

Návrh konstrukce laboratorního kulového mlýnu, k mletí krystalických látek v prostředí suchém.

Jiří Kocourek

Bakalářská práce
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jiří Kocourek

Osobní číslo: T12126

Studijní program: B3909 Procesní inženýrství

Studijní obor: Technologická zařízení

Forma studia: prezenční

Téma práce: Návrh konstrukce laboratorního kulového mlýnu, k mletí krystalických látek v prostředí suchém.

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studijní část dle zvoleného tématu.
2. Navrhněte princip technického řešení kulového mlýnu.
3. Zpracujte technickou dokumentaci.
4. Proveďte diskuzi a hodnocení řešení kulového mlýnu.

Rozsah bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Rozsah příloh:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
Doporučená literatura dle určení vedoucího bakalářské práce.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání bakalářské práce: **8. ledna 2016**
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 4. února 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním bakalářské/diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že bakalářská/diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou/diplomovou práci - nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské/diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské/diplomové práce využít ke komerčním účelům.

Ve Zlíně 24. 5. 2016



Jiří Kocourek

1) zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47b Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydávající zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledků obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlédnutí veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

2) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

3) zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přiměřeně k větší výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Hlavním cílem bakalářské práce je navrhnout a konstrukčně zpracovat drtící zařízení, kulový mlýn, který bude určen pro dezintegraci krystalických látek. Součástí řešení je obecný a konkrétní výpočet procesních parametrů a hlavních mechanismů mlýnu.

Klíčová slova:

kulový mlýn, mletí, krystal, mlýn, konstrukce, laboratoř, sypký, jemný, zrnitost, dezintegrace, rozměňování.

ABSTRACT

The main aim of this thesis is the design and construction process crusher, ball mill, which will be intended for the disintegration of crystalline substances. The solution includes general and specific calculation process parameters and the main mechanisms mill.

Keywords:

ballmill, grinding, crystal, mill, construction, laboratory, free-flowing, fine, graininess, disintegration, comminution.

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, doc. Ing. Zdeňku Dvořákovi CSc, za plnou podporu při řešení problematiky mletí a dezintegrace látek. Dále za pomoc při samotném studiu této problematiky a za bezbřehou trpělivost.

Motto práce:

Není vždy potřeba jen to největší.

Dále prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PEVNÝCH MATERIÁLŮ	12
1.1 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ DLE FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ.....	12
1.2 DĚLENÍ MATERIÁLŮ DLE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	13
1.3 DĚLENÍ MATERIÁLŮ DLE CHEMICKÝCH VLASTNOSTÍ	14
2 ROZŘAZENÍ SYPKÝCH MATERIÁLŮ PODLE FEM	16
2.1 ZRNITOST A ---> K A I ---> VI.....	16
2.2 SOUDRŽNOST 1 ---> 6	17
2.3 CHOVÁNÍ BĚHEM DOPRAVY	17
OBJEMOVÁ HMOTNOST ρv [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].....	17
TEPLOTA T [$^{\circ}\text{C}$, K].....	18
3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI SYPKÉHO MATERIÁLU	19
3.1 ZRNITOST	19
3.2 VLHKOST	20
3.3 MĚRNÁ, OBJEMOVÁ A SYPNÁ HMOTNOST	21
3.4 SYPNÝ ÚHEL.....	22
3.5 ÚHEL VNITŘNÍHO A VNĚJŠÍHO TŘENÍ	23
3.6 SOUDRŽNOST SYPKÝCH MATERIÁLŮ	24
3.7 NAPĚŤOVÝ STAV SYPKÉHO TĚLESA	26
3.8 STANOVENÍ TLAKŮ V SYPKÉM TĚLESE.....	28
4 ZÁKLADNÍ POJMY V ROZMĚLŇOVÁNÍ MATERIÁLŮ	31
4.1 ROZPOJITELNOST.....	31
4.2 ZÁKLADNÍ DRUHY A ZPŮSOBY MECHANICKÉHO ROZPOJOVÁNÍ.....	32
4.3 TEORIE ROZPOJOVÁNÍ.....	33
4.3.1 Rittingerova hypotéza (povrchová).....	33
4.3.2 Bondova hypotéza	35
4.4 OBECNÁ DIFERENCIÁLNÍ ROVNICE ROZPOJOVÁNÍ.....	35
5 ZÁKLADNÍ DRUHY DEZINTEGRAČNÍCH PŘÍSTROJŮ	37
5.1 VÁLCOVÉ A KUŽELOVÉ MLÝNY A DRTIČE.....	37
5.2 TALÍŘOVÉ MLÝNY (CONDUX).....	37
5.3 NOŽOVÉ MLÝNY	38
5.4 TLUKADLOVÉ A KLADIVOVÉ MLÝNY	39
5.5 KOLOIDNÍ MLÝNY	39
5.6 KULOVÉ A KULOVĚ VIBRAČNÍ MLÝNY	40
5.6.1 Přibližný průměr mlecích tělísek a poloměr rotace tělísek.	42
5.6.2 Výpočet úhlu odpadu tělíska v bubnu v optimální pozici.....	42
5.6.3 Výpočet úhlu odpadu tělíska v bubnu dle otáček a průměru.	42

5.6.4	kritické otáčky kulového mlýna.	43
5.6.5	Optimální otáčky kulového mlýna obecně i pro různá prostředí.	43
5.6.6	Rozdělení tří základních režimů pohybu koulí.	44
5.6.7	Popis pozic a výpočty polohových a kinetických energií pro výpočet výkonu.....	44
6.	SOURN TEORETICKÉ ČÁSTI.....	46
II	PRAKTICKÁ ČÁST	47
6	CÍL PRÁCE	48
7	VÝPOČETNÍ ČÁST MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ	49
7.1	NÁVRH A VÝPOČET PARAMETRŮ PRO BUBEN O PRŮMĚRU 200M	51
7.1.1	Průměr mlecích koulí	51
7.1.2	Poloměr oběžné kružnice mlecích tělísek	51
7.1.3	Kritické otáčky bubnu	51
7.1.4	Optimální otáčky a rychlosti pro různé režimy.....	51
7.1.5	Optimální poměrná hmotnost materiálu a mlecích tělísek bubnu.....	52
7.1.6	Objemy materiálů a mlecích tělísek s procentuální zaplněností bubnu	53
7.1.7	Síly působící na tělísko v bubnu kulového mlýnu o průměru 200mm.	53
7.1.8	Přibližný minimální teoretický výkon potřebný pro mletí a poloha tělíška	55
7.1.9	Minimální reálný příkon elektromotoru.....	58
7.2	NÁVRH A VÝPOČET PARAMETRŮ PRO BUBEN O PRŮMĚRU 150MM	58
7.2.1	Průměr mlecích koulí	58
7.2.2	Poloměr oběžné kružnice mlecích tělísek	58
7.2.3	Kritické otáčky bubnu	59
7.2.4	Optimální otáčky pro různé režimy.....	59
7.2.5	Optimální poměrná hmotnost materiálu a mlecích tělísek bubnu.....	60
7.2.6	Objemy materiálů a mlecích tělísek s procentuální zaplněností bubnu	60
7.2.7	Síly působící na tělísko v bubnu kulového mlýnu o průměru 150mm.	61
7.2.8	Přibližný minimální teoretický výkon potřebný pro mletí a poloha tělíška	63
7.2.9	Minimální reálný příkon elektromotoru.....	65
7.3	NÁVRH A VÝPOČET PARAMETRŮ PRO BUBEN O PRŮMĚRU 100MM	66
7.3.1	Průměr mlecích koulí	66
7.3.2	Poloměr oběžné kružnice mlecích tělísek	66
7.3.3	Kritické otáčky bubnu	66
7.3.4	Optimální otáčky pro různé režimy.....	66
7.3.5	Optimální poměrná hmotnost materiálu a mlecích tělísek bubnu.....	67
7.3.6	Objemy materiálů a mlecích tělísek s procentuální zaplněností bubnu	68
7.3.7	Síly působící na tělísko v bubnu kulového mlýnu o průměru 100mm.	68
7.3.8	Přibližný minimální teoretický výkon potřebný pro mletí a poloha tělíška	70
7.3.9	Minimální reálný příkon elektromotoru.....	73

7.4	VÝPOČET ZABEZPEČOVACÍHO ŘEMENNÉHO PŘEVODU.....	73
7.5	NÁVRH KOUTOVÉHO SVÁRU KONSTRUKCE.....	78
7.6	STATICKE URČENÍ ZATĚŽUJÍCÍCH SIL	78
7.7	NÁVRH STATICKEHO A DYNAMICKÉHO ŽIVOTNOSTI LOŽISKA.....	79
7.8	TECHNICKÁ DOKUMENTACE.....	80
7.9	NÁVOD K OBSLUZE MĚŘÍCÍHOZAŘÍZENÍ KULOVÉHO MLÝNU.....	82
7.9.1	Znázornění celého stroje a všech sestav.....	84
6.	ZÁVĚR.....	87
	SEZNAM POUŽITÝCH CITACÍ.....	89
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ	93
	SEZNAM TABULEK.....	94
	SEZNAM PŘÍLOH.....	95

ÚVOD

Lidstvo již od počátků touží, po znalostech a vědění. To byl, je a bude hnací motor pokroku a rozkvětu civilizace jak ji známe. Chtělo to nezměrnou spoustu generací, aby lidstvo dosáhlo úrovně vědění, jenž mu dovoluje popsat celistvě a smyslně svět, který nás obklopuje. Je to míra znalostí, která odhaluje stavbu hmoty od subatomárních rozměrů a sil na ně působících, až po makroskopický svět nás obklopující.

Jen tehdy si člověk mohl položit otázku a správně si na ni i odpovědět. Proč se hmota chová tak, jak se chová, neboli jaké má vlastnosti a jak tyto vlastnosti využít. Informace o vlastnostech látek či sloučenin, lze získat dvojím způsobem. Experimentálním či teoretickým, nutno podotknout, že každá teorie, aby byla ve vědecké obci přijata, jako platná a pravdivá musí být experimentálně ověřena. V opačném případě skončí v propadlišti dějin v lepším případě jako zajímavá teoretická úvaha, která je vhodná k zamyšlení.

Tato práce má za úkol alespoň částečně objasnit nejdůležitější mechanické vlastnosti sypkých látek, které vedou k pochopení problematiky dezintegrace zrn na co možná nejnižší zrnitost dle platných fyzikálních zákonů. Způsobů jak tohoto záměru dosáhnout je jak již to bývá bezpočet. Na následujících řádcích rozvedu, několik základních technologií a jednu vybranou popíši v teoretické části dopodrobna. Je to technologie kulového mlýnu. Ten v principu užívá rotujícího bubnu pro dodání kinetické energie ocelovým či jiným koulím v něm uzavřených. Ty se mezi sebou třou a vzájemně do sebe naráží. Přidáním materiálu, který chceme rozemlít do bubnu, se jejich kinetická energie předává danému materiálu za následku porušení jeho celistvosti, až následného rozpadu. Dle doby působení těchto sil lze odhadnout výslednou jemnost takto připravovaného prášku. Cílem přípravy pro zlepšení chemických procesů je zvýšit povrch daného materiálu vztažený na jeho hmotnost v jednotkách dle $SI\text{m}^2/kg$.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PEVNÝCH MATERIÁLŮ

Pevná látka je jedno ze tří skupenství hmoty, v kterém jsou částice vázány silami v pevně daných polohách. Kinetická energie částic atomů, tedy energie dodaná atomu teplem je tedy nižší než potenciální energie přitažlivých atomárních sil, které drží molekulu pohromadě. Základní dělení je na krystalické a amorfní.

1.1 Rozdělení materiálů dle fyzikálních vlastností

Materiály obecně rozdělujeme podle fyzikálních vlastností z pohledu materiálu, mechaniky, optiky elektrických aj. vlastností. [1], [2]

Hustota:

ρ [kg/m^3] ($25\text{ }^\circ\text{C}$), je podíl hmotnosti vůči objemu.

Teplota tání:

T_t [$^\circ\text{C}$] Teplota tání je teplota, při které látka změní své skupenství z pevného na kapalné. Je to pevně daná konstanta materiálu, která závisí na okolním tlaku.

Tepelná vodivost:

λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$] Tepelná vodivost neboli kondukce nastává předáváním kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů.

Elektrická vodivost:

G [S] Neboli konduktance je fyzikální veličina, která popisuje schopnost materiálu vést elektrický proud z jednoho konce na druhý konec vodiče bez poklesu napětí. Dobrý vodič má konduktanci vysokou.

Měrný elektrický odpor:

ρ [$\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$], je fyzikální veličina, která udává míru vést elektrický proud vodičem. Je závislá na samotné délce vodiče, na jeho průřezu a jeho teplotě. Se stoupající teplotou výrazně roste i elektrický odpor vodiče. Dále velice záleží na čistotě materiálu, z kterého je vodič vyroben. V dnešní době jsou již známy materiály, které nevykazují žádnou měřitelnou elektrickou vodivost. Takovým materiálům říkáme supravodiče.

Magnetické vlastnosti:

Materiály mohou být buď magnetické, nemagnetické nebo skoro nemagnetické čili paramagnetické. Magnetické materiály vykazují další veličiny: magnetický tok značen $\phi = [Wb]$, intenzita magnetického pole $H=[Am^{-1}]$, magnetická indukce $B=[T]$, permeabilita neboli prostupnost prostředí $\mu = [Hm^{-1}]$, permeabilita neboli prostupnost vakua $\mu_0 = 1,256637 * 10^{-6}[T/Am]$, relativní permeabilita neboli prostupnost prostředí $\mu_r = [T, Hm^{-1}, Am^{-1}]$

1.2 Dělení materiálů dle mechanických vlastností

Níže uvedené vlastnosti materiálů se stahují pouze na materiály ve skupenství tuhém. Dané vlastnosti jsou v podstatě jen projevem elektromagnetických sil, na subatomární úrovni vyvolané společnou interakcí atomového jádra a po příslušných po orbitalech, nebo ve vazbách obíhajících elektronech. [3], [8]

Základní mechanické vlastnosti: Tah, Tlak, Krut, Střih, ohyb:

Jsou mezní napětí materiálu při různém typu namáhání, při jehož překročení dojde k nevratným deformacím, neboli dojde k překročení (R_E) meze pružnosti. Napětí se udává v Mpa/mm^2 .

Pevnost:

Směrodatnou veličinou pevnosti je mezní napětí, při kterém dojde k trvalému a nevratnému poškození struktury materiálu.

Pružnost:

Pružnost neboli elasticita je schopnost materiálu odolávat mechanickému působení sil. Tato deformace, i když má za následek změnu objemu tělesa je vratná. Protože se projeví jen snížením mezi atomárních vzdáleností a tím pádem vychýlení atomů ze stabilní polohy. Při opětovném odtížení působících sil nastane relaxace materiálu, po níž se těleso vrátí do původního tvaru.

Tvrдост:

Tvrdoost jde popsat jako odolnost materiálu proti vniknutí cizího tělesa nebo narušení povrchové vrstvy. Tvrdoost se dá měřit Brinellovou metodou tvrdoosti ta se značí HB. Nebo Rockwellovou metodou ta se značí HRA, HRB respektive HRC. Obecně jde tvrdoost vyjádřit vztahem

$$H = F \cdot (e \cdot p \cdot F \cdot T \cdot t \cdot v) \quad 1-1$$

e= konstanta popisující pružné vlastnosti materiálu

p= charakteristika plasticity

F= je zatěžující síla

T= je koeficient tvaru a rozměru

t= je součinitel smykového tření mezi cizím tělesem a zkoumaným vzorkem

v= je rychlost vnikajícího tělesa

Tvárnost:

Neboli plasticita je dovednost materiálu měnit svůj tvar bez svého porušení. Dobrou tvárnost mají především kovy a toho se využívá ke kování atd.

Houževnatost:

Je schopnost materiálu opakovaně odolávat proti roztržení či narušení silou, která působí nějakou rychlostí za dané teploty a při určité napjatosti.

1.3 Dělení materiálů dle chemických vlastností

Chemické interakce nastávají tehdy, když se setkají dva prvky s natolik rozdílnými vlastnostmi, které jsou převážně způsobeny jiným počtem elektronů nebo jinou energií elektronů. Energie elektronů závisí na vzdálenosti oběhu od jádra po příslušném orbitalu. Při přiblížení těchto rozdílných částic na kritickou vzdálenost se částice dostávají do nerovnovážného stavu a ten je pro ně dlouhodobě neudržitelný. Stav částic se změní za cílem snížení míry entropie a dosažení rovnovážného stavu.[4], [7], [3]

Odolnost proti korozi:

Koroze může být způsobena dvěma způsoby. Buď oxidací to znamená, že molekuly materiálu přijímají z okolního prostředí atomy kyslíku. Za doprovodu chemické reakce vznikne

z části původního materiálu oxid. Druhý způsob je redukční za působení H_2, NH_3, N_2, CO . Materiál který je odolnější má v průběhu času nižší úbytek hmotnosti materiálu na plochu vystavenou korozním vlivům.

Elektrochemická odolnost vůči korozi:

Nejběžnější výskyt tohoto typu koroze je napadení oceli vzdušnou vlhkostí v jinak suchém plynu. Nebo je vyvolána rozdílnou elektrochemickou ušlechtilostí kovů $\Delta E_o [mV]$

Chemická stabilita:

Je velmi sporadická. Záleží na přesném typu zkoumané látky a na látce jí vystavené. Pro příklad přidávám tabulku chemické odolnosti známých polymerů.

Tepelná stabilita:

Teplota je velice důležitý faktor při určování mechanické pevnosti materiálů. Záleží na typu materiálu, ale obecně můžeme konstatovat, že materiál se stává křehčím, čím má nižší teplotu. Naopak zase čím víc teplota roste tak dochází k měknutí materiálů následném rozpouštění krystalů či obecně pevných látek, které následuje vypařování a tudíž změn v plyn. Když budeme materiál nadále zahřívat je možné se vzrůstajícím tlakem atomy sloučit či rozštěpit na úplně jiné atomy a vytvořit tak i nám neznáme prvky.

2 ROZŘAZENÍ SYPKÝCH MATERIÁLŮ PODLE FEM

FEM (European Federation of Materials Handling) je Evropské neziskové sdružení, které se zabývá materiály, dopravou a zacházení s nimi. FEM bylo založeno v roce 1953. Sídlo má trvale v Bruselu a v současné době sdružuje 13 národů z členských států EU. FEM zastupuje víc než 1000 firem. Podle návrhu, který byl FEM vypracován, je sypká hmota dělena dle základních 5 kategorií:[1]

2.1 Zrnitost A ---> K a I ---> VI

Zrnitost je definována dvěma znaky. První definuje rozměr neboli velikost zrn dle kategorií podle písmen A až K. Dle přiložené tabulky.

Tab. 1 Značení velikosti zrn

Kategorie	Průměrný rozměr zrn (mm)
A	od 0,0 do 0,4
B	od 0,4 do 1,0
C	od 1,0 do 3,0
D	od 3,0 do 10
E	od 10 do 25
F	od 25 do 50
G	od 50 do 75
H	od 75 do 150
J	od 150 do 300
K	od 300 výše

Druhý definuje tvar zrna a ten je udáván římskými čísly. I až V

- I. Ostré hrany a zároveň srovnatelné rozměry ve všech 3 rozměrech. (krychle)
- II. Ostré hrany, kde je jeden rozměr výrazně větší než ostatní. (hranoly)
- III. Ostré hrany, kde jsou 2 rozměry výrazně větší než zbývající. (desky, lupínky)
- IV. Zaoblené hrany se srovnatelnými rozměry ve všech rozměrech. (koule)
- V. Oblé hrany, kde je jeden rozměr výrazně větší než ostatní (válce, tyče)

2.2 Soudržnost

1 ---> 6

- 1) Materiál ve vzduchu poletující a tvořící stav podobný tekutině
- 2) Lehce tekoucí, sypký úhel menší než 30°
- 3) Normálně tekoucí, sypký úhel mezi 30 až 45°
- 4) Těžko tekoucí se sypkým úhlem 45 až 60°
- 5) Soudržný materiál, sypký úhel větší než 60°
- 6) Materiál netvořící skluz, netekoucí, se schopností tvořit klenby a těžko od sebe oddělitelný.

2.3 Chování během dopravy

Ke všem materiálům se dá přiřadit jedna nebo více následujících přepravních vlastností. Tyto označení jsou závazné pro veškeré členské státy, které užívají systém značení FEM. Jedná se o základní popis pro obsluhu manipulující s danou látkou, z důvodů zajištění bezpečnosti práce.

Tab. 2 Značení přepravních vlastností materiálů

Označení	Vlastnost	Příklady
O	abrazivní (o brusivý)	písek, šrot
P	korozivní	sůl, kyseliny
Q	křehký	sklo
R	explozivní	TNT
S	hořlavý	dřevo
T	prachovitý	cement
U	vlhký (%)	
V	lepivý	bahno
W	hygroskopický	rýže, sůl
X	páchnoucí	odpad, sýr

Objemová hmotnost ρ_v [kg*m⁻³]

Je výhodné udávat jako podíl hmotnosti v kg a objemu v metrech krychlových. Je závislá na dalších hodnotách, jako je vlhkost, teplota. Stlačení atd. Z důvodů dodržení značení v základních hodnotách SI.

Teplota T [$^{\circ}\text{C}$, K]

Teplo je další formou přenosu energie. Tato energie se dle platných zákonů termodynamiky přenáší jen za podmínek teplotního rozdílu systému a okolí. Je udávána nejčastěji ve stupních Celzia, Kelvina anebo ve stupních Fahrenheita. Teplota silně ovlivňuje mechanické i chemické vlastnosti přepravovaného či zpracovávaného materiálu. Ve fyzikálně praxi se můžeme setkat i s jiným popisem teploty. S termodynamickou veličinou entalpií, která se běžně označuje písmenem H . Přidáním energie do systému, přímo úměrně naroste i míra entalpie. Tedy míra vnitřní uspořádanosti. [5]

$$\Delta H = Q [p]$$

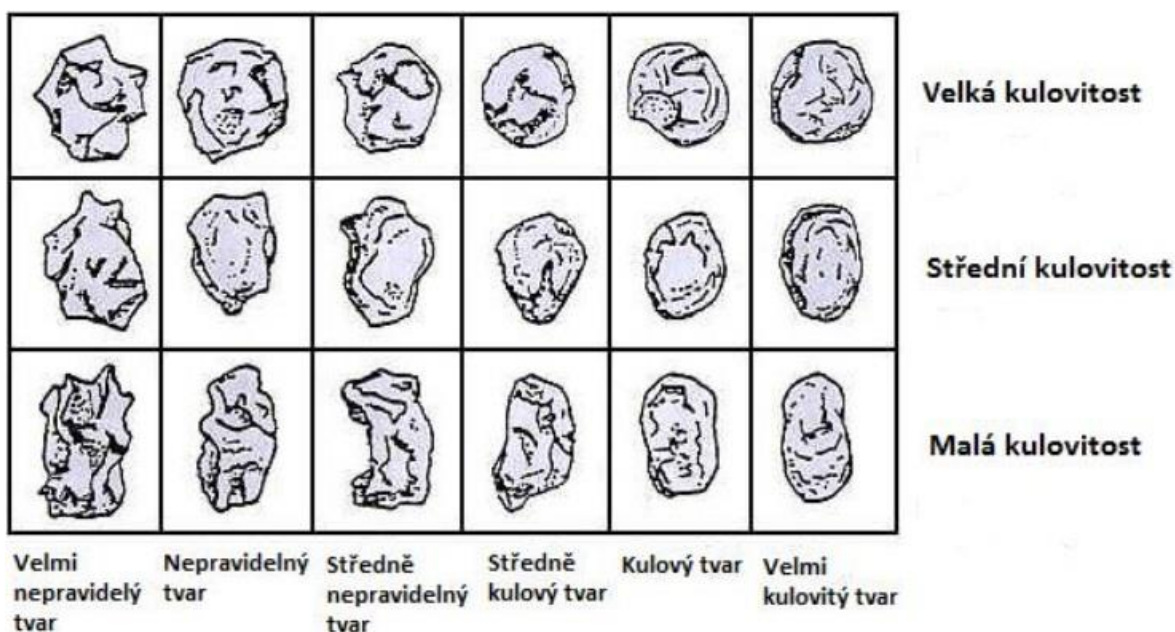
2-1

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI SYPKÉHO MATERIÁLU

Mechanické chování a vlastnosti sypké hmoty je složité. V podstatě jde o společnou interakci všech částic tvořící zkoumané množství materiálu. Pohyb částic je důvodem proč se materiál nechová stejně v průběhu času. Pro popsání a pochopení mechanismů ovlivňujících mechanické vlastnosti je důležité nadefinovat tyto parametry:[1]

3.1 Zrnitost

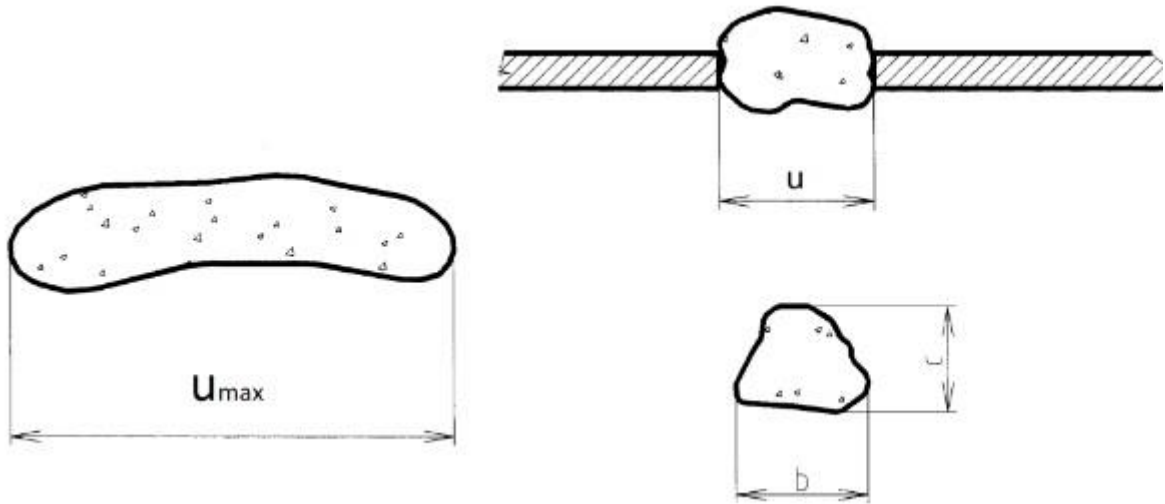
Zrnitost je složení podle velikosti zrna v zastoupení dle tříd zrnitosti nebo je reprezentována křivkou zrnitosti. Velikost zrna d je udávána v mm nebo v μm . Protože je hmota tvořena nesourodou směsí různých tvarů zrn, je stanovení velikosti byť jen jednoho zrna obtížné. Pro zjednodušení se často bere největší rozměr zrna, nebo dva největší rozměry zrna na sebe kolmé. Nejvíce korespondující je však popis dle reprezentativní částice-koule mající stejný objem jako zkoumané zrno. Odlišením od kulovitosti se dále vyjadřuje míra sféricity zrna neboli jeho tvar.[1], [7]



Obr. 3-1 Wadellova tabulka sféricity částic

V průmyslu se nejčastěji užívá vibračních sít neboli síťový rozbor, přes které putuje sypký materiál. Maximální velikost zrna tedy U_{max} je taková, jaká je velikost čtvercového oka

síta, kterým propadne 95% materiálu. Přežitým standardem co se týká udávání rozměrů ok sít, je počet ok na palec čtvereční. Což je alespoň dle mě naprosto nesměrodatný údaj a jako takový by se neměl užívat v praxi.



Obr. 3-2 Stanovení velikosti zrn dle síťového rozboru

Třídění materiálu může být docíleno i jednou nebo kombinací více uvedených technologií třídění sypkých materiálů.: Rovinný třídíč, Rotační třídíč, Pneumatický třídíč, Hydraulický třídíč, Odstředivka, Filtry a odlučovače, Aero-filtry, Hydro-filtry, Speciální filtry

3.2 Vlhkost

Vlhkost je definována jako obsah vody v materiálu v procentech hmotnosti. Je to nestálá veličina, která se mění v průběhu času dle zacházení s materiálem. Sypký materiál, na jehož zrnech ulpí, byť malé množství vody je vlhký materiál. Vlhkost je velice ovlivňující vlastnost krystalických látek, která mění míru jemnosti mletí. S ní souvisí i schopnost nasákavosti (schopnost pojmout vodu), která však u krystalických látek nehraje důležitou roli. Voda přimíšená se dá oddělit mechanicky. Odstředivou silou nebo tepelným působením, kterým dojde k odparu nežádoucí kapaliny. Voda:

Přimíšená (gravitační) W_g je za použití odstředivé síly odstranitelná.

Hrubá W_{ex} je část vody která se při odstředování volně vypaří do atmosféry.

Voda veškerá W_t je součet veškeré zbylé vody, který má materiál při přirozeném stavu

Nasákavost W_{max} je schopnost hmoty absorbovat vodu až k dosažení rovnovážného stavu. [1]

3.3 Měrná, objemová a sypná hmotnost

Jedná se o soubor základních fyzikálních vlastností daných materiálů, které slouží k řešení problematiky sypkých hmot. Jak z hlediska skladování, dopravy, manipulace a obecně práce s daným materiálem. [1], [7]

Měrná hmotnost:

$\rho[kg \cdot m^{-3}]$. Je hustota materiálu, která se zjišťuje při velikosti zrna menší než 0,125 mm a při teplotě 105-110°C. Je to hodnota běžně užívaná při výpočtech a snadno dohledatelná v matematicko-fyzikálních tabulkách. Na příklad měrná hmotnost oceli je přibližně $\rho = 7850 kg \cdot m^{-3}$.

Objemovou hmotnost:

$\rho_v[kg * m^{-3}]$. Je hustota materiálu i s jeho póry a dutinami v neupraveném stavu. Laboratorní měření této veličiny se běžně provádí podobně jako u sypné hmotnosti až na rozdíl, že je potřebné změřit třeba přidáním vody objem nezaplňených prostorů měřeného materiálu.

Sypná hmotnost:

$\rho_s[kg * m^{-3}]$. Je hustota materiálu při jeho volném nasypání do měřicí nádoby známého objemu.

Součinitel nakypření je poměr mezi objemovou a sypnou hmotností:

$$k_N = \frac{\rho_v}{\rho_s} \quad 3-1$$

Všeobecně platí:

$$\rho_s < \rho_v < \rho[kg * m^{-3}] \quad 3-2$$

Sypná tíha:

Jde v podstatě o tíhu 1 metru krychlového materiálu v tíhovém poli naší planety. Tato tíha se hojně užívá v praxi a obecně průmyslu.

$$\gamma_s = \rho_s \cdot g [Nm^{-3}]$$

3-3

3.4 Sypný úhel

Sypný úhel sypkého materiálu je rozlišitelný a to na dva základní stavy dle konkrétních situací a to:[1],

Přirozený sypný úhel (klidový) ψ_s

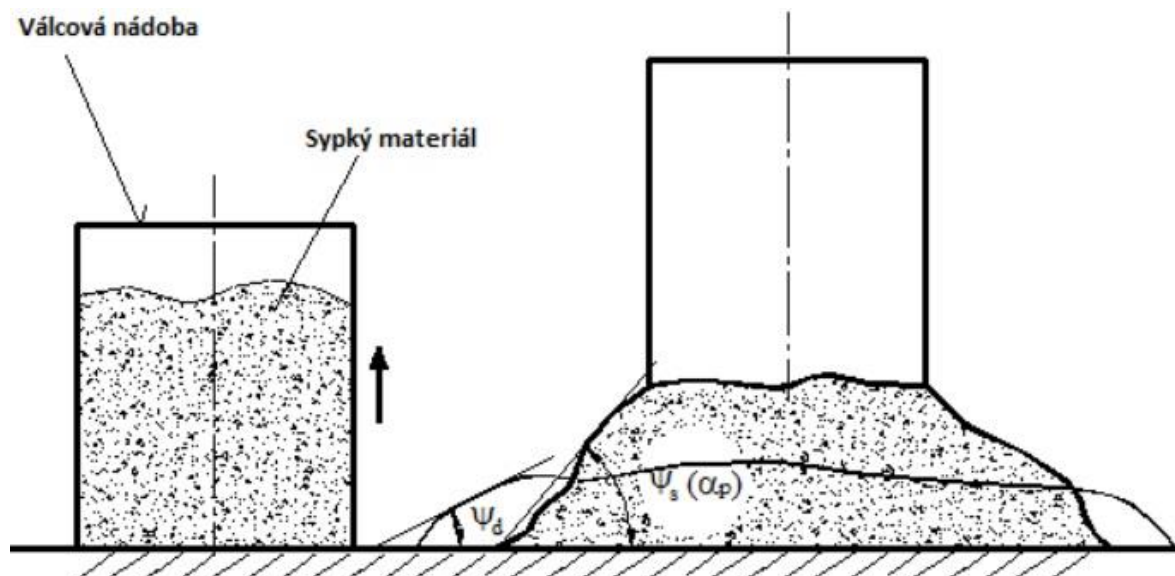
Je úhel, který svírá tečna svahu volně sypaného materiálu z malé vížky a nízkou rychlostí s vodorovnou rovinou. Dá se představit rovnoměrným pomalým zvedáním válcové nádoby bez dna, v které je měřený sypký materiál. Ten samovolně postupně vypadává na podložku a vytváří tak námi měřitelný úhel.

dynamický sypný úhel ψ_d

Vzniká při kmitání podložky dopředně zpětným pohybem ve vodorovné rovině, za následku snížení přirozeného sypného úhlu a platí:

$$\psi_d < \psi_s$$

3-4



Obr. 3-3 Ukázka způsobu měření přirozeného sypného úhlu nádobou bez dna

3.5 Úhel vnitřního a vnějšího tření

Tento úhel φ sdružuje tření mezi jednotlivými zrny materiálu. Tudiž závisí na tvaru povrchu a velikosti zrn. Dále je velice důležitý faktor normálového napětí materiálu, který je vyvolán zhuštěností materiálu. S rostoucím napětím vyvolaným tíhou materiálu nad pozorovanou oblastí se vnitřní úhel materiálu zvyšuje.

Měření se provádí na strojích dvou základních typů. Jenikeho typ a Schutzeho typ jedná se o rotační smykové měřicí přístroje. Příklad měření je uveden na obrázku číslo 3-4. [1]

φ_e - efektivní úhel vnitřního tření

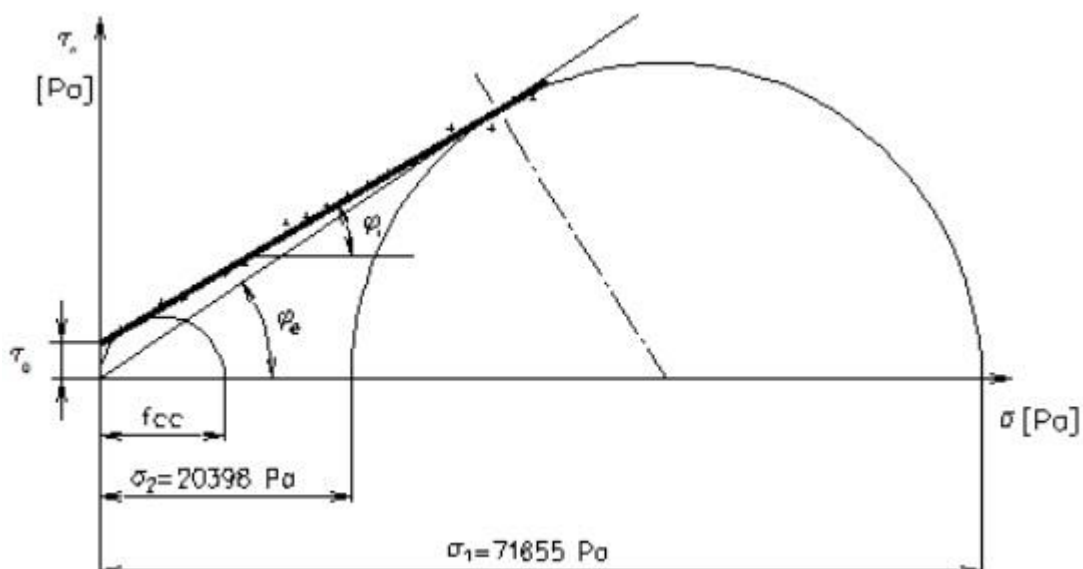
φ_i - aktuální (instantní) úhel vnitřního tření materiálu.

Úhel vnitřního tření materiálu φ jde přibližně vypočítat z přirozeného sypného úhlu ψ_s

$$\varphi \div \arctg \cdot (0,9 \operatorname{tg} \psi_s) [^\circ] \quad 3-5$$

Součinitel vnitřního tření z úhlu vnitřního tření je tak.

$$f = \operatorname{tg} \varphi [-] \quad 3-6$$



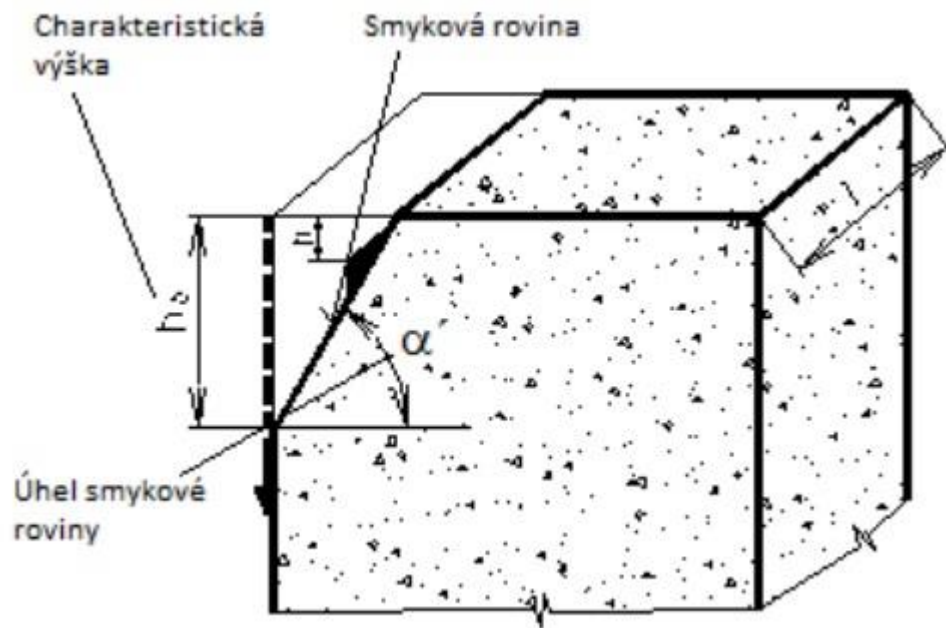
Obr. 3-4 Úhel vnitřního, vnějšího tření a dalších veličin

Úhel vnějšího tření je kritický úhel, při jehož dosažení začíná materiál klouzat po podložce a začne tak zvětšovat svoji podstavu. Součinitel vnějšího tření je závislý na velikosti normálového tlaku, který je vyvolán tíhou materiálu nad zkoumanou oblastí.

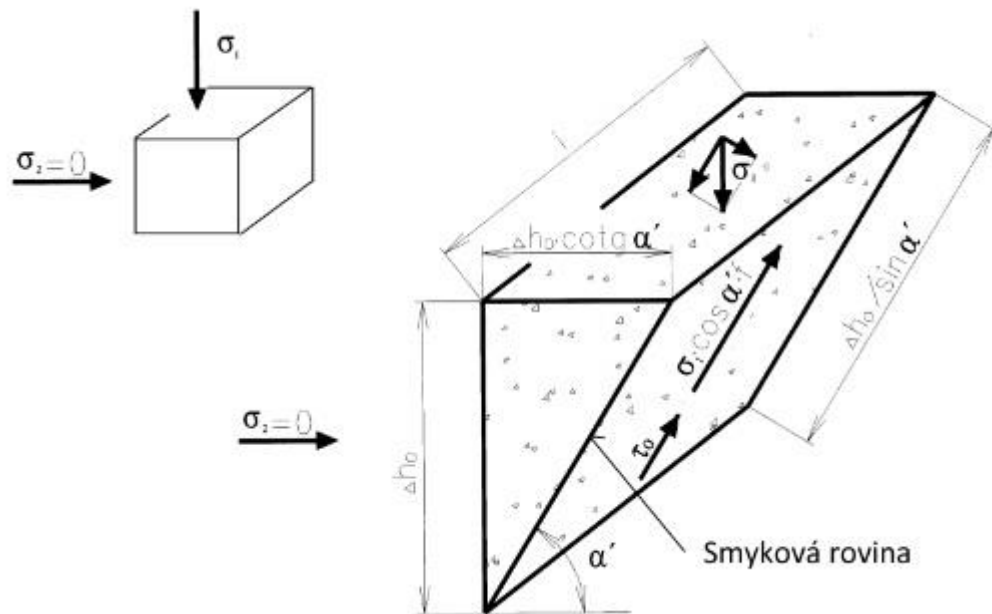
3.6 Soudržnost sypkých materiálů

Soudržnost takových materiálů je provázána kohezivitou, ta je jedna z podstatných vlastností. Jde o schopnost přenášet vnitřním třením i drobná tahová a dokonce i krutová napětí. Ideální sypký materiál dokáže přenášet jen smyková a tlaková napětí. Počáteční soudržné napětí τ_0 zapříčiňuje soudržnost materiálu, jde tedy o vnitřní tření. To je závislé na sypné tíze γ_s , charakteristické výšce h_0 , součinitele vnitřního tření f a na úhlu smykové roviny α .

Měření úhlu smykové roviny a charakteristické výšky je prováděno ve speciální měřicí nádobě čtvercového půdorysu. Tato nádoba má jednu speciální vlastnost a tou je posuvná jedna ze čtyř stěn, která se dokáže volně pohybovat ve vertikálním směru a měnit tak výšku horní hrany. Náčrtek tohoto měření je na obrázku číslo 3-5.[1]



Obr. 3-5 Schéma získání hodnoty charakteristické výšky a úhlu smykové roviny



Obr. 3-6 Zobrazení úkosu a smykové roviny při počátečním smykovém napětí

α' - úhel smykové roviny [°]

τ_0 - počáteční soudržné napětí [Pa]

σ_j - napětí ve svislém směru [Pa]

σ_2 - napětí ve vodorovném směru [Pa] (Do zhroucení klínu $\sigma_2 = 0$)

h_0 - charakteristická výška [m]

Díky využití rovnováhy sil můžeme na klínu odvodit:

$$\tau_0 \cdot \frac{\Delta h_0}{\sin \alpha'} \cdot l + \sigma_1 \cdot f \cdot \Delta h_0 \cdot \cot g(\alpha') \cdot \cos(\alpha') = \sigma_1 \cdot \Delta h_0 \cdot l \cdot \sin(\alpha') \cdot \cot g(\alpha') [Pa] \quad 3-7$$

$$\sigma_1 = \gamma_s \cdot h_0 [Pa] \quad 3-8$$

$$\tau_0 = \gamma_s \cdot h_0 \cdot \frac{(0.5 \cdot \sin(2\alpha') - f \cdot \cos^2(\alpha'))}{0.25} [Pa] \quad 3-9$$

$$\tau_0 \div \frac{\gamma_s \cdot h_0}{4} [Pa] \quad 3-10$$

Maximální skluzovou plochu klínu lze odvodit:

$$\alpha' = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} = 45^\circ + \frac{\varphi}{2} [^\circ] \quad 3-11$$

Dále...

$$\tau_0 = \frac{\gamma_s \cdot h_0}{2} \cdot \frac{1 - \sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} [Pa] \quad 3-12$$

$$\tau_0 = \frac{\gamma_s \cdot h_0}{2} \cdot \operatorname{tg}(90^\circ - \varphi) [Pa] \quad 3-13$$

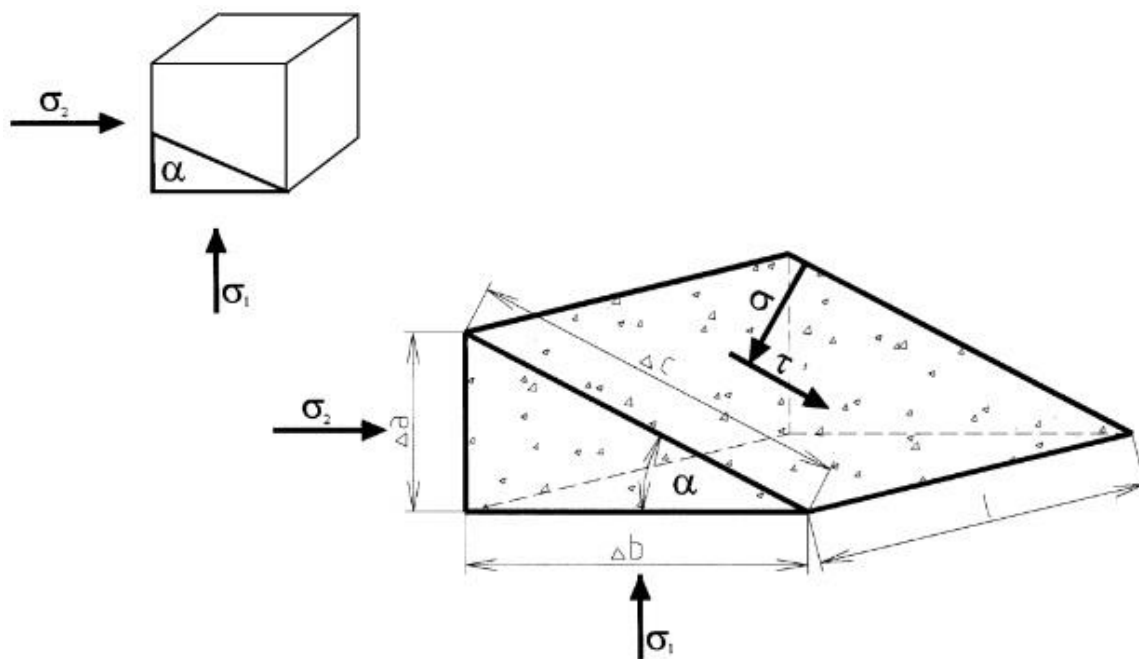
3.7 Napět'ový stav sypkého tělesa

Sypký materiál uskladněný v nádobách nebo volně ložený tvoří takzvané sypké těleso, které jako jiné tělesa podléhá působení napětí.

Abychom byli schopni opsat průběhy těchto napětí, musíme si daný zkoumaný objekt zjednodušit. To lze provést zjednodušením a rozebráním na co možná nejmenší elementy. Nejjednodušším elementem je 4 stěn. Neboli trojboký hranol. Pro zachování rovnováhy sil platí: [1], [9]

$$\Sigma F_{i\sigma} = 0 \Rightarrow l \cdot (\Delta c \cdot \sigma - \Delta \alpha \cdot \sigma_2 \cdot \sin(\alpha) - \Delta b \cdot \sigma_1 \cdot \cos(\alpha)) = 0 \quad 3-14$$

$$\Sigma F_{i\tau} = 0 \Rightarrow l \cdot (\Delta c \cdot \tau - \Delta \alpha \cdot \sigma_2 \cdot \cos(\alpha) - \Delta b \cdot \sigma_1 \cdot \sin(\alpha)) = 0 \quad 3-15$$



Obr. 3-7 Síly figurující v napjatosti elementu

$$\Delta a = \Delta c \cdot \sin(\alpha) \quad \Delta b = \Delta c \cdot \cos(\alpha) \quad 3-16$$

Dosazením a následnou úpravou 3-14, 3-15, 3-16:

$$\sigma = \sigma_1 \cdot \cos^2(\alpha) + \sigma_2 \cdot \sin^2(\alpha) [Pa] \quad 3-17$$

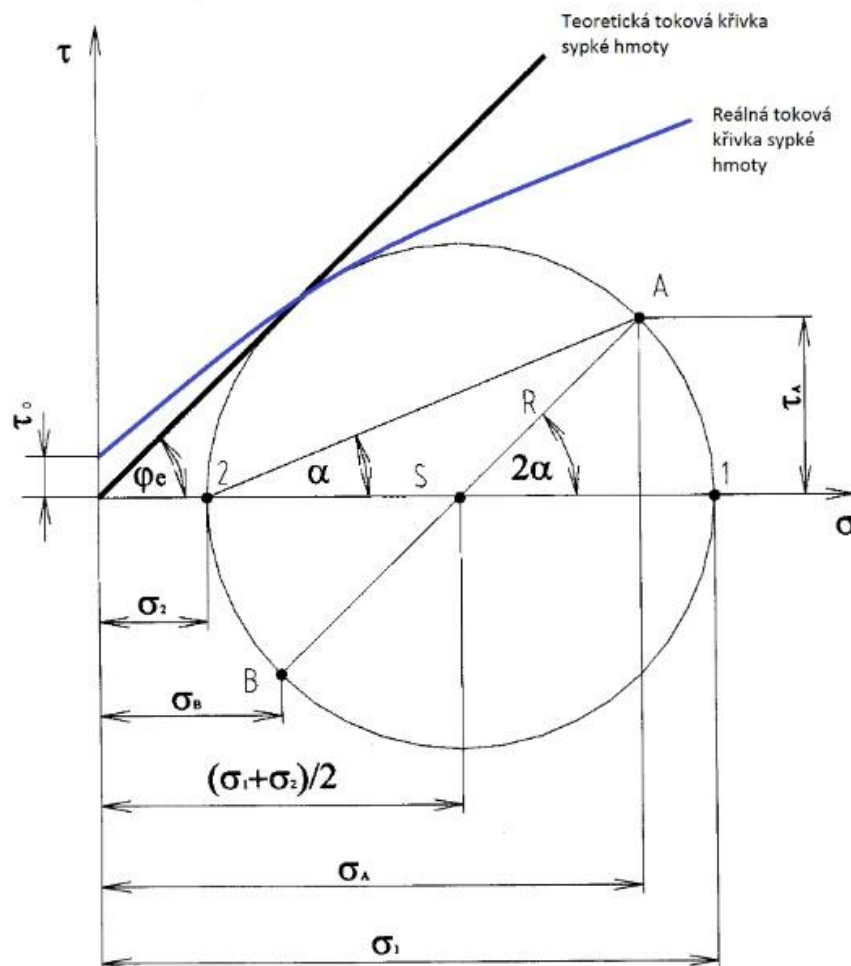
$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin(2 \cdot \alpha) [Pa] \quad 3-18$$

Upravením rovnice 3-17 dle trigonometrických operací získáme:

$$\sigma = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos(2\alpha) \right) [Pa] \quad 3-19$$

Dalším upravením rovnic 3-18 a 3-19 získáme rovnici Mohrovy kružnice napětí:

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right)^2 \cdot \cos^2(2\alpha) [Pa] \quad 3-20$$



Obr. 3-8 Mohrova kružnice zobrazující napětí sypkého materiálu s teoretickou a reálnou tokovou čarou sypkého materiálu

K dokonalému popsání působících sil musíme popsat i kolmá či boční napětí σ_B . Součinitel bočního tlaku je tedy:

$$k_b = \frac{\sigma_B}{\sigma_A} [-] \quad 3-21$$

Nejnižší hodnota bočního tlaku je součinitel sypkostí neboli koeficient sytností lze vyjádřit:

$$k = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1-\sin(\varphi)}{1+\sin(\varphi)} \quad 3-22$$

3.8 Stanovení tlaků v sypkém tělese

Sypké těleso se vyznačuje velikým rozsahem úhlu vnitřního tření, který může nabývat hodnot: $\varphi = (0, 90^\circ)$. Oproti tomu kapalně hmoty mají úhel vnitřního tření $\varphi \cong 0^\circ$. To výrazně zjednodušuje výpočty možných situací. Podobně jsou natom i tuhé materiály, kde se úhel vnitřního tření rovná $\varphi \cong 90^\circ$.

K výpočtu problematiky sypkých materiálů je pro jednoduchost užívá Rankinova teorie, ta zohledňuje pouze hydrostatický tlak daného materiálu a zároveň zanedbává tření stěn nádoby a vnitřní tření materiálu. Napětí působící svisle na vodorovnou plochu lze vyjádřit:[6], [1]

$$\sigma_1 = \gamma_s \cdot h [Pa] \quad 3-23$$

Dále pro svislou plochu vodorovným napětím:

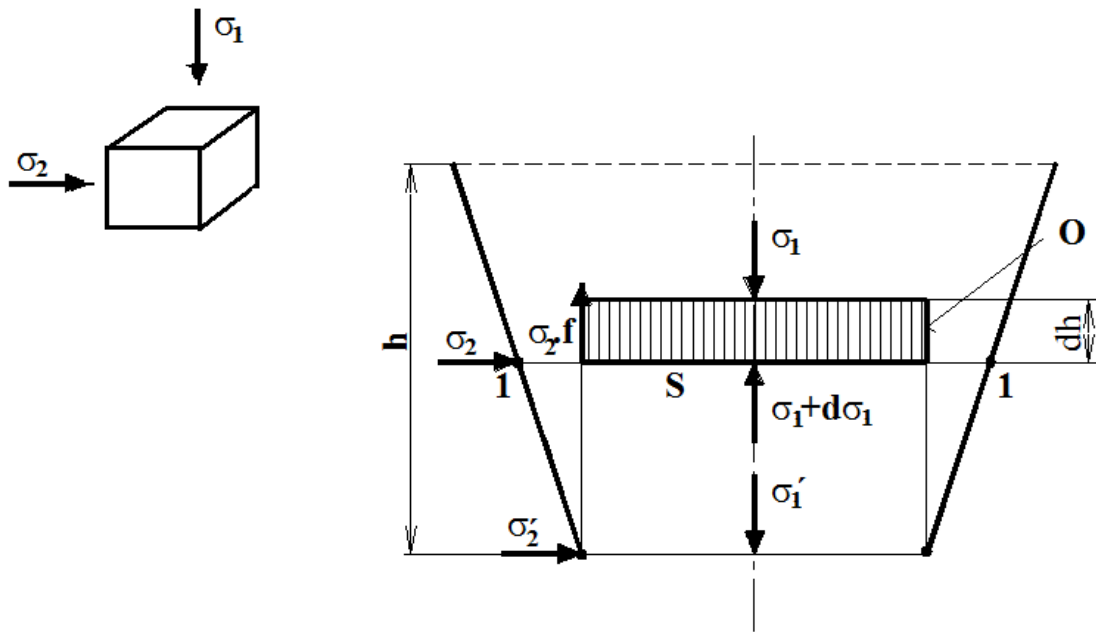
$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot k = k \cdot \gamma_s \cdot h [Pa] \quad 3-24$$

Výše uvedené teoretické vztahy se dají užít pro nádoby o maximální výšce $h \leq (8 \div 10) \cdot R$, kde R je hydraulický poloměr. Ten se dá určit ze vztahu:

$$R = \frac{S}{o} [m] \quad 3-25$$

Teorie s přesnějším popisem problematiky je Jansenova. Ta rozdělí zkoumaný prostor se sypkým materiálem na jednotlivé vrstvy a ty přenášejí napětí (napětí závěsu čili další vrstvy) z jedné na druhou a zároveň i na stěny nádoby. Zohledňuje tedy vnitřní i vnější tření materiálu. Hlavní napětí se dá spočítat dle platného vzorce za předpokladu: $\Sigma F_{iy} = 0 [N]$

$$\sigma_1 \cdot S + \gamma_s \cdot S \cdot dh - \sigma_2 \cdot o \cdot f \cdot dh = (\sigma_1 + d\sigma_1) \cdot S \quad 3-26$$



Obr. 3-9 Znáornění Jansenovy teorie sil účinkujících na stěny nádoby

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_2}{k}, \quad d\sigma_1 \frac{d\sigma_2}{k} \text{ a } \frac{0}{S} = \frac{1}{R} \quad 3-27$$

$$\frac{\sigma_2}{k} + \gamma_s \cdot dh - \frac{\sigma_2}{R} \cdot f \cdot dh = \frac{\sigma_2}{k} + \frac{d\sigma_2}{k} \quad 3-28$$

Po uplatnění integrace na obou stranách rovnice a selekcí proměnných získáme vztah:

$$\int dh = \int \frac{d\sigma_2}{\gamma_s \cdot k - \frac{k \cdot f}{R} \sigma_2} \quad 3-29$$

Po integraci a nadeřinování okrajových podmínek: $h = 0 \rightarrow \sigma_2 = 0$ a pro $h = h \rightarrow \sigma_2 = \sigma_2'$ získáme Jansenovo napětí:

$$\sigma_2' = \frac{\gamma_s \cdot R}{f} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot f \cdot h}{R}}\right) [Pa] \quad 3-30$$

$$\sigma_1' = \frac{\gamma_s \cdot R}{f \cdot k} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot f \cdot h}{R}}\right) [Pa] \quad 3-31$$

Pro popis reálných tlaků p_1' a p_2' , které probíhají v nádobách při rázových napětích vyvolaných zavíráním a otevíráním nádoby, se v praxi užívá opravných koeficientů k_o a k_d .

$$p'_1 = \sigma'_1 \cdot k_o \cdot k_d \text{ [Pa]} \quad 3-32$$

$$p'_2 = \sigma'_2 \cdot k_o \cdot k_d \text{ [Pa]} \quad 3-33$$

k_o =součinitel závěsu $\in (1 \div 2)$

k_d =dynamický součinitel $\in (1,1 \div 1,6)$

Teoretický a reálný tlak jsou odlišné, kompenzují to právě dva více uvedené opravné koeficienty. V praxi se doporučuje užívat právě výpočtů poopravených těmito koeficienty. Je možné vyjádřit:

$$\frac{p'_1}{\sigma_1} = 2,3 = k_o \cdot k_d \quad 3-34$$

$$\frac{p'_2}{\sigma_2} = 2,3 = k_o \cdot k_d \quad 3-35$$

4 ZÁKLADNÍ POJMY V ROZMĚLŇOVÁNÍ MATERIÁLŮ

Rozmělňování neboli drcení je technologický proces, který si klade za hlavní účel zvýšení jemnosti směsi. Důvody pro zjemnění jsou různé. Usnadnění dopravy nebo vůbec umožnění. Technologická příprava na další krok výroby. Požadavky zákazníka jak estetické tak praktické k usnadnění následného zpracování suroviny.

Rozpojování je v podstatě dodávání kinetické energie částicím materiálu za následku narušení celistvosti a rozpadu. K zvýšení měrného povrchu [m^2 , m^3 , $m^2 \cdot kg^{-1}$] materiálu a tím k urychlení chemických reakcí při zpracování, což má za následek urychlení a zlevnění výroby. Hlavní technologie lze rozlišit na mletí a drcení. Rozdíl mezi technologiemi podle výsledné velikosti zrn není pevně nadefinován, a tudíž je sporný. Ale udává se velikost kolem 1,25 mm, až maximálně hodnota $1 \div 3 \text{ mm}$. [1]

4.1 Rozpojitelnost

Je schopnost sypkých materiálů čili partikulárních materiálů rozdělit se na menší části o stejném složení. Rozpojitelnost se běžně definuje jako koeficient drtitelnosti. Ten je definován poměrem drtícího času potřebného k dosažení jemnosti srovnatelné s vybraným etalonem. Koeficient drtitelnosti je potřeba definovat za podmínek opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření. Rozpojitelnost je ovlivněna hlavně vlastnostmi materiálu. Nejdůležitější z nich jsou: pevnost, tvrdost, houževnatost, křehkost, stlačitelnost, voděodolnost, složení materiálů (obsah prvků S, C, N), tepelná vodivost, elektrické vlastnosti, štěpnost, abrazivzdornost. Další nepřímo ovlivňující vlastnosti jsou zejména konstrukční řešení a typ drtiče či mlýnu. Interpartikulární síly, ty jsou funkcí velikosti částic. Dále koheze Van der Waalsovy síly, tekuté můstky a vlivy okolního prostředí teplota vlhkost. [1]

Stupeň rozpojení „ i “ lze výpočtem získat ze vztahu:

$$i = \frac{U}{u} = \frac{U_{str}}{u_{str}} \quad 4-1$$

Kde: „ U “ je velikost vstupního zrna, „ u “ velikost výstupního zrna. U_{str} a u_{str} jsou střední hodnoty velikosti výstupního a vstupního zrna.

Redukovaný stupeň rozdrobení se vztahuje na 80% nerozdrobených a rozdrobených množství, které projdou kruhovým otvorem při síťovém rozdělení.

$$i = \frac{D_{80}}{d_{80}}$$

4-2

4.2 Základní druhy a způsoby mechanického rozpojování

Účinkem sil dodávaných, na částice materiálu dochází k poškození struktury materiálu, až dojde k rozdělení zrna na menší. Tohoto záměru je možné dosáhnout hned několika způsoby: Tlakem, Rázem, Nárazem, Ohybem, Střihem, Štípáním. [1]

Druh rozpojování závisí na vlastnostech materiálu a volbě technologa. Dále uvádím příklady stupňů drcení materiálu. Užití hodnoty velikosti zrn jsou diskutabilní a záleží na mnohých faktorech a domluvě.

Druh	i	Velikost rozpojených částic [mm]
Primární (hrubé, předběžní drcení)	3-6	zrna převážně >125
Sekundární (střední) drcení	cca 10	zrna převážně >25
Terciární (jemné) drcení	cca 15	zrna převážně <25
Mletí	10-50	zrna převážně <1,25
Jemné mletí	100	zrna převážně <0,08
Velmi jemné mletí	>100	zrna cca 0,08

Obr. 4-1 Druhy drcení a výsledná velikost rozpojených částic

Hrubé drcení	10,8-14,4	MJ.t ⁻¹ (kJ.kg ⁻¹)
Jemné drcení	18,0-21,6	MJ.t ⁻¹ (kJ.kg ⁻¹)
Mletí	72,0-108,9	MJ.t ⁻¹ (kJ.kg ⁻¹)
Jemné mletí	360,0-3600,0	MJ.t ⁻¹ (kJ.kg ⁻¹)

Obr. 4-2 Energie potřebná k dosažení určité jemnosti

Jde jen o přibližné hodnoty, z důvodů velice náročného výpočtu spotřebované práce na mletí materiálu na požadovanou jemnost.

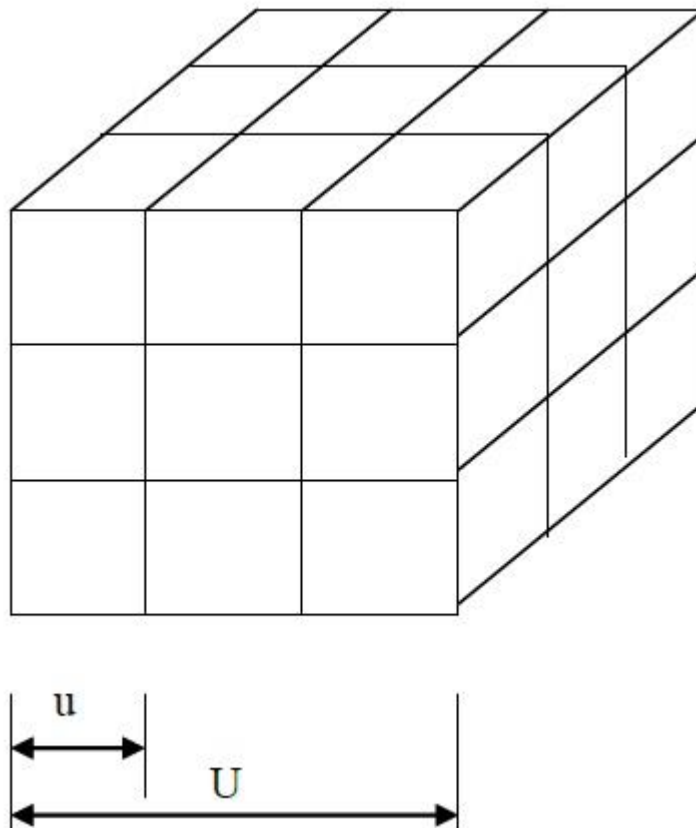
4.3 Teorie rozpojování

K správnému konstrukčnímu návrhu zařízení, je nutno alespoň přibližně vypočíst potřebnou energii nutnou k dosažení stanoveného cíle.

Vzhledem ke složitosti této problematiky je potřeba se spokojit s neúplně deterministickými teoriemi. Proto jsem vybral jen jednu, která je potřeba pro jemné mletí, kterým se budu dále zabírat v praktické části práce. [1]

4.3.1 Rittingerova hypotéza (povrchová)

Tato metoda patří mezi nejstarší hypotézy. Předpokládá, že práce potřebná na mletí materiálu je úměrná zvětšení povrchu. Jde o hypotézu, která je platná zejména pro jemné mletí materiálů.



Obr. 4-3 příklad dělení částice „U“ na menší částice „u“

Původní povrch:

$$S = 6 \cdot U^2 \quad 4-3$$

Nově vzniklý povrch pro $i=3$:

$$S' = (6 + 12) \cdot U^2 = 18 \cdot U^2 \quad 4-4$$

Nově vzniklý povrch pro $i=4$:

$$S'' = 24 \cdot U^2 \quad 4-5$$

Nově vzniklý povrch pro $i=5$:

$$S''' = 30 \cdot U^2 \quad 4-6$$

Počet dílčích rovin:

$$\left(\frac{U}{u} - 1\right) \cdot 3 \quad 4-7$$

Počet nových ploch:

$$\left(\frac{U}{u} - 1\right) \cdot 3 \cdot 2 \quad 4-8$$

Pro $i=10$

$$U = 10 \rightarrow S = 6 \cdot U^2 = 600 \quad 4-9$$

$$u = 1, i \rightarrow S' = 6 \cdot (10 - 1) \cdot 10^2 = 5400 \quad 4-10$$

U krychle povrch roste:

$$\left(\frac{U}{u} - 1\right) u \text{ koule } \left(\frac{D}{d}\right) [mm^{-1}] \quad 4-11$$

Nově vzniklý povrch je určen:

$$S' = 3 \cdot 2 \cdot \left(\frac{U}{u} - 1\right) \cdot U^2 = 6 \cdot \left(\frac{U}{u}\right) \cdot U^2 [J] \quad 4-12$$

Práce pro vytvoření nové plochy bude za předpokladu označení nově vzniklé plochy měřnou prací:

$$W_R = w_r' \cdot S' = 6 \cdot w_r' \cdot \left(\frac{U}{u} - 1\right) \cdot U^2 [J] \quad 4-13$$

Práce potřebná k rozpojení hmotnostní jednotky materiálu:

$$w_r = \frac{W_R}{\rho \cdot U^3} = \frac{6 \cdot w_r'}{\rho \cdot U} \cdot \left(\frac{U}{u} - 1\right) [J \cdot kg^{-1}] \quad 4-14$$

Pokusy neprokazují obecnou platnost Rittingerovy hypotézy. K energii takto spočítané je nutno připočíst energie spotřebované na deformace částic a na překonání tření částic. S těmito energiemi hypotéza nepočítá. Pro jemné mletí je teorie v uvedeném znění naprosto dostačující.

4.3.2 Bondova hypotéza

Bondova hypotéza vydaná roku 1952. Počítá energie v první fázi mletí úměrně objemu tělesa U^3 , ve finální fázi mletí počítá energie úměrně nově vznikajícímu povrchu.

Pro střední drcení platí:

$$W = W_D + W_P = k_0 \cdot \sqrt{U^3 \cdot U^2} = k_0 \cdot U^{2,5} \quad 4-15$$

Potřebná práce pro $Q[t]$ o počtu N zrn o rozměru U při stupni drcení i :

$$W_Q = k_0 \cdot U^{2,5} \cdot N = k_0 \cdot U^{2,5} \cdot \frac{Q}{\rho \cdot U^3} = k_B \cdot \frac{Q}{\sqrt{U}} \quad 4-16$$

Množství práce nutné k rozdrocení jednoho zrnka:

$$\text{Kick } W_K = k_k \cdot U^3 \quad \text{pro hrubé mletí}$$

$$\text{Bond } W_B = k_0 \cdot U^{2,5} \quad \text{pro středně hrubé mletí}$$

$$\text{Rittinger } W_R = k_R \cdot U^2 \quad \text{pro vysoce jemné mletí}$$

$$\text{Obecně: } W = k_p \cdot U^m \quad \text{kde } m=2 \div 3$$

4.4 Obecná diferenciální rovnice rozpojování

Charlesova rovnice rozpojování vydána roku 1957 zahrnuje veškeré známé rovnice a teorie: [1]

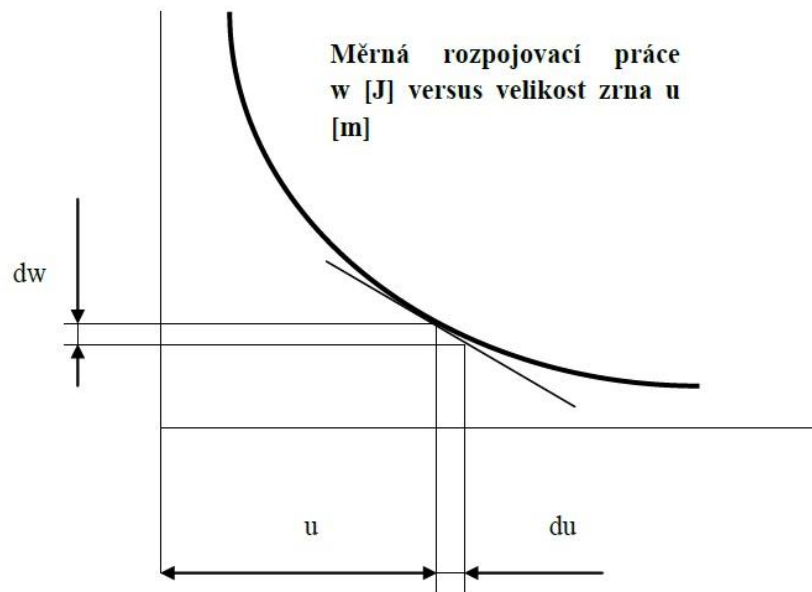
$$dw = -C \cdot \frac{du}{u^m} \quad 4-17$$

W měrná rozpojovací práce

u rozměr částic

C konstanta úměrnosti charakterizuje pevnost materiálu

m exponent je závislý na druhu dodávané energie př.: tlak, stříh



Obr. 4-4 Měrná rozpojovací práce „w“ v závislosti na velikosti částice „u“

Kickova hypotéza, $m=1$

$$w = -C \cdot \ln \frac{U}{u} = C \cdot \ln \frac{u}{U} \quad 4-18$$

Rittingerova hypotéza, $m=2$

$$w = C \cdot \left(\frac{1}{U} - \frac{1}{u} \right) \quad 4-19$$

Bondova hypotéza, $m=3/2$

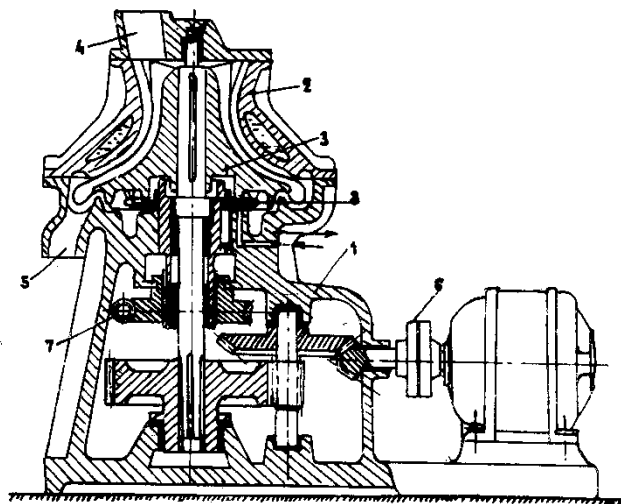
$$w = 2 \cdot C \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{u}} \right]_U^u = 2 \cdot C \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{u}} - \frac{1}{\sqrt{U}} \right) \quad 4-20$$

5 ZÁKLADNÍ DRUHY DEZINTEGRAČNÍCH PŘÍSTROJŮ

Drtiče a mlýny při své činnosti nahodile rozměňují částice a to má za následek nahodilé zastoupení velikosti částic. To jde popsat distribuční křivkou. Mlýny a drtiče musí dodat energii mletému materiálu, nejčastěji: tlaku, smyku a tření. Způsob dodání záleží na konstrukčním řešení daného zařízení. [7], [10]

5.1 Válcové a kuželové mlýny a drtiče

Hojně používaný typ jsou, dvoj válce. Ty se vyznačují hlavně velmi rozdílným skluzovým poměrem, Svými rozměry ($\frac{L}{D} \cong 1,4m$) a poměrně častým chlazením. Slouží hlavně pro jemné mletí past a různých přísad z gumárenského i jiného průmyslu. Kuželové drtiče mletou daný materiál pomocí tření.

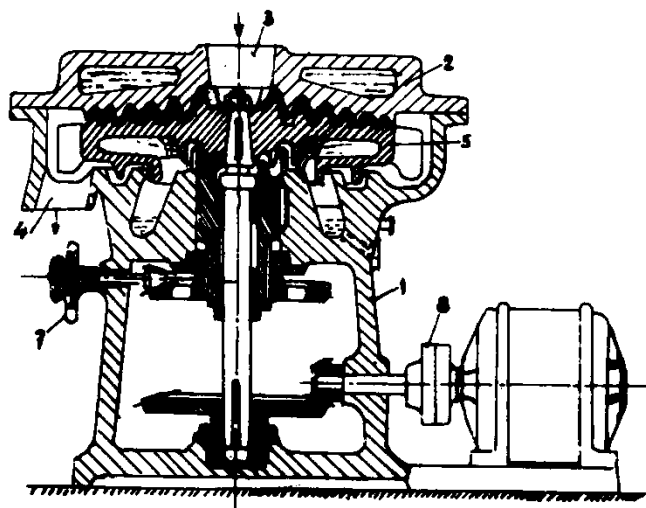


Obr. 5-1 Kuželový drtič

1-fréna, 2-komora, 3-rotor, 4-násypka, 5-výstup, 6-rozběhová spojka, 7-šroubový, 8-prsteneček

5.2 Talířové mlýny (Condux)

Princip mletí je přitlačit k sobě 2 disky. Rovinné či profilované na požadovanou vzdálenost a tím nadefinovat výslednou velikost zrn. Talířové mlýny jsou schopné mletí za sucha i mokra jsou podobné konstrukce a principu jako mlýny kuželové.

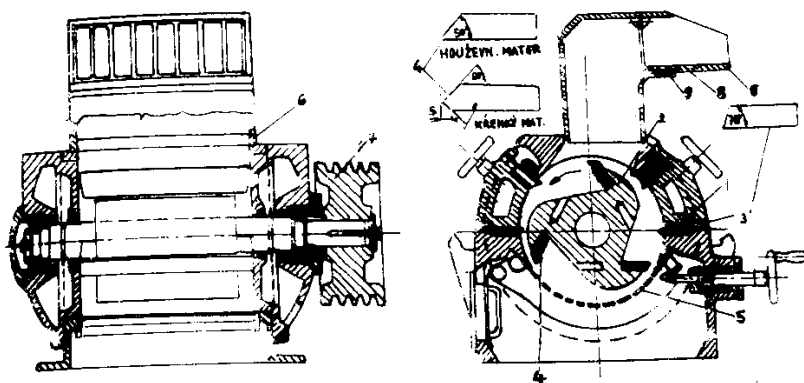


Obr. 5-2 Talířový mlýn

1-fréna, 2-víko, 3-plnicí otvor, 4-výstup, 5-rotor, 6-prsteneč, 7-ruční kolečko, 8-pružná spojka

5.3 Nožové mlýny

Pracují na principu rotujících nožů, které se těsně míjejí s noži upevněnými na statoru bubnu. Mechanická práce je předávána převážně řezným účinkem. Je nutno dbát nato aby nože nešli do záběru najednou, ale postupně z důvodů možného zaseknutí mlýna a jeho případném poškození a zajištění dostatečného míchání směsi. Spodní část bubnu bývá prakticky vždy užita přímo k třídění krájeného materiálu. Většinou jde o perforovaný plech nebo nějaká forma mřížoviny o potřebné velikosti otvorů.

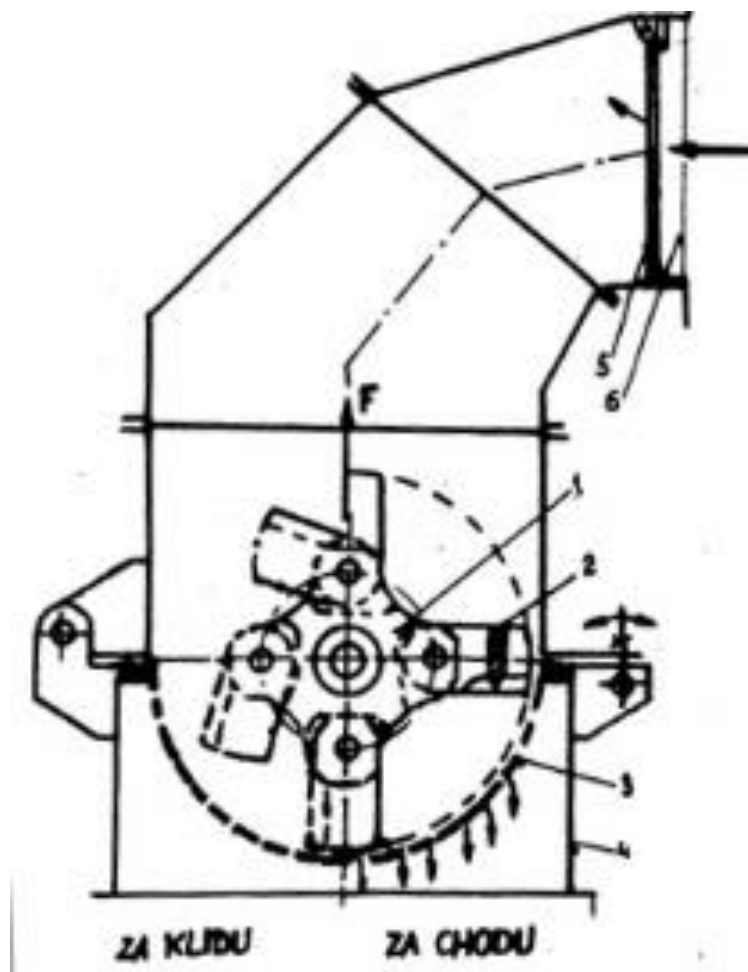


Obr. 5-3 nožový mlýn

1-skříň, 2-rotor, 3-statorový nůž, 4-rotorový nůž, 5-rošt, 6-násepka, 7-řemenice, 8-závěs, 9-magnetický odlučovač

5.4 Tlukadlové a kladivové mlýny

Tlukadlové mlýny předávají materiálu energii hlavně údery: kladiv, lamel či kolíčků. Tento pohyb má za následek i víření materiálu, který je tímto způsobem míchán. Konstrukce i velikosti se velmi různí, ale obecně lze konstatovat, že provoz tohoto typu zařízení je hlučný a hlavně u větších mlýnů je hluk neúnosný a proto se doporučuje provoz v samostatné místnosti. Materiál je opět zahříván a tak je nutné zajistit chlazení v zájmu ochrany jak zařízení tak i materiálu.



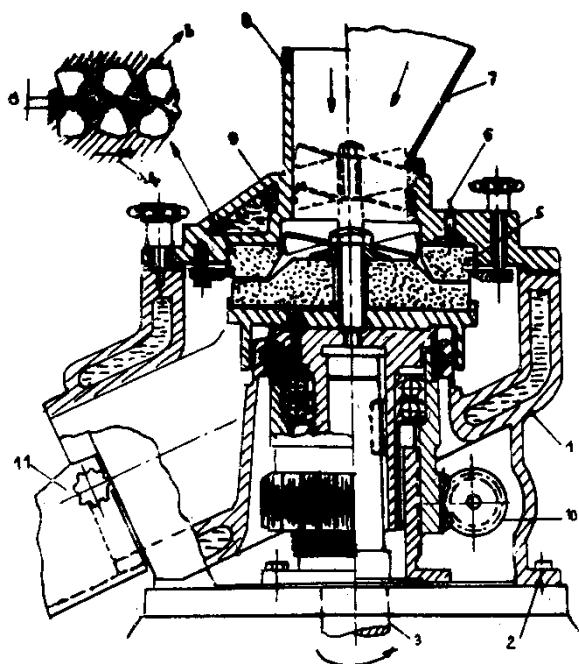
Obr. 5-4 Kladivový mlýn

1-rotor, 2-kladivo, 3-mříška, 4-těleso, 5-závěs, 6-hrdlo

5.5 Koloidní mlýny

Koloidní mlýny jsou zařízení, které slouží k přípravě supra jemných prášků. Jde o principiálně o talířový mlýn, ale s tím rozdílem že zde jsou disky z velmi jemnozrnných a velmi

tvrdých a otěruvzdorných materiálů (karborundu, syntetického korundu), které vzájemně proti obě rotují a v mokřém prostředí rozemílají materiál na prach. Možná dosažitelná jemnost je závislá na kvalitě hrubosti a tvrdosti brusných disků. Při dobrém vybavení se dá dosáhnout jemnosti respektive velikosti zrn **pod 1 μ m** takové rozměry, se již nazývají koloidní. S tímto pojmem se můžeme setkat v medicíně například koloidní stříbro, které se všech připravuje elektrolyticky a ne mletím. Použití takto jemných prášku je finančně náročné a proto se užívají v bohužel v malé míře, protože otvírají dveře k vývoji nové generace konstrukčních materiálů s pohádkovými vlastnostmi a astronomickými cenami.



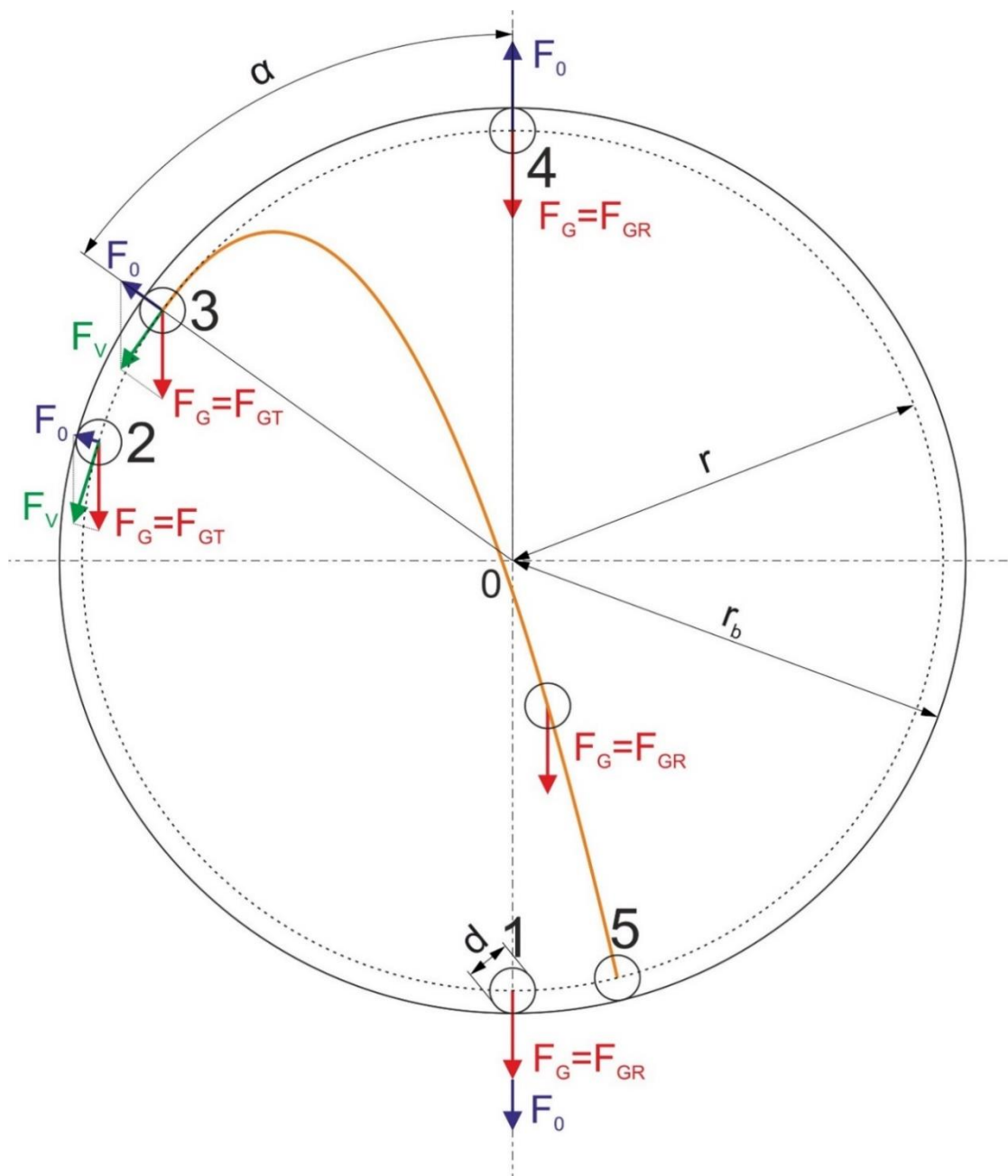
Obr. 5-5 koloidní mlýn

1-fréna, 2-stojan, 3-hřídel, 4-rotor, 5- stator, 6-víko, 7-nálevka, 8-nátrubek, 9-míchadlo, 10-převod, 11-odklopný žlab

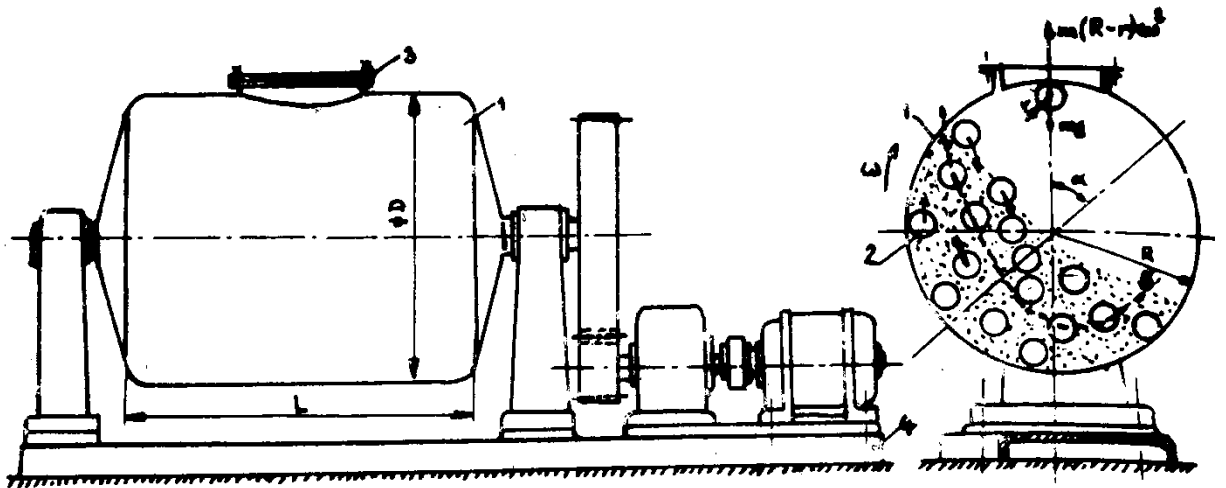
5.6 Kulové a kulově vibrační mlýny

Kulové mlýny fungují na principu otáčejícího se bubne. Buben se otáčí optimálními otáčkami dle zvoleného mlecího režimu (jeden ze 3). Tímto pohybem předává kinetickou energii jak koulím, tak i materiálu. Samotné mletí je způsobeno kombinací tření a úderů koulí jak o sebe sami tak o buben. Tyto mlýny se hojně užívají v průmyslu jako průběžné kulové mlýny k mletí velkého množství hornin či rud řádově jde o desítky tun za hodinu. Ale samozřejmě se konstruují i menší specializované mlýny k laboratorním potřebám. Ty slouží

převážné k mletí vzorků na potřebnou jemnost k možnosti dokonalého promíchání a následného rozboru či jiným aplikacím dle potřeby. Kulové vibrační mlýny jsou řešeny odpruženou nádobou s materiálem a koulemi. Nádoba vykonává složité pohyby tj. kmity a otáčí se kolem vlastní osy. Optimální otáčky bubne se pohybují od 1/2 až po 2/3 otáček kritických.



Obr. 6-1 Přítomné síly po dobu dezintegračního procesu



Obr. 5-6 kulový mlýn

1-buben, 2-koule, 3-víko, 4-základová deska, 5-dělicí křivka

5.6.1 Přibližný průměr mlecích tělísek a poloměr rotace tělísek.

$$d = \frac{2 \cdot r_b}{18} \div \frac{2 \cdot r_b}{24} [mm] \quad 5-1$$

$$r = \frac{2 \cdot r_b - d}{2} [mm] \quad 5-2$$

5.6.2 Výpočet úhlu odpadu tělíska v bubnu v optimální pozici.

$$m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) [N] \quad 5-3$$

$$m \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \cdot n^2 = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) [N] \quad 5-4$$

$$\cos(\alpha) = \frac{4 \cdot r \cdot \pi^2 \cdot n^2}{g} = 4,024 \cdot r \cdot n^2 \text{ pro } n [s^{-1}] \quad 5-5$$

$$\cos(\alpha) = \frac{r \cdot n^2}{894,5} \approx \frac{r \cdot n^2}{900} \text{ pro } n [min^{-1}] \quad 5-6$$

$$\alpha = \cos \left(\frac{r \cdot n^2}{894,5} \approx \frac{r \cdot n^2}{900} \right)^{-1} \text{ pro } n [min^{-1}] \quad 5-7$$

5.6.3 Výpočet úhlu odpadu tělíska v bubnu dle otáček a průměru.

$$n = \sqrt{\frac{\cos(\alpha)}{4,024 \cdot r}} = 0,498 \cdot \sqrt{\frac{\cos(\alpha)}{r}} \approx 0,5 \cdot \sqrt{\frac{\cos(\alpha)}{r}} [ot \cdot s^{-1}] \quad 5-8$$

$$n \approx 30 \cdot \sqrt{\frac{\cos(\alpha)}{r}} [ot \cdot min^{-1}] \quad 5-9$$

5.6.4 kritické otáčky kulového mlýna.

Kritické otáčky jsou takové otáčky, při kterých síla odstředivá je rovna síle přitažlivé a naopak. $F_O = F_G$. Při těchto otáčkách a otáčkách vyšších dochází k setrvání jak mletého materiálu, tak mlecích tělísek v podobné až stejné pozici vůči sobě za následku ustávání intenzity dezintegračního procesu.

$$F_O = F_{GR} [N] \quad 5-10$$

$$m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot g [N] \quad 5-11$$

$$r \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot n_{kr}^2 = g [m \cdot s^{-1}] \quad 5-12$$

$$n_{kr} = \frac{0,5}{\sqrt{r}} [s^{-1}] \quad 5-13$$

$$n_{kr} = \frac{30}{\sqrt{r}} [min^{-1}] \quad 5-14$$

Víše uvedené vzorce zanedbávají jisté odporové síly. Například interakci mletého materiálu a mlecích tělísek, dále tření materiálu a stěn bubny. Proto výsledné čísla neodpovídají stoprocentně realitě, ale chyba zanedbáním odporových sil je natolik malá, že se dají užít k přibližnému a hlavně funkčnímu výpočtu potřebných hodnot.

Za účelem dosažení nejdelší dráhy volného pádu a tudíž i dosažením maximálního množství kinetické energie, v tělísku obsažené lze odvodit optimální úhel odpoutání tělíska od stěny bubne.

$$\alpha_{opt} = 54^\circ 39' 51'' \cong 54^\circ 40' \quad 5-15$$

5.6.5 Optimální otáčky kulového mlýna obecně i pro různá prostředí.

Pracovní prostředí může být dvojího charakteru. Mletí v prostředí suchém s pouze vodnou vázanou na mletý materiál, případně vodní vlhkostí. Nebo mletí v prostředí mokřem. To neblaze omezuje míru dosažitelnosti jemnosti mletého materiálu, ale zabraňuje akumulaci nadkritického tepla při mletí snadno vznětlivých krystalických látek a minerálů. Toho je třeba dbát pro bezpečný provoz zařízení při mletí citlivých látek.

$$n_{opt} = 0,498 \cdot \sqrt{\frac{\cos(54^\circ 40')}{r}} = \frac{0,3791}{\sqrt{r}} \approx \frac{0,4}{\sqrt{r}} [ot \cdot s^{-1}] \quad 5-16$$

$$n_{opt} = \frac{22,8}{\sqrt{r}} [min^{-1}] \quad 5-17$$

$$n_{opt} = 0,7582 \cdot n_{kr} [ot \cdot min^{-1}] \quad 5-18$$

Pro prostředí mokré:

$$n_M = \frac{22-38}{\sqrt{2 \cdot r_b}} [\text{min}^{-1}] \quad 5-19$$

Pro prostředí suché:

$$n_M = \frac{25-34}{\sqrt{2 \cdot r_b}} [\text{min}^{-1}] \quad 5-20$$

5.6.6 Rozdělení tří základních režimů pohybu koulí.

Dle příslušných otáček rozlišujeme tři základní režimy mletí v kulových mlýnech. Přibližný rozdíl mezi režimy je $\pm 30\%$ od optimálních otáček.

Optimální otáčky pro kaskádový režim jsou nižší než optimální, ale maximálně o 30%.

$$n_{opt} \cdot 0,7 < n_{opt k} < n_{opt} \quad 5-21$$

Optimální otáčky pro vodopádový režim jsou v rozmezí $\pm 5\%$.

$$n_{opt v} \pm 1,05 \cdot n_{opt} \quad 5-22$$

Optimální otáčky pro rotační režim jsou vyšší než optimální, ale maximálně o 30%.

$$n_{opt} \cdot 1,3 > n_{opt r} > n_{opt} \quad 5-23$$

5.6.7 Popis pozic a výpočty polohových a kinetických energií pro výpočet výkonu

$$h_2 = r + r \cdot \cos(\alpha_2) [m] \quad 5-24$$

$$h_3 = r + r \cdot \cos(\alpha_3) [m] \quad 5-25$$

$$h_4 = 2 \cdot r [m] \quad 5-26$$

$$h_5 = r - r \cdot \sin(\alpha_5) [m] \quad 5-27$$

$$\Delta h = h_3 - h_5 [m] \quad 5-28$$

$$\Delta h = r + r \cdot \cos(\alpha_3) - (r - r \cdot \sin(\alpha_5)) [m] \quad 5-29$$

$$\Delta h = r \cdot \sin(\alpha_3) + r \cdot \sin(\alpha_5) [m] \quad 5-30$$

$$\Delta l_{31} = r \cdot \cos(\alpha) [m] \quad 5-31$$

$$\Delta l_{23} = r \cdot \cos(\alpha_2) [m] \quad 5-32$$

$$\Delta l_{15} = r \cdot \cos(\alpha_5) [m] \quad 5-33$$

$$\Delta l_{35} = \Delta l_{31} + \Delta l_{15} [m] \quad 5-34$$

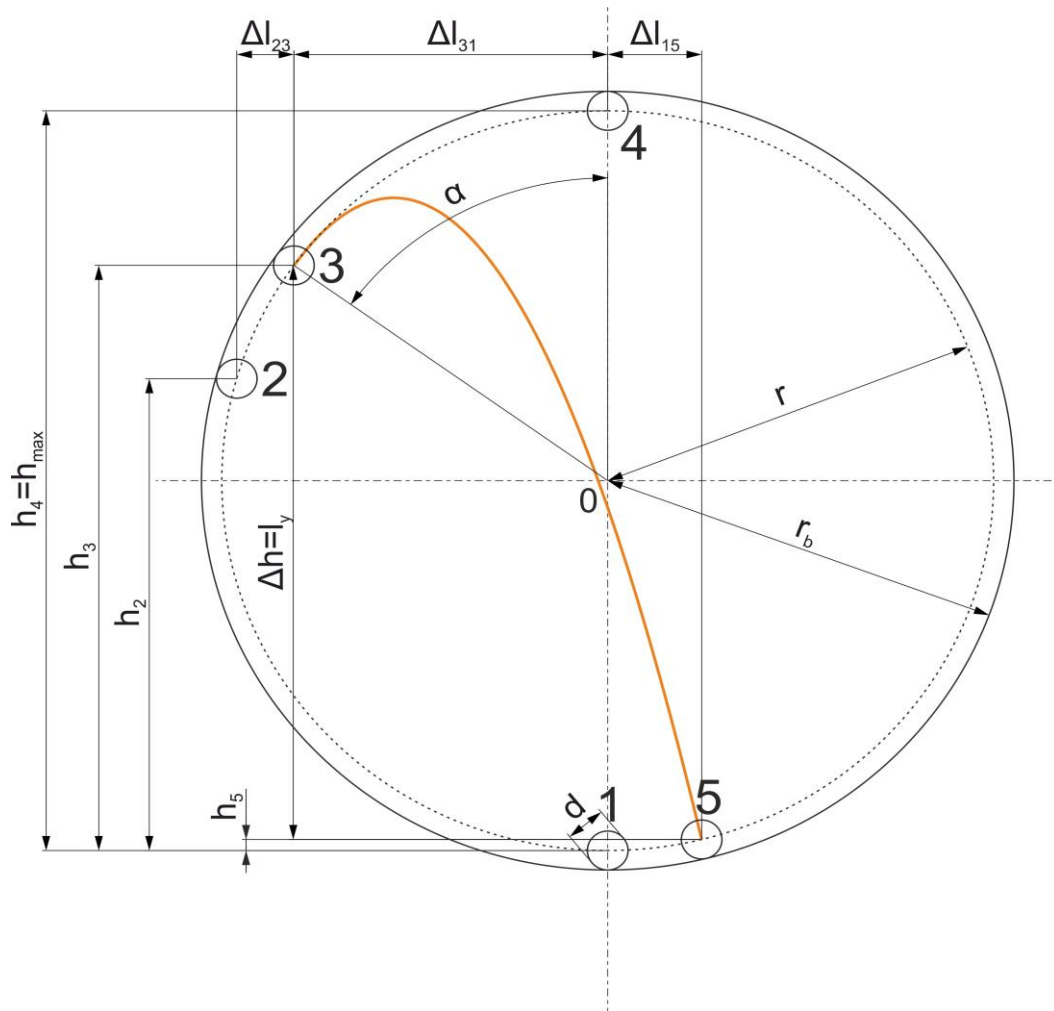
$$\Delta l_{35} = r \cdot \cos(\alpha) + r \cdot \cos(\alpha_5) [m] \quad 5-35$$

$$\Delta E_p = m_1 \cdot g \cdot h_3 - m_1 \cdot g \cdot h_5 [J] \quad 5-36$$

$$\Delta E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} [J] \quad 5-37$$

$$\Delta E_c = \Delta E_p + \Delta E_k = [J] \quad 5-38$$

$$p_t \approx \Delta E_c \cdot \frac{n_{krit}}{60} [W] \quad 5-39$$



Obr. 6-2 Přítomné síly dezintegračního procesu

6. SOURN TEORETICKÉ ČÁSTI

Čtenář, který pozorně četl obsah práce výše uvedené, by měl znát nebo být schopný popsat základní vlastnosti tuhých látek dle fyzikálních, mechanických a chemických vlastností a částečně i jejich projevy. Dále byl seznámen s obsáhlou problematikou mechanických vlastností sypkých materiálů jejich veličinách. S metodou značení a rozlišování sypkých materiálů dle norem FEM Způsobem měření vlastností těchto materiálů. Dále zde byla rozebrána problematika dělení čili rozměňování makroskopických částic a důležité vlastnosti významně ovlivňující proces dělení. Byli zde uvedeny i základní druhy přístrojů, které se užívají k dělení materiálů a jejich základní konstrukcí a popisem vlastností.

V druhé části bude rozebrána konstrukce kulového mlýnu, jak po teoretické stránce, tak po stránce praktické.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

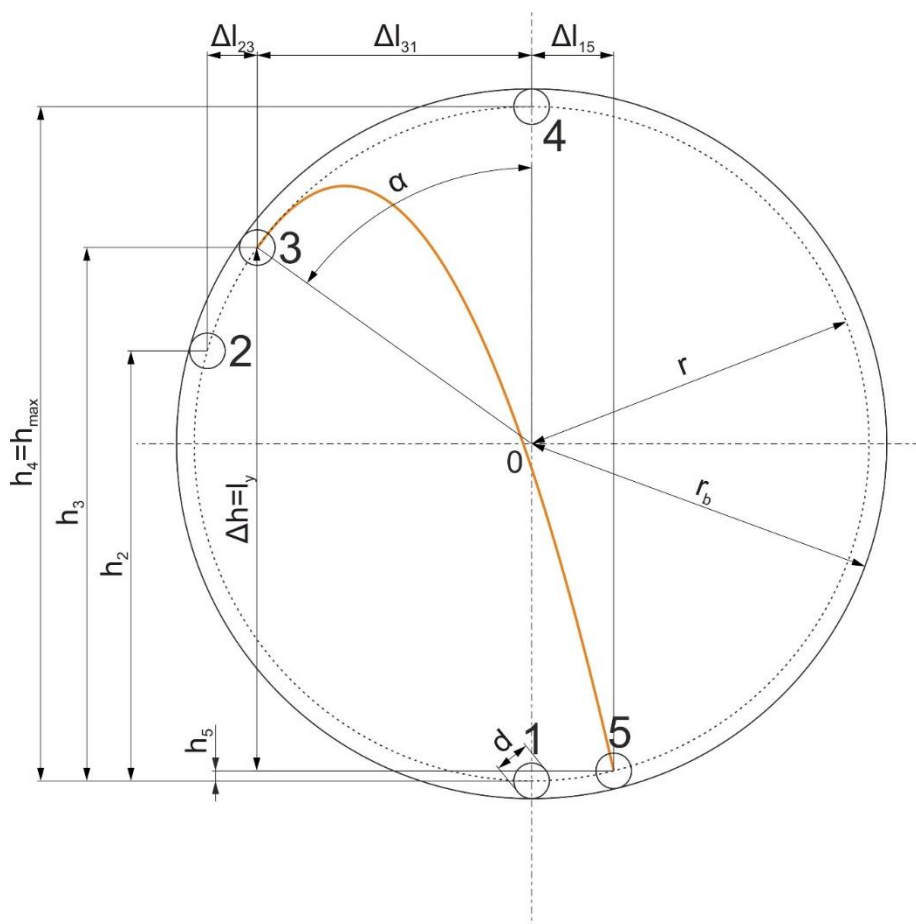
6 CÍL PRÁCE

Cílem je návrh a konstrukce praktického víceúčelového kulového mlýnu s libovolně nastavitelnou rychlostí otáčení, dále s nastavitelnou roztečí podpěrných válců. To umožňuje užití libovolně velkého bubnu. Pro optimální otáčky takto zvoleného bubnu jsou zde uvedeny všechny potřebné vztahy a souvislosti. Dále je možné do obvodů zapojit časovač. Pro omezení pracovní činnosti v nočních hodinách. Je to výhodné z důvodů časové náročnosti procesu dezintegrace.

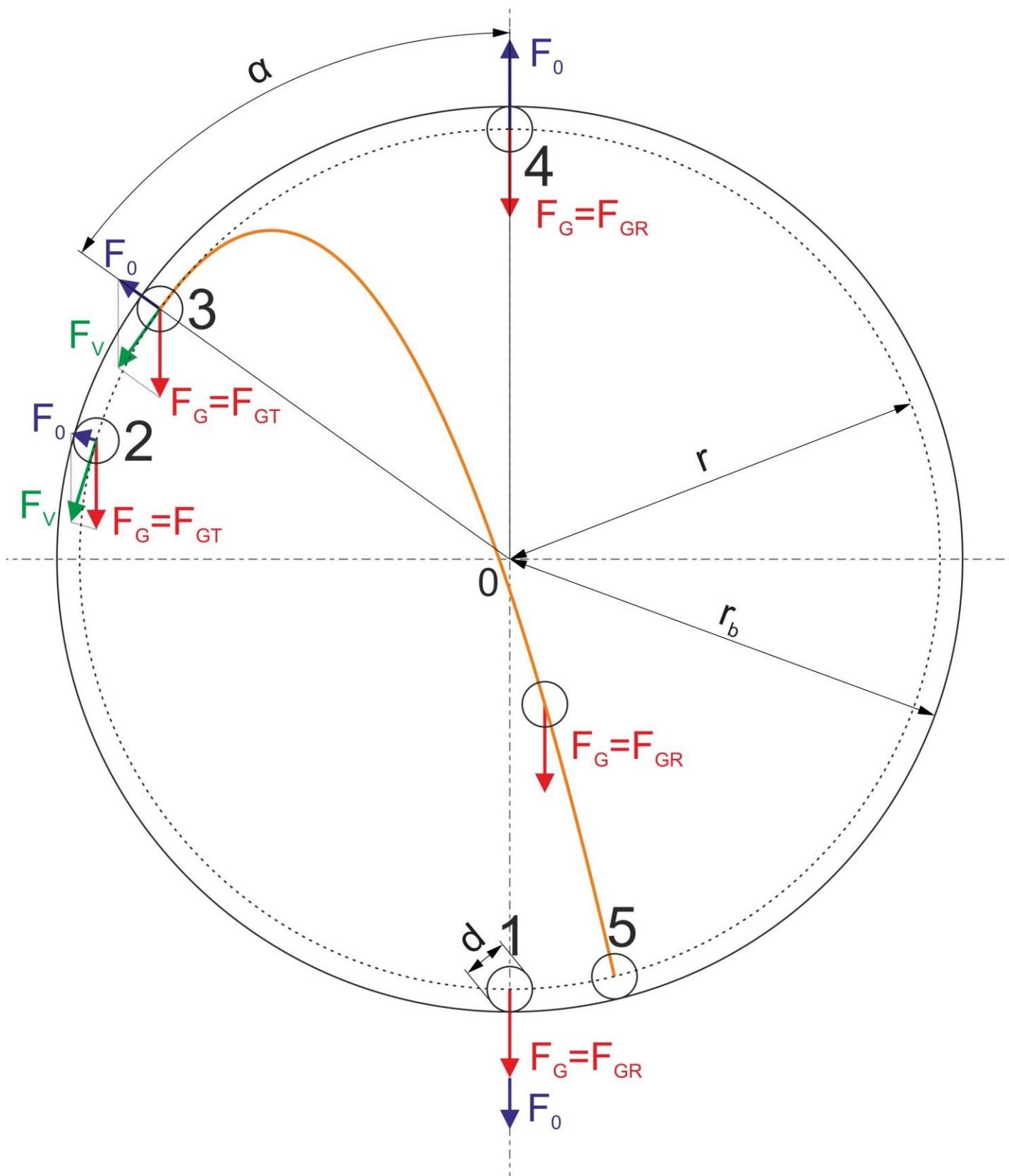
7 VÝPOČETNÍ ČÁST MECHANICKÉHO CHOVÁNÍ

V této části jsou spočítány veškeré potřebné vztahy, popisující proměnlivě působící síly na kulový mlýn, mlecí tělíska a mletý materiál samotný v průběhu procesu. Dále je zde vy počtena minimální životnost ložisek v závislosti na statickém, ale i dynamickém zatížení mlecím procesem a mechanickou konstrukcí kulového mlýnu. Jedná se především o síly vyvozené gravitačním působením, ale i působením elektromotoru jako pohonu.

Mlecí tělíska jsou unášeny rotačním pohybem bubnu. To vyvolává odstředivou sílu působící na mlecí tělíska a ty tak ulpívají na povrchu bubnu, do té doby dokud se tíhová síla vyvolána gravitační silou naší planety nevyrovná a následně nepřevládne. Převládnutí tíhové síly doprovází akcelerace tělísek po celé parabolické dráze volného pádu a následně zvyšování kinetické energie, která se předá při dopadu tělíska. Jak je zjevné z následujícího obrázku. [1], [11], [12]



Obr. 7-1 Vzájemná pozice tělísek závislá na optimálních otáčkách mlecích režimů



Obr. 7-2 Přítomné síly po dobu dezintegračního procesu

7.1 Návrh a výpočet parametrů pro bubnu o průměru 200mm

7.1.1 Průměr mlecích koulí

$$d = \frac{2 \cdot r_b}{18} \div \frac{2 \cdot r_b}{24} [mm] \quad 7-1$$

$$d = \frac{2 \cdot 96}{18} \div \frac{2 \cdot 96}{24} = 10,6 \div 8 [mm]$$

$$m_{t10} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \cdot \rho_t [kg] \quad 7-2$$

$$m_{t10} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,01^3}{3} \cdot 7860 = 4,1 \cdot 10^{-3} kg$$

Průměr mlecích tělísek volím 10mm. Vypočtená hmotnost jednoho mlecího tělíška v podobě ocelové kuličky je 4,1g.

7.1.2 Poloměr oběžné kružnice mlecích tělísek

$$r = r_b - \frac{d}{2} [mm] \quad 7-3$$

$$r = 96 - \frac{10}{2} = 91 [mm]$$

Vypočtená dráha rotace mlecích tělísek má poloměr 91mm = 0.091m.

7.1.3 Kritické otáčky bubny

$$n_{kr} = \frac{30}{\sqrt{r}} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-4$$

$$n_{kr} = \frac{30}{\sqrt{0,091}} = 99,45 ot \cdot min^{-1}$$

Kritické otáčky mlecích tělísek jsou 99,45ot/min = 1,66ot/s.

7.1.4 Optimální otáčky a rychlosti pro různé režimy

$$n_{opt} = 0,7582 \cdot n_{kr} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-5$$

$$n_{opt} = 0,7582 \cdot 99,45 = 75,40 ot \cdot min^{-1}$$

Optimální otáčky pro kaskádový režim jsou nižší než optimální, ale maximálně o 30%.

$$n_{opt} \cdot 0,7 < n_{opt k} < n_{opt} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-6$$

$$n_{opt k} \Rightarrow 55 ot \cdot min^{-1}$$

$$v_{opt k} = \frac{n_{opt k}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r [m \cdot s^{-1}] \quad 7-7$$

$$v_{opt k} = \frac{55}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,091 = 0,526 m \cdot s^{-1}$$

Optimální otáčky pro vodopádový režim jsou v rozmezí $\pm 5\%$.

$$n_{opt v} \pm 1,05 \cdot n_{opt} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-8$$

$$n_{opt v} \Rightarrow 75 ot \cdot min^{-1}$$

$$v_{opt v} = \frac{n_{opt v}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r [m \cdot s^{-1}] \quad 7-9$$

$$v_{opt v} = \frac{75}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,091 = 0,715 m \cdot s^{-1}$$

Optimální otáčky pro rotační režim jsou vyšší než optimální, ale maximálně o 30%.

$$n_{opt} \cdot 1,3 > n_{opt r} > n_{opt} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-10$$

$$n_{opt r} \Rightarrow 100 ot \cdot min^{-1}$$

$$v_{opt r} = \frac{n_{opt r}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r [m \cdot s^{-1}] \quad 7-11$$

$$v_{opt r} = \frac{100}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,091 = 0,950 m \cdot s^{-1}$$

7.1.5 Optimální poměrná hmotnost materiálu a mlecích tělísek bubnu

$$\mu = \frac{m_m}{m_t} = 0,25 \div 0,33 [kg] \quad 7-12$$

$$\mu = 15 = \frac{m_m}{m_t} kg \quad 7-13$$

$$m_m \cong 3,75 kg$$

$$m_t \cong 11,25 kg$$

Vypočtená hmotnost mlecích tělísek je 11,25 kg a hmotnost mletého materiálu je 3,75 kg. To činí orientačně 2813 ocelových kuliček s průměrem 10mm.

7.1.6 Objemy materiálů a mlecích tělísek s procentuální zaplněností bubnu

$$V_b = S \cdot l_b [m^3] \quad 7-14$$

$$V_b = 0,029 \cdot 0,261 = 7,57 \cdot 10^{-3} m^3$$

Jako melivo se v tomto případě uvažuje křemen s hustotou $\rho = 2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} = \frac{3,75}{2600} = 1,44 \cdot 10^{-3} m^3 \quad 7-15$$

Jako mlecí tělíska se v tomto případě uvažuje ocelová koule s hustotou $\rho = 7860 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

$$V_t = \frac{m_t}{\rho_t} = \frac{11,25}{7860} = 1,43 \cdot 10^{-3} [m^3] \quad 7-16$$

$$V_c = V_m + V_t = 1,44 \cdot 10^{-3} + 1,43 \cdot 10^{-3} [m^3] \quad 7-17$$

$$V_c = 2,87 \cdot 10^{-3} m^3$$

$$Z = \frac{V_b}{V_c} \cdot 100 = \frac{7,57 \cdot 10^{-3}}{2,87 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 38\%$$

Celková náplň bubnu je $2,87 \cdot 10^{-3} m^3$. Celkový objem bubnu je $7,57 \cdot 10^{-3} m^3$. Celková zaplněnost bubnu s průměrem 200mm je 38%.

7.1.7 Síly působící na tělísko v bubnu kulového mlýnu o průměru 200mm.

$$\alpha_2 = \cos \left(\frac{r \cdot n_{opt} k^2}{894,5} \right)^{-1} [^\circ] \quad 7-18$$

$$\alpha_2 = \cos \left(\frac{0,091 \cdot 55^2}{894,5} \right)^{-1} = 74^\circ$$

$$\alpha_3 = \cos \left(\frac{r \cdot n_{opt} v^2}{894,5} \right)^{-1} [^\circ] \quad 7-19$$

$$\alpha_3 = \cos \left(\frac{0,044 \cdot 75^2}{894,5} \right)^{-1} = 54^\circ 40' [^\circ]$$

$$y = x \cdot \tan \left(\alpha - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos(\alpha)^2} \right) [m] \quad 7-20$$

$$\alpha_5 = (\text{z balistické křivky}) \approx 14^\circ$$

$$F_G = m \cdot g [N] \quad 7-21$$

$$F_G = 0,004 \cdot 9,81 = 0,0392 \text{ N}$$

$$F_{GR} = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) [N] \quad 7-22$$

$$F_{GR} = 0,004 \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 0,0392 \text{ N}$$

$$F_{GT} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) [N] \quad 7-23$$

$$F_{GT} = 0,004 \cdot 9,81 \cdot \sin(90) = 0,0392 \text{ N}$$

$$F_O = m \cdot r \cdot \omega^2 [N] \quad 7-24$$

$$F_{O1} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60}\right)^2 [N] \quad 7-25$$

$$F_{O1} = 0,004 \cdot 0,091 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 0}{60}\right)^2 = 0 \text{ N}$$

$$F_{V1} = \sqrt{F_{O1}^2 + 2 \cdot F_{O1} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_1) + F_G^2} = 0 [N] \quad 7-26$$

$$F_{V1} = \sqrt{0^2 - 2 \cdot 0 \cdot 0,0392 \cdot \cos(180^\circ - 0) + 0,0392^2} = 0,0392 \text{ N}$$

$$F_{O2} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60}\right)^2 [N] \quad 7-27$$

$$F_{O2} = 0,004 \cdot 0,091 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 55}{60}\right)^2 = 0,0121 \text{ N}$$

$$F_{V2} = \sqrt{F_{O2}^2 + 2 \cdot F_{O2} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_2) + F_G^2} [N] \quad 7-28$$

$$F_{V2} = \sqrt{0,0121^2 + 2 \cdot 0,0121 \cdot 0,0392 \cdot \cos(180^\circ - 73^\circ 29') + 0,0392^2} = 0,0374 \text{ N}$$

$$F_{O3} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_3}{60}\right)^2 = [N] \quad 7-29$$

$$F_{O3} = 0,004 \cdot 0,091 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 75}{60}\right)^2 = 0,0225 \text{ N}$$

$$F_{V3} = \sqrt{F_{O3}^2 + 2 \cdot F_{O3} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_3) + F_G^2} [N] \quad 7-30$$

$$F_{V3} = \sqrt{0,0225^2 + 2 \cdot 0,0225 \cdot 0,0392 \cdot \cos(180^\circ - 54^\circ 40') + 0,0392^2} = 0,0319 \text{ N}$$

$$F_{O4} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_4}{60}\right)^2 = [N] \quad 7-31$$

$$F_{O4} = 0,004 \cdot 0,091 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 100}{60}\right)^2 = 0,0399 \text{ N}$$

$$F_{V4} = \sqrt{F_{O3}^2 + 2 \cdot F_{O3} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_3) + F_G^2} [N] \quad 7-32$$

$$F_{V4} = \sqrt{0,0399^2 + 2 \cdot 0,0399 \cdot 0,0392 \cdot \cos(180^\circ - 0) + 0,0392^2} = 0,007 \text{ N}$$

Z výpočtů vyplývá, že odstředivé a přitažlivé síly se vzájemným působením složí za následku vytvoření výslednice sil. Tato výslednice má vektor rovnoběžný s tečnou přímkou kružnice v bodě dotyku tělíska pro které se dané síly počítají. Výjimkou jsou body 1 a 4 kde směr výslednice sil je totožný se směrem odstředivé síly.

7.1.8 Přibližný minimální teoretický výkon potřebný pro mletí a poloha tělíska

$$h_2 = r + r \cdot \cos(\alpha_2) [m] \quad 7-33$$

$$h_2 = 0,091 + 0,091 \cdot \cos(74^\circ) = 0,116 \text{ m}$$

$$h_3 = r + r \cdot \cos(\alpha_3) [m] \quad 7-34$$

$$h_3 = 0,091 + 0,091 \cdot \cos(54^\circ 40') = 0,144 \text{ m}$$

$$h_4 = h_{max} = 2 \cdot r [m] \quad 7-35$$

$$h_4 = 2 \cdot 0,091 = 0,182 \text{ m}$$

$$h_5 = r - r \cdot \cos(\alpha_5) [m] \quad 7-36$$

$$h_5 = 0,091 - 0,091 \cdot \cos(14^\circ) = 0,003 \text{ m}$$

$$\Delta h = h_3 - h_5 [m] \quad 7-37$$

$$\Delta h = 0,144 - 0,003 = 0,141 \text{ m}$$

$$\Delta l_{31} = r \cdot \sin(\alpha) [m] \quad 7-38$$

$$\Delta l_{31} = 0,091 \cdot \sin(54^\circ 40') = 0,0742 \text{ m}$$

$$\Delta l_{23} = r \cdot \sin(\alpha_2) [m] \quad 7-39$$

$$\Delta l_{23} = 0,091 \cdot \sin(74^\circ) = 0,087 \text{ m}$$

$$\Delta l_{15} = r \cdot \sin(\alpha_5) [m] \quad 7-40$$

$$\Delta l_{15} = 0,091 \cdot \sin(14^\circ) = 0,022 \text{ m}$$

$$\Delta l_{35} = \Delta l_{31} + \Delta l_{15} [m] \quad 7-41$$

$$\Delta l_{35} = 0,0742 + 0,022 = 0,0962 \text{ m}$$

Energie potřebná pro kaskádový režim mletí:

$$\Delta E_{p k} = m_1 \cdot g \cdot h_2 [J] \quad 7-42$$

$$\Delta E_{p k} = 15 \cdot 9,81 \cdot 0,116 \text{ J}$$

$$\Delta E_{p k} = 17,1 \text{ J}$$

$$\Delta E_{k k} = \frac{m \cdot v_{opt k}^2}{2} [J] \quad 7-43$$

$$\Delta E_{k k} = \frac{15 \cdot 0,526^2}{2} = 2,1 \text{ J}$$

$$\Delta E_{c k} = \Delta E_{p k} + \Delta E_{k k} = 17,1 + 2,1 = 19,2 \text{ J} \quad 7-44$$

$$p_{t k} \approx \Delta E_{c k} \cdot \frac{n_{opt k}}{60} [W] \quad 7-45$$

$$p_{t k} \approx 19,2 \cdot \frac{55}{60} = 17,6 \text{ W}$$

Energie potřebná pro vodopádový režim mletí:

$$\Delta E_{pv} = m_1 \cdot g \cdot h_3 - m_1 \cdot g \cdot h_5 [J] \quad 7-46$$

$$\Delta E_{pv} = 15 \cdot 9,81 \cdot 0,144 - 15 \cdot 9,81 \cdot 0,003 J$$

$$\Delta E_{pv} = 20,75 J$$

$$\Delta E_{kv} = \frac{m \cdot v_{optv}^2}{2} [J] \quad 7-47$$

$$\Delta E_{kv} = \frac{15 \cdot 0,715^2}{2} = 3,84 J$$

$$\Delta E_{cv} = \Delta E_{pv} + \Delta E_{kv} = 20,75 + 3,84 = 24,59 J \quad 7-48$$

$$p_{tv} \approx \Delta E_{cv} \cdot \frac{n_{optv}}{60} [W] \quad 7-49$$

$$p_{tv} \approx 24,59 \cdot \frac{75}{60} = 30,73 W$$

Energie potřebná pro rotační režim mletí: J

$$\Delta E_{pr} = m_1 \cdot g \cdot h_4 [J] \quad 7-50$$

$$\Delta E_{pr} = 15 \cdot 9,81 \cdot 0,19 [J]$$

$$\Delta E_{pr} = 28,0 J$$

$$\Delta E_{kr} = \frac{m \cdot v_{opt r}^2}{2} [J] \quad 7-51$$

$$\Delta E_{kr} = \frac{15 \cdot 0,95^2}{2} = 6,8 J$$

$$\Delta E_{cr} = \Delta E_{pr} + \Delta E_{kr} = 28 + 6,8 = 34,8 J \quad 7-52$$

$$p_{tr} \approx \Delta E_{cr} \cdot \frac{n_{opt r}}{60} [W] \quad 7-53$$

$$p_{tr} \approx 34,8 \cdot \frac{100}{60} = 58 W$$

Přibližný teoretický výkon spočítaný z rozdílů polohové a kinetické energie potřebné k zvednutí náplně a mlecích tělísek za sekundu při rotačním režimu mletí je roven 58 W. Toto číslo bylo spočteno bez zohlednění ztrát způsobených odporovými silami. A zároveň nezohledňuje zbytkovou kinetickou a polohovou energii tělísek po dopadu na dno bubnu nebo po oběhu kolem bubnu.

7.1.9 Minimální reálný příkon elektromotoru

$$P_s = \frac{P_{tr}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n} [kW] \quad 7-54$$

$$P_s = \frac{P_t}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5} \approx \frac{58}{0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,64 \cdot 0,8} \approx 393 \text{ W}$$

Reálný příkon elektromotoru se rovná 393 W za předpokladu užitých účinností:

$\eta_1=0,6$ Účinnost přenosu energie na objem bubnu

$\eta_2=0,8$ Účinnost uložení převodů a hřídelí

$\eta_3=0,6$ Účinnost řemenového systému

$\eta_4=0,64$ Účinnost převodů v převodovém soustrojí

$\eta_5=0,8$ a účinnost elektromotoru

7.2 Návrh a výpočet parametrů pro bubnu o průměru 150mm

7.2.1 Průměr mlecích koulí

$$d = \frac{2 \cdot r_b}{18} \div \frac{2 \cdot r_b}{24} [mm] \quad 7-55$$

$$d = \frac{2 \cdot 71}{18} \div \frac{2 \cdot 71}{24} = 7,9 \div 5,9 \text{ mm}$$

$$m_{t6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \cdot \rho_t [kg] \quad 7-56$$

$$m_{t6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,003^3}{3} \cdot \rho_t = 8,9 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

Průměr mlecích tělísek volím 6mm. Vypočtená hmotnost jednoho mlecího tělíska v podobě ocelové kuličky je 0,89g.

7.2.2 Poloměr oběžné kružnice mlecích tělísek

$$r = r_b - \frac{d}{2} [mm] \quad 7-57$$

$$r = 71 - \frac{6}{2} = 68 \text{ mm}$$

Vypočtená dráha rotace mlecích tělísek má poloměr 68mm = 0.068m.

7.2.3 Kritické otáčky bubnu

$$n_{kr} = \frac{30}{\sqrt{r}} [\text{min}^{-1}] \quad 7-58$$

$$n_{kr} = \frac{30}{\sqrt{0,068}} = 115 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Kritické otáčky mlecích tělísek jsou $115 \text{ ot/min} = 1,45 \text{ ot/s}$.

7.2.4 Optimální otáčky pro různé režimy

$$n_{opt} = 0,7582 \cdot n_{kr} [\text{min}^{-1}] \quad 7-59$$

$$n_{opt} = 0,7582 \cdot 115 = 87,2 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Optimální otáčky pro kaskádový režim jsou nižší než optimální, ale maximálně o 30%.

$$n_{opt} \cdot 0,7 < n_{opt k} < n_{opt} [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 7-60$$

$$n_{opt k} \Rightarrow 65 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$v_{opt k} = \frac{n_{opt k}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 7-61$$

$$v_{opt k} = \frac{55}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,068 = 0,43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Optimální otáčky pro vodopádový režim jsou v rozmezí $\pm 5\%$.

$$n_{opt v} \pm 1,05 \cdot n_{opt} [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 7-62$$

$$n_{opt v} \Rightarrow 87 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$v_{opt v} = \frac{n_{opt v}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 7-63$$

$$v_{opt v} = \frac{75}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,068 = 0,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Optimální otáčky pro rotační režim jsou vyšší než optimální, ale maximálně o 30%.

$$n_{opt} \cdot 1,3 > n_{opt r} > n_{opt} [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 7-64$$

$$n_{opt r} \Rightarrow 114 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$v_{opt r} = \frac{n_{opt r}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 7-65$$

$$v_{opt r} = \frac{100}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,068 = 0,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

7.2.5 Optimální poměrná hmotnost materiálu a mlecích tělísek bubnu

m_m hmotnost materiálu

m_t hmotnost mlecích tělísek

$$\mu = \frac{m_m}{m_t} = 0,25 \div 0,33 [kg] \quad 7-66$$

$$\mu = 9 = \frac{m_m}{m_t} kg \quad 7-67$$

$$m_m \cong 3 \text{ kg}$$

$$m_t \cong 6 \text{ kg}$$

Vypočtená hmotnost mlecích tělísek je 6 kg a hmotnost mletého materiálu je 3kg. To činí orientačně 6742 ocelových kuliček s průměrem 6mm.

7.2.6 Objemy materiálů a mlecích tělísek s procentuální zaplněností bubnu

$$V_b = S \cdot l_b [m^3] \quad 7-68$$

$$V_b = 0,016 \cdot 0,259 = 4,14 \cdot 10^{-3} m^3$$

Jako melivo se v tomto případě uvažuje křemen s hustotou $\rho = 2600 \text{ kg} \cdot m^{-3}$.

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} = \frac{3}{2600} = 1,15 \cdot 10^{-3} m^3 \quad 7-69$$

Jako mlecí tělíska se v tomto případě uvažuje ocelová koule s hustotou $\rho = 7860 \text{ kg} \cdot m^{-3}$.

$$V_t = \frac{m_t}{\rho_t} = \frac{6}{7860} = 7,63 \cdot 10^{-4} m^3 \quad 7-70$$

$$V_c = V_m + V_t = 1,15 \cdot 10^{-3} + 7,63 \cdot 10^{-4} [m^3] \quad 7-71$$

$$V_c = 1,91 \cdot 10^{-3} m^3$$

$$Z = \frac{V_b}{V_c} \cdot 100 = \frac{4,14 \cdot 10^{-3}}{1,91 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 46\%$$

Celková náplň bubnu je $1,91 \cdot 10^{-3} m^3$. Celkový objem bubnu je $4,14 \cdot 10^{-3} m^3$. Celková zaplněnost bubnu s průměrem 150mm je 46%.

7.2.7 Síly působící na tělísko v bubnu kulového mlýnu o průměru 150mm.

$$\alpha_2 = \cos\left(\frac{r \cdot n_{opt} k^2}{894,5}\right)^{-1} [^\circ] \quad 7-72$$

$$\alpha_2 = \cos\left(\frac{0,068 \cdot 61^2}{894,5}\right)^{-1} = 73^\circ 34'$$

$$\alpha_3 = \cos\left(\frac{r \cdot n_{opt} v^2}{894,5}\right)^{-1} [^\circ] \quad 7-73$$

$$\alpha_3 = \cos\left(\frac{0,068 \cdot 87^2}{894,5}\right)^{-1} = 54^\circ 52'$$

$$y = x \cdot \tan\left(\alpha - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos(\alpha)^2}\right) [m] \quad 7-74$$

$$\alpha_5 = (\text{z balistické křivky}) \approx 14^\circ$$

$$F_G = m \cdot g [N] \quad 7-75$$

$$F_G = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{GR} = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) [N] \quad 7-76$$

$$F_{GR} = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{GT} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) [N] \quad 7-77$$

$$F_{GT} = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 \cdot \sin(90) = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_O = m \cdot r \cdot \omega^2 [N] \quad 7-78$$

$$F_{O1} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60}\right)^2 [N] \quad 7-79$$

$$F_{O1} = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,068 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 0}{60}\right)^2 [N]$$

$$F_{V1} = \sqrt{F_{O1}^2 + 2 \cdot F_{O1} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_1) + F_G^2} = 0 \text{ N} \quad 7-80$$

$$F_{V1} = \sqrt{0^2 - 2 \cdot 0 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(180^\circ - 0) + (8,7 \cdot 10^{-3})^2} = 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{O2} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60}\right)^2 [\text{N}] \quad 7-81$$

$$F_{O2} = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,068 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 61}{60}\right)^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{V2} = \sqrt{F_{O2}^2 + 2 \cdot F_{O2} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_2) + F_G^2} [\text{N}] \quad 7-82$$

$$F_{V2}$$

$$= \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot (2,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (8,7 \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(180^\circ - 73^\circ 32') + (8,7 \cdot 10^{-3})^2}$$

$$= 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{O3} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_3}{60}\right)^2 [\text{N}] \quad 7-83$$

$$F_{O3} = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,068 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 87}{60}\right)^2 = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{V3} = \sqrt{F_{O3}^2 + 2 \cdot F_{O3} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_3) + F_G^2} [\text{N}] \quad 7-84$$

$$F_{V3}$$

$$= \sqrt{(5,0 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot (5,0 \cdot 10^{-3}) \cdot (8,7 \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(180^\circ - 54^\circ 40') + (8,7 \cdot 10^{-3})^2}$$

$$= 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{O4} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_4}{60}\right)^2 = [\text{N}] \quad 7-85$$

$$F_{O4} = 8,9 \cdot 10^{-4} \cdot 0,068 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 114}{60}\right)^2 = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{V4} = \sqrt{F_{O4}^2 + 2 \cdot F_{O4} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_4) + F_G^2} [\text{N}] \quad 7-86$$

$$F_{V4} = \sqrt{(8,6 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot (8,6 \cdot 10^{-3}) \cdot (8,7 \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(180^\circ - 0) + (8,7 \cdot 10^{-3})^2}$$

$$= 1 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

Z výpočtů vyplývá, že odstředivé a přitažlivé síly se vzájemným působením složí za následku vytvoření výslednice sil. Tato výslednice má vektor rovnoběžný s tečnou přímkou kružnice v bodě dotyku tělíska pro které se dané síly počítají. Výjimkou jsou body 1 a 4 kde směr výslednice sil je totožný se směrem odstředivé síly.

7.2.8 Přibližný minimální teoretický výkon potřebný pro mletí a poloha tělíska

$$h_2 = r + r \cdot \cos(\alpha_2) [m] \quad 7-87$$

$$h_2 = 0,068 + 0,068 \cdot \cos(73^\circ 34') = 0,087 \text{ m}$$

$$h_3 = r + r \cdot \cos(\alpha_3) [m] \quad 7-88$$

$$h_3 = 0,068 + 0,068 \cdot \cos(54^\circ 52') = 0,107 \text{ m}$$

$$h_4 = h_{max} = 2 \cdot r [m] \quad 7-89$$

$$h_4 = 2 \cdot 0,068 = 0,136 \text{ m}$$

$$h_5 = r - r \cdot \cos(\alpha_5) [m] \quad 7-90$$

$$h_5 = 0,068 - 0,068 \cdot \cos(14^\circ) = 0,002 \text{ m}$$

$$\Delta h = h_3 - h_5 [m] \quad 7-91$$

$$\Delta h = 0,107 - 0,002 = 0,105 \text{ m}$$

$$\Delta l_{31} = r \cdot \sin(\alpha) [m] \quad 7-92$$

$$\Delta l_{31} = 0,068 \cdot \sin(54^\circ 52') = 0,056 \text{ m}$$

$$\Delta l_{23} = r \cdot \sin(\alpha_2) [m] \quad 7-93$$

$$\Delta l_{23} = 0,068 \cdot \sin(73^\circ 34') = 0,065 \text{ m}$$

$$\Delta l_{15} = r \cdot \sin(\alpha_5) [m] \quad 7-94$$

$$\Delta l_{15} = 0,068 \cdot \sin(14^\circ) = 0,016 \text{ m}$$

$$\Delta l_{35} = \Delta l_{31} + \Delta l_{15} [m] \quad 7-95$$

$$\Delta l_{35} = 0,056 + 0,016 = 0,072 \text{ m}$$

Energie potřebná pro kaskádový režim mletí:

$$\Delta E_{p k} = m_1 \cdot g \cdot h_2 [J] \quad 7-96$$

$$\Delta E_{p k} = 9 \cdot 9,81 \cdot 0,087 [J]$$

$$\Delta E_{p k} = 7,7 J$$

$$\Delta E_{k k} = \frac{m \cdot v_{opt k}^2}{2} [J] \quad 7-97$$

$$\Delta E_{k k} = \frac{9 \cdot 0,43^2}{2} = 0,8 J$$

$$\Delta E_{c k} = \Delta E_{p k} + \Delta E_{k k} = 7,7 + 0,8 = 8,5 J$$

$$p_{t k} \approx \Delta E_{c k} \cdot \frac{n_{opt k}}{60} [W] \quad 7-98$$

$$p_{t k} \approx 8,5 \cdot \frac{61}{60} = 8,6 \text{ W}$$

Energie potřebná pro vodopádový režim mletí:

$$\Delta E_{p v} = m_1 \cdot g \cdot h_3 - m_1 \cdot g \cdot h_5 [J] \quad 7-99$$

$$\Delta E_{p v} = 9 \cdot 9,81 \cdot 0,107 - 9 \cdot 9,81 \cdot 0,002 J$$

$$\Delta E_{p v} = 9,3 J$$

$$\Delta E_{k v} = \frac{m \cdot v_{opt v}^2}{2} [J] \quad 7-100$$

$$\Delta E_{k v} = \frac{9 \cdot 0,62^2}{2} = 1,7 J$$

$$\Delta E_{c v} = \Delta E_{p v} + \Delta E_{k v} = 8,6 + 1,7 = 10,3 J \quad 7-101$$

$$p_{t v} \approx \Delta E_{c v} \cdot \frac{n_{opt v}}{60} [W] \quad 7-102$$

$$p_{t v} \approx 10,3 \cdot \frac{87}{60} = 14,9 \text{ W}$$

Energie potřebná pro rotační režim mletí:

$$\Delta E_{pr} = m_1 \cdot g \cdot h_4 \text{ [J]} \quad 7-103$$

$$\Delta E_{pr} = 9 \cdot 9,81 \cdot 0,136 \text{ [J]}$$

$$\Delta E_{pr} = 12,0 \text{ J}$$

$$\Delta E_{kr} = \frac{m \cdot v_{opt r}^2}{2} \text{ [J]} \quad 7-104$$

$$\Delta E_{kr} = \frac{9 \cdot 0,81^2}{2} = 3,0 \text{ J}$$

$$\Delta E_{cr} = \Delta E_{pr} + \Delta E_{kr} = 12 + 3,0 = 15 \text{ J} \quad 7-105$$

$$p_{tr} \approx \Delta E_{cr} \cdot \frac{n_{opt r}}{60} \text{ [W]} \quad 7-106$$

$$p_{tr} \approx 15 \cdot \frac{114}{60} = 28,5 \text{ W}$$

Přibližný teoretický výkon spočítaný z rozdílů polohové a kinetické energie potřebné k zvednutí náplně a mlecích tělísek za sekundu při rotačním režimu mletí je roven 28,5 W. Toto číslo bylo spočteno bez zohlednění ztrát způsobených odporovými silami. A zároveň nezohledňuje zbytkovou kinetickou a polohovou energii tělísek po dopadu na dno bubnu nebo po oběhu kolem bubnu.

7.2.9 Minimální reálný příkon elektromotoru

$$P_s = \frac{P_{tr}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n} \text{ [W]} \quad 7-107$$

$$P_s = \frac{P_t}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5} \approx \frac{28,5}{0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,64 \cdot 0,8} \approx 193 \text{ W}$$

Reálný příkon elektromotoru se rovná 193 W za předpokladu užitých účinností:

$\eta_1=0,6$ Účinnost přenosu energie na objem bubnu

$\eta_2=0,8$ Účinnost uložení převodů a hřídelí

$\eta_3=0,6$ Účinnost řemenového systému

$\eta_4=0,64$ Účinnost převodů v převodovém soustrojí

$\eta_5=0,8$ a účinnost elektromotoru

7.3 Návrh a výpočet parametrů pro buben o průměru 100mm

7.3.1 Průměr mlecích koulí

$$d = \frac{2 \cdot r_b}{18} \div \frac{2 \cdot r_b}{24} [mm] \quad 7-108$$

$$d = \frac{2 \cdot 44}{18} \div \frac{2 \cdot 44}{24} = 5,1 \div 3,8 \text{ mm}$$

$$m_{t6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \cdot \rho_t [kg] \quad 7-109$$

$$m_{t6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 0,002^3}{3} \cdot 7860 = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$$

Průměr mlecích tělísek volím 4mm. Vypočtená hmotnost jednoho mlecího tělíska v podobě ocelové kuličky je 0,26g.

7.3.2 Poloměr oběžné kružnice mlecích tělísek

$$r = r_b - \frac{d}{2} [mm] \quad 7-110$$

$$r = 46 - \frac{4}{2} = 44 \text{ mm}$$

Vypočtená dráha rotace mlecích tělísek má poloměr 44mm = 0.044m.

7.3.3 Kritické otáčky bubnu

$$n_{kr} = \frac{30}{\sqrt{r}} [min^{-1}] \quad 7-111$$

$$n_{kr} = \frac{30}{\sqrt{0,044}} = 143 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Kritické otáčky mlecích tělísek jsou 143ot/min = 2,38ot/s.

7.3.4 Optimální otáčky pro různé režimy

$$n_{opt} = 0,7582 \cdot n_{kr} [min^{-1}] \quad 7-112$$

$$n_{opt} = 0,7582 \cdot 143 = 108,42 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Optimální otáčky pro kaskádový režim jsou nižší než optimální, ale maximálně o 30%.

$$n_{opt} \cdot 0,7 < n_{opt k} < n_{opt} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-113$$

$$n_{opt k} \Rightarrow 76 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$v_{opt k} = \frac{n_{opt k}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 7-114$$

$$v_{opt k} = \frac{76}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,044 = 0,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Optimální otáčky pro vodopádový režim jsou v rozmezí $\pm 5\%$.

$$n_{opt v} \pm 1,05 \cdot n_{opt} \text{ [ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 7-115$$

$$n_{opt v} \Rightarrow 109 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$v_{opt v} = \frac{n_{opt v}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 7-116$$

$$v_{opt v} = \frac{109}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,044 = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Optimální otáčky pro rotační režim jsou vyšší než optimální, ale maximálně o 30%.

$$n_{opt} \cdot 1,3 > n_{opt r} > n_{opt} \text{ [ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 7-117$$

$$n_{opt r} \Rightarrow 141 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$v_{opt r} = \frac{n_{opt r}}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 7-118$$

$$v_{opt r} = \frac{141}{60} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,044 = 0,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

7.3.5 Optimální poměrná hmotnost materiálu a mlecích tělísek bubnu

m_m hmotnost materiálu

m_t hmotnost mlecích tělísek

$$\mu = \frac{m_m}{m_t} = 0,25 \div 0,33 \text{ [kg]} \quad 7-119$$

$$\mu = 5 = \frac{m_m}{m_t} \text{ kg} \quad 7-120$$

$$m_m \cong 1,25 \text{ kg}$$

$$m_t \cong 3,75 \text{ kg}$$

Vypočtená hmotnost mlecích tělísek je 3,75 kg a hmotnost mletého materiálu je 1,25kg. To činí orientačně 14423 ocelových kuliček s průměrem 4mm.

7.3.6 Objemy materiálů a mlecích tělísek s procentuální zaplněností bubnu

$$V_b = S \cdot l_b \text{ [m}^3\text{]} \quad 7-121$$

$$V_b = 0,007 \cdot 0,256 = 1,79 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$$

Jako melivo se v tomto případě uvažuje křemen s hustotou $\rho = 2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} = \frac{1,25}{2600} = 4,81 \cdot 10^{-4} \text{m}^3 \quad 7-122$$

Jako mlecí tělíska se v tomto případě uvažuje ocelová koule s hustotou $\rho = 7860 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

$$V_t = \frac{m_t}{\rho_t} = \frac{3,75}{7860} = 4,77 \cdot 10^{-4} \text{m}^3 \quad 7-123$$

$$V_c = V_m + V_t = 4,81 \cdot 10^{-4} + 4,77 \cdot 10^{-4} \text{m}^3 \quad 7-124$$

$$V_c = 9,57 \cdot 10^{-4} \text{[m}^3\text{]}$$

$$Z = \frac{V_b}{V_c} \cdot 100 = \frac{1,79 \cdot 10^{-3}}{9,57 \cdot 10^{-4}} \cdot 100 = 53\%$$

Celková náplň bubnu je $9,57 \cdot 10^{-4} \text{m}^3$. Celkový objem bubnu je $1,79 \cdot 10^{-3} \text{m}^3$. Celková zaplněnost bubnu s průměrem 100mm je 53%.

7.3.7 Síly působící na tělíska v bubnu kulového mlýnu o průměru 100mm.

$$\alpha_2 = \cos \left(\frac{r \cdot n_{opt} k^2}{894,5} \right)^{-1} \text{ [}^\circ\text{]} \quad 7-125$$

$$\alpha_2 = \cos \left(\frac{0,044 \cdot 109^2}{894,5} \right)^{-1} = 54^\circ 14'$$

$$\alpha_3 = \cos \left(\frac{r \cdot n_{opt} v^2}{894,5} \right)^{-1} \text{ [}^\circ\text{]} \quad 7-126$$

$$\alpha_3 = \alpha = \cos \left(\frac{0,044 \cdot 141^2}{894,5} \right)^{-1} = 12^\circ 3'$$

$$y = x \cdot \tan\left(\alpha - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos(\alpha)^2}\right) [m] \quad 7-127$$

$$\alpha_5 = (\text{z balistické křivky}) \approx 14^\circ$$

$$F_G = m \cdot g [N] \quad 7-128$$

$$F_G = 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{GR} = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) [N] \quad 7-129$$

$$F_{GR} = 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 \cdot \cos(0) = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{GT} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) [N] \quad 7-130$$

$$F_{GT} = 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81 \cdot \sin(90) = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_O = m \cdot r \cdot \omega^2 [N] \quad 7-131$$

$$F_{O1} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60}\right)^2 = [N] \quad 7-132$$

$$F_{O1} = 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,044 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 0}{60}\right)^2 = 0 \text{ N}$$

$$F_{V1} = \sqrt{F_{O1}^2 + 2 \cdot F_{O1} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_1) + F_G^2} = 0 [N] \quad 7-133$$

$$F_{V1} = \sqrt{0^2 - 2 \cdot 0 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(180^\circ - 0) + (2,6 \cdot 10^{-3})^2} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{O2} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_2}{60}\right)^2 = [N] \quad 7-134$$

$$F_{O2} = 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,044 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 76}{60}\right)^2 = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

$$F_{V2} = \sqrt{F_{O2}^2 + 2 \cdot F_{O2} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_2) + F_G^2} [N] \quad 7-135$$

$$\begin{aligned} F_{V2} &= \sqrt{(7,2 \cdot 10^{-4})^2 + 2 \cdot (7,2 \cdot 10^{-4}) \cdot (2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(180^\circ - 54^\circ 14') + (2,6 \cdot 10^{-3})^2} \\ &= 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ N} \end{aligned}$$

$$F_{O3} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_3}{60}\right)^2 = [N] \quad 7-136$$

$$F_{O3} = 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,044 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 109}{60}\right)^2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{V3} = \sqrt{F_{O3}^2 + 2 \cdot F_{O3} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_3) + F_G^2} [N] \quad 7-137$$

$$\begin{aligned} F_{V3} &= \sqrt{(1,5 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot (1,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(180^\circ - 12^\circ 3') + (2,6 \cdot 10^{-3})^2} \\ &= 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ N} \end{aligned}$$

$$F_{O4} = m \cdot r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n_4}{60}\right)^2 = [N] \quad 7-138$$

$$F_{O4} = 2,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,044 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 141}{60}\right)^2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

$$F_{V4} = \sqrt{F_{O4}^2 + 2 \cdot F_{O4} \cdot F_G \cdot \cos(180^\circ - \alpha_4) + F_G^2} = 0 [N] \quad 7-139$$

$$\begin{aligned} F_{V4} &= \sqrt{(2,5 \cdot 10^{-3})^2 + 2 \cdot (2,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot \cos(180^\circ - 0^\circ) + (2,6 \cdot 10^{-3})^2} \\ &= 1 \cdot 10^{-4} \text{ N} \end{aligned}$$

Z výpočtů vyplývá, že odstředivé a přitažlivé síly se vzájemným působením složí za následku vytvoření výslednice sil. Tato výslednice má vektor rovnoběžný s tečnou přímkou kružnice v bodě dotyku tělíska pro které se dané síly počítají. Výjimkou jsou body 1 a 4 kde směr výslednice sil je totožný se směrem odstředivé síly.

7.3.8 Přibližný minimální teoretický výkon potřebný pro mletí a poloha tělíska

$$h_2 = r + r \cdot \cos(\alpha_2) [m] \quad 7-140$$

$$h_2 = 0,044 + 0,044 \cdot \cos(54^\circ 14') = 0,070 \text{ m}$$

$$h_3 = r + r \cdot \cos(\alpha_3) \text{ [m]} \quad 7-141$$

$$h_3 = 0,044 + 0,044 \cdot \cos(12^\circ 3') = 0,087 \text{ m}$$

$$h_4 = h_{max} = 2 \cdot r \text{ [m]} \quad 7-142$$

$$h_4 = 2 \cdot 0,044 = 0,088 \text{ m}$$

$$h_5 = r - r \cdot \cos(\alpha_5) \text{ [m]} \quad 7-143$$

$$h_5 = 0,044 - 0,044 \cdot \cos(14^\circ) = 0,001 \text{ m}$$

$$\Delta h = h_3 - h_5 \text{ [m]} \quad 7-144$$

$$\Delta h = 0,087 - 0,001 = 0,086 \text{ m}$$

$$\Delta l_{31} = r \cdot \sin(\alpha) \text{ [m]} \quad 7-145$$

$$\Delta l_{31} = 0,044 \cdot \sin(12^\circ 3') = 0,009 \text{ m}$$

$$\Delta l_{23} = r \cdot \sin(\alpha_2) \text{ [m]} \quad 7-146$$

$$\Delta l_{23} = 0,044 \cdot \sin(54^\circ 14') = 0,036 \text{ m}$$

$$\Delta l_{15} = r \cdot \sin(\alpha_5) \text{ [m]} \quad 7-147$$

$$\Delta l_{15} = 0,044 \cdot \sin(14^\circ) = 0,011 \text{ m}$$

$$\Delta l_{35} = \Delta l_{31} + \Delta l_{15} \text{ [m]} \quad 7-148$$

$$\Delta l_{35} = 0,009 + 0,011 = 0,020 \text{ m}$$

Energie potřebná pro kaskádový režim mletí:

$$\Delta E_{p k} = m_1 \cdot g \cdot h_2 [J] \quad 7-149$$

$$\Delta E_{p k} = 5 \cdot 9,81 \cdot 0,07 [J]$$

$$\Delta E_{p k} = 3,4 J$$

$$\Delta E_{k k} = \frac{m \cdot v_{opt k}^2}{2} [J] \quad 7-150$$

$$\Delta E_{k k} = \frac{5 \cdot 0,35^2}{2} = 0,3 J$$

$$\Delta E_{c k} = \Delta E_{p k} + \Delta E_{k k} = 3,4 + 0,3 = 3,7 J \quad 7-151$$

$$p_{t k} \approx \Delta E_{c k} \cdot \frac{n_{opt k}}{60} [W] \quad 7-152$$

$$p_{t k} \approx 3,7 \cdot \frac{76}{60} = 4,7 W$$

Energie potřebná pro vodopádový režim mletí:

$$\Delta E_{p v} = m_1 \cdot g \cdot h_3 - m_1 \cdot g \cdot h_5 [J] \quad 7-153$$

$$\Delta E_{p v} = 5 \cdot 9,81 \cdot 0,087 - 5 \cdot 9,81 \cdot 0,001 [J]$$

$$\Delta E_{p v} = 4,2 J$$

$$\Delta E_{k v} = \frac{m \cdot v_{opt v}^2}{2} [J] \quad 7-154$$

$$\Delta E_{k v} = \frac{5 \cdot 0,5^2}{2} = 0,6 J$$

$$\Delta E_{c v} = \Delta E_{p v} + \Delta E_{k v} = 4,2 + 0,6 = 4,8 [J] \quad 7-155$$

$$p_{t v} \approx \Delta E_{c v} \cdot \frac{n_{opt v}}{60} [W] \quad 7-156$$

$$p_{t v} \approx 4,8 \cdot \frac{109}{60} = 8,72 W$$

Energie potřebná pro rotační režim mletí:

$$\Delta E_{p r} = m_1 \cdot g \cdot h_4 [J] \quad 7-157$$

$$\Delta E_{p r} = 5 \cdot 9,81 \cdot 0,088 [J]$$

$$\Delta E_{p r} = 4,3 J$$

$$\Delta E_{k r} = \frac{m \cdot v_{opt r}^2}{2} [J] \quad 7-158$$

$$\Delta E_{kr} = \frac{5 \cdot 0,65^2}{2} = 1,1 \text{ J}$$

$$\Delta E_{cr} = \Delta E_{pr} + \Delta E_{kr} = 4,3 + 1,1 = 5,4 \text{ J} \quad 7-159$$

$$p_{tr} \approx \Delta E_{cr} \cdot \frac{n_{opt r}}{60} [\text{W}]$$

$$p_{tr} \approx 5,4 \cdot \frac{114}{60} = 10,3 \text{ W}$$

Přibližný teoretický výkon spočítaný z rozdílů polohové a kinetické energie potřebné k zvednutí náplně a mlecích tělísek za sekundu při rotačním režimu mletí je roven 10,3 W. Toto číslo bylo spočteno bez zohlednění ztrát způsobených odporovými silami. A zároveň nezohledňuje zbytkovou kinetickou a polohovou energii tělísek po dopadu na dno bubnu nebo po oběhu kolem bubnu.

7.3.9 Minimální reálný příkon elektromotoru

$$P_s = \frac{P_{tr}}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n} [\text{W}] \quad 7-160$$

$$P_s = \frac{P_t}{\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5} \approx \frac{10,3}{0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,6 \cdot 0,64 \cdot 0,8} \approx 69,9 \text{ W}$$

Reálný příkon elektromotoru se rovná 70 W za předpokladu užitých účinností:

$\eta_1=0,6$ Účinnost přenosu energie na objem bubnu

$\eta_2=0,8$ Účinnost uložení převodů a hřídelí

$\eta_3=0,6$ Účinnost řemenového systému

$\eta_4=0,64$ Účinnost převodů v převodovém soustrojí

$\eta_5=0,8$ a účinnost elektromotoru

7.4 Výpočet zabezpečovacího řemenného převodu

Zabezpečovací pohonný systém má pro zajištění bezpečného provozu zařízení nesmírnou důležitost. V tomto zařízení je realizován klínovým řemenem, který je napínán pružinou a tím je zajištěná optimální napínací síla řemene. Jedná se o případ zablokování otáčení hnané hřídele, končetinou, kusem oblečení či vlasy. V případě absence tohoto systému by z

převodovaný motor bezstarostně poškozoval zařízení či obsluhu samotnou. Až do doby zmáčknutí záchranného tlačítka central-stopu, jenž okamžitě odpojí hlavní přívod elektrického proudu. Pro možnost odkousnutí je v čele hnané hřídele hexagonální vybrání pro imbusový klíč 6mm.

Z tabulek str.:545 volím hodnoty:[11]

Převodový poměr 1:1 (málo místa)

Řemenice 50 Z 1 ČSN 02 3180

Řemen SPZ 643

Stanovení součinitelů c_1, c_2, c_3

$$c_1=1,00$$

$$c_2=1,2$$

$$c_3=630$$

$$d_p = 63 \text{ [mm]}$$

Buben D=200mm:

$$n_{3max} = 100 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1} \quad 7-161$$

$$n_{3min} = 55 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$i_{1,2} = \frac{d_p}{D_p} \quad 7-162$$

$$i_{1,2} = \frac{63}{63} = 1$$

$$i_{2,3} = \frac{r_2}{r_3} \quad 7-163$$

$$i_{2,3 D100} = \frac{0,04}{0,1} = 0.4$$

$$n_{1max} = \frac{n_{3max}}{i_{2,3 D100}} [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}] \quad 7-164$$

$$n_{1max} = \frac{100}{0.4} = 250 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$n_{1min} = \frac{n_{3min}}{i_{2,3 D100}} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-165$$

$$n_{1max} = \frac{55}{0.4} = 138 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Buben D=150mm:

$$n_{3max} = 114 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$n_{3min} = 61 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$i_{1,2} = \frac{d_p}{D_p} \quad 7-166$$

$$i_{1,2} = \frac{63}{63} = 1$$

$$i_{2,3} = \frac{r_2}{r_3} \quad 7-167$$

$$i_{2,3 D100} = \frac{0,04}{0,075} = 0.533$$

$$n_{1max} = \frac{n_{3max}}{i_{2,3 D100}} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-168$$

$$n_{1max} = \frac{114}{0.533} = 214 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$n_{1min} = \frac{n_{3min}}{i_{2,3 D100}} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-169$$

$$n_{1max} = \frac{61}{0.533} = 114 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Buben D=100mm:

$$n_{3max} = 141 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$n_{3min} = 55 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$i_{1,2} = \frac{d_p}{D_p} \quad 7-170$$

$$i_{1,2} = \frac{63}{63} = 1$$

$$i_{2,3} = \frac{r_2}{r_3} \quad 7-171$$

$$i_{2,3 D100} = \frac{0,04}{0,05} = 0,8$$

$$n_{1max} = \frac{n_{3max}}{i_{2,3 D100}} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-172$$

$$n_{1max} = \frac{141}{0,8} = 176 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$n_{1min} = \frac{n_{3min}}{i_{2,3 D100}} [ot \cdot min^{-1}] \quad 7-173$$

$$n_{1max} = \frac{55}{0,8} = 69 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Obvodová rychlost:

$$v = \pi \cdot d_p \cdot n_d = \pi \cdot D_p \cdot n_p [m \cdot min^{-1}] \quad 7-174$$

$$v = \pi \cdot 0,063 \cdot \frac{176,25}{60} [m \cdot s^{-1}]$$

$$v = 0,58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Teoretická délka řemene:

d_p = Výpočtový průměr malé řemenice [mm]

D_p = Výpočtový průměr velké řemenice [mm]

$$L_p \approx 2 \cdot A + 1,57 \cdot (D_p + d_p) + \frac{(D_p - d_p)^2}{4,4} [mm] \quad 7-175$$

$$L_p \approx 2 \cdot 120 + 1,57 \cdot (63 + 63) + \frac{(63 - 63)^2}{4,4} [mm]$$

$$L_p \approx 437,82 \Rightarrow \text{volím } 440 \text{ mm}$$

Osová vzdálenost řemenice:

$$0,7 \cdot (D_p + d_p) < A < 2 \cdot (D_p + d_p) [mm] \quad 7-176$$

$$0,7 \cdot (63 + 63) < A < 2 \cdot (63 + 63) [mm]$$

$$88,2 < A < 252 \Rightarrow \text{volím } 120 \text{ mm}$$

Úhel opásání malé řemenice i velké:

$$\beta \approx 180^\circ - 60^\circ \frac{(D_p - d_p)}{A} [^\circ] \quad 7-177$$

$$\beta \approx 180^\circ - 60^\circ \frac{(63-63)}{100 \div 160} [^\circ]$$

$$\beta \approx 180^\circ$$

Počet klínových řemenů:

$$z = \frac{P \cdot c_2}{P_r \cdot c_1 \cdot c_3} [] \quad 7-178$$

$$z = \frac{0,4 \cdot 1,2}{0,68 \cdot 1 \cdot 0,82} = 0,86 \Rightarrow \text{volím } 1$$

Výkon a síla přenášený řemenem:

$$p = \frac{2 \cdot \pi \cdot F \cdot r \cdot n_{max}}{60} = 120 [W] \quad 7-179$$

$$F = \frac{p \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n_{max}} [N] \quad 7-180$$

$$F = \frac{120 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 0,0315 \cdot 250} = 145,5 \text{ N}$$

Pracovní předpětí řemene:

$$F_u = (1,5 \div 2) \cdot F [N] \quad 7-181$$

$$F_u = (1,5) \cdot 145,5 = 218,3 \text{ N}$$

Meze seřízení osové vzdálenosti:

x = Osová přestavitelnost pro napínání klínového řemene [mm]

y = Osová přestavitelnost pro nasazení klínového řemene [mm]

$$x \geq 0,03 \cdot L_p [mm] \quad 7-182$$

$$x \geq 0,03 \cdot 440 = 1,32 [mm]$$

$$y \geq 0,015 \cdot L_p [mm] \quad 7-183$$

$$y \geq 0,015 \cdot 440 = 6,6 \text{ mm}$$

7.5 Návrh koutového sváru konstrukce

Materiál: 11373

$t=1$ mm

$\tau_D = 72$ [MPa]

Celková zatěžující síla zatěžující jedno lůžko domečků:

$$F = m \cdot g = 8,25 \cdot 9,81 = 81 \text{ N} \quad 7-184$$

Minimální délka svárů jedné strany:

$$s_1 = \frac{F_1}{s} = \frac{F_1}{l_1 \cdot 0,7 \cdot t} \leq \tau_D [\text{Mpa}] \quad 7-185$$

$$l_1 = \frac{81}{72 \cdot 0,7 \cdot 2} = 0,8 \text{ mm}$$

Pro nízké zatížení volím metodu bodových svárů. Ty budou rozmístěny jen z důvodů zvýšení tuhosti sestavy rozmístěny v každé druhé spáře pro domeček ložiska. Pozor při výrobě svár nesmí přečnívat do pracovního prostoru domečků hřídelí.

7.6 Statické určení zatěžujících sil

$$F_1 = m_{\ddot{r}} \cdot g + F_{nap} = 0,287 \cdot 9,81 + 218,3 = 221 \text{ N} \quad 7-186$$

$$F_2 = (m_{max} + m_{\ddot{r}}) \cdot g = (15 + 1) \cdot 9,81 = 157 \text{ N} \quad 7-187$$

Hnaná hřídel:

$$\Sigma F_{iX} = -F_1 - F_2 + R_{AX} + R_{CX} = 0 \text{ [N]} \quad 7-188$$

$$\Sigma F_{iY} = R_{AY} + R_{CY} = 0 \text{ [N]} \quad 7-189$$

$$\Sigma F_{MA} = -F_1 \cdot 0,165 - F_2 \cdot 0,313 + R_{CX} \cdot 0,345 \text{ [N]} \quad 7-190$$

$$R_{CX} = \frac{221 \cdot 0,165 + 157 \cdot 0,313}{0,345} = 248 \text{ N}$$

$$\Sigma F_{MC} = -F_1 \cdot 0,180 - F_2 \cdot 0,032 + R_{AX} \cdot 0,345 \text{ [N]} \quad 7-191$$

$$R_{AX} = \frac{221 \cdot 0,180 + 157 \cdot 0,032}{0,345} = 130 \text{ N}$$

Posuvná hřídel:

$$\Sigma F_{iX} = -F_1 + R_{AX} + R_{CX} = 0 \text{ [N]} \quad 7-192$$

$$\Sigma F_{iY} = R_{AY} + R_{CY} = 0 \text{ [N]} \quad 7-193$$

$$\Sigma F_{MA} = -F_1 \cdot 0,165 + R_{CX} \cdot 0,345 \text{ [N]} \quad 7-194$$

$$R_{CX} = \frac{221 \cdot 0,165}{0,345} = 105,7 \text{ N}$$

$$\Sigma F_{MC} = -F_1 \cdot 0,180 + R_{AX} \cdot 0,345 \text{ [N]} \quad 7-195$$

$$R_{AX} = \frac{221 \cdot 0,180}{0,345} = 115,3 \text{ N}$$

Nejvíce zatížené ložisko je ložisko v blízkosti řemenice z důvodů pracovního napětí řemene jeho zatížení činí 248 N. Ostatní ložiska, jsou namáhána necelou polovinou, takže po zhruba 10 letech je doporučena záměna ložisek mezi hřídeli. To prodlouží životnost o dalších 10 až 15 let. Výsledné síly se mohou měnit o maximálně 10 N. Z důvodů možnosti volby pozice uložení bubnu. Pro Výpočty zatížení bylo užito maximálních dovolených hodnot naplnění největšího bubne.

7.7 Návrh statického a dynamického životnosti ložiska

Z tabulek vybrané hodnoty pro válečkové ložisko NU 204.

$$d = 20 \text{ mm}$$

$$D = 47 \text{ mm}$$

$$b = 14 \text{ mm}$$

$$b_m = 1,1$$

$$C = 11800$$

$$C_0 = 6200$$

Z tabulek [11]:

D_{we} = Průměr tělísek

D_{pw} = Oběžná dráha tělísek

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{0}{\approx 200} \leq e = 2,72 \Rightarrow X = 1; Y = 0 \quad 7-196$$

$$\frac{D_{we} \cdot \cos(\alpha)}{D_{pw}} = \frac{10 \cdot \cos(88^\circ)}{18} = 0,02 \Rightarrow f_c = 60,8 \quad 7-197$$

$$P_r = X \cdot R_{CX} + Y \cdot R_{CY} [N] \quad 7-198$$

$$P_r = 1 \cdot 248 + 0 \cdot R_{CY} = 248 \text{ N}$$

$$C_r = b_m \cdot f_c \cdot (iL_{we} \cdot \cos(\alpha))^{\frac{7}{9}} \cdot Z^{\frac{3}{4}} \cdot D_{we}^{\frac{29}{27}} \quad 7-199$$

$$C_r = 1,1 \cdot 60,8_c \cdot (1 \cdot 10 \cdot \cos(88^\circ))^{\frac{7}{9}} \cdot 12^{\frac{3}{4}} \cdot 10^{\frac{29}{27}}$$

$$C_r = 2255,1$$

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^{\frac{10}{3}} = 34540 [\text{mil ot}] \quad 7-200$$

$$L_{10} = \left(\frac{2255}{248}\right)^{\frac{10}{3}} = 1569 \text{ mil ot}$$

Stroj je navržen na to, aby pracoval na maximální dovolené zatížení po dobu 16 hodin, 7 dní v týdnu po dobu 17,9 let. Po zhruba 10 letech je doporučena záměna ložisek mezi hřídeli. To prodlouží životnost o dalších 10 až 15 let.

7.8 Technická dokumentace

Rozměry= 500x350x190 [mm]

Hmotnost= 23 se stabilizační deskou 53 [kg]

Příkon=0,5 [kW]

Provozní napětí= 220÷230 [V]

Maximální zátěž=2,2 [A]

Plynulá regulace napětí motoru = $0 \div 230$ [V]

Maximální zatížení regulátoru = 2000 [W]

Motor: TJ-CH 0,5 [kW], ratio= 1:10 => výstupní otáčky 300 [$ot \cdot min^{-1}$]

IP 11 []

Provozní otáčky = $0 \div 800$ [$ot \cdot min^{-1}$]

Měřicí otáčky = $2,5 \div 99999$ [$ot \cdot min^{-1}$]

Přesnost odčítání otáček = $\pm (0,05\% + 1 \text{ digit})$

Maximální hmotnost náplně bubnu = 10 [kg]

Doporučené průměry mlecích bubnů= 100,150,200,250 [mm]

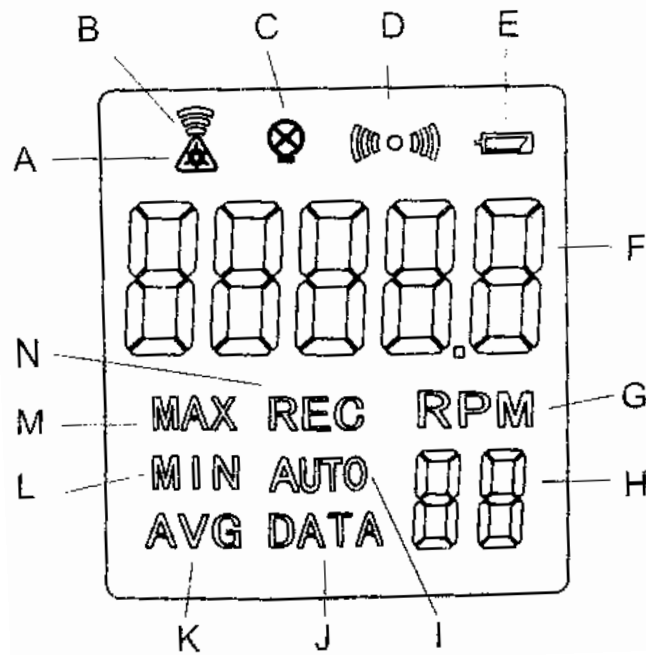
Maximální délka bubnu = 270 [mm]

Maximální čas mletí= $0 \div 24$ [h] (časovač 0-24hodin) umožňuje nastavení doby začátku a skončení mletí každý den (vypne se v nočních hodinách)

Provozní teplota = $0 \div 50^{\circ}\text{C}$

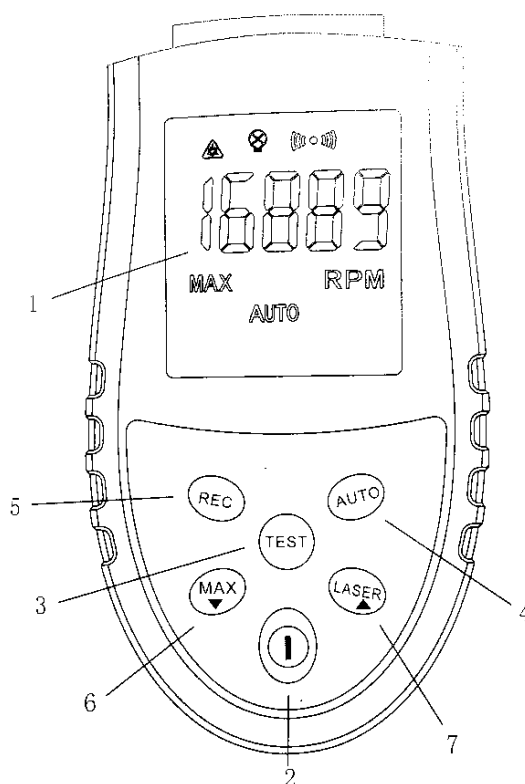
7.9 Návod k obsluze měřícího zařízení kulového mlýnu

- 1 Displej
- A laser
- B indikace zesílení výkonu laseru
- C indikace podsvícení displeje
- D odčítaná hodnota [$ot \cdot min^{-1}$]
- E indikace napájení nebo síly baterie



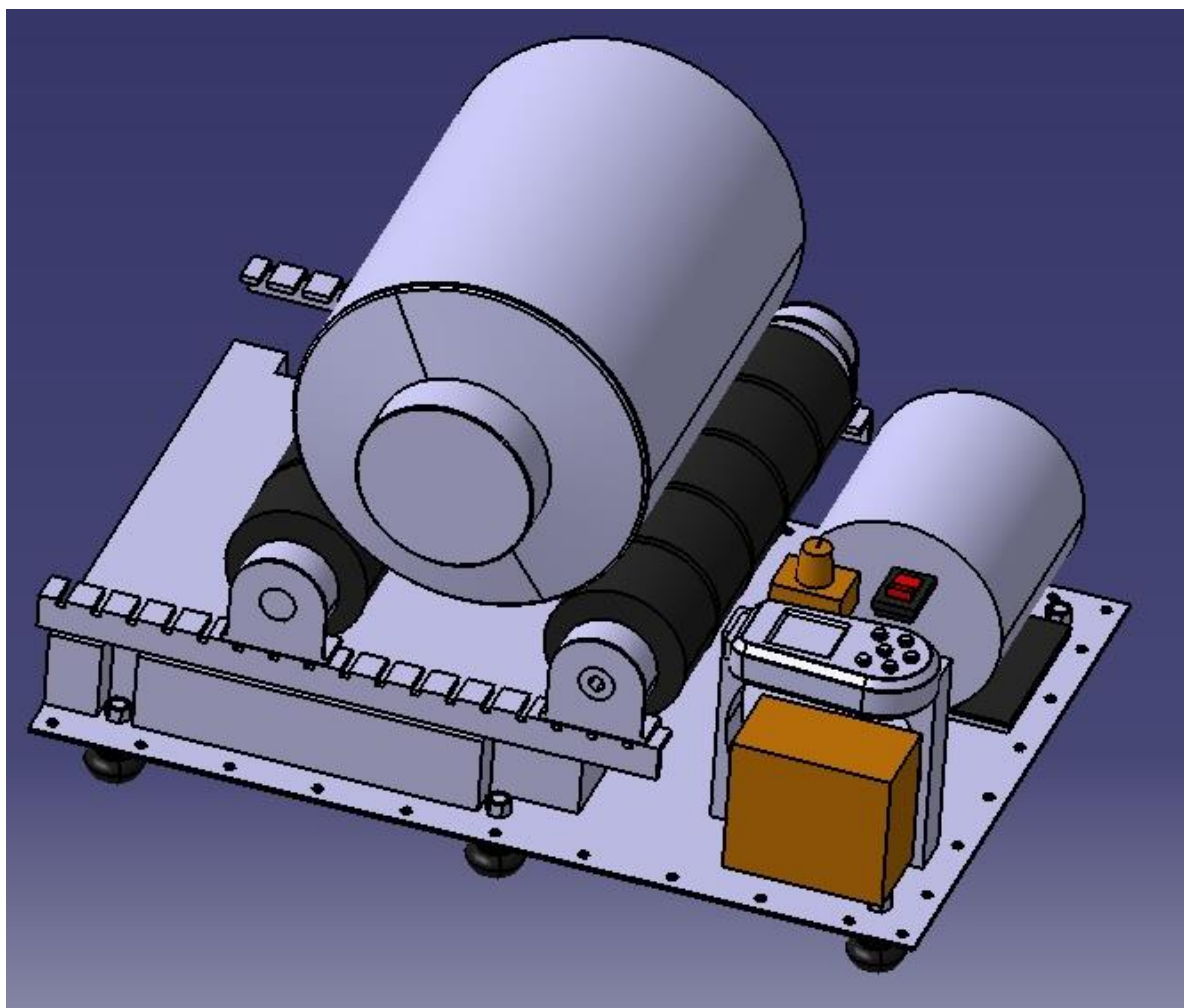
Obr. 7-3 Rozmístění indikačních značek na display

1. Vypínač stisknutí zapne a vypne podsvícení. Podržení zapne nebo vypne měřicí přístroj.
2. TEST Manuální měření. Při podržení ukáže aktuální měřenou hodnotu.
3. AUTO Zapíná a ukončuje měření.
4. REC Zapne nebo ukončí záznam měření otáček. Maximální počet měření v paměti je 50.
5. MAX > Zobrazí maximální a minimální hodnoty naměřené.
6. LASER Zapnutí nebo vypnutí zesílení výkonu laseru. Možno aktivovat při problémech s kvalitou měření.
7. Zdroj laserového záření
8. Vstup světla do měřicí části přístroje.

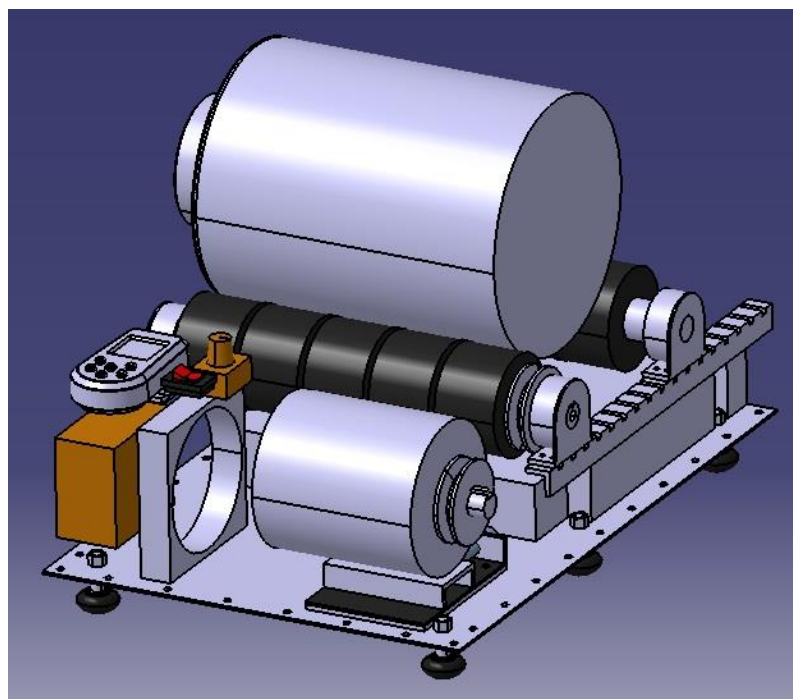


Obr. 7-4 Ukázka způsobu měření přirozeného syného úhlu nádobou bez dna

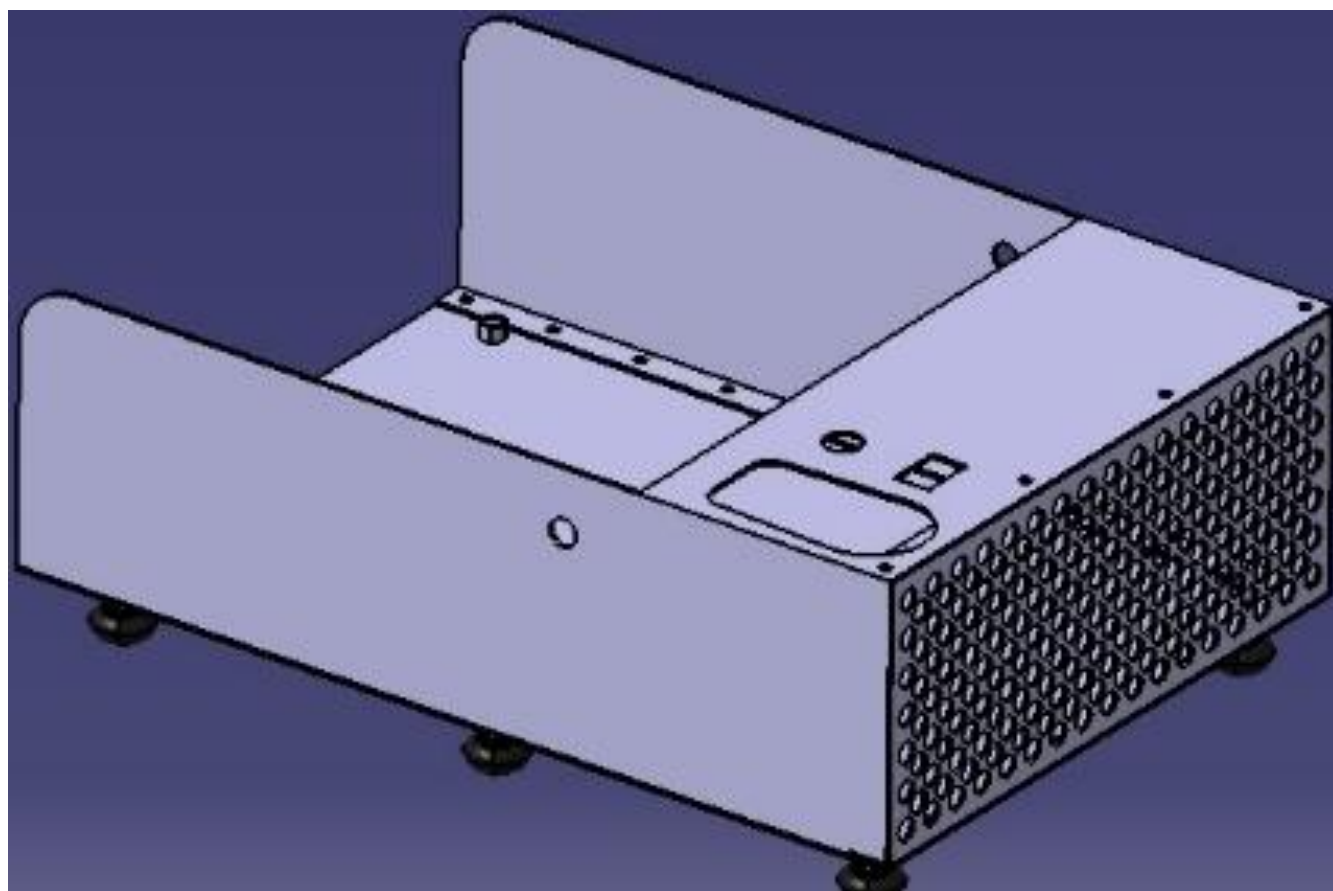
7.9.1 Znáznornění celého stroje a všech sestav



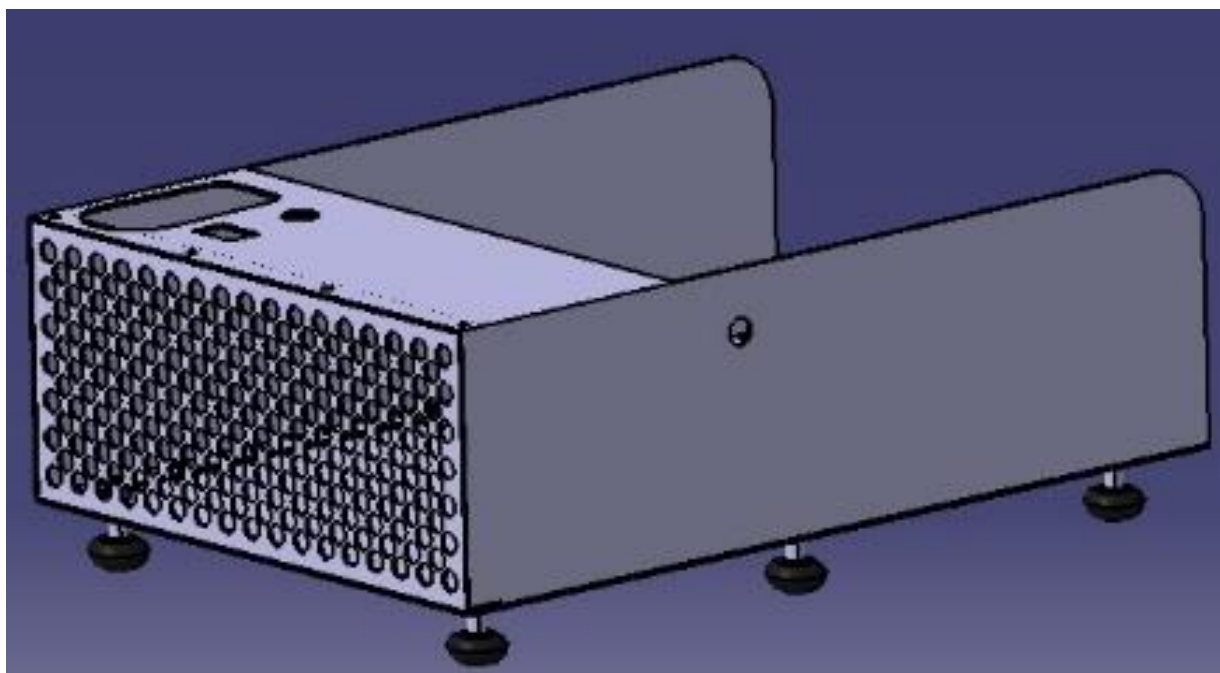
Obr. 7-5 hlavní soustrojí



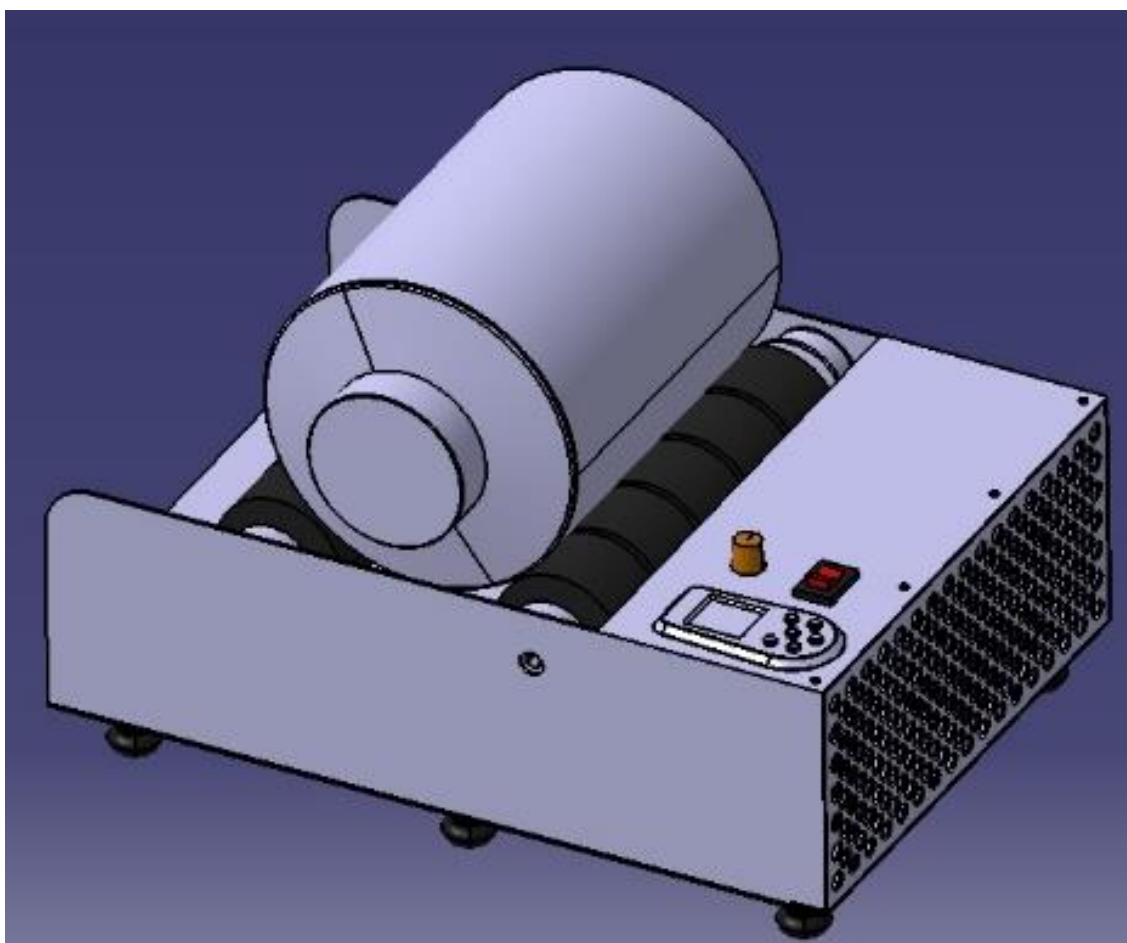
Obr. 7-6 Hlavní soustrojí



Obr. 7-7 Hlavní kryt



Obr. 7-8 Hlavní kryt



Obr. 7-9 Celkový pohled

6. ZÁVĚR

V průběhu mé práce ohledně konstrukce kulového mlýnu jsem pečlivě prostudoval veškeré potřebné fyzikální vztahy a souvislosti z oblastí mechaniky tuhých těles a jejich rozdělení dle různých vlastností. Hlavní důraz jsem věnoval vlastnostem a chování sypké hmoty. Ta co do složitosti interakce mezi drobnými fragmenty sebe sama, je až překvapivě složitá. Je zajímavé pozorovat, jak při zmenšování pozorovaných elementů hmoty se mění jejich chování a interakce. Čím je element menší, tím více začínají převládat vazebné a dipólové síly, které jsou pro makroskopické elementy zanedbatelné až nepozorovatelné. Opět se potvrzuje, že záludnosti a složitost mikrosvěta ještě neodhalila veškerá svá tajemství.

Dále mě zaujala jiná technologie vibračních kulových mlýnů ty, jsou co do ceny přibližně 10 až 20 dražší za dosažení stejného výsledku, ale za výrazně zkrácený čas. Pohyb tělísek uvnitř nádoby je čistě nahodilí. Alespoň na první pohled, ale výpočet interakcí a trajektorií koulí by bylo zajímavé minimálně i jako živý spořič obrazovky. Je to technologie podle mě až moc předražená a tudíž by se na ní dalo hodně vydělat ohledně konstrukce, zařízení protože je na ni velká marže.

Náplní výpočetní části bylo hlavně propočítat optimální režimy otáček pro běžné základní rozměry mlecích bubnů. To je úzce spojeno s vlastní energií tělísek v něm uzavřených. Ty jsou složeny hlavně z odstředivé a přitažlivé síly a jejich výsledných interakcí. Souhrn těchto hodnot a přehled bubnů pro ně odpovídajících je v uveden v následující tabulce.

Tab. 3 Tabulka optimálních rychlostí odpovídajících režimům

Mlecí režimy	Průměry bubnů D [mm]		
	D=200	D=150	D=100
Kaskádový [ot/min]	52,78	61,04	75,9
Vodopádový [ot/min]	75,4	87,2	108,42
Rotační [ot/min]	98,02	113,4	140,95

Závěrem mám ještě několik návrhů na vylepšení zařízení. Pro zvýšení multifunkčnosti a využitelnosti stroje.

První je kryogenní mletí. Jde o rotační přívod chladiva. Ten by byl umístěn uprostřed víčka pro snadnou manipulaci s nádobou, která nemá díru ve dně. Hadičku s průchodkou by držel stavitelný stojánek složen z magnetu, tyče a držáku průchodky. Magnet spolu s krytem

umožní optimální nastavení pozice vůči ose otáčení bubne. Chlazení by probíhalo kapalným dusíkem.

Druhé vylepšení je umístit elektromagnet či neodimové magnety do nosných hřídelí. To by mělo za následek výrazné umocnění mlecí síly, kterou působí tělíska na melivo.

Třetí vylepšení spočívá v přivedení elektrického náboje do prostoru bubnu. To by mělo za následek nabití částic a následné vzájemné odpuzování. To by zabránilo nebo omezilo vznikání konglomerací, které omezují maximální dosažitelnou jemnost meliva. Toto vylepšení bylo konzultováno a jeho funkčnost byla teoreticky potvrzena. Jedná se o zásadní vylepšení soudobé konstrukce veškerých kulových mlýnů založených na principu padajících tělísek.

SEZNAM POUŽITÝCH CITACÍ

- [1] SLÍVA, Aleš. *Základy zařízení úpraven: učební text předmětu "Zařízení úpraven"*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2011, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2732-2.
- [2] Super magnety.cz URL: <http://www.supermagnety.cz/cz/64/teoreticky-uvod/fyzikalni-veliciny-popisujici-magneticke-pole/>
- [3] POKLUDA, Jaroslav. *Mechanické a strukturní materiálové charakteristiky: Určeno pro posl. fak. strojní*. 1. vyd. Brno: VUT, 1990, 211 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0078-1.
- [4] STRNADEL, Bohumír. *Nauka o materiálu*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 180 s. ISBN 978-80-248-0689-1.
- [5] NOVÁK, Josef a kolektiv. *Fyzikální chemie bakalářský a magisterský kurz*. Vyd. 1. Fyzikální a koloidní chemie na VČHT v Praze: Josef Novák, 2008. ISBN 978-80-248-1230-1.
- [6] Zezulka, J. *MECHANIKA SYPKÝCH HMOT*. ES VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0699-0.
- [7] MAŇAS, Miroslav, Michal STANĚK a David MAŇAS. *Výrobní stroje a zařízení: gumárenské a plastikářské stroje I*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 264 s. ISBN 978-80-7318-596-1.
- [8] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 175 s. ISBN 80-704-3417-1.
- [9] ŠUBA, Oldřich. *Mechanické chování těles*. Vyd. 4. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 103 s. ISBN 978-80-7318-792-7.
- [10] České vysoké učení technické Rozpojování URL: http://users.fsid.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz13_rv.pdf
- [11] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4
- [12] BENEŠ, Vladimír. *Dílenské tabulky pro školu a praxi*. Úvaly: ALBRA, 2008.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α_2 = úhel pro optimální odpad v 2 pozici	[°]
α_3 = úhel pro optimální odpad ve 3 pozici	[°]
α_5 = úhel dopadu tělíška do 5 pozice	[°]
d = Průměr mlecího tělíška	[mm]
D = Průměr bubny kulového mlýnu	[mm]
R = Průměr oběžné kružnice valivých tělíšek	[mm]
n_{kr} = Kritické otáčky	[ot · min ⁻¹]
n_{opt} = Optimální otáčky	[ot · min ⁻¹]
n_s = Skutečné otáčky	[ot · min ⁻¹]
μ = koeficient udávající poměr mletého materiálu a mlecích tělíšek	[]
G = Hmotnost náplně	[kg]
G_0 = Hmotnost mlecích tělíšek	[kg]
Z = zaplněnost bubny	[%]
P_t = Orientační příkon pro mletí	[W]
P_s = Skutečný příkon pro mletí	[W]
η_n = Účinnost	[]
m_m = hmotnost materiálu	[kg]
m_t = hmotnost mlecích tělíšek	[kg]
φ_e = efektivní úhel vnitřního tření	[°]
φ_i = aktuální (instantní) úhel vnitřního tření materiálu.	[°]
ψ_d = dynamický sypný úhel	[°]
ρ_s = hustota materiálu	[kg · m ⁻³]
T = teplota	[°C]
α' = úhel smykové roviny	[°]

τ_0 = počáteční soudržné napětí	[Pa]
σ_j = napětí ve svislém směru	[Pa]
σ_2 = napětí ve vodorovném směru (Do zhroucení klínu $\sigma_2 = 0$)	[Pa]
h_0 = charakteristická výška	[m]
S = původní povrch	[m ²]
S' = nově vzniklý povrch	[m ²]
W = měrná rozpojovací práce	[J]
u = rozměr částic	[m]
C = konstanta úměrnosti charakterizuje pevnost materiálu	[]
m = exponent je závislý na druhu dodávané energie př.: tlak, stříh	[]
C = <i>Statická únosnost</i>	[]
C_0 = dynamická únosnost	[]
L_{10} = základní životnost ložiska	[ot · 10 ⁶]
U = proud	[A]
I = napětí	[V]
R = elektrický odpor	[Ω]
d_p = Výpočtový průměr malé řemenice	[mm]
D_p = Výpočtový průměr velké řemenice	[mm]
$\eta_1=0,6$ Účinnost přenosu energie na objem bubnu	[]
$\eta_2=0,8$ Účinnost uložení převodů a hřídelí	[]
$\eta_3=0,6$ Účinnost řemenového systému	[]
$\eta_4=0,64$ Účinnost převodů v převodovém soustrojí	[]
$\eta_5=0,8$ a účinnost elektromotoru	[]
$\Delta E_{p\ n}$ = rozdíl potenciální energie	[J]
$\Delta E_{k\ n}$ = rozdíl kinetických energií	[J]

ΔE_{c_n} = rozdíl celkové energie

[J]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1 Wadellova tabulka sféricity částic	19
Obr. 3-2 Stanovení velikosti zrn dle síťového rozboru	20
Obr. 3-3 Ukázka způsobu měření přirozeného sypného úhlu nádobou bez dna.....	22
Obr. 3-4 Úhel vnitřního, vnějšího tření a dalších veličin.....	23
Obr. 3-5 Schéma získání hodnoty charakteristické výšky a úhlu smykové roviny	24
Obr. 3-6 Zobrazení úkosu a smykové roviny při počátečním smykovém napětí	25
Obr. 3-7 Síly figurující v napjatosti elementu	26
Obr. 3-8 Mohrova kružnice zobrazující napětí sypkého materiálu s teoretickou a reálnou tokovou čarou sypkého materiálu.....	27
Obr. 3-9 Znázornění Jansenovy teorie sil účinkujících na stěny nádoby	29
Obr. 4-1 Druhy drcení a výsledná velikost rozpojených částic	32
Obr. 4-2 Energie potřebná k dosažení určité jemnosti.....	32
Obr. 4-3 příklad dělení částice „U“ na menší částice „u“	33
Obr. 4-4 Měrná rozpojovací práce „w“ v závislosti na velikosti částice „u“	36
Obr. 5-1 Kuželový drtič	37
Obr. 5-2 Talířový mlýn.....	38
Obr. 5-3 nožový mlýn.....	38
Obr. 5-4 Kladivový mlýn.....	39
Obr. 5-5 koloidní mlýn	40
Obr. 5-6 kulový mlýn.....	42
Obr. 7-1 Vzájemná pozice tělísek závislá na optimálních otáčkách mlecích režimů.....	49
Obr. 7-2 Přítomné síly po dobu dezintegračního procesu	50
Obr. 7-3 Rozmístění indikačních značek na display.....	82
Obr. 7-4 Ukázka způsobu měření přirozeného sypného úhlu nádobou bez dna.....	83
Obr. 7-5 hlavní soustrojí	84
Obr. 7-6 Hlavní soustrojí	85
Obr. 7-7 Hlavní kryt.....	85
Obr. 7-8 Hlavní kryt.....	86
Obr. 7-9 Celkový pohled	86

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Značení velikosti zrn	16
Tab. 2 Značení přepravních vlastností materiálů	17
Tab. 3 Tabulka optimálních rychlostí odpovídajících režimům	87

SEZNAM PŘÍLOH

1. Výkresová dokumentace (přiložena v zadní části)
2. DVD s kompletní prací a návrhem kulového mlýnu (přiloženo v zadní části)