



národní
úložiště
šedé
literatury

Matematické modelování transportu tepla a hmoty v rotační peci

Kozakovič, M.
2022

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-520553>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 25.05.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní [nusl.cz](http://www.nusl.cz) .

Matematické modelování transportu tepla a hmoty v rotační peci

Kozakovič M.^{1,2}, Havlica J.^{2,3}, Huchet F.⁴

¹Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta strojního inženýrství, Pasteurova 1, 400 96 Ústí nad Labem, Česká republika

²Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Přírodovědecká fakulta, Pasteurova 3632/15, 400 96 Ústí nad Labem, Česká republika

³Akademie věd České republiky, Ústav chemických procesů, Rozvojová 2/135, 165 02 Praha, Česká republika

⁴Université Gustave Eiffel, MAST/GPEM, Campus de Nantes, Allée des Ponts et Chaussées CS5004 44344 Bouguenais cedex France

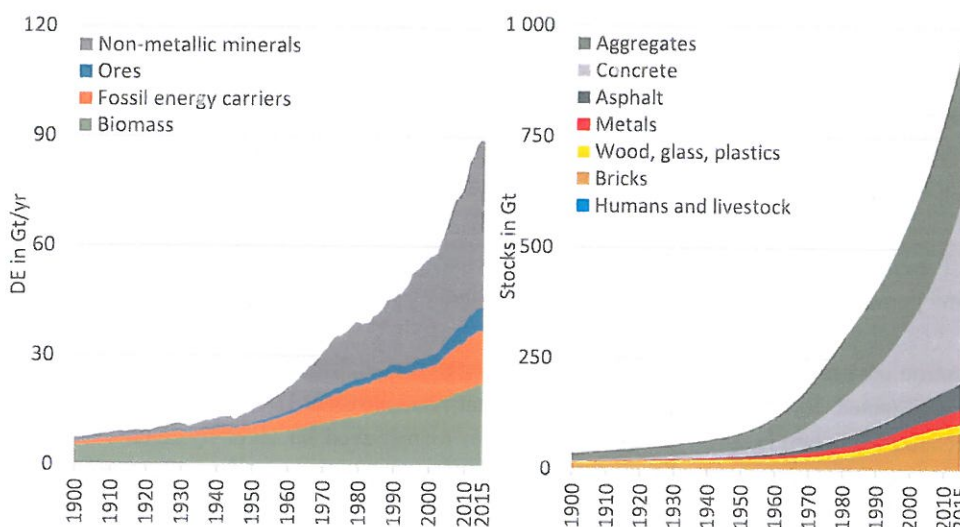
Klíčová slova: DEM, transport tepla, 1D model, rotační pec

Abstrakt

Hlavním cílem tohoto výzkumu bylo porovnat výsledky 1D modelu transportu s diskretním částicovým modelem rotační pece s přímým ohřevem v laboratorním měřítku. Dalším cílem bylo prozkoumat vliv počtu zvedáků na vytvoření aktivního povrchu částic ve vznosu, který umožňuje účinný transport tepla.

Studovaná rotační pec je válec se sklonem 4° o délce 0,5 m a průměru 0,108 m s pravidelně uspořádanými zvedáky na vnitřní straně. Teplo je do rotační pece dopravováno horkým vzduchem na vstupu. Materiál v rotační peci tvoří kulovité částice o průměru 1 milimetr. Rychlost otáčení rotační pece je 21,5 otáček za minutu. Pro každou simulaci bylo provedeno 20 otáček. Simulace byly provedeny metodou diskretních prvků implementovanou v open-source kódu LIGGGHTS.

Účinný přenos tepla je umožněn především velkým množstvím částic ve vznosu, které jsou ohřívány vhněným teplým vzduchem. Na začátku bylo zjištěno, že klíčovým parametrem, který řídí množství částic v plynném režimu, je počet zvedáků a jejich geometrie. Dále bylo zjištěno, že v pravé části základny válce se vytváří oblast, do které se částice vypádávající ze zvedáků nedostanou. Tento jev je způsoben dynamikou transportu částic, neboť částice se neudrží v aktivní fázi a vlivem gravitace se rychle pohybují ke dnu. Účinek této zóny je negativní, protože horký vzduch proudí bez odporu, což brání účinnému ohřevu systému.



Obrázek 1: Těžba různých druhů materiálů a obchodované zásoby materiálů za posledních 100 let¹.

Úvod

Rotační pece se široce používají v oblasti stavebnictví, hutnictví a chemického průmyslu jako jednotková operace v chemickém inženýrství zejména pro sušení, míchání, granulování a ohřev granulárů. Obrázek 1 ukazuje závislost množství vytěžených materiálů (vlevo) a zásob obchodovaných materiálů (vpravo) v závislosti na čase. Za posledních sto let je

trend těžby exponenciální. Je zřejmé, že současné nakládání s materiály je neudržitelné. V blízké budoucnosti tedy bude nutné přejít na oběhové hospodářství. Zkoumání jevů spojených s přenosem tepla za účelem zlepšení modelovacích nástrojů a pochopení dynamiky přenosu hmoty v rotačních pecích má z uvedených důvodů zásadní význam.

Zjednodušené schéma rotační pece s přímým ohřevem je znázorněno na obrázku 2. Rotační pec je obvykle delší ocelová trubka se spádem a hnacím ústrojím, které zajišťuje rotaci. Na vnitřní straně trubky jsou zvedáky, které zvedají materiál z lože. Při zpracování asfaltu se používá především přímý ohřev horkým plamenem, jak je znázorněno na obrázku. V případě přímého ohřevu se na transportu tepla podílejí všechny mechanismy. V případě rotační pece se zvedáky je zásadní dostat materiál do vznosu, respektive aktivní fáze.

1D model transportu tepla a hmoty představili Sunkara a kol.³ Piton a kol.⁴ rozšířili tento model o další geometrii zvedáku a použili jej ke zkoumání dynamiky částic v průmyslovém zařízení. Nascimento a kol.⁵ studovali zadržování pevných látek v rotačních pecích pomocí eulerovského přístupu. Karali et al.⁶ zjistili optimální objemový poměr loženého materiálu je přibližně 12,5 %. Zhang a kol.⁷ studovali vliv počtu zvedáků na na tvorbu aktivní fáze pomocí metody diskretních prvků (DEM). Zjistili, že osm zvedáků v peci je optimálních pro jimi použitou geometrii. Geometrické uspořádání zvedáků v rotační peci studoval Silveira a kol.⁸. Ve svém výzkumu určili ideální uspořádání zvedáků vedoucí k nejvyšší aktivní fázi.

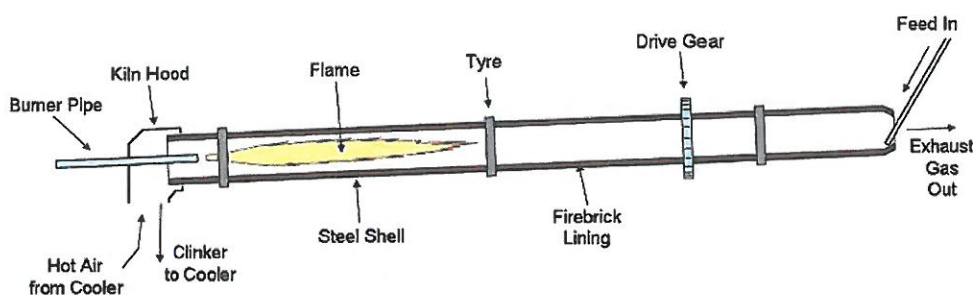


Figure 2: The scheme of a direct-heated rotary kiln ².

Hlavním cílem tohoto výzkumu je porovnat výsledky 1D modelu transportu s numerickými simulacemi transportu hmoty v rotační peci s přímým ohřevem v laboratorním měřítku pomocí DEM. Dalším cílem je prozkoumat vliv počtu zvedáků na tvorbu částic v aktivní fázi, která umožňuje účinný transport tepla.

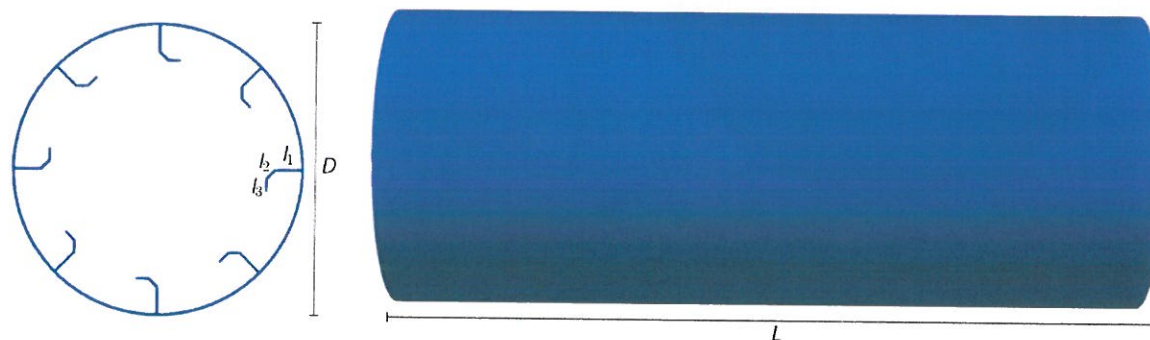
Metoda

V této práci byl pomocí 1D axiálního modelu a DEM studován vliv počtu zvedáků na tvorbu aktivní fáze v rotační peci. Schéma studované rotační pece včetně geometrie zvedáků je znázorněna na obrázku 3. Geometrické parametry rotační pece jsou uvedeny v tabulce I. Rychlost otáčení rotační pece byla 21,3 ot/min, což odpovídá Froudovu číslu 0,0274. Parametry DEM, tj. Youngův modul Y , koeficient restituice e , časový krok Δt , koeficient tření μ , valivé tření μ_r a Poissonův poměr ν byly nastaveny podle článku od Silveiry⁸, viz tabulka I, část Parametry.

Sunkarou odvozený 1D model se skládá z integrálních rovnic, které lze řešit jednoduchou implementací pokročilých integračních metod. Výhodou je, že výsledky lze získat rychle. Model 1D obecně funguje pouze pro přetížené systémy. Dostatečnou podmínkou je, aby výška lože přesahovala rozměr zvedáku. Zvolený objemový poměr $V_f = 15\%$ tuto podmínku splňuje. DEM je v podstatě metoda molekulární dynamiky pro odpuzivé silové interakce. Soustava obyčejných diferenciálních rovnic druhého řádu se řeší pomocí Verletova algoritmu. DEM použitá v tomto článku je implementována v open-source kódu LIGGGHTS. Získané výsledky představují podrobné informace o polohách, rychlostech, silách a rotačních rychlostech částic. Na druhou stranu je DEM časově náročnější metoda z hlediska výpočtu. V tomto případě se podle Silveiry⁸ modeluje pouze 10 % délky rotační pece, tj. 5 cm, s použitím periodických okrajových podmínek. Počet částic při stejném objemovém poměru odpovídá $N = 63\,837$. Tato metoda výrazně zkracuje dobu výpočtu. Zpracování dat bylo provedeno v programu Matlab.

Tabulka I
Geometrické parametry a podmínky simulace DEM rotační pece

Geometrie				Parametry			
L [m]	0,5	L_{part} [m]	0.05	N [-]	63 837	μ_r [-]	0,04
D [m]	0,108	V_f [-]	0.15	Fr [-]	0,0274	e_{pp} [-]	0,8
l_1 [m]	0,01	d_p [m]	0.00109	Y [Pa]	$5,10^6$	e_{ww} [-]	0,9
l_2 [m]	0,005	ρ [kg.m ⁻³]	2445	μ_{pp} [-]	0,7	Δt [s]	$2 \cdot 10^{-5}$
l_3 [m]	0,005	ω [s ⁻¹]	21.3	μ_{ww} [-]	0,4	v [-]	0,3



Obrázek 3: Geometrie rotační pece podle Silveiry.

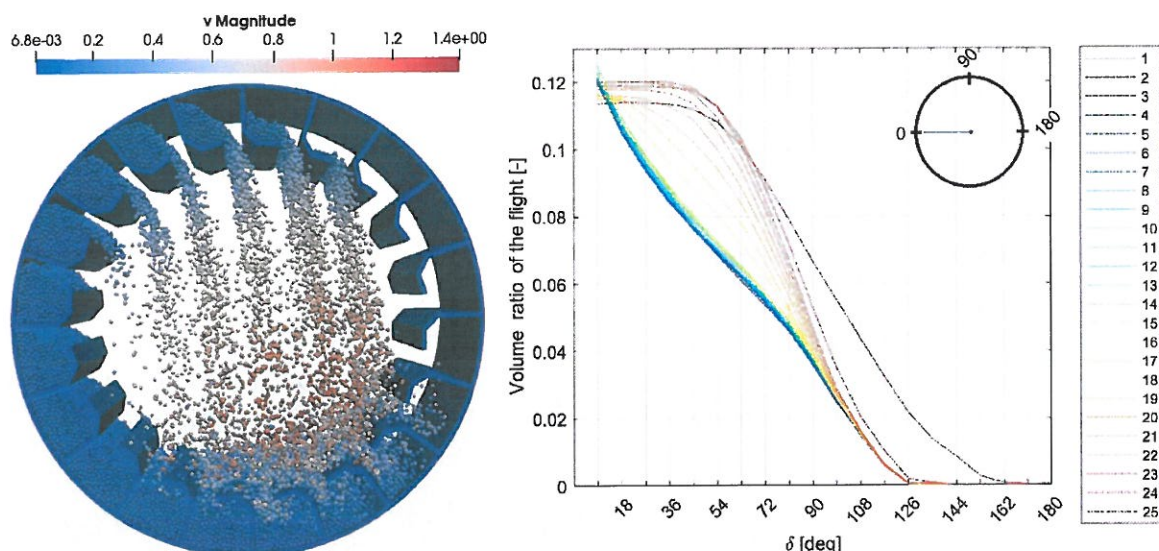
Výsledky

Obrázek 4 vlevo ukazuje vizualizaci výsledků DEM pro 20 zvedáků v 80. otáčce. Částice v peci jsou zabarveny podle velikosti rychlosti. Na základě této jednoduché vizualizace můžeme rozlišit částice v aktivní fázi a v loži. Částice v aktivní fázi mají vyšší velikost rychlosti. Lze pozorovat, že aktivní zóna částic se tvoří především ve středu válce o průměru přibližně 7 cm. V této aktivní zóně však existují dvě hlavní pásma, kam částice nemohou dosáhnout. Tato pásma se nacházejí v levé a pravé části základny válce. V levé části základny válce částice nevypadávají ze zvedáku kvůli menšímu sklonu. V pravé části základny válce částice díky volnému pádu velmi rychle padají zpět do lože. Je také vidět, že částice z lože jsou rovnoměrně rozloženy ve všech zvedácích. Je zřejmé, že v tomto případě je výška lože menší než délka zvedáku.

Pro objektivní vyhodnocení aktivní fáze je nutné přistoupit k podrobnějším charakteristikám. Je užitečné vyhodnotit poměr objemu částic v jednom zvedáku v závislosti na jeho úhlové poloze. První zvedák umístěný v nejvyšším bodě válcové základny je při každé plné otáčce posunut o 90 stupňů proti směru hodinových ručiček. Posunutá poloha je rovna $\delta = 0$ stupňů. Schéma je znázorněno v pravé horní části na obrázku 4. Tato charakteristika se obvykle projevuje strmě klesající křivkou.

Na obrázku 4 vpravo je vidět poměr objemu částic ve zvedáku relativizovaný k hmotnosti lože v závislosti na jeho úhlové poloze pro různý počet zvedáků. Z grafu je patrné, že ve zvedáku se nachází přibližně 12 % celkové hmotnosti částic. Tento objemový poměr zvedáku je téměř stejný pro počet zvedáků od jednoho do patnácti, na druhé straně se snižuje pro vyšší počet zvedáků. Tento pokles objemového poměru lze vysvětlit rozprostřením částic do většího počtu zvedáků, které mají v součtu větší objem než částice v loži.

Graf na obrázku 4 vpravo rovněž ukazuje, že přibližně do patnácti zvedáků částice vypadávají ze zvedáku pod menším úhlem sklonu. Při vyšším počtu zvedáků než patnáct však mají částice tendenci držet se ve zvedáku i při větším sklonu pece. Při sklonu pece kolem 50° pak částice vystupují ze zvedáku strměji. V případě pětadvaceti zvedáků jsou částice vypadávající z pece výjimkou. V tomto případě jsou zvedáky již velmi blízko sebe a částice nemají dostatek prostoru pro vypadnutí ze zvedáku. Vyšší počet zvedáků než dvacet pět však vede k nežádoucímu sterickému efektu. Částice do zvedáku nevstupují ani z něj nevypadávají. Vyšší počet zvedáků tak nepodporuje vznik aktivní fáze.



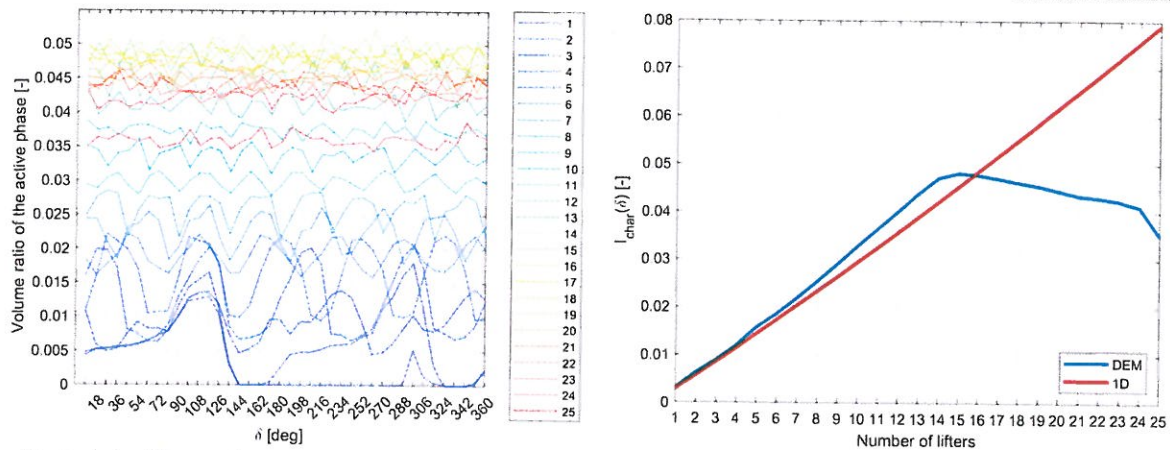
Obrázek 4: Vizualizace částic v rotační peci pro 20 zvedáků v 80. otáčce (vlevo), poměr objemu částic ve zvedáku v závislosti na jeho úhlové poloze pro různé počty zvedáků (vpravo).

Pro analýzu výsledků je nejdůležitější sledovat tvorbu částic v aktivní fázi. V 1D modelu je poměr objemu částic v aktivní fázi určen výpočtem v modelu. V případě DEM je nutné tyto částice sledovat pomocí fyzikálních veličin. Jako vhodná veličina byla zvolena velikost rychlosti. V tomto případě byla stanovena velikost rychlosti částic v aktivní fázi vyšší než 0,4 m/s.

Na obrázku 5 vlevo je znázorněna závislost poměru objemu částic v aktivní fázi vzhledem k celkovému objemu lože na úhlové poloze zvedáku. Na grafu můžeme pozorovat tři oblasti. Pro menší počet zvedáků je patrná zóna s periodickou závislostí aktivní fáze na poloze zvedáku. V tomto případě se aktivní fáze vyskytuje pouze ve špičkách a poté během rotace zcela vymizí. Přibližně od pěti zvedáků se hodnota objemového poměru aktivní fáze ustálí na průměru. V této druhé zóně aktivní fáze nepřestává. Přibližně u patnácti zvedáků je patrné, že objemový poměr aktivní fáze dosahuje nejvyšší hodnoty. V případě této třetí zóny můžeme hovořit o dosažení určité optimální hodnoty objemového poměru aktivní fáze. Po dosažení této zóny již vyšší počet zvedáků nepřispívá ke zvýšení objemu aktivní fáze.

Pro snadné zjištění hodnoty aktivní fáze byla vypočtena střední hodnota funkce dané křivkou na obrázku 5 vlevo. Výsledné střední hodnoty objemového poměru aktivní fáze v závislosti na počtu zvedáků v peci jsou uvedeny na obrázku 5 vpravo pro 1D model i DEM.

Graf na obrázku 5 vpravo odpovídá třem zónám uvedeným v levém grafu. U první zóny do 5 zvedáků lze pozorovat malou aktivní fázi. Ve druhé zóně je vidět, že aktivní fáze lineárně narůstá. Optimální počet zvedáků, při kterém hodnota aktivní fáze dosáhne nejvyššího bodu a dále neroste, odpovídá třetí zóně. Kromě toho se zdá, že 1D model poskytuje špatné výsledky pro vyšší počet zvedáků, než je dosažené optimum podle výsledků DEM. Tento jev odpovídá vizualizaci, viz obrázek 4 vlevo, že se objem lože ve zvedácích rozprostírá. V tomto případě se zdá, že celkový součet objemu částic ve zvedácích přesahuje objem lože. Je zřejmé, že je porušena podmínka přetížení systému. V důsledku toho 1D model v tomto případě nefunguje správně.



Obrázek 5: Objemový poměr aktivní fáze v závislosti na úhlové poloze zvedáku v rotační peci (vlevo), průměrný objemový poměr aktivní fáze v závislosti na počtu zvedáků v rotační peci (vpravo).

Závěr

V této práci byl pomocí 1D axiálního modelu a DEM studován vliv počtu zvedáků na tvorbu aktivní fáze v rotační peci.

Bylo zjištěno, že aktivní zóna částic se tvoří především ve středu válce o průměru přibližně 7 cm. V této aktivní zóně však existují dvě hlavní oblasti nebo pásma, kam se částice nedostanou. Bylo také zjištěno, že částice z lože jsou rovnoměrně rozloženy ve všech zvedácích při vyšším počtu zvedáků, v důsledku čehož je v tomto případě výška lože menší než délka zvedáku. Dále bylo zjištěno, že vyšší počet zvedáků než dvacet pět vede k nežádoucímu sterickému efektu. Částice do zvedáku nevstupují ani z něj nevypadávají. Vyšší počet zvedáků tak nepodporuje tvorbu aktivní fáze.

Kromě toho byly pozorovány tři zóny aktivní fáze. U menšího počtu zvedáků se aktivní fáze vyskytuje pouze ve špičkách a poté během rotace zcela zaniká. Přibližně od pěti zvedáků se hodnota objemového poměru aktivní fáze ustálila na průměrné hodnotě. V této druhé zóně aktivní fáze nezanikla. Přibližně při patnácti zvedácích dosáhl objemový poměr aktivní fáze nejvyšší hodnoty. Po dosažení tohoto optima již vyšší počet zvedáků nepřispíval k nárůstu aktivní fáze.

Závěrem byl zjištěn optimální počet zvedáků, při kterém hodnota aktivní fáze dosáhne svého nejvyššího bodu a dále neroste. Zdálo se, že 1D model dává při vyšším počtu zvedáků špatné výsledky. Tento jev však byl vysvětlen porušením podmínky přetížení systému. V důsledku toho bylo zjištěno, že 1D model nepracuje správně pro vyšší počet zvedáků. Pracovní rozsah 1D modelu lze přibližně určit rovností součtu objemu zvedáků a objemu lože.

Poděkování

Tento výzkum byl podpořen projektem U21-Kvalitní lidské zdroje pro posílení mezinárodního prostředí II CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_053/0017815, dále interním grantem UJEP-SGS-2020-53-003-3 a projektem Strategy AV21 of the Czech Academy of Sciences, VP20 - Water for life for valuable support.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Reference

- [1] KRAUSMANN, Fridolin, Christian LAUK, Willi HAAS and Dominik WIEDENHOFER. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Global Environmental Change* [online]. 2018, **52**, 131-140 [cit. 2022-05-10]. ISSN 09593780. Available from: doi:10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003
- [2] CemKilnKiln. In: *Wikipedia commons: Wikimedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 9. 10. 2006 [cit. 2022-05-10]. Available from: <https://commons.wikimedia.org/>
- [3] SUNKARA, Koteswara Rao, Fabian HERZ, Eckehard SPECHT, Jochen MELLMANN and Richard ERPELDING. Modeling the discharge characteristics of rectangular flights in a flighted rotary drum. *Powder Technology* [online]. 2013, **234**, 107-116 [cit. 2022-05-10]. ISSN 00325910. Available: doi:10.1016/j.powtec.2012.09.007
- [4] PITON, Maxime, Florian HUCHET, Olivier LE CORRE, Laurédan LE GUEN a Bogdan CAZACLIU. A coupled thermal-granular model in flights rotary kiln: Industrial validation and process design. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2015, **75**, 1011-1021 [cit. 2022-05-10]. ISSN 13594311. Available from: doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.10.052
- [5] NASCIMENTO, Suellen M., Rondinelli M. LIMA, Rodolfo J. BRANDÃO, Claudio R. DUARTE a Marcos A. S. BARROZO. Eulerian study of flights discharge in a rotating drum. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* [online]. 2019, **97**(2), 477-484 [cit. 2022-05-10]. ISSN 00084034. Available from: doi:10.1002/cjce.23291
- [6] KARALI, Mohamed A., Koteswara Rao SUNKARA, Fabian HERZ and Eckehard SPECHT. Experimental analysis of a flighted rotary drum to assess the optimum loading. *Chemical Engineering Science* [online]. 2015, **138**, 772-779 [cit. 2022-05-10]. ISSN 00092509. Available from: doi:10.1016/j.ces.2015.09.004
- [7] ZHANG, Lanyue, Zhaochen JIANG, Jochen MELLMANN, Fabian WEIGLER, Fabian HERZ, Andreas BÜCK and Evangelos TSOTSAS. Influence of the number of flights on the dilute phase ratio in flighted rotating drums by PTV measurements and DEM simulations. *Particuology* [online]. 2021, **56**, 171-182 [cit. 2022-05-10]. ISSN 16742001. Available from: doi:10.1016/j.partic.2020.09.010
- [8] Silveira, Jeniffer C., Rondinelli M. Lima, Rodolfo J. Brandao, Claudio R. Duarte, and Marcos A.S. Barrozo. 2022. *Powder Technol.* 395: 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.09.043>.

Experimentální a výpočtové metody v inženýrství

9. ročník konference pro mladé vědecké pracovníky

15. - 17. června 2022, Ústí nad Labem, Česká republika



Sborník příspěvků

Editor

Martin Svoboda

Ústí nad Labem

ISBN 978-80-7561-355-4



9 788075 613554

