

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Ing. Martin Jonák

**OPTIMALIZACE KONSTRUKCE
KOREČKOVÝCH DOPRAVNÍKŮ**

DESIGN OPTIMIZATION OF BUCKET CONVEYORS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: doc. Ing. Jiří Malášek, Ph.D.

Oponenti:

Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA

Korečkový dopravník, koreček, nehomogenní materiál, partikulární materiál, metoda diskretních prvků, úhel vnitřního tření, optimalizace.

KEYWORDS

Bucket conveyor, bucket, non-homogeneous material, particulate material, discrete element method, internal friction angle, optimization.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Disertační práce je uložena v Areálové knihovně, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

© Jonák Martin, 2018

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

Úvod	5
1 Cíl disertační práce	6
2 Teorie	7
2.1 Spojitý přístup	7
2.1.1 Tvar hladinové plochy pro ideální kapalinu	7
2.1.2 Tvar povrchu materiálu v korečku pro ideálně sypký a ne-soudržný partikulární materiál s konstantním úhlem vnitřního tření	9
2.1.3 Tvar povrchu materiálu v korečku pro ideálně sypký a ne-soudržný partikulární materiál s proměnným úhlem vnitřního tření a s případnou kohezí	12
2.2 Diskrétní přístup	14
2.2.1 Metoda diskrétních prvků	14
3 Implementace	20
3.1 Výpočetní nástroj	20
3.2 Výpočtové modely využívající metody diskrétních prvků	21
3.2.1 Výpočtový model experimentálního zařízení	21
3.2.2 Výpočtové modely korečkového dopravníku	22
4 Validace	24
5 Ukázkové příklady optimalizace konstrukce korečkových dopravníků	27
5.1 Optimalizace s použitím genetického algoritmu	27
5.2 Optimalizace s použitím metamodelů	29
6 Závěr	32
Literatura	33
Curriculum Vitæ	35

ÚVOD

Přínosem práce je výzkum s cílem identifikace vhodných teoretických popisů, implementace těchto popisů do analytických a výpočtových modelů, jejich experimentální validace a použití v ukázkové optimalizační úloze, jejíž účelem je demonstrovat vybrané způsoby optimalizace konstrukce korečkových dopravníků s využitím moderních optimalizačních metod.

Konkrétně je pozornost věnována analýze vybraných popisů vhodných pro řešení problematiky toků a deformací materiálů během jejich transportu korečkovými dopravníky a jsou prezentovány dva možné přístupy - spojitý a diskrétní. Spojitý přístup je založen na předpokladu, že studované vlastnosti daného materiálu mohou být popsány spojitou funkcí polohy [1]. Diskrétní přístup je pak charakteristický tím, že studovaný materiál je popisován jako soustava konečného počtu částic [1], které mají konkrétní rozměry, tvary a materiálové vlastnosti. Zde je prezentována metoda diskrétních prvků, přičemž z dříve publikovaných článků jsou zřejmé možnosti použití této metody pro modelování toků a deformací homogenních i nehomogenních materiálů.

Na základě teoretických popisů jsou vytvořeny modely, které jsou následně použity pro řešení úloh souvisejících s danou problematikou. Jednotlivé úlohy jsou pak záměrně sestaveny tak, aby je bylo možné ověřit na experimentálním zařízení nazývaném „Zařízení pro kreativní systém tvorby matematických popisů obecných procesů“, které se nachází v Laboratoři partikulárních látek na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Konkrétně se jedná o úlohy, které jsou zaměřené na proces vyprazdňování korečku a jsou zde postupně použity oba výše uvedené přístupy.

Získané výsledky jsou dále experimentálně ověřeny metodou PIV pro sypké materiály, kdy je na výše zmíněném zařízení vysokorychlostní kamerou snímáno reálné vyprazdňování korečku a získaný záznam je dále zpracováván metodami pro zpracování obrazu dostupnými v knihovnách OpenCV.

Dále je v práci provedena rešerše dvou optimalizačních metod, jež jsou spolu s validovaným modelem použity v ukázkové optimalizační úloze, ve které je provedena optimalizace geometrie korečku pro odstředivý i gravitační způsob vyprazdňování. Optimalizační úloha je řešena jednak přímo, s použitím genetického algoritmu, a jednak nepřímo, pomocí metamodelu. Přestože v obou případech je dosaženo prakticky stejných výsledků, tj. přibližně shodné výšky vnější a vnitřní stěny korečku a délky jeho vyložení, a zároveň tyto výsledky korespondují s hodnotami doporučenými v dostupné literatuře [3, 4, 19], tak časová náročnost vytvoření a použití metamodelu je řádově nižší, než v případě použití genetického algoritmu.

Závěr práce je věnován zhodnocení a diskuzi dosažených výsledků.

1 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem disertační práce je identifikace vhodných matematických popisů, které mohou být použity pro popis toků a deformací materiálů od ideální kapaliny až po sypkou (partikulární) látku, a dále vyhodnocení možností jejich aplikace pro popis chování nehomogenních materiálů obecně.

Autor si rovněž dává za cíl implementaci vybraných popisů do úloh souvisejících s řešenou problematikou, včetně jejich následné validace s použitím „Zařízení pro kreativní systém tvorby matematických popisů obecných procesů“.

Je předpokládáno, že pomocí poznatků získaných vhodným použitím těchto matematických popisů bude možno optimalizovat tvar korečku a provozní parametry dopravníku tak, aby k vyprazdňování materiálu docházelo požadovaným způsobem.

Doktorské studium bylo členěno do etap uvedených níže.

1. Studium mechanismů toků materiálů v průběhu vyprazdňování korečků a zhodnocení současného stavu poznání.
2. Vytvoření vybraných matematických popisů tvaru povrchu materiálu v korečku.
3. Implementace těchto matematických popisů do výpočetního nástroje.
4. Vytvoření výpočtových diskrétně-prvkových modelů korespondujících s experimenty, které lze provádět na „Zařízení pro kreativní systém tvorby matematických popisů obecných procesů“.
5. Vytvoření výpočtového modelu celého korečkového dopravníku včetně identifikace vhodných materiálových modelů.
6. Validace vytvořených výpočtových modelů i výpočetního nástroje.
7. Nalezení a sestavení algoritmu vhodného pro řešení ukázkové optimalizační úlohy.
8. Vytvoření ukázkové optimalizační úlohy zaměřené na optimalizaci konstrukce korečkového dopravníku.
9. V souvislosti s danou problematikou, diskuze použitelnosti jednotlivých matematických popisů, shrnutí a zhodnocení získaných poznatků.
10. Publikování dosažených výsledků ve vědeckých časopisech a na mezinárodních konferencích.

2 TEORIE

Pro přesné stanovení úhlu, po jehož dosažení začne materiál opouštět koreček, resp. pro stanovení vhodného tvaru korečku tak, aby jej materiál opouštěl předem určeným způsobem, je nutné vědět, jakým způsobem se bude materiál během vyprazdňování v korečku přetvářet. Dle [1] jsou způsoby řešení problematiky toků a deformací nejen sypkých materiálů zpravidla rozdělovány do dvou přístupů. Jedná se o tzv. spojitý a diskrétní přístup. Rovněž zde prezentované popisy je možné zařadit do těchto dvou přístupů blíže popsanych v následujících podkapitolách.

2.1 Spojitý přístup

Spojité přístup (z angl. the continuum approach) je založen na předpokladu, že studované vlastnosti daného materiálu mohou být popsány spojitou funkcí polohy. Materiál je tedy popisován jako kontinuum a vliv orientace, tvaru a velikosti jednotlivých částic zde není uvažován.

Předmětem následujícího textu je popis křivky, která vznikne řezem přepravovaného materiálu kolmým na osu otáčení O . Tato křivka je dále též nazývaná jako tvar hladinové plochy, nebo tvar povrchu materiálu v korečku.

Zde je nutné poznamenat, že níže uvedené popisy vychází z předpokladu, že tvar povrchu materiálu v korečku lze stanovit pouze v okamžiku počátku jeho vyprazdňování. Do té chvíle křivka popisující tento tvar může odpovídat pouze určitému meznímu přetvoření, neboť je dále předpokládáno, že z počátečních podmínek je známo pouze množství materiálu v korečku, resp. jeho objem a součinitel plnění. Rovněž se předpokládá, že hodnota úhlu vnějšího tření nemá vliv na přetváření materiálu v korečku a dále, že pro kohezivní materiály bude tento popis nevhodný, např. z důvodu nalepení materiálu na stěny korečku. Dále je také nutné uvést, že ve všech popisech uvedených v následujících podkapitolách je úloha řešena jako statická.

2.1.1 Tvar hladinové plochy pro ideální kapalinu

Bude-li se jednat o ideální kapalinu charakterizovanou úhlem vnitřního tření $\varphi = 0^\circ$, což lze považovat za základní popis přepravovaného materiálu, a bude-li úloha řešena jako statická, lze odvodit (viz rovnice (2.1) a (2.2) až (2.5)), že hladinové plochy, tedy i povrch materiálu (pro $\varphi = 0^\circ$), zaujmou v korečku tvary válcových ploch s osou rovnoběžnou k ose rotace korečku a procházející bodem P (viz obr. 2.1).

Pro případ řezu se tedy jedná o tvar kružnice, jejíž poloměr je závislý na vzdálenosti hladiny od pólu P , resp. na poloměru r (velikost polohového vektoru $\mathbf{r}$ mezi

osou otáčení O a zkoumaným místem, např. bod B na obr. 2.1), úhlové rychlosti ω a velikosti tíhového zrychlení g .

Níže provedené odvození tvaru hladinové plochy ideální kapaliny je provedeno v řezu jako statická a dvourozměrná úloha a je schematicky znázorněno na obr. 2.1. Polohu pólu P lze určit buď z podobnosti trojúhelníků (2.1), nebo z integrace rovnice směrnic tečny hladinové plochy, pomocí které je provedeno také odvození jejího tvaru.

$$\frac{\overline{OP} - y}{x} = \frac{g - y\omega^2}{x\omega^2} \Rightarrow \overline{OP} = y + \frac{g - y\omega^2}{\omega^2} = \frac{g}{\omega^2} \quad (2.1)$$

kde:

$$y = r \sin \alpha$$

$$x = r \cos \alpha$$

$$g = |\mathbf{g}| = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Na materiál působí výsledná síla $\mathbf{F}_v = (F_{v_x}, F_{v_y})$, přičemž $\mathbf{F}_v = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_o$. Složky výsledné síly jsou:

$$F_{v_x} = \rho_\gamma x \omega^2, \quad F_{v_y} = \rho_\gamma (y \omega^2 + g_y) \quad (2.2)$$

Směrnice tečny je pak ve tvaru:

$$k_t = -\frac{1}{k_n} = -\frac{x\omega^2}{y\omega^2 + g_y} = \frac{dy}{dx} \quad (2.3)$$

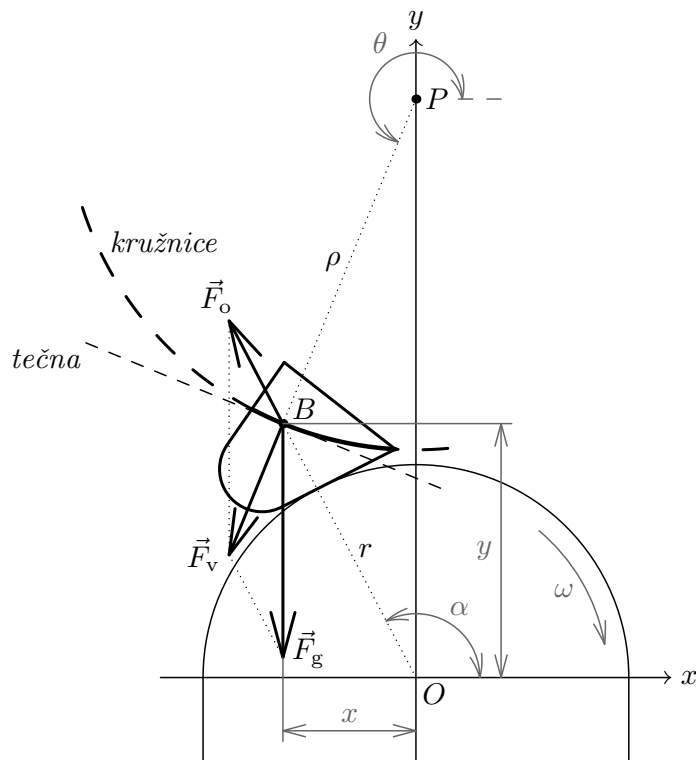
Vztah upravíme a po integraci je získána rovnice:

$$y^2 + x^2 + \frac{2g_y}{\omega^2}y = C_2 \quad (2.4)$$

Vztah (2.4) je vhodné dále upravit na tvar obecné rovnice kružnice s použitím pomocného členu $\frac{g_y^2}{\omega^4}$:

$$(y^2 + \frac{2g_y}{\omega^2}y + \frac{g_y^2}{\omega^4}) - \frac{g_y^2}{\omega^4} + x^2 = C_2 \Rightarrow (y + \frac{g_y}{\omega^2})^2 + x^2 = C_2 + \frac{g_y^2}{\omega^4} \Rightarrow (y - (-\frac{g_y}{\omega^2}))^2 + x^2 = \rho^2 \quad (2.5)$$

kde ρ je poloměr kružnice (vzdálenost $\overline{BP}$), viz obr. 2.1. Jedná se o rovnici kružnice se středem v bodě $P [0; -\frac{g_y}{\omega^2}]$, tedy $\overline{OP}$ je $\frac{|g_y|}{\omega^2}$, což je ve shodě s rovnicí (2.1).



Obr. 2.1: Nákres k odvození tvaru hladinové plochy pro případ ideální kapaliny v korečku rotujícím kolem vodorovné osy O - gravitační vyprazdňování.

2.1.2 Tvar povrchu materiálu v korečku pro ideálně sypký a nesoudržný partikulární materiál s konstantním úhlem vnitřního tření

Základní popis tvaru povrchu materiálu v korečku uvedený v předchozí podkapitole je vzhledem ke schopnosti partikulárních materiálů přenášet do určité míry i smyková napětí velmi zjednodušený. Schopnost přenášet smyková napětí lze charakterizovat úhlem vnitřního tření φ , který je pro způsob popisu uvedený v této podkapitole považován za nenulový a konstantní.

Křivka, vzniklá svislým řezem povrchu materiálu v korečku kolmým na osu otáčení O , pak není kružnice, ale dle [3, 4, 15] se jedná o logaritmickou spirálu. Tato skutečnost vyplývá z předpokladu, že vlivem tření, jež je tedy charakterizováno nenulovým, ale konstantním úhlem vnitřního tření φ , se elementy partikulárního materiálu nepřesouvají do takové polohy, která by odpovídala případu uvedenému v podkapitole 2.1.1, nýbrž se za touto polohou „opožďují“. Tečna křivky, vzniklé svislým řezem povrchu materiálu, pak nebude svírat s úsečkou ρ úhel $\pi/2$, ale úhel $\varphi + \pi/2$.

Byly provedeny dva způsoby odvození křivky popisující tvar povrchu materiálu v korečku. Odvození jsou provedena pro případ gravitačního způsobu vyprazdňování korečku. Problematika je schematicky znázorněna na obr. 2.2.

Vzhledem ke skutečnosti, že hledané parametrické rovnice logaritmické spirály jsou definovány v souřadném systému (x_P, y_P) se středem v pólu $P [0; -\frac{g_y}{\omega^2}]$, je zde jako první krok provedena transformace do tohoto souřadného systému. Konkrétně se jedná o translaci ve směru osy y o $\frac{g_y}{\omega^2}$. Tedy:

$$F_{v_x} = \rho_\gamma x \omega^2 = \rho_\gamma x_P \omega^2 \quad (2.6)$$

$$F_{v_y} = \rho_\gamma (y \omega^2 + g_y) = \rho_\gamma \left(\left(y_P - \frac{g_y}{\omega^2} \right) \omega^2 + g_y \right) \quad (2.7)$$

kde:

$x_P = x$ je transformovaná složka polohového vektoru $\mathbf{r}$ ve směru osy x ,
 $y_P = y + \frac{g_y}{\omega^2}$ je transformovaná složka polohového vektoru $\mathbf{r}$ ve směru osy y .

Za účelem získání tečné a normálové složky vektoru výsledné síly $\mathbf{F}_v$ je ve zkoumaném bodě hledané křivky provedena transformace do souřadného systému normály a tečny (n, t) . Tedy:

$$\begin{bmatrix} F_{v_n} \\ F_{v_t} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{rot}} \begin{bmatrix} F_{v_x} \\ F_{v_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta - \varphi) & \sin(\theta - \varphi) \\ -\sin(\theta - \varphi) & \cos(\theta - \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{v_x} \\ F_{v_y} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

kde:

F_{v_x} a F_{v_y} jsou složky vektoru výsledné síly $\mathbf{F}_v$ v souřadném systému (x_P, y_P) ,
 F_{v_n} a F_{v_t} jsou složky vektoru výsledné síly $\mathbf{F}_v$ v souřadném systému (n, t) .

Jelikož:

$$k_t = -\frac{1}{k_n} \quad (2.9)$$

kde:

k_t je směrnice tečny a
 k_n je směrnice normály,

může být pro následující integraci vybrána tečná, nebo normálová složka vektoru $\mathbf{F}_v$, a je provedena transformace zpět do souřadného systému (x_P, y_P) . Je-li tedy zvolena normálová složka F_{v_n} , lze provést následující transformaci:

$$\begin{bmatrix} F_{v_{nx}} \\ F_{v_{ny}} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{rot}}^{-1} \begin{bmatrix} F_{v_n} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta - \varphi) & -\sin(\theta - \varphi) \\ \sin(\theta - \varphi) & \cos(\theta - \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{v_n} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

kde:

$F_{v_{nx}}$ a $F_{v_{ny}}$ jsou složky vektoru $\mathbf{F}_{v_n}$ v souřadném systému (x_P, y_P) .

Směrnice tečny je pak ve tvaru:

$$k_t = -\frac{1}{k_n} = -\frac{F_{v_{nx}}}{F_{v_{ny}}} = -\frac{\cos(\theta - \varphi)F_{v_n}}{\sin(\theta - \varphi)F_{v_n}} = \frac{dy}{dx} \quad (2.11)$$

Vztah (2.11) je upraven:

$$-\frac{(\cos \theta \cos \varphi + \sin \theta \sin \varphi)F_{v_n}}{(\sin \theta \cos \varphi - \cos \theta \sin \varphi)F_{v_n}} = \frac{\frac{dy}{d\theta}}{\frac{dx}{d\theta}} \quad (2.12)$$

a zlomek je rozšířen o $\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi}$ a upraven:

$$\frac{\sin \theta \operatorname{tg} \varphi + \cos \theta}{\cos \theta \operatorname{tg} \varphi - \sin \theta} = \frac{\frac{dy}{d\theta}}{\frac{dx}{d\theta}} \quad (2.13)$$

Po integraci jsou získány rovnice:

$$y = ae^{(\operatorname{tg} \varphi)\theta} \sin \theta + C_2 \quad (2.14)$$

$$x = ae^{(\operatorname{tg} \varphi)\theta} \cos \theta + C_1 \quad (2.15)$$

Druhý způsob odvození je proveden v souladu s obr. 2.2 přímo v polárním souřadném systému (θ, ρ) . Úsečky ρ a $\rho + d\rho$, které svírají s osou x_P úhly θ a $\theta + d\theta$, jsou vzdálenosti zkoumaných bodů na povrchu materiálu A a B od pólu P a zároveň nositelky směrů výsledné síly $\mathbf{F}_v$ v bodech A a B . Úhel mezi normálou k předpokládanému tvaru povrchu přepravovaného materiálu v bodě A , resp. B , a úsečkou ρ je úhel vnitřního tření φ . Jestliže body A a B leží na téže křivce, potom platí:

$$\rho + d\rho = \rho + \operatorname{tg} \varphi \rho d\theta \quad (2.16)$$

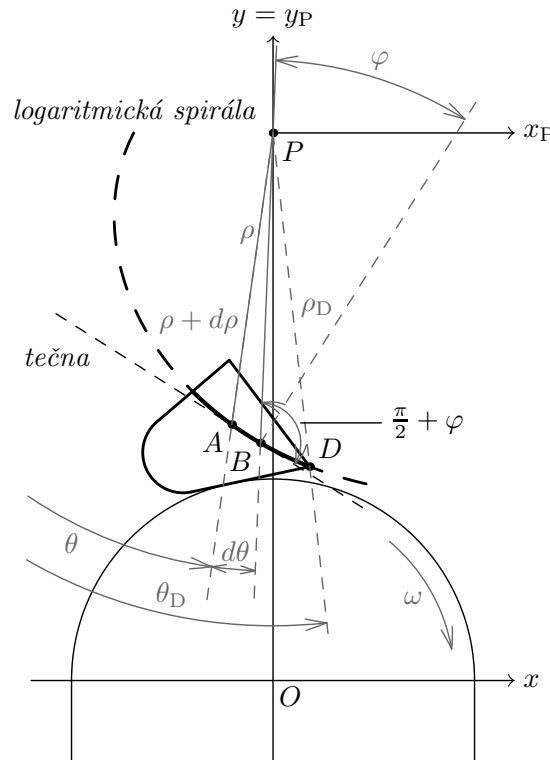
Po úpravě:

$$\int_{\rho}^{\rho_D} \frac{d\rho}{\rho} = \int_{\theta}^{\theta_D} \operatorname{tg} \varphi d\theta \quad (2.17)$$

Po integraci (2.17) a úpravě je získána rovnice:

$$\rho = \rho_D e^{-\operatorname{tg} \varphi (\theta_D - \theta)} = \rho_D e^{\operatorname{tg} \varphi (\theta - \theta_D)} \quad (2.18)$$

Odvozené rovnice jsou obecné rovnice logaritmické spirály, kde ρ_D a θ_D určují polohu bodu D , ve kterém logaritmická spirála s pólem v bodě P protíná stěnu korečku.



Obr. 2.2: Schematické znázornění tvaru povrchu partikulárního materiálu odpovídajícího logaritmické spirále - gravitační vyprazdňování.

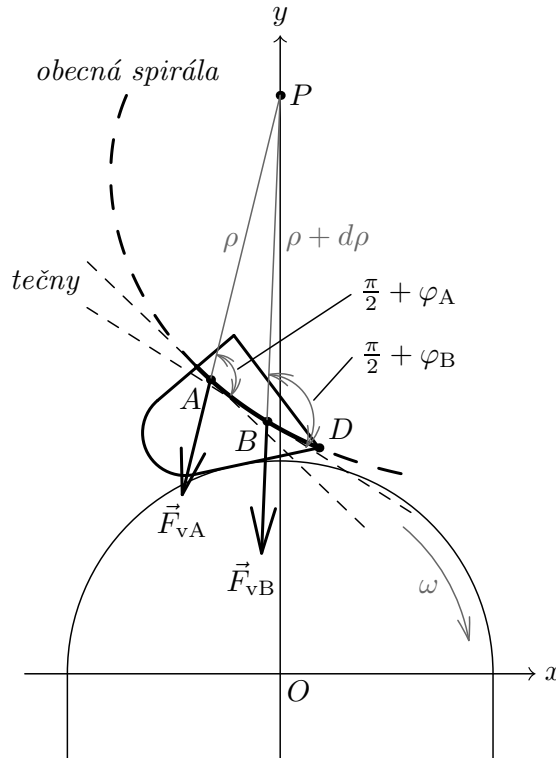
2.1.3 Tvar povrchu materiálu v korečku pro ideálně sypký a nesoudržný partikulární materiál s proměnným úhlem vnitřního tření a s případnou kohezí

Popis tvaru povrchu materiálu v korečku provedený v podkapitole 2.1.2 je v dnes dostupné literatuře [15, 4, 3] považován za teoreticky přesný. Je však rovněž známo [14],

že závislost mezního smykového napětí na mezním normálovém napětí je obecně nelineární, tudíž vztah $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$ je potřeba nahradit vztahem $\tau = f(\sigma)$, kde f (dále též mezní čára) může být obecná funkce, pro jejíž analytické vyjádření není doposud jednoznačná teorie [4].

Důsledek obecně nelineární závislosti mezi mezním smykovým a mezním normálovým napětím při odvozování tvaru povrchu materiálu v korečku je, že tento tvar nebude obecně odpovídat logaritmické spirále, nýbrž se bude jednat o obecnou funkci, pravděpodobně obecnou spirálu, jejíž tvar bude záviset na charakteristice $\tau = f(\sigma)$.

Na obr. 2.3 je schematicky znázorněná problematika nelineární závislosti mezi mezním smykovým a mezním normálovým napětím ve vztahu k úhlu, který svírá nositelka vektoru výsledné síly $\vec{F}_v$ s tečnou křivky popisující tvar povrchu materiálu v korečku. Je zřejmé, že tento úhel obecně nebude pro dva různé body A a B ležící na této křivce stejný. Je-li tedy známa charakteristika materiálu $\tau = f(\sigma)$, mělo by být možné odvodit i tvar křivky popisující tvar povrchu materiálu v korečku.



Obr. 2.3: Schematické znázornění tvaru povrchu partikulárního materiálu odpovídajícího obecné spirále - gravitační vyprazdňování.

2.2 Diskrétní přístup

V rámci diskrétního přístupu (z angl. the particulate approach) je studovaný materiál popisován jako soustava konečného počtu částic, které mají konkrétní rozměry, tvary a materiálové vlastnosti. Chování soustavy je pak dáno pohybem a vzájemnou interakcí na úrovni jednotlivých částic a jsou zde aplikovány fyzikální principy adekvátní studované problematice. Při řešení problematiky chování sypkých látek se bude jednat např. o Newtonovy pohybové zákony. V následujícím textu je prezentována metoda diskrétních prvků (DEM).

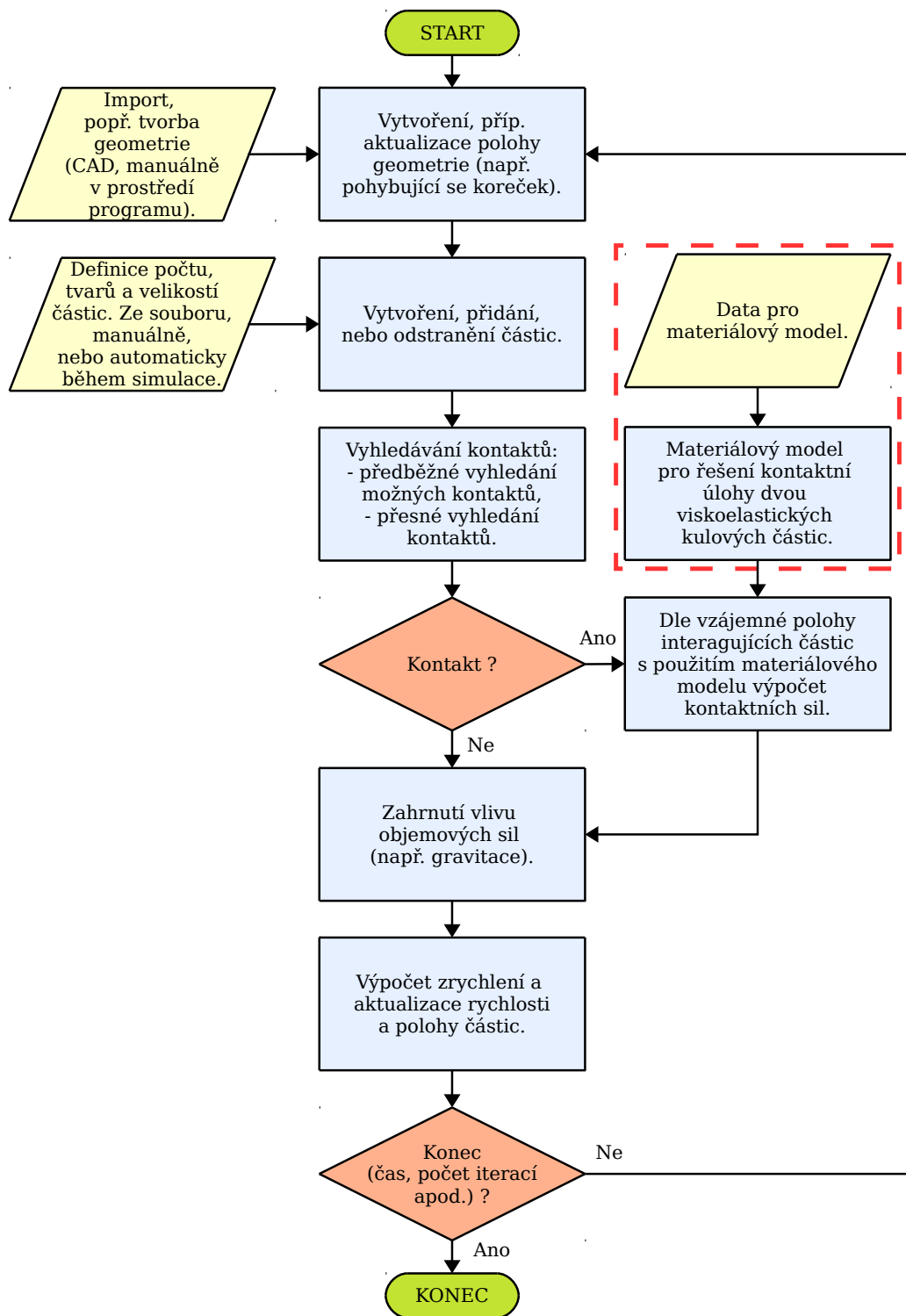
2.2.1 Metoda diskrétních prvků

Metoda diskrétních prvků patří do rodiny numerických metod, které umožňují výpočet pohybů a vzájemného působení velkého množství „diskrétních“ částic. Ve [2] byly popsány základní principy metody diskrétních prvků v aplikaci na řešení problematiky chování partikulárních látek. Vhodnost použití této metody v její základní podobě je založena na předpokladu, že deformace jednotlivých částic skutečného materiálu jsou zanedbatelné vzhledem k deformaci studované soustavy jako celku.

Během výpočetního cyklu je v každé iteraci, tj. pro časový krok Δt , řešena pohybová a kontaktní úloha, přičemž pro řešení těchto úloh existuje více přístupů. S ohledem na způsob použití metody v této práci může být výpočetní cyklus zjednodušeně popsán prostřednictvím vývojového diagramu znázorněného na obr. 2.4. Z diagramu je patrné, že prvními kroky jsou import geometrie do prostředí simulace a vytvoření částic, včetně inicializace materiálových modelů. Poté je spuštěn hlavní výpočetní cyklus, během kterého jsou vyhledávány vzájemné kontakty mezi částicemi a kontakty mezi částicemi a geometrií. Pro každý nalezený kontakt je následovně řešena kontaktní úloha, jejíž cílem je stanovit kontaktní síly a momenty, přičemž jejich velikosti jsou funkcí materiálového modelu a kolizní geometrie daného kontaktu, jež popisuje způsob a velikost deformace částic při kolizi.

Řešení kontaktní úlohy pro případ kontaktu dvou viskoelastických kulových částic (Kelvin-Voigtův model pro lineární isotropní materiál) může být popsáno následovně:

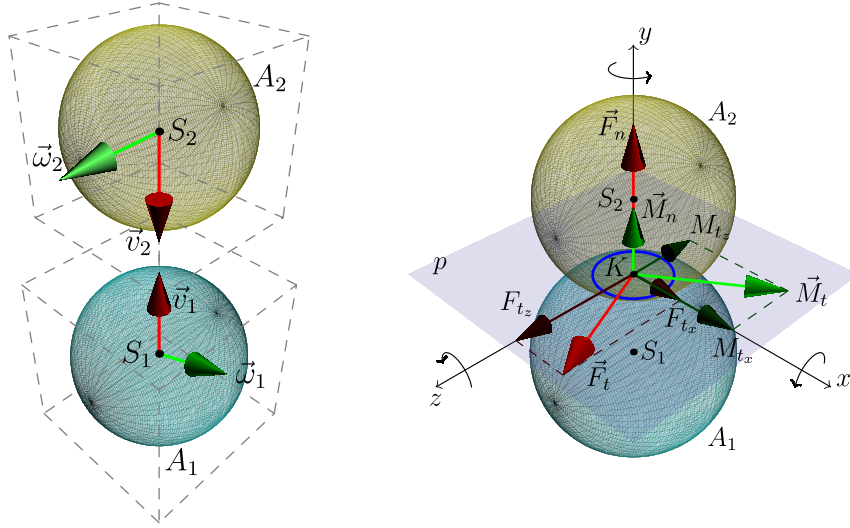
Nechť t_{i-1} je čas na začátku iterace $i - 1$ a částice A_1 a A_2 se středy S_1 a S_2 a o poloměrech R_1 a R_2 se pohybují rychlostmi $\mathbf{v}_1$ a $\mathbf{v}_2$ a nejsou ve vzájemném kontaktu. Vzdálenost středů částic je $\overline{S_1 S_2}$. V tomto okamžiku kontaktní síla $\mathbf{F}$ neexistuje. Situace je znázorněna na obr. 2.5a.



Obr. 2.4: Vývojový diagram znázorňující průběh výpočetního cyklu v metodě diskretních prvků. Bloky ohraničené červeným obdélníkem představují části vytvořené při řešení cíle této práce.

Vzhledem k pohybu částic jsou na konci této iterace obě částice posunuty o $\mathbf{v}_1 \Delta t$ a $\mathbf{v}_2 \Delta t$. Za předpokladu, že vzájemný pohyb částic vede ke kolizi a dále, že časový krok Δt je dostatečně malý tak, aby se částice „neminuly“, tzn. že posuny částic jsou výrazně menší než jejich poloměry, existuje v i -té iteraci i kolizní geometrie, tj. vzájemný průnik obou částic vůči sobě. Pro případ kulových částic je kolizní geometrií průnik dvou kulových ploch. Tento průnik je charakterizován kontaktním bodem K , rovinou p a penetrací definovanou vektorem $\mathbf{x}_n$, jehož nositelka je vždy shodná s nositelkou normálového vektoru $\mathbf{n}^0$. Samotný kontaktní bod K lze pak definovat jako průsečík nositelky normálového vektoru $\mathbf{n}^0$ s rovinou p .

Způsob popisu kolizní geometrie výše uvedenou penetrací a její přímé použití ve vztahu (2.20) lze považovat za základní. Situace je znázorněna na obr. 2.5b.



(a) Situace před kolizí dvou kulových částic. (b) Kolize dvou kulových částic - znázornění kontaktních sil a momentů.

Obr. 2.5: Znázornění situace vedoucí ke kolizi dvou kulových částic.

Poté co je získána relativní dráhová rychlost $\mathbf{v}_{rel}$ a úhlová rychlost $\boldsymbol{\omega}_{rel}$, je vypočtena kontaktní síla $\mathbf{F}$.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_t \quad (2.19)$$

$$\mathbf{F}_n = \begin{cases} k_n^+ \mathbf{x}_n + c_n^+ \mathbf{v}_n & \text{je-li } (R_1 + R_2) \geq \overline{S_1 S_2} \\ k_n^- \mathbf{x}_n + c_n^- \mathbf{v}_n & \text{je-li } (R_1 + R_2) < \overline{S_1 S_2} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{F}_t = \begin{cases} k_t^+ \mathbf{x}_t + c_t^+ \mathbf{v}_t & \text{je-li } (R_1 + R_2) \geq \overline{S_1 S_2} \\ k_t^- \mathbf{x}_t + c_t^- \mathbf{v}_t & \text{je-li } (R_1 + R_2) < \overline{S_1 S_2} \end{cases} \quad (2.21)$$

kde:

- $\mathbf{F}$ je kontaktní síla,
- $\mathbf{F}_n$ je normálová složka $\mathbf{F}$,
- $\mathbf{F}_t$ je tečná (smyková) složka $\mathbf{F}$,
- $\mathbf{x}_n$ je vektor charakterizující vzájemný průnik částic, tzv. penetraci, jehož velikost lze také vypočítat jako $(R_1 + R_2) - \overline{S_1 S_2}$. Je-li tato hodnota ≥ 0 , dochází ke kolizi.
- $\mathbf{x}_t$ je celková tečná deformace, která se mění inkrementálně,
- k_n je koeficient tuhosti v normálovém směru,
- k_t je koeficient tuhosti v tečném směru,
- c_n je koeficient tlumení v normálovém směru,
- c_t je koeficient tlumení v tečném směru.

Znaménka v horním indexu odlišují koeficienty pro dva způsoby interakce částic - tlak (+), resp. tah (-), např. pro popis kohezivního chování.

Dvě podmínky v rovnicích (2.20) a (2.21) přibližně popisují skutečnost, že v případě kontaktu dvou částic, kdy $(R_1 + R_2) \geq \overline{S_1 S_2}$, je podstata jejich vzájemné interakce jiná (jedná se o „deformaci“ částic jako takových) než v případě jejich kohezivního, popř. jiného chování, jehož následkem je schopnost přenášet jistá tahová zatížení, tedy pro $(R_1 + R_2) < \overline{S_1 S_2}$, přičemž nevykazuje-li materiál toto chování, kontakt zaniká. V opačném případě zaniká až po dosažení určité mezní hodnoty.

Výše uvedené koeficienty tuhostí a tlumení lze vypočítat jako:

$$\frac{1}{k_n} = \frac{1}{k_{n_1}} + \frac{1}{k_{n_2}} \Rightarrow k_n = \frac{k_{n_1} k_{n_2}}{k_{n_1} + k_{n_2}} \quad (2.22)$$

$$\frac{1}{k_t} = \frac{1}{k_{t_1}} + \frac{1}{k_{t_2}} \Rightarrow k_t = \frac{k_{t_1} k_{t_2}}{k_{t_1} + k_{t_2}} \quad (2.23)$$

$$\frac{1}{c_n} = \frac{1}{c_{n_1}} + \frac{1}{c_{n_2}} \Rightarrow c_n = \frac{c_{n_1} c_{n_2}}{c_{n_1} + c_{n_2}} \quad (2.24)$$

$$\frac{1}{c_t} = \frac{1}{c_{t_1}} + \frac{1}{c_{t_2}} \Rightarrow c_t = \frac{c_{t_1} c_{t_2}}{c_{t_1} + c_{t_2}} \quad (2.25)$$

kde:

- k_{n_1}, k_{n_2} a k_{t_1}, k_{t_2} jsou koeficienty tuhosti částice A_1 , resp. A_2 , v normálovém a tečném směru,
- c_{n_1}, c_{n_2} a c_{t_1}, c_{t_2} jsou koeficienty tlumení částice A_1 , resp. A_2 , v normálovém a tečném směru.

Hodnoty koeficientů pro konkrétní částici je možno stanovit několika způsoby. Buď použitím modulu pružnosti v tahu E a Poissonova čísla ν . Tento způsob je však

velice přibližný, neboť obě hodnoty jsou určeny pro popis elastického kontinua a po identifikaci hodnot parametrů materiálového modelu se mohou výrazně lišit od původních hodnot pro materiál reálných částic. Nebo použitím koeficientů restituce pro normálový a tečný směr, z nichž lze získat koeficienty tuhosti a tlumení, což je v praxi častější případ. Anebo ryze experimentálně.

Konečná velikost síly $\mathbf{F}_t$ je ovlivněna třením mezi interagujícími částicemi. Výše uvedený způsob popisu rozšíříme o podmínku:

$$\mathbf{F}_t = \begin{cases} \mathbf{F}_t, & \text{jestliže } \mathbf{F}_t \leq f \mathbf{F}_n, \\ f \mathbf{F}_n, & \text{jestliže } \mathbf{F}_t > f \mathbf{F}_n, \end{cases} \quad (2.26)$$

kde:

f je součinitel tření a
 $f \mathbf{F}_n$ je třecí síla, tedy maximální velikost síly $\mathbf{F}_t$.

Součinitel tření f je definovaný jako tangenta třecího úhlu pro daný materiál, přičemž v případě kontaktu dvou, nebo více částic s různou hodnotou tohoto součinitele, lze jeho konečnou velikost upravit tak, aby korespondovala s experimentálně změřenými hodnotami.

Tečná složka síly vytváří momenty kolmé na $\mathbf{n}^0$:

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{F}_t \times (\mathbf{K} - \mathbf{S}_1) \quad (2.27)$$

$$\mathbf{M}_2 = \mathbf{F}_t \times (\mathbf{K} - \mathbf{S}_2) \quad (2.28)$$

kde:

$\mathbf{M}_1$ je moment působící na částici A_1 ,
 $\mathbf{M}_2$ je moment působící na částici A_2 .

V případě nenulové relativní úhlové rychlosti $\boldsymbol{\omega}_{\text{rel}}$ zde může být zohledněn vliv momentu $\mathbf{M}_r$ způsobeného valivým odporem a odporem vzniklým vzájemným třením dvou částic při krutu. Jeho velikost může být závislá jak na velikosti síly $\mathbf{F}_n$, tak např. i na velikosti $\boldsymbol{\omega}_{\text{rel}}$.

Obdobně, jako v případě výpočtu kontaktní síly, je dále vypočten moment vzniklý změnou a rychlostí změny natočení interagujících částic vůči sobě. Výpočet tohoto momentu je však relevantní pouze v případech, kdy nahrazovaný materiál vykazuje kohezivní chování, nebo je-li snaha zohlednit určitý vliv viskoelastického chování na úrovni vzájemné rotace dvou interagujících částic (maximální velikost tohoto momentu bude rovna velikosti $\mathbf{M}_r$), anebo je tímto materiálovým modelem obecně

popisován systém, jehož elementy jsou schopné přenášet zatížení ve všech šesti stupních volnosti. Na dvě interagující částice tedy působí moment:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_o + \mathbf{M}_k \quad (2.29)$$

$$\mathbf{M}_o = k_o \boldsymbol{\varphi}_t + c_o \boldsymbol{\omega}_t \quad (2.30)$$

$$\mathbf{M}_k = k_k \boldsymbol{\varphi}_n + c_k \boldsymbol{\omega}_n \quad (2.31)$$

kde:

- $\mathbf{M}$ je celkový moment vzniklý změnou a rychlostí změny natočení interagujících částic vůči sobě,
- $\mathbf{M}_o$ je složka momentu $\mathbf{M}$ pro ohyb,
- $\mathbf{M}_k$ je složka momentu $\mathbf{M}$ pro kroucení,
- $\boldsymbol{\varphi}_t$ je složka vzájemného natočení interagujících částic ve směru rovnoběžném s rovinou p , přičemž $\boldsymbol{\varphi}_t = \boldsymbol{\varphi}_t + \boldsymbol{\omega}_t \Delta t$,
- $\boldsymbol{\varphi}_n$ je složka vzájemného natočení interagujících částic ve směru kolmém na rovinu p , přičemž $\boldsymbol{\varphi}_n = \boldsymbol{\varphi}_n + \boldsymbol{\omega}_n \Delta t$,
- k_o, k_k jsou koeficienty tuhosti v ohybu a krutu a
- c_o, c_k jsou koeficienty tlumení v ohybu a krutu.

Koeficienty k_o , k_k a c_o , c_k nelze považovat za nezávislé, nýbrž jejich velikost závisí na k_n , k_t a c_n , c_t .

Jelikož daná částice zpravidla interaguje s více než jednou další částicí, jsou síly a momenty pro každou interakci dané částice postupně sčítány. Poté jsou aplikovány další, např. objemové síly (zejména gravitace). Výsledkem je celková síla a celkový moment působící na danou částici, ze kterých je následně s použitím Druhého Newtonova zákona vypočteno dráhové a úhlové zrychlení částice. Následně s použitím varianty Verletovy metody pro integraci Newtonových pohybových rovnic, tzv. leapfrog integrace, je vypočtena změna dráhové a úhlové rychlosti, která je přičtena k jejich okamžitým hodnotám známým z předchozí iterace, jež jsou dále použity při výpočtu polohy a orientace částice. Poté co jsou aktualizovány polohy a rychlosti všech částic, je aktuální čas navýšen o Δt a celý výpočet se opakuje dokud není splněna ukončovací podmínka.

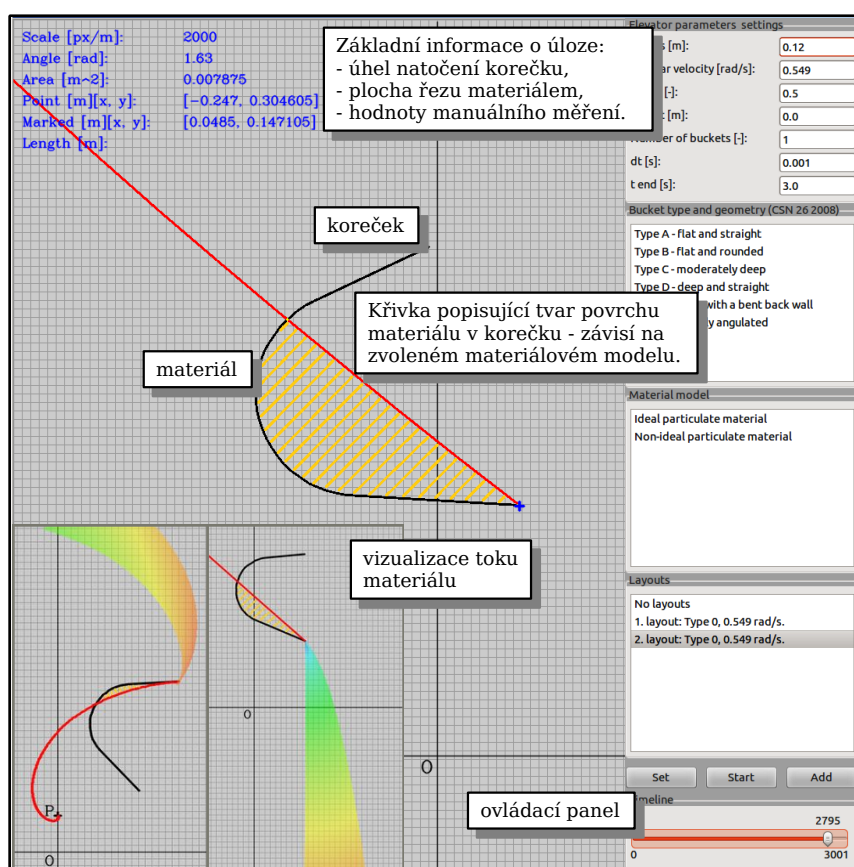
Podle výše uvedeného popisu řešení kontaktní úlohy, který byl vytvořen v rámci plnění cíle disertační práce, byl vytvořen materiálový model. Přestože se jedná o známou problematiku kontaktu viskoelastických částic, byla implementace materiálového modelu vytvořena obecně tak, aby umožnila např. zahrnutí vlivu koheze a zohlednění rozdílných mechanismů uplatňujících se jak při kontaktu, tak také při jeho rozpojování.

3 IMPLEMENTACE

V této kapitole jsou provedeny implementace teoretických popisů.

3.1 Výpočetní nástroj

Za účelem ověření analytických popisů uvedených v rámci podkapitoly 2.1 byl vytvořen výpočetní nástroj, který umožňuje stanovení začátku vyprazdňování korečku, resp. stanovení úhlu, po jehož dosažení začne materiál koreček opouštět, spolu se znázorněním způsobu a průběhu vyprazdňování. Výsledky jednotlivých výpočtů obsahující informace o vstupních parametrech, křivce popisující tvar povrchu materiálu v korečku, jeho natočení, velikosti průřezu materiálu a o křivkách předpokládaného pohybu materiálu během vyprazdňování je možno zapsat na disk v podobě textových dat, nebo je přímo porovnávat prostřednictvím grafického uživatelského rozhraní, viz obr. 3.1, které zároveň slouží i pro komunikaci mezi uživatelem a výpočetním nástrojem.



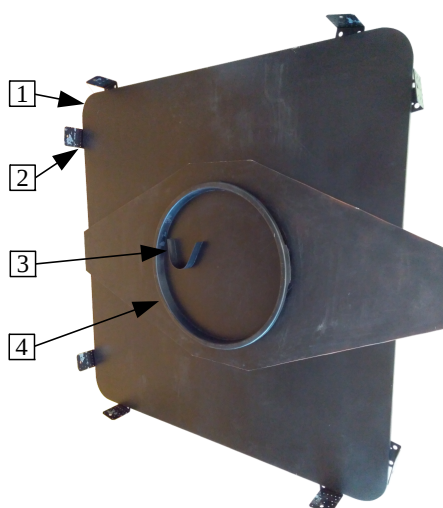
Obr. 3.1: Grafické uživatelské rozhraní výpočetního nástroje.

3.2 Výpočtové modely využívající metody diskretních prvků

Na základě teorie prezentované v podkapitole 2.2.1, byl v rámci frameworku Yade vytvořen viskoelastický materiálový model vhodný pro popis chování jak homogenních, tak nehomogenních materiálů. Poté co byl model verifikován, byly s jeho použitím vytvořeny úlohy popsané níže.

3.2.1 Výpočtový model experimentálního zařízení

S použitím 3D modelu experimentálního zařízení byla vytvořena úloha (simulace) vyprazdňování korečku. Materiály použité v simulacích odpovídaly bílým plastovým kuličkám a hracím kostkám - čtyřstěnu, šestistěnu, osmistěnu a dvanáctistěnu. Bílé plastové kuličky byly vybrány jako zástupce homogenního materiálu, kdy mechanicko-fyzikální vlastnosti na úrovni jednotlivých kuliček jsou považovány za shodné. Dále kuličky odpovídají základnímu tvaru částic v DEM simulacích - kulové částice. Hrací kostky byly vybrány jako zástupce nehomogenního materiálu. Nehomogenita je v tomto případě způsobena rozdílným tvarem částic, který je v simulacích nutno zohlednit. Hrací kostky lze aproximovat kulovými částicemi, shluky kulových částic, nebo konvexními mnohostěny.



(a) Experimentální zařízení, které se sestává z černé zadní stěny (1), upevňovacích segmentů (2), korečku (3) a válce (4).



(b) Zjednodušený model pro DEM simulaci, který se sestává pouze z funkčních ploch.

Obr. 3.2: Experimentální zařízení a jeho model.

3.2.2 Výpočtové modely korečkového dopravníku

Za účelem provedení ukázkového příkladu optimalizace geometrie korečku korečkového dopravníku byly autorem práce vytvořeny dva zjednodušené virtuální modely tohoto zařízení, které se sestávají pouze z funkčních ploch.

Na obr. 3.3 jsou znázorněny modely pro odstředivý, resp. gravitační způsob vyprazdňování, spolu s detaily míst, ve kterých dochází jednak ke změnám materiálového toku a jednak ke generování nových částic a k odstranění částic, které již prošly dopravníkem.

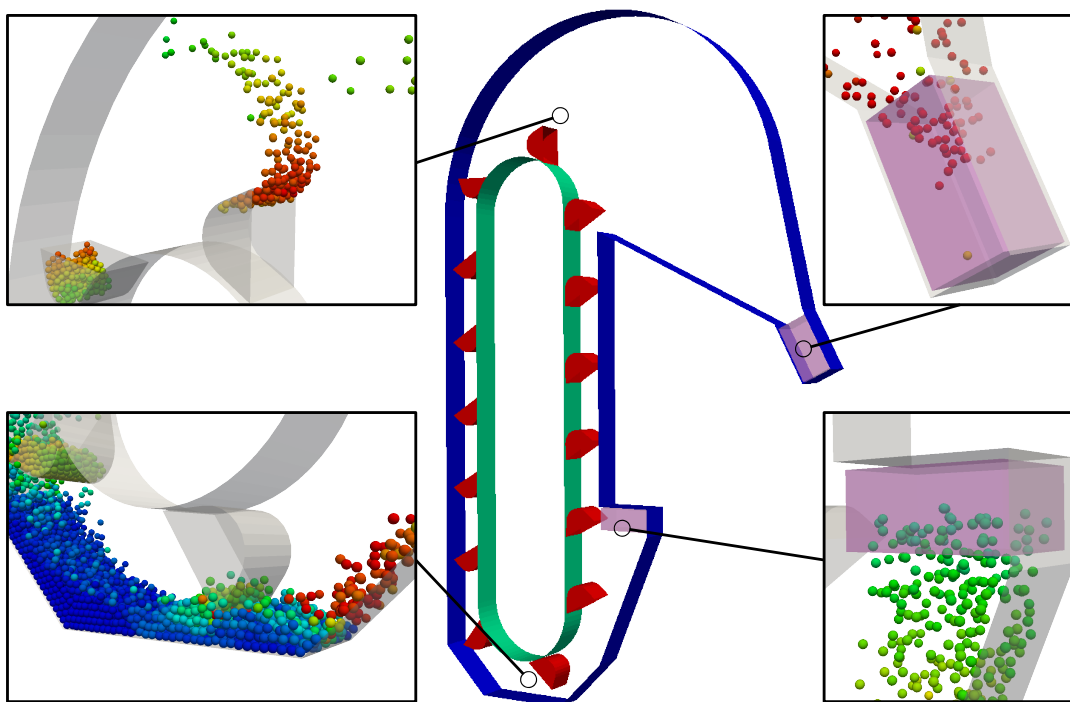
Pohyblivé prvky jsou korečky, které jsou rovněž tvořeny pouze funkčními plochami. Celý pohyb korečků je rozdělen na čtyři části - dvě rotace a dvě translace. Korečky jsou generovány na počátku simulace v čase $t = 0$ s a jejich rozměry jsou definovány v souladu s normou ČSN 26 2008 [19]. Jedná se o pět parametrů - výška vnitřní stěny h_1 , výška vnější stěny h_2 , vyložení korečku a , poloměr zaoblení dna r_{kor} a šířka korečku b_{kor} , přičemž nalezení vhodných hodnot pro první tři uvedené, bude cílem optimalizace, viz tab. 3.1.

Jako materiál jsou použity kulové částice o průměru 10 mm. Ostatními parametry tento materiál odpovídá změřeným parametrům bílých plastových kuliček pro airsoft. Průměr částic byl zvětšen z důvodu snížení vysoké časové náročnosti pro případ, pokud by byly použity částice o jmenovitém průměru 6 mm. Z tohoto důvodu se jedná o fiktivní materiál, který by se však měl svými vlastnostmi podobat tvrdým plastovým kuličkám.

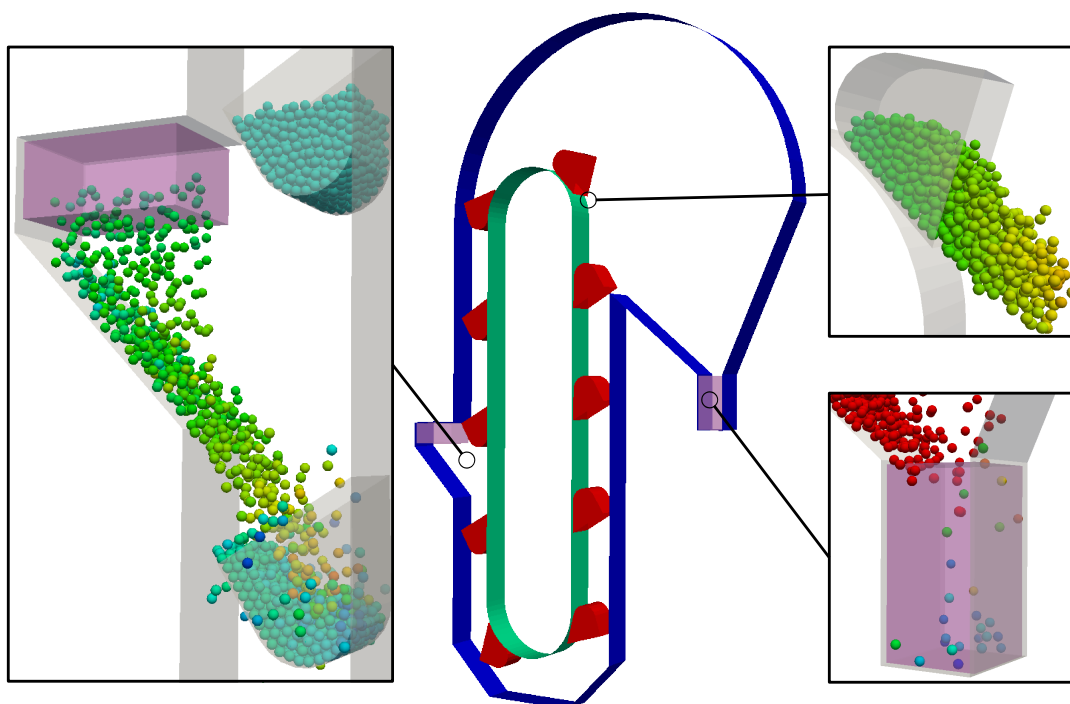
Tyto dva zjednodušené modely korečkového dopravníku včetně celé funkcionality (zadávaní pohybu korečků, generování materiálu a jeho odstraňování, zápis dat na disk apod.) byly vytvořeny s použitím frameworku Yade a nově vytvořeného materiálového modelu prezentovaného v podkapitole 2.2.1.

Tab. 3.1: Intervaly optimalizovaných rozměrů.

Parametr / typ dopravníku	Odstředivý (2D úloha)		Gravitační (3D úloha)	
Meze intervalu	min	max	min	max
Výška vnitřní stěny h_1 , [m]	0,1 (konstantní)		0,05	0,17
Výška vnější stěny h_2 , [m]	0	0,12	0	0,15
Vyložení korečku a , [m]	0,1	0,13	0,1	0,13



(a) Virtuální model pro hrabací způsob plnění a odstředivý způsob vyprazdňování korečku.



(b) Virtuální model pro nasypávací způsob plnění a gravitační způsob vyprazdňování korečku.

Obr. 3.3: Modely korečkového dopravníku pro DEM simulaci použité v ukázkovém příkladu optimalizace. Fialové kvádry znázorňují oblasti, ve kterých dochází k vytváření částic, resp. k jejich odstranění. Funkční plochy přední a zadní stěny dopravníku nejsou zobrazeny.

4 VALIDACE

Za účelem ověření správného nastavení hodnot parametrů materiálových modelů, včetně jejich případných úprav, byly s použitím naměřených dat získaných na experimentálním zařízení provedeny validace výpočetního nástroje i diskrétně-prvkových modelů popsaných v kapitole 3.

V souladu s experimenty byly validace provedeny pro dvě úhlové rychlosti rotace experimentálního zařízení. Množství materiálu, geometrie zařízení a velikosti úhlové rychlosti byly nastaveny podle experimentů a dále byly považovány za konstantní. Vektor hodnot parametrů materiálových modelů byl nastaven dle naměřených hodnot mechanicko-fyzikálních parametrů bílých plastových kuliček a hracích kostek. V případě, že zkoumaný model nekorespondoval s experimentálně získanými daty, následovala úprava hodnot těchto parametrů. Za účelem průběžného hodnocení těchto úprav byly využívány zejména časy začátku a konce procesu vyprazdňování korečku.

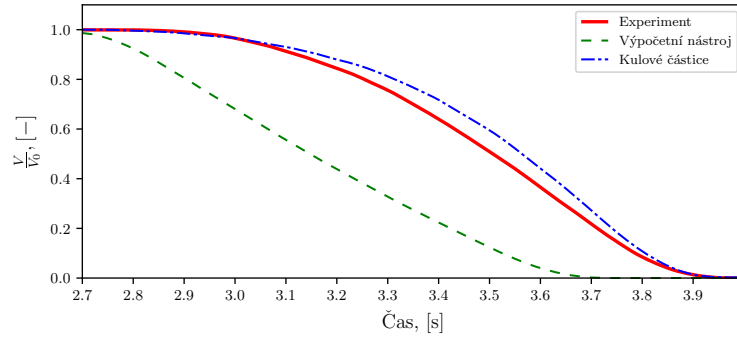
Na závěr byly vytvořeny časové charakteristiky průběhů vyprazdňování. Pro vzájemné posouzení charakteristik získaných ze simulovaných průběhů vyprazdňování s charakteristikami získanými experimentálně byly použity koeficienty korelace a determinace.

Co se týče výpočetního nástroje, je podle níže uvedených koeficientů a časových charakteristik nutné uvést, že se tento nástroj podařilo validovat spíše pro nízké rychlosti rotace experimentálního zařízení.

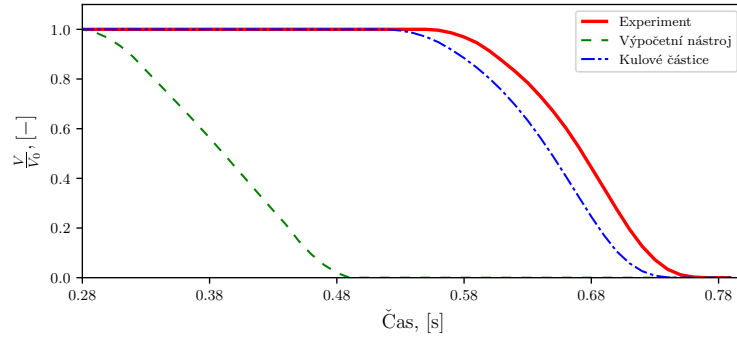
Co se týče diskrétně-prvkových modelů, lze jak na níže uvedených časových charakteristikách, tak i z hodnot koeficientů korelace a determinace pozorovat dobrou shodu mezi experimentálními a vypočtenými daty.

Z níže uvedených výsledků lze vyvodit závěr, že zatímco analytické popisy a na jejich základě vytvořený výpočetní nástroj jsou pro popis (simulaci) vyprazdňování korečku použitelné pouze omezeně, tj. pro nízké rychlosti rotace experimentálního zařízení, tak výpočtové modely využívající teorie prezentované v podkapitole 2.2.1 byly validovány a získané výsledky korespondují se všemi provedenými experimenty. Nicméně vzhledem k možnostem experimentálního zařízení je rozsah použitelnosti omezen spíše na gravitační způsob vyprazdňování.

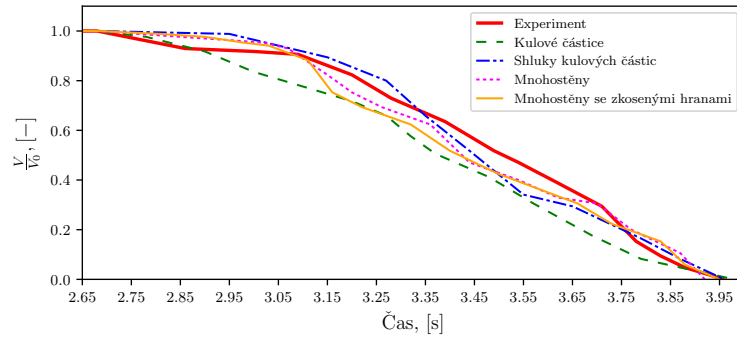
S ohledem na tyto skutečnosti je optimalizační úloha popsaná v kapitole 5 řešena s použitím výpočtového diskrétně-prvkového modelu s kulovými částicemi.



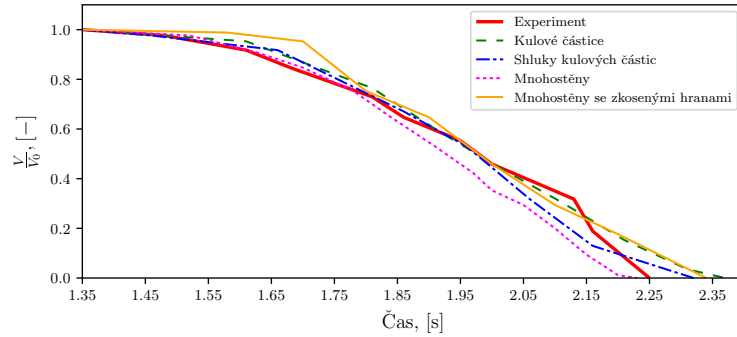
(a) Úhlová rychlost: 0,549 rad/s. Materiál: bílé plastové kuličky.



(b) Úhlová rychlost: 4,280 rad/s. Materiál: bílé plastové kuličky.



(c) Úhlová rychlost: 0,516 rad/s. Materiál: hrací kostky.



(d) Úhlová rychlost: 0,953 rad/s. Materiál: hrací kostky.

Obr. 4.1: Časové charakteristiky průběhu vyprazdňování korečku. V_0 a V jsou množství materiálu na začátku a v průběhu vyprazdňování.

Tab. 4.1: Koeficient korelace R a koeficient determinace R^2 mezi časovými charakteristikami průběhů vyprazdňování korečku získanými použitím výpočetního nástroje a DEM simulace a charakteristikami získanými experimentálně. Materiál: bílé plastové kuličky.

Koeficient	Výpočetní nástroj	Kulové částice
Úhlová rychlost: 0,549 rad/s		
R	0,909	0,996
R^2	0,365	0,983
Úhlová rychlost: 4,280 rad/s		
R	0,443	0,986
R^2	-	0,948

Tab. 4.2: Koeficient korelace R a koeficient determinace R^2 mezi časovými charakteristikami průběhů vyprazdňování korečku získanými z výsledků DEM simulací a charakteristikami získanými experimentálně. Materiál: hrací kostky.

Koeficient	Kulové částice	Shluky	Mnohostěny	Zkosené mnohostěny
Úhlová rychlost: 0,516 rad/s				
R	0,986	0,989	0,987	0,983
R^2	0,894	0,965	0,972	0,956
Úhlová rychlost: 0,953 rad/s				
R	0,990	0,988	0,992	0,970
R^2	0,964	0,956	0,909	0,933

5 UKÁZKOVÉ PŘÍKLADY OPTIMALIZACE KONSTRUKCE KOREČKOVÝCH DOPRAVNÍKŮ

V této kapitole jsou prezentovány dva ukázkové příklady, ve kterých je provedena optimalizace geometrie korečku korečkového dopravníku. V prvním příkladě je optimalizace provedena pomocí genetického algoritmu přímo s použitím dvou vytvořených výpočtových modelů korečkového dopravníku prezentovaných v rámci kapitoly 3. Z důvodu vysoké časové náročnosti tohoto přístupu, byl vytvořen druhý ukázkový příklad, ve kterém je s výpočtovými modely korečkového dopravníku proveden počítačový experiment a na základě jeho výsledků je vytvořen metamodel, tedy „model výpočtového modelu“. Samotná optimalizace již probíhá na úrovni metamodelu.

5.1 Optimalizace s použitím genetického algoritmu

Při řešení optimalizační úlohy byla použita paralelizovaná verze ostrovního a generačního modelu genetického algoritmu s použitím elitismu spolu s výpočtovými modely korečkového dopravníku. Optimalizační úlohu lze formulovat následovně:

Najdi takovou geometrii korečku, pro kterou při konstantních mechanicko-fyzikálních vlastnostech materiálu, rozměrech zařízení a velikosti úhlové rychlosti bude podíl materiálového toku Q_{OUT} na výstupu z dopravníku k materiálovému toku Q_{IN} na vstupu do dopravníku maximální.

Úloha byla řešena pro odstředivý i gravitační způsob vyprazdňování korečku, přičemž v případě odstředivého způsobu byly optimalizovány dva parametry: výška vnější stěny h_2 a vyložení korečku a , a v případě gravitačního způsobu byly optimalizovány tři parametry: výška vnitřní stěny h_1 , výška vnější stěny h_2 a vyložení korečku a . Jednotlivé parametry byly voleny s ohledem na způsob plnění a způsob vyprazdňování. Z důvodu porovnatelnosti získaných výsledků byly optimalizované parametry záměrně voleny v souladu s normou ČSN 26 2008 [19]. Interval y vymezující prohledávaný prostor jsou uvedeny v tab. 3.1. Kritériem pro ukončení jedné simulace byla doba jejího běhu a kritériem pro ukončení celé optimalizace byla velikost změny hodnoty hodnoticí funkce, tzv. *fitness funkce*.

V tab. 5.1 jsou uvedeny výsledky optimalizace v podobě hodnot výše uvedených parametrů. Grafická reprezentace dvojice řešení s nejvyšší hodnotou fitness funkce je znázorněna na obr. 5.1. V tab. 5.2 jsou uvedeny časy běhu jedné simulace i celkové časy optimalizace. Z výsledků je patrné, že se pro jednotlivé způsoby vyprazdňování korečku podařilo nalézt takové geometrie, které jsou tvarově podobné korečkům

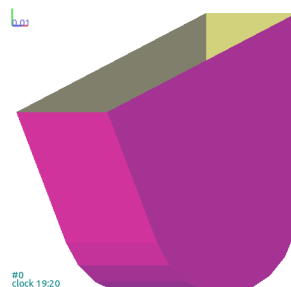
doporučeným normou ČSN 26 2008. Jmenovitě se jedná o typ korečku A-mělký přímý a typ korečku D-hluboký přímý.

Tab. 5.1: Hodnoty výšky vnitřní stěny h_1 , výšky vnější stěny h_2 a vyložení korečku a šesti nejlepších nalezených řešení.

Parametr / řešení	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Odstředivý korečkový dopravník (2D úloha)						
Q_{OUT}/Q_{IN} , [–]	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95
$h_1 = \text{konst}$, [m]	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
h_2 , [m]	0,040	0,042	0,051	0,037	0,040	0,039
a , [m]	0,130	0,130	0,130	0,129	0,130	0,129
Gravitační korečkový dopravník (3D úloha)						
Q_{OUT}/Q_{IN} , [–]	0,90	0,90	0,89	0,89	0,86	0,86
h_1 , [m]	0,163	0,163	0,163	0,163	0,170	0,163
h_2 , [m]	0,106	0,106	0,097	0,112	0,123	0,136
a , [m]	0,130	0,129	0,125	0,125	0,114	0,114



(a) Koreček pro odstředivý způsob vyprazdňování.



(b) Koreček pro gravitační způsob vyprazdňování.

Obr. 5.1: Grafická reprezentace dvojice řešení s nejvyšší hodnotou fitness funkce.

Tab. 5.2: Vybrané časy optimalizace pro Intel® Core™ i7 CPU 960 (4 jádra).

Parametr / typ dopravníku	Odstředivý (2D úloha)	Gravitační (3D úloha)
Doba běhu simulace, [minuta]	30	20
Čas optimalizace, [den]	20	22

5.2 Optimalizace s použitím metamodelů

Tato podkapitola pojednává o tvorbě metamodelů nad diskrétně-prvkovými modely toku partikulárního materiálu korečkovým dopravníkem. Motivací je nalezení vhodné geometrie korečku v řádově kratším čase než v případě použití genetického algoritmu.

S ohledem na skutečnost, že problematika tvorby metamodelů nad diskrétně-prvkovými modely nebyla doposud v dostupné literatuře dostatečně kriticky diskutována, je nutné tento přístup k optimalizaci geometrie korečku považovat za experimentální.

Obdobně jako při použití genetického algoritmu byl i tento ukázkový příklad optimalizace proveden pro odstředivý a gravitační způsob vyprazdňování. Formulace optimalizační úlohy tímto zůstává shodná s formulací provedenou v předchozí podkapitole.

Na rozdíl od optimalizace řešené pomocí genetického algoritmu, kdy simulace s použitím dvou výpočtových modelů korečkového dopravníku byly prováděny pro stanovení hodnoty fitness funkce každého jedince (bod návrhového prostoru), jsou nyní tyto modely použity pro získání série výstupních proměnných v závislosti na vstupních, jejichž hodnoty byly vhodně voleny z návrhového prostoru.

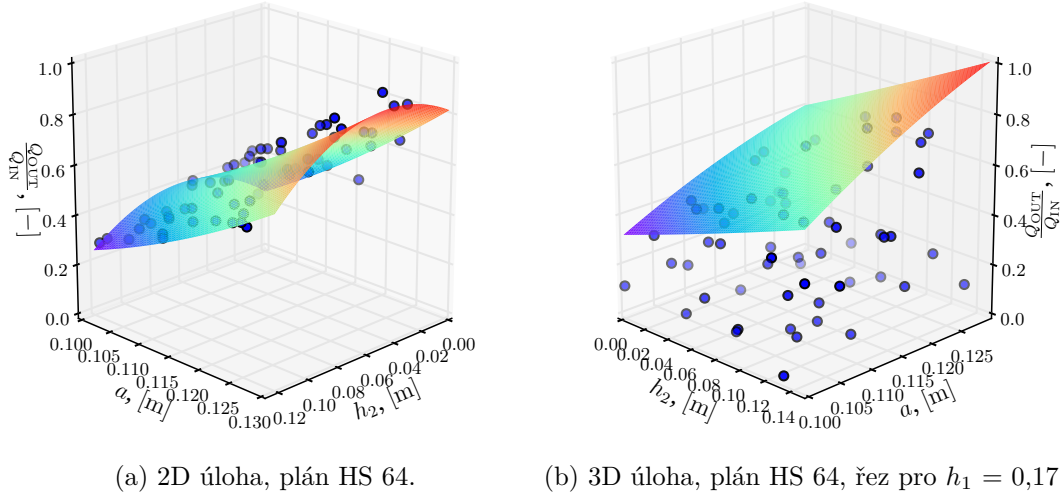
S přihlédnutím k [16] byly pro jednotlivé způsoby vyprazdňování korečku sestaveny čtyři experimentální plány. Pro aproximaci chování výpočtových modelů byl použit lineární regresní metamodel druhého řádu. Parametry použité při tvorbě metamodelů jsou uvedeny v tab. 5.3.

Následná optimalizace byla prováděna již na úrovni jednotlivých metamodelů.

Tab. 5.3: Vybrané parametry a experimentální plány použité při tvorbě metamodelů.

Parametr / typ dopravníku	Odstředivý (2D úloha)	Gravitační (3D úloha)
Počet nezávislých proměnných	2	3
Intervaly parametrů (označení, interval, jednotka)	$h_2, <0; 0,12>, [m];$ $a, <0,1; 0,13>, [m]$	$h_1, <0,05; 0,17>, [m];$ $h_2, <0; 0,15>, [m];$ $a, <0,1; 0,13>, [m]$
Experimentální plány (název, typ, počet návrhových bodů)	HS 64, Haltonova sekvence, 64 HS 16, Haltonova sekvence, 16 UFP 4x4, úplný faktorový plán, 16 UFP 3x3, úplný faktorový plán, 9	HS 64, Haltonova sekvence, 64 HS 16, Haltonova sekvence, 16 HS 4x4x4, úplný faktorový plán, 64 HS 3x3x3, úplný faktorový plán, 27

Po provedení počítačových experimentů bylo vytvořeno osm metamodelů, z nichž dva vybrané, jež odpovídají experimentálnímu plánu HS 64, jsou znázorněny na obr. 5.2. Hodnoty návrhových proměnných ležící ve zkoumaném prostoru v blízkosti maxima jsou uvedeny v tab. 5.4 a 5.5.



Obr. 5.2: Metamodel Q_{OUT}/Q_{IN} 2D a 3D úlohy.

Tab. 5.4: Optimalizované hodnoty návrhových proměnných 2D úlohy.

Proměnná / plán	HS 64	HS 16	UFP 4x4	UFP 3x3
h_2 , [m]	0,044	0,054	0,052	0,056
a , [m]	0,13	0,13	0,13	0,13

Tab. 5.5: Optimalizované hodnoty návrhových proměnných 3D úlohy.

Proměnná / plán	HS 64	HS 16	UFP 4x4x4	UFP 3x3x3
h_1 , [m]	0,17	0,17	0,17	0,17
h_2 , [m]	0,15	0,15	0,15	0,15
a , [m]	0,13	0,13	0,13	0,13

Pro hodnocení kvality metamodelů byl použit koeficient determinace, upravený koeficient determinace, průměrná absolutní a maximální absolutní chyba. Hodnoty použitých metrik jsou uvedeny v tab. 5.6.

Tab. 5.6: Hodnocení kvality metamodelů: koeficient determinace R^2 , upravený koeficient determinace R_{adj}^2 , průměrná absolutní chyba MAE a maximální absolutní chyba MAX .

2D úloha				
Koeficient / plán	HS 64	HS 16	UFP 4x4	UFP 3x3
R^2	0,920	0,886	0,934	0,978
R_{adj}^2	0,918	0,878	0,924	0,971
MAE	0,039	0,045	0,044	0,028
MAX	0,123	0,109	0,105	0,049
3D úloha				
Koeficient / plán	HS 64	HS 16	UFP 4x4x4	UFP 3x3x3
R^2	0,849	0,921	0,851	0,918
R_{adj}^2	0,841	0,901	0,844	0,908
MAE	0,066	0,045	0,071	0,055
MAX	0,176	0,094	0,250	0,159

Z výsledků hodnocení kvality metamodelů je patrné, že v případě 2D úlohy vyšší hodnoty koeficientů determinace vypovídají o dobré globální aproximaci chování výpočtového modelu. Nicméně hodnoty lokálních odchylek (metriky MAE a MAX) mezi aproximací a výpočtem poukazují na skutečnost, že použití responzní plochy nedokáže ideálně vystihnout zkoumané chování výpočtového modelu. V případě 3D úlohy je tato skutečnost ještě patrnější. V budoucnu bude nutné při tvorbě metamodelů zohlednit i vliv dalších parametrů, které ovlivňují chování výpočtového modelu korečkového dopravníku, a také bude pravděpodobně potřeba otestovat i použití jiné techniky metamodelování, např. umělých neuronových sítí. Časy vypovídající o náročnosti tohoto přístupu jsou uvedeny v tab. 5.7, přičemž z uvedených hodnot je ve srovnání s tab. 5.2 patrná výrazná časová úspora. Obdobně jako v předchozí podkapitole se i zde celkový čas skládá výhradně z výpočetního času.

Tab. 5.7: Vybrané časy metamodelování pro Intel® Core™ i7 CPU 960 (4 jádra).

Parametr / typ dopravníku	Odstředivý (2D úloha)	Gravitační (3D úloha)
Doba běhu simulace, [minuta]	30	20
Celkový čas (včetně analýzy metamodelů), [hodina]	14	15

6 ZÁVĚR

Předkládaná disertační práce se zabývá studiem metod vhodných pro popis chování (ne)homogenních materiálů během jejich přepravy korečkovými dopravníky a dále vybranými způsoby optimalizace jejich konstrukce. Konkrétně byla pozornost věnována identifikaci teoretických popisů vhodných pro řešení problematiky toků a deformací zejména partikulárních materiálů, implementaci těchto popisů do výpočetního nástroje a výpočtových modelů, jejich experimentální validaci a následnému použití v ukázkové optimalizační úloze.

V práci byly prezentovány popisy, které lze zařadit do dvou přístupů - spojitý a diskrétní. V rámci spojitého přístupu bylo provedeno odvození křivky vzniklé řezem povrchu materiálu v korečku kolmým na jeho osu otáčení. Ukázalo se, že tento popis je vhodný pro dobře tekoucí a nekohezivní materiály a pro velmi nízké rychlosti pohybu korečku, tj. přibližně do 0,1 m/s. V rámci diskrétního přístupu byl s použitím frameworku Yade vytvořen poměrně univerzální materiálový model. Výpočtové modely, ve kterých byl tento materiálový model použit, vykazovaly velmi dobrou shodu s experimenty.

Míra shody mezi simulovaným a změřeným průběhem vyprazdňování byla kvantifikována pomocí koeficientu korelace a koeficientu determinace, jejichž hodnoty se pohybovaly v rozmezí 0,365 – 0,909 při použití výpočetního nástroje a 0,894 – 0,996 při použití diskrétně-prvkových modelů. Experimenty byly prováděny na „Zařízení pro kreativní systém tvorby matematických popisů obecných procesů“.

Jelikož výsledky simulací využívajících metody diskrétních prvků korespondovaly s experimenty ve větším rozsahu než analytické popisy, byly pro řešení ukázkové optimalizační úlohy vytvořeny dva výpočtové modely korečkového dopravníku. Jeden pro odstředivý způsob vyprazdňování (2D úloha - dva optimalizované parametry) a jeden pro gravitační způsob vyprazdňování (3D úloha - tři optimalizované parametry). V obou případech se jednalo o optimalizaci geometrie korečku.

Optimalizační metodou byl genetický algoritmus, a přestože nalezené geometrie korečku korespondovaly s geometriemi doporučenými normou ČSN 26 2008, použití tohoto algoritmu poukázalo na výjimečnou časovou náročnost takového přístupu. Za účelem snížení časové náročnosti optimalizace byl použit metamodeling, přičemž bylo dosaženo podobných výsledků, avšak v řádově kratším čase - desítky hodin namísto desítek dnů.

Přínosem této práce je předložení doposud nepublikovaného přístupu k možnostem optimalizace korečkových dopravníků s využitím moderních výpočtových a optimalizačních metod.

LITERATURA

- [1] COWIN, S. C. A theory for the flow of granular materials. In *Powder Technology*, Volume 9, Issues 2–3, February–March 1974, Pages 61-69, ISSN 0032-5910.
- [2] CUNDALL, P. A. *BALL - A program to model granular media using the distinct element method*. Technical Note, Advanced Technology Group, Dames & Moore, London.
- [3] DRAŽAN, F. a kol. Teorie a stavba dopravníků, skriptu ČVUT v Praze, 1983.
- [4] GAJDŮŠEK, J.; ŠKOPÁN, M. Teorie dopravních a manipulačních zařízení. VUT Brno 1988.
- [5] GELNAR, D. *Verifikace a validace DEM modelů sypkých hmot v aplikaci na korečkové elevátory a možnosti řešení reálné situace v praxi při plnění a vyprazdňování korečků*. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2015, školitel: Zegzulka, J.
- [6] JONÁK, M. Determining the influence of load near machine's component, caused by reshaped material. In *Mechatronics: Recent Technological and Scientific Advances*. Scientific Publishing Services Pvt. Ltd., Chennai, India: Springer - Verlag, Berlin Heidelberg, 2011. s. 723-727. ISBN: 978-3-642-23243-5.
- [7] JONÁK, M. Výpočetní nástroj pro popis toků a deformací partikulárních materiálů během procesu vyprazdňování korečku. In *XI. mezinárodní konference Dynamika tuhých a deformovatelných těles 2013*. Ústí nad Labem: FVTM UJEP, 2013. s. 1-8. ISBN: 978-80-7414-607-7.
- [8] JONÁK, M. Možnosti modelování toků partikulárních materiálů během vyprazdňování korečků korečkového dopravníku. In *Strojírenská technologie*, 2013, roč. 2013, č. 2, s. 63-67. ISSN: 1211-4162.
- [9] JONÁK, M.; KAŠPÁREK, J.; ŘEZNÍČEK, M. Numerická simulace pohybu nehomogenního materiálu. In *Dynamika tuhých a deformovatelných těles DTDT 2014 Sborník přednášek z XII. mezinárodní vědecké konference*. 1. Ústí Nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. L., 2014. s. 1-6. ISBN: 978-80-7414-749-4.
- [10] JONÁK, M.; MALÁŠEK, J. Popisy toků a deformací nehomogenních hmot. In *XXXVIII. Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů*. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012. s. 47-50. ISBN: 978-80-261-0141-3.

- [11] JONÁK, M. Použití meta-heuristické optimalizační metody pro získání vybraných vstupních parametrů pro dem simulaci korečkového dopravníku v aplikaci na optimalizaci geometrie korečku. In *Sborník XXXIX. mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů*. Horní Bečva: Institut Dopravy, VŠB- TU Ostrava, 2013. s. 1-5. ISBN: 978-80-248-3124-4.
- [12] JONÁK, M.; KAŠPÁREK, J.; MALÁŠEK, J.; ŘEZNÍČEK, M. DEM simulace procesu vyprazdňování korečku s použitím konvexních mnohostěnů. In *41. mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů*. Studentská 1402/2, Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. s. 12-17. ISBN: 978-80-7494-196-2.
- [13] JONÁK, M. Optimalizace geometrie korečku korečkového dopravníku s využitím metamodelů. In *TUNS 2017*. VŠB-TUO, Ostrava, 2017. s. 83-88. ISBN: 978-80-248-4030-7.
- [14] MALÁŠEK, J. *Identifikace napjatosti, deformace a proudění v nehomogenních materiálech*. Brno: VUT v Brně, 2008, 28 s., Habilitační a inaugurační spisy, sv. 278. ISSN 1213-418X.
- [15] RADEMACHER, F. J. C. Non-spill discharge characteristics of bucket elevators. In *Powder Technology*. Volume 22, Issue 2, March–April 1979, Pages 215-241.
- [16] SIMPSON, T. W.; POPLINSKI, J. D.; KOCH, P. N.; ALLEN, J. K. Meta-models for Computer-based Engineering Design: Survey and recommendations. In *Engineering with Computers*. Volume 17, Issue 2, Jul 2001, Pages 129-150. ISSN 1435-5663.
- [17] ŠŤASTNÝ, A. *Modelování silových účinků působících na dopravní a manipulační zařízení s cílem jejich optimalizace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 113 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Miroslav Škopán, CSc.
- [18] ZEGZULKA, J. *Mechanika sypkých hmot*. VŠB-TU Ostrava, 2004, 186 s. ISBN 80-248-0699-1.
- [19] ČSN 26 2008. Svislé korečkové elevátory - Základní parametry a rozměry. 8 s., Praha, 1993.

Curriculum Vitæ

Martin Jonák

Osobní informace

Datum narození: 27. února, 1986
Místo narození: Bohumín
Telefon: 541142429
E-mail: jonak@fme.vutbr.cz

Vzdělání

2010–2018 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
obor: Konstrukční a procesní inženýrství, titul: Ph.D.

2008–2010 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
obor: Procesní inženýrství, titul: Ing.

2005–2008 Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství,
obor: Strojní inženýrství, titul: Bc.

2001–2005 Gymnázium Františka Živného, Bohumín

Ocenění

2013 Cena České společnosti pro mechaniku pro mladé účastníky
do 35 let v rámci konference Dynamika tuhých a deformova-
telných těles DTDT 2013

Předchozí zaměstnání

2014–2018 Technický pracovník, Ústav automobilního a dopravního in-
ženýrství, Fakulta strojního inženýrství

Participace na projektech

2018–dosud	TJ01000033, Vývoj prostředků pro snižování vibrací a hluku turbodmychadel, zahájení: 01.01.2018, ukončení: 31.12.2019 (spoluřešitel)
2014–2017	TA04020087, Vývoj, optimalizace a výroba vyvážecího traktoru se zřetelem na ekologickou čistotu prací a ekonomické zpracování biomasy v lesním hospodářství, zahájení: 01.07.2014, ukončení: 28.02.2017 (spoluřešitel)
2014	Mobilní měřicí soustava pohyblivých a silových účinků na konstrukce strojních zařízení, zahájení: 03.04.2014, ukončení: 31.12.2014 (spoluřešitel)
2013	Modelování přetváření nehomogenních materiálů během procesu vyprazdňování korečků, zahájení: 01.01.2013, ukončení: 31.12.2013 (hlavní řešitel)

Publikační aktivita

- Příspěvky na konferencích indexovaných v databázích WoS a Scopus: 10
- Publikace v časopisech na seznamu Rady vlády: 2
- Publikace v konferenčních sbornících: 14
- Výzkumné zprávy: 3
- Kapitoly v knize: 1

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studiem metod vhodných pro popis chování (ne)homogenních materiálů během jejich přepravy korečkovými dopravníky v aplikaci na optimalizaci geometrie korečku i na optimalizaci provozního režimu celého zařízení. Konkrétně se jedná o studii dostupných a tvorbu vlastních analytických i numerických výpočtových modelů a jejich následné použití pro popis toků a deformací zejména partikulárních materiálů. V případě tvorby a použití analytických modelů je pozornost věnována především procesu vyprazdňování korečku – vztah tvaru povrchu přepravovaného materiálu vůči tvaru, poloze a pohybu korečku včetně stanovení počátku a způsobu vyprazdňování. V případě výpočtového modelování s použitím metody diskrétních prvků práce obsahuje také základní výpočtový model korečkového dopravníku, který je prezentován a použit v rámci ukázkového optimalizačního příkladu. Cílem práce je také stanovení mezí platnosti některých klasických matematicko-fyzikálních popisů.

ABSTRACT

This thesis deals with a study of methods sufficient to describe the behavior of bulk materials (homogeneous and non-homogeneous) during their transport by bucket elevators in the application focused on the optimization of the bucket shape and also on the optimization of operating parameters of whole elevator. More specifically, this thesis is based on the studying and creating analytical and numerical computational models which are used for description of flows and deformations especially of particulate materials. Firstly, the thesis is focused on the process of discharging the bucket – the relationship among the shape of the surface of a particulate material and geometry, position and movement of the bucket. The beginning and way of discharge of the bucket will be determined. Secondly, the thesis includes the overall computational model of a bucket elevator which is based on discrete element method and presented in the case study. The goal is to determine the limits of some classical physical and mathematical descriptions.