ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

VÝPOČETNÍ METODY STŘEDOTLAKÉ PNEUMATICKÉ DOPRAVY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DAVID VANČURA 7 – TŽP – 2017

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Jiřímu Hemerkovi, CSc. za odborné vedení práce, podporu a pomoc při zpracování.

PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 12.1.2017 Bc. David Vančura

……...

SOUHRN

Cílem této práce je uvést teoretické základy výpočtu tlakové ztráty pneumatické dopravy a na případu pneumatické dopravy odprašků vápence v objektu cementárny v Čížkovicích porovnat tři výpočetní metody určení tlakové ztráty dopravní trasy při středotlaké pneumatické dopravě. Výpočetní metody jsou aplikovány na dopravní trasu, jejíž schéma je součástí zadání diplomové práce. Pro zadanou dopravní trasu dopravující 25 t/h je stanoven optimální průměr dopravního potrubí a vhodná dopravní rychlost. Pro zvolené parametry je stanovena výsledná tlaková ztráta dle modifikované metody aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu a je doporučen vhodný typ podávače včetně návrhových parametrů.

Klíčová slova: pneumatická doprava, tlakové ztráty, výpočetní metody, metoda aditivnosti, podávač.

SUMARRY

The aim of this work is to present theoretical foundation of the calculation of the pressure loss of pneumatic transport. The comparison of three computational methods for obtaining pressure loss of pipeline in medium-pressure pneumatic transport is shown on the case of the pneumatic transport of limestone dedusts in the cement mill Čížkovice. Calculation methods are applied over the pipeline whose scheme is in the assignment of the diploma thesis. The optimal diameter of the pipeline and appropriate transportation velocity is determined on the given 25 t/h pipeline. For the selected parameters the result pneumatic loss is determined by the modified method of additivity with correction for progressive acceleration of gas and progressive acceleration of material. The appropriate type of feeder including its design parameters is recommended.

Keywords: pneumatic transport, pressure loss, calculation methods, method of additivity, feeder

Obsah:

SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ 3

1. ÚVOD 6

2. PNEUMATICKÁ DOPRAVA 6

3. TLAKOVÉ ZTRÁTY PNEUMATICKÉ DOPRAVY 7

3.1 Rovnice tlakového spádu 7

3.2 Pohybová rovnice částice 9

3.3 Součinitel dopravy 11

3.4 Řešení rovnice tlakového spádu 12

3.5 Optimalizace pneumatické dopravy 13

3.5.1 Fázový diagram a optimalizace pneumatické dopravy 13

3.5.2 Optimalizace provozních nákladů pneumatické dopravy 15

3.6 Nízkotlaká pneumatická doprava – princip aditivnosti 15

3.7 Výpočetní metody středotlaké a vysokotlaké dopravy 16

3.7.1 Modifikovaná metoda aditivnosti, doplněná o ztrátu urychlením plynu a urychlením materiálu 17

3.7.2 Urbanova metoda 18

4. STANOVENÍ TLAKOVÉ ZTRÁTY DOPRAVNÍ TRASY DLE VÝPOČETNÍCH METOD U STŘEDOTLAKÉ PNEUMATICKÉ DOPRAVY 21

4.1 Modifikovaná metoda aditivnosti doplněná o korekci na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu 22

4.1.1 Postup výpočtu 22

4.2 Modifikovaná metoda aditivnosti doplněná o korekci na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu 33

4.2.1 Postup výpočtu 33

4.3 Urbanova metoda 35

4.3.1 Postup výpočtu pro přetlakovou dopravu 35

5. POROVNÁNÍ VÝPOČETNÍCH METOD STŘEDOTLAKÉ PNEUMATICKÉ DOPRAVY 39

6. OPTIMALIZACE PNEUMATICKÉ DOPRAVY 41

6.1 Optimalizace provozních nákladů pneumatické dopravy 41

6.2 Fázový diagram a optimalizace pneumatické dopravy 42

7. STANOVENÍ VÝSLEDNÉ TLAKOVÉ ZTRÁTY DLE ZVOLENÉ METODY 44

8. DOPORUČENÍ VHODNÉHO PODÁVAČE 44

9. ZÁVĚR 46

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 48

SEZNAM PŘÍLOH 49

SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Označení	Název	Jednotka
A	průřez potrubí dopravní trasy (označení slouží k odvození rovnice tlakového spádu)	[m^2]
C_M	hmotnostní koncentrace materiálu	[kg/m^3]
d	vnitřní průměr potrubí dopravní trasy	[m]
d_{opt}	optimální průměr potrubí	[m]
dp	diferenciál tlaku	[Pa]
ds	diferenciál délky úseku	[m]
dt	diferenciál času	[s]
du	diferenciál rychlosti materiálu	[m/s]
dv	diferenciál rychlosti plynu	[m/s]
F_a	aerodynamický odpor částice	[N]
F_g	gravitační síla působící na částici	[N]
Fr	Froudeho číslo potrubí	[1]
$Fr_č$	Froudeho číslo částice	[1]
Fr_s	jiné vyjádření Froudeho čísla	[1]
F_τ	odporová síla působící proti pohybu částice v potrubí a vzájemnými nárazy mezi částicemi	[N]
g	tíhové zrychlení	[m/s^2]
H	převýšení i-tého úseku či dopravní trasy	[m]
k	součinitel dopravy	[1]
L	celková délka dopravní trasy, délka úseku	[m]
$\dot{M}$	hmotnostní tok plynu	[kg/s]
$M_č$	hmotnost částice	[kg]
$\dot{M}_m$	hmotnostní tok materiálu	[kg/s]
p_0	tlak v potrubí na počátku dopravní trasy	[Pa]
p_1	počáteční tlak v potrubí v prvním úseku dopravní trasy	[Pa]
p_2	tlak v potrubí na konci dopravní trasy či úseku	[Pa]
p_b	barometrický tlak	[Pa]
p_d	dynamický tlak	[Pa]
r	měrná plynová konstanta	[J/kg.K]

Označení	Název	Jednotka
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
s	délka úseku	[m]
S	průřez potrubí v i-tém úseku	[m^2]
T_0	termodynamická teplota na počátku dopravní trasy či i-tého úseku	[K]
u	střední rychlost materiálu (částic)	[m/s]
U_2	formální označení výrazu	[1]
u_{vz}	rychlost vznosu částice	[m/s]
$\dot{V}$	objemový tok	[m^3/s]
v	střední rychlost plynu	[m/s]
v_0	počáteční rychlost plynu na počátku dopravní trasy	[m/s]
v_1	počáteční rychlost plynu v prvním úseku dopravní trasy	[m/s]
v_2	počáteční rychlost plynu v posledním úseku dopravní trasy	[m/s]
v_{min}	dopravní rychlost (u fázového diagramu rozděluje oblasti stabilní a nestabilní dopravy)	[m/s]
V_{sm}	objem směsi (vzduch a dopravovaný materiál)	[m^3]
W_2	formální označení výrazu	[1]

Označení	Název	Jednotka
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
$\Delta p_{m,H}$	tlaková ztráta způsobená zdvihem materiálu	[Pa]
$\Delta p_{m,u}$	tlaková ztráta způsobená počátečním urychlením materiálu	[Pa]
Δp_{m1}	tlaková ztráta způsobená třením materiálu	[Pa]
Δp_{m2}	tlaková ztráta způsobená zdvihem materiálu	[Pa]
Δp_{m3}	tlaková ztráta způsobená při průchodu materiálu místními odpory	[Pa]
$\Delta p_{u,m}$	tlaková ztráta způsobená urychlením materiálu	[Pa]
$\Delta p_{u,v}$	tlaková ztráta způsobená urychlením plynu	[Pa]
Δp_{v1}	tlaková ztráta způsobená třením plynu	[Pa]
Δp_{v2}	tlaková ztráta způsobená zdvihem plynu	[Pa]
Δp_{v3}	tlaková ztráta způsobená při průchodu plynu místními odpory	[Pa]
Δp_z	celková tlaková ztráta	[Pa]

Označení	Název	Jednotka
α	úhel oblouku	[°]
μ	směšovací poměr	[1]
β	poměrná rychlost	[1]
γ	součinitel polohy oblouku	[1]
ε	poréznost	[1]
ζ	ztrátový součinitel při průchodu plynu obloukem	[1]
η	dynamická viskozita	[Pa.s]
λ	součinitel tření	[1]
ν	kinematická viskozita	[m^2/s]
ξ_y	základní hodnota součinitele tření dopravovaného materiálu	[1]
ξ_υ	součinitel odporu proti pohybu částice v potrubí	[1]
π	Ludolfovo číslo	[1]
ρ	hustota plynu	[kg/m^3]
ρ_m	hustota materiálu částic	[kg/m^3]
ρ_s	sypná hmotnost	[kg/m^3]
τ	tečné napětí na stěně vlivem plynu	[Pa]
τ_m	tečné napětí na stěně vlivem materiálu	[Pa]
υ	úhel sklonu i-tého úseku dopravní trasy	[°]

1. ÚVOD

Tato práce se zabývá především stanovením tlakové ztráty dopravní trasy při středotlaké přetlakové pneumatické dopravě třemi výpočetními metodami včetně porovnání.

Nejprve jsou popsány teoretické základy k dané problematice. V následující kapitole budou na zadanou dopravní trasu aplikovány tři metody výpočtu tlakové ztráty při středotlaké pneumatické dopravě, jejichž postup výpočtu a výsledky jsou porovnány. Dále dle jedné zvolené metody výpočtu tlakové ztráty dopravní trasy v našem případě modifikovaná metoda aditivnosti s rozdělením trasy na více jednoduchých úseků a korekci na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu je stanoven optimální průměr potrubí dopravní trasy pomocí vynesené závislosti výkonového měřítka resp. součinu $(\Delta p.\dot{V})$ a vnitřního průměru potrubí dopravní trasy $\emptyset d$ a dále je určena střední dopravní rychlost $v_{st\check{r}}$. Ze stanovených parametrů je vypočtena výsledná tlaková ztráta dopravní trasy, která bude jedním ze vstupních parametrů pro návrh vhodného podávače.

2. PNEUMATICKÁ DOPRAVA

Než se dostaneme k samotnému odvození rovnice tlakového spádu a jejího řešení, je nutné zmínit, co je to vlastně pneumatická doprava. Pneumatická doprava je obecně známa jako doprava materiálu stlačeným vzduchem a to vodorovně, šikmo i svisle. Největším problémem u návrhu pneumatické dopravy je neúplnost projekčních podkladů pro nové dopravované materiály. Materiálové vlastnosti, které musí být experimentálně zjištěny, ve velké míře ovlivňují chování částic v potrubí čímž je ovlivněn tlakový spád po délce potrubní trasy, tudíž celková tlaková ztráta.
Pneumatická doprava se dělí podle různých hledisek:

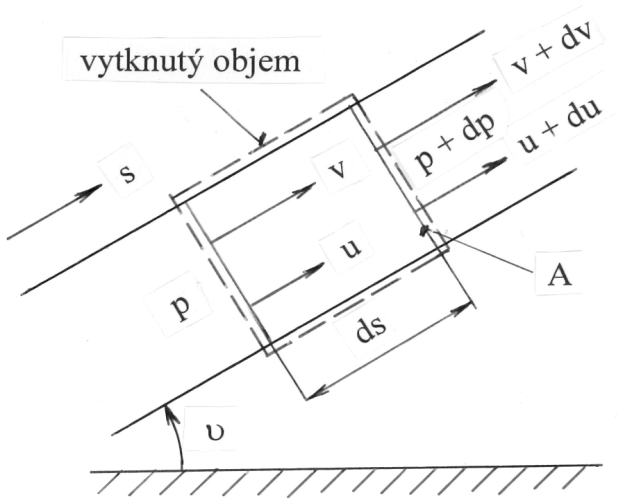
1) dle tlaku v potrubí: *podtlakovou, přetlakovou a smíšenou*
2) dle velikosti tlakové ztráty: *nízkotlakou, středotlakou a vysokotlakou*

Tlaková ztráta dopravní trasy se u nízkotlaké dopravy dosahuje hodnot do $10\ kPa$. U středotlaké dopravy se pohybuje tlaková ztráta v rozmezí hodnot $10 \div 50\ kPa$ a u vysokotlaké dopravy dosahuje hodnot $> 50\ kPa$.

3. TLAKOVÉ ZTRÁTY PNEUMATICKÉ DOPRAVY

3.1 Rovnice tlakového spádu

Výchozí rovnicí k určení tlakové ztráty dopravní trasy při pneumatické dopravě je rovnice tlakového spádu. V literatuře (L1) je odvozena rovnice tlakového spádu pro šikmé potrubí s úhlem ν pro obecný tvar pneumatické dopravy viz obr. 3.1.



Obr. 3.1 Označení veličin u rovnice tlakového spádu

Rovnice je odvozena aplikací věty o změně hybnosti ve vytknutém objemu, která říká, že změna hybnosti je rovna součtu všech působících sil na kontrolní oblast. Rovnice je uvedena v konečném tvaru dle vztahu

$$\dot{M}dv + \dot{M}_m du = -Adp - \pi d\, ds(\tau + \tau_m) - AdsC_M g\, sinv - Ads\varepsilon\rho g\, sinv \qquad (3.1\text{-}1)$$

úpravou rovnice (3.1-1) dostaneme rovnici pro vyjádření tlakového spádu:

$$-\frac{dp}{ds} = \frac{\pi d\tau}{A}\left(1 + \frac{\tau_m}{\tau}\right) + \frac{\varepsilon\rho\mu}{\beta} g\, sin\, \upsilon + \varepsilon\rho g\, sin\, \upsilon + \frac{\dot{M}}{A}\frac{dv}{ds} + \frac{\dot{M}_m}{A}\frac{du}{ds} \qquad (3.1\text{-}2)$$

dalšími úpravami rovnice (3.1-2) dostaneme rovnici:

$$-\frac{dp}{ds} = \lambda \frac{1}{d}\frac{v^2}{2}\rho\left(1 + \frac{\tau_m}{\tau}\right) + \left(\frac{\varepsilon\rho\mu}{\beta} + \varepsilon\rho\right) g\, sinv + \varepsilon\rho\frac{1}{2}\frac{d(v^2)}{ds} + C_M\frac{1}{2}\frac{d(u^2)}{ds} \qquad (3.1\text{-}3)$$

kde:

λ [1] – součinitel tření

d [m] – vnitřní průměr potrubí dopravní trasy

v [m/s] – střední rychlost plynu

u [m/s] – střední rychlost materiálu (částic)

ρ [kg/m^3] – hustota plynu

τ_m [Pa] – tečné napětí na stěně vlivem materiálu

τ [Pa] – tečné napětí na stěně vlivem plynu

ε [1] – poréznost

μ[1] – směšovací poměr

β [1] – poměrná rychlost

g [m/s^2] – tíhové zrychlení

υ [°] – úhel sklonu potrubí

C_M [kg/m^3] – hmotnostní koncentrace materiálu.

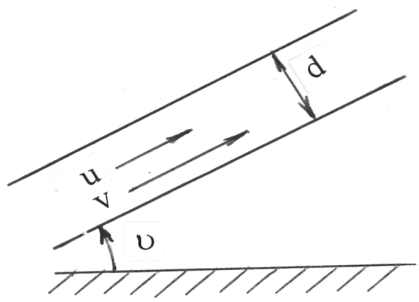
Rovnice (3.1-3) je obecná diferenciální rovnice tlakového spádu *dp/ds*. První člen na pravé straně rovnice představuje tlakový spád třením plynu a materiálu, druhý člen vyjadřuje tlakový spád zdvihem plynu a materiálu, třetí člen tlakový spád urychlením plynu a poslední člen tlakový spád urychlením materiálu.

První člen na levé straně rovnice vyjadřuje změnu hybnosti proudu plynu a druhý člen na levé straně rovnice změnu hybnosti proudu materiálu. Na pravé straně rovnice jsou jednotlivé působící síly na kontrolní oblast. První člen vyjadřuje výslednou tlakovou sílu, druhý člen výslednou třecí sílu na stěnách potrubí působící proti pohybu směsi vznikající z tečného napětí na stěně vlivem plynu τ a materiálu τ_m. Poslední dva členy na pravé straně jsou průměty gravitační síly do směru potrubí odpovídající hmotnosti materiálu a hmotnosti plynu ve vytknutém objemu.

V tuto chvíli máme v rovnici jednu neznámou a to střední rychlost částice u [m/s] v daném průřezu potrubí nebo chcete-li poměrnou rychlost $\beta = u/v$. Aby bylo možno stanovit hodnotu poměrné rychlosti u pneumatické dopravy je potřeba vyřešit pohybovou rovnici částice nacházející se v dopravním potrubí.

3.2 Pohybová rovnice částice

Obecný případ šikmé dopravy je zobrazen na obr. 3.2



Obr. 3.2 Šikmá pneumatická doprava

Pro pohyb částice nacházející se v šikmém dopravním potrubí platí obecná vektorová rovnice ve tvaru

$$M_{č}\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{F}_a + \vec{F}_g + \vec{F}_\tau \tag{3.2-1}$$

kde:

$\vec{F}_a$ *[N] – aerodynamický odpor částice*

$\vec{F}_g$ *[N] – gravitační síla působící na částici*

$\vec{F}_\tau$ *[N] – odporová síla působící proti pohybu částice v potrubí a vzájemnými nárazy mezi částicemi.*

Postupnými operacemi se dosáhne pohybové rovnice ve tvaru:

$$\frac{du}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{(v-u)^2}{u_{vz}^2}g - gsinv - \xi_v\frac{1}{d}\frac{u^2}{2} \tag{3.2-2}$$

kde:

u_{vz} *[m/s] – rychlost vznosu částice*

ξ_v *[1] – součinitel odporu proti pohybu částice v potrubí*

V našem případě využijeme alternativu pohybová rovnice částice pro ustálenou šikmou dopravu, při které je dle některých autorů rovnice doplněna o sílu F_v $[N]$. Tato

síla je potřeba k tomu, aby částice zůstala ve stavu vznosu. Dle Vávry (L2) lze sílu vyjádřit vztahem

$$F_v = M_č\, g \frac{u_{vz}}{v}\, cos^2 v \tag{3.2-3}$$

kde:

$M_č$ *[kg] – hmotnost částice*

Odporová síla $\vec{F_\tau}$ je pak vztažena pouze na základní hodnotu součinitele odporu proti pohybu částice v potrubí ξ_y [1]. Můžeme tedy přepsat alternativní pohybovou rovnici do tvaru

$$0 = \frac{(v-u)^2}{u_{vz}^2} g - g\left(sinv + \frac{u_{vz}}{v} cos^2 v\right) - \xi_y \frac{1}{d}\frac{u^2}{2} \tag{3.2-4}$$

Tato rovnice je alternativou k původnímu vyjádření ve tvaru (3.2-2). Dle Vávry (L2) se dojde z řešení rovnice (3.2-4) ke složitému výrazu vyjadřující poměrnou rychlost u ustálené šikmé dopravy ve tvaru

$$\beta_v = \frac{u}{v} = \frac{1-\sqrt{1-\left(1-\frac{\xi_v}{2}Fr_s\right)\left(1-\frac{u_{vz}^2}{v^2}sinv-\frac{u_{vz}^3}{v^3}cos^2 v\right)}}{1-\frac{\xi_v}{2}Fr_s} \tag{3.2-5}$$

kde:

$Fr_s = \frac{1}{Fr_č}$ *– jiné vyjádření Froudeho čísla částice*

Ze vztahu (3.2-5) vyplývá, že ke stanovení skutečné hodnoty poměrné rychlosti $\beta = u/v$ je potřeba znát hodnotu poměru rychlostí u_{vz}/v, tedy rychlost vznosu částice u_{vz} spolu s návrhovou rychlostí proudu v, ale také hodnotu Froudeho čísla Fr_s a v neposlední řadě základní hodnotu součinitele odporu (součinitele tření) dopravovaného materiálu ξ_y.

Existují tabulky se základními hodnotami součinitele tření dopravovaného materiálu. Dle druhu materiálu (zrnitý, práškový) je uvedena příslušná hodnota ξ_y. Jedná se pouze o materiály, u nichž byly tyto parametry laboratorně zjištěny. U většiny materiálů není tato hodnota známa, proto se např. dle doporučení Vávry (ústní sdělení) používá hodnota $\xi_y = 0{,}005$.

U poměrné rychlosti $\beta = u/v$ existují také určité odhady a doporučení hodnot s tím, že záleží na dopravě (vodorovná, svislá nebo šikmá). Na základě praktických zkušeností s provozem pneumatické dopravy existují i doporučení dopravních rychlostí pro různé dopravované materiály. Hodnota dopravní rychlosti by měla být taková, aby nedocházelo k ucpání dopravní trasy. Jsou tedy určeny minimální dopravní rychlosti, pod které by se projektant při návrhu neměl v žádném případě dostat. V opačném případě by neměla dopravní rychlost být tak vysoká aby docházelo k případné lokální abrazi materiálu a v neposlední řadě k hluku při proudění směsi dopravním potrubím.

Závěrem této kapitoly je nutno zdůraznit, že volbou dopravní rychlosti v pneumatické dopravě projektant ovlivňuje nejen spolehlivost a správnou funkčnost pneumatické dopravy, ale i provozní a investiční náklady.

3.3 Součinitel dopravy

V předchozí kapitole 3.1 je uvedena obecná rovnice tlakového spádu (3.1-3), ve které je tlakový spád v potrubí vlivem tření vyjádřen tečným napětím plynu a materiálu na stěně potrubí $\tau[Pa]$ a $\tau_m[Pa]$. V této souvislosti přišel v minulosti pan Gasterstädt k závěru, že poměr napětí τ_m/τ závisí na hodnotě směšovacího poměru μ [1] dle vztahu

$$\frac{\tau_m}{\tau} = k\mu \tag{3.3-1}$$

kde:

k [1] – *součinitel úměrnosti, závislý na úhlu dopravy a druhu dopravovaného materiálu*

Podle autora se součinitel úměrnosti nazývá Gasterstädtův součinitel dopravy. Po dosazení vztahu (3.3-1) do obecné diferenciální rovnice tlakového spádu (3.1-3) přejde rovnice do tvaru

$$-\frac{dp}{ds} = \lambda \frac{1}{d}\frac{v^2}{2}\rho(1 + k\mu) + \left(\frac{\varepsilon\rho\mu}{\beta} + \varepsilon\rho\right) g\, sin\upsilon + \varepsilon\rho\frac{1}{2}\frac{d(v^2)}{ds} + C_M\frac{1}{2}\frac{d(u^2)}{ds} \tag{3.3-2}$$

Hodnota součinitele k [1] lze stanovit z empirických vztahů, které vyjadřují specifické vlastnosti dopravovaného materiálu s ohledem na tlakový spád třením materiálu o stěny potrubí. Znalost hodnoty k nám umožňuje stanovit s dostatečnou přesností u daného případu tlakový spád vlivem tření, jehož podíl na celkové tlakové

ztrátě bývá ve většině případů pneumatické dopravy dominantní. Existuje opravdu celá řada vztahů pro určení součinitele *k*. Vávra (L2) uvádí ve své literatuře univerzální vztah pro součinitel dopravy při šikmé dopravě pod úhlem υ ve tvaru

$$k = \frac{2\frac{u_{\upsilon z}}{\upsilon}\cos\upsilon}{\lambda\frac{u}{\upsilon}\frac{1}{Fr}} + \frac{\xi_y}{\lambda}\frac{u}{\upsilon} \qquad (3.3\text{-}3)$$

kde:

Fr [1] – *Froudeho číslo potrubí*

λ [1] – *součinitel tření čistého plynu v potrubí*

Při použití univerzálního vztahu pro výpočet součinitele dopravy *k*, při dopravě pod úhlem se musí respektovat předpoklad, že se jedná o hydraulicky hladké potrubí. Tato skutečnost nastává po krátké době provozu dopravní trasy při pneumatické dopravě vlivem abrazivních vlastností dopravovaného materiálu, přičemž dojde k vyhlazení vnitřního povrchu stěn potrubí. Součinitel tření lze opět stanovit stejně jako součinitel dopravy *k* z mnoha empirických vztahů závislých na Reynoldsově čísle *Re* [-]. Je mnoho literatur uvádějících vztahy pro výpočet součinitele tření. V literatuře (L3) je doporučen vztah podle Blasia ve tvaru

$$\lambda = \frac{0{,}316}{Re^{0{,}25}} \qquad (3.3\text{-}4)$$

kde:

R_e [1] – *Reynoldsovo číslo, tento vztah platí pro* R_e *v rozsahu* $(2.10^3; 10^5)$

Pro větší hodnoty je doporučeno dle literatury (L4), použít vztah pro hydraulicky hladké potrubí ve tvaru

$$\lambda = \frac{0{,}184}{Re^{0{,}2}} \qquad (2.3\text{-}5)$$

tento vztah platí pro R_e *v rozsahu* $(10^5$ *až* $10^6)$

3.4 Řešení rovnice tlakového spádu

U nízkotlaké dopravy, kde celková tlaková ztráta $\Delta p_z < 10\ kPa,$ je výpočet celkové tlakové ztráty jednoduší, protože lze zanedbat změnu hustoty plynu ρ po délce trasy a tudíž je zanedbána expanze plynu a dá se použít princip aditivnosti. U středotlaké

a vysokotlaké dopravy již nelze změnu hustoty zanedbat a během dopravy bude plyn po délce dopravní trasy expandovat a bude se měnit jeho rychlost *v [m/s]*. Výpočet tlakové ztráty bude složitější v tom, že tlakový spád *dp/ds* je funkcí veličin, které se v průběhu dopravy po její trase postupně mění. Aby byla úloha vůbec řešitelná, předpokládá se určité zjednodušení, které je uvedeno v následujících kapitolách.

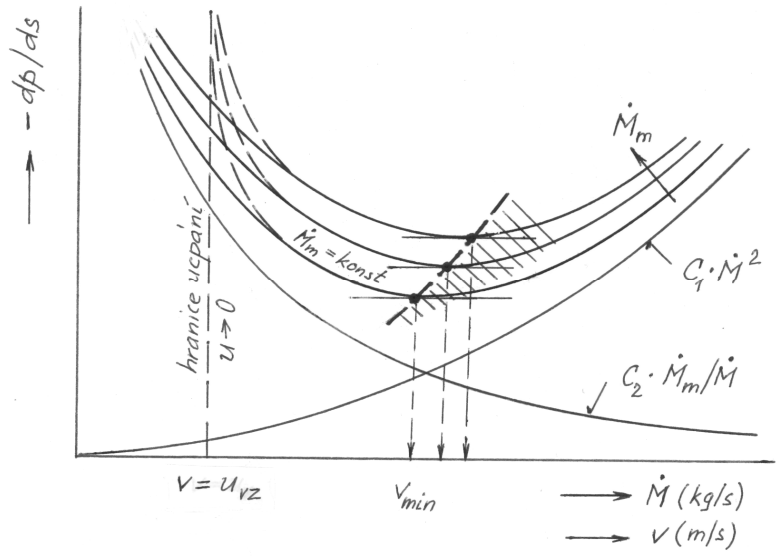
3.5 Optimalizace pneumatické dopravy

3.5.1 Fázový diagram a optimalizace pneumatické dopravy

Nejpřesnější určení vhodné dopravní rychlosti pneumatické dopravy vychází z fázového diagramu, což je grafické vyjádření závislosti tlakového spádu – dp/ds na hmotnostním průtoku plynu $\dot{M}$ $[kg/s]$ resp. rychlosti proudění plynu v $[m/s]$, kde hmotnostní tok materiálu $\dot{M}_m$ $[kg/s]$ je parametrem závislosti. Určujícím bodem, při kterém se předpokládá nejekonomičtější provoz pneumatické dopravy, je lokální minimum této závislosti. Lokální minimum totiž určuje nejen nejnižší hodnotu tlakového spádu ale i oblast doporučených dopravních rychlostí, která je v pneumatické dopravě označována jako oblast stabilní pneumatické dopravy ve vznosu. Naopak na druhé straně určuje oblast nestabilní pneumatické dopravy. Tyto dvě oblasti dělí hodnota dopravní rychlosti v_{min}, která se nachází pod lokálním minimem součtové křivky. Fázový diagram je nejpřesnější metoda k optimalizaci dopravní rychlosti, čímž je ovlivněna výsledná tlaková ztráta dopravní trasy.

Fázový diagram je sestaven na základě vztahu

$$-\frac{dp}{ds} = C_1 \,.\, \dot{M}^2 + C_2 \,.\, \frac{\dot{M}_m}{\dot{M}} \qquad (3.5\text{-}1)$$



Obr. 3.5.1 – Fázový diagram

kde:

$\frac{dp}{ds}$ $[Pa/m]$ – *výsledný tlakový spád (od proudění plynu a od přítomnosti dopravovaného materiálu)*

C_1 $[1]$ – *konstanta číslo 1*

C_2 $[1]$ – *konstanta číslo 2*

Podotýkám, že tento vztah byl odvozen pro krátký horizontální úsek, kde bylo uvažováno, že tlaková ztráta v tomto úseku je způsobena pouze třením plynu a materiálu. Ostatní členy buď neexistovali, nebo byly zanedbány.

Fázový diagram se sestavuje následujícím způsobem. Dle principu aditivnosti od sebe dokážeme oddělit tlakové ztráty způsobené prouděním plynu a prouděním materiálu. Nejprve se tedy početně určí obě konstanty ze vztahu (3.5-1). Ze stanovených konstant se určí obě závislosti dle vztahů

$$-\frac{dp}{ds} = C_1 \,.\, \dot{M}^2 \quad \text{a} \quad -\frac{dp}{ds} = C_2 \,.\, \frac{\dot{M}_m}{\dot{M}}$$

Po vynesení obou závislostí dle výše uvedených vztahů, je proveden součet hodnot obou křivek a je vynesena součtová křivka, která odpovídá vztahu (3.5-1).

Následuje určení lokálního minima součtové křivky resp. hodnota v_{min}. Posledním krokem je volba dopravní rychlosti z oblasti stabilní pneumatické dopravy.

3.5.2 Optimalizace provozních nákladů pneumatické dopravy

Pro požadované dopravované množství materiálu $\dot{M}_m$ $[kg/s]$ a konkrétní dopravní trasu, lze přiřadit různé vnitřní průměry potrubí $\emptyset d$ $[m]$. Z rovnice kontinuity vyplývá, že při zmenšování vnitřního průměru potrubí $\emptyset d$ a při zvolené dopravní rychlosti v $[m/s]$ se bude zmenšovat objemový průtok dopravovaného vzduchu $\dot{V}$ $[m^3/s]$ i $\dot{M}$ $[kg/s]$ a pro zadané $\dot{M}_m$ $[kg/s]$ se musí zvýšit hodnota směšovacího poměru, která výrazně ovlivňuje všechny tlakové ztráty ovlivněné přítomností materiálu (tření, počáteční urychlení, urychlení po délce trasy, zdvih, oblouky).

Optimalizace pneumatické dopravy spočívá v našem případě ve vynesení závislosti $\Delta p \,.\, V = f(d)$ a v určení minima. Nejnižší bod této závislosti nám bude stanovovat optimální vnitřní průměr dopravní trasy $\emptyset d_{opt}$ $[m]$, ve kterém by mělo nastat minimum provozních nákladů. Vnitřní průměry vybíráme z normalizovaných rozměrů potrubí. Při vynesení závislosti může nastat případ, kdy závislost v místě minima bude poměrně plochá. V tomto případě, volíme průměr potrubí v této oblasti, co nejmenší aby investiční náklady byly také co nejmenší.

3.6 Nízkotlaká pneumatická doprava – princip aditivnosti

U nízkotlaké dopravy se využívá pro výpočet celkové tlakové ztráty metoda aditivnosti – rozdělení dopravní trasy na více jednoduchých úseků s předpokladem, že hustota plynu v potrubí je v daném úseku konstantní a změna stavu plynu je izotermická. U nízkotlaké dopravy se neuvažuje tlaková ztráta způsobená urychlením plynu a materiálu. V našem případě se jedná, o středotlakou pneumatickou dopravu ale i přesto je tato kapitola nutná pro pochopení principu aditivnosti, který je využit při výpočtech.

Jak už bylo řečeno v předchozích kapitolách u nízkotlaké pneumatické dopravy ($\Delta p_z \leq 10\ kPa$) je možno zanedbat změnu hustoty plynu v daném úseku. Z tohoto tvrzení platí, že je zanedbána expanze plynu a v případě konstantního vnitřního průměru potrubí, zůstává stejná dopravní rychlost plynu v $[m/s]$. Za těchto podmínek lze při výpočtu tlakové ztráty využít jednoduché metody založené na principu aditivnosti.

Princip aditivnosti spočívá v určitém zjednodušení a to, že celková tlaková ztráta způsobená dopravováním směsi plynu a materiálu se uvažuje rovna součtu tlakové ztráty vzniklé při proudění samotného plynu a tlakové ztráty při proudění samotného materiálu.

Celková tlaková ztráta se tedy stanoví součtem jednotlivých složek, které vzniknou řešením příslušné části obecné rovnice tlakového spádu (3.3-2). V kapitole není uvedeno odvození jednotlivých složek tlakové ztráty z obecné rovnice tlakového spádu, ale pouze přehled již odvozených složek v konečném tvaru viz tab. 3.6-1.

Tab. 3.6-1 Přehled vztahů pro výpočet tlakové ztráty u nízkotlaké pneumatické dopravy – princip aditivnosti

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	$\varepsilon\rho g H \cong \rho g H \cong 0$	$\varepsilon\rho\mu\frac{v}{u}gH \cong \rho\mu\frac{v}{u}gH$
Místní ztráty	$\sum\zeta\,.\,p_d$	$\mu\frac{v^2}{2}\,\rho\,\sum\gamma\zeta = \mu\,p_d\,\sum\gamma\zeta$

**) Vztah platí pro podtlakovou i přetlakovou dopravu, kde představuje ztrátu dynamického tlaku na výstupu z potrubí do okolí, např. zásobníku materiálu.*

3.7 Výpočetní metody středotlaké a vysokotlaké dopravy

U středotlaké ($\Delta p_z = 10 \div 50\,kPa$) a vysokotlaké ($\Delta p_z \geq 50\,kPa$) dopravy nelze zanedbat změny hustoty plynu po délce trasy, jako je tomu u dopravy nízkotlaké. Metodu aditivnosti určenou pro nízkotlakou dopravu je potřeba modifikovat, aby ji bylo možno využít pro středotlakou případně pro vysokotlakou dopravu a to tak, že u výpočetních metod uvažujeme změnu hustoty plynu po délce dopravní trasy a vztahy pro nízkotlakou dopravu doplníme o ztrátu na urychlení plynu a ztrátu na urychlení materiálu. Tlakové ztráty u středotlaké pneumatické dopravy lze stanovit třemi výpočetními metodami.

1) Modifikovaná metoda aditivnosti, doplněná o ztrátu urychlením plynu a urychlením materiálu
   a) Varianta 1 – korekce na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu

b) *Varianta 2 – korekce na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu*

2) Urbanova metoda

Tyto metody určené pro výpočet tlakové ztráty u středotlaké dopravy zohledňují, jak už bylo řečeno změnu hustoty plynu po délce dopravní trasy. U všech výpočetních metod se použije iterační postup výpočtu, aby se dosáhlo skutečných hodnot na konci i-tého úseku nebo trasy.

3.7.1 Modifikovaná metoda aditivnosti, doplněná o ztrátu urychlením plynu a urychlením materiálu

Před samotným výpočtem je dopravní trasa rozdělena na několik přibližně stejně dlouhých úseků. Tyto úseky by měli mít přibližně stejnou tlakovou ztrátu. Pokud bude samozřejmě požadavek na co nejpřesnější průběh tlakového spádu, je potřeba dopravní trasu rozdělit na co nejvíce úseků. Oblouky (místní odpory) jsou vždy přiřazeny k předcházejícímu úseku. Pro výpočetní metodu jsou určeny určité předpoklady:

1) Hustota plynu ρ_i $[kg/m^3]$ je v daném i-tém úseku konstantní a výpočet tlakové ztráty v daném úseku Δp_i $[Pa]$ se provede dle principu aditivnosti a vztahů pro nízkotlakou pneumatickou dopravu
2) Pro dopravní trasu platí, že se jedná o izotermickou změnu stavu
3) Vlivem tlakové ztráty úseku se počáteční tlak změní na tlak konečný, který bude roven počátečnímu tlaku v následujícím úseku. Počátečnímu tlaku odpovídá dle stavové rovnice hustota plynu ρ_i $[kg/m^3]$. Z izotermické změny se stanoví rychlost plynu v_i $[m/s]$ dle podmínky $p_i . v_i = konst$. Dochází ke změně rychlosti plynu v_i $[m/s]$ a zároveň ke změně rychlosti materiálu u_i $[m/s]$, přičemž se předpokládá, že hodnota poměrné rychlosti $\beta = u_i/v_i = konst$. Se změnou rychlosti plynu se bude měnit i hodnota součinitele dopravy k_i[1].

Všechny tyto výše zmíněné veličiny se poklesem tlaku po délce trasy postupně skokovitě mění.

Modifikovaná metoda aditivnosti, která se využívá pro středotlakou i vysokotlakou dopravu, využívá ke stanovení tlakové ztráty výpočetní vztahy určené pro nízkotlakou dopravu doplněné o členy vyjadřující tlakovou ztrátu na urychlení materiálu a na urychlení plynu s ohledem na změnu hustoty plynu po délce trasy.

Celková tlaková ztráta dopravní trasy lze tedy stanovit dvěma variantami.

a) Varianta 1 – korekce na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu

Samotný výpočet tlakové ztráty dopravní trasy je proveden pomocí tab. 3.6-1. K této tlakové ztrátě je přičtena korekce na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu. Korekce se přičítá jednorázově a provádí se přes celou dopravní trasu dle vztahů

$$\Delta p_{u,v} = \varepsilon \rho_1 v_1 (v_2 - v_1) \tag{3.7-1}$$

a

$$\Delta p_{u,m} = \varepsilon \rho_1 \mu v_1 (u_2 - u_1) = \varepsilon \rho_1 \mu v_1 \beta (v_2 - v_1) \tag{3.7-2}$$

kde:

$v_1 [m/s]$ – *počáteční rychlost plynu v prvním úseku dopravní trasy*

$v_2 [m/s]$ – *počáteční rychlost plynu v posledním úseku dopravní trasy*

b) Varianta 2 – korekce na postupné urychlování plynu a postupné urychlení materiálu

Varianta 2 je založena na postupném přičítání korekce na urychlení materiálu a plynu. Tato korekce se tedy přičítá postupně po úsecích. Tato varianta mnohem lépe vystihuje změny určujících veličin, ke kterým dochází plynule po délce trasy. Vztahy (3.7-1) a (3.7-2) jsou tentokrát aplikovány postupně na jednotlivé úseky dopravní trasy a tím je i zpřesněna rychlost plynu na konci daného úseku. Dá se říci, že tato metoda se nejvíce přibližuje skutečnosti.

3.7.2 Urbanova metoda

Výpočet touto metodou je nejenom rychlý, ale i velmi přesný. Výpočet tlakové ztráty zahrnuje tlakový spád:

a) třením plynu a materiálu
b) místní ztrátou (oblouky) plynu a materiálu
c) urychlením plynu materiálu po délce trasy

Tlakový spád způsobený zdvihem materiálu a počátečním urychlením materiálu na dopravní rychlost $u\ [m/s]$ je přičten až nakonec.

Výpočet tlakového spádu vychází z rovnice

$$-\frac{dp}{ds} = \lambda \frac{1}{d}\frac{v^2}{2}\rho\ (1 + k\mu) + \frac{1}{2}\rho v^2(\sum\zeta + \mu\sum\gamma\zeta) + \varepsilon\rho\frac{1}{2}\frac{d(v^2)}{ds} + \varepsilon\mu\frac{\rho v^2}{2}\frac{2}{v}\frac{du}{ds}\frac{1}{ds} \qquad (3.7\text{-}3)$$

kde:

$\zeta[1]$ – *ztrátový součinitel při průchodu plynu obloukem*

$\gamma[1]$ – *součinitel polohy oblouku*

První člen na pravé straně rovnice vyjadřuje tlakový spád způsobený třením materiálu a plynu v potrubí. Tlakový spád způsobený při průchodu plynu a materiálu oblouky vyjadřuje člen druhý a poslední dva členy rovnice vyjadřují tlakový spád způsobený urychlením plynu a urychlením materiálu. Předpoklad pro využití této metody spočívá v těchto parametrech:

a) součinitel dopravy $k = konst.$
b) po celé délce trasy se u této metody uvažuje izotermická změna stavu plynu
c) vnitřní průměr potrubí $d = konst.$

S těmito předpoklady lze upravit rovnici (3.7-3) na tvar

$$dp\ p = -\left[\frac{\lambda(1+k\mu)}{d} + \frac{(\sum\zeta+\mu\sum\gamma\zeta)}{L}\right]\frac{\rho v^2 p}{2}ds - \frac{\rho v^2 p}{2}\frac{2dv}{v} - \mu\frac{\rho v^2 p}{2}\frac{2du}{v} \qquad (3.7\text{-}4)$$

kde:

$L[m]$ – *celková délka dopravní trasy, která v sobě zahrnuje nejen půdorysné rozměry ale i převýšení dopravní trasy včetně oblouků*

V tuto chvíli se postup výpočtu dle Urbanovy metody dělí podle tlaku v potrubí (vůči barometrickému tlaku) na podtlakovou a přetlakovou dopravu. V mém případě je zvolen způsob přetlakové dopravy, tudíž zmíním pouze vztahy určené k výpočtu přetlakové dopravy.

Nejprve předpokládáme, že na konci dopravní trasy bude tlak $p_2[Pa]$ roven tlaku barometrickému $p_b[Pa]$, z čehož bude stanovena i hustota $\rho_2[kg/m^3]$ na konci trasy. Dále zvolíme nebo známe dopravní rychlost $v_2[m/s]$, tím je znám součin na konci trasy

$\rho_2 . v_2^2 . p_2$. Z izotermické změny stavu vyplývá, že součin $\rho . v^2 . p = konst$. Po tomto zjednodušení, lze jednoduše integrovat mezi začátkem a koncem dopravní trasy. Výsledkem je vztah pro poměr tlaků p_1/p_2 ve tvaru

$$\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{1 + U_2 + W_2 \, ln \frac{p_1}{p_2}} \tag{3.7-5}$$

kde:

U_2 *a* W_2 *– formální označení pro výrazy*

$$U_2 = \left[\frac{\lambda(1+k\mu)}{d} + \frac{(\sum\zeta + \mu\sum\gamma\zeta)}{L}\right] \frac{\rho_2 v_2^2}{p_2} L \tag{3.7-6}$$

$$W_2 = 2\left(1 + \mu\frac{u}{v}\right)\frac{\rho_2 v_2^2}{p_2} \tag{3.7-7}$$

Ve vztahu (3.7-5) je poměr tlaků i pod odmocninou a tudíž je potřeba použít metodu postupného přibližování (iterační metodu). Pro první výpočet je doporučeno zvolit za poměr tlaků hodnotu 1 a maximálně po 4 krocích se s dostatečnou přesností dostaneme ke správné hodnotě poměru tlaků. K absolutní hodnotě tlaku $p_1[Pa]$, kterou dostaneme vyjádřením z rovnice (3.7-5) je nutno ještě na konec výpočtu přičíst tlakovou ztrátu způsobenou zdvihem materiálu a popřípadě počátečním urychlením materiálu. Tlaková ztráta počátečním urychlením se stanoví dle vztahu

$$\Delta p_{m,u} = \varepsilon\rho_1\mu v_1^2(\beta_1 - \beta_0) \cong \mu\rho_1 v_1^2 \frac{u}{v} = \mu\rho_2 v_2^2 \frac{u}{v}\frac{p_2}{p_1} \tag{3.7-8}$$

kde:

$\rho_2 . v_2^2$ *– známe a poměr tlaků* $\frac{p_2}{p_1}$ *vyplývá z rovnice (3.7-5)*

Tlakovou ztrátu způsobenou zdvihem materiálu vyjádříme dle vztahu

$$\Delta p_{m,H} = \varepsilon\mu\rho\frac{v}{u}gH \cong \mu\rho\frac{v}{u}gH \tag{3.7-9}$$

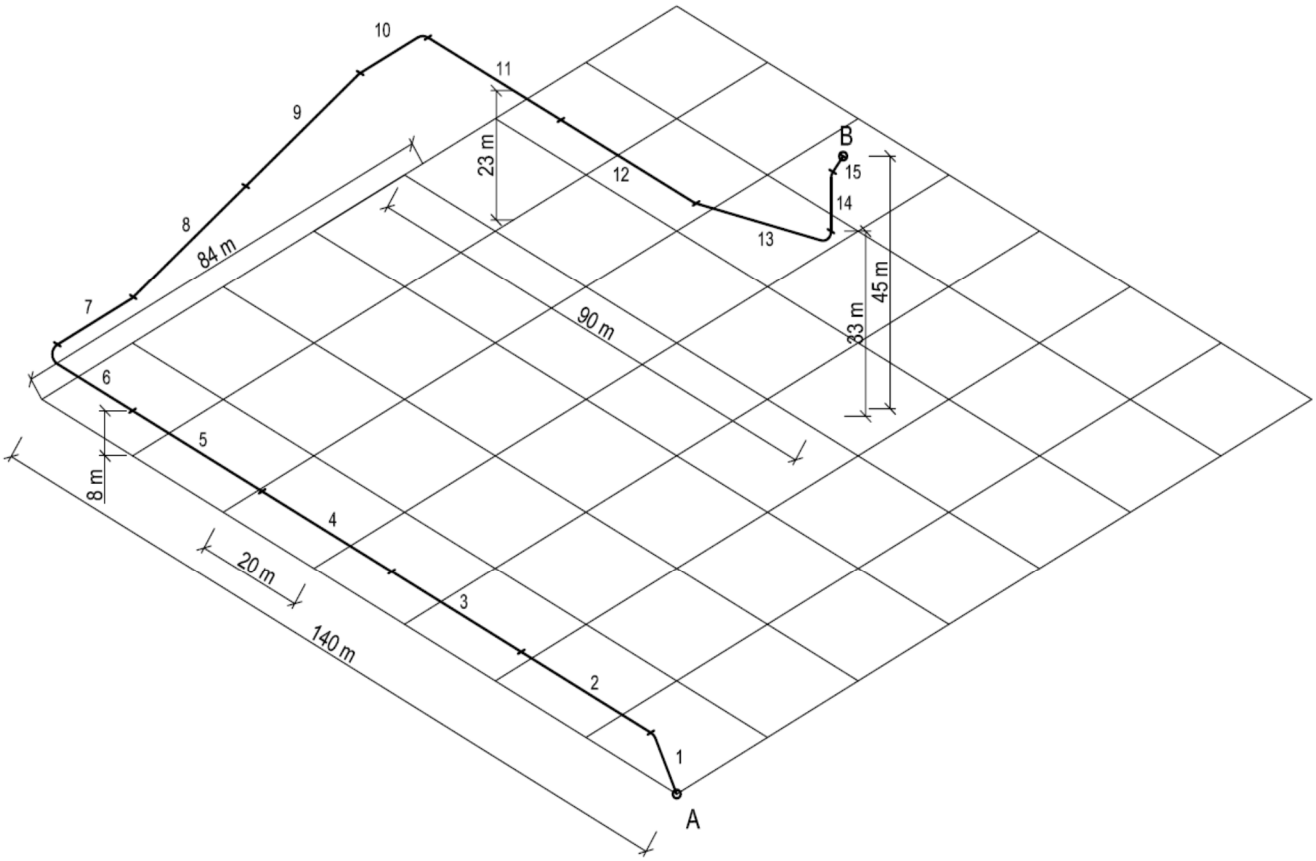
V tuto chvíli jsou známy veškeré členy tlakových ztrát a pouhým součtem stanovíme celkovou tlakovou ztrátu dopravní trasy dle Urbanovy metody.

4. STANOVENÍ TLAKOVÉ ZTRÁTY DOPRAVNÍ TRASY DLE VÝPOČETNÍCH METOD U STŘEDOTLAKÉ PNEUMATICKÉ DOPRAVY

Pro přehlednost jsou na úvod znovu uvedeny výpočetní metody, podle kterých bude stanovena celková tlaková ztráta zadané dopravní trasy středotlaké přetlakové pneumatické dopravy.

1) Modifikovaná metoda aditivnosti doplněná o korekci na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu
2) Modifikovaná metoda aditivnosti doplněná o korekci na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu
3) Urbanova metoda

Schéma zadané dopravní trasy středotlaké pneumatické dopravy:



Vstupní parametry výpočetních metod

Dopravní trasou (z bodu A do bodu B) jsou ve stavu vznosu dopravovány odprašky vápence ($CaCO_3$) o hmotnostním průtoku $\dot{M}_m = 25\ t/h$. Hustota materiálu $\rho_m = 2700\ kg/m^3$ a sypná hmotnost $\rho_s = 1200\ kg/m^3$. Celková délka dopravní trasy činí $314\ m$ a celkové převýšení $45\ m$. Byl zvolen tlak $p_0 = 135\ 000\ Pa$ a rychlost plynu $v_0 = 18\ m/s$ na počátku dopravní trasy (tlak p_0 a rychlost v_0 byly zvoleny na základě rady vedoucího diplomové práce vycházející ze zkušeností, s podobnými trasami středotlaké pneumatické dopravy, platí to ale pouze pro modifikovanou aditivní metodu, u metody Urbanovy probíhá výpočet od konce k počátku dopravní trasy, takže volíme tlak na konci). Na počátku dopravní trasy byl spolu s materiálem nasáván vzduch o teplotě $20\ °C$. Rychlost vznosu materiálu $u_{vz} = 2\ m/s$ a základní hodnota součinitele odporu $\xi_y = 0{,}01$ (součinitele tření), byly určeny opět na základě zkušeností vedoucího diplomové práce s dopravovaným materiálem. Vnitřní průměr dopravní trasy byl zvolen a odpovídá hodnotě normalizovaného rozměru ocelového bezešvého potrubí $\emptyset d = 259\ mm$. Dopravní rychlost přes celou dopravní trasu, musí být v rozmezí $15 \div 25\ m/s$.

4.1 Modifikovaná metoda aditivnosti doplněná o korekci na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu

Předpoklady výpočtu:

1) po celé délce trasy je vnitřní průměr potrubí $\emptyset d = konst.$
2) změna stavu plynu po délce trasy je izotermická
3) po celé délce trasy je poměrná rychlost $\beta = konst.$

4.1.1 Postup výpočtu

Pro přehlednost je uveden výpočet tlakové ztráty počátečního úseku. Ostatní hodnoty jsou shrnuty v tabulce, viz příloha č. 1.

1) Stanovení hmotnostního průtoku plynu $\dot{M}$

Úsek č. 1 má délku $L = 10{,}5\ m$ m a sklon $\upsilon = 58°$

Nejprve byl vypočítán průřez potrubí $S[m^2]$

$$S = \frac{\pi . d^2}{4} = \frac{\pi . 0{,}259^2}{4} = 0{,}053\ m^2$$

Hustota nasávaného vzduchu ρ

$$\rho = \frac{p_0}{r.T_0} = \frac{135000}{287.293{,}15} = 1{,}605\ kg/m^2$$

Hmotnostní průtok plynu proudící potrubím $\dot{M}$

$$\dot{M} = \rho.S.v_0 = 1{,}605.0{,}053.18 = 1{,}522\ kg/s$$

Hmotnostní průtok plynu $\dot{M}$ je po celé délce trasy konstantní.

2) **Stanovení směšovacího poměru** μ

Převod jednotek hmotnostního průtoku materiálu

$$\dot{M}_m = 25\ \ t/h = 6{,}944\ \ kg/s$$

Směšovací poměr μ

$$\mu = \frac{\dot{M}_m}{\dot{M}} = \frac{6{,}944}{1{,}522} = 4{,}564$$

3) **Stanovení Froudeho čísla** $Fr_č$

Dáno:

- *tíhové zrychlení v tíhovém poli Země* $g = 9{,}81\ m/s^2$

- *rychlost vznosu částic dopravovaného materiálu* $u_{vz} = 2\ m/s$

$$Fr_č = \frac{g.d}{u_{vz}^2} = \frac{9{,}81.0{,}259}{2^2} = 0{,}635$$

4) **Stanovení jiného tvaru Froudeho čísla** Fr_s

$$Fr_s = \frac{1}{Fr_č} = \frac{1}{0{,}635} = 1{,}574$$

5) **Stanovení poměrné rychlosti** β_v

Počáteční úsek má sklon 58°

$$\beta_v = \frac{u}{v} = \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\xi_v}{2} Fr_s\right)\left(1 - \frac{u_{vz}^2}{v^2} sin\, v - \frac{u_{vz}^3}{v^3} cos^2 v\right)}}{1 - \frac{\xi_v}{2} Fr_s}$$

$$= \frac{1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{0{,}01}{2} . 1{,}574\right)\left(1 - \frac{2^2}{18^2} sin\, 58° - \frac{2^3}{18^3} cos^2 58°\right)}}{1 - \frac{0{,}01}{2} . 1{,}574}$$

$$= 0{,}862385$$

6) Stanovení součinitele dopravy k dle univerzálního vztahu při dopravě ve sklonu pod úhlem v

Dáno:

- *dynamická viskozita* $\eta = 18{,}15 . 10^{-6}\ Pa.s$

<u>Kinematická viskozita plynu</u> ν

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{0{,}00001815}{1{,}605} = 0{,}00001131\ m^2/s$$

<u>Reynoldsovo číslo</u> Re

$$Re = \frac{v_1 . d}{\nu} = \frac{18 . 0{,}259}{0{,}00001131} = 412152$$

<u>Součinitel tření</u> λ

Pro hydraulicky hladké potrubí a ($2300 < Re < 10^5$) platí Blasiův vztah

$$\lambda = \frac{0{,}316}{\sqrt[4]{Re}} \qquad (4.1\text{-}1)$$

a pro vyšší rozsah ($10^5 < Re < 10^6$) byl použit vztah

$$\lambda = \frac{0{,}184}{\sqrt[5]{Re}} \qquad (4.1\text{-}2)$$

Pro vypočtené Reynoldsovo číslo $Re = 412152$ bude pro výpočet součinitele tření λ použit vztah (4.1-2)

$$\lambda = \frac{0{,}184}{\sqrt[5]{Re}} = \frac{0{,}184}{\sqrt[5]{412152}} = 0{,}013861$$

Froudeho číslo potrubí Fr

$$Fr = \frac{g.d}{v^2} = \frac{9{,}81.0{,}259}{18^2} = 0{,}007842$$

Součinitel dopravy k

$$k = \frac{2\,.\frac{u_{vz}}{v}.\cos v}{\lambda\,.\frac{u}{v}\,.\frac{1}{Fr}} + \frac{\xi_y}{\lambda}.\frac{u}{v} = \frac{2\,.\frac{2}{18}.\cos 58°}{0{,}013861\,.\,0{,}862385\,.\frac{1}{0{,}007842}} + \frac{0{,}01}{0{,}013861}.0{,}862385$$
$$= 0{,}6994$$

7) **Poréznost** ε

Poréznost ε je definována pro vytknutý element potrubí jako poměr objemu plynu V k objemu směsi V_{sm} dle vztahu

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

úpravami se dosáhne vztahu

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{\rho\,.\mu}{\beta\,.\rho_m}}$$

Stanovení poréznosti ε

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{\rho\,.\mu}{\beta\,.\rho_m}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}605\,.\,4{,}564}{0{,}8623844495\,.\,2700}} = 0{,}9969$$

8) **Ztrátový součinitel při průchodu částic materiálu oblouky** ζ

Podle literatury (L5) je proveden výpočet hodnoty ztrátového součinitele. Výpočet platí pouze pro $r/d = 1{,}5$ nebo 3, kde r značí poloměr ohybu oblouku a d jeho vnitřní průměr. Při výpočtu tlakové ztráty oblouku je potřeba si uvědomit, že v hodnotě ζ není zahrnuta tlaková ztráta třením. V případě úseku č. 1 je vnitřní průměr potrubí $d = 0{,}259\,m$. Pro výpočet ztrátového součinitele budou použity následující vztahy odpovídající podmínce ($d \geq 0{,}225\,m$).

$$\zeta_1 = 0{,}34\,.\,(d/r)^{3/4}$$

U oblouků byl volen poměr $r/d = 3$ což odpovídá hodnotě $r = 0{,}777$.

$\zeta_1 = 0{,}34\,.\,(0{,}259/0{,}777)^{3/4} = 0{,}149155$

Ztrátový součinitel je dále stanoven dle vztahu

$\zeta = C_\alpha\,.\,\zeta_1$

$C_\alpha = 0{,}9\,.\,sinv \qquad (pro \quad \alpha < 45°)$

$C_\alpha = -1{,}53 + 1{,}3.\,log\,\alpha \qquad (pro \quad 45° < \alpha < 180°)$

Úsek č. 1 v sobě zahrnuje oblouk s úhlem $\alpha = 54°$. Pro stanovení hodnoty C_α bude tedy využit vztah

$C_\alpha = -1{,}53 + 1{,}3.\,log\,\alpha = -1{,}53 + 1{,}3.\,log\,54° = 0{,}722$

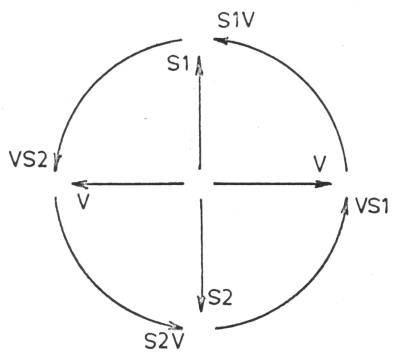
<u>Stanovení ztrátového součinitele</u>

$\zeta = C_\alpha\,.\,\zeta_1 = 0{,}722\,.\,0{,}149155 = 0{,}108$

9) Hodnota součinitele polohy oblouku γ

Poloha oblouku je důležitá pro výpočet tlakové ztráty způsobené při průchodu materiálu. V literatuře (L1) jsou uvedeny vztahy pro výpočet tlakové ztráty při průchodu obloukem. Vztahy jsou odvozeny na základě působících sil na částice dopravovaného materiálu. Na částice působí zejména odstředivá síla, která způsobí stržení částic na vnější stranu oblouku, kde dojde k jejich postupnému zpomalení. Z uvedených vztahů dle literatury (L1) vyplývá, že k hlavnímu poklesu tlaku dojde až za obloukem, kde se materiál urychluje na původní rychlost. Z tohoto tvrzení plyne, že tlakovou ztrátu lze stanovit jako tlakovou ztrátu na urychlení částic materiálu. V praxi se délka oblouku přičte do délky úseku, kde se počítá tlaková ztráta třením nebo se úměrně prodlouží jak horizontální, tak vertikální část úseku.

Pro přesnější výpočet uvádí Urban v literatuře (L6) vztah pro určení tlakové ztráty, kde třecí sílu o stěny oblouku vyjádřil nejen na základě působení odstředivé síly ale i síly gravitační. Ztráta je tedy závislá na kombinaci sil tudíž na poloze oblouku viz schéma na obrázku č. 4.1-1.



Obr. 4.1-1 Označení polohy oblouku

Na Obr. 4.1-1 jsou uvedeny zkratky ve vertikální rovině.

V – vodorovně, S1 – svisle vzhůru a S2 – svisle dolů

Poloha oblouku:

VS1 – z vodorovného směru do svislého směru (směrem vzhůru)

S1V – ze svislého směru (směrem vzhůru) do vodorovného směru

VS2 - z vodorovného směru do svislého směru (směrem dolů)

S2V – ze svislého směru (směrem dolů) do vodorovného směru

V literatuře (L1) je uvedeno, že součinitel polohy oblouku γ (1) nabývá pouze dvou hodnot, a to $\gamma = 4$, což odpovídá poloze oblouku VS1 a ostatním polohám odpovídá hodnota $\gamma = 1$.

Do úseku č. 1 je započítán oblouk s polohou S1V což odpovídá součiniteli polohy oblouku $\gamma = 1$.

10) Stanovení počáteční hodnoty tlaku $p_{poč}$

Počáteční tlak na začátku dopravní trasy byl stanoven na základě zkušeností vedoucího diplomové práce. Bylo tedy stanoveno, že pokud průměrná dopravní rychlost,

bude okolo $20\ m/s$ a vnitřní průměr potrubí dopravní trasy bude okolo $d = 0{,}25\ m$, bude tomu odpovídat celková tlaková ztráta dopravní trasy přibližně $35\ kPa$. Byl tedy zvolen tlak na počátku úseku č. 1 roven $p_0 = 135\ 000\ Pa$. Pro účely srovnání metod není hodnota tlaku na počátku dopravní trasy až tak důležitá. Srovnání proběhne na základě odchylek hodnot celkové tlakové ztráty a postupu výpočtu. Není povinností dosáhnout na konci dopravní trasy tlaku barometrického p_b.

V tuto chvíli bude proveden výpočet jednotlivých složek určujících tlakovou ztrátu u nízkotlaké pneumatické dopravy - princip aditivnosti, podle vztahů dle tabulky 3.6-1. Je nutno zdůraznit, že členy tlakové ztráty na počáteční urychlení plynu a materiálu nebudou stanovovány jelikož, je uvažováno, že energie na urychlení je zahrnuta v průtokovém podávači, který byl předpokládán u všech výpočetních metod.

11) Stanovení tlakové ztráty způsobené třením plynu Δp_{v1}

<u>Dynamický tlak</u>

$$p_d = \frac{\rho}{2} \,.\, v^2 = \frac{1{,}605}{2} \,.\, 18^2 = 260{,}01\ Pa$$

<u>Tlaková ztráta způsobená třením plynu</u>

$$\Delta p_{v1} = \frac{\lambda}{d} \,.\, s \,.\, p_d = \frac{0{,}0138613746}{0{,}259} \,.\, (10{,}5 + 0{,}4) \,.\, 260{,}01 = 151{,}639\ Pa$$

kde parametr s je vlastně délka úseku č. 1 a v případě tohoto úseku ještě navýšena o délku oblouku.

12) Stanovení tlakové ztráty způsobené třením materiálu Δp_{m1}

$$\Delta p_{m1} = k \,.\, \mu \,.\, \frac{\lambda}{d} \,.\, s \,.\, p_d = 0{,}6994 \,.\, 4{,}564 \,.\, \frac{0{,}0138613746}{0{,}259} \,.\, (10{,}5 + 0{,}4) \,.\, 260{,}01$$
$$= 484{,}006\ Pa$$

13) Stanovení tlakové ztráty způsobené zdvihem plynu Δp_{v2}

<u>Převýšení úseku</u> H

$$H = L \,.\, \sin \upsilon = 10{,}5 \,.\, \sin 58\,° = 8{,}905\ m$$

<u>Stanovení tlakové ztráty zdvihem plynu</u> Δp_{v2}

$\Delta p_{v2} = \varepsilon \,.\, \rho \,.\, g \,.\, H = 0{,}9969 \,.\, 1{,}605 \,.\, 9{,}81 \,.\, 8{,}905 = 139{,}726\ Pa$

14) Stanovení tlakové ztráty způsobené zdvihem materiálu Δp_{m2}

$$\Delta p_{m2} = \varepsilon \,.\, \rho \,.\, \mu \,.\, \frac{1}{\beta} \,.\, g \,.\, H = 0{,}9969 \,.\, 1{,}605 \,.\, 4{,}564 \,.\, \frac{1}{0{,}862384495} \,.\, 9{,}81 \,.\, 8{,}905$$
$$= 741{,}743\ Pa$$

15) Stanovení tlakové ztráty při průchodu plynu místními odpory Δp_{v3}

$\Delta p_{v3} = \sum \zeta \,.\, p_d = 0{,}108 \,.\, 260{,}01 = 27{,}998\ Pa$

16) Stanovení tlakové ztráty při průchodu materiálu místními odpory Δp_{m3}

$\Delta p_{m3} = \mu \,.\, p_d \,.\, \sum \gamma\zeta = 4{,}564 \,.\, 260{,}01.\ (1 \,.0{,}108) = 127{,}771\ Pa$

V této variantě výpočtu je tlaková ztráta způsobená urychlováním plynu a materiálu po délce trasy započtena až nakonec a to jednorázově přes celou dopravní trasu.

17) Stanovení tlaku na konci úseku č. 1 p_2

$$\Delta p_z = \sum \Delta p_{vi} + \sum \Delta p_{mi} = (\Delta p_{v1} + \Delta p_{v2} + \Delta p_{v3}) + (\Delta p_{m1} + \Delta p_{m2} + \Delta p_{m3})$$
$$= (151{,}639 + 139{,}726 + 27{,}998) + (484{,}006 + 741{,}743 + 127{,}771)$$
$$= 1672{,}882\ Pa$$

$p_2 = p_1 - \Delta p_z = 135000 - 1672{,}882 = 133327{,}118\ Pa$

Tlak na konci úseku č. 1 je tedy roven tlaku $p_2 = 133327{,}118\ Pa$. Tlak p_2 na konci úseku č. 1 bude počátečním tlakem úseku č. 2. Doposud byly výpočty stahovány k parametrům na počátku úseku. Musíme tedy některé parametry v závislosti na tlaku p_2 přepočítat jednak na podmínky na konci úseku aby se dali použít pro počátek následujícího úseku dopravní trasy a také proto, aby některé parametry jako např. Reynoldsovo číslo proudu nebylo stanoveno z rychlosti na začátku úseku ale, aby mohlo být vztaženo ke střední rychlosti proudu v celém úseku. Všechny tyto parametry jsou přepočítány pomocí iterační metody, viz následující vztahy, které představují 1. iteraci (index I).

<u>Hustota vzduchu na konci úseku</u>

$$\rho_{2I} = \frac{p_2}{r.T_0} = \frac{133327{,}118}{287.293{,}15} = 1{,}585\ kg/m^2$$

Hustota vzduchu na konci úseku

$$v_{2I} = \frac{\dot{M}}{S.\rho_{2I}} = \frac{1{,}522}{0{,}053.1{,}585} = 18{,}226\ m/s$$

Střední rychlost proudění plynu v úseku č. 1

$$v_{stř I} = \frac{v_1 + v_{2I}}{2} = \frac{18 + 18{,}226}{2} = 18{,}113\ m/s$$

Střední hustota plynu

$$\rho_{stř I} = \frac{\rho_1 + \rho_{2I}}{2} = \frac{1{,}605 + 1{,}585}{2} = 1{,}595$$

Kinematická viskozita plynu

$$\nu_I = \frac{\eta}{\rho_{stř I}} = \frac{0{,}00001815}{1{,}595} = 0{,}00001138\ m^2/s$$

Reynoldsovo číslo

$$Re_I = \frac{v_{stř I}.d}{\nu_I} = \frac{18{,}113.0{,}259}{0{,}00001138} = 412168$$

Součinitel tření

$$\lambda_I = \frac{0{,}184}{\sqrt[5]{Re_I}} = \frac{0{,}184}{\sqrt[5]{412168}} = 0{,}013861$$

Froudeho číslo potrubí

$$Fr_I = \frac{g.d}{v_{stř I}^2} = \frac{9{,}81.0{,}259}{18{,}113^2} = 0{,}00774$$

Součinitel dopravy

$$k_I = \frac{2.\frac{u_{vz}}{v_{stř I}}.\cos\upsilon}{\lambda_I.\beta.\frac{1}{Fr_I}} + \frac{\xi_y}{\lambda_I}.\beta = \frac{2.\frac{2}{18{,}113}.\cos 58°}{0{,}013861.0{,}862385.\frac{1}{0{,}00774}} + \frac{0{,}01}{0{,}013861}.0{,}862385$$

$$= 0{,}69797$$

Stanovení poréznosti ε

$$\varepsilon_I = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{stř I} \,.\, \mu}{\beta \,.\, \rho_m}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}595 \,.\, 4{,}564}{0{,}8623844495 \,.\, 2700}} = 0{,}9969$$

Tlakové ztráta způsobená třením plynu Δp_{v1}

Dynamický tlak:

$$p_{dI} = \frac{\rho_{stř I}}{2} \,.\, {v_{stř I}}^2 = \frac{1{,}595}{2} \,.\, 18{,}113^2 = 261{,}64\ Pa$$

Tlaková ztráta způsobená třením plynu:

$$\Delta p_{v1I} = \frac{\lambda_I}{d} \,.\, s \,.\, p_{dI} = \frac{0{,}013861}{0{,}259} \,.\, (10{,}5 + 0{,}4) \,.\, 261{,}64 = 152{,}595\ Pa$$

Tlaková ztráta způsobena třením materiálu Δp_{m1}

$$\Delta p_{m1I} = k_I \,.\, \mu \,.\, \frac{\lambda_I}{d} \,.\, s \,.\, p_{dI} = 0{,}69797 \,.\, 4{,}564 \,.\, \frac{0{,}013861}{0{,}259} \,.\, (10{,}5 + 0{,}4) \,.\, 261{,}64$$
$$= 468{,}224\ Pa$$

Tlaková ztráta způsobená zdvihem plynu Δp_{v2}

$$\Delta p_{v2I} = \varepsilon_I \,.\, \rho_{stř I} \,.\, g \,.\, H = 0{,}9969 \,.\, 1{,}595 \,.\, 9{,}81 \,.\, 8{,}905 = 138{,}863\ Pa$$

Tlaková ztráta způsobená zdvihem materiálu Δp_{m2}

$$\Delta p_{m2I} = \varepsilon_I \,.\, \rho_{stř I} \,.\, \mu \,.\, \frac{1}{\beta} \,.\, g \,.\, H = 0{,}9969 \,.\, 1{,}595 \,.\, 4{,}564 \,.\, \frac{1}{0{,}862384495} \,.\, 9{,}81 \,.\, 8{,}905$$
$$= 734{,}851\ Pa$$

Tlaková ztráta při průchodu plynu místními odpory Δp_{v3}

$$\Delta p_{v3I} = \sum \zeta \,.\, p_{dI} = 0{,}108 \,.\, 261{,}64 = 28{,}174\ Pa$$

Tlaková ztráta při průchodu materiálu místními odpory Δp_{m3}

$$\Delta p_{m3I} = \mu \,.\, p_{dI} \,.\, \sum \gamma\zeta = 4{,}564 \,.\, 261{,}64.\ (1 \,.\, 0{,}108) = 128{,}578\ Pa$$

Stanovení tlaku na konci úseku č. 1 po první iteraci p_{2I}

$$\Delta p_{zI} = \sum \Delta p_{viI} + \sum \Delta p_{miI} = (\Delta p_{v1I} + \Delta p_{v2I} + \Delta p_{v3I}) + (\Delta p_{m1I} + \Delta p_{m2I} + \Delta p_{m3I})$$
$$= (152{,}595 + 138{,}863 + 28{,}174) + (468{,}224 + 734{,}851 + 128{,}578)$$
$$= 1651{,}284\ Pa$$

$$p_{2I} = p_1 - \Delta p_{zI} = 135000 - 1651{,}284 = 133348{,}716\ Pa$$

Stejnými vztahy je provedena druhá a třetí iterace z čehož se zjistí skutečná hodnota tlaku p_{2III} na konci úseku č. 1. Tlak p_{2III} je roven hodnotě $133354\ Pa$. Stejným postupem se vypočte tlak na konci každého úseku.

V posledním úseku dopravní trasy se musí ještě připočítat tlaková ztráta na celkové urychlení materiálu a celkové urychlení plynu.

Tlaková ztráta na celkové urychlení plynu je stanovena dle vztahu (3.7-1) uvedeného v kapitole 3.7-1.

$$\Delta p_{u,v} = \varepsilon_{st\check{r}} \,.\, \rho_{st\check{r}} \,.\, v_1 \,.\, (v_2 - v_1) = 0{,}9972 \,.\, 1{,}4457 \,.\, 18 \,.\, (22{,}444 - 18)$$
$$= 115{,}310\ Pa$$

kde:

$\varepsilon_{st\check{r}}$ *– střední hodnota poréznosti, která byla stanovena jako aritmetický průměr přes všechny úseky dopravní trasy (pro vysvětlení např. hodnota poréznosti na počátku úseku č. 5 odpovídá hodnotě poréznosti na konci úseku č. 4, která byla stanovena na základě 3 iterací celkové tlakové ztráty úseku)*

$\rho_{st\check{r}}$ *– střední hodnota hustoty plynu, která byla stanovena také jako aritmetický průměr přes všechny úseky dopravní trasy*

v_1 *– rychlost proudění plynu na počátku úseku č. 1*

v_2 *– rychlost proudění plynu na počátku úseku č. 15 (= rychlost proudění plynu na konci úseku č. 14, která byla stanovena na základě 3 iterací celkové tlakové ztráty úseku)*

a tlaková ztráta na celkové urychlení materiálu je stanovena dle vztahu (3.7-2)

$\Delta p_{u,m} = \varepsilon \,.\, \rho_{stř} \,.\, \mu \,.\, v_1 \,.\, \beta \,.\, (v_2 - v_1) =$
$0{,}9972 \,.\, 1{,}4457 \,.\, 4{,}564 \,.\, 18 \,.\, 0{,}862384495 \,.\, (22{,}444 - 18) = 453{,}820\ Pa$

Tlakové ztráty na celkové urychlení plynu $\Delta p_{u,v}$ a celkové urychlení materiálu $\Delta p_{u,m}$ jsou přičteny k ostatním členům tvořících celkovou tlakovou ztrátu úseku č. 15.

Tímto způsobem byl stanoven tlak na konci úseku č. 15, s tím že jsou veličiny vztahovány opět k hustotě plynu na počátku úseku. Jsou tedy provedeny 3 iterace výpočtu včetně korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu. Dostaneme tak celkovou tlakovou ztrátu dopravní trasy. Tlak na začátku trasy roven $135000\ Pa$ klesl na hodnotu $107464\ Pa$. Z toho plyne, že celková tlaková ztráta dopravní trasy stanovená dle modifikované metody aditivnosti doplněná o korekci na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu je rovna $27536\ Pa$.

4.2 Modifikovaná metoda aditivnosti doplněná o korekci na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu

Předpoklady výpočtu:

4) *po celé délce trasy je vnitřní průměr potrubí* $\emptyset d = konst.$
5) *změna stavu plynu po délce trasy je izotermická*
6) *po celé délce trasy je poměrná rychlost* $\beta = konst.$

4.2.1 Postup výpočtu

Pro přehlednost je uveden výpočet tlakové ztráty počátečního úseku. Ostatní hodnoty jsou shrnuty v tabulce, viz příloha č. 2.

Postup výpočtu včetně vypočtených hodnot jednotlivých veličin je identický s postupem viz kapitola 4.1.1.

Nejdříve jsou stanoveny tlakové ztráty způsobené třením, zdvihem a místními odpory. Ze součtu tlakových ztrát stanovíme tlakovou ztrátu tentokrát bez korekce na postupné urychlení. Určíme tlak na konci úseku $p_2 = 133455\ Pa$ bez korekce na urychlení. Z tohoto tlaku dále stanovíme hustotu ρ_2 a rychlost proudění plynu v_2.

1) Hustota plynu na konci úseku ρ_2

$$\rho_2 = \frac{p_2}{r \,.\, T_2} = \frac{133455}{287 \,.\, 293{,}15} = 1{,}586\ kg/m^3$$

2) Rychlost proudění plynu na konci úseku v_2

$$v_2 = \frac{\dot{M}}{\rho_2 \,.\, S} = \frac{1{,}522}{1{,}586 \,.\, 0{,}053} = 18{,}21 \ m/s$$

Ze stanovené hustoty a rychlosti proudění plynu na konci úseku vypočteme korekci na postupné urychlení materiálu a postupné urychlení plynu ze vztahů viz kapitola 3.7.1.

3) Tlaková ztráta na postupné urychlení plynu $\Delta p_{u,v}$

$$\Delta p_{u,v} = \varepsilon \,.\, \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \,.\, v_1 \,.\, (v_2 - v_1) = 0{,}9969 \,.\, \frac{1{,}605 + 1{,}586}{2} \,.\, 18 \,.\, (18{,}21 - 18)$$
$$= 5{,}97 \ Pa$$

4) Tlaková ztráta na postupné urychlení materiálu $\Delta p_{u,m}$

$$\Delta p_{u,m} = \varepsilon \,.\, \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \,.\, \mu \,.\, v_1 \,.\, \beta \,.\, (v_2 - v_1)$$
$$= 0{,}9969 \,.\, \frac{1{,}605 + 1{,}586}{2} \,.\, 4{,}564 \,.\, 18 \,.\, 0{,}862384495 \,.\, (18{,}21 - 18)$$
$$= 23{,}48 \ Pa$$

Korekce na postupné urychlování materiálu a postupné urychlování plynu bude přičtena k ostatním členům tlakové ztráty, z čehož bude stanovena celková tlaková ztráta úseku č. 1. Z celkové tlakové ztráty byl určen tlak na konci úseku s korekcí na postupné urychlování plynu a materiálu $p_2 = 133298 \ Pa$.

Stejně jako je tomu u předešlé výpočetní metody, veškeré veličiny se vztahují k hustotě plynu na počátku úseku. Aby byl výpočet správný, budou provedeny opět 3 iterace, u kterých se veškeré veličiny vztahují ke střední hodnotě hustoty plynu. Iteracemi byl tedy stanoven tlak na konci úseku č. 1 $p_{2III} = 133323 \ Pa$. Identicky byl proveden výpočet tlakové ztráty pro všechny úseky.

Tímto způsobem byl stanoven tlak na konci dopravní trasy resp. tlaková ztráta dopravní trasy. Tlak na začátku trasy roven $135000 \ Pa$ klesl na hodnotu $107376 \ Pa$. Z toho plyne, že celková tlaková ztráta dopravní trasy stanovená dle modifikované metody aditivnosti doplněné o korekci na postupné urychlení plynu a postupné urychlení materiálu je rovna 27624 Pa.

4.3 Urbanova metoda

Urbanova metoda je popsána v kapitole 3.7.2. Výpočet celkové tlakové ztráty dopravní trasy touto metodou je nejen časově méně náročný než u ostatních metod, ale je i velice přesný.

Předpoklady výpočtu:

1) *po celé délce trasy je vnitřní průměr potrubí* $\emptyset d = konst.$
2) *změna stavu plynu po délce trasy je izotermická*
3) *po celé délce trasy je poměrná rychlost* $\beta = konst.$
4) *po celé délce trasy je součinitel dopravy* $k = konst.$

4.3.1 Postup výpočtu pro přetlakovou dopravu

Pro přehlednost jsou hodnoty shrnuty ještě v tabulce, viz příloha č. 3. Dopravní trasa má délku $L = 314\ m$ a celkové převýšení trasy od počátku do konce $H = 45\ m$. Aby se dala Urbanova metoda, resp. hodnota celkové tlakové ztráty dopravní trasy, opravdu porovnat s ostatními výpočetními metodami, musí se použít některé již známé parametry z předchozích dvou výpočtových metod. Výpočet celkové tlakové ztráty dle Urbanovy metody je totiž u přetlakové dopravy proveden z opačné strany dopravní trasy, než je tomu u modifikovaných metod aditivnosti.

Z těchto skutečností byly určeny potřebné podmínky, při kterých bude možno všechny tři výpočetní metody porovnat.

Podmínky:

a) *rychlost proudění plynu v potrubí na konci dopravní trasy* $\boldsymbol{v_2}$ *musí být ve všech výpočetních metodách stejná (na základě předešlých vypočtených hodnot byla zvolena rychlost proudění plynu v potrubí* $v_2 = 22{,}6\ m/s$*)*
b) *tlak v potrubí na konci dopravní trasy* $\boldsymbol{p_2}$ *musí být ve všech výpočetních metodách stejný (na základě vypočtených hodnot předešlých vypočtených hodnot byl zvolen tlak* $p_2 = 107420\ Pa$*, který je aritmetickým průměrem obou hodnot vypočtených dle předešlých metod)*
c) *součinitel dopravy* $\boldsymbol{k}$ *byl volen dle předchozích výpočetních metod jako střední aritmetický průměr*

1) **Hustota vzduchu na konci dopravní trasy** ρ_2

$$\rho_2 = \frac{p_2}{r.T_2} = \frac{107420}{287.293{,}15} = 1{,}277\ kg/m^2$$

2) **Hmotnostní průtok plynu proudící potrubím** $\dot{M}$

$$\dot{M} = \rho_2\,.S.v_2 = 1{,}277.0{,}053\,.22{,}6 = 1{,}522\ kg/s$$

Hmotnostní průtok plynu $\dot{M}$ je po celé délce trasy konstantní.

3) **Stanovení směšovacího poměru** μ

$$\mu = \frac{\dot{M}_m}{\dot{M}} = \frac{6{,}944}{1{,}522} = 4{,}564$$

4) **Stanovení poměrné rychlosti** β_v

Za hodnotu poměrné rychlosti dosadíme poměrnou rychlost uvažovanou u předcházejících výpočetních metod.

$$\beta_v = 0{,}862385$$

5) **Stanovení součinitele dopravy** k

Za hodnotu součinitele dopravy dosadíme střední hodnotu k z uvažovaných hodnot u předcházejících výpočetních metod.

$$k = 0{,}721$$

6) **Stanovení kinematické viskozity plynu v potrubí** ν

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_2} = \frac{0{,}00001815}{1{,}277} = 0{,}00001422\ m^2/s$$

7) **Stanovení Reynoldsova čísla proudu plynu** Re

$$Re = \frac{v_2.d}{\nu} = \frac{22{,}6\,.0{,}259}{0{,}00001422} = 412136$$

8) **Stanovení součinitele tření** λ

$$\lambda = \frac{0{,}184}{\sqrt[5]{Re}} = \frac{0{,}184}{\sqrt[5]{412136}} = 0{,}013861$$

9) Poréznost ε

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{\rho_2 \,.\, \mu}{\beta \,.\, \rho_m}} = \frac{1}{1 + \frac{1{,}277 \,.\, 4{,}564}{0{,}8623844495 \,.\, 2700}} = 0{,}9975$$

10) Ztrátový součinitel místního odporu ζ

V případě Urbanovy výpočetní metody se uvažuje ztrátový součinitel ζ roven součtu všech ztrátových součinitelů po celé délce trasy. Výpočet ztrátových součinitelů jednotlivých úseků je proveden stejným způsobem jako u předchozích výpočetních metod. Součet všech ztrátových součinitelů je roven hodnotě $\zeta = 0{,}971$.

11) Hodnota součinu součinitele polohy oblouku γ a ztrátového součinitele ζ

Součin je stanoven dle vztahu

$$\sum(\gamma_i . \zeta_i) = 2{,}1436$$

12) Stanovení počáteční hodnoty tlaku $p_{poč}$

Počáteční tlak na začátku dopravní trasy bude stanoven z poměru tlaků p_1/p_2 dle vztahu

$$\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{1 + U_2 + W_2 \, ln \frac{p_1}{p_2}}$$

a z určení těchto výrazů

$$U_2 = \left[\frac{\lambda(1+k\mu)}{d} + \frac{(\sum\zeta + \mu\sum\gamma\zeta)}{L}\right] \frac{\rho_2 v_2^2}{p_2} L$$

$$W_2 = 2\left(1 + \mu\frac{u}{v}\right)\frac{\rho_2 v_2^2}{p_2}$$

<u>Stanovení výrazu</u> U_2

$$U_2 = \left[\frac{\lambda \,.\, (1 + k \,.\, \mu)}{d} + \frac{(\sum\zeta + \mu \,.\, \sum\gamma \,.\, \zeta)}{L}\right] . \frac{\rho_2 \,.\, v_2^2}{p_2} . L$$

$$= \left[\frac{0{,}013861 \,.\, (1 + 0{,}721 \,.\, 4{,}564)}{0{,}259} + \frac{(0{,}971 + 4{,}564 \,.\, 2{,}1436)}{314}\right] . \frac{1{,}277 \,.\, 22{,}6^2}{107420} . 314 = 0{,}50407$$

Stanovení výrazu W_2

$$W_2 = 2\,.\left(1 + \mu\,.\frac{u}{v}\right).\frac{\rho_2.v_2^2}{p_2} = 2\,.(1 + 4{,}564\,.\,0{,}862384495).\frac{1{,}277\,.\,22{,}6^2}{107420}$$
$$= 0{,}06004$$

Následuje dosazení hodnot z vypočtených výrazů do rovnice poměru tlaků. Jediným problémem je poměr tlaků p_1/p_2 pod odmocninou. Poměr tlaků je tedy stanoven iterační metodou výpočtu. Do prvního výpočtu bude použit dle doporučení z literatury (L1) poměr tlaků roven hodnotě 1. V tuto chvíli proběhnou čtyři iterace, kterými se dostaneme na výslednou hodnotu poměru tlaků $p_1/p_2 = 1{,}23149$.

Z hodnoty poměru tlaků stanovíme tlak p_1^*, což představuje tlak na začátku dopravní trasy ale před přičtením zdvihu materiálu k celkové tlakové ztrátě, proto ho značíme se znaménkem *.

$$p_1^* = p_2\,.\,1{,}23149 = 107420\,.\,1{,}23149 = 132286\ Pa$$

13) Stanovení tlakové ztráty zdvihem materiálu $\Delta p_{m,H}$

$$\Delta p_{m,H} = \varepsilon\,.\,\mu\,.\,\rho_2\,.\frac{v}{u}\,.\,g\,.\,H = 0{,}9975\,.\,4{,}564\,.\,1{,}277\,.\,0{,}862384495\,.\,9{,}81\,.\,45$$
$$= 2213\ Pa$$

14) Stanovení celkové tlakové ztráty Δp_z

$$\Delta p_z = (p_1^* - p_2) + \Delta p_{m,H} = (132286 - 107420) + 2213 = 27079\ Pa$$

Z toho plyne, že tlak v potrubí na začátku dopravní trasy $p_1 = 134499\ Pa$. Celková tlaková ztráta byla určena pro hustotu plynu na konci dopravní trasy ρ_2. Vzhledem k následujícímu porovnání výpočetních metod přepočítáme iterační metodou celkovou tlakovou ztrátu dopravní trasy, přičemž veškeré veličiny budou vztaženy ke střední hustotě plynu přes celou trasu. Po třech iteracích byl stanoven výsledný tlak v potrubí na začátku dopravní trasy $p_1 = 134450\ Pa$.

5. POROVNÁNÍ VÝPOČETNÍCH METOD STŘEDOTLAKÉ PNEUMATICKÉ DOPRAVY

Na úvod je uvedena tabulka s výslednými hodnotami tlaku v potrubí na počátku a na konci dopravní trasy při stejně zvoleném průměru potrubí a středních dopravních rychlostí. Tlak v potrubí je u prvních dvou metod volen počáteční a u Urbanovy metody je zvolen tlak konečný dle předchozích výpočetních metod. Ještě je potřeba zdůraznit, že u výpočetních metod není stanovena tlaková ztráta na počáteční urychlení materiálu a počáteční urychlení plynu. Důvodem je volba podávače. Protože byl zvolen průtokový podávač, je uvažováno, že výstupní rychlost z podávače není nulová, ale je rovna zvolené hodnotě počáteční rychlosti.

Tabulka 5.1 – Výsledky výpočetních metod

výpočetní metoda	p_1 [Pa]	p_2 [Pa]	Δp_z [Pa]	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	$v_{stř}$ [m/s]
1	135 000	107 464	27 536	18,0	22,6	19,9
2	135 000	107 376	27 624	18,0	22,6	19,9
3	134 450	107 420	27 030	18,1	22,6	20,3

kde

1 - Modifikovaná metoda aditivnosti doplněná o korekci na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu

2 - Modifikovaná metoda aditivnosti doplněná o korekci na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu

3 - Urbanova metoda

p_1 - *Tlak v potrubí na počátku dopravní trasy*

p_2 - *Tlak v potrubí na konci dopravní trasy*

Δp_z - *Celková tlaková ztráta dopravní trasy*

v_1 - *Rychlost proudění plynu v potrubí na počátku dopravní trasy*

v_2 - *Rychlost proudění plynu v potrubí na konci dopravní trasy*

$v_{stř}$ - *Střední rychlost proudění plynu v celé délce dopravní trasy*

Tabulka 5.1 udává i celkovou tlakovou ztrátu dopravní trasy získanou pomocí třech výpočetních metod. První dvě metody mají téměř identický postup výpočtu včetně vstupních hodnot s tím rozdílem, že u první metody se započítává urychlení materiálu a urychlení plynu jednorázově přes celou dopravní trasu a u druhé metody postupně po

úsecích. Je tedy logické, že pokud by byly vyneseny průběhy tlakového spádu po délce dopravní trasy pro obě modifikované metody výpočtu, tak by sice hodnoty tlaku v potrubí na konci dopravní trasy byly stejné ale průběhy by se lišili tvarem a strmostí. U druhé metody se průběh tlakového spádu nejvíce blíží skutečnosti, to ale nelze říci u metody první, kdy se tlaková ztráta na urychlení plynu a materiálu přičítá až nakonec. U první metody je tedy průběh tlakového spádu nevypovídající.

V případě srovnání celkových tlakových ztrát včetně tlakové ztráty získané Urbanovou metodou jde dle tabulky 5.1 o téměř identické výsledky. Urbanova metoda se v hodnotě celkové tlakové ztráty liší pouze o $0{,}5\ kPa$. Vzhledem k délce dopravní trasy, jejího převýšení a dopravovanému množství je tato nepřesnost akceptovatelná ale je nutno na tuto nepřesnost při návrhu podávače myslet. Výpočetní metoda dle Urbana je sice ve výsledku matematicky správná a s mírnou odchylkou i přesná ale narážíme na problém s volbou součinitele dopravy k. Urbanova výpočetní metoda totiž předpokládá, že hodnota součinitele dopravy po celé délce dopravní trasy zůstává konstantní. Ze znalosti hodnot součinitele dopravy z předchozích výpočetních metod bylo možné stanovit průměrnou hodnotu součinitele dopravy pro metodu Urbanovu. V případě neznalosti těchto hodnot musíme součinitel dopravy k volit. V tuto chvíli nastávají dvě řešení. První spočívá v tom, že projektant má určité zkušenosti s dopravními trasami podobných parametrů včetně vlastností dopravovaného materiálu a zvolí si hodnotu součinitele dopravy na základě určitých zkušeností. V druhé variantě řešení se bude muset zvolit nějaká hodnota, která ale nebude nijak podložena výpočtem ani zkušeností, čímž se ve výsledku můžeme dopustit velké chyby. Pro zajímavost byly u Urbanovy výpočetní metody zvoleny dvě různé hodnoty součinitele dopravy $k = 0{,}7$ a $k = 0{,}8$, u kterých byla stanovena celková tlaková ztráta dopravní trasy. Celková tlaková ztráta dopravní trasy se při těchto součinitelích dopravy lišila o $2\ kPa$.

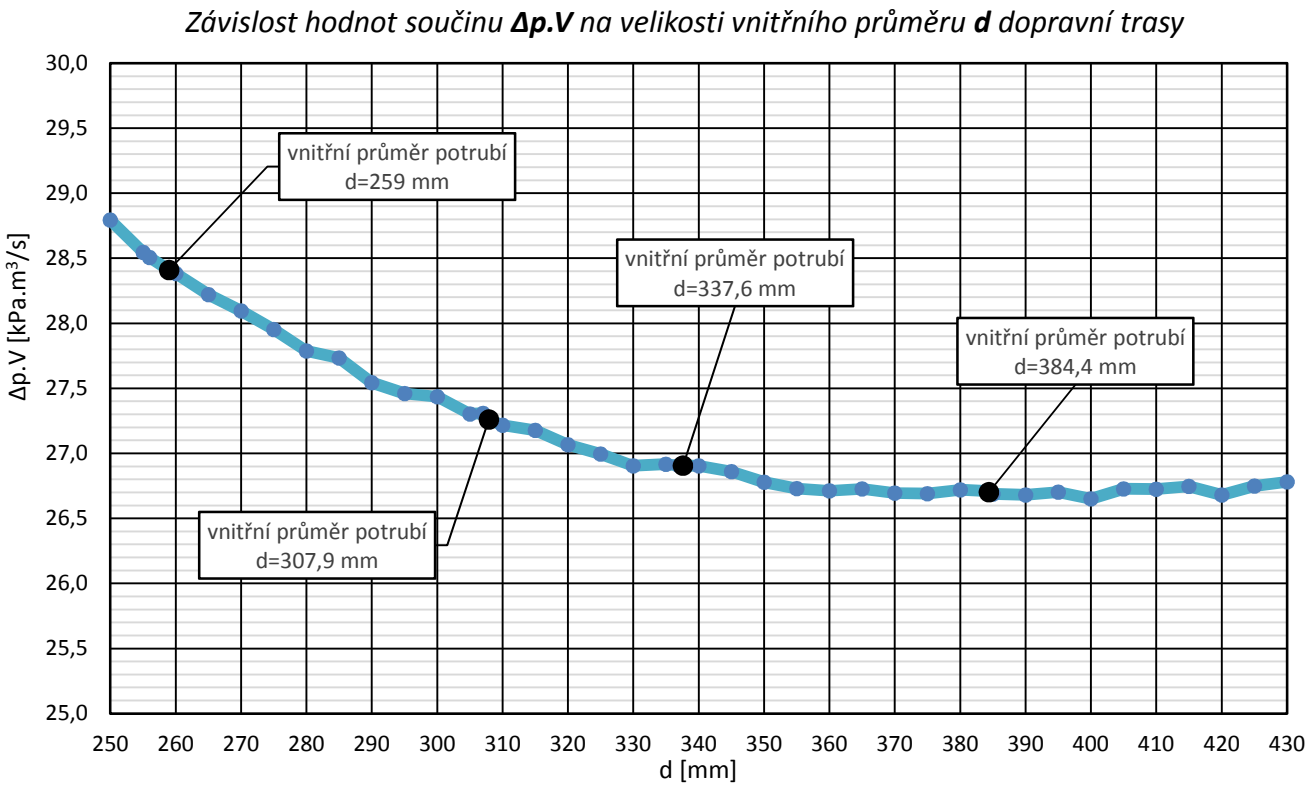
Je potřeba ještě zmínit rychlost proudění plynu po délce dopravní trasy. Jelikož u první a druhé výpočetní metody máme z výpočtu tlakové ztráty k dispozici 15 hodnot rychlosti plynu v jednotlivých úsecích, byla střední rychlost proudění stanovena aritmetickým průměrem přes všechny hodnoty. U metody Urbanovy byla střední rychlost stanovena na základě dvou hodnot na počátku a na konci dopravní trasy. Proto si můžeme všimnout určité odchylky v hodnotě střední rychlosti proudění plynu.

6. OPTIMALIZACE PNEUMATICKÉ DOPRAVY

Optimalizace pneumatické dopravy byla provedena pro zvolenou výpočetní metodu tedy modifikovanou metodu aditivnosti s korekcí na postupné urychlování materiálu a postupné urychlování plynu. U následujících kapitol jsou tedy potřebné hodnoty čerpány z této výpočetní metody.

6.1 Optimalizace provozních nákladů pneumatické dopravy

Význam optimalizace a jeho samotné řešení je popsáno v kapitole 3.5.2. Dle postupu v této kapitole byla vynesena závislost hodnot součinu $\Delta p.\dot{V}$ na velikosti vnitřního průměru $\emptyset d$ dopravní trasy viz obrázek 6.1.1.



Obr. 6.1.1 – Optimalizace provozních nákladů pneumatické dopravy

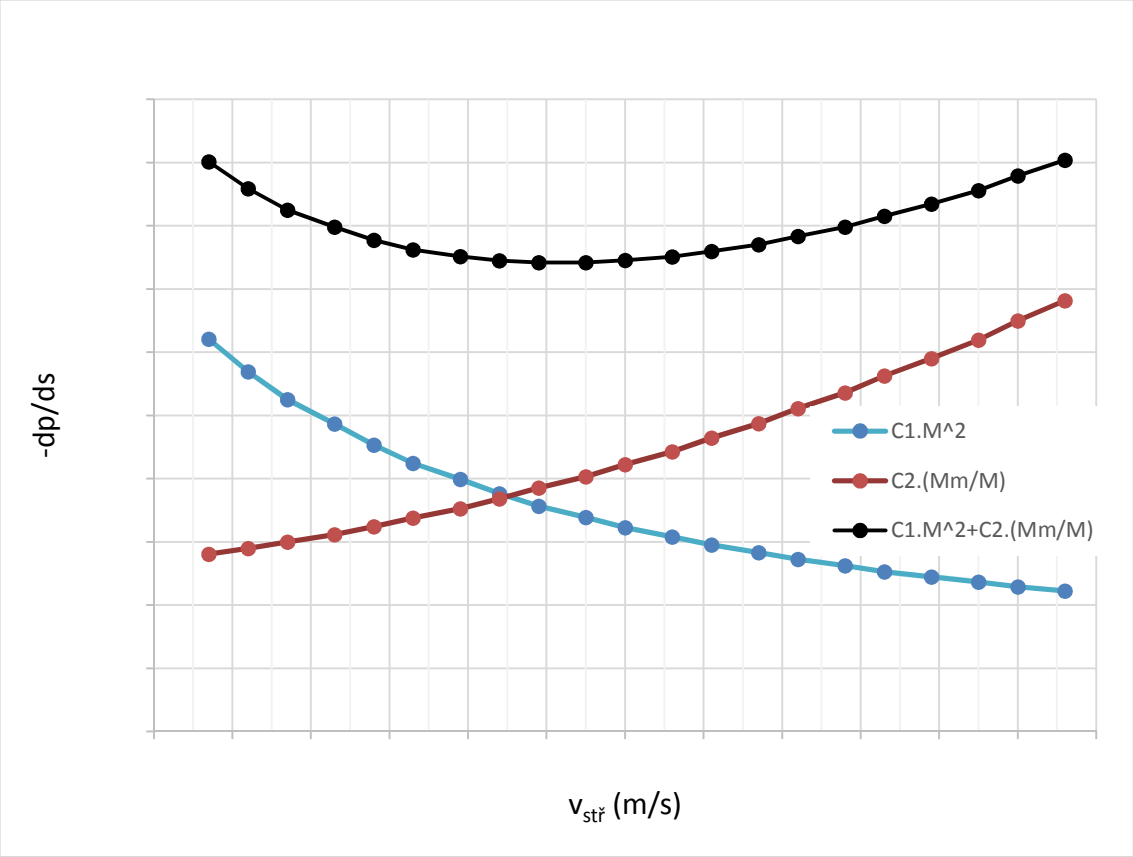
Veškeré hodnoty použité pro vynesení závislosti jsou uvedeny v příloze č. 4. Do závislosti byly ještě vyneseny čtyři body, které představují normalizované rozměry ocelového bezešvého potrubí určeného pro pneumatickou dopravu. Minimální hodnota součinu $\Delta p.\dot{V}$ odpovídá dle obr. 6.1.1 vnitřnímu průměru potrubí $\emptyset d = 400\ mm$. Teoreticky odpovídá tento průměr tzv. optimálnímu průměru potrubí dopravní trasy pneumatické dopravy. Z hlediska investičních nákladů je ale potřeba ještě zvážit i

pořizovací cenu za metr zvoleného potrubí. V případě vynesené závislosti došlo kolem hodnoty minimálního součinu $\Delta p.\dot{V}$ k plochému průběhu závislosti. Toho lze využít při volbě optimálního průměru potrubí dopravní trasy. Snažíme se dostat na co nejmenší průměr potrubí s přihlédnutím na hodnotu součinu $\Delta p.\dot{V}$. Byl tedy zvolen optimální průměr dopravní trasy $\emptyset d = 337{,}6\ mm$.

V pneumatické dopravě je pravidlo, zvolit průměr dopravní trasy z nejbližších standardizovaných rozměrů nacházející se na levé straně od lokálního minima s přihlédnutím na všechny faktory ovlivňující náklady nejen pořizovací ale i provozní.

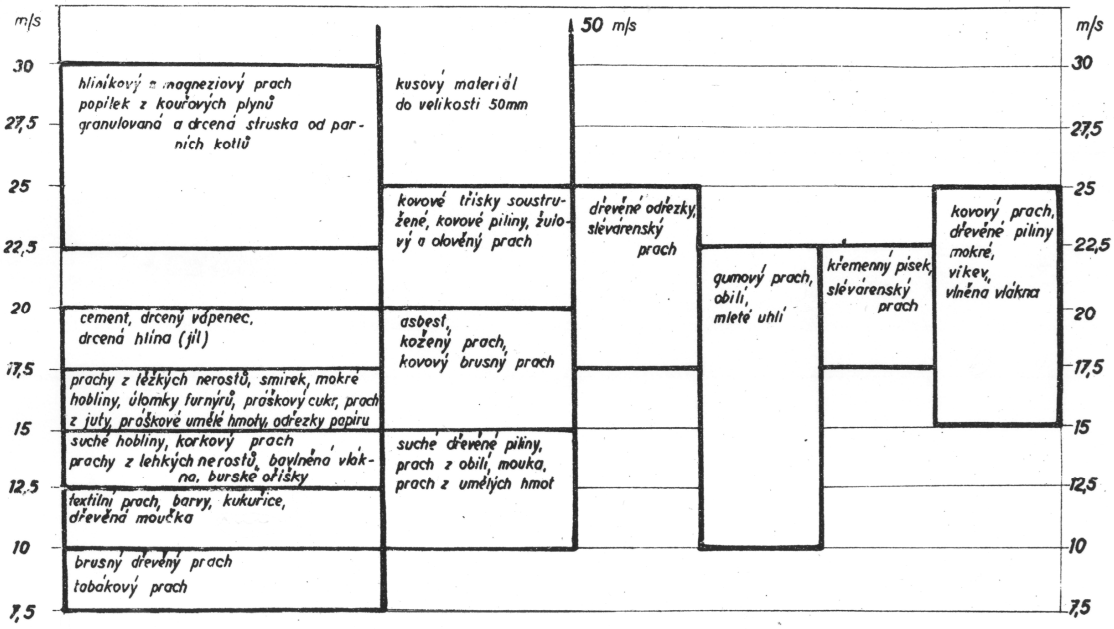
6.2 Fázový diagram a optimalizace pneumatické dopravy

Optimalizace pneumatické dopravy pomocí fázového diagramu je popsána v kapitole 3.5.1. Jak již bylo řečeno, fázový diagram patří mezi nejpřesnější metody určení hodnoty dopravní rychlosti. Samotné sestavení fázového diagramu je ale časově velmi náročné, protože by to znamenalo provést opakovaný výpočet tlakového spádu. Na obrázku 6.2.1 je vidět typický průběh fázového diagramu



Obr. 6.2.1 – Typický průběh fázového diagramu

V našem případě bude dopravní rychlost volena dle praktických zkušeností několika autorů. Nejprve, je uveden obrázek 6.2.2, který uvádí praktické hodnoty rychlosti dopravního vzduchu pro dopravu některých materiálů dle Pražáka (L6).



Obr. 6.2.2 - Praktické hodnoty dopravní rychlosti pro dopravu některých materiálů

Další doporučení (Vávra - ústní sdělení) platí pravidlo, že pod 12 m/s nelze nic dopravovat. Dle stejného zdroje by se měla doporučená dopravní rychlost nacházet v rozsahu hodnot $v = (2{,}5\ až\ 3).u_{vz}$. Další doporučení stanovuje minimální dopravní rychlost u svislé dopravy $v_{min} = 10 + 0{,}54\,.u_{vz}$.

Dle těchto doporučení byla nakonec zvolena z obr. 6.2.2 střední hodnota dopravní rychlosti. Dle druhu dopravovaného materiálu, v našem případě odprašků vápence, je zvolena střední dopravní rychlost $v_{stř} \doteq 20\ m/s$.

Volím tedy počáteční dopravní rychlost plynu $v_0 = 19\ m/s$ což odpovídá střední rychlost proudění plynu v potrubí $v_{stř} = 20{,}2\ m/s$.

Na základě optimalizace pneumatické dopravy volím jako vstupní parametry výpočtu celkové tlakové ztráty modifikovanou metodou aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu:

a) vnitřní průměr potrubí dopravní trasy $d = 337{,}6\ mm$
b) střední dopravní rychlost $v_{stř} = 20{,}2\ m/s$ resp. počáteční rychlost plynu $v_0 = 19\ m/s$

7. STANOVENÍ VÝSLEDNÉ TLAKOVÉ ZTRÁTY DLE ZVOLENÉ METODY

Pro výpočet výsledné tlakové ztráty byla zvolena modifikovaná metoda aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu. Vstupní parametry jsou identické se vstupními parametry v kapitole č. 4 s tím rozdílem, že vnitřní průměr dopravní trasy je roven $\emptyset d = 337{,}6\ mm$ a počáteční rychlost plynu $v_0 = 19\ m/s$. Tabulka všech hodnot, je uvedena v příloze č. 5. Dalším cílem výpočtu výsledné tlakové ztráty bylo určit takový počáteční tlak v potrubí, aby se na konci dopravní trasy dosáhlo barometrického tlaku.

Dle výpočetního postupu z kapitoly č. 4.2.1 byla stanovena výsledná tlaková ztráta dopravní trasy při středotlaké přetlakové pneumatické dopravě $\Delta p_z = 15070\ Pa$, které odpovídá počáteční tlak v potrubí dopravní trasy $p_0 = 116395\ Pa$.

8. DOPORUČENÍ VHODNÉHO PODÁVAČE

Podávače pneumatické dopravy mají zpravidla dva základní úkoly

1) podávat dopravovaný materiál do dopravního potrubí
2) uzavírat dopravní potrubí tak, aby směs vzduchu s materiálem proudila k jeho konci

Druhy podávačů:

a) komorový
b) rotační
c) šnekový
d) ejektorový
e) průtokový
f) směšovací hubice – pro sací dopravu (dvouplášťová)

V případě středotlaké dopravy s přihlédnutím na parametry dopravní trasy, přicházejí v úvahu 3 druhy podávače. Jsou to průtokový podávač, dmychadlo a šnekový podávač. Dle srovnání těchto tří podávačů z hlediska hlučnosti a energetické náročnosti, byl zvolen průtokový podávač, viz obrázek 8.1.

LEGENDA:

PP - PRŮTOKOVÝ PODAVAČ

N - NÁSYPKA

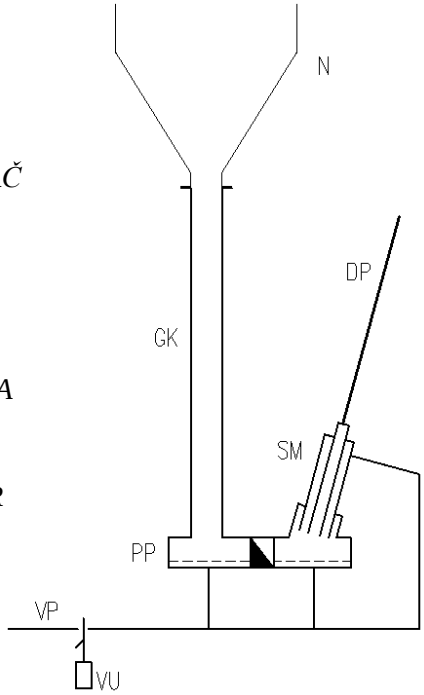
VP - DOPRAVNÍ VZDUCH

DP - DOPRAVNÍ POTRUBÍ

GK - GRAVITAČNÍ KOMORA

SM - SMĚŠOVAČ

VU - VZDUCHOVÝ UZÁVĚR



Obr. 8.1- Průtokový podávač

Průtokový podávač využívá k dopravě materiálu hydrostatický tlak vzniklý v gravitační komoře, kde dopravovaný materiál vytvoří fluidní vrstvu a chová se jako tekutina. Provzdušňovaný válec slouží jako tlakový uzávěr. Využívá se tedy stavební výšky mezi podlahou a výstupem ze zásobníkového sila. Velikost hydrostatického tlaku by měla odpovídat minimálně celkové tlakové ztrátě dopravní trasy.

Výhodou průtokového podávače je hlavně nízká spotřeba energie, která je potřeba pro provzdušnění válce a zbytek energie na dopravu pokryje způsobený hydrostatický tlak. Dalšími výhodami je malá zastavěná plocha a objem, kontinuální doprava, technicky i investičně nenáročný zdroj dopravního vzduchu.

Vstupní parametry pro návrh konkrétního průtokového podávače jsou následující:

a) dopravované množství materiálu (odprašků vápence $CaCO_3$) $\dot{M}_{CaCO_3} = 25\ t/h$
b) celková tlaková ztráta dopravní trasy $\Delta p_z = 15070\ Pa$
c) dopravní trasa je zhotovena z ocelového bezešvého potrubí $\emptyset d = 337{,}6\ mm$
d) požadovaný tlak na začátku dopravní trasy $p_0 = 116395\ Pa$

9. ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo porovnání třech výpočetních metod středotlaké pneumatické dopravy. Výpočetní metody vycházejí z metody aditivnosti, která se používá u nízkotlaké pneumatické dopravy s tím, že jsou modifikovány tak, aby je bylo možné použít na středotlakou pneumatickou dopravu. Celková tlaková ztráta zadané dopravní trasy viz tab. 9.1, byla stanovena dle těchto tří výpočetních metod

1) *Modifikovaná metoda aditivnosti s korekcí na celkové urychlení materiálu a celkové urychlení plynu*
2) *Modifikovaná metoda aditivnosti s korekcí na postupné urychlování materiálu a celkové urychlení plynu*
3) *Urbanova metoda*

Tab. 9.1 – Tabulka hodnot pro porovnání výpočetních metod

	p_1	p_2	Δp_z	v_1	v_2	$v_{stř}$
výpočetní metoda	*[Pa]*	*[Pa]*	*[Pa]*	*[m/s]*	*[m/s]*	*[m/s]*
1	135 000	107 464	27 536	18,0	22,6	19,9
2	135 000	107 376	27 624	18,0	22,6	19,9
3	134 450	107 420	27 030	18,1	22,6	20,3

V případě první a druhé výpočetní metody se stanovená hodnota celkové tlakové ztráty neliší. Postup výpočtu u těchto dvou metod se liší pouze v korekci na urychlení plynu a materiálu. U první metody je korekce na celkové urychlení a je připočtena až na konec výpočtu jednorázově, z čehož byla stanovena celková tlaková ztráta $\Delta p_z = 27536\ Pa$. U druhé metody je korekce na postupné urychlování, která je započítávána po úsecích postupně po celé délce dopravní trasy z čehož byla stanovena celková tlaková ztráta $\Delta p_z = 27624\ Pa$.

U Urbanovy metody vyšla celková tlaková ztráta dopravní trasy $\Delta p_z = 27030\ Pa$. Výsledná hodnota se liší od ostatních o zhruba 0,5 kPa. Aby bylo možné Urbanovu metodu srovnat s ostatními metodami bylo nutné některé vstupní parametry čerpat z předcházejících metod, podrobnosti viz kapitola 4.3. Odchylka hodnoty celkové tlakové ztráty může být způsobena tím, že tlaková ztráta se počítá přes celou délku dopravní trasy jednorázově a ne po úsecích jako je tomu u modifikovaných metod.

Závěrem k porovnání výpočetních metod bych podotknul, že dle mého názoru je nejpřesnější modifikovaná metoda aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a materiálu a to nejen hodnotou celkové tlakové ztráty ale i samotným průběhem tlaku po délce dopravní trasy, který se tak nejvíce blíží skutečnosti. U Urbanovy metody je největší problém vůbec zvolit vstupní parametry. V našem případě se dalo čerpat z předcházejících výpočetních metod ale, pokud bychom tyto hodnoty neměli a chtěli stanovit tlakovou ztrátu, může ve výsledku dojít k velké chybě. Například při volbě dopravního součinitele k je potřeba mít určité zkušenosti s projektováním dopravních tras pneumatické dopravy. Pro kontrolu byly zvoleny dvě hodnoty dopravního součinitele $k = 0{,}7$ a $k = 0{,}8$. Celková tlaková ztráta dopravní trasy se při těchto součinitelích dopravy lišila o $2\ kPa$. Vidíme, že hodnota celkové tlakové ztráty dopravní trasy je z velké míry závislá na volbě součinitele dopravy k. Proto tato skutečnost činí projektování pneumatické dopravy za vysoce profesní činnost, ke které je potřeba mít určité zkušenosti a znalosti.

Dalším úkolem bylo provést optimalizaci pneumatické dopravy u zadané středotlaké dopravní trasy. Nejprve byl určen optimální průměr potrubí dle závislosti hodnot součinu $\Delta p\,.\dot{V}$ a vnitřním průměru potrubí $\emptyset d$. Zpravidla se volí průměr nejbližší nižší odpovídající normalizovaným rozměrům. Byl tedy zvolen vnitřní průměr potrubí dopravní trasy $\emptyset d = 337{,}6\ mm$. V dalším kroku byla zvolena dle doporučení Pražáka hodnota dopravní rychlosti $v_{stř} \doteq 20\ m/s$ vycházející z praktických zkušeností, ze které byla zvolena počáteční dopravní rychlost $v_0 = 19\ m/s$ což odpovídá střední dopravní rychlosti po délce dopravní trasy $v_{stř} = 20{,}2\ m/s$. Volba hodnoty dopravní rychlosti je jedním z nejdůležitějších rozhodnutí, protože má vliv nejen na spolehlivost provozu ale i na provozní a investiční náklady.

Pro zvolený optimální průměr potrubí a dopravní rychlost, byla stanovena výsledná tlaková ztráta modifikovanou metodou aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu u zadané dopravní trasy $\Delta p_z = 15070\ Pa$. Jako typ vhodného podávače byl z hlediska hlučnosti a energetické náročnosti zvolen průtokový podávač. Přesný typ podávače a dimenze jednotlivých částí nebyly určeny. V praxi volí přesný typ podávače včetně jeho částí výrobce podávačů s přihlédnutím na konkrétní rozměry strojovny, dispozici strojovny atd. ale hlavně na základě zkušeností s již realizovaných projektů a jejich provozem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[L1] **HEMERKA, J.:** *Teoretické základy pneumatické dopravy,* Fakulta strojní ČVUT v Praze

[L2] **VÁVRA, A.:** *Pneumatická doprava dřevěného odpadu,* kapitola 4.4 v knize Hejma, J., Budinský, K., Vávra, A., Drkal, F.,: *Vzduchotechnika v dřevozpracujícím průmyslu,* SNTL, Praha, 1981

[L3] **JEŽEK, J., VÁRADIOVÁ, B., ADAMEC, J.:** *Mechanika tekutin,* Fakulta strojní ČVUT v Praze

[L4] **BARTÁK, M.:** *Úvod do přenosových jevů pro inteligentní budovy,* Praha, červenec 2010.

[L5] **CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. a kol..:** *Větrání a klimatizace - Technický průvodce,* Vydání třetí, zcela přepracované, Praha: Česká Matica technická, 1993. ISBN 80-901574-0-8.

[L6] **URBAN, J.:** *Pneumatická doprava,* SNTL, Praha, 1964

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Výpočet celkové tlakové ztráty dopravní trasy (modifikovaná metoda aditivnosti s korekcí na celkové urychlení plynu a celkové urychlení materiálu)

Příloha č. 2 Výpočet celkové tlakové ztráty dopravní trasy (modifikovaná metoda aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu)

Příloha č. 3 Výpočet celkové tlakové ztráty dopravní trasy (Urbanova metoda)

Příloha č. 4 Stanovení optimálního průměru dopravní trasy

Příloha č. 5 Výpočet celkové tlakové ztráty dopravní trasy po optimalizaci pneumatické dopravy (modifikovaná metoda aditivnosti s korekcí na postupné urychlování plynu a postupné urychlování materiálu)