

Využití DEM simulace sypkých hmot v praxi

Ing. Robert Brázda, Ph.D.¹, Ing. Zdeněk Poruba, Ph.D.²

¹Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB – TU Ostrava, Ostrava – Poruba; robert.brazda@vsb.cz

²Katedra aplikované mechaniky, Fakulta strojní VŠB – TU Ostrava, Ostrava – Poruba

Přijato: 25. 10. 2016, recenzováno: 28. 1. a 29. 1. 2017

Abstrakt

Mnoho dopravních a procesních zařízení v praxi nefunguje zcela dle představ provozovatele. Provozovatel pak často provádí různé konstrukční či technologické úpravy daného zařízení dle intuice nebo dle zkušeností s již fungujícím podobným zařízením či na základě metody pokus – omyl. Každý takový pokus, který skončí i nezdarem, je přínosný, nicméně materiálově, finančně i časově náročný. Článek předkládá možnost ověření funkčnosti indikovaných úprav na dopravních a procesních zařízeních nikoliv na fyzickém modelu, ale pomocí simulací pohybu sypkých hmot na základě numerických metod. Tato metoda je ve světě známá pod názvem Discrete Element Method, zkráceně DEM, a v češtině se ustálil výraz Metoda diskretních prvků.

Utilisation of DEM simulation of bulk materials in practice

Many transport and process systems in practice does not work entirely by the operator concepts. The operator then often perform a variety of structural or technological adjustments of the equipment according to the intuition or from experience with similar equipment already functioning or on the basis of methods „trial – error”. Any such even unsuccessful attempt ending in failure is beneficial, however, materially, financially and time-consuming. The article presents the option to verify the functionality of proposed modifications in the transport and process equipment not on the physical model, but using a simulation of movement of bulk materials based on numerical methods. This method is known as Discrete Element Method, abbreviated as DEM (Metoda diskretních prvků in Czech).

Nutzung der DEM-Simulierung von Schüttgut in Praxis

Viele Verkehrs- und Prozessanlagen funktionieren in der Praxis nicht vollkommen nach den Vorstellungen des Betreibers. Der Betreiber dann oft führt verschiedene Konstruktions- oder verfahrenstechnische Anpassungen der Anlage entweder intuitiv oder auf Basis von Erfahrungen mit einer bereits funktionierenden ähnlichen Anlage oder anhand der Methode Versuch und Irrtum. Jeder solche Versuch, sei er auch als Misserfolg endet, ist förderlich, nichtsdestoweniger anspruchsvoll aus der Sicht des Materials, der Kosten und der Zeit. Der Artikel legt die Möglichkeit vor, die Funktionsfähigkeit der indizierten Anpassungen an den Verkehrs- und Prozessanlagen zu überprüfen, und das aber nicht auf einem physischen Modell, sondern mithilfe der Simulierung der Schüttgutbewegung auf Basis von numerischen Methoden. Diese Methode ist weltweit unter dem Namen Discrete Element Methode, verkürzt DEM, bekannt.

Klíčová slova: šnekový dopravník, hnědé uhlí, metoda diskretních prvků.

Keywords: screw conveyor, lignite (brown coal), the Discrete Element Method.

1 Úvod

Představme si modelovou situaci řešení tokového problému na aplikaci šnekového dopravníku dopravujícího hnědé uhlí do prostoru litinového hořáku teplovodního kotle. Takové aplikace šnekových dopravníků jsou dnes velmi využívány nejen pro dopravu hnědého uhlí, ale i různých směsí, například hnědého uhlí s peletkami či dopravu biomasy. Jejich úspěšné nasazení je dáno jednoduchou konstrukcí, spolehlivostí a minimem nutných údržbářských zásahů.

I přes výše uvedené výhody se velmi často stává, že daný šnekový dopravník nepracuje optimálně dle požadavků provozovatele a je potřeba najít vhodné řešení k optimalizaci chodu zařízení.

2 Popis modelového zařízení a příklad neoptimálního fungování zařízení

Příklad modelového zařízení je znázorněn na ilustračním obrázku (viz obrázek č. 1) a je tvořen nezobrazeným zásobní-

kem paliva (uhlí, biomasa, směsí), vlastním dopravním systémem – šnekovým dopravníkem a prostorem hořáku, kde dochází spalováním dopravovaného paliva ke vzniku tepelné energie, která je dále odebrána k dalšímu využití systémem teplovodního kotle.

Jednotlivé oblasti jsou patrnější na obrázku č. 2, kde prostor S1 je prostorem dopravovaného paliva ze zásobníku paliva, prostor S2 je uzavřeným prostorem šnekového dopravníku a prostor S3 je oblastí hořáku. Je zřejmé, že vlastní šnek prochází všemi třemi oblastmi S1, S2 a S3, ale pouze v oblasti S2 je uzavřen vlastním žlabem. Oblast S2 je tedy limitující z hlediska výpočtu dopravního výkonu takového šnekového dopravníku.

Pro optimální fungování hořáku je velmi důležité, aby dopravované palivo bylo v hořáku rozprostřeno rovnoměrně a homogenizováno, tedy aby každá vrstva obsahovala optimální poměr paliva jak z hlediska velikosti jednotlivých zrn (granulometrie), tak v případě směsí i z hlediska jednotlivých složek směsi. Příklad neoptimálního fungování zařízení při dopravě hnědého uhlí do hořáku je uveden na obrázku č. 3.



Obr. 1: Příklad modelového zařízení – ilustrační fotografie [2]

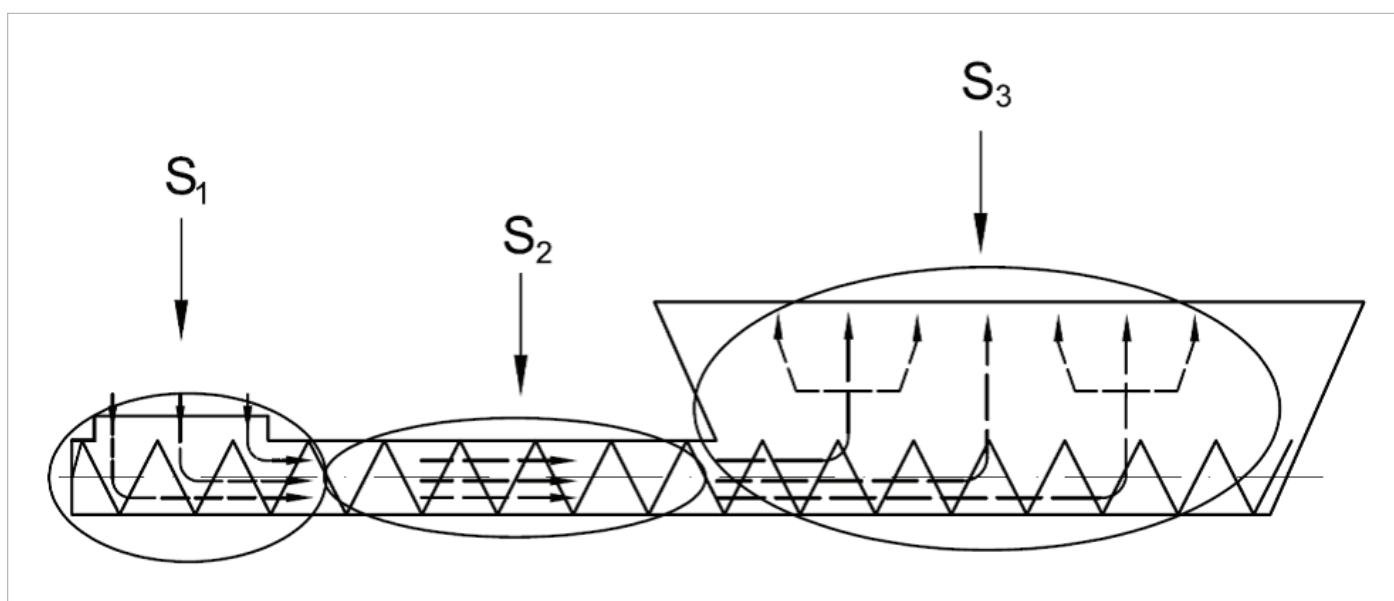
Z obrázku č. 3 je patrné, že hnědé uhlí, které je dopravováno do prostoru hořáku zleva šnekovým dopravníkem, je nerovnoměrně rozloženo v hořáku. Zatímco v levé části hořáku je paliva nedostatek, v pravé části hořáku je paliva přebytek. Takto navržené zařízení není ideální z hlediska potřeb spalování paliva v tomto hořáku a je limitujícím faktorem pro určení indikovaného tepelného výkonu teplovodního kotle.

3 Možnosti řešení situace využitím numerického modelování – DEM

DEM je numerická metoda založená na Newtonových pohybových zákonech. Je určována celková síla působící na jednotlivá zrna či částice v systému a následně jsou sledována zrychlení, rychlosti a polohy těchto zrn či částic v definovaném časovém intervalu. Celková síla představuje součet kontaktních sil (mezi zrny/částicemi navzájem a mezi zrnem/částicí a okrajem sledované oblasti) a objemových sil (tíhové síly, magnetické síly či síly elektrostatické).

Prvním krokem při aplikaci DEM je vytvoření geometrického modelu zařízení a přiřazení kinematických veličin jeho pohybujícím se částem. Následně jsou na definovaných (počátečních) pozicích vytvořena zrna/částice sypkého materiálu. Dále je simulace prováděna v krátkých časových krocích, ve kterých je počítána celková síla působící na jednotlivá zrna/částice systému. Na základě znalosti pohybové rovnice a celkové síly působící na zrno/částici lze následně dopočítávat jeho kinematické parametry (zrychlení, rychlosti, polohy).

Materiálové vlastnosti jednotlivých zrn/částic jsou v modelu zohledněny užitím systému pružin a tlumičů. Tuhost pružiny je přitom funkcí velikosti zrna/částice a jeho materiálu (modul pružnosti, Poissonovo číslo). Konstanta tlumení je úměrná součiniteli restituce, což je parametr určující energetickou ztrátu během kolize zrn/částic. Určení vhodných materiálových a kontaktních parametrů je stěžejní pro přesnost a použitelnost prováděné simulace.



Obr. 2: Zjednodušené modelové zařízení [3]



Obr. 3: Neoptimální zaplnění hořáku palivem.

K využití DEM metody pro optimalizaci materiálového toku zařízením je nejprve nutno znát veškeré parametry jak vlastního konstrukčního díla, v tomto případě šnekového dopravníku a hořáku, tak také veškeré informace o dopravovaném materiálu – hnědém uhlí. Z hlediska vstupních parametrů jsou potřeba tyto informace:

- a) Parametry vstupního otvoru:
 - pozice, velikost a tvar vstupního otvoru ze zásobníku do šnekového dopravníku
 - doba podávání materiálu
- b) Geometrie konstrukčního díla:
 - specifikace hranic a hraničních podmínek
- c) Pohyb šneku:
 - čas pohybu šneku
 - rychlost otáčení šneku
 - zrychlení šneku
 - osy otáčení šneku
 - statické a dynamické třecí parametry šneku
- d) Dopravovaný materiál (viz obrázek č. 4):
 - rotační parametry
 - koeficienty restituce
 - statické a dynamické třecí parametry
 - velikost dopravního množství
 - velikost materiálu – granulometrické parametry
 - houževnatost materiálu
 - adhezní parametry
 - hustota materiálu

Výčet konkrétních vstupních parametrů šnekového dopravníku a hořáku je uveden v tab. 1 níže.

Výše uvedené parametry jsou spolu s 3D modelem konstrukce vloženy do výpočetního softwaru, který obsahuje DEM modul a je zahájena výpočetní sekvence tvořená těmito kroky [4]:

- generování částic přepravovaného materiálu,
- přiřazení počátečních rychlostí těmto částicím a dále v každém výpočetním (časovém) kroku:
- výpočet kontaktních sil (třecích, kohezních, adhezních) působících na každou částici (pro urychlení výpočtu jsou aplikovány algoritmy omezující lokaci částic potenciálně tvořících kontaktní páry),
- sestavení pohybové rovnice pro každou částici,
- výpočet zrychlení částic z pohybové rovnice a dále jeho integrací dopočet rychlostí a přemístění (nových poloh) částic.

Tab. 1: Vstupní informace šnekového dopravníku a hořáku.

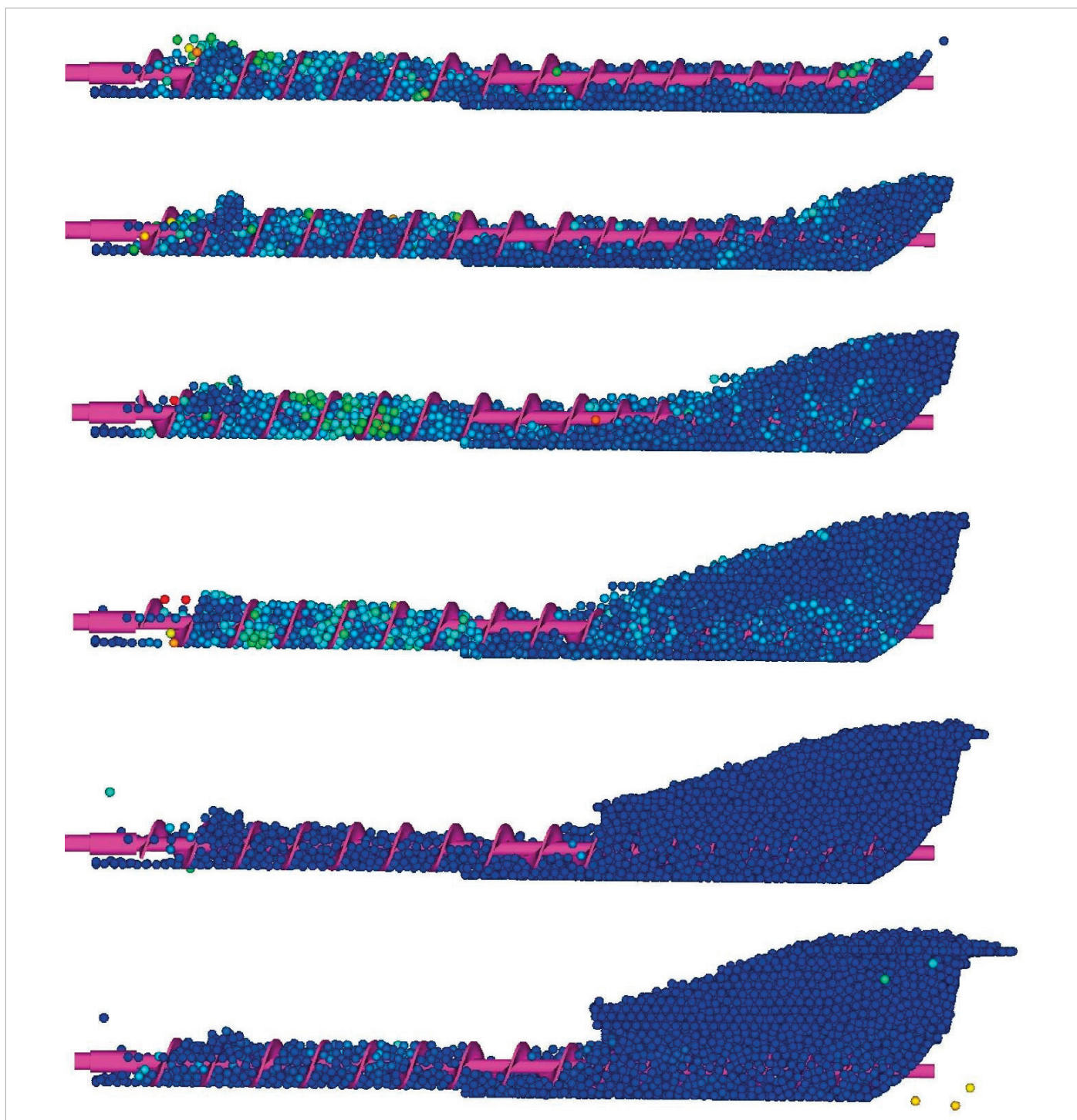
Parametr	Hodnota
Délka dopravního šneku	1 540 mm
Otáčky dopravního šneku	15 otáček.min ⁻¹
Průměr šneku	80 mm
Stoupání šneku	80 mm
Objem hořáku	20,8 dm ³

Tab. 2: Vstupní informace dopravovaného materiálu.

Parametr	Hodnota
Dopravovaný materiál	hnědé uhlí – ořech 2
Zrnitost uhlí	10 – 25 mm
Sypná hmotnost	661 kg.m ⁻³
Součinitel smykového tření uhlí x litina	0,67
Součinitel smykového tření uhlí x nerez	0,59
Počáteční smykové napětí	1 206 Pa
Tlaková pevnost	5,48 kPa
Tokový součinitel	15,98



Obr. 4: Vzorek dopravovaného hnědého uhlí [3]



Obr. 5: Grafické zobrazení pohybu dopravovaného materiálu – nemodifikovaný šnek.



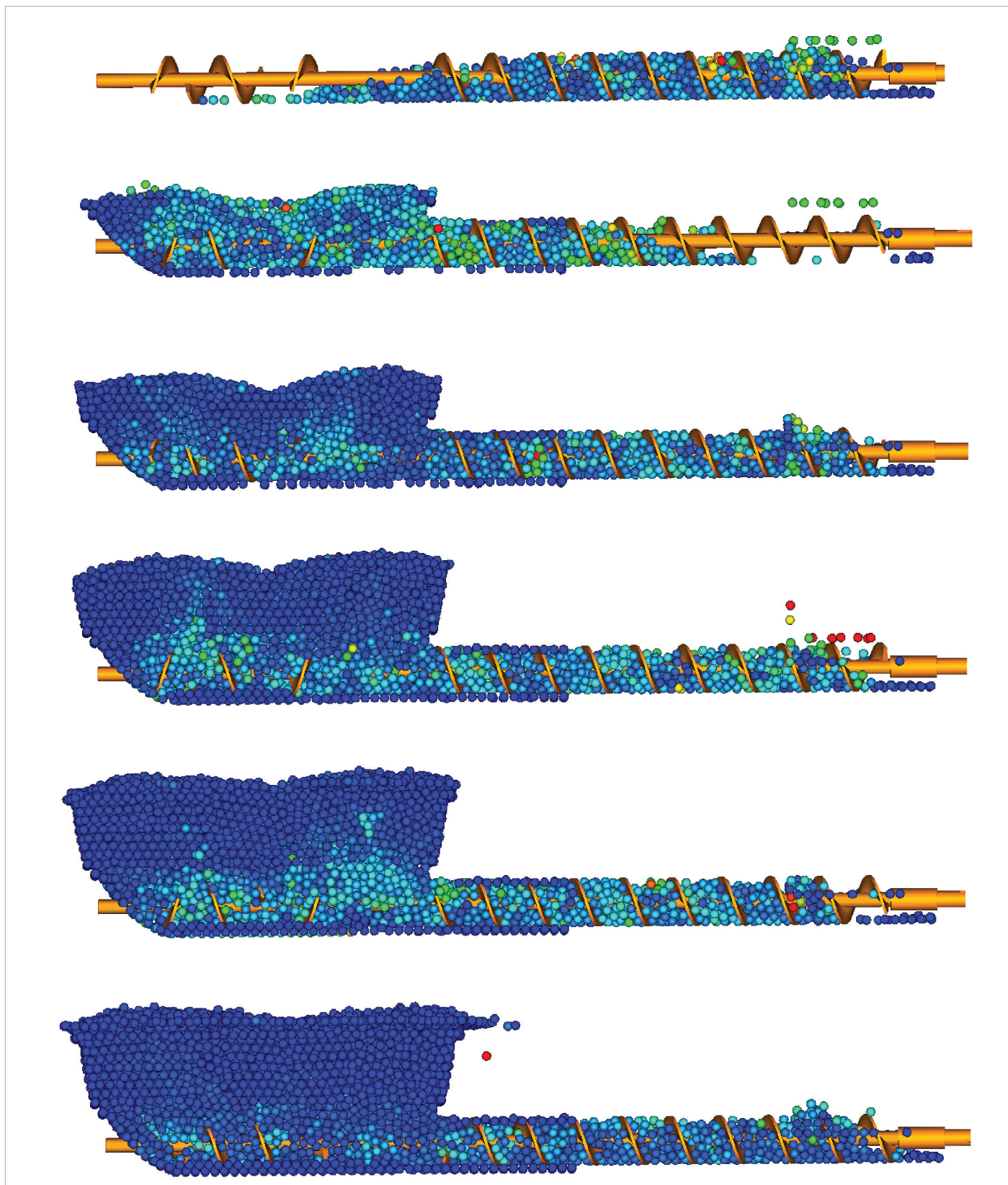
Obr. 6: Optimální zaplnění hořáku palivem.

Nové polohy jsou následně využity k určení sil v dalším výpočetním kroku a celý proces se opakuje až do ukončení výpočtu.

Výsledkem simulací jsou:

a) grafické znázornění pohybu dopravovaného materiálu ve vymezeném prostoru,

b) silové účinky na konstrukci a dopravovaný materiál,
c) momentové účinky na konstrukci a dopravovaný materiál,
d) zobrazení rychlostních polí pohybujících se částí a dopravovaného materiálu,
e) zobrazení zrychlení pohybujících se částí a dopravovaného materiálu.



Obr. 7: Grafické zobrazení pohybu dopravovaného materiálu – modifikovaný šnek.

Na obrázku č. 5 je zobrazen výsledek DEM simulace při použití nemodifikovaného šneku (šneku s neoptimální plnicí funkcí) a jednotlivé časové sekvence jsou seřazeny svisle, přičemž viditelná je pouze konstrukce šneku. Z obrázku č. 5 je zřejmé, že vlastní hořák je umístěn vpravo, uprostřed je žlab šneku a vlevo pak násypné místo šnekového dopravníku. Z časového průběhu simulace je patrné, že při plnění hořáku teplovodního kotle šnekovým dopravníkem dochází u nemodifikovaného šneku k hromadění dopravovaného materiálu na konci hořáku. Tato skutečnost je také patrná při vizuálním porovnání zaplněného fyzického modelu, viz obrázek č. 3, a výsledku simulace na obrázku č. 5.

Problém s nedostatečně zaplněným hořákem teplovodního kotle je zcela zásadní a má vliv nejen na nerovnoměrné prohořívání jednotlivých vrstev hnědého uhlí v hořáku či na výpočet potřebného tepelného výkonu teplovodního kotle, ale má také značný vliv na efektivnost odstraňování zbytků hoření – popelovin. V místech zcela nezaplněného hořáku dochází při postupném doplňování hnědého uhlí k mísení tohoto paliva se zbytky hoření, a tím ke snižování účinnosti hoření v daném prostoru. Naopak v zcela zaplněném či přeplněném prostoru hořáku dochází k nedokonalému prohoření vrstev a takto nevyužitá paliva odchází nespáleno s ostatními zbytky hoření do zásobníku popelovin.

K optimalizaci plnicí (dopravní) funkce šnekového dopravníku je možno hledat řešení v použití jiných materiálů šnekového dopravníku, žlabu či hořáku nebo provést konstrukční změny především na šnekovém dopravníku. Při využití DEM metod dochází ke změně konstrukce šnekového dopravníku na 3D modelu a tento modifikovaný model je opětovně vložen k numerické analýze v daném výpočetním DEM programu. V rámci tohoto DEM programu opět proběhne výpočet pohybu nadefinovaného materiálu a dojde k ověření, zdali konstrukční změna šnekového dopravníku zlepšila plnicí funkci hořáku teplovodního kotle.

Na obrázku č. 7 je zaznamenán časový záznam pohybu hnědého uhlí šnekovým dopravníkem s modifikovaným šnekem do hořáku, ze kterého je patrné, že změnou konstrukce šneku šnekového dopravníku došlo k zlepšení plnicí funkce hořáku. Prostor hořáku je nyní zaplněn efektivněji, což je možno zhodnotit porovnáním obrázku č. 5 a 7.

Modifikovaný šnek může být po úspěšném otestování plnicí funkce pomocí DEM programu fyzicky vytvořen a jeho funkčnost ověřena na fyzickém modelu. Úspěšnost této modifikace lze pozorovat na obrázku č. 6, kde je patrný soulad zaplněnosti hořáku teplovodního kotle s predikcí pomocí DEM, viz obrázek č. 7.

4 Závěr

Vhodnost použití DEM metod pro řešení optimalizačních úloh dopravních a procesních zařízení je dána především snížením časových, materiálových a v neposlední řadě finančních nároků na testování různých variant řešení. Na druhé straně efektivní využití DEM metod je možné pouze za předpokladu dostatečného výpočetního výkonu použitého počítače s instalovaným DEM programem a dále pak znalostí všech nutných parametrů zařízení a dopravovaného materiálu, vkládaných do DEM

programu. Nezbytnou podmínkou úspěšně provedené simulace pomocí DEM metody je zkušenost výpočtáře v oblasti numerického modelování a interpretace získaných výsledků.

Na výše uvedeném případě šnekového dopravníku dopravujícího hnědé uhlí do prostoru hořáku teplovodního kotle bylo ukázáno, že DEM metody mají své místo v průmyslové praxi a že při správném využití těchto metod lze očekávat soulad mezi simulací a reálným fyzickým modelem či zařízením.

Poděkování

Tento článek vznikl za podpory grantů Studentské grantové soutěže uvedených pod registračními čísly SP2017/101 „Studium tekutosti sypkých hmot v nových typech modelů zásobníků a rozvoj pracoviště na Krásnopolské“ a SP2017/136 „Výpočtové a experimentální modelování se zaměřením na materiálový výzkum a biomechaniku“.

Literatura

- [1] BRÁZDA, R.: Problematika dopravy a skladování sypkých hmot s uhlím vnitřního tření pod 30°. Vědecké spisy Fakulty strojní, Edice: Autoreferáty disertačních prací, sv. 99, Ostrava: ID, FS VŠB – TU Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1555-8.
- [2] www.vytipime.eu/dakon-fb-2-automat.
- [3] URBANEC, M.: Optimalizace dopravy paliva pomocí šnekového dopravníku, Diplomová práce, ID FS VŠB – TU Ostrava 2015.
- [4] RAPAPORT, D. C.: The art of molecular dynamics simulation. 2nd ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2004. ISBN 0521825687.