

Porovnání numerických řešičů pro pneumatický transport velkých částic a jejich validace

Ing. Petra Tisovská <petra.tisovska@tul.cz>, doc. Ing. Petr Šidlof, Ph.D.

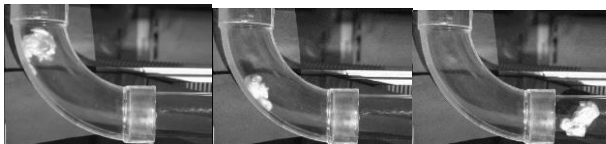
Tento příspěvek je součástí projektu, který se zabývá vývojem modelů a numerických metod a jejich aplikace v simulačním software pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. Důraz je zde kladen na numerickou simulaci velké částice a zhodnocení vhodnosti numerických řešičů pro simulaci interakce této částice s prouděním tekutiny.

Klíčová slova: pneumatický transport, numerické řešení, velké částice, CFD-DEM

Úvod

Pneumatický transport pevných částic je klíčovou součástí mnoha průmyslových odvětví. Numerické simulace si kladou za cíl tento děj popsat a následně jej optimalizovat v různých průmyslových zařízeních.

Cílem tohoto projektu je porovnání vhodnosti různých numerických řešičů (komerční ANSYS Fluent, Opensource OpenFOAM) pro řešení unášení bavlny v průmyslovém provozu. Příklad kusu bavlny v potrubí je zobrazen na obrázku 1.



Obrázek 1: Chování transportované bavlny v kolenu při rychlosti vzduchu $u_0 = 5$ m/s

Z obrázku je patrné, že dochází ke změně tvaru bavlny. Vzorek se při průchodu kolene smrští a následně zase rozvine a odlepí od stěny potrubí.

Nejvíce diskutovaným problémem v této oblasti je transport velkého množství malých částic, které jsou definovány dle velikosti d a charakteristického rozměru sítě l : $d \ll l$. Důležitým příkladem použití numerických výpočtů je například proces tzv. fluidized bed, kterým se zabývá Linmin Li [1].

Příklad CFD simulace velkého množství částic přemísťovaného pneumatickým transportem lze nalézt v článku [2].

Metodika

Pro numerické simulace unášení pevných částic v tekutině se používají dva základní přístupy: Euler –

Euler a Euler – Lagrange. V této práci byl zvolen přístup Euler (pro tekutinu) a Lagrange (pro pevnou fázi).

Nestlačitelná Navier-Stokesova rovnice popisuje proudění tekutiny:

$$\nabla \cdot (\alpha_s u_s + \alpha_f u_f) = 0 \quad (1)$$

a

$$\frac{\partial \alpha_f u_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f u_f u_f) = \frac{1}{\rho_f} (-\nabla p + \alpha_f \nabla \cdot \tau + \alpha_f \rho_f g + F_f) \quad (2)$$

kde α_s a α_f značí poměr mezi pevnou (s) a tekutou (f) fází. Veličina u označuje rychlost. Tlak je P a ρ symbolizuje hustotu. Symbol τ je tenzor napětí, g je gravitační zrychlení, F_f je síla vznikající interakcí pevné částice s tekutinou.

Pohyb pevné částice je popsán Newtonovým druhým pohybovým zákonem:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_c} F_{ij}^c + F_i^f + F_i^g \quad (3)$$

a

$$I_i \frac{dw_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_c} M_{ij} \quad (4)$$

kde m_i a I_i značí hmotnost a moment setrvačnosti částice i . Symboly v_i a w_i značí translační a úhlovou rychlost. Síly F_{ij}^c , F_i^f , F_i^g jsou kontaktní, interakční a gravitační. Moment je označen jako M_{ij} . Tyto rovnice jsou převzaty z [3].

Rovnice uvedené výše (1) a (2) jsou následně diskretizovány metodou konečných objemů.

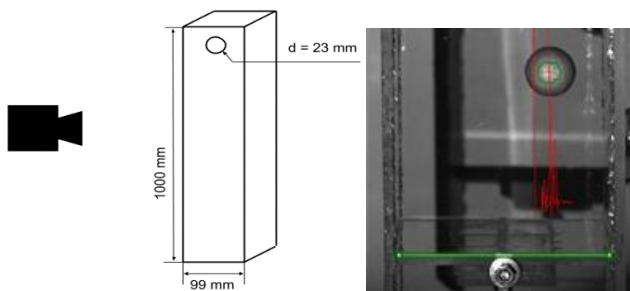
Výsledky a diskuze

Proudění tekutiny je tedy počítáno Eulerovým přístupem, metodou konečných objemů. Pohyb částic je určen lagrangeovským přístupem, kde je sledována každá částice. Interakce mezi prouděním a pevným tělesem je dána silami, které jsou určeny experimentálně odvozenými vztahy.

Pro softwarový balík OpenFOAM i komerční ANSYS Fluent bylo simulacemi ověřeno, že pro konvergenci řešení musí být splněna podmínka velikosti částice $d \ll l$. Tyto řešiče jsou tedy pro simulaci interakce velké částice s proudící tekutinou nevhodné. Pro velkou částici platí, že $d > l$.

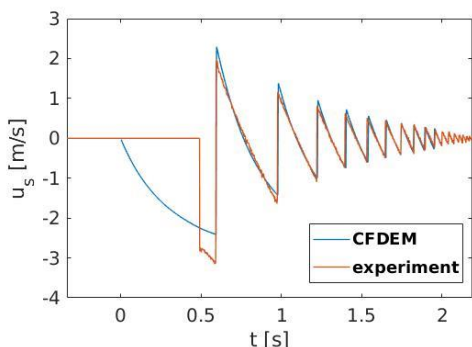
Pro numerickou simulaci velké částice byl zvolen balík CFDEM, který vznikl spojením OpenFOAM a LIGGGHTS Opensource balíků.

Software byl ověřen na základě experimentu volného pádu částice a jejímu následnému odrazu. Experiment je schematicky popsán na obrázku 2, kde je také zobrazen detail z měření.



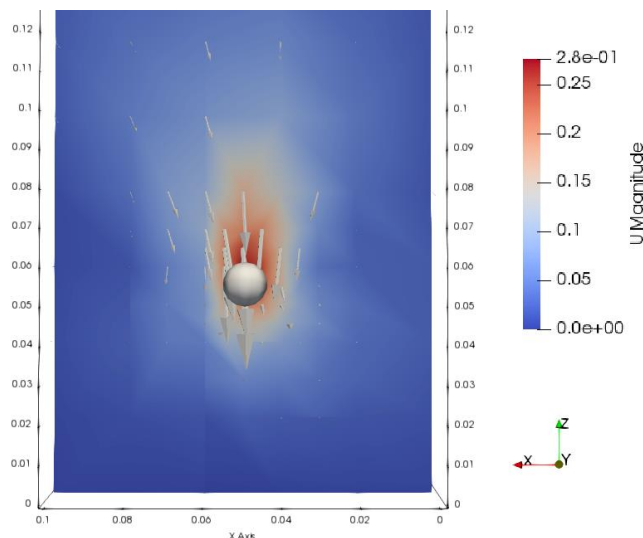
Obrázek 2: Volný pád částice $d = 23$ mm snímáný vysokorychlostní kamerou a detail z prováděného experimentu

Rychlost částice byla vyhodnocena a porovnána s rychlostí, která byla získána ze simulace. Jak ukazuje obrázek 3, simulace s naměřenými daty prokazuje shodu.



Obrázek 3: Srovnání rychlosti částice u_s v experimentu s CFDEM simulací

Proudové pole kolem částice je zobrazeno na obrázku 4.



Obrázek 4: Volný pád částice v nehybném vzduchu

Závěr

Z provedených CFD simulací vyplývá, že vhodným nástrojem pro simulování pohybu velkých částic v tekutině je CFD-DEM. Budoucí práce se bude zabývat tvarem a vlastnostmi pevné částice, jako je například její porozita, elasticita apod. Jako jiný vhodný přístup se jeví metoda Euler-Euler, kde je pevná částice popsána jako velmi viskózní kapalina s patřičnými vlastnostmi.

Poděkování

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2019.

Reference

- [1] LINMIN LI, BAOKUAN LI, ZHONGQIU LIU. *Modeling of spout-fluidized beds and investigation of drag closures using OpenFOAM*, Powder Technology, Volume 305, 2017, Pages 364-376, ISSN 0032-5910.
- [2] CHENLONG D., CHENG S., LINGLING WU, YUEMIN Z. JINFENG HE. *CFD-DEM simulation of fluid-solid flow of a tapered column separation bed*, International Journal of Mining Science and Technology, Volume 25, Issue 5, 2015, Pages 855-859, ISSN 2095-2686.
- [3] ZHANG, ZIXIN AND YIN. *A Coupled CFD-DEM Simulation of Slurry Infiltration and Filter Cake Formation during Slurry Shield Tunneling*, Infrastructures, Volume 3, 2018, Issue 2, ISSN 2412-3811.