

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Odstraňování úlepů v zásobnících uhlí

Autor: **Michal ŠTEJR**

Vedoucí práce: **Ing. Vladimír KŘENEK**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Michal ŠTEJR**
Osobní číslo: **S17B0230P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Téma práce: **Odstraňování úlepů v zásobnících uhlí**
Zadávající katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rozbor vlastností tuhých paliv – zejména z hlediska jejich skladování a transportu, včetně rozboru příčiny úlepů a klenbování sypkých materiálů.
2. Vypracujte rešerši technologických zařízení sloužících pro odstraňování klenby a úlepů v zásobnících uhlí a jiných sypkých materiálů.
3. Proveďte návrh souboru technologických zařízení pro odstraňování klenby a úlepů pro následující zadání skladovaného paliva:
 - Sokolovské hnědé uhlí průmyslová směs 620-51E
 - Teplota uhlí do cca 30° C
 - Sypný úhel 45 – 60°
 - Sypná váha 0,72 – 0,80 t/m³
 - Vlhkost uhlí 15 – 38 %.
4. Pro zadaný tvar zásobníku a zadaný druh uhlí navrhnete ve dvou variantách řešení pro odstraňování klenby a úlepů (porovnejte obě varianty po stránce technické a ekonomické).

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **výkres návrhu řešení**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Černý, V.: Parní kotle. ČVUT Praha, 1975
- Hrdlička, F.: Průmyslová energetika, ČVUT Praha, 2000
- Doležal, R.: Kotle a spalovací zařízení, SNTL, 1965
- Zegzulka, J.: Mechanika sypkých hmot, VŠB-TU Ostrava, 2004, ISBN 80-248-0699-1

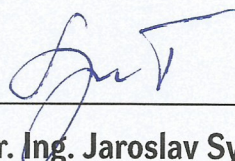
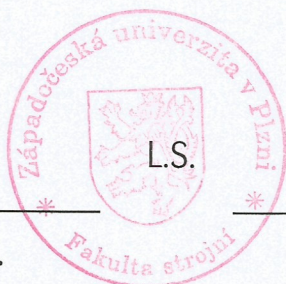
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Křenek**
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jan Moša**
MOSA Solution s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



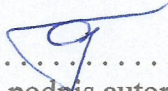
Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 26. 7. 2020.....


.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji Ing. Vladimíru Křenkovi za pomoc při vedení bakalářské práce. Mé poděkování patří též Ing. Janu Mošovi a Ing. Antonínu Macháčkovi za spolupráci při získávání údajů pro praktickou část práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Štejr	Jméno Michal	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 - „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Křenek	Jméno Vladimír	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Odstraňování úlepů v zásobnících uhlí		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	65	TEXTOVÁ ČÁST	65	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce obsahuje rozbor vlastností tuhých paliv z hlediska skladování a transportu, dále řeší technologických zařízení pro odstraňování klenby a úlepů v zásobnících sypkých materiálů a na závěr řešení odstraňování klenby a úlepů pro sokolovské uhlí skladované v zadaném zásobníku včetně výkresu návrhu řešení.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>uhlí, sypké materiály, statická klenba, dynamická klenba, klenby, úlepy, zrnitost, vlhkost, sypná hmotnost, sypný úhel, úhel vnitřního a vnějšího tření, soudržné napětí, napěťový stav sypkého tělesa, hmotový tok, jádrový tok, poruchy toku, středový tunel, odstranění poruch toku, pulzní trysky</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Štejr	Name Michal		
FIELD OF STUDY	2301R016 “Construction of power system engineering“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Křenek	Name Vladimír		
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Removal of sediment in coal storage tanks			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	power system engineering	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	65	TEXT PART	65	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis contains an analysis of the properties of solid fuels from the perspective of storage and transport also a research of technological equipment for removing arches and bridges in bulk material storages and finally solutions for removing arches and bridges for coal stored in the specified tank including a design solution.
KEY WORDS	Coal, bulk materials, static arch, dynamic arch, arches, grain size, moisture, bulk density, pour angle, angle of internal and external friction, coherent stress, bulk stress bodies, mass flow, funnel flow, flow problems, central tunnel elimination of flow problems, pulse nozzles

Obsah

Obsah.....	7
Použité zkratky a symboly.....	10
Úvod.....	11
1. Palivo.....	12
1.1. Rozdělení paliv.....	12
1.1.1. Podle skupenství.....	12
1.1.2. Podle stáří.....	12
1.1.3. Podle původu.....	12
1.2. Rozbor jednotlivých tuhých paliv.....	13
1.2.1. Uhlí.....	13
1.2.2. Koks.....	16
1.2.3. Tuhá biopaliva.....	16
2. Mechanické vlastnosti sypkých hmot.....	17
2.1. Zrnitost.....	17
2.2. Vlhkost.....	18
2.3. Měrná, objemová a sypná hmotnost.....	19
2.3.1. Měrná hmotnost ρ	19
2.3.2. Objemová hmotnost ρ_v	19
2.3.3. Sypná hmotnost ρ_s	19
2.4. Sypný úhel.....	19
2.5. Úhel vnitřního a vnějšího tření partikulárního materiálu.....	19
2.6. Soudržnost sypkých hmot.....	21
2.7. Napěťový stav sypkého tělesa.....	22
2.8. Určení tlaků v sypkém tělese.....	24
2.8.1. Rankinova teorie.....	25
2.8.2. Jansenova teorie.....	25

3.	Zásobníky pro skladování sypké hmoty	27
4.	Mechanismy toku partikulární hmoty v zásobnících	29
4.1.	Jádrový tok	29
4.2.	Hmotový tok	30
4.2.1.	Podmínky hmotového toku podle Jenikeho	31
4.3.	Srovnání jádrového a hmotového toku	32
4.4.	Volba typu zásobníku v závislosti na stavu skladované hmoty	32
5.	Poruchy toku partikulární hmoty	34
5.1.	Klenbování	35
5.2.	Středový tunel	35
5.3.	Úlepy	36
5.4.	Nepravidelný tok	36
5.5.	Segregace materiálu	36
5.6.	Nevhodná doba skladování	37
6.	Technologická zařízení pro odstranění poruch toku partikulární hmoty	38
6.1.	Aktivní prvky	38
6.1.1.	Provzdušňovací nebo fluidizační podložky	38
6.1.2.	Vzduchové polštáře	39
6.1.3.	Vzduchová děla	40
6.1.4.	Pulzní trysky	40
6.1.5.	Akustické čištění – akustický měnič	41
6.1.6.	Vibrační vypouštěcí pomůcky	42
6.1.7.	Mechanické vypouštěcí pomůcky	44
6.1.8.	Lokální ohřev	44
6.2.	Pasivní prvky	45
6.3.	Tabulka srovnání jednotlivých metod	46
7.	Návrh zařízení pro odstranění klenby a úlepů pro zadaný sypký materiál ...	47

7.1. Analýza sypké hmoty	47
7.2. Volba vhodné technologie	48
7.3. Technologie pulzních trysek.....	48
8. Návrh řešení poruch toku pro zadaný zásobník	51
8.1. Konstrukce zásobníku.....	51
8.1.1. Aktuální stav zásobníku.....	51
8.2. Návrh řešení – varianta A	55
8.3. Návrh řešení – varianta B	56
8.4. Srovnání navržených variant	57
8.5. Porovnání řešení pro ocelový a betonový zásobník	58
9. Závěr.....	59
Zdroje:	60
Seznam obrázků.....	62
Seznam příloh.....	64

Použité zkratky a symboly

R_0	[%]	Střední světelná odraznost vitrinitu
U_{\max}	[mm]	Maximální rozměr zrna
ρ	[kg·m ⁻³]	Měrná hmotnost
ρ_v	[kg·m ⁻³]	Objemová hmotnost
ρ_s	[kg·m ⁻³]	Sypná hmotnost
ψ_s	[°]	Přírozený sypný úhel
ψ_d	[°]	Dynamický sypný úhel
φ_e	[°]	Efektivní úhel vnitřního tření
φ_i	[°]	Okamžitý úhel vnitřního tření za pohybu partikulárního materiálu
ν	[°]	Úhel vnějšího tření
τ_o	[Pa]	Soudržné napětí
k_b	[-]	Součinitel bočního tlaku
k	[-]	Součinitel sypnosti
σ	[Pa]	Napětí v určitém směru
σ'	[Pa]	Odvozená Jensenova napětí
$F(\theta)$	[-]	Normalizovaný rychlostní profil

Úvod

Bakalářská práce zkoumá odstraňování úlepů a kleneb v zásobnících na uhlí. Cílem je provést návrh řešení pomocí vhodných zařízení pro odstranění poruch toku uhlí pro zadaný zásobník a sokolovské uhlí při dané teplotě, vlhkosti a dalších podmínkách, viz zadání bakalářské práce. Řešení této problematiky je velice důležité, protože poruchy toku mohou vést k zastavení celého technologického procesu, které způsobí velké finanční ztráty. Před samotným návrhem je vhodné prozkoumat vlastnosti sypkých materiálů z širšího hlediska a provést rešerši zařízení sloužících k odstraňování klenby a úlepů. Práci lze tedy rozdělit do čtyř tematických částí.

První část bakalářské práce stručně definuje pojem palivo a zabývá se jeho rozdělením a vlastnostmi. Nejvíce se tato část zaměřuje na fosilní paliva, a to především na uhlí, protože je součástí následujících návrhů řešení.

Druhá část pojednává o základních mechanických vlastnostech sypké hmoty jako je například zrnitost nebo úhel vnitřního a vnějšího tření. Znalost základních mechanických vlastností je velmi podstatná k pochopení principů mechaniky sypkých hmot. V této práci jsou zmíněny pouze základní principy z jinak velmi rozsáhlého oboru mechaniky sypkých hmot, které jsou potřebné pro pochopení chování sypké hmoty v zásobníku. Speciální pozornost je věnována poruchám toku. Na tvorbu poruch toku má vliv velké množství faktorů jako např. struktura a vlhkost uskladněného materiálu nebo samotný materiál, tvar skladovacího zásobníku a další faktory zmíněné v této části.

Ve třetí části je proveden návrh technologických zařízení pro odstranění poruch toku, a to konkrétně klenby a úlepů pro zadaný typ průmyslové směsi 620-51E (sokolovské hnědé uhlí). Návrh obsahuje více možných řešení, ze kterých je vybráno nejvhodnější. Pro vybrané řešení je proveden popis jednotlivých částí technologie. Při návrhu řešení bylo dbáno na zadanou hodnotu teploty, vlhkosti, sypného úhlu a sypnou váhu zadaného hnědého uhlí.

Čtvrtá část obsahuje dvě navržená řešení pro zmíněnou průmyslovou směs a zadaný zásobník. V závěru této části jsou obě dvě řešení porovnána. Srovnání bylo provedeno ze dvou základních hledisek, a to technického a ekonomického. Pro vybranou technickou specifikaci byl vytvořen schématický výkres řešení, který je přiložen jako příloha k bakalářské práci.

1. Palivo

Palivo je látka nebo směs látek schopných za určitých podmínek uvolnit chemickou energii uloženou v látce a pomocí chemické reakce ji přeměnit na energii tepelnou. Tuto chemickou reakci nazýváme spalování. Látky nazvané jako palivo musí splňovat některé základní požadavky. U dobrého paliva je předpokládána velká výhřevnost na určitý objem látky. To znamená, maximální množství aktivních látek uvolňujících teplo, a naopak minimální obsah látek zabraňujících hoření a škodlivých látek. Podstatná je také dostupnost. Palivo by mělo být možné těžit nebo vyrábět ve velkém množství. Doprava by měla být co nejjednodušší a nejbezpečnější. Některé druhy paliva se skladují na hromadách venku. U takových paliv je důležitá odolnost proti povětrnostním vlivům. [1]

1.1. Rozdělení paliv

Jednotlivá paliva je možné rozdělit do skupin podle jejich stáří, fyzikálních vlastností nebo například využití. Z hlediska této bakalářské práce je největší pozornost kladena na pevná přírodní fosilní paliva, a to především na uhlí.

1.1.1. Podle skupenství

- Pevné: černé a hnědé uhlí, dřevo, lignit, antracit, koks
- Kapalně: ropa, těžké a lehké topné oleje, mazut
- Plynné: zemní plyn, propan-butan, svítiplyn, vodík

1.1.2. Podle stáří

- Fosilní (pravěká) – uhlí, ropa, zemní plyn
- Současná – dřevo, propan-butan

1.1.3. Podle původu

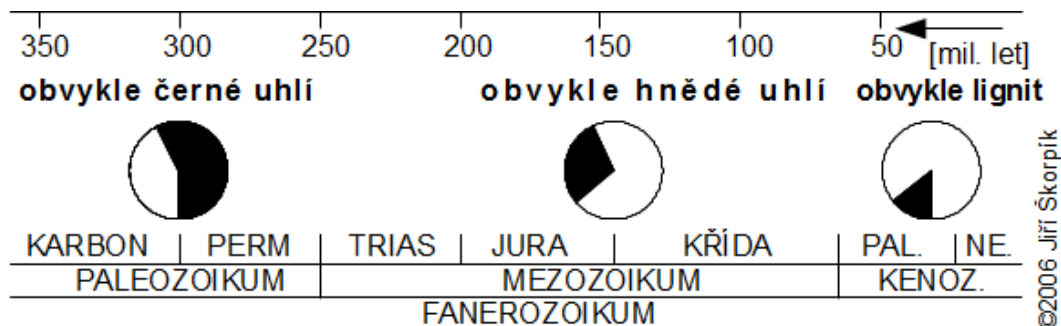
- Přírodní – paliva vzniklá přírodními procesy bez zásahu člověka např.: hnědé uhlí, zemní plyn, ropa, dřevo
- Vyrobená – paliva vzniklá za pomoci člověka např.: koks, brikety, benzín, petrolej, generátorový plyn, vodní plyn [2]

1.2. Rozbor jednotlivých tuhých paliv

Jak již bylo zmíněno, největší pozornost z tuhých paliv je věnována uhlí vzhledem k zadání této bakalářské práce. Existují i další tuhá paliva jako například dřevo, tuhá biopaliva nebo látky odvozené od uhlí (koks).

1.2.1. Uhlí

Uhlí je látka složená ze zuhelnatělých zbytků rostlin. Proces vzniku uhlí stejně tak jako procesy vzniku dalších fosilních paliv jsou komplikované chemické procesy. V případě uhlí se procesu, který postihuje především nekromasu suchozemských rostlin, říká uhelnění. Tento proces si lze zjednodušeně představit tímto způsobem. Po odumření rostlin dochází na povrchu k rašelinění a uvnitř v kůře k prouhelňování. Nejprve tedy dochází k rašelinění za částečného přístupu vzduchu díky vlivu bakterií, plísní a hub. Ve větší hloubce pod zemským povrchem navazuje na tento proces termický rozklad za vysokého tlaku, který způsobí další prouhelňování. Z rašeliny tedy prouhelňováním vzniká lignit, hnědé nebo černé uhlí, případně antracit. Z chemického hlediska můžeme v uhlí nalézt především C, H, O, N, S a mimo tyto prvky ještě téměř všechny ostatní prvky. Obsah C je závislý na prouhelňování. Čím je stupeň prouhelňování větší, tím je i větší obsah C a menší obsah H a O. [3]



Obr. 1 – 1 Výřez z časové osy země zachycující vývoj množství uhlí [4]

Na obrázku 1 – 1 je vidět, že přes 50% uhlí vzniklo v období karbonu a permu. Toto období bylo ideální pro vznik fosilních paliv, protože docházelo k velkým přírodním katastrofám a zároveň k četné horotvorné činnosti. V období jury a křídý vzniklo asi 30% uhlí a v období paleogénu a neogénu asi 14% uhlí. Na základě stupně prouhelňování můžeme rozdělit produkty a meziprodukty tvorby uhlí takto: rašelina → lignit → hnědé uhlí → černé uhlí → antracit. [4]

Rašelina

V této první fázi tvorby uhlí má látka ještě tvar připomínající původní odumřelé rostliny. Většina prchavých plynů se stihla uvolnit do okolí, ale stupeň prouhelnění není vysoký. Obsah uhlíku v tomto stadiu je mezi 50 – 60%. V České republice není rašelina na základě hornického zákona považována za nerost. Lze ji využít jako palivo, ale spalování není příliš efektivní. Větší uplatnění našla rašelina v zemědělství. [4,5]



Obr. 1 – 2 Vzorek vysušené rašeliny [5]

Lignit

Lignit neboli nejmladší hnědé uhlí je měkká forma hnědého uhlí. Stupeň prouhelnění ještě stále není tak vysoký, ale již jej lze částečně zaměnit s hnědým uhlím. Lignit má na rozdíl od hnědého uhlí nižší výhřevnost. Lze jej využívat v energetice jako palivo. V České republice spaluje lignit jen elektrárna v Hodoníně. [5]



Obr. 1 – 3 Vzorek Lignitu [5]

Hnědé uhlí

Pokud rašelina sestoupila do větší hloubky a vzrostl tlak a tím i teplota, bylo umožněno další prouhelnění a vznik hnědého uhlí. Hnědé uhlí na rozdíl od rašeliny obsahuje množství

vody menší než 75% hmotnosti. Zároveň se liší větším obsahem uhlíku. Výhodou hnědého uhlí na rozdíl od černého uhlí je, že se nachází blíže k povrchu, a proto je jeho těžba levnější. Lze jej těžit v povrchových dolech a využívá se v hojném množství jako palivo v energetice. Světové zásoby v roce 2005 činily přibližně 414 miliard tun. Pro představu roční přibližná těžba uhlí v České republice včetně lignitu byla 47,87 milionů tun. [5]



Obr. 1 – 4 Vzorek hnědého uhlí [5]

Černé uhlí

Tento typ uhlí vzniká dalším prouhelňováním hnědého uhlí a již vypadá převážně jako hornina a není možné zde nalézt tvary původních rostlin. Obsah uhlíku je větší než u hnědého uhlí a tím je větší i výhřevnost. Naopak obsah popelovin je menší než v uhlí hnědém. Rozdíl mezi hnědým a černým uhlím posuzujeme na základě střední světelné odraznosti vitrinitu (R_0). Jedná se o parametr měřený v laboratoři pomocí mikroskopu. Mezní hranice pro černé uhlí je $R_0 = 0,5 \%$. Využití černého uhlí je především v energetice a pro výrobu koksu. Lze jej také používat v petrochemickém průmyslu. [5]



Obr. 1 – 5 Vzorek černého uhlí [5]

Antracit

Za ideálních podmínek bylo umožněno odumřelým zbytkům rostlin maximální prouhelnění. Toto poslední stadium uhlí se nazývá antracit. Obsah uhlíku se pohybuje mezi 91 – 97%. Od černého uhlí se odlišuje i svým vzhledem. Vzorky mají silný lesk. Další prouhelňování antracitu za vhodných podmínek vede ke vzniku grafitu. Nejvíce na světě těží antracit Čína. Antracit je vhodný pouze pro výrobu energie. [5]



Obr. 1 – 6 Vzorek antracitu [5]

1.2.2. Koks

Černé uhlí s nízkým obsahem síry je vhodné pro tvorbu koksu. Tato látka je vyráběna pyrolýzou uhlí za teploty okolo 1000°C. V přírodě koks vzniká přirozenou cestou, a to v případech kontaktu uhlí s lávou. Kromě využití v energetickém průmyslu je koks používán ve vysoké peci při výrobě železa. [6]

1.2.3. Tuhá biopaliva

Mezi tyto paliva řadíme především dřevo v různých formách (polena, štěpka, piliny, brikety, pelety) a dále například slámu či seno ve formě briket a pelet. Výhodou tohoto druhu paliva je jeho obnovitelnost. Tuhá biopaliva se v dnešní době používají především pro vytápění rodinných domů. V energetickém průmyslu nemají příliš velké využití.

2. Mechanické vlastnosti sypkých hmot

Pro správné pochopení principů mechaniky sypkých hmot, je dobré se nejprve seznámit se základními vlastnostmi sypkých hmot. Zároveň níže zmíněné vlastnosti z velké míry předurčují chování sypkých materiálů při jejich dopravě a skladování. Lze říci, že tuhá paliva jsou po vytěžení ve formě sypké hmoty s rozdílnými vlastnostmi.

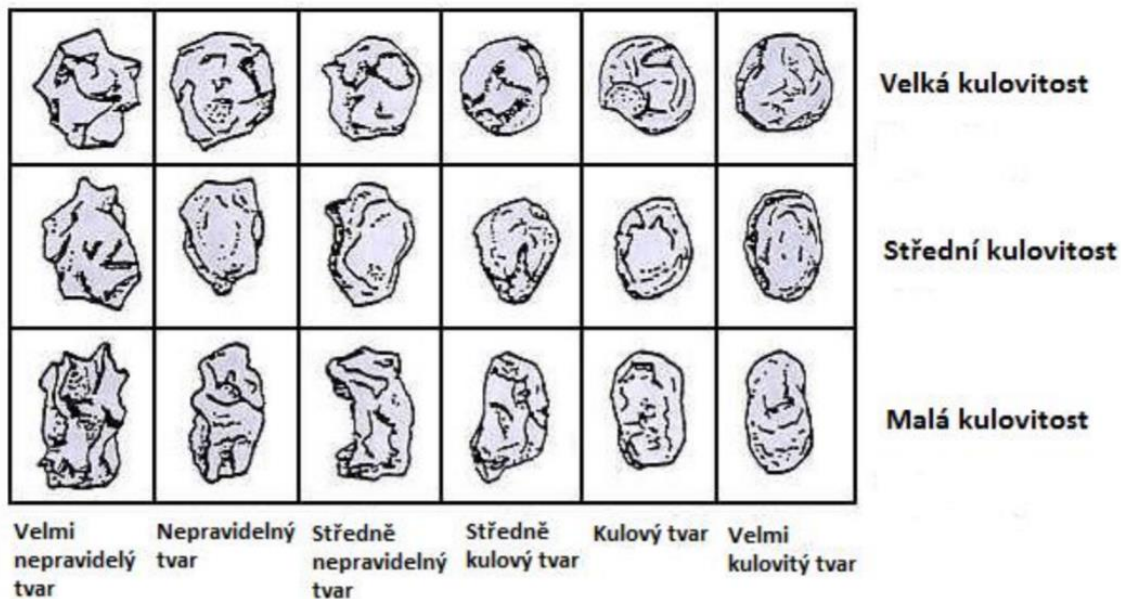
Sypká též partikulární hmota se skládá z velkého množství různých částic, které se liší rozměry a tvarem, ale celková objemová hmotnost je shodná. Vzhledem k různorodému složení partikulární hmoty je její chování z velké části nepředvídatelné. V podstatě posun jednoho zrna sypkého materiálu může způsobit řetězovou reakci, která způsobí pohyb větší části hmoty. V dnešní době známe jen některé experimentálně zjištěné poznatky, které můžeme využít při odhadu chování partikulární hmoty.

Pro předpoklad chování sypkého materiálu jsou podstatné především tyto vlastnosti:

- a) Zrnitost
- b) Vlhkost
- c) Měrná, objemová a sypná hmotnost
- d) Sypný úhel
- e) Úhel vnitřního a vnějšího tření
- f) Soudržné napětí
- g) Napěťový stav sypkého tělesa [7]

2.1. Zrnitost

Zkoumá partikulární hmotu na základě rozměrů a tvaru jednotlivých částic. Využívá tzv. granulometrie pro určení procentuálního obsahu částic z různých tříd zrnitosti nebo pro tvorbu křivky zrnitosti. Různorodost jednotlivých částic komplikuje nalezení reprezentativního vzorku daného materiálu. Tyto reprezentativní vzorky lze určovat na základě několika kritérií. Nejvíce se využívá maximálního rozměru zrna U_{\max} [mm] nebo dvou navzájem kolmých maximálních rozměrů. Další podstatnou vlastností je součinitel odklonu od sféricity, který určuje, jak moc se zrno tvarově liší od koule. [7]



Obr. 2 – 1 Wadellova tabulka sféricity částic [7]

V běžné praxi se nejčastěji používá síťový rozbor jako forma granulometrie. Využívá se několika vrstev sít s rozdílnou velikostí ok, které jsou uloženy na vibrační podložce. Síta jsou řazena odspodu od těch s nejmenším rozměrem ok až po síta s největším rozměrem ok. Materiál je nasypán na horní síto a vibrační podložka zajistí propad jednotlivých částic podle velikosti ok v sítu. Následně je množství materiálu na jednotlivých sítích převáženo a lze zjistit procentuální podíl zrn o různé velikosti. [7]

2.2. Vlhkost

Vyjadřuje množství vody v materiálu vztažené na celkovou hmotnost vzorku tohoto materiálu. Vlhkost je uváděna v procentech. Vzhledem k podnebí se především díky vzdušné vlhkosti množství vody v sypké hmotě neustále mění a může tak komplikovat přepravu, manipulaci a skladování. Partikulární hmota zadržující vodu na jednotlivých částicích hmoty se nazývá vlhká. Právě vlhkost a schopnost přijímat vodu z okolí též zvaná nasákavost, jsou podstatné při zkoumání možností tvorby úlepů a dalších poruch toku materiálu. Nežádoucí vlhkost lze odstranit pomocí odstředivé síly nebo tepelným působením (odpařením) ve speciálních přístrojích. [7]

2.3. Měrná, objemová a sypná hmotnost

2.3.1. Měrná hmotnost ρ

Hmotnost objemové jednotky sypkého materiálu při zaplnění veškerých volných částí. Udává se v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a zkoumá se po rozdrčení materiálu na částice o velikosti menší než 0,125 mm a zahřátí na 105-110 °C. [7]

2.3.2. Objemová hmotnost ρ_v

Hmotnost objemové jednotky sypkého materiálu při zachování všech pórů a dutin (tzv. rostlý stav). Princip určení objemové hmotnosti je stejný jako u hmotnosti měrné, ale nejprve je nutné zjistit objem meziprostoru částic pomocí vhodné kapaliny o daném objemu. Jednotkou objemové hmotnosti je $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$. [7]

2.3.3. Sypná hmotnost ρ_s

Hmotnost objemové jednotky materiálu v rozděleném a volně sypaném stavu. Například materiál nasypaný do vagónu a připravený na přepravu. Zkoumá se v laboratoři pomocí nádoby o daném objemu, do které je nasypán měřený materiál a po naplnění zvážen. [7]

2.4. Sypný úhel

Pro sypný úhel daného materiálu rozlišujeme dvě hodnoty, a to v klidu nebo při pohybu materiálu. [7]

Klidový (přirozený) sypný úhel ψ_s – Je takový úhel, který svírá tečna ke svahu volně vysypaného materiálu z válcové nádoby a vodorovná podložka. Získává se experimentálně v laboratořích. [7]

Dynamický sypný úhel ψ_d – Vzniká v případě dopravy nebo obdobné manipulace se sypkým materiálem. Vlivem kmitavého pohybu dojde k rozprostření materiálu na větší plochu a tím ke zmenšení sypného úhlu. [7]

2.5. Úhel vnitřního a vnějšího tření partikulárního materiálu

Další podstatnou vlastností partikulární hmoty je tření mezi jednotlivými částicemi, které je vyjádřené **úhlem vnitřního tření**. Tento úhel se liší v závislosti na vlastnostech zrn materiálu jako je jejich tvar a velikost. Dále také závisí na zhutnění materiálu a normálovém tlaku (roste s množstvím hmoty nad měřenou oblastí). Čím je materiál více konsolidovaný, tím úhel vnitřního tření roste a naopak. Z tohoto důvodu se měření provádí na nově nasypaném

materiálu a následně na zhutněném materiálu. K určení vnitřního tření se využívá smykový a rotační stroj (Jenikeho a Schulzeho typ). [7]

Jako příklad je uvedeno měření černého uhlí na přímočarém smykovém stroji. Kromě vnitřního třecího úhlu lze z obrázku (obr. 2 – 2) zjistit i další tokové vlastnosti a tokové křivky (Mohrovy kružnice).

Použité symboly:

φ_e – efektivní úhel vnitřního tření

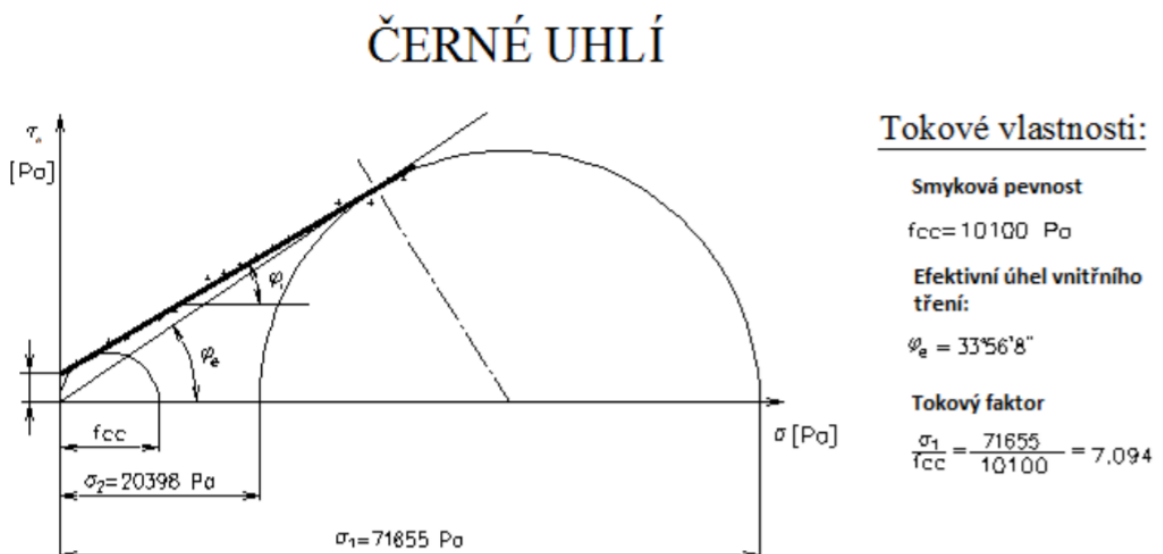
φ_i – okamžitý úhel vnitřního tření za pohybu partikulárního materiálu

Pro přibližné určení úhlu vnitřního tření s využitím přirozeného sypného úhlu ψ_s lze využít vztah:

$$\varphi = \arctg(0,9tg(\psi_s)) \quad [^\circ] \quad (2.51)$$

Z toho plyne, že součinitel vnitřního tření určený z úhlu vnitřního tření je určen jako

$$f = tg(\varphi) \quad [-] \quad (2.52) \quad [7]$$



Obr. 2 – 2 Úhel vnějšího, vnitřního tření a další tokové vlastnosti černého uhlí [7]

Pro případ skladování a přepravy partikulární hmoty je velice podstatný **úhel vnějšího tření**. Vyjadřuje úhel, při jehož dosažení dochází k pohybu hmoty po podložce. Podobně jako u sypného úhlu rozlišujeme úhel vnějšího tření za klidu a za pohybu. Pro klidový případ platí $tg\varphi = \mu$ (klidový součinitel tření) a pro případ pohybu platí $tg\varphi_d = \mu_d$ (pohybový součinitel

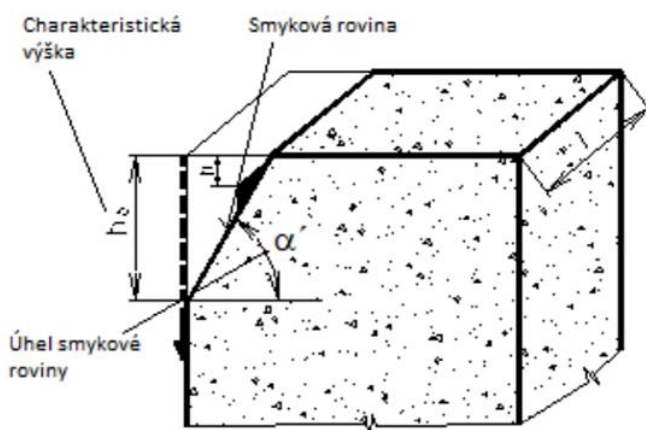
tření). Součinitel vnějšího tření je závislý na normálovém tlaku, a především na vlastnostech podložky. Z tohoto důvodu se například u betonového sila může využít obložení z kluzkého materiálu pro zlepšení kluzných podmínek. Úhel vnějšího tření se určuje experimentálně na strojích používaných pro určení úhlu vnitřního tření. [7]

2.6. Soudržnost sypaných hmot

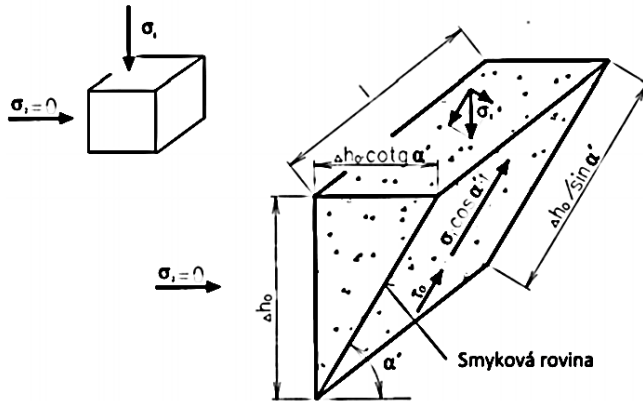
Soudržnost je jedna z dalších významných vlastností, která má velký vliv na tvorbu poruch toku materiálu. Lze ji definovat jako vlastnost materiálu přenášet pomocí vnitřního tření smyková a tlaková napětí, ale také v malé míře napětí tahová a krutová. Partikulární látky, které přenášejí jen smyková a tlaková namáhání, označujeme jako ideální. [7]

Soudržnost partikulární hmoty je určena **soudržným napětím** τ_0 . Na smykových rovinách působí soudržné napětí a vnitřní tření. Společně způsobují soudržnost hmoty. Počáteční soudržné napětí je ovlivněné sypnou tíhou γ_s , charakteristickou výškou h_0 , součinitelem vnitřního tření f a také úhlem smykové plochy α' . [7]

Pro určení τ_0 je nutné experimentálně zjistit charakteristickou výškou h_0 a úhel smykové roviny α' . K tomu se využívá speciální nádoby, která má na jedné straně stěnu s možností vertikálního pohybu. Nádoba je naplněna partikulárním materiálem o dané sypné hmotnosti a následným pohybem zmiňované strany nastane odtržení klínu materiálu. (obr. 2 - 4). Po provedení experimentu je odměřen úhel smykové roviny α' a charakteristická výška h_0 . [7]



Obr. 2 – 3 Měření charakteristické výšky a úhlu smykové roviny [7]



Obr. 2 – 4 Silové působení na odděleném klínu [7]

α' - úhel smykové roviny [°]

τ_0 - počáteční soudržné napětí [Pa]

$\sigma_{1,2}$ – napětí ve svislém a vodorovném směru (v okamžiku oddělení klínu $\sigma_2 = 0$) [Pa]

h_0 – charakteristická výška [m]

Ze silové rovnováhy na odděleném klínu a s využitím změřené charakteristické výšky a úhlu smykové roviny je možné odvodit vztah pro počáteční soudržné napětí

$$\tau_0 = \frac{\gamma_s \cdot h_0}{2} \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \varphi) \text{ [Pa]} \quad (2.61)$$

2.7. Napěťový stav sypkého tělesa

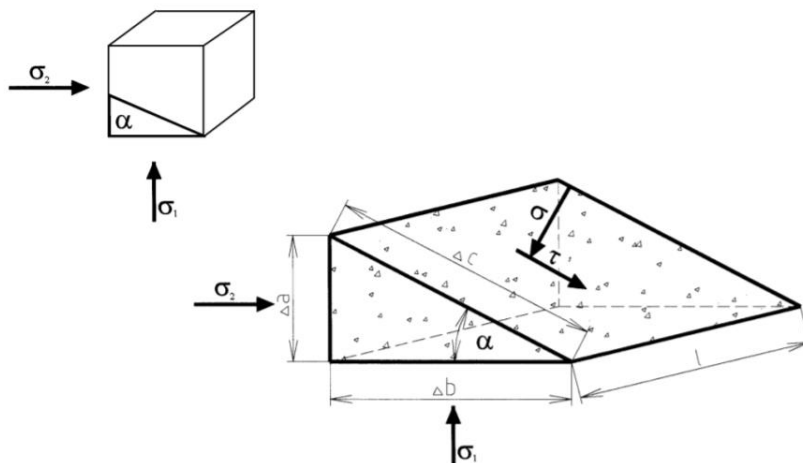
Jako sypké těleso označujeme partikulární hmotu, která se nachází v zásobníku nebo je volně ložená. Takové těleso stejně jako další podléhá napěťovému stavu. [7]

Pro určení napětí ve vybrané rovině byla oddělena malá část sypkého tělesa. Tento element má tvar například trojbokého hranolu. Následně je na hranol na obrázku (obr. 2 - 5) vyznačeno silové působení včetně sil, které nahrazují působení odstraněných částí tělesa. [7]

Pro silovou rovnováhu na hranolu platí:

$$\sum F_{i\sigma} = 0 \rightarrow l \cdot (\Delta c \cdot \sigma - \Delta a \cdot \sigma_2 \cdot \sin(\alpha) - \Delta b \cdot \sigma_1 \cdot \cos(\alpha)) = 0 \quad (2.71)$$

$$\sum F_{i\tau} = 0 \rightarrow l \cdot (\Delta c \cdot \tau - \Delta a \cdot \sigma_2 \cdot \cos(\alpha) - \Delta b \cdot \sigma_1 \cdot \sin(\alpha)) = 0 \quad (2.72)$$



Obr. 2 – 5 Silové působení na oddělené části sypkého tělesa [7]

$$\Delta a = \Delta c \cdot \sin(\alpha) \quad \Delta b = \Delta c \cdot \cos(\alpha) \quad (2.73)$$

Geometrické vztahy (2.73) byly dosazeny do rovnic silové rovnováhy (2.71) a (2.72):

$$\sigma = \sigma_1 \cdot \cos^2(\alpha) + \sigma_2 \cdot \sin^2(\alpha) \quad [\text{Pa}] \quad (2.74)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin(2\alpha) \quad [\text{Pa}] \quad (2.75)$$

Rovnice (2.74) byla upravena pomocí trigonometrických vztahů.

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos(2\alpha) \quad [\text{Pa}] \quad (2.76)$$

Pro vytvoření Mohrovy kružnice napětí bylo využito součtu umocněných vztahů (2.75) a (2.76).

Po matematické úpravě byl získán vztah:

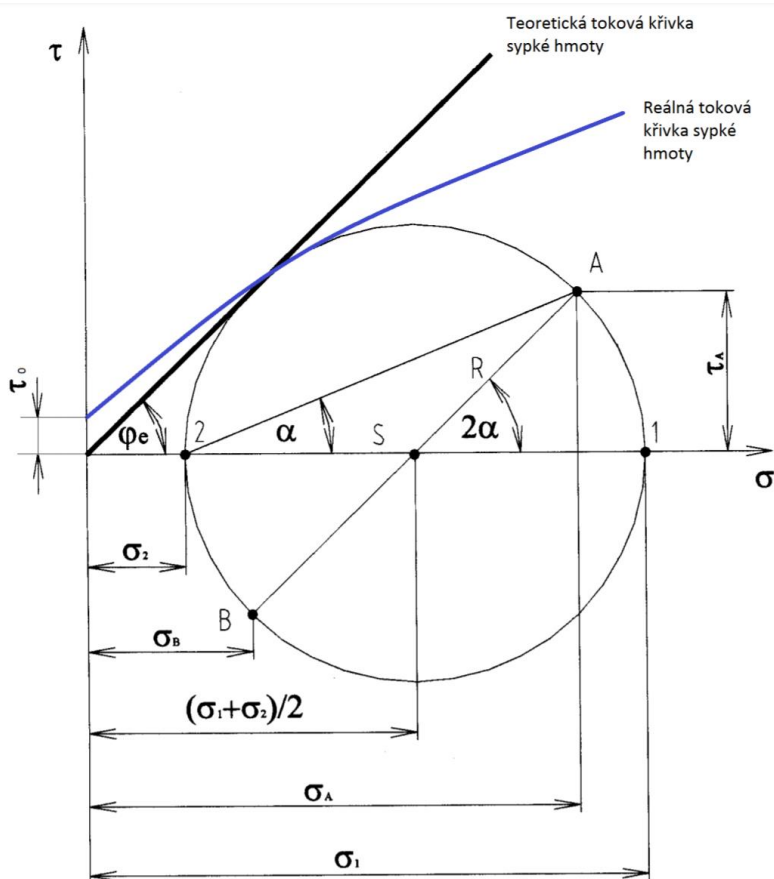
$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}\right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right)^2 \quad [\text{Pa}] \quad (2.77)$$

Ve skutečnosti je nutné počítat i s napětím vznikajícím v kolmém nebo bočním směru σ_B . Pro zohlednění těchto napětí je využíváno tzv. součinitele bočního tlaku:

$$k_b = \frac{\sigma_B}{\sigma_A} \quad [-] \quad (2.78)$$

Nejnižší možný součinitel bočního tlaku (2.78) vyplývá ze vztahu (2.79) a označuje se součinitel sypnosti.

$$k = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1 - \sin(\varphi)}{1 + \sin(\varphi)} \quad [-] \quad (2.79) \quad [7]$$



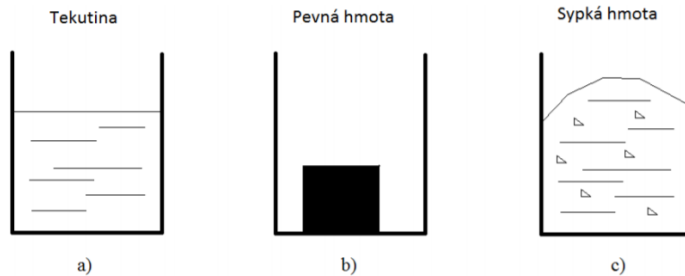
Obr. 2 – 6 Mohrova kružnice napětí a teoretická a reálná toková čára partikulárního materiálu [7]

2.8. Určení tlaků v sytkém tělese

Aby bylo možné lépe definovat tokové vlastnosti a navrhovat skladovací a dopravní zařízení je nutné určit tlak, který působí v sytkém tělese. Vzhledem k výše zmíněným vlastnostem partikulárních hmot, jako je například odlišný úhel vnitřního tření $\varphi = (0, 90^\circ)$, nelze využít Pascalův zákon. Tento zákon uvažuje rovnoměrné šíření tlaku do všech směrů a platí pouze pro kapaliny, kde se vždy $\varphi \approx 0^\circ$. Nelze využít ani vztahů pro pevné látky, protože jejich úhel vnitřního tření $\varphi = 90^\circ$. Chování zmíněných látek v uzavřené nádobě znázorňuje obrázek (obr. 2 – 7). Existují dvě používané teorie pro určení tlaku v sytkém tělese (Rankinova, Jansenova). [7]

2.8.1. Rankinova teorie

Tato teorie využívá zanedbání vnitřního tření v partikulární hmotě a tření po stranách nádoby. Při využití tohoto zjednodušení, lze svislé napětí působící na vodorovnou plochu považovat za hydrostatický tlak. Ten lze popsat vztahem (2.81), kde h je výška sypké hmoty.



Obr. 2 – 7 Chování látek v uzavřené nádobě [7]

$$\sigma_1 = \gamma_s \cdot h \quad [\text{Pa}] \quad (2.81)$$

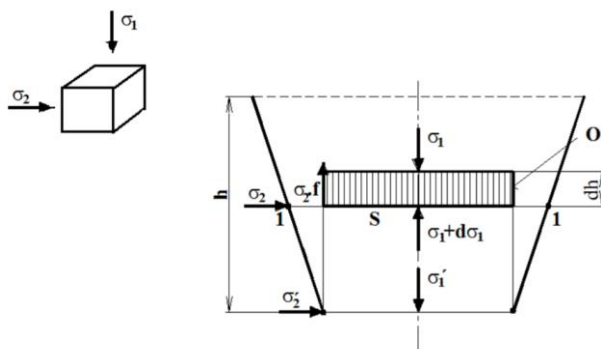
Pro případ svislé plochy lze využít vodorovného napětí.

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot k = k \cdot \gamma_s \cdot h \quad [\text{Pa}] \quad (2.82)$$

Vzhledem k zanedbání vnitřního tření a tření na stranách nádoby lze tuto teorii použít pouze pro zásobníky do maximální výšky $h \leq (8 \div 10) \cdot R$, kde R vyjadřuje velikost hydraulického poloměru. [7]

2.8.2. Jansenova teorie

Tato teorie předpokládá, že na element hmoty nazvaný sloupec působí ostatní části materiálu vnitřním třením a prostřednictvím vnějšího tření působí tyto části materiálu na stěny skladovací nádoby. Na rozdíl od Rankinovy teorie, tato teorie tedy bere v úvahu vnitřní a vnější tření a je z tohoto důvodu přesnější. Hlavní napětí se dá získat z obr. 2 – 8. [7]



Obr. 2 – 8 Odvození hlavního napětí a síly působící na stěnu nádoby [7]

Po odvození s využitím obrázku dostáváme vztah pro Jansenovo napětí (odvození není podstatné pro tuto práci a není proto součástí této práce):

$$\sigma'_2 = \frac{\gamma_s \cdot R}{f} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot f \cdot h}{R}}\right) \quad [\text{Pa}] \quad (2.83)$$

$$\sigma'_1 = \frac{\gamma_s \cdot R}{f \cdot k} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot f \cdot h}{R}}\right) \quad [\text{Pa}] \quad (2.84)$$

Následně je možné odvodit vztahy pro skutečné tlaky p'_1 a p'_2 . Tyto tlaky vznikají ve skutečných zásobnících při manipulaci s uzavěrem výpusti. V praxi jsou používány opravné koeficienty k_0 a k_d .

$$p'_1 = \sigma'_1 \cdot k_0 \cdot k_d \quad [\text{Pa}] \quad (2.85)$$

$$p'_2 = \sigma'_2 \cdot k_0 \cdot k_d \quad [\text{Pa}] \quad (2.86)$$

Kde k_0 (součinitel závěsu) $\in (1 \div 2)$ a k_d (dynamický součinitel) $\in (1,1 \div 1,6)$. Tyto součinitelé vyjadřují působení dalších vlivů na sypký materiál. Tímto se odlišuje teoretický tlak od tlaku reálného. Z praxe v dnešní době víme, že poměr teoretických napětí (2.83 a 2.84) a skutečných tlaků (2.85 a 2.86) se velmi často blíží hodnotě 2,3. Proto se v praxi zvětšuje toto teoretické napětí právě o hodnotu 2,3.

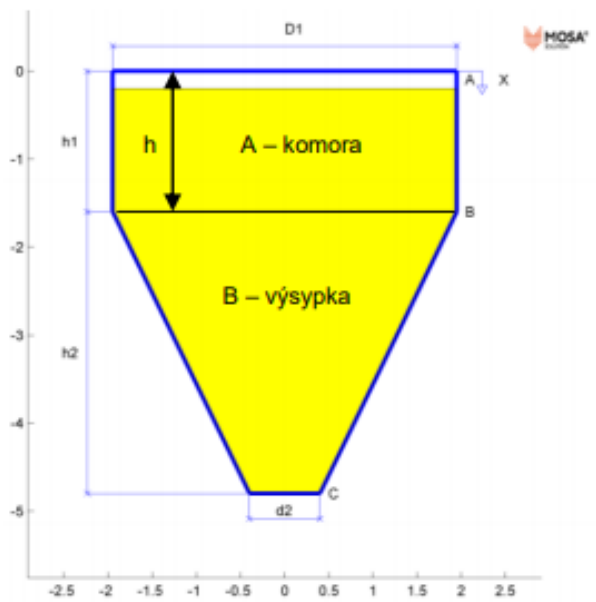
Vzhledem k výše uvedenému lze uvažovat:

$$\frac{p'_1}{\sigma'_1} = 2,3 = k_0 \cdot k_d \quad (2.87)$$

$$\frac{p'_2}{\sigma'_2} = 2,3 = k_0 \cdot k_d \quad (2.88) \quad [7]$$

3. Zásobníky pro skladování sypké hmoty

„Zásobník je obecně chápán jako prostorová konstrukce, sloužící k uskladňování zrnitých, prachových, popř. též z části soudržných vláknitých materiálů - sypkých hmot. Schéma zásobníku a jeho částí (obr. 3 – 1). Zásobník se skládá z komory ozn. „A“ o výšce „h“ a z výsyvky „B“. Nad komorou může být ještě manipulační prostor. Půdorysný tvar komory bývá kruhový, pravoúhlý, popř. mnohoúhelníkový. Zásobníky jsou ukládány na základové konstrukce buď přímo nebo prostřednictvím podpěr, mohou být i součástí technologických celků. Základní jednotku zásobníku tvoří buňka, která se většinou sestává z jedné komory a jedné výsyvky, přičemž buňky mohou stát samostatně, nebo bývají sdružovány ve sdruženém zásobníku. Zásobníky se člení na bunkry a sila.“ [15]



Obr. 3 - 1 Schéma zásobníku a základní pojmy [14]

Zásobník splňuje požadavky pro bunkr pokud:

$$h \leq 1,5 * \sqrt{A} \quad (3.1)$$

Kde:

h – výška komory

A – plocha vnitřního průměru buňky

Pokud nerovnost neplatí, pak se jedná o silo nikoli bunkr. [15]

Zásobníky lze dále rozdělit do tří skupin.

1. Stabilní – zásobníky používané na jednom místě.
2. Přemístitelné – zásobníky používané na daném místě dočasně a následně přesunuté jinam.
3. Mobilní – zásobníky používané i za pohybu. [15]

4. Mechanismy toku partikulární hmoty v zásobnících

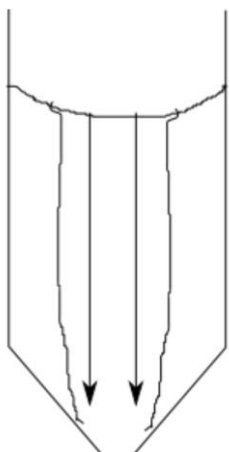
Jak bylo zmíněno výše, pohyb partikulární hmoty je velmi složitý a do jisté míry náhodný. Faktorů, které ovlivňují tokové vlastnosti, je více. Patří mezi ně druh sypké hmoty, tvar a sklon stěn zásobníku a také materiál zásobníku.

V dnešní době rozlišujeme především dva mechanismy toku. První z nich je **hmotový tok**, kdy dochází k pohybu celého objemu uložené sypké hmoty. Tomuto mechanismu odpovídá způsob vyprazdňování FIFO (First in – First out), neboli materiál, který přitéká jako první, odtéká jako první. Druhým mechanismem je **jádrový tok**. Pro ten je typický nerovnoměrný průtok materiálu celým průřezem zásobníku a pohyb je uskutečněn především podél osy zásobníku. Princip tedy odpovídá způsobu vyprazdňování FILO (First in – Last out), neboli materiál, který přitéká jako poslední, odtéká jako první. [8,9]

4.1. Jádrový tok

Jak již bylo zmíněno, jedná se o mechanismus, kdy první nasypaná vrstva odtéká jako poslední a k toku dochází především v oblasti nad výpustí. Tento tok není ve většině případů žádoucí, ale setkáváme se s ním u velkého množství zásobníků v těžkém průmyslu. Jádrový tok vznikne v případě poddimenzování výpustního otvoru nebo špatně zvoleného sklonu a drsností stěn zásobníku.

Jedním z hlavních důvodů, proč není jádrový tok žádaný, je vznik tzv. mrtvých zón. Na obr. 4 - 1 lze vidět, že k toku dochází nejprve nad výpustí a oblasti, které přiléhají blíže ke stěnám zásobníku se nepohybují. V takovém případě se jedná právě o zmiňovanou mrtvou zónu. V lepším případě začne tato oblast postupně odtékat v okamžiku, kdy se k ní přiblíží hladina materiálu v zásobníku. Pohybující se materiál při klesání hladiny v silu začne strhávat částice, které se do té doby nacházely v mrtvé zóně, a tato zóna se postupně zmenšuje s klesající hladinou. Tímto způsobem může dojít k úplnému vyprázdnění sila. V praxi však nastávají i případy, kdy se povede mrtvou oblast samovolně vysypat až po úplném vyprázdnění zásobníku nebo dojde ke zhutnění materiálu a vzniku úlepů. V takovém případě musí být usazený materiál ze zásobníku vysypán za pomoci speciálních přípravků. [8,9]

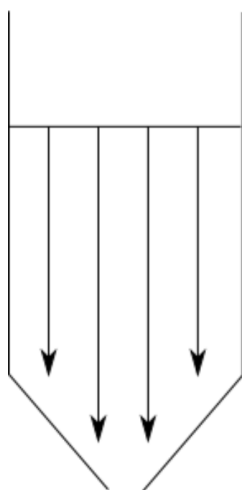


Funnel Flow

Obr. 4 - 1 Model sila s jádrovým tokem (po stranách „mrtvá zóna“) [8]

4.2. Hmotový tok

Pokud to konstrukce zásobníku umožňuje, je dosažení právě hmotového toku prioritou. V případě hmotového toku materiál vytéká ve stejném pořadí jako přitéká, není tedy v takové míře pravděpodobný vznik mrtvých zón a lze proto využívat veškerý objem zásobníku. Pro dosažení tohoto mechanismu musí být splněny některé předpoklady. Sklon stěn sila u výpustného otvoru se pohybuje v rozmezí $15^\circ - 20^\circ$. Mezi další předpoklady patří tvar, materiál, drsnost stěn zásobníků a úhel vnitřního tření skladované látky. Velkou roli hraje také doba skladování, sléhavost materiálu a velikost výsypného otvoru. [8,9]



Mass Flow

Obr. 4 - 2 Hmotový tok sypké hmoty a isolinie znázorňující oblasti se stejným napětím [8]

Pro zajištění hmotového toku existuje několik teorií jako je Jenikeho nebo Zegzulkovo.

4.2.1. Podmínky hmotového toku podle Jenikeho

Při zachování předpokladu, že veškerý materiál v zásobníku je v pohybu, můžeme sestavit vztah omezující hmotový tok:

$$F(\theta) = \exp\left(-3 \int_0^\theta \tan(2\psi^*) d\theta\right) \quad (4.21)$$

ψ^* úhel, který svírá směr většího hlavního napětí se souřadnicí r

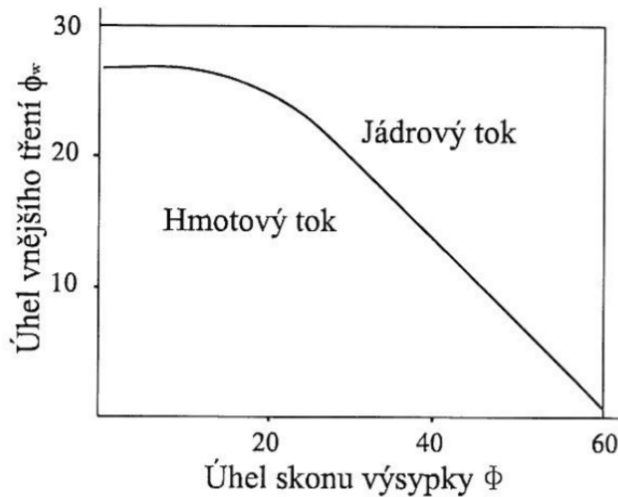
θ úhlová souřadnice sférického souřadného systému

Veličina $F(\theta)$ je normalizovaný rychlostní profil:

$$F(\theta) = \frac{v_r(\theta)}{v_r(0)} \quad (4.22)$$

Z rovnice lze odvodit, že vznik hmotového toku je podmíněn vhodným úhlem sklonu stěny v místě výpusti a úhlem vnějšího tření. Při návrhu zásobníku je tedy možné docílit hmotového toku volbou těchto dvou charakteristik. Zvolený úhel sklonu má vliv na celkovou výšku zásobníku dané kapacity. Úhel vnějšího tření ovlivníme především volbou materiálu pro stěnu, protože zvolená partikulární hmota má neměnné vlastnosti. Zásobníky se vyrábí kovové nebo betonové a jako obklad pro snížení vnějšího úhlu tření se využívá například nerezových plechů nebo keramických obkladů. [10]

Z řešení vztahu (4.21) lze sestavit graf závislosti úhlu vnějšího tření na úhlu sklonu výsypky pro daný materiál. Tento graf se běžně používá při plánování konstrukce zásobníku s hmotovým tokem. Na obr. 4 - 3 je vidět mezní křivka oddělující oblasti hmotového a jádrového toku. Zároveň z obrázku plyne, že cílem je maximálně snižovat úhel vnějšího tření. [10]



Obr. 4 - 3 Graf znázorňující mezní křivku mezi hmotovým a jádrovým tokem (pro daný materiál) [10]

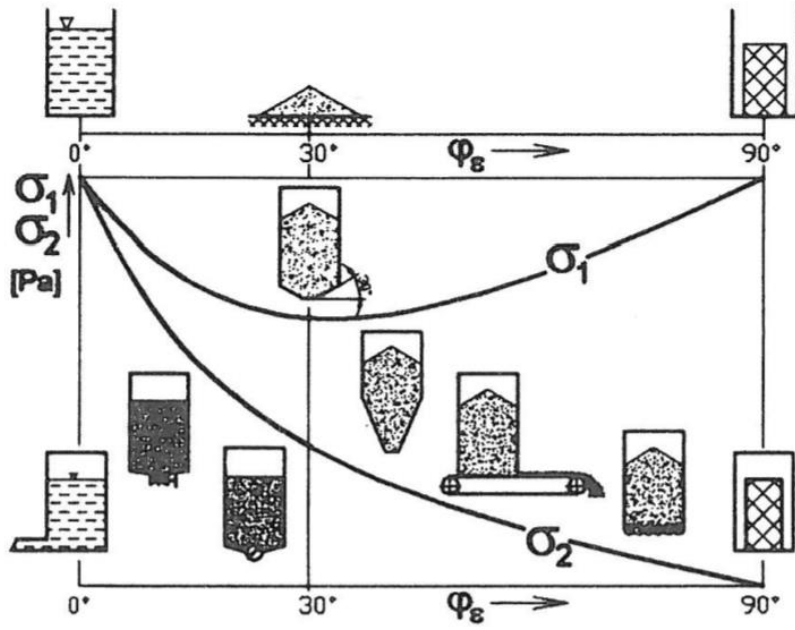
4.3. Srovnání jádrového a hmotového toku

Jak bylo zmíněno výše, ve většině případů požadujeme dosažení hmotového toku. Výhodou tohoto mechanismu je stabilní tok materiálu, minimalizování vzniku mrtvých zón a rázu při jejich odstraňování. Omezením vzniku mrtvých zón dojde k zabránění stárnutí usazeného materiálu a zároveň segregaci částic. Mrtvé zóny zároveň narušují fungování čidel využívaných pro určení naplnění zásobníku.

Nevýhodou oproti jádrovému toku je odírání stěn při relativním pohybu materiálu vůči stěně zásobníku a větší nároky na konstrukční plánování a materiály zásobníku. [8,9]

4.4. Volba typu zásobníku v závislosti na stavu skladované hmoty

Vzhledem k vnitřnímu úhlu tření je ke každé partikulární hmotě v podstatě přiřazen tvar skladovacího zásobníku, ve kterém je dosaženo hmotového toku. Pro nově vznikající síla je v dnešní době téměř vždy podmínkou, aby bylo dosaženo hmotového toku. Jak bylo zmíněno, aby bylo dosaženo hmotového toku, zásobník musí mít vhodný sklon, tvar a musí být zvolena vhodná kombinace materiálu stěn a úhlu vnitřního tření. Pro menší úhly vnitřního tření je možné aplikovat menší úhly sklonu zásobníku a naopak. U velmi špatně tekoucích materiálů lze dokonce využít zásobníky se záporným (opačným) sklonem stěny. Volba vhodného zásobníku v závislosti na vnitřním úhlu tření a průběhu tlaků je znázorněna na obr. 4 - 4. [17]



Obr. 4 - 4 Volba typu zásobníku pro průběh tlaků jako funkce úhlu vnitřního tření $\varphi \in (0^\circ \div 90^\circ)$ [17]

5. Poruchy toku partikulární hmoty

Výhodou hmotového toku oproti jádrovému je minimum vznikajících poruch toku. Tyto poruchy vedou k nestabilnímu toku materiálu nebo až k úplnému přerušení toku a k zastavení následujících procesů. Zastavení výroby a odstranění poruch toku je doprovázeno velkými finančními náklady.

V zásobnících vznikají tyto poruchy toku:

- klenbování
- středové tunely
- úlepy
- nepravidelný tok

V důsledku těchto poruch vznikají v zásobníku další nepříznivé jevy:

- segregace materiálu
- nevhodná doba skladování

Vznik klenbování a středových tunelů závisí především na tekutosti neboli celkové adhezi mezi částicemi. Čím bude adheze mezi částicemi menší, tím lépe partikulární hmota teče zásobníkem a snižuje se pravděpodobnost vzniku poruchy toku.

$$F = F_v + F_c + F_e + F_{es} \quad [Lawrence] \quad (5.1)$$

Kde:

F = výsledná adhezní síla mezi částicemi

F_v = Van der Waalsova síla

F_c = kapilární síly (vztažené na vlhkost produktu)

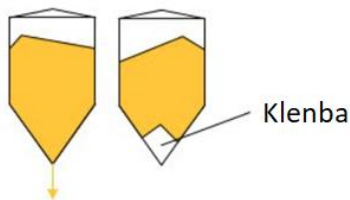
F_e = elektrické síly

F_{es} = elektrostatická síla

Metodám vhodným k odstranění těchto poruch případně k zajištění hmotového toku se věnuje následující kapitola 6. [11]

5.1. Klenbování

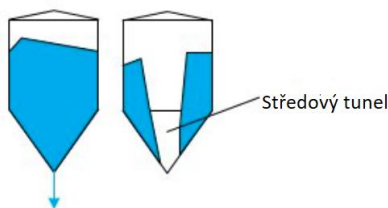
Nejčastější poruchou toku je právě klenbování. K tomu dochází, když je dostatečně kohezivní (soudržný) materiál uložen v nevhodně navrženém zásobníku, který má nedostatečně strmé stěny nebo nevhodný rozměr výtokového otvoru. V takovém případě adhezní síly působící v sypkém materiálu zabrání tečení a přenesou působící tíhovou sílu do stěn zásobníku. Pokud jsou adhezní síly dostatečně velké, vznikne pevná (statická) klenba a tok materiálu se úplně zastaví. V opačném případě vzniká dočasná (dynamická) klenba, která se dále rozpadá za vzniku velkých rázů, které mohou mít až destruktivní dopad na konstrukci zásobníku. Vzniku klenbování lze zabránit vhodným úhlem stěny zásobníku a nadkritickým průměrem výpusti. U již existujících zásobníků bez možnosti úplné rekonstrukce musí být využito pomůcek pro odstraňování poruch toku. [11]



Obr. 5 – 1 Znárodnění klenby v silu [11]

5.2. Středový tunel

V zásobnících s jádrovým tokem nebo s velmi malým výpustným otvorem dochází ke vzniku středového tunelu. V takovém případě sypký materiál protéká pouze tunelem uprostřed sila, po stranách se nepohybuje a vzniká zde zmiňovaná mrtvá zóna. Tento materiál se začne pohybovat v okamžiku, kdy se k němu přiblíží hladina materiálu v zásobníku. U kohezivních materiálů dochází k úplnému vyprázdnění sila a zachování celé mrtvé zóny nebo k částečnému odtržení mrtvé zóny. Odstraňování středových tunelů je spojeno se vznikem velkých rázových sil v zásobníku. Na takové zásobníky jsou kladeny velké konstrukční nároky.



Obr. 5 – 2 Znárodnění středového tunelu v silu [11]

5.3. Úlepy

Z důvodu nevhodného tvaru zásobníku, velké vlhkosti a kohezivitu materiálu nebo vlivem povětrnostních podmínek (namrzání) dochází v zásobnících k tvorbě úlepů na stěnách. V praxi nejvíce materiálu ulpívá na přechodu svislé části zásobníku na šikmou. Úlepy vznikají i na svislých stěnách zásobníku. Vzniklé úlepy zabraňují maximálnímu využití kapacity sila a mohou mít matoucí vliv na čidla, která udávají aktuální stav naplnění sila. Při odstraňování dochází ke vzniku rázů v zásobníku, které mohou vést k jeho poškození. [12]

5.4. Nepravidelný tok

Nepravidelný tok je především následkem tvorby zmíněných kleneb, středových tunelů a úlepů. Nepravidelný tok může být způsoben vysokým podílem prachových zrn nebo nadměrnou fluidizací (provzdušněním) materiálu. V takovém případě dochází k nadměrnému prostupu sypkého materiálu skrz výpust' a hrozí zasypání následujících zařízení nebo osob. V opačném případě, když dojde k zastavení toku z důvodu klenby nebo středového tunelu, je nutno použít technologii pro odstraňování poruch toku. [12]

5.5. Segregace materiálu

Při plnění zásobníku dochází k prvotní segregaci nehomogenního sypkého materiálu. V případě použití středového plnění zásobníku dochází k hromadění jemných částic v ose plnění a větší částice se hromadí u stěn. Ve velkém množství případů je požadováno konkrétní zrnitostní složení v okamžiku, kdy materiál opouští zásobník. Nedodržení tohoto zrnitostního složení se může promítnout do kvality a odolnosti výrobku. [12]

U zásobníků s hmotovým tokem je nebezpečí segregace materiálu při vyprazdňování minimalizováno. Vzhledem k současnému pohybu všech částí sypkého materiálu dochází k průběžnému promíchání jemných a hrubých částic sypkého materiálu. K největšímu mísení dochází v oblasti okolo výpustného otvoru. [12]

Problém se segregací materiálu je velký u zásobníků s jádrovým mechanismem toku. Dochází prvotně k odsypání materiálu ze středu zásobníku (jemné částice) a následně do výpustného otvoru spadávají hrubší částice ze stran. Při jádrovém toku nedochází v žádné části k dostatečnému promíchání, a proto není zajištěna homogenita daného materiálu po vysypání. [12]

5.6. Nevhodná doba skladování

Stejně jako ostatní výše zmíněné poruchy toku i tato vzniká především u zásobníku s jádrovým mechanismem toku. Pro hmotový tok platí teorie FIFO (First in – First out) a části materiálu zůstávají v zásobníku přibližně stejnou dobu. Opakem je jádrový tok, kdy dochází k odečtení nejprve nově nasypané vrstvy uprostřed zásobníku. Zásobník s jádrovým tokem tedy odpovídá teorii FILO (First in – Last out). V takovém případě může mít materiál na stranách zásobníku výrazně jiné stáří než materiál v ose výpustného otvoru. To vede k problémům při skladování materiálů s omezenou trvanlivostí jako jsou například farmaceutické prostředky a krmiva. [12]

6. Technologická zařízení pro odstranění poruch toku partikulární hmoty

V dnešní době se při konstrukci nových technologických procesů obsahujících manipulaci s partikulární hmotou příliš nevěnuje pozornost vhodnému návrhu zásobníku. Podobně tomu bylo dříve, a proto jsou poruchy toku v zásobnících běžné. Takové poruchy mohou způsobit zastavení dodávky materiálu ze zásobníku nebo v horším případě narušení konstrukce celého zásobníku. Obě dvě možnosti s sebou přináší velké finanční ztráty.

Jak bylo zmíněno výše, dosažení hmotového toku v zásobníku závisí především na vlastnostech sypkého materiálu a konstrukci sila. Nejčastějším nedostatkem stávajících sil je nevhodný úhel stěny nad výpustí nebo malý rozměr výpustního otvoru. V takových případech vzniká jádrový tok a s ním velké množství poruch toku.

Aby byl zajištěn hmotový tok nebo bylo minimalizováno množství poruch u jádrového toku, využíváme dvou základních metod. [13]

- **Aktivní prvky** – pulzní trysky, vzduchová děla, vibrační prvky atd.
- **Pasivní prvky a prevence vzniku poruchy toku** – vhodná konstrukce, vestavby, obložení stěn

Aktivní prvky rozdělujeme na pneumatické, vibrační a mechanické. Aktivní prvky dodávají do zásobníku energii například formou vibrací, rázových vln nebo stlačeného vzduchu za účelem rozrušení vznikajících nebo již vzniklých poruch toku. Vhodnou volbou aktivních a pasivních prvků pro daný typ partikulární hmoty a zásobníku lze dosáhnout bezporuchového toku. [13]

6.1. Aktivní prvky

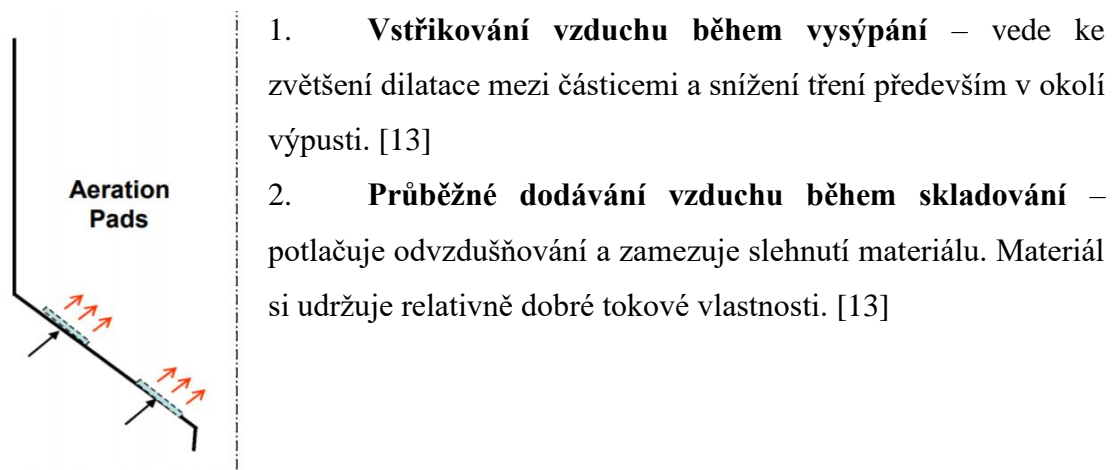
Aktivní prvky využívají několika základních principů nebo jejich kombinací pro dosažení bezproblémového toku. Patří sem snaha vyvolat v materiálu napětí, které převyšuje mez pevnosti sypkého materiálu nebo snížit tření mezi částicemi nebo zvýšit separaci mezi částicemi. [13]

6.1.1. Provzdušňovací nebo fluidizační podložky

Tyto podložky pracují na principu dilatace sypkého materiálu pomocí vzduchu. Vzduch je vstříkván do intersticiálního prostoru mezi částicemi partikulární hmoty a zvyšuje tak

vzdálenost jednotlivých částic. Provzdušněný neboli fluidizovaný sypký materiál má tendence se chovat jako kapalina. Při využití těchto podložek je důležité kontrolovat množství dodaného vzduchu. Příliš velké množství vzduchu v intersticiálních prostorech vede k úplné fluidizaci sypké hmoty a k nekontrolovatelnému tečení. Tato metoda je vhodná pro skladované materiály s částicemi o velikosti menší než 75 mikronů (mikrometrů). Nevýhodou je segregace jemných a hrubých částic při průchodu vzduchu a také velká spotřeba stlačeného vzduchu. U dodávaného vzduchu jsou kladeny velké nároky na jeho čistotu a suchost, aby nedošlo k znehodnocení sypkého materiálu. [13]

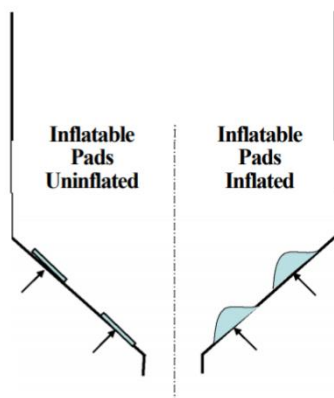
Existují dva přístupy pro dodávání vzduchu pomocí podložek. Oba dva je možné namontovat na již existující zásobníky s přetrvávajícími poruchami toku.



Obr. 6 - 1 Provzdušňovací podložky [13]

6.1.2. Vzduchové polštáře

Vzduchové polštáře jsou pružné měchýře, které se montují na šikmou část zásobníku. Vzduchové polštáře jsou vhodné i pro již existující zásobníky. Prudkým dodáním tlakového vzduchu dojde k nafouknutí polštáře, vzniku rázu a stlačení materiálu směrem do středu. Vzduchové polštáře jsou vhodné pro rozrušení křehkých kleneb. Tento mechanismus je vhodné používat pouze při otevřené výpusti zásobníku, protože stlačení materiálu ve středu může vést ke zhoršení tokových vlastností. Zároveň je nutné kontrolovat a měnit polštáře, z důvodu opotřebování odíráním. [13]

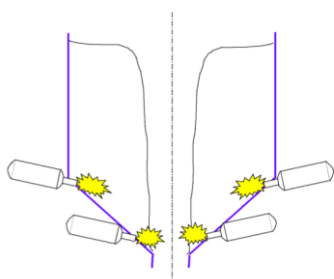


Obr. 6 - 2 Nafouklé a vyfouklé vzduchové polštáře [13]

6.1.3. Vzduchová děla

Vzduchová děla využívají principu navýšení napětí nad mez pevnosti. Obsah nádržky se stlačeným vzduchem (až 10 barů) je v řádu sekund vyprázdněn. Náhlý přísun tlakového vzduchu zapříčiní vznik rázu, který se šíří partikulární hmotou uloženou v zásobníku a vede k rozrušení kleneb a mrtvých zón. Tyto děla mohou být nasměrována do materiálu nebo podél stěny. Při výstřelu podél stěny dojde k odříznutí materiálu od stěny. [13]

Vzduchová děla se využívají především při skladování lepkavých, vlhkých a adhezivních materiálů. Tato zařízení není vhodné používat pravidelně, protože s každým výstřelem vzniká velká reakční síla, která se přenáší na zásobník a může vést k jeho poškození. Měli by se používat jen při restartování toku, k rozrušení vzniklé klenby nebo ke konečnému vyčištění zásobníku. [13]

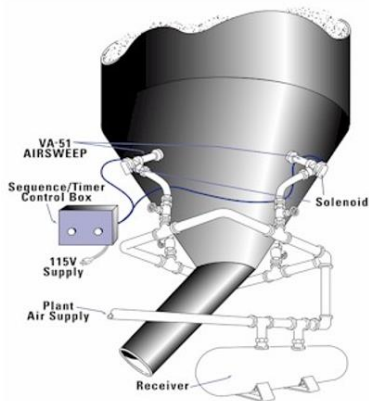


Obr. 6 – 3 Vzduchová děla [13]

6.1.4. Pulzní trysky

Systém odstraňování poruch toku pomocí pulzního dávkování vzduchu. Tento systém slučuje sílu přetlakové dávky vzduchu se systémem kontrolovaného dávkování. To vede k eliminování možného vzniku netekoucího materiálu u stěn a tím v celém zásobníku. Jedná se

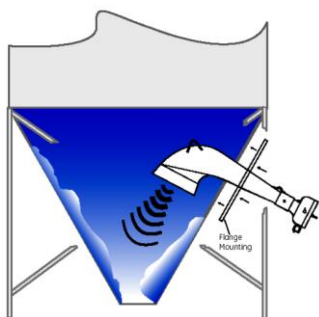
o systém, který vykazuje jedny z nejlepších výsledků při zajišťování bezporuchového toku. Trysky jsou rozmístěny v experimentálně zjištěných místech a působí vždy pouze ve svém okolí. To vede k aktivaci materiálu vždy pouze v okolí trysky a chování zbylého materiálu není ovlivněno. Řídicí systém zajišťuje dávkování vzduchu podle navolených programů, které se dají upravovat. Výhodou tohoto systému je výrazně menší spotřeba tlakového vzduchu než u výše zmíněných technologií. [14]



Obr. 6 – 4 Schéma pulzních trysek „airsweep“ [14]

6.1.5. Akustické čištění – akustický měnič

Systém akustického čištění využívá silných zvukových vln, které se šíří materiálem formou vibrací. Vibrace způsobí vzájemný posuv částic a uvolnění materiálu. Zdrojem vln je akustický měnič. U akustického měniče lze nastavit hladinu akustického tlaku a frekvenci na základě skladovaného materiálu. Měníče se vyrábí ve velikostech od 430 mm až 3 metry. U největších je hladina akustického tlaku až 200 dB. Tento způsob čištění je vhodný pro partikulární hmoty s částicemi o velikosti 20 mikrometrů až 20 milimetrů. [14]



Obr. 6 – 5 Schéma akustického čištění [14]

6.1.6. Vibrační vypouštěcí pomůcky

Mechanické vibrace se k čištění zásobníku používají velmi dlouho. Studie vlivu vibrací poukazují na smíšený vliv na stav partikulární hmoty. To znamená, že v některých místech dochází k uvolnění materiálu a v jiných k jeho zhutňování. Tyto pomůcky mohou být montovány vně i uvnitř zásobníku. V dnešní době je na trhu velké množství vibračních pomůcek. Lze je rozdělit podle zdroje energie (stlačený vzduch a elektřina) nebo na základě typu generovaného pohybu (lineární a rotační). Lineární vibrátory vytvářejí vibrace, které jsou kolmé na stěnu násypky. Rotační vibrátory produkují vibrace jak kolmé, tak rovnoběžné se stěnou násypky. Vzhledem k množství vibračních pomůcek budou v této práci uvedené pouze ty nejpoužívanější. [13]

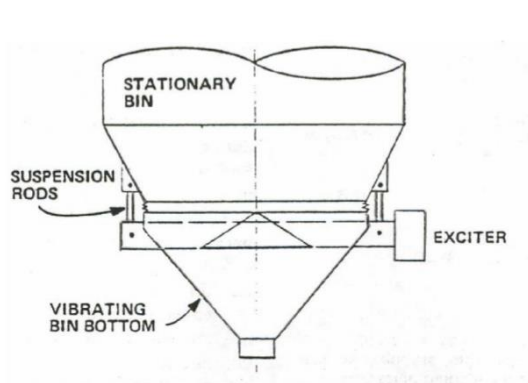
Nejběžnějším způsobem je obouchávání pomocí kovových tyčí a palic. Vlivem této metody vznikají nebezpečné deformace na stěnách zásobníku. Tato metoda je velice zastaralá a není příliš účinná, proto většina uživatelů zásobníku přistupuje k instalaci účinnějších systémů pro odstranění poruch toku.



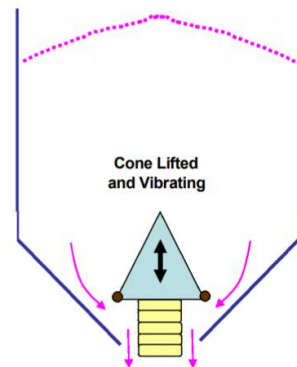
Obr. 6 – 6 Znamky obouchání sila [14]

Prvním běžně používaným mechanismem jsou **vibrační aktivátory koše**. Tento mechanismus se skládá z obráceného kužele nebo přepážky umístěné uvnitř zásobníku a vibračního koše neboli dna zásobníku. Mezi stěnou zásobníku a kuželem je prostor pro propadávání materiálu. Dno zásobníku osciluje v horizontální eliptické rovině s frekvencí 10 – 50 Hz. Kombinace vibrujícího dna a kuželu zapříčiní nepřerušovaný tok. Tyto koše jsou často využívány v chemickém průmyslu a zemědělství. Nevýhodou je možnost zhutnění materiálu při vibracích s uzavřenou výpustí, zmenšení výpustního otvoru obráceným kuželem a nutnost odizolovat zbylé části zásobníku od vibrací. [13]

Z vibračních košů se postupně vyvinul **vibrační kuželový vypouštěcí ventil**. Tento kužel funguje zároveň jako vypouštěcí uzávěr a jako vibrační pomůcka pro aktivaci toku. Vysunutím kužele směrem do zásobníku a jeho současným vibrováním je umožněno skladovanému materiálu vytékat výpustným otvorem. Nevýhodou je neuspokojivé těsnění kužele v zásobnících s velmi jemným materiálem.

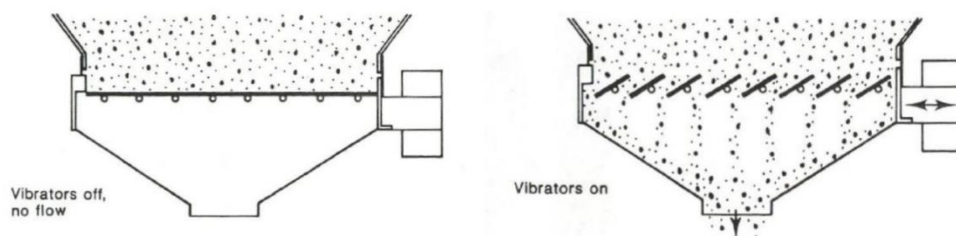


Obr. 6 – 7 Schéma vibračního koše



Obr. 6 – 8 Schéma vibračního kuželu

Další pomůckou jsou **pevné a pohyblivé vibrační lopatky**. Tato pomůcka funguje na principu vibrujících lopatek („žaluzií“). Vibrace zapříčiňují tok materiálu v okolí lopatek, ale nemají vliv na zbytek uloženého materiálu. Změnou frekvence je možné regulovat průtok okolo lopatek. Schéma tohoto mechanismu je na obrázku (obr. 6 – 9). Počet lopatek a sklon jsou zjišťovány experimentálně. Nepohyblivé lopatky nemohou být použity jako uzávěr výpusti, protože může dojít k propadávání materiálu skrz lopatky i po zastavení vibrací. Naopak pohyblivé lopatky je možné použít jako uzávěr výpusti a zároveň jako podporu spolehlivého toku a regulaci průtoku sypkého materiálu. [13]



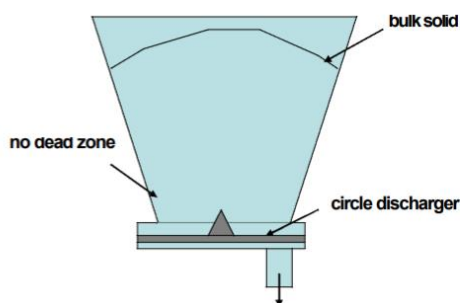
Obr. 6 – 9 Schéma pohyblivých lopatek v zásobníku (vlevo – uzavřená výpust' a žádné vibrace, vpravo – vibrující lopatky a tekoucí materiál [13])

6.1.7. Mechanické vypouštěcí pomůcky

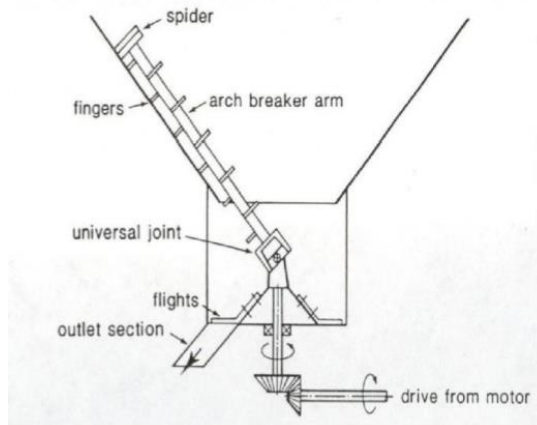
V dnešní době existuje velké množství mechanismů, které pracují jako mechanické pomůcky pro kvalitní tok materiálu. Lze je rozdělit do dvou skupin.

První skupinou jsou mechanismy, které stabilně dopravují materiál k výpusti. Jedná se o různé **šnekové podavače** zabudované a různě rozmístěné v silu nebo **diskové podavače s rotujícími kužely** (obr. 6 – 10). Výhodou této skupiny je, že funguje jako podavač materiálu a zároveň rozbíjí vznikající klenby a mrtvé zóny. Vzhledem k vyšší složitosti konstrukce a spotřebě energie se používají jen u velmi obtížně tekoucích materiálů jako je například mastek. [13]

Druhá skupina se zaměřuje pouze na rozrušování poruch toku a samotný tok je způsoben tíhovou silou jako u ostatních pomůcek. Jedná se například o vypouštěcí pomůcky s **výsypným rotačním ramenem** (obr. 6 – 11). Rameno opisuje tvar výsypky a odstraňuje materiál od stěny. Existují i další mechanismy, které mechanicky svým pohybem rozrušují materiál, ale nejsou příliš praktické a využívají se jen pro velmi špatně tekoucí materiály. [13]



Obr. 6 – 10 Diskový podavač [13]



Obr. 6 – 11 Rotační rameno [13]

6.1.8. Lokální ohřev

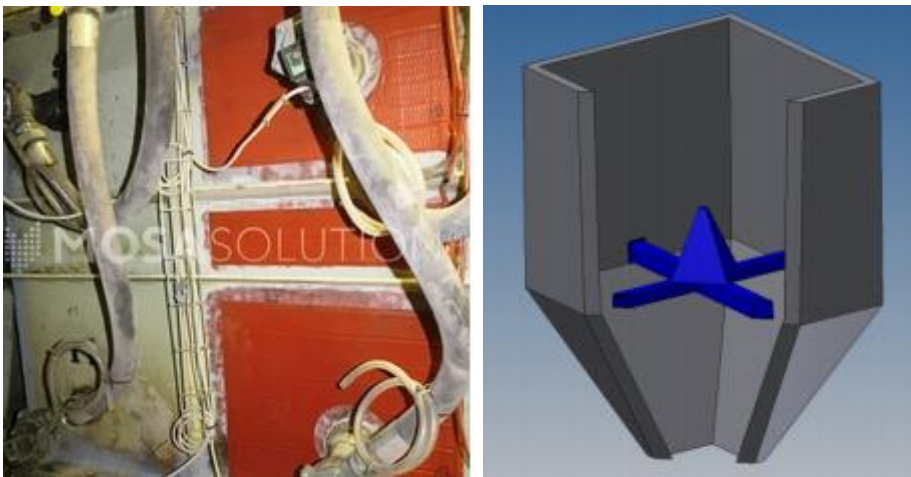
Metoda lokálního ohřevu využívá topných rohoží, které jsou připevněny na venkovní stěny ocelových zásobníků. Stěny se ohřívají na požadovanou teplotu (120°C) a předávají teplo materiálu uvnitř zásobníku. V sypké hmotě dochází k tepelnému narušení vnitřních vazeb mezi jednotlivými částicemi a tím k uvedení hmoty do pohybu. Je zřejmé, že tato metoda zcela nespadá pod ani jednu z výše zmíněných skupin aktivních prvků. Lokální ohřev je možné využívat samostatně nebo v kombinaci s dalším prvkem pro odstranění poruch toku (např.

pulzní trysky). V případě lokálního ohřevu, ale i dalších metod je vhodné nejprve provést analýzu skladované směsi s ohledem na ložiska zahoření a předejít tak možnému výbuchu. [14]

6.2. Pasivní prvky

Za nejzákladnější pasivní prvek ochrany proti poruchám toku se dá považovat již mnohokrát zmiňovaná vhodná konstrukce sila. To znamená vhodná volba sklonu výpusti a případné obložení stěn zásobníku materiálem s nižším koeficientem tření. Pro již existující zásobníky lze aplikovat obklady nebo ocelové konstrukce, které upravují sklon výpusti a třecí vlastnosti stěn zásobníku.

Typickým pasivním prvkem jsou však **vestavby do zásobníků**. Jedná se o vestavby například z oceli, které jsou na vlastní konstrukci a nezatěžují tak konstrukci již existujícího zásobníku. Tvar a velikost záleží na výrobci. Nejběžněji se vyskytuje čtyřboký jehlan nebo komolý kužel. Tyto prvky zabraňují (bez využití další energie) u lehce nebo středně těžce tekoucích materiálů tvorbě poruch toku a zároveň umožňují zmenšení sklonu stěny a tím zmenšení celkové výšky zásobníku. Toto řešení je nejčastěji používané, u již existujících zásobníků a vykazuje velmi dobré výsledky při skladování uhlí, koksu, cementu a strusky. [13]



Obr. 6 – 12 Topné rohože v kombinaci s pulzními tryskami [13]

Obr. 6 – 13 Schéma pasivního prvku v zásobníku [14]

6.3. Tabulka srovnání jednotlivých metod

Typ technologie	Vhodné pro	Nevhodné pro
Pneumatický	Kohezní a fluidizovatelné prášky	Sléhavé, velmi vlhké materiály s velkými zrny a sklonem k nekontrolovanému toku
Vibrační	Kohezní, lepkavé prášky a křehké klenby	Sléhavé materiály při vibracích
Mechanický	Těžko dopravovatelné materiály, velmi vlhké, materiály se sklonem k nekontrolovanému tečení	Velká síla s velkým průtokem, jemné a drsné materiály
Pasivní	Neobvyklé materiály pro běžná síla a místa bez přísunu elektřiny a tlakového vzduchu	Lepkavé a sléhavé materiály s velkým potenciálem pro tvorbu poruch toku [13]

7. Návrh zařízení pro odstranění klenby a úlepů pro zadaný sypký materiál

Jedním z cílů bakalářské práce je návrh souboru technologických zařízení pro odstraňování klenby a úlepů pro zadané palivo. Tato část bakalářské práce se zaměřuje na volbu vhodného řešení pro daný materiál bez závislosti na zásobníku, ve kterém je skladovaný. V dnešní době lze k řešení přistoupit dvěma způsoby. První řešení se zaměřuje pouze na odstranění klenby a úlepů. Druhý způsob je zajištění hmotového toku materiálu. Toto řešení je poněkud komplexnější, protože hmotový tok není v takové míře náchylný na tvorbu poruch toku a zároveň nedochází ke stárnutí materiálu a vzniku mrtvých zón.

Při tvorbě samotného návrhu je například možné postupovat pomocí klíče v příručce firmy Mosa solution s.r.o. nebo dalších firem pracujících ve stejné oblasti. Aby bylo možné uskutečnit druhý zmíněný způsob řešení je nutné získat dostatečné množství informací o dopravované hmotě a všech zařízeních, které se v procesu využívají. V případě, že tak není uskutečněno, nelze zcela jistě nalézt správné technické řešení. V takovém případě je každé řešení zkouška metodou pokus – omyl. To vede ke zbytečným finančním nákladům na technologie, u kterých není zajištěna garance optimálního výsledku tedy bezporuchového toku partikulární hmoty. Po provedení analýzy partikulární hmoty je možné určit vhodné a nevhodné technologie pro řešení toku, ale bez znalosti zásobníku a jeho vlastností není možné zcela garantovat plynulý a bezporuchový tok. [14]

7.1. Analýza sypké hmoty

Analýza sypké hmoty obsahuje nezákladnější veličiny jako sypnou hmotnost, zrnitost, sypný úhel, vlhkost a úhel vnitřního a vnějšího tření. Tato zkouška se běžně provádí v laboratořích sypkých hmot. Význam a způsoby určení základních vlastností jsou zmíněny výše.

Pro tuto práci je za sypkou hmotu určeno **sokolovské hnědé uhlí** (průmyslová směs 620-51E). Zadané vlastnosti:

- Teplota uhlí do cca 30°C
- Sypný úhel 45 – 60°
- Sypná váha 0,72 – 0,8 t/m³
- Vlhkost uhlí 15 – 38%

Je zřejmé, že v ideálním případě chybí pro návrh informace o zrnitosti, a především o úhlu vnitřního tření. Jak již bylo zmíněno, úhel vnitřního tření se mění v závislosti na zhutnění a vlhkosti materiálu. Z tohoto důvodu by bylo nutné experimentálně zjistit závislost vnitřního úhlu tření na vlhkosti materiálu.

Pro tuto práci bylo využito informací od firmy Mosa solution s.r.o.. Na základě těchto informací lze sokolovské hnědé uhlí považovat za téměř tekoucí materiál se zrnitostí 0 – 40 mm. Při návrhu je nutné brát ohled na extrémní abrazivitu materiálu. [14]

7.2. Volba vhodné technologie

Při zvážení veškerých vlastností zadaného uhlí a s přihlédnutím k tabulce v kapitole č. 6.3. bylo při výběru vhodné technologie uvažováno o pneumatických a vibračních zařízeních nebo pasivních prvcích. Vzhledem k předpokladu, že poruchy toku je nutné řešit především na již existujících zásobnících, je potřeba využít technologie, které lze jednoduše namontovat na stávající zásobník. Instalace vibračních pomůcek jako vibrační kužel vyžaduje větší zásah do konstrukce zásobníku. To s sebou nese velké finanční investice. Vzhledem k jednoduchosti, velké efektivitě a ekonomičnosti provozu byla vybrána jako nejvhodnější technologie pulzních trysek.

7.3. Technologie pulzních trysek

Jak již bylo zmíněno, pulzní trysky využívají tlakovou energii, která v krátkých pulzech proniká do partikulární hmoty podél stěn zásobníku. Výsledkem působení trysek je odstranění poruch toku a v ideálním případě zajištění toku hmotového.

Systém pulzních trysek je velice jednoduchý a lze jej montovat na již existující ocelové či železobetonové zásobníky, a to jak zevnitř, tak v některých případech i zvenku. Samotná technologie obsahuje:

- Pulzní vzduchové trysky
- Systém rozvodu přetlakového vzduchu
- Řídící jednotku

Pulzní vzduchové trysky jsou montovány na daný zásobník v takovém počtu a s takovým rozmístěním, aby došlo k eliminaci poruch toku a v dnešní době i k dosažení hmotového toku, pokud je to možné. Toto rozmístění vyplývá z experimentů, z matematicky určené pozice statické a dynamické klenby a ze zkušeností firmy, která trysky instaluje.

Samotná pulzní tryska je jednoduché zařízení (viz Obr. 7 – 1) obsahující přívod tlakového vzduchu a tlakový uzávěr. V okamžiku pulzu se uzávěr na dobu 250 ms pootevře přibližně o 2,5 mm. Vzhledem k vysoké abrazivitě hnědého uhlí, by bylo vhodné provádět montáž zevnitř a současně instalovat keramická pouzdra, která chrání trysky a stěnu zásobníku v okolí trysky před mechanickým obroušením. [14]

Systém rozvodu přetlakového vzduchu se skládá z rozvodového potrubí, vzdušníku a kompresoru. Pro rozvod tlakového vzduchu a jeho dostatečnou zásobu je využíváno rozšířeného potrubí DN100. Toto potrubí musí být vyspádováno pro odvod kondenzátu, který zde může vznikat. V rozšířeném potrubí je v nejnižším bodě umístěna odbočka s kulovým ventilem. Tento kulový ventil slouží k odčerpání zmiňovaného kondenzátu. Z tohoto potrubí jsou v blízkosti pulzní trysky vyvedeny odbočky, aby mohly být napojeny jednotlivé pulzní ventily. Odbočky se vyvádí vždy v horní části rozšířeného potrubí, aby bylo zabráněno vstupu nečistot do pulzní trysky. Průřez těchto trubek je volen na základě použitých pulzních trysek. Pro pulzní trysky VPV - 60 se využívá potrubí DN40 a pro trysky VPV – 40 se využívá potrubí DN25. V každé odbočce je instalován kulový ventil před pulzní tryskou, aby mohlo dojít k odstávce jednotlivých trysek v případě poruchy. Potrubní rozvody lze vidět na obr. 7 – 2. Každá tryska má vlastní přívodní potrubí, které se odděluje z hlavního potrubí. Celý potrubní systém je napojen na vzdušník. Potřebný přetlak pro kontinuální fungování trysek je 0,5 – 0,8 MPa. [14]

Řídící jednotka je systém, který obsahuje algoritmus fungování pulzních trysek. To znamená, v jakém intervalu dochází k pulzům. Tento interval lze měnit v závislosti na aktuální situaci v zásobníku. Spotřeba přetlakového vzduchu však nesmí přesáhnout množství vyrobeného přetlakového vzduchu v kompresoru. Pokud by se tak stalo a došlo k poklesu tlaku v systému pod 0,4 MPa, řídicí jednotka musí zastavit činnost pulzních trysek, protože by mohlo dojít k vniknutí skladovaného materiálu do pulzního ventilu. Je možné instalovat samostatnou automatickou řídicí jednotku nebo stávající řídicí systém doplnit o řízení pulzních trysek. [14]



Obr. 7 – 1 Pulzní tryska [14]



Obr. 7 – 2 Rozvody tlakového vzduchu [14]

8. Návrh řešení poruch toku pro zadaný zásobník

Posledním cílem této bakalářské práce je návrh a vzájemné porovnání dvou variant pro řešení toku zmiňovaného sokolovského hnědého uhlí (průmyslová směs 620-51E) v konkrétním zásobníku. Porovnání je provedeno po stránce technické a ekonomické. Při výběru zásobníku byl brán ohled především na co největší shodu skladovaného materiálu se zadáním bakalářské práce. Vybraný zásobník se nachází v teplárně (Plzeňská energetika a.s.) v Plzni. V této teplárně a zároveň elektrárně jsou instalovány jak železobetonové, tak ocelové zásobníky na uhlí. Konkrétně se jedná o 4 železobetonové zásobníky, každý s kapacitou 170 tun hnědého uhlí, které zásobují kotel K1 a 4 sdružené ocelové zásobníky, každý s kapacitou přibližně 300 tun, které zásobují kotel K3 a K4. Pro účely této práce byly zvoleny ocelové zásobníky kotle K3. V rámci této kapitoly bude také poukázáno na hlavní rozdíly železobetonových a ocelových zásobníků při tvorbě a odstraňování poruch toku.

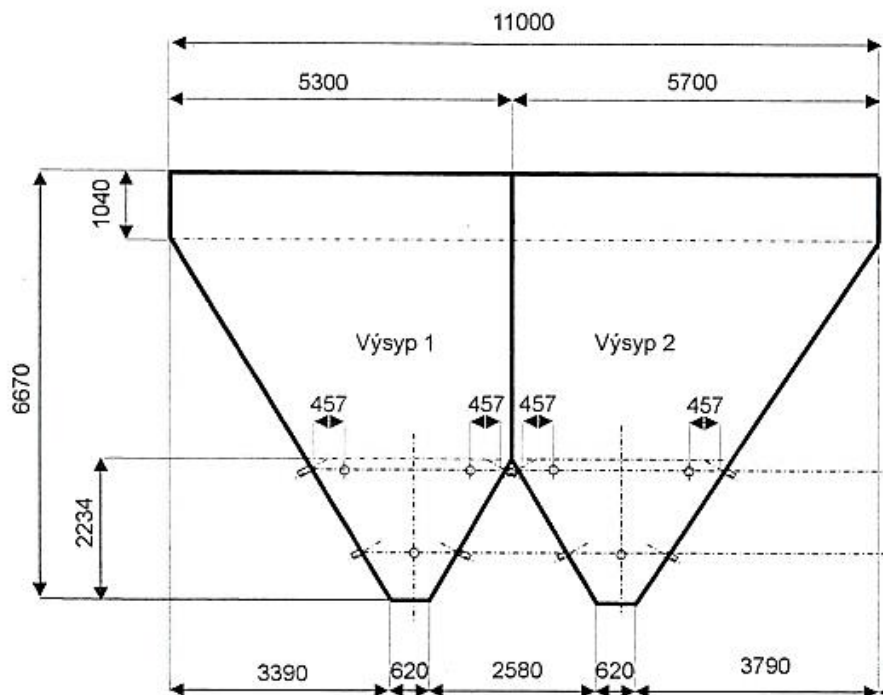
8.1. Konstrukce zásobníku

Pro zásobování kotle K3 hnědým sokolovským uhlím jsou využívány 2 ocelové zásobníky. Tyto zásobníky jsou sdruženy do dvojic viz obr. 8 – 1, ale každý má odlišnou šířku a tím i sklon boční stěny. Úhel sklonu boční stěny zásobníku od osy kolmé na plochu výpusti a procházející jejím středem je okolo 30° v závislosti na přesných rozměrech zásobníku. Každý zásobník má svůj výsypný otvor o rozměrech 0,62 x 4,45 metru. Uzávěr výsypného otvoru je tvořen šoupátkovým mechanismem, který je tvořen čtyřmi deskami. Na základě potřeby lze pomocí počtu otevřených desek korigovat množství odcházejícího uhlí ze zásobníku a mírně také ovlivnit tvorbu poruch toku. Pod zásobníkem se nachází dopravník vedoucí k mlýnu a následně ke kotli K3. Výkon mlýnu a zároveň vyprazdňování zásobníku je také možné regulovat pohyblivou deskou dopravníku pod výpustným otvorem. Při zvýšení desky dochází ke zmenšení prostoru mezi dopravníkem a zásobníkem a tím ke snížení výkonu mlýnu. Zásobníky stojí na ocelových podpěrách a mají ocelová žebra, aby bylo docíleno větší pevnosti. [14,16]

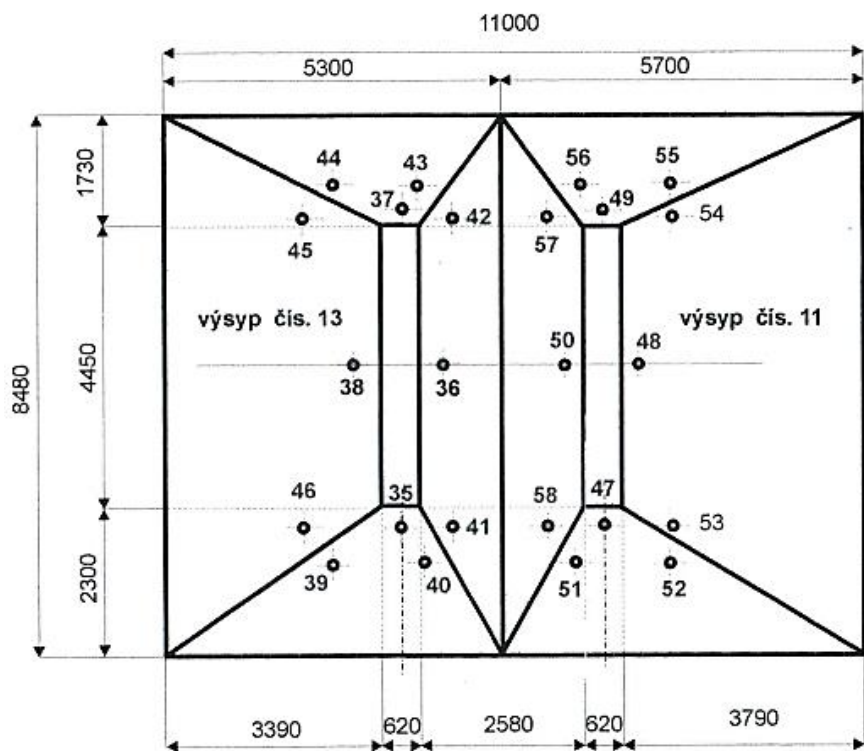
8.1.1. Aktuální stav zásobníku

Jak již bylo zmíněno, v dřívější době a ani dnes není při návrhu a stavbě zásobníku brán velký ohled na tvorbu poruch toku. U zásobníků kotle K3 přetrvávaly poruchy toku, a to konkrétně úlepy na stěnách zásobníku a klenbování nad výpustí. Proto zde byly nejprve instalovány nerezové plechy AISI 304 za účelem snížení úhlu vnitřního tření a tím omezení

tvorby zmíněných poruch toku. Pokud by byla provedena zkouška v laboratoři, bylo by prokázáno, že tento plech má menší úhel vnitřního tření než původní ocelový plech třídy 11. Na základě následné instalace pulzních trysek, lze předpokládat, že řešení nerezovými plechy nebylo dostačující. V roce 2000 došlo k instalaci pulzních trysek Myrlen typu VA – 51. Tyto trysky byly instalovány bez řádné analýzy zásobníku a skladované hmoty do míst v okolí výpusti, kde byla předpokládána tvorba statické a dynamické klenby. Na základě informací samotné teplárny je aktuální systém pulzních trysek v podstatě vyhovující. Za běžného provozu k poruchám téměř nedochází. Ty se vyskytují jen v případě příliš velké vlhkosti uhlí (při špatné dodávce nebo vydatných deštích, kdy uhlí zmokne na venkovní skládce) nebo v případě odstávky kotle. V takovém případě dojde ke slehnutí a zhutnění skladovaného uhlí. Při následném obnovení provozu se zvyšuje pravděpodobnost vzniku úlepů a klenby. Pokud v takovém případě nejsou pulzní trysky pro obnovení toku dostačující je nutné problém řešit mechanickým způsobem. Nejprve zaměstnanci využijí bodců na hliníkových tyčích (hliník je zvolen, protože se jedná o lehký materiál). V případě, že ani toto nepomůže je do zásobníku spuštěna hadice s tlakovým vzduchem do míst, kde je potřeba odstranit poruchu. Hadice je zatížena závažím, aby bylo zabráněno jejímu nepředvídatelnému chování. Podle výpovědí zatím nenastala situace, kdy by některé z těchto řešení nezabralo, aby bylo nutné řešit problém jiným způsobem. Pulzní trysky tedy téměř vyřešily klenbování a tvorbu úlepů v okolí výpusti. V dnešní době by bylo možné uvažovat o dosažení zmiňovaného hmotového toku, který je ve většině případů výhodnější. Takovému řešení by musela předcházet detailní analýza zásobníku a skladované hmoty, aby bylo možno s určitostí říci, jestli aktuální konstrukce umožňuje hmotový tok a za jakých podmínek. [14,16]



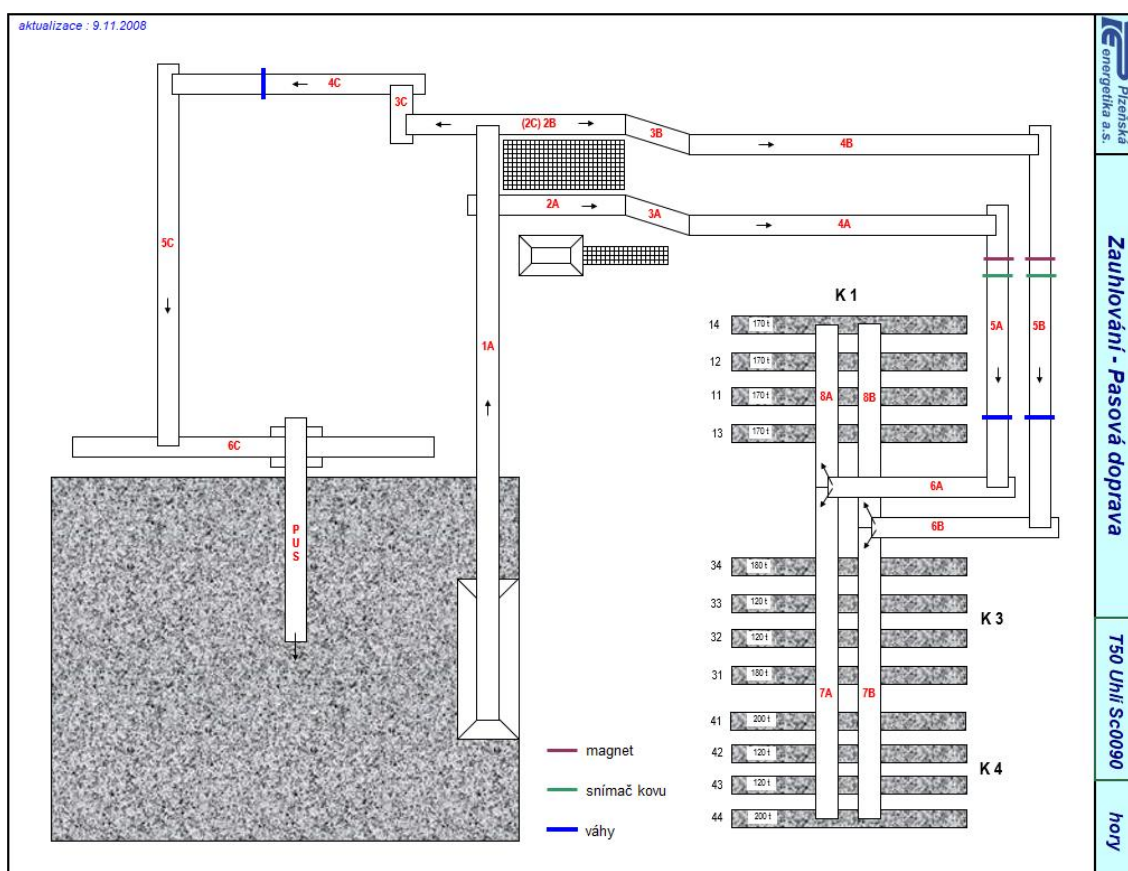
Obr. 8 – 1 Schéma přední stěny sdužených zásobníků včetně umístění trysek Myrlen VA - 51 [14]



Obr.8 – 2 Schéma půdorysu sdužených zásobníků včetně umístění trysek Myrlen VA - 51 [14]



Obr. 8 – 3 Zásobník kotle K3 s instalovanými tryskami Myrlen VA - 51 [14]



Obr. 8 – 4 Schéma pásové dopravy uhlí do zásobníků [16]

8.2. Návrh řešení – varianta A

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, vhodnou volbou pro hnědé uhlí s vysokou vlhkostí a zároveň pro zvolený zásobník je řešení toku pomocí pulzních trysek. Tato technologie je již na zásobníku instalovaná, ale pouze omezeně ve dvou vrstvách v oblasti výpusti. Zároveň lze předpokládat, že radikální přestavba, tedy změna konstrukce zásobníku (např. zvětšení výpustného otvoru, změna sklonu stěny) není vzhledem k umístění a navazujícím technologiím možná. Cílem této varianty je doplnění stávající technologie tak, aby byly, pokud je to možné, splněny požadavky dnešní doby na hmotový tok nebo alespoň na zcela bezporuchový tok i v případě zhoršené kvality uhlí.

Prvním krokem k úspěšnému řešení je detailní analýza sokolovského hnědého uhlí v laboratoři sypkých hmot a zároveň analýza zásobníku. Analýza zásobníku se zaměřuje na úhel vnějšího tření stěny, sklon stěny, místa vzniku statické a dynamické klenby a případné další potřebné informace. Následným odborným vyhodnocením získaných informací je možné rozhodnout o umístění a počtu použitých pulzních trysek. Lze předpokládat, že na základě získaných informací by bylo nutné doplnit stávající pulzní trysky o další, které by byly umístěny na základě znalostí a experimentů firmy, která by instalaci prováděla.

Bylo by vhodné montáž pulzních trysek provádět zevnitř zásobníku, aby bylo možné instalovat keramická pouzdra, která chrání pulzní trysky a jejich okolí proti působení abrazivních materiálů, kterým je i zmíněné hnědé uhlí. Zároveň by byly stávající pulzní trysky zkontrolovány případně vyměněny za nové a opatřeny ochranným pouzdrům.

Pokud by ani následující řešení nebylo zcela vyhovující, je možné doplnit systém pulzních trysek o topné rohože, ale to jen v případě, že by byla vyloučena možnost vzniku ložiska zahoření. V takovém případě by do skladovaného materiálu nebyla dodávána energie pouze formou pulzů stlačeného vzduchu, ale také formou tepla, které způsobuje tepelné narušení vnitřních vazeb mezi částicemi materiálu. Lokální ohřev by tedy přispěl k účinnosti pulzních trysek a zároveň mírně předehrál a vysušil hnědé uhlí na cestě ke kotli K3.

Technologie pulzních trysek a rozbor jednotlivých prvků této technologie je proveden v kapitole 7.2. Technologie lokálního ohřevu je také velmi jednoduchá a je zde potřeba pouze topných rohoží, řídicího systému a možnosti zavedení elektrických rozvodů, protože topné rohože fungují na principu odporového ohřevu.

Schématický návrh doplnění pulzních trysek se nachází v příloze č. 1. Jedná se pouze o hrubý návrh, protože jak bylo zmíněno, bylo by nutné provést určité simulace a experimenty pro nalezení nejvhodnějšího rozmístění pulzních trysek.

8.3. Návrh řešení – varianta B

I přes již existující systém pulzních trysek na daném zásobníku je možné uvažovat o změně technologie pro odstranění poruch toku. Dalším možným řešením, které nevyžaduje přílišný zásah do konstrukce zásobníku, je využití akustické energie. V takovém případě by stávající technologie mohla být ponechána pro případ potřeby nebo by byla demontována a otvory zavařeny. Lze uvažovat o ponechání stávajících rozvodů tlakového vzduchu a jejich využití pro variantu akustického řešení.

Stejně jako pro variantu A i zde platí, že pro dosažení požadovaných výsledků je vhodné nejprve znát analýzu sokolovského hnědého uhlí a technické informace o zásobníku kotle K3. U této technologie je důležité nechat vypracovat frekvenční analýzu pro zvolený zásobník a skladovanou hmotu. V případě neznalosti frekvenční analýzy hrozí, že se frekvence zvuku z měniče přiblíží vlastní frekvenci kmitání zásobníku a vznikne rezonance. Rezonance může mít až destruktivní následky na konstrukci zásobníku.

Po provedení frekvenční analýzy je možné vyrobit akustický zvukovod („horn“) jehož frekvenci bude možné nastavit na frekvenci dané části, kterou je nutné uvést do pohybu. Frekvenci akustického horku je možné měnit v určitém rozmezí pro případ změny vlastností skladované hmoty. Samotný zvukovod není technicky složité zařízení. Skládá se z přívodu vzduchu, titanové membrány a zvukovodu. Průchod tlakového vzduchu rozkmitá titanovou membránu a pomocí zvukovodu dojde k šíření akustického tlaku s požadovanou frekvencí. Ve skladované látce dojde k rozkmitání jednotlivých částic, jejich vzájemnému posuvu a tím v ideálním případě k rozbití vzniklých nebo vznikajících poruch toku.

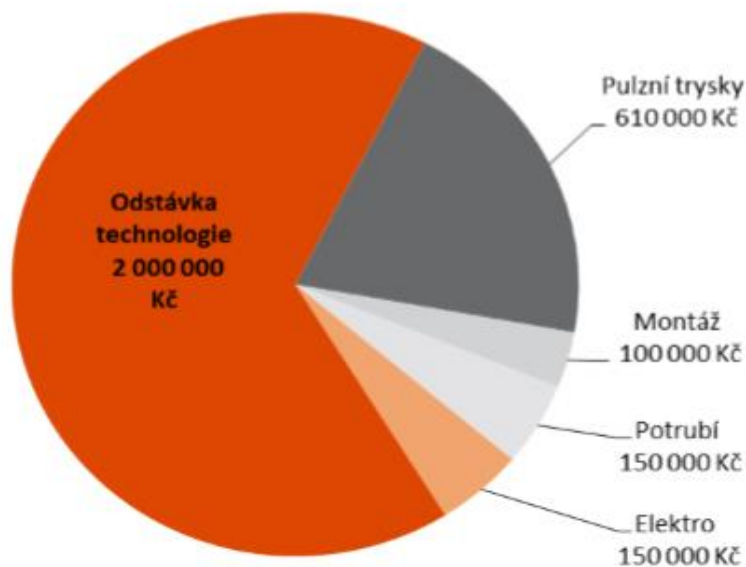
Instalace akustických měničů je z hlediska náročnosti podobná instalaci pulzních trysek. Je zde potřeba zavedení tlakového vzduchu k akustickému měniči a nainstalování řídicího systému. Řídicí systém může být samostatná jednotka nebo může být integrován v centrálním řídicím systému. Řídicí systém zajišťuje určenou časovou prodlevu mezi aktivováním zvukového měniče.

8.4. Srovnání navržených variant

Vzhledem k faktu, že navržená řešení nebyla instalována na zadaný zásobník, není zcela možné porovnávat celkovou účinnost jednotlivých návrhů, proto je toto porovnání spíše teoretické. Srovnání navržených variant je provedeno po stránce technické a ekonomické.

Z technického hlediska jsou obě varianty velmi podobné a vynikají svojí jednoduchostí. Jak již bylo zmíněno, obě varianty pracují se stlačeným vzduchem a k jejich provozu je tedy nutný dostatečný přísun tlakového vzduchu. Výhodou je možnost relativně jednoduché montáže na již existující zásobníky. O jednoduché montáži lze hovořit, protože si nevyžaduje ani u jedné z variant velký zásah do konstrukce sila nebo složité stavební práce. Nevýhodou akustického řešení oproti pulzním tryskám je vysoká hladina intenzity zvuku, která dosahuje v některých případech téměř 200 dB (práh bolesti pro lidské ucho odpovídá 130 dB). Takový hluk není žádoucí v zásobnících, které se nachází v okolí obydlených budov, jako je například zásobník kotle K3.

Z ekonomického hlediska je v první řadě důležité vědět, že jakékoli účinné řešení poruch toku je lepší než žádné. Tento závěr lze demonstrovat na obrázku (obr. 7 – 4) na základě informací firmy MOSA solution s.r.o., která se řešením poruch toku zabývá. Graf na obrázku (obr. 7 – 4) popisuje konkrétní příklad realizace pulzních trysek do elektroodlučovačů, kde jednodenní odstávka technologie stojí až 2 miliony korun, ale samotná realizace pulzních trysek vyšla na přibližně milion korun. Lze předpokládat, že v případě opakovaných poruch toku, které mohou zavinit odstávku celé následující technologie, se investice do technologie na jejich odstranění vyplatí i v jiných případech. [14]



Obr. 8 – 5 Graf nákladů na realizaci pulzních trysek a odstávky dané technologie z roku 2015 [14]

Samotná investice do varianty A se příliš neliší od investice do varianty B. Jak již bylo zmíněno, v obou případech je nutné přivést tlakový vzduch na určená místa a provést instalaci. Výhodou pulzních trysek je nižší spotřeba tlakového vzduchu při provozu.

8.5. Porovnání řešení pro ocelový a betonový zásobník

V teplárně jsou kromě ocelových zásobníků použité i zásobníky betonové pro zauhlování kotle K3. V této části práce budou uvedeny hlavní rozdíly mezi zmíněnými zásobníky, které je nutné uvažovat při řešení poruch toku.

Z obecného rozboru podstatných vlastností plyne první velice zásadní rozdíl, a to v úhlu vnějšího tření. Ze samotné struktury jednotlivých materiálů je zřejmé, že ocel má nižší úhel vnějšího tření. Z tohoto důvodu je vhodné u betonových zásobníků využívat plechových nebo keramických obkladů pro snížení tohoto úhlu. Další podstatnou vlastností je schopnost šířit rázy a případně tlumit vibrace. Ocel lépe šíří vibrace, které mohou přispívat k rozrušování poruch toku, ale zároveň musí být brán ohled na šíření rázů do ocelové konstrukce. Betonová konstrukce lépe absorbuje vibrace a vznikající rázy, avšak pro stejnou účinnost je tedy nutné použít větší množství pulzních trysek. Toto jsou základní rozdíly, dále by mohla být porovnávána například životnost nebo ekonomické náklady na zásobníky, ale tyto skutečnosti nemají souvislost s poruchami toku, a proto zde nebudou dále zkoumány.

9. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout řešení poruch toku, konkrétně tvorby klenby a úlepů pro zadaný zásobník a sokolovské hnědé uhlí.

Aby mohl být návrh proveden, bylo potřebné prozkoumat vlastnosti tuhých paliv, a to především těch fosilních, mezi které se řadí i sokolovské hnědé uhlí (průmyslová směs 620 – 51E). Pro dosažení cíle bylo také nutné pochopení základních principů velice rozsáhlého oboru mechaniky sypkých hmot. K dostatečnému pochopení používaných pojmů byla před kapitolu mechaniky sypkých hmot zařazena kapitola obsahující základní mechanické vlastnosti sypkých hmot. Následně byla velká pozornost věnována rešerši technologických zařízení sloužících pro odstraňování klenby a úlepů.

Po detailním prostudování výše uvedených kapitol bylo přistoupeno k samotnému řešení. Byly vypracovány dvě varianty řešení. Pro každou variantu byla zvolena jiná technologie z provedené rešerše s ohledem na vlastnosti zadaného zásobníku a typ skladovaného materiálu. Varianta A obsahuje řešení toku v zásobníku pomocí pulzních trysek, zatímco varianta B pomocí akustického měniče. Obě navržené varianty byly srovnány po stránce ekonomické a technické. Na základě srovnání nelze s určitostí říci, která varianta je lepší, protože technologie nebyla instalována a nelze se tedy opřít o konkrétní fakta. Lze však předpokládat, že při odborné instalaci obou variant by došlo k vyřešení zmíněného problému.

Zdroje:

- [1] MIŠKOVSKÝ, Miroslav. *Paliva, úprava paliv a spalování*. Praha, 1971.
- [2] Paliva. *Komenského66* [online]. [cit. 2019-11-12]. Dostupné z:
<http://www.komenskeho66.cz/materialy/chemie/WEB-CHEMIE9/paliva.html>
- [3] DOPITA, Miloslav, Václav HAVLENA a Jiří PEŠEK. *Ložiska fosilních paliv: celostátní vysokoškolská příručka pro studenty přírodovědeckých fakult skupiny oborů geologické vědy*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985
- [4] ŠKORPÍK, Jiří. *FOSILNÍ PALIVA, JEJICH VYUŽITÍ V ENERGETICE A EKOLOGICKÉ DOPADY: Uhlí* [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z:
<http://www.transformacni-technologie.cz/07.html#uvod>
- [5] JIRÁSEK, Jakub, Martin SIVEK a Petr LÁZNIČKA. *Ložiska energetických surovin: Ložiska nerostů* [online]. [cit. 2019-12-05]. Dostupné z:
http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/loziska_energeticky_surov.html
- [6] *Úvodem o koksu: Co je koks a jak vzniká?* [online]. [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <http://www.koksovny.cz/cz/uvodem-o-koksu>
- [7] SLÍVA, Aleš. *Základy zařízení úpraváren* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011 [cit. 2020-02-04]. ISBN 978-80-248-2732-2. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2732-2.pdf>
- [8] *Mass flow and funnel flow hoppers: Definition*, [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: https://powderprocess.net/mass_flow_silo.html
- [9] *Solve flow problems in hoppers and silos (Bad flow, no flow)* [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z:
https://powderprocess.net/Powder_Flow/Solve_Flow_Problems.html
- [10] *GRAVITY FLOW OF BULK SOLIDS*. Salt Lake City, Utah: Utah engineering experimental station, 1961, (108).
- [11] *Blockages in silos : arching and bridging* [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: https://powderprocess.net/Powder_Flow/Arching_Bridging.html
- [12] SCHULZE, Dietmar. *Powders and bulk solids: behavior, characterization, storage and flow*. New York: Springer, c2008. ISBN 35-407-3767-7.

- [13] Shrikant Dhodapkar, Lyn BATES a Shrikant KLINZING. *Shapa technical paper: Discharge aids* [online]. 2007, 34 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z:
<https://shapa.co.uk/technical-downloads/Updated%20Papers%20May%202015/Discharge%20Aids.pdf>
- [14] MOSA Solution, Kaplířova 297 Čížkovice, (z interních zdrojů firmy)
- [15] DUŠÁTKO, Antonín. *Bezpečný podnik - bezpečnost skladovacích zařízení sypkých hmot a bezpečnost jejich provozu*. Praha: Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2004.
- [16] Téma: Aktuální stav zásobníku: Rozhovor s Antonínem MACHÁČKEM, vedoucím směny, Plzeň, 17.6.2020.
- [17] ZEGZULKA, Jiří. *Mechanika sypkých hmot*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-2480699-1.

Seznam obrázků

Obr. 1 - 1 Výřez z časové osy země zachycující vývoj množství uhlí

Obr. 1 – 2 Vzorek vysušené rašeliny

Obr. 1 – 3 Vzorek Lignitu

Obr. 1 – 4 Vzorek Hnědého uhlí

Obr. 1 – 5 Vzorek černého uhlí

Obr. 1 – 6 Vzorek antracitu

Obr. 2 – 1 Wadellova tabulka sféricity částic

Obr. 2 – 2 Úhel vnějšího, vnitřního tření a další tokové vlastnosti černého uhlí

Obr. 2 – 3 Měření charakteristické výšky a úhlu smykové roviny

Obr. 2 – 4 Silové působení na odděleném klínu

Obr. 2 – 5 Silové působení na oddělené části sypkého tělesa

Obr. 2 – 6 Mohrova kružnice napětí a teoretická a reálná toková čára partikulárního materiálu

Obr. 2 – 7 Chování látek v uzavřené nádobě

Obr. 2 – 8 Odvození hlavního napětí a síly působící na stěnu nádoby

Obr. 3 - 1 Schéma zásobníku a základní pojmy

Obr. 4 - 1 Model síla s jádrovým tokem (po stranách = „mrtvá zóna“)

Obr. 4 - 2 Hmotový tok sypké hmoty a isolinie znázorňující oblasti se stejným napětím

Obr. 4 - 3 Graf znázorňující mezní křivku mezi hmotovým a jádrovým tokem (pro daný materiál)

Obr. 4 - 4 Volba typu zásobníku pro průběh tlaků jako funkce úhlu vnitřního tření $\varphi \in (0^\circ - 90^\circ)$

Obr. 5 – 1 Znázornění klenby v silu

Obr. 5 – 2 Znázornění středového tunelu v silu

Obr. 6 - 1 Provozdušňovací podložky

Obr. 6 - 2 Nafouklé a vyfouklé vzduchové polštáře

Obr. 6 – 3 Vzduchová děla

Obr. 6 – 4 Schéma pulzních trysek „airsweep“

Obr. 6 – 5 Schéma akustického čištění

Obr. 6 – 6 Znamky obouchání sila

Obr. 6 – 7 Schéma vibračního koše

Obr. 6 – 8 Schéma vibračního kuželu

Obr. 6 – 9 Schéma pohyblivých lopatek v zásobníku (vlevo – uzavřená výpusť a žádné vibrace, vpravo – vibrující lopatky a tekoucí materiál)

Obr. 6 – 10 Diskový podavač

Obr. 6 – 11 Rotační rameno

Obr. 6 – 12 Topné rohože v kombinaci s pulzními tryskami

Obr. 6 – 13 Schéma pasivního prvku v zásobníku

Obr. 7 – 1 Pulzní tryska

Obr. 7 – 2 Rozvody tlakového vzduchu

Obr. 8 – 1 Schéma přední stěny sdružených zásobníků včetně umístění trysek Myrlen VA – 51

Obr. 8 – 2 Schéma půdorysu sdružených zásobníků včetně umístění trysek Myrlen VA - 51

Obr. 8 – 3 Zásobník kotle K1 s instalovanými tryskami Myrlen VA - 51

Obr. 8 – 4 Schéma pásové dopravy uhlí do zásobníků

Obr. 8 – 5 Graf nákladů na realizaci pulzních trysek a odstávky dané technologie z roku 2015

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Návrh řešení pro zásobník kotle K3

PŘÍLOHA č. 1

Návrh řešení pro zásobník kotle K3

