.10)$$

Pro určení součinitele dopravy existuje množství empirických vztahů, které závisí na dopravovaném materiálu a dopravním úhlu pneumatické dopravy. Teoretickým univerzálním vztahem pro určení součinitele dopravy je vztah podle [4]

$$k = \frac{2 \frac{u_{vz}}{v} \cos \nu}{\lambda \frac{u}{v} \frac{1}{Fr}} + \frac{\xi_y}{\lambda} \frac{u}{v} \quad (3.11)$$

, kde Fr [1] je Froudeho číslo potrubí a λ [1] součinitel tření plynu v potrubí za předpokladu, že se jedná o hydraulicky hladké potrubí. Během provozu pneumatické dopravy totiž v krátké době dochází abrazí způsobené dopravovaným materiálem k vyhlazení vnitřního povrchu dopravního potrubí. K výpočtu součinitele tření plynu v potrubí je pak možné použít Blasiův vztah

$$\lambda = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (3.12)$$

Tento vztah platí za předpokladu, že $Re \in (2, 10^3; 10^5)$. Pokud jsou hodnoty Re vyšší, je možné použít např. vztah

$$\lambda = \frac{0,184}{Re^{0,2}} \quad (3.13)$$

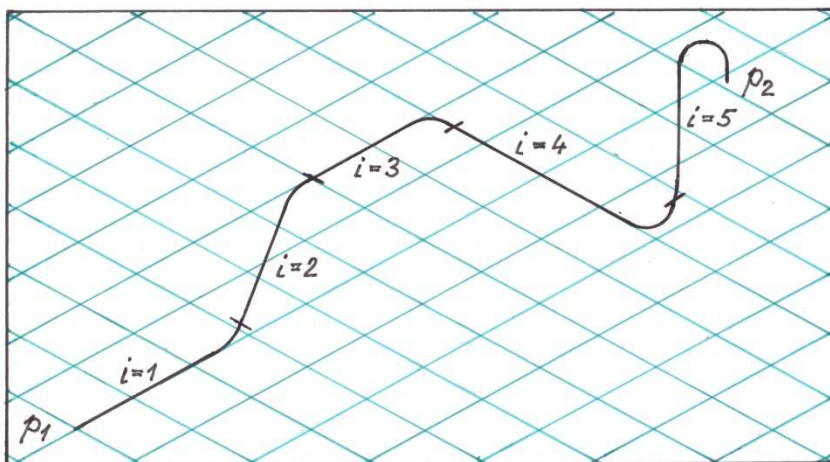
, který platí pro rozsah $Re \in (10^5; 10^6)$. [1]

4. VÝPOČET STŘEDOTLAKÉ PNEUMATICKÉ DOPRAVY

Při výpočtu středotlaké a vysokotlaké pneumatické dopravy nelze na rozdíl od nízkotlaké dopravy zanedbat expanzi, potažmo změnu hustoty ρ [kg/m³] plynu po délce potrubní trasy, která způsobí změnu rychlosti proudění v [m/s]. V případě středotlaké a vysokotlaké dopravy je tlakový spád dp/ds funkcí veličin, které se během dopravy mění po celé potrubní trase. Při výpočtech se proto uvažují určitá zjednodušení, aby byla úloha řešitelná. Existuje několik metod výpočtu středotlaké pneumatické dopravy.

4.1 Metoda aditivnosti

Tato metoda spočívá v rozdělení celé trasy potrubí pneumatické dopravy na více kratších úseků o celkovém počtu i , přičemž se oblouky uvažují jako samostatné úseky. Příklad takového rozdělení trasy je znázorněn na obr. 4.1. V jednotlivých i -tých úsecích se předpokládá konstantní hustota plynu ρ_i [kg/m³] a izotermická změna stavu plynu. Výpočet tlakové ztráty úseku Δp_i [Pa] se provede využitím principu aditivnosti a vztahů uvedených v tab. 4.2. Tlaková ztráta úseku Δp_i [Pa] má za následek změnu počátečního tlaku v úseku $\Delta p_{i, poč}$ [Pa] na konečný tlak $\Delta p_{i, kon}$ [Pa], který se uvažuje jako počáteční tlak následujícího úseku $i + 1$. Uvažujme úsek i , kde na počátku je tlak $p_{i, poč}$ [Pa]. Tomuto tlaku odpovídá dle stavové rovnice hustota plynu ρ_i [kg/m³]. Při předpokladu izotermické změny plynu v délce úseku i je možné stanovit podle stavové rovnice při izotermické změně $p_i \cdot v_i = \text{konst.}$ rychlost plynu na počátku úseku v_i [m/s]. Při proudění dochází ke změně rychlosti plynu v_i [m/s] a materiálu u_i [m/s] za konstantní hodnoty směšovacího poměru $\beta = u_i/v_i = \text{konst.}$ Se změnou rychlosti plynu se mění u jednotlivých úseků i součinitel dopravy k_i [1]. Uvedené veličiny jsou tedy pro výpočet tlakové ztráty úseku Δp_i [Pa] pro daný úsek konstantní. Tyto veličiny se po délce dopravní trasy vlivem poklesu tlaku skokovitě mění. Při výpočtu ale dochází k zanedbání tlakové ztráty na urychlení plynu a urychlení materiálu, z tohoto důvodu je možné tuto metodu použít pouze pro středotlakou pneumatickou dopravu o tlakových ztrátách do $\Delta p_{\max} = 25$ kPa.



Obr. 4.1 Rozdělení potrubní trasy na jednotlivé úseky [1]

4.1.1 Princip aditivnosti

Při využití tohoto principu se předpokládá, že tlaková ztráta dopravované směsi materiálu a plynu se rovná součtu tlakové ztráty proudění samotného plynu a tlakové ztráty způsobené přítomností dopravovaného materiálu. Jednotlivé složky tlakové ztráty získáme řešením příslušné části obecné rovnice tlakového spádu (3.2). Celkovou tlakovou ztrátu pak získáme součtem těchto složek. Odvození složek je uvedeno v [1].

Tab. 4.2 Přehled vztahů odvozených z obecné rovnice tlakového spádu použitím principu aditivnosti [1]

Složka tlakové ztráty na	Čistý plyn	Materiál
počáteční urychlení	$p_d = \frac{v^2}{2} \rho$	$2 \mu \frac{u}{v} p_d$
tření	$\frac{\lambda}{d} s p_d$	$k \mu \frac{\lambda}{d} s p_d$
zdvih	$\varepsilon \rho g H \cong \rho g H \cong 0$	$\varepsilon \rho \mu \frac{v}{u} g H \cong \rho \mu \frac{v}{u} g H$
místní ztráty	$\sum \zeta p_d$	$\mu \frac{v^2}{2} \rho \sum \gamma \zeta = \mu p_d \sum \gamma \zeta$

4.2 Modifikovaná metoda aditivnosti

U této metody se celá trasa potrubí pneumatické dopravy rozdělí na více kratších úseků, přičemž se oblouky přiřadí k předcházejícímu přímému úseku (viz obr. 4.1). Počet

úseků trasy je závislý na požadované přesnosti výpočtu tlakové ztráty. Čím více úseků, tím přesnější bude výsledná tlaková ztráta. Abychom mohli použít metodu aditivnosti k výpočtu středotlaké pneumatické dopravy, je nutné doplnit výpočetní vztahy uvedené v tab. 4.2 o ztrátu na urychlení plynu a ztrátu na urychlení materiálu. V této kapitole budou popsány metody výpočtu tlakových ztrát, které zohledňují změnu hustoty plynu po délce dopravní trasy. Modifikovaná metoda aditivnosti má dvě varianty.

4.2.1 První varianta modifikované metody aditivnosti

Tato varianta je vhodná pouze pro středotlakou dopravu. Modifikace spočívá v přičtení korekce na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu k tlakové ztrátě dopravní trasy. Pokud je počáteční rychlost plynu v prvním úseku rovna v_1 [m/s] a v posledním rovna v_2 [m/s], tak se tlakové ztráty na celkové urychlení plynu $\Delta p_{u,v}$ [Pa] a celkové urychlení materiálu $\Delta p_{u,m}$ [Pa] stanoví použitím následujících vztahů

$$\Delta p_{u,v} = \varepsilon \rho_1 v_1 (v_2 - v_1) \quad (4.1)$$

$$\Delta p_{u,m} = \varepsilon \rho_1 \mu v_1 (u_2 - u_1) = \varepsilon \rho_1 \mu v_1 \beta (v_2 - v_1) \quad (4.2)$$

4.2.2 Druhá varianta modifikované metody aditivnosti

Tato varianta je univerzální a je možné ji použít při výpočtech tlakových ztrát středotlaké i vysokotlaké pneumatické dopravy. Modifikace spočívá v korekci na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu. Na rozdíl od první varianty se u této varianty přičítají korekce podle vztahů (4.1) a (4.2) postupně k tlakovým ztrátám jednotlivých úseků dopravní trasy. Ve vztazích (4.1) a (4.2) pak index 1 označuje podmínky na počátku uvažovaného úseku a index 2 označuje podmínky na konci úseku. Vypočtené tlakové ztráty $\Delta p_{u,v}$ [Pa] a $\Delta p_{u,m}$ [Pa] se přičtou k ostatním složkám tlakové ztráty počítaného úseku. Tím se získá nová výsledná tlaková ztráta úseku, s kterou se upřesní výpočet tlaku a tím i rychlosti plynu na konci daného úseku v_2 [m/s].

4.3 Urbanova metoda

Pro úplnost je třeba také zmínit tuto relativně přesnou a rychlou metodu výpočtu. Celková tlaková ztráta je způsobena tlakovým spádem

- třením dopravního plynu a dopravovaného materiálu
- místní ztrátou plynu a materiálu (vzniká při změnách směru proudění v potrubí)
- urychlením plynu a materiálu po délce potrubní trasy

Tlaková ztráta zdvihem a počátečním urychlením materiálu se přičítá nakonec k celkové tlakové ztrátě. Předpokladem pro použití této metody výpočtu je konstantní hodnota součinitele dopravy $k = \text{konst.}$, izotermická změna stavu plynu a konstantní průměr potrubí $d = \text{konst.}$ Řešení upravené rovnice tlakového spádu, která vychází z rovnice (3.2) je různé pro přetlakovou a podtlakovou pneumatickou dopravu. Podle tohoto rozdělení dopravy se volí postup výpočtu. U přetlakové dopravy je předpoklad známé tlakové podmínky na konci dopravní trasy, např. $p_2 = p_b$ [Pa], zatímco u podtlakové dopravy jsou známy podmínky na počátku dopravní trasy, např. $p_1 = p_b$ [Pa]. Nevýhoda této metody při výpočtu přetlakové dopravy spočívá ve volbě vstupních parametrů zejména hodnoty dopravního součinitele k [1]. Přesnost výpočtu tak závisí především na zkušenostech projektanta, jež se může při chybné volbě dopravního součinitele dopustit velké nepřesnosti ve výpočtu celkové tlakové ztráty dopravní trasy. [1]

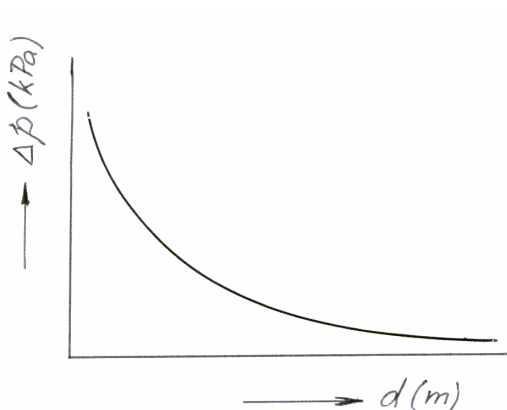
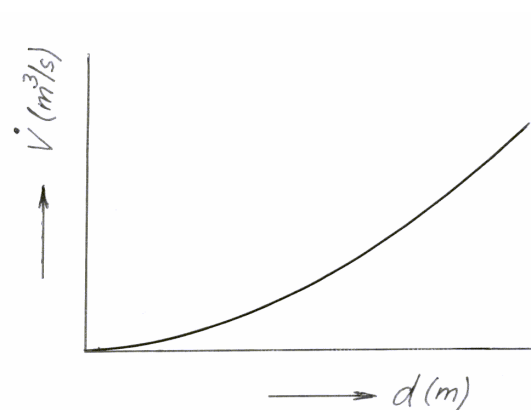
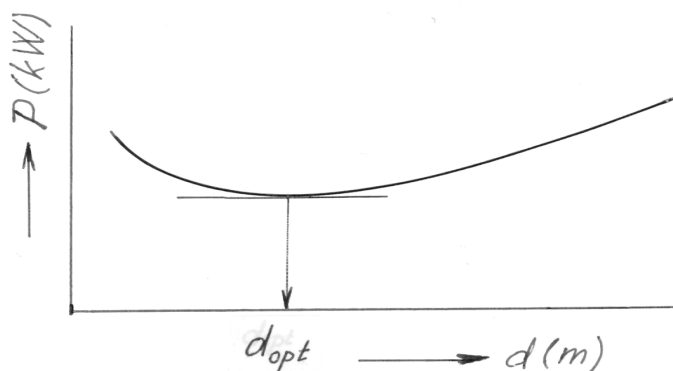
5. NÁVRH OPTIMÁLNÍCH PARAMETRŮ PNEUMATICKÉ DOPRAVY

Cílem při návrhu pneumatické dopravy je nejen zajištění funkčnosti a provozuschopnosti zařízení, ale také nízké investiční a provozní náklady. K optimalizaci pneumatické dopravy z hlediska těchto požadavků slouží metody, které jsou uvedeny v následujících kapitolách.

5.1 Volba průměru dopravní trasy s ohledem na provozní náklady

Mezi hlavní parametry při návrhu pneumatické dopravy patří volba vnitřního průměru d [m] dopravní trasy. Teoreticky je možné pro dopravu materiálu o hmotnostním toku \dot{M}_m [kg/s] volit různý průměr potrubí. Ovšem je potřeba počítat s tím, že se se zmenšováním průměru potrubí zvyšuje hodnota tlakové ztráty vlivem tření plynu a materiálu o stěny potrubí (viz obr. 5.1). Pokud budeme sledovat závislost objemového průtoku dopravního plynu na průměru potrubí při zachování hodnoty dopravní rychlosti plynu, zjistíme, že naopak se zmenšujícím se průměrem klesá (viz obr. 5.2). Provozní náklady na středotlakou dopravu jsou tvořeny především náklady na pohon zdrojů dopravního vzduchu. Energetická náročnost zdroje dopravního vzduchu pneumatické dopravy tak nezávisí pouze na pokrytí tlakové ztráty dopravní trasy, ale také na množství dopravovaného vzduchu. Elektrický příkon zařízení roste s rostoucí hodnotou

Δp [Pa] i \dot{V} [Pa]. Ke stanovení optimálního průměru potrubí d_{opt} [m] slouží grafické znázornění závislosti součinu $\Delta p \cdot \dot{V} = f(d)$, kde součin $\Delta p \cdot \dot{V}$ představuje výkon zdroje dopravního vzduchu. Optimální průměr z hlediska provozních nákladů získáme z lokálního minima této závislosti, jak je znázorněno na obr. 5.3. Na základě zjištěné hodnoty vybíráme vhodný normalizovaný průměr potrubí. Pokud je závislost v okolí minima plochá, je z hlediska investičních nákladů vhodné volit nejmenší možný průměr. [1]

Obr. 5.1 Závislost $\Delta p = f(d)$ [1]Obr. 5.2 Závislost $\dot{V} = f(d)$ [1]

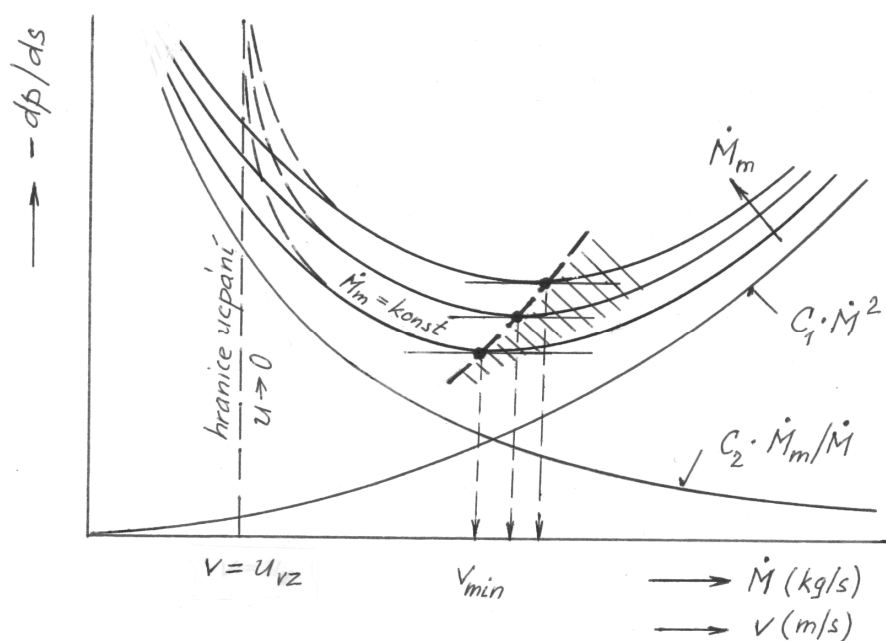
Obr. 5.3 Optimalizace vnitřního průměru dopravní trasy [1]

5.2 Volba optimální dopravní rychlosti

Fázový diagram, s jehož pomocí je možné určit optimální rychlost pneumatické dopravy je grafickým vyjádřením závislosti tlakového spádu $-dp/ds$ na hmotnostním průtoku plynu \dot{M} [kg/s], resp. rychlosti plynu v [m/s], kde hmotnostní tok materiálu

\dot{M}_m [kg/s] je parametrem závislosti (viz obr. 5.4). Optimální dopravní rychlost z ekonomického hlediska provozu získáme z lokálního minima této závislosti, kde dosahuje tlakový spád nejnižší hodnoty. Zároveň je z fázového diagramu patrná oblast stabilní pneumtické dopravy ve vlnosu, která vymezuje doporučené rychlosti dopravního plynu a která se nachází napravo od minimální hodnoty dopravní rychlosti v_{min} [m/s]. Pod hodnotou v_{min} [m/s] se nachází tzv. nestabilní oblast pneumtické dopravy. Při dalším poklesu dopravní rychlosti až k rychlosti, která se rovná rychlosti částic materiálu ve vlnosu u_{vz} [m/s] hrozí ucpání dopravního potrubí. Fázový diagram je sestaven za použití vztahu (5.1). [1]

$$-\frac{dp}{ds} = C_1 \dot{M}^2 + C_2 \frac{\dot{M}_m}{\dot{M}} \quad (5.1)$$



Obr. 5.4 Fázový diagram [1]

6. VÝPOČET TLAKOVÉ ZTRÁTY DOPRAVNÍ TRASY POUŽITÍM MODIFIKOVANÉ METODY ADITIVNOSTI

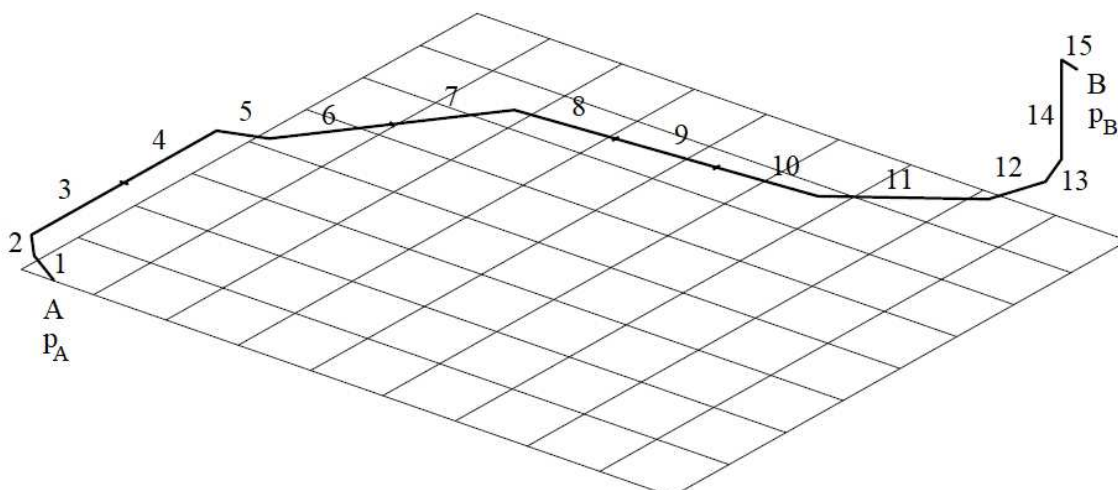
Pro výpočet zadané trasy pneumatické dopravy byla zvolena metoda aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu, která je ze všech výše uvedených metod nejpřesnější.

6.1 Vstupní parametry

Jako modelový příklad této studie slouží dopravní trasa pneumatické dopravy, která byla vybudována v Teplárně Kolín k dopravování popílku od výsypky elektrického odlučovače kotle (bod A na schéma trasy) do zásobníkového sila (bod B trasy), odkud je následně popílek odvážen. V tabulce 6.1 jsou souhrnně uvedeny vstupní parametry. Schéma dopravní trasy, rozdělené na jednotlivé úseky, je znázorněno na obr. 6.1. Tlak na počátku trasy, rychlost dopravního plynu, rychlost vnosu materiálu a základní hodnota součinitele odporu byla stanovena vedoucím diplomové práce na základě zkušeností s obdobnými systémy středotlaké pneumatické dopravy. Dopravní rychlost by se měla pohybovat v rozmezí 15 – 26 m/s.

Tab. 6.1 – Vstupní parametry pneumatické dopravy

Celková délka dopravní trasy	$l_c = 159,3 \text{ m}$
Celkové převýšení dopravní trasy	$h_c = 21,4 \text{ m}$
Hmotnostní tok materiálu	$\dot{M}_m = 4 \text{ t/h}$
Hustota materiálu	$\rho_m = 2200 \text{ kg/m}^3$
Sypná hmotnost materiálu	$\rho_s = 650 \text{ kg/m}^3$
Barometrický tlak okolí	$p_b = 98000 \text{ Pa}$
Tlak na počátku dopravní trasy	$p_0 = 135000 \text{ Pa}$
Rychlost dopravního plynu na počátku trasy	$v_0 = 18 \text{ m/s}$
Rychlost vnosu materiálu	$u_{vz} = 3 \text{ m/s}$
Základní hodnota součinitele odporu	$\xi_y = 0,005$
Teplota nasávaného vzduchu	$t_0 = 20 \text{ °C}$
Teplota dopravovaného materiálu	$t_m = 80 \text{ °C}$
Měrná tepelná kapacita dopravovaného materiálu	$c_m = 0,8 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
Vnitřní průměr potrubí dopravní trasy	$d = 0,15 \text{ m}$



Obr. 6.1 Schéma dopravní trasy

6.2 Postup výpočtu

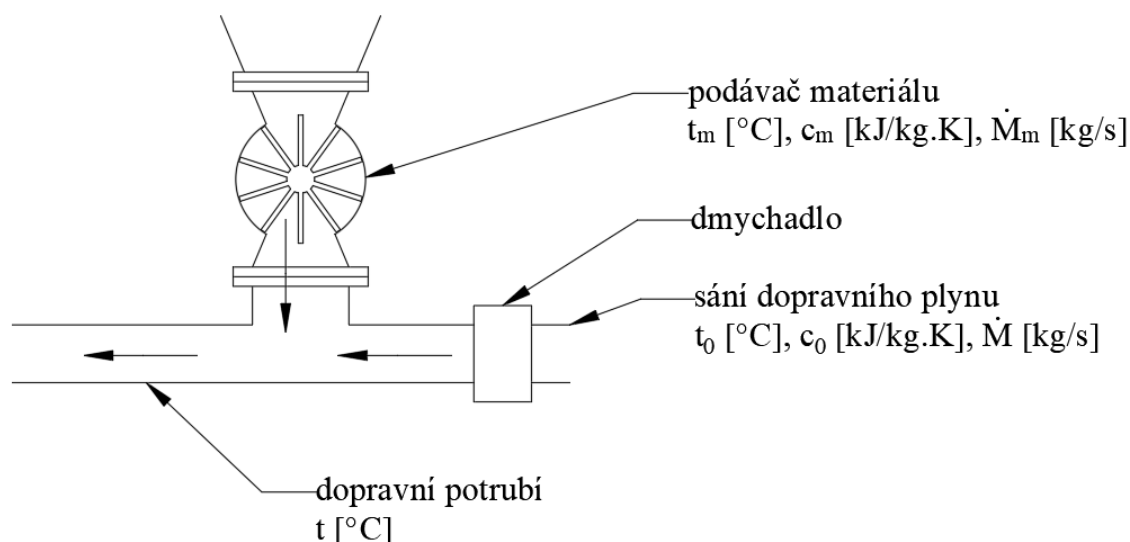
V této kapitole je uveden na ukázkou postup výpočtu prvního úseku dopravní trasy. Výsledky výpočtu všech úseků jsou uvedeny v příloze č. 1. Po celé délce trasy se uvažuje konstantní vnitřní průměr d [m] a izotermická změna stavu.

6.2.1 Výpočet tlaku na konci úseku

1) Výpočet hmotnostního průtoku dopravního plynu a materiálu

Výpočet teploty směsi za podavačem

Vzhledem k tomu, že je trasou dopravován popílek o počáteční teplotě $t_m = 80$ °C dopravním plynem o počáteční teplotě $t_0 = 20$ °C, je nutné vypočítat teplotu směsi za podavačem. Výsledná teplota dopravované směsi se v potrubí po nasátí okolního vzduchu a intenzivním směřováním s dopravovaným materiálem ustálí velmi rychle a zjednodušeně můžeme výpočet tlakových ztrát počítat od počátku dopravní trasy s výslednou teplotou směsi dopravního plynu a dopravovaného materiálu. Zároveň je možné ve výpočtech zanedbat tepelné ztráty do okolí dopravního potrubí. Ve výpočtu je tedy uvažovaná změna stavu jako izotermická a počítáno s konstantní teplotou směsi v rozsahu celé dopravní trasy. Výpočet teploty směsi za podavačem byl proveden podle schéma znázorněném na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Schéma k výpočtu teploty směsi za podáváčem

Hustota vzduchu před podáváčem

$$\rho_0 = \frac{p_0}{r \cdot T_0} = \frac{135000}{287 \cdot 293,15} = 1,605 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Plocha průřezu potrubí před podáváčem

$$S_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,150^2}{4} = 0,018 \text{ m}^2$$

Hmotnostní tok plynu před podáváčem

$$\dot{M} = \dot{V}_0 \cdot \rho_0 = S_0 \cdot v_0 \cdot \rho_0 = 0,018 \cdot 18 \cdot 1,605 = 0,51 \text{ kg} / \text{s}$$

Hmotnostní tok materiálu

$$\dot{M}_m = 4 \text{ t} / \text{h} = 1,111 \text{ kg} / \text{s}$$

Teplota směsi za podáváčem

$$t_1 = \frac{c_m \cdot \dot{M}_m \cdot t_m + c_0 \cdot \dot{M} \cdot t_0}{c_m \cdot \dot{M}_m + c_0 \cdot \dot{M}} = \frac{0,8 \cdot 1,111 \cdot 80 + 1,01 \cdot 0,51 \cdot 20}{0,8 \cdot 1,111 + 1,01 \cdot 0,51} = 58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Hustota vzduchu na začátku úseku

$$\rho_1 = \frac{p_1}{r \cdot T_1} = \frac{135000}{287 \cdot 331,12} = 1,421 \text{ kg} / \text{m}^3$$

Plocha průřezu potrubí (konstantní po celé délce dopravní trasy)

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,150^2}{4} = 0,018 \text{ m}^2$$

Hmotnostní tok plynu (konstantní po celé délce dopravní trasy)

$$\dot{M} = \dot{V} \cdot \rho_1 = S \cdot v_1 \cdot \rho_1 = 0,018 \cdot 18 \cdot 1,421 = 0,452 \text{ kg / s}$$

2) Výpočet směšovacího poměru

Směšovací poměr

$$\mu = \frac{\dot{M}_m}{\dot{M}} = \frac{1,111}{0,452} = 2,459$$

3) Výpočet Froudeho čísla materiálu

$$Fr_{\xi} = \frac{g \cdot d}{u_{vz}^2} = \frac{9,81 \cdot 0,150}{3^2} = 0,164$$

4) Výpočet převrácené hodnoty Froudeho čísla

$$Fr_s = \frac{1}{Fr_{\xi}} = \frac{1}{0,164} = 6,116$$

5) Výpočet poměrné rychlosti

Sklon osy dopravního potrubí

$$\nu = 38^\circ$$

Poměrná rychlost

$$\beta_v = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\xi_y}{2} \cdot Fr_s\right) \cdot \left(1 - \frac{u_{vz}^2}{v_1^2} \cdot \sin \nu - \frac{u_{vz}^3}{v_1^3} \cdot \cos^2 \nu\right)}}{1 - \frac{\xi_y}{2} \cdot Fr_s} =$$

$$= \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{0,005}{2} \cdot 6,116\right) \cdot \left(1 - \frac{3^2}{18^2} \cdot \sin 38 - \frac{3^3}{18^3} \cdot \cos^2 38\right)}}{1 - \frac{0,005}{2} \cdot 6,116} = 0,82564$$

6) Výpočet součinitele dopravyKinematická viskozita plynu

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_1} = \frac{0,00002001}{1,421} = 0,00001409 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Reynoldsovo číslo

$$\text{Re} = \frac{v_1 \cdot d}{\nu} = \frac{18 \cdot 0,15}{0,00001409} = 191680$$

Součinitel tření

$$\lambda = \frac{0,184}{\sqrt[5]{\text{Re}}} = \frac{0,184}{\sqrt[5]{191680}} = 0,01615$$

Froudeho číslo potrubí

$$\text{Fr} = \frac{g \cdot d}{v_1^2} = \frac{9,81 \cdot 0,150}{18^2} = 0,00454$$

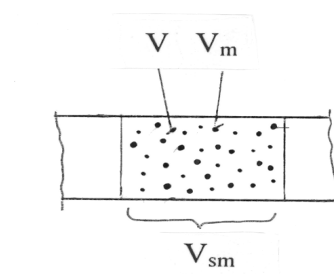
Součinitel dopravy

$$k = \frac{2 \cdot \frac{u_{vz}}{v_1} \cdot \cos \nu}{\lambda \cdot \beta_v \cdot \frac{1}{\text{Fr}}} + \frac{\xi_y}{\lambda} \cdot \beta_v = \frac{2 \cdot \frac{3}{18} \cdot \cos 38}{0,01615 \cdot 0,82564 \cdot \frac{1}{0,00454}} + \frac{0,005}{0,01615} \cdot 0,82564 =$$

$$= 0,34498$$

7) Výpočet poréznostiDefinice poréznosti

Poréznost je poměr objemu plynu V [m³] a objemu směsi V_{sm} [m³]. Objem směsi je součet objemu plynu V [m³] a objemu materiálu V_m [m³] ve vytknutém elementu, jak je znázorněno na obr. 6.3.



Obr. 6.3 Vytknutý element a veličiny pro definici poréznosti [1]

$$\varepsilon = \frac{V}{V + V_m} = \frac{V}{V_{sm}}$$

Výpočet poréznosti

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{\rho_l \cdot \mu}{\beta_v \cdot \rho_m}} = \frac{1}{1 + \frac{1,421 \cdot 2,459}{0,82564 \cdot 2200}} = 0,99808$$

8) Výpočet ztrátového součinitele při průchodu částic materiálu oblouku

Výpočet je proveden podle [3]. V hodnotách výsledného ztrátového součinitele ζ [1] není zahrnuta tlaková ztráta třením. V případě hladkého oblouku kruhového potrubí o úhlu α [°], pro $d \leq 0,2$ m a $r/d = 3$ pro výpočet ztrátového součinitele oblouku platí vztah

$$\zeta = C_\alpha \cdot \zeta_1$$

Výpočet základní hodnoty ztrátového součinitele

$$\zeta_1 = \frac{0,21}{\sqrt{\frac{r}{d}}} = \frac{0,21}{\sqrt{\frac{0,45}{0,15}}} = 0,12124$$

Korekce na úhel oblouku

$$C_\alpha = 0,9 \cdot \sin \alpha \quad \text{pro } \alpha < 45^\circ$$

$$C_\alpha = -1,53 + 1,3 \cdot \log \alpha \quad \text{pro } 45^\circ \leq \alpha < 180^\circ$$

Úsek č. 1 má na svém konci oblouk o úhlu $\alpha = 45^\circ$. Pro výpočet korekce na úhel oblouku použijeme vztah pro podmínku $45^\circ \leq \alpha < 180^\circ$.

Výpočet korekce na úhel oblouku

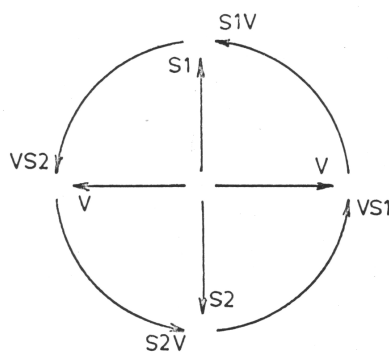
$$C_\alpha = -1,53 + 1,3 \cdot \log \alpha = -1,53 + 1,3 \cdot \log 45 = 0,61918$$

Výpočet ztrátového součinitele oblouku

$$\zeta = C_\alpha \cdot \zeta_1 = 0,61918 \cdot 0,12124 = 0,07507$$

9) Součinitel polohy oblouku

V praxi se tlaková ztráta při průchodu obloukem započítává přičtením délky oblouku k délce úseku, ve kterém se počítá tlaková ztráta třením. V přesném výpočtu tlakové ztráty vlivem změny směru potrubí je nutné uvažovat polohu oblouku. Způsob výpočtu je uveden v [4]. Třecí síla o stěny oblouku je způsobená nejen působením odstředivé síly, ale také síly gravitační. Po průchodu částice obloukem dojde k jejímu zpomalení, výsledný vztah pro výpočet tlakové ztráty při průchodu materiálu místními odpory je závislý na kombinaci těchto sil a tedy poloze oblouku. Jednotlivé polohy se označují dle schématu na obr. 6.4.



Obr. 6.4 Schéma označení polohy oblouku [1]

Zkratky použité ve schématu na obr. 6.4:

S1 – svisle vzhůru

S2 – svisle dolů

V – vodorovně

VS1 – z vodorovného do svislého směru (směr vzhůru)

S1V – ze svislého (směr vzhůru) do vodorovného směru

VS2 – z vodorovného do svislého směru (směr dolů)

S2V – ze svislého (směr dolů) do vodorovného směru

Při výpočtu tlakové ztráty při průchodu materiálu místními odpory Δp_{m3} [Pa] bude v následující kapitole použit zjednodušený vztah podle [4]. V tomto vztahu je použit součinitel polohy oblouku, který nabývá dvou hodnot. Pro nejméně výhodnou polohu oblouku VS1 je to hodnota $\gamma = 4$ a pro všechny ostatní polohy oblouku je to $\gamma = 1$. Na konci úseku číslo 1 je oblouk odpovídající poloze V, tudíž je ve výpočtu počítáno se součinitelem polohy $\gamma = 1$.

10) Výpočet dynamického tlaku

$$p_d = \frac{\rho_1}{2} \cdot v_1^2 = \frac{1,421}{2} \cdot 18^2 = 230,131 Pa$$

11) Výpočet tlakové ztráty třením plynu

$$\Delta p_{v1} = \frac{\lambda}{d} \cdot (l + l_o) \cdot p_d = \frac{0,01615}{0,15} \cdot (3,5 + 0,3) \cdot 230,131 = 94,182 Pa$$

kde l_o [m] je délka oblouku za úsekem č. 1

12) Výpočet tlakové ztráty třením materiálu

$$\begin{aligned} \Delta p_{m1} &= \frac{\lambda}{d} \cdot k \cdot \mu \cdot (l + l_o) \cdot p_d = \frac{0,01615}{0,15} \cdot 0,34498 \cdot 2,459 \cdot (3,5 + 0,3) \cdot 230,131 = \\ &= 79,887 Pa \end{aligned}$$

13) Výpočet tlakové ztráty zdvihem plynu

$$\Delta p_{v2} = \varepsilon \cdot \rho_1 \cdot g \cdot (l \cdot \sin v) = 0,99808 \cdot 1,421 \cdot 9,81 \cdot (3,5 \cdot \sin 38) = 29,971 Pa$$

14) Výpočet tlakové ztráty zdvihem materiálu

$$\begin{aligned} \Delta p_{m2} &= \varepsilon \cdot \rho_1 \cdot \mu \cdot \frac{1}{\beta_v} \cdot g \cdot (l \cdot \sin v) = \\ &= 0,99808 \cdot 1,421 \cdot 2,459 \cdot \frac{1}{0,82564} \cdot 9,81 \cdot (3,5 \cdot \sin 38) = 89,253 Pa \end{aligned}$$

15) Výpočet tlakové ztráty místními odpory při průchodu plynu

$$\Delta p_{v3} = \sum \zeta \cdot p_d = 0,07507 \cdot 230,131 = 17,276 \text{ Pa}$$

16) Výpočet tlakové ztráty místními odpory při průchodu materiálu

$$\Delta p_{m3} = \mu \cdot p_d \cdot \sum \gamma \cdot \zeta = 2,459 \cdot 230,131 \cdot 1 \cdot 0,07507 = 42,477 \text{ Pa}$$

17) Výpočet tlaku na konci úseku bez korekce na urychlení plynu a materiálu

Tlaková ztráta úseku bez korekce na urychlení plynu a materiálu

$$\begin{aligned} \Delta p_z &= \sum \Delta p_{v,i} + \sum \Delta p_{m,i} = (\Delta p_{v1} + \Delta p_{v2} + \Delta p_{v3}) + (\Delta p_{m1} + \Delta p_{m2} + \Delta p_{m3}) = \\ &= (94,182 + 29,971 + 17,276) + (79,887 + 89,253 + 42,477) = 353,046 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$p_{kon} = p_1 - \Delta p_z = 135000 - 353,046 = 134646,954 \text{ Pa}$$

18) Výpočet hustoty plynu na konci úseku

$$\rho_2 = \frac{p_{kon}}{r \cdot T_1} = \frac{134646,954}{287 \cdot 331,12} = 1,417 \text{ kg / m}^3$$

19) Výpočet rychlosti proudění plynu na konci úseku

$$v_2 = \frac{\dot{M}}{\rho_2 \cdot S} = \frac{0,452}{1,417 \cdot 0,018} = 18,047 \text{ m / s}$$

20) Výpočet tlakové ztráty na postupné urychlení plynu

$$\begin{aligned} \Delta p_{u,v} &= \varepsilon \cdot \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \cdot v_1 \cdot (v_2 - v_1) = 0,99808 \cdot \frac{1,421 + 1,417}{2} \cdot 18 \cdot (18,047 - 18) = \\ &= 1,203 \text{ Pa} \end{aligned}$$

21) Výpočet tlakové ztráty na postupné urychlení materiálu

$$\begin{aligned} \Delta p_{u,m} &= \varepsilon \cdot \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \cdot \mu \cdot v_1 \cdot \beta_v \cdot (v_2 - v_1) = \\ &= 0,99808 \cdot \frac{1,421 + 1,417}{2} \cdot 2,459 \cdot 18 \cdot 0,82564 \cdot (18,047 - 18) = 2,442 \text{ Pa} \end{aligned}$$

22) Výpočet tlaku na konci úseku s korekcí na urychlení plynu a materiálu

$$p_2 = p_{kon} - (\Delta p_{u,v} + \Delta p_{u,m}) = 134646,954 - (1,203 + 2,442) = 134643,309 \text{ Pa}$$

6.2.2 Výpočet tlaku na konci úseku - 1. iterace

V prvním výpočtu, tedy nulté iteraci tlakové ztráty prvního úseku, se veškeré vypočtené veličiny vztahují k počátečnímu zvolenému tlaku p_1 [Pa], zvolené počáteční rychlosti v_1 [m/s] a k vypočtené hustotě plynu ρ_1 [kg/m³] na začátku úseku. Tyto parametry je nutné vypočítat také pro konec prvního úseku, aby se mohly použít jako výchozí hodnoty pro počátek druhého úseku. Z hodnot parametrů na začátku a na konci úseku trasy se vždy vypočtou střední hodnoty hustoty vzduchu $\rho_{stř}$ [kg/m³] a rychlosti proudění vzduchu $v_{stř}$ [m/s] v celém úseku. Ty se následně použijí pro přesnější výpočet parametrů, které jsou počítané v nulté iteraci z hodnot na počátku úseku jako např. Reynoldsovo číslo.

1) Výpočet hustoty vzduchu na konci úseku

$$\rho_{2,I} = \frac{p_2}{r \cdot T_1} = \frac{134643,309}{287 \cdot 331,12} = 1,417 \text{ kg / m}^3$$

2) Výpočet střední hustoty vzduchu v úseku

$$\rho_{stř,I} = \frac{\rho_1 + \rho_{2,I}}{2} = \frac{1,421 + 1,417}{2} = 1,419 \text{ kg / m}^3$$

3) Výpočet rychlosti proudění vzduchu na konci úseku

$$v_{2,I} = \frac{\dot{M}}{\rho_{2,I} \cdot S} = \frac{0,452}{1,417 \cdot 0,018} = 18,048 \text{ m / s}$$

4) Výpočet střední rychlosti proudění vzduchu v úseku

$$v_{stř,I} = \frac{v_1 + v_{2,I}}{2} = \frac{18 + 18,048}{2} = 18,024 \text{ m / s}$$

5) Výpočet kinematické viskozity plynu

$$\nu_I = \frac{\eta}{\rho_{stř,I}} = \frac{0,00002001}{1,419} = 0,00001410 \text{ m}^2 / \text{s}$$

6) Výpočet kinematické viskozity plynu

$$\text{Re}_I = \frac{v_{stř,I} \cdot d}{\nu_I} = \frac{18,024 \cdot 0,15}{0,00001410} = 191680$$

7) Výpočet součinitele tření

$$\lambda_I = \frac{0,184}{\sqrt[5]{\text{Re}_I}} = \frac{0,184}{\sqrt[5]{191680}} = 0,01615$$

8) Výpočet Froudeho čísla potrubí

$$\text{Fr}_I = \frac{g \cdot d}{v_{stř,I}^2} = \frac{9,81 \cdot 0,15}{18,024^2} = 0,00453$$

9) Výpočet poměrné rychlosti

$$\beta_{v,I} = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\xi_y}{2} \cdot \text{Fr}_s\right) \cdot \left(1 - \frac{u_{vz}^2}{v_{stř,I}^2} \cdot \sin^2 \nu - \frac{u_{vz}^3}{v_{stř,I}^3} \cdot \cos^2 \nu\right)}}{1 - \frac{\xi_y}{2} \cdot \text{Fr}_s} =$$

$$= \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{0,005}{2} \cdot 6,116\right) \cdot \left(1 - \frac{3^2}{18,024^2} \cdot \sin^2 38 - \frac{3^3}{18,024^3} \cdot \cos^2 38\right)}}{1 - \frac{0,005}{2} \cdot 6,116} = 0,82580$$

10) Výpočet součinitele dopravy

$$k_I = \frac{2 \cdot \frac{u_{vz}}{v_{stř,I}} \cdot \cos \nu}{\lambda_I \cdot \beta_{v,I} \cdot \frac{1}{\text{Fr}_I}} + \frac{\xi_y}{\lambda_I} \cdot \beta_{v,I} = \frac{2 \cdot \frac{3}{18,024} \cdot \cos 38}{0,01615 \cdot 0,82580 \cdot \frac{1}{0,00453}} + \frac{0,005}{0,01615} \cdot 0,82580 =$$

$$= 0,34466$$

11) Výpočet poréznosti

$$\varepsilon_I = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{stř,I} \cdot \mu}{\beta_{v,I} \cdot \rho_m}} = \frac{1}{1 + \frac{1,419 \cdot 2,459}{0,82580 \cdot 2200}} = 0,99808$$

12) Výpočet dynamického tlaku

$$p_{d,I} = \frac{\rho_{stř,I}}{2} \cdot v_{stř,I}^2 = \frac{1,419}{2} \cdot 18,024^2 = 230,436 Pa$$

13) Výpočet tlakové ztráty třením plynu

$$\Delta p_{v1,I} = \frac{\lambda_I}{d} \cdot (l + l_o) \cdot p_{d,I} = \frac{0,01615}{0,15} \cdot (3,5 + 0,3) \cdot 230,436 = 94,307 Pa$$

kde l_o [m] je délka oblouku za úsekem č. 1

14) Výpočet tlakové ztráty třením materiálu

$$\begin{aligned} \Delta p_{m1,I} &= \frac{\lambda_I}{d} \cdot k_I \cdot \mu \cdot (l + l_o) \cdot p_{d,I} = \frac{0,01615}{0,15} \cdot 0,34466 \cdot 2,459 \cdot (3,5 + 0,3) \cdot 230,436 = \\ &= 79,917 Pa \end{aligned}$$

15) Výpočet tlakové ztráty zdvihem plynu

$$\Delta p_{v2,I} = \varepsilon_I \cdot \rho_{stř,I} \cdot g \cdot (l \cdot \sin \nu) = 0,99808 \cdot 1,419 \cdot 9,81 \cdot (3,5 \cdot \sin 38) = 29,932 Pa$$

16) Výpočet tlakové ztráty zdvihem materiálu

$$\begin{aligned} \Delta p_{m2,I} &= \varepsilon_I \cdot \rho_{stř,I} \cdot \mu \cdot \frac{1}{\beta_{v,I}} \cdot g \cdot (l \cdot \sin \nu) = \\ &= 0,99808 \cdot 1,419 \cdot 2,459 \cdot \frac{1}{0,82580} \cdot 9,81 \cdot (3,5 \cdot \sin 38) = 89,119 Pa \end{aligned}$$

17) Výpočet tlakové ztráty místními odpory při průchodu plynu

$$\Delta p_{v3,I} = \sum \zeta \cdot p_{d,I} = 0,07507 \cdot 230,436 = 17,299 Pa$$

18) Výpočet tlakové ztráty místními odpory při průchodu materiálu

$$\Delta p_{m3,I} = \mu \cdot p_{d,I} \cdot \sum \gamma \cdot \zeta = 2,459 \cdot 230,436 \cdot 1 \cdot 0,07507 = 42,534 Pa$$

19) Výpočet tlaku na konci úseku bez korekce na urychlení plynu a materiálu

Tlaková ztráta úseku bez korekce na urychlení plynu a materiálu

$$\begin{aligned}\Delta p_{z,I} &= \sum \Delta p_{v,i,I} + \sum \Delta p_{m,i,I} = (\Delta p_{v1,I} + \Delta p_{v2,I} + \Delta p_{v3,I}) + (\Delta p_{m1,I} + \Delta p_{m2,I} + \Delta p_{m3,I}) = \\ &= (94,307 + 29,932 + 17,299) + (79,917 + 89,119 + 42,534) = 353,108 \text{ Pa}\end{aligned}$$

$$p_{kon,I} = p_1 - \Delta p_{z,I} = 135000 - 353,108 = 134646,892 \text{ Pa}$$

20) Výpočet hustoty plynu na konci úseku

$$\rho_{2,u,I} = \frac{p_{kon,I}}{r \cdot T_1} = \frac{134646,892}{287 \cdot 331,12} = 1,417 \text{ kg/m}^3$$

21) Výpočet rychlosti proudění plynu na konci úseku

$$v_{2,u,I} = \frac{\dot{M}}{\rho_{2,u,I} \cdot S} = \frac{0,452}{1,417 \cdot 0,018} = 18,047 \text{ m/s}$$

22) Výpočet tlakové ztráty na postupné urychlení plynu

$$\begin{aligned}\Delta p_{u,v,I} &= \varepsilon_I \cdot \frac{\rho_1 + \rho_{2,u,I}}{2} \cdot v_1 \cdot (v_{2,u,I} - v_1) = 0,99808 \cdot \frac{1,421 + 1,417}{2} \cdot 18 \cdot (18,047 - 18) = \\ &= 1,203 \text{ Pa}\end{aligned}$$

23) Výpočet tlakové ztráty na postupné urychlení materiálu

$$\begin{aligned}\Delta p_{u,m,I} &= \varepsilon_I \cdot \frac{\rho_1 + \rho_{2,u,I}}{2} \cdot \mu \cdot v_1 \cdot \beta_{v,I} \cdot (v_{2,u,I} - v_1) = \\ &= 0,99808 \cdot \frac{1,421 + 1,417}{2} \cdot 2,459 \cdot 18 \cdot 0,82580 \cdot (18,047 - 18) = 2,443 \text{ Pa}\end{aligned}$$

24) Výpočet tlaku na konci úseku s korekcí na urychlení plynu a materiálu

$$p_{2,I} = p_{kon,I} - (\Delta p_{u,v,I} + \Delta p_{u,m,I}) = 134646,982 - (1,203 + 2,443) = 134643,246 \text{ Pa}$$

Stejným postupem je vypočtena také druhá a třetí iterace. Skutečná hodnota tlaku na konci prvního úseku odpovídá hodnotě třetí iterace, tedy $p_{2,III} = 134643 \text{ Pa}$. Stejným způsobem bylo vypočteno všech 15 úseků. Tlak na konci dopravní trasy (označeno jako

místo B) je $p_B = 121560$ Pa. Když se tato hodnota odečte od tlaku na začátku dopravní trasy (označeno jako místo A) $p_A = 135000$ Pa vyjde celková tlaková ztráta dopravní trasy, která byla vypočtena modifikovanou metodou aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu $\Delta p_z = 13440$ Pa.

25) Úprava počátečního tlaku

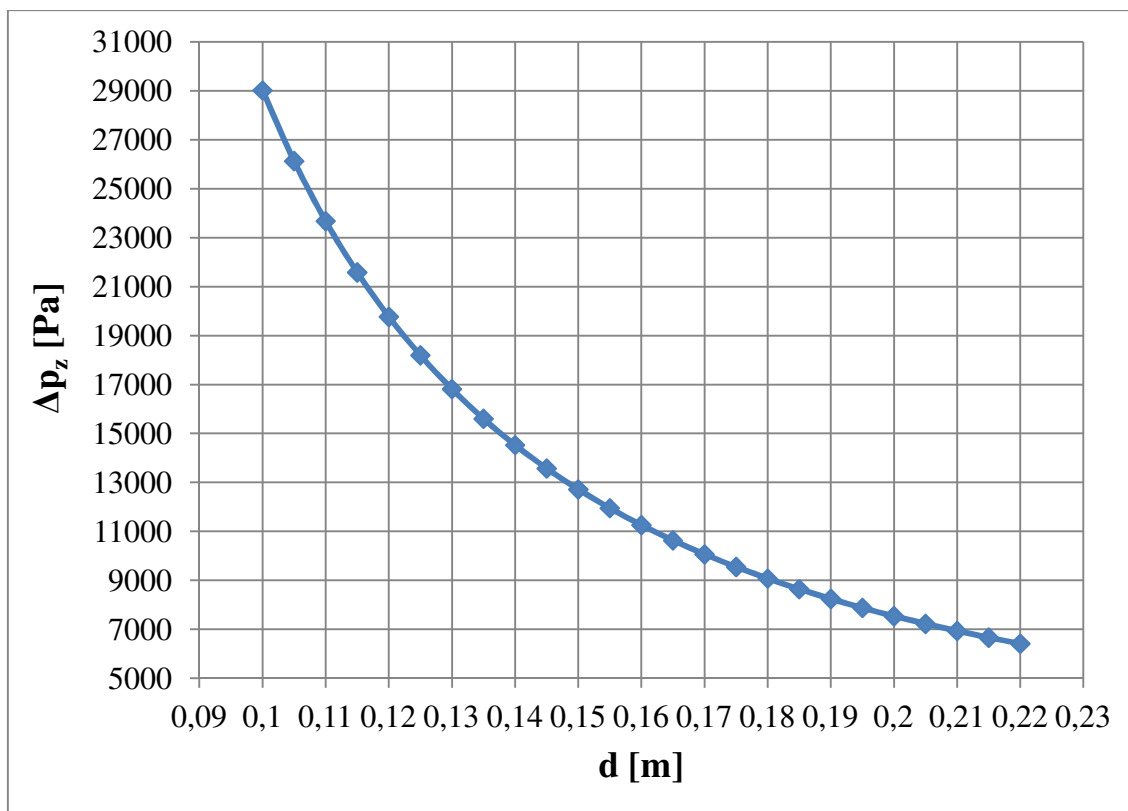
Na začátku výpočtu byl zvolen počáteční tlak $p_0 = 135000$ Pa. Je nutné snížit počáteční tlak tak, aby na konci trasy vyšel barometrický tlak okolí, tedy $p_b = 98000$ Pa. Výpočtem byl stanoven počáteční tlak (v bodě A trasy) $p_A = 110735$ Pa. Tlak na konci úseku (v bodě B trasy) $p_B = 98000$ Pa. Celková tlaková ztráta dopravní trasy tak činí $\Delta p_z = 12735$ Pa.

7. OPTIMALIZACE PNEUMATICKÉ DOPRAVY

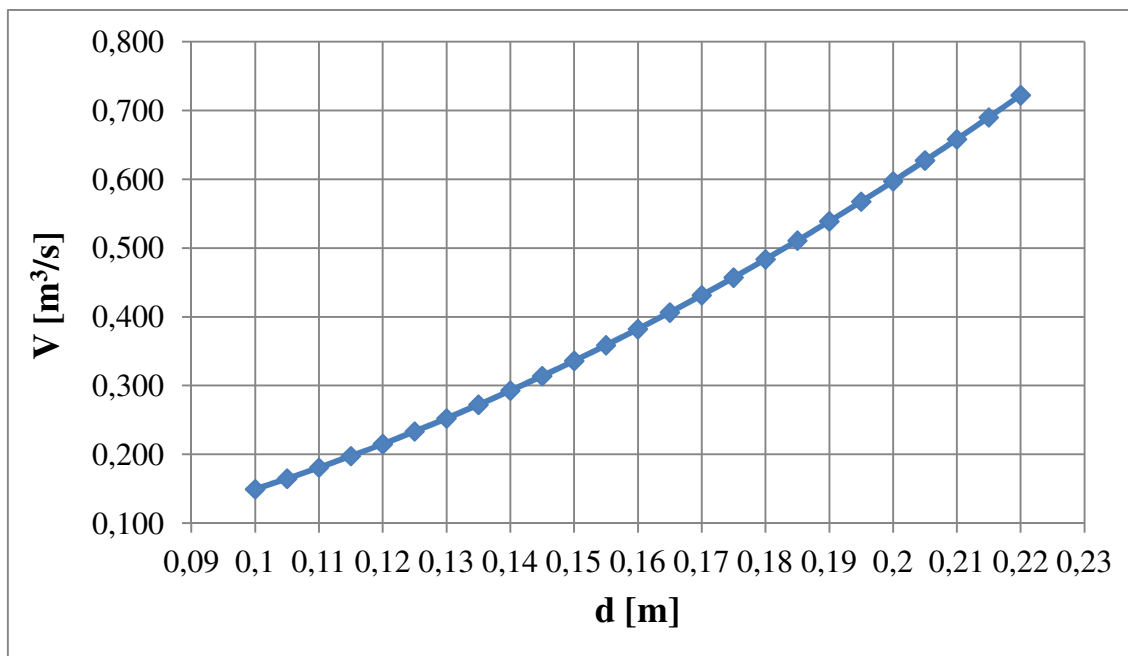
Po výpočtu tlakové ztráty dopravní trasy je nutné upravit vstupní parametry tak, aby byla pneumatická doprava co nejméně nákladná z investičního i z provozního hlediska. Při této optimalizaci však musí být ponechány optimální provozní parametry, které vedou ke spolehlivosti a bezproblémovému fungování dopravního systému.

7.1 Optimalizace průměru potrubí dopravní trasy

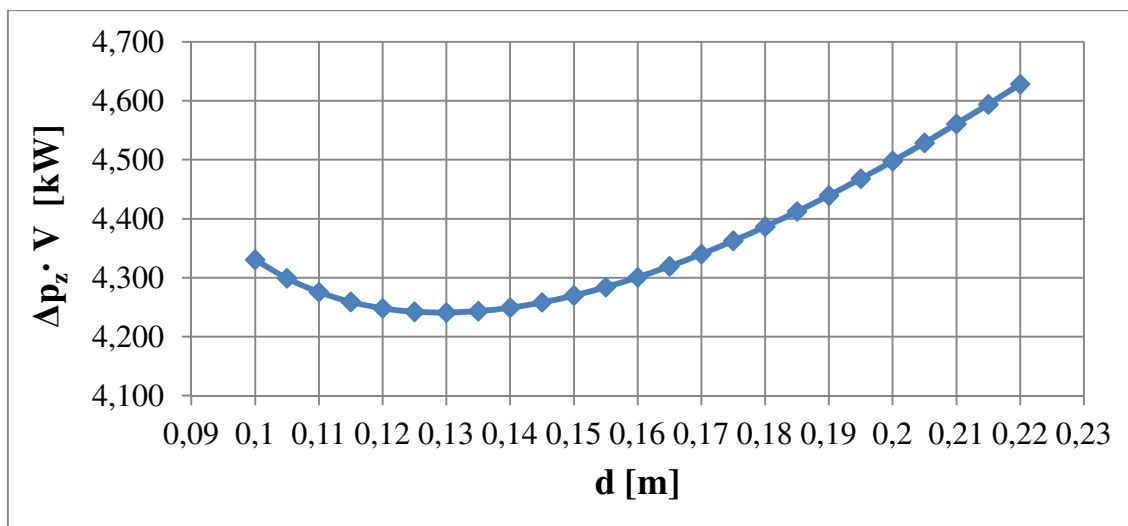
Na obr. 7.1 je znázorněna závislost tlakové ztráty na vnitřním průměru dopravního potrubí a na obr. 7.2 závislost objemového průtoku na vnitřním průměru dopravního potrubí. Na základě metody pro stanovení optimálního průměru pro zajištění nízkých provozních nákladů uvedené v kapitole 5.1, byla vynesena závislost součinu tlakové ztráty Δp_z [Pa] a objemového průtoku dopravního vzduchu \dot{V} [m^3/s] při konstantní střední rychlosti $v_{\text{stř}}$ [m/s] na vnitřním průměru dopravní trasy d [m]. Tato závislost je znázorněna na obr. 7.3. Hodnoty, použité pro konstrukci této závislosti jsou uvedeny v příloze č. 2. Minimální hodnotě součinu $\Delta p_z \cdot \dot{V}$ odpovídá optimální vnitřní průměr potrubí $d_{\text{opt}} = 0,13$ m. Na základě této hodnoty bylo vybráno pro dopravní trasu normalizované ocelové bezešvé potrubí DN 125 o vnitřním průměru $d = 0,124$ m.



Obr. 7.1 Závislost $\Delta p_z = f(d)$



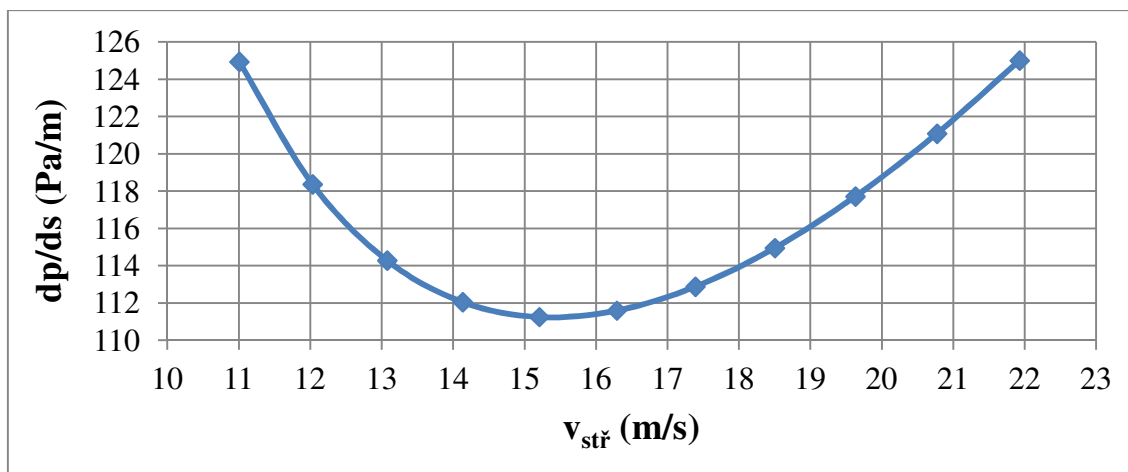
Obr. 7.2 Závislost $\dot{V} = f(d)$



Obr. 7.3 Závislost $\Delta p_z \cdot \dot{V} = f(d)$

7.2 Volba dopravní rychlosti

Metoda optimalizace pneumatické dopravy za pomoci fázového diagramu je vysvětlena v kapitole 5.2. Ke stanovení optimální dopravní rychlosti s ohledem na tlakový spád slouží fázový diagram, který je zobrazen na obr. 7.4. K jeho sestrojení byly použity hodnoty, které jsou uvedeny v příloze č. 3. Sestrojen byl s optimalizovanou hodnotou vnitřního průměru dopravního potrubí $d = 0,124$ m a za předpokladu konstantní hodnoty hmotnostního průtoku materiálu $\dot{M}_m = 1,111$ kg / s . Tlakový spád pneumatické dopravy dosahuje minimální hodnoty při střední dopravní rychlosti $v_{\min} = 15,2$ m/s, které odpovídá počáteční rychlosti $v_0 = 14$ m/s. Z hlediska provozuschopnosti dopravy se doporučuje volit rychlost z oblasti stabilní pneumatické dopravy ve vzhledu, která se nachází napravo od této minimální rychlosti. Z fázového diagramu je zřejmé, že např. střední hodnota rychlosti $v_{\text{stř}} = 17,4$ m/s, které odpovídá počáteční rychlosti $v_0 = 16$ m/s se v této oblasti nachází, současně této rychlosti odpovídá nízký tlakový spád a proto je možné tuto rychlost zvolit jako základní parametr pneumatické dopravy.



Obr. 7.4 Fázový diagram

7.3 Souhrn parametrů pneumatické dopravy

Na základě optimalizace v předchozích kapitolách, byly zvoleny následující parametry řešeného systému pneumatické dopravy:

- vnitřní průměr potrubí dopravní trasy $d = 0,124$ m
- počáteční dopravní rychlost $v_0 = 16$ m/s, resp. střední rychlost $v_{stř} = 17,4$ m/s

8. VÝPOČET TLAKOVÉ ZTRÁTY TRASY PNEUMATICKÉ DOPRAVY PO OPTIMALIZACI PARAMETRŮ

Vstupní parametry pro výpočet tlakové ztráty pneumatické dopravy jsou shodné s parametry uvedenými v tabulce 6.1. Liší se pouze v parametrech, které byly v předcházejících kapitolách optimalizovány. Těmi jsou vnitřní průměr dopravního potrubí d [m] a počáteční dopravní rychlost v_0 [m/s]. Výpočet byl proveden podle postupu v kapitole 6. Výpočtem s optimalizovanými hodnotami průměru a rychlosti vyšel tlak na konci dopravní trasy (označeno jako místo B) $p_B = 92755$ Pa. Když se tato hodnota odečte od tlaku na začátku dopravní trasy (označeno jako místo A) $p_A = 110735$ Pa vyjde celková tlaková ztráta dopravní trasy, která byla vypočtena modifikovanou metodou aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu $\Delta p_z = 17980$ Pa. Opět je nutné hodnotu vstupního tlaku p_A [Pa] upravit tak, aby na konci trasy vycházel barometrický tlak okolí. Výpočtem byl stanoven počáteční tlak (v bodě A trasy) $p_A = 116133$ Pa. Tlak na konci úseku (v bodě B trasy) $p_B = 98000$ Pa. Celková tlaková ztráta dopravní trasy tak činí $\Delta p_z = 18133$ Pa. Veškeré vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 4.

9. VOLBA VHODNÉHO PODÁVAČE MATERIÁLU

Rozdělení a doporučení pro volbu podávače materiálu bylo uvedeno v kapitole 2.7. U řešeného systému kontinuální středotlaké pneumatické dopravy je možno volit z několika druhů podávačů – rotační, šnekový, ejekční a průtokový. První hledisko pro volbu podávače budou vlastnosti dopravovaného materiálu. Vzhledem k tomu, že je dopravován popílek, který je vysoce abrazivní je třeba volit podávač bez pohyblivých součástí přicházejících do styku s dopravovaným materiálem, tedy ejektorový nebo průtokový. Druhé hledisko bude energetická náročnost provozu podávače. U ejektorového podávače je energetická ztráta tvořena energií potřebnou k vytvoření ejekčního účinku vzduchu. Výhodou průtokového podávače materiálu je nízká energie potřebná k provzdušnění sloupce materiálu a zejména, že využívá k vytvoření tlakového uzávěru potenciální energii shromážděného materiálu ve výsypce elektrického odlučovače. Je tedy z hlediska energetické náročnosti vhodnější volbou než ejektorový podávač. Na základě výše uvedeného je tedy volen průtokový podávač materiálu.

9.1 Návrh výšky gravitační komory průtokového podávače

Hlavním parametrem průtokového podávače je výška gravitační komory, tedy stavební výška mezi podlahou a výstupem výsypky odlučovače. V gravitační komoře se nachází provzdušněný sloupec materiálu tvořící tlakový uzávěr hydrostatickým tlakem. Výpočet se provede podle vzorce (2.1)

$$p_f = H_g \cdot \rho_f \cdot g$$

$$H_g = \frac{p_f}{g \cdot \rho_f} = \frac{18133}{9,81 \cdot 640} = 2,89 \text{ m}$$

$$p_f = \Delta p_z = 18133 \text{ Pa}$$

, kde H_g [m] – výška sloupce provzdušněného materiálu;

ρ_f [kg/m³] – sypná hmotnost provzdušněného materiálu;

g [m/s²] – tíhové zrychlení;

p_f [Pa] – hydrostatický tlak sloupce provzdušněného materiálu;

Δp_z [Pa] – celková tlaková ztráta dopravní trasy.

Výška gravitační komory tedy musí být minimálně stejně vysoká jako vypočtená výška sloupce provzdušněného materiálu $H_g = 2,89$ m. V praxi je potřeba také určit další parametry a dimenze jednotlivých částí podáváče materiálu. To se řeší na základě prostorových možností v místě realizace dopravní trasy pneumatické dopravy a zejména na základě zkušeností projektanta s již realizovanými projekty.

10. ZÁVĚR

Na začátku práce bylo uvedeno rozdělení systémů pneumatické dopravy, vlastnosti dopravovaných materiálu, rozdělení podáváčů dopravovaného materiálu do dopravní trasy a charakteristiky důležité pro jejich volbu. Dále se teoretická část zabývala postupy a metodami, které se používají pro výpočet celkové tlakové ztráty dopravního potrubí při pneumatické dopravě. Na závěr teoretické části bylo pojednáno o volbě a optimalizaci parametrů pneumatické dopravy tak, aby byly zajištěny nízké investiční i provozní náklady a aby byl zajištěn bezproblémový chod celého zařízení pneumatické dopravy.

Praktická část diplomové práce se zabývala volbou a výpočtem vhodných parametrů zadaného systému pneumatické dopravy popítku z výsypky elektrického odlučovače do zásobníkové sila. K výpočtu tlakové ztráty dopravní trasy byla vybrána z důvodu nejvyšší přesnosti metoda aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu. Z důvodu dopravy popítku o teplotě $t_m = 80$ °C bylo nutné vypočítat teplotu směsi dopravovaného materiálu a dopravního plynu za podáváčem materiálu, tedy na začátku prvního úseku dopravní trasy. Následoval výpočet tlakových ztrát jednotlivých úseků, na které byla dopravní trasa rozdělena. Výpočet byl pro názornost ukázán na prvním úseku dopravní trasy. Při zvoleném tlaku na začátku dopravní trasy (označeno jako místo A na schéma trasy) $p_A = 135000$ vyšel tlak na konci dopravní trasy (označeno jako místo B na schéma trasy) $p_B = 121560$ Pa. Po odečtení této hodnoty tlaku od počátečního tlaku vyšla celková tlaková ztráta dopravní trasy, která byla vypočtena modifikovanou metodou aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu $\Delta p_z = 13440$ Pa. Po výpočtu následovala úprava počátečního tlaku tak, aby na konci trasy vyšel barometrický tlak okolí, tedy $p_b = 98000$ Pa. Výpočtem byl stanoven počáteční tlak

$p_A = 110735$ Pa. Tlak na konci úseku $p_B = 98000$ Pa. Celková tlaková ztráta dopravní trasy byla vypočtena $\Delta p_z = 12735$ Pa.

Po výpočtu byla provedena optimalizace navrhovaných parametrů pneumatické dopravy, tedy průměru dopravního potrubí d [m] a počáteční, resp. střední dopravní rychlost $v_{stř}$ [m/s]. Optimalizace průměru byla provedena vynesemím závislosti $\Delta p \cdot \dot{V} = f(d)$, ze které je možno odečíst optimální průměr potrubí zohledňující nejen tlakovou ztrátu trasy, ale také množství dopravovaného vzduchu. Nejnižší hodnota součinu $\Delta p_z \cdot \dot{V}$ odpovídala průměru $d_{opt} = 0,13$ m. Z důvodu snížení investičních nákladů je vhodné při výběru normalizovaného potrubí volit průměr z hodnot nalevo od d_{opt} [m]. Bylo tak zvoleno normalizované ocelové bezešvé potrubí DN 125 o vnitřním průměru $d = 0,124$ m. Dalším krokem byla volba dopravní rychlosti pomocí fázového diagramu, což je závislost tlakového spádu na střední dopravní rychlosti. Nejnižší hodnota tlakového spádu odpovídala minimální rychlosti $v_{min} = 15,2$ m/s. Při volbě dopravní rychlosti je nutné držet se napravo od této rychlosti v tzv. oblasti stabilní pneumatické dopravy. S ohledem na velikost tlakového spádu byla zvolena střední dopravní rychlost $v_{stř} = 17,4$ m/s, které odpovídá počáteční rychlost $v_0 = 16$ m/s. Posledním krokem návrhu pneumatické dopravy byl přepočet tlakové ztráty s optimalizovanými parametry. Výpočtem byl stanoven počáteční tlak $p_A = 116133$ Pa. Tlak na konci dopravní trasy $p_B = 98000$ Pa. Celková tlaková ztráta dopravní trasy tak činí $\Delta p_z = 18133$ Pa.

Po výpočtu tlakové ztráty a optimalizaci parametrů následovala volba vhodného podáváče materiálu. Vzhledem k charakteru dopravovaného materiálu a energetické náročnosti dopravy byl zvolen pro řešený systém pneumatické dopravy průtokový podáváč materiálu o výšce gravitační komory, která musí být minimálně vysoká jako vypočtená výška sloupce provzdušněného materiálu $H_g = 2,89$ m.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HEMERKA, J.: Teoretické základy pneumatické dopravy, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2017
- [2] MILLS, D., JONES, M., AGARWAL, V.: Handbook of Pneumatic Conveying Engineering, vyd. Marcel Dekker, New York (USA), 2004, ISBN 0-8247-4790-9
- [3] CHYSKÝ, J., HEMZAL K. a kol.: Větrání a klimatizace, třetí vydání, Česká Matice technická, Praha, 1993, ISBN 80-901574-0-8
- [4] HEJMA, J., BUDINSKÝ, K., VÁVRA, A., DRKAL, F.: Vzduchotechnika v dřevozpracujícím průmyslu, SNTL, Praha, 1981
- [5] URBAN, J.: Pneumatická doprava, SNTL, Praha, 1964
- [6] VÁVRA, A.: Rychlost částice při pneumatické dopravě, 1 – Teoretické řešení, Zemědělská technika 11, separátní výtisk, MZL VH, Praha, 1965
- [7] DRAŽAN, F., JEŘÁBEK K.: Manipulace s materiálem, SNTL, Praha, 1979
- [8] RAYMAN, P.: Progresivní způsob pneumatické dopravy sypkých materiálů ze sil a z výsypek tkaninových filtrů a elektroodlučovačů, Kladno, firemní podklady

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Výpočet tlakové ztráty metodou aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu

Příloha č. 2 – Optimalizace průměru dopravní trasy

Příloha č. 3 – Volba dopravní rychlosti

Příloha č. 4 – Výpočet tlakové ztráty metodou aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu po optimalizaci parametrů