

## DALELIŲ JUDĖJIMO AKUSTINIAME LAUKE SKAITINIS MODELIAVIMAS

Darius VAINORIUS

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva  
El. paštas [darius.vainorius@vgtu.lt](mailto:darius.vainorius@vgtu.lt)*

**Santrauka.** Straipsnyje parodyta, kaip diskrečiųjų elementų metodas (DEM) taikomas polidispersinių aerosolio dalelių akustinės aglomeracijos skaitiniam modeliavimui. Lygtimis aprašytos jėgos, veikiančios dalelę, judančią terpėje, ir pateiktos dalelės judėjimo greičio ir trajektorijos nustatymo lygtys. Gavus rezultatus nustatyta, kad dviejų vienodo skersmens izoliuotų dalelių aglomeracijos laikas iš esmės sumažėja dėl kitų dalelių įterpimo į daugiasluksnę sistemą.

**Reikšminiai žodžiai:** akustinė aglomeracija, aerosolio dalelės, DEM.

## Įvadas

Šiuolaikiniame pasaulyje vis didesne miestų aplinkos oro kokybės problema tampa oro užterštumas KD10 (skersmuo – iki 10 μm skersmens) kietosiomis dalelėmis. Dėl savo mažumo kietosios dalelės nesulaikomos viršutiniuose žmogaus kvėpavimo takuose ir gali prasiskverbti giliai į plaučius bei tokiu būdu sukelti didelę grėsmę žmogaus sveikatai. Sveikatos specialistų nuomone, KD10 tipo dalelės prisideda prie lėtinių plaučių ligų, plaučių vėžio, astmos ir kitų plaučių ligų vystymosi (Omidvarborna *et al.* 2015)

Pagal Europos Sąjungos direktyvos 2003/35/EB paskutinius pakeitimus Europos Sąjungos narės privalo pradėti taikyti direktyvos reikalavimus ir užtikrinti veiksmingą į atmosferą išsiskiriančių smulkių dalelių kiekio ribojimą pagal atitikties koeficientus. Tam tikslui kuriami įvairūs šiuolaikiniai oro valymo įrenginiai, būdai ir metodai. Vienas iš tokių metodų – dalelių, veikiančių akustiniu lauku, aglomeracija. Šiuo metu egzistuoja keletas akustinio signalo taikymo taršai kontroliuoti ir orui valyti būdų. Vienas daugiausiai pastaruoju metu sulaukiančių tiek teorinių, tiek eksperimentinių tyrinėjimų būdų – dalelių akustinė aglomeracija. Akustinė aglomeracija – tai vienas iš pirminio apdorojimo būdų, kai didelio intensyvumo garso bangos naudojamos mažų (mikronų dydžio) aerosolio dalelių aglomeracijos efektyvumui padidinti. Tačiau kad dalelių akustinė aglomeracija būtų efektyvi, reikia žinoti, kaip dalelė elgiasi akustiniame lauke. Šie procesai yra įdomūs tiek inžineriniu taikomuoju, tiek teoriniu požiūriu (Hoffmann 2000; Yao 2016; Zhou *et al.* 2016).

Šio straipsnio tikslas – pademonstruoti dviejų dalelių elgesio skirtumus, esant joms izoliuotoms, ir dalelių elgesį, kai jas veikia dalelių žiedas. Ypatingas dėmesys skiriamas aglomeracijos laikui ir gravitacinio aglomeracijos ilgiui iliustruoti.

## Dalelių aglomeracijos modelio metodologija

Siekiant supaprastinti dalelių aglomeracijos modelio metodologijos aprašymą, priimamos tokios prielaidos: dalelė – absoliučiai kieto kūno sferinės formos, aplinka – nespūdi terpė, kuri charakterizuojama tankiu, kinetine ir dinamine klampa. Išorinis žadinimas kiekvienu laiko momentu  $t$  aprašomas sinusoidiniu akustiniu greičiu  $u_s(t)$ :

$$u_s(t) = U_{0s} \sin(\omega t). \quad (1)$$

Sferinių dalelių, esančių aplinkoje, judėjimas charakterizuojamas laiku  $t$  besikeičiančiu padėties vektoriumi ir dalelės masės centro greičio vektoriumi. Dalelė juda pagal antrąjį Niutono dėsnį ir šio dėsnio išraiška DEM atrodo taip:

$$m_p \begin{Bmatrix} \dot{u}_{xp}(t) \\ \dot{u}_{yp}(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{xp}(t) \\ F_{yp}(t) \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

čia  $m_p$  – dalelės masės skaliarinis dydis, kuris gaunamas pagal formulę:

$$m_p = \frac{\pi \rho_p D_p^3}{6}. \quad (3)$$

Akustinės bangos sukeltas aplinkos horizontalus virpamasis judėjimas dalelei perduodamas per aplinkos, kurioje yra dalelė, jėgas. Hidrodinaminių jėgų poveikį dalelei nagrinėjo Maxey, Riley (1983), Deen *et al.* (2007), Xiang *et al.* (2010).

Be išorinio žadinimo jėgos  $u_s$ , dalelę veikia  $F_l$  keliąmoji jėga:

$$F_l = V_p \rho_g g, \quad (4)$$

$F_g$  sunkio jėga:

$$F_g = mg. \quad (5)$$

Ir pasipriešinimo jėga  $F_{Dp}$ , kurią patiria dalelė, judėdama skystyje esant be galo mažam Reinoldso skaičiui  $Re$ , susideda iš stacionaraus Stokes pasipriešinimo, virtualios masės, t. y. dalelės ir dalelę apgaubiančio skysčio sluoksnio bendros masės, ir Basset jėgos:

$$F_{Dp} = 6\pi\mu r U + \left(\frac{2}{3}\right)\pi r^3 \rho_g D_t U + 3\pi r^2 \left[ \frac{(2\mu U)}{\delta} + \delta \rho_g D_t U \right], \quad (6)$$

čia  $r$  – dalelės spindulys;  $U$  – aplinkos greitis, atsižvelgiant į daleles;  $\mu$  – skysčio dinaminė klampa;  $\rho_g$  – aplinkos tankis;  $D$  – diferenciacija nuo laiko  $t$ ;  $\delta$  – akustinis paribio sluoksnis, kurio dydis  $(2\nu/\omega)^{1/2}$ .

Vertindami visų šių jėgų poveikį dalelei, Tiwary (Tiwary, Reethof 1986) pareiškė, kad kietosioms sferinėms dalelėms, kurių skersmuo mažesnis negu  $14 \mu\text{m}$ , vertinti reikėtų tik  $F_{Dp}$  pasipriešinimo jėgą, nes visų kitų jėgų įtaka niekingai maža ir jų galima nevertinti. Vertinant pasipriešinimo jėgą, reikia atsižvelgti į keletą veiksnių, kuriuos išsamiai aprašo Beetstra *et al.* (2007), Yazdchi, Luding (2012), Mikhailov, Freire (2013), Kačianauskas *et al.* (2017). Šiuo atveju pasipriešinimo jėga bus išreikšta Stokes jėga ir pakoreguota pasipriešinimo koeficientu  $C_{Dp,rel}$ :

$$F_{Dp}(t) = 3\pi\mu D_p (u_m(t) - u_p(t)) C_{Dp,rel}. \quad (7)$$

Pasipriešinimo koeficientas priklauso nuo dalelės Reinoldso skaičiaus  $Re_p$ , kuris apskaičiuojamas taip:

$$Re_p = U_{0p} D_p / \nu. \quad (8)$$

Esant Oseen tekėjimui, kuris charakterizuojamas santykinai labai mažu Reinoldso skaičiumi ( $Re_p \leq 0,5$ ), pasipriešinimo koeficientas bus:

$$C_{Dp,rel}(Re_p) = \left(1 + \frac{3Re_p}{16}\right). \quad (9)$$

Vertikalus dalelių judėjimas įprastai būna paveiktas gravitacijos, taip pat yra vertinamas dalelių plūdrumas ir hidrodinaminės jėgos (Zaidi *et al.* 2015). Vertikali gravitacinė jėga yra proporcinga sunkio jėgos pagreičiui  $g$  ir nustatoma kaip sunkio jėgos ir plūdrumo santykis.

$$F_{Gp} = -\pi g (\rho_p - \rho_m) D_p^3 / 6. \quad (10)$$

Tokiu būdu gaunama, kad horizontalioji jėga  $F_{xp}$  lygtyje (2) gaunama iš horizontalios pasipriešinimo jėgos, tuo

tarpu vertikaloji jėga  $F_{yp}$  gaunama iš vertikaliosios pasipriešinimo ir sunkio jėgų, todėl:

$$F_{xp}(t) = F_{Dxp}(t); \quad (11)$$

$$F_{yp}(t) = F_{Dyp} + F_{Dyp}(t). \quad (12)$$

Visas pirmiau aprašytas dalelių judėjimo terpėje matematinis modelis įdiegtas į originalią DEM programą DEM-ACOUSTICS, sukurtą Vilniaus Gedimino technikos universiteto Mechanikos fakulteto Mechanikos mokslo instituto darbuotojų.

## Skaitinio eksperimento rezultatai ir aptarimas

Skaitinis uždavinys sprendžiamas mažais laiko žingsniais. Dalelių judėjimo skaičiavimo laiko žingsnis parenkamas taip, kad sprendinys būtų reikiamo tikslumo. Kietosios dalelės yra veikiamos garso sukeltų ir gravitacijos jėgų. Kiekvienu laiko momentu skaičiuojamos jėgos, veikiančios kiekvieną dalelę ir, taikant Niutono judėjimo lygtis, nustatomos naujosios dalelių padėties. Taip pat kiekvienu laiko momentu ieškomi kontaktai tarp dalelių. Jeigu kontaktas randamas, tai kontaktuojančios dalelės yra sujungiamos į vieną didesnę dalelę.

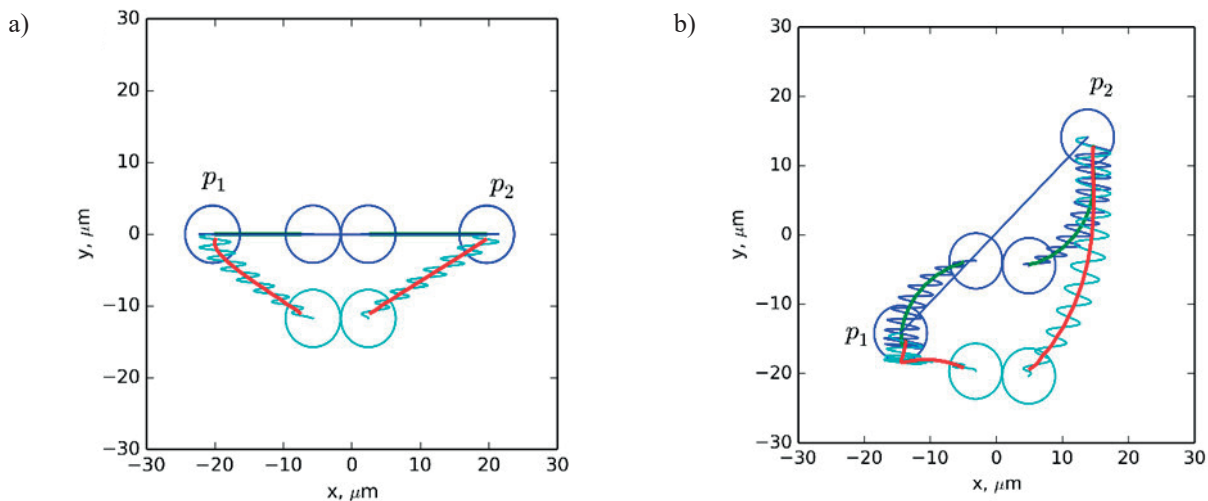
Nagrinėjama dviejų dalelių aglomeracija akustiniame lauke, esant kitų dalelių žiedui su skirtingais žiedo spinduliais. Kaip atskaitos taškas, norint palyginti dalelių žiedo įtaką aglomeracijos laikui ir vertikaliajam judesiui, imamas dviejų atskirų dalelių aglomeracijos laikas ir vertikalus judėjimas.

Duomenys skaičiuoti buvo parinkti tokie: garso bangos dažnis – 3000 Hz, garso slėgio lygis – 136 dB, garso bangos greičio amplitudė – 0,44 m/s, dalelių skersmuo – 8  $\mu\text{m}$ , dalelių tankis – 2400 kg/m<sup>3</sup>, atstumas tarp dalelių – 40  $\mu\text{m}$ , dalelių žiedo spindulys – 100 ir 200  $\mu\text{m}$ , akustinio signalo kampas – 0° ir 45°. Vertinami dalelių aglomeracijos laiko ir judėjimo trajektorijos kitimai. Skaičiavimų rezultatai pateikiami 1 lentelėje ir 1 bei 2 pav.

1 lentelė. Dviejų dalelių aglomeracijos laikas ir vertikalus kelias, kai yra tik dvi izoliuotos dalelės ir dalelių žiedas, esant skirtingam akustinio signalo kampui

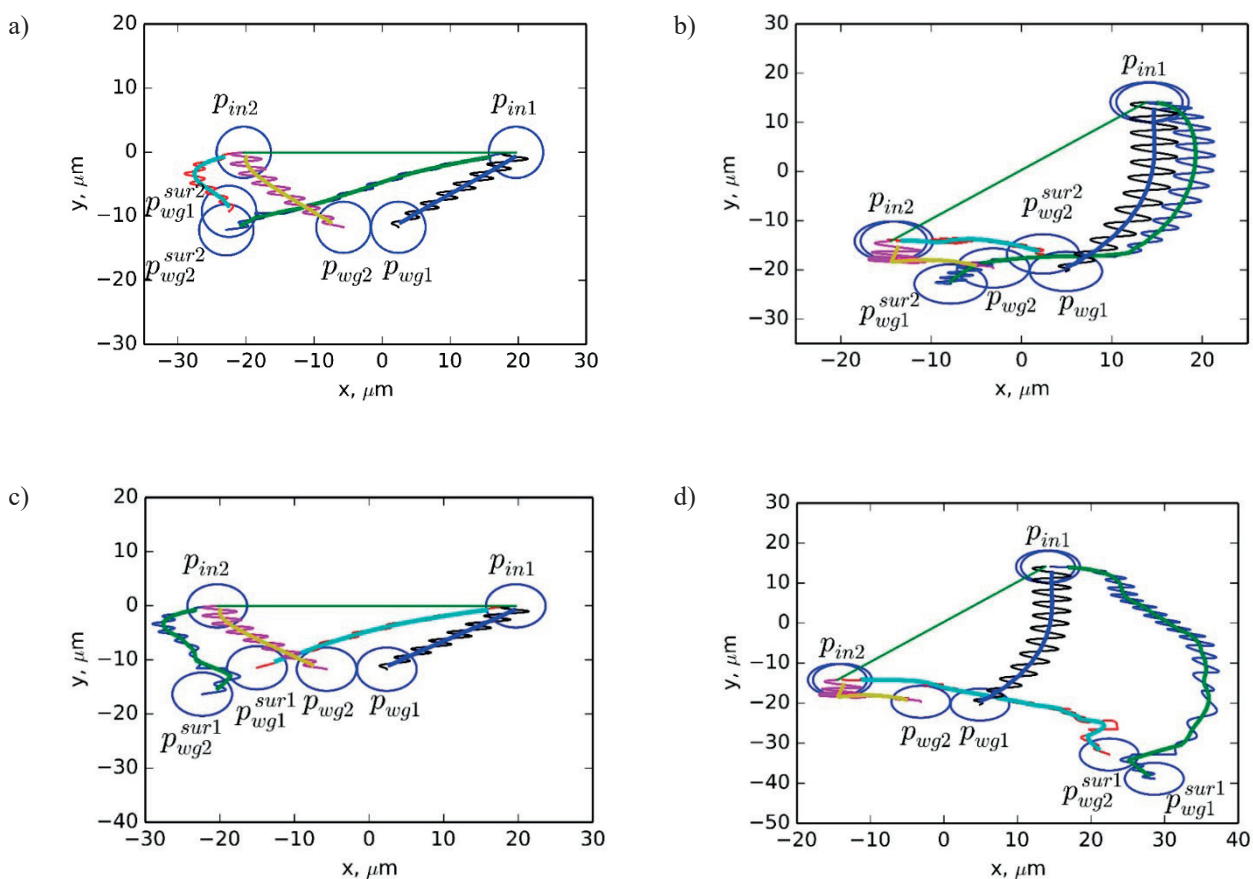
Table 1. Agglomeration times and a vertical displacement of two identical isolated particles and of the two identical particles with particle ring at the different angle of acoustic signal

Signalo kampas	Žiedo spindulys $r$ , $\mu\text{m}$	Aglomeracijos laikas, ms	Dalelių vertikalus kelias $Y$ , $\mu\text{m}$
0	100	0,375	17,096
0	200	2,437	10,963
0	Begalybė	2,319	10,586
45	100	0,166	14,052
45	200	3,882	14,865
45	Begalybė	3,701	18,932



1 pav. Dviejų vienodo dydžio izoliuotų dalelių (8 ir 8  $\mu\text{m}$ ) judėjimo trajektorijos, įvertinant gravitaciją ir be gravitacijos (akustinio signalo kampas: a)  $0^\circ$ ; b)  $45^\circ$

Fig. 1. Trajectories of two identical particles of 8  $\mu\text{m}$  diameter calculated by taking into account the gravitation force and without the gravitation force at the different angle of the acoustic signal:  $0^\circ$  for a); and  $45^\circ$  for b)



2 pav. Dviejų vienodo dydžio dalelių (8 ir 8  $\mu\text{m}$ ) judėjimo trajektorijos, įvertinant dalelių žiedą su skirtingu spinduliu  $r$  ir akustiniu signalo kampas: a)  $\beta = 0^\circ$ ,  $r = 200 \mu\text{m}$ ; b)  $\beta = 0^\circ$ ,  $r = 100 \mu\text{m}$ ; c)  $\beta = 45^\circ$ ,  $r = 200 \mu\text{m}$ ; d)  $\beta = 45^\circ$ ,  $r = 100 \mu\text{m}$

Fig. 2. Trajectories of two identical particles of 8  $\mu\text{m}$  diameter at the different radius  $r$  of the particle ring, and at the different angle of the acoustic signal: a) as  $\beta = 0^\circ$ ,  $r = 200 \mu\text{m}$ ; b) as  $\beta = 0^\circ$ ,  $r = 100 \mu\text{m}$ ; c) as  $\beta = 45^\circ$ ,  $r = 200 \mu\text{m}$ ; d) as  $\beta = 45^\circ$ ,  $r = 100 \mu\text{m}$

Lyginant dalelių aglomeracijos laiką, esant dalelių žiedui su skirtingų dalelių žiedo spinduliu, matyti, kad greičiausiai aglomeracija įvyksta esant 100 μm spinduliui. Kai spindulys yra 200 μm, aglomeracijos laikas didėja ir tampa panašus į dviejų dalelių aglomeraciją. Tai galima paaiškinti tuo, kad kuo arčiau yra kitos dalelės, tuo didesnę įtaką jos daro centre esančių dviejų dalelių judėjimui. Tikėtina, kad, dar padidinus dalelių žiedo spindulį, aglomeracijos laikas dar pailgėtų.

Lyginant vertikalų dalelių poslinkį, pastebėta tokia pati tendencija, kaip ir esant dalelių aglomeracijai, t. y. didėjant dalelių žiedo spinduliui, didėja ir centre esančių dalelių vertikalūs poslinkis.

Iš rezultatų taip pat matyti, kad, esant skirtingam akustinio signalo padavimo kampui, skiriasi tiek centre esančių dalelių aglomeracijos laikas, tiek vertikalūs judesys. Kaip matyti iš rezultatų, esant 100 μm dalelių žiedo spinduliui, dėl 45° kampo dalelių aglomeracijos laikas ir vertikalūs judėjimas yra kur kas trumpesnis, negu esant 0° kampui. Tačiau, kai kampai yra skirtingi, esant 200 μm dalelių žiedo spinduliui, tiek aglomeracijos laikas, tiek vertikalūs judėjimas labai nebesiskiria.

## Išvados

1. Nagrinėjant dviejų dalelių sąveiką, esant įvairiam dalelių žiedui apie jas, veikiant akustiniam laukui, pastebėta, kad dalelių žiedo spindulys turi įtakos dalelių aglomeracijos laikui ir vertikaliam poslinkiui.
2. Iš atliktų modeliavimo pavyzdžių, didinant dalelių žiedo spindulį, galima spręsti, kad, nuolat didinant dalelių žiedo spindulį, būtų pasiekta riba, kai žiede esančios dalelės nedarytų įtakos žiedo centre esančioms dalelėms, ir jų aglomeracijos laikas taptų toks pat kaip tik dviejų izoliuotų dalelių aglomeracijos laikas.
3. Įvairioms dalelių sistemoms modeliuoti dažniausiai taikomas diskrečiųjų elementų metodas. Šiuo metodu fizinių dalelių visuma aprašoma kaip tam tikros formos diskrečiųjų elementų rinkinys. DEM yra dinaminis metodas, kuris aprašo sistemos būvį, judant dalelėms.

## Padėka

Tiriamoji publikacijos dalis atlikta mokslininkų grupių projekto „Akustinio poveikio aerozolio dalelių sistemoje modeliavimas diskrečiųjų elementų metodu“ MIP-072/2013 lėšomis. Autorius reiškia padėką šio projekto nariams už pagalbą naudojantis jų sukurtą programine įranga.

## Literatūra

- Beetstra, R.; Hoef, M. A. Van Der; Kuipers, J. A. M. 2007. Drag force of intermediate Reynolds number flow past mono- and bidisperse arrays of spheres, *AIChE Journal* 53(2): 489–501. <https://doi.org/10.1002/aic.11065>
- Deen, N. G.; Van Sint Annaland, M.; Van der Hoef, M. A.; Kuipers, J. A. M. 2007. Review of discrete particle modeling of fluidized beds, *Chemical Engineering Science* 62(1–2): 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.014>
- Europos Parlamento ir Tarybos Direktyva 2003/35/EB [interaktyvus]. 2003 [žiūrėta 2018 m. sausio 9 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//TEXT+REPORT+A8-2015-0249+0+DOC+XML+V0//LT>
- Hoffmann, T. L. 2000. Environmental implications of acoustic aerosol agglomeration, *Ultrasonics* 38(1–8): 353–357. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00184-5)
- Yao, Y. 2016. Research and applications of ultrasound in HVAC field: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58(May 2016): 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.222>
- Yazdchi, K.; Luding, S. 2012. Towards unified drag laws for inertial flow through fibrous materials, *Chemical Engineering Journal* 207–208: 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.140>
- Kačianauskas, R.; Maknickas, A.; Vainorius, D. 2017. DEM analysis of acoustic wake agglomeration for mono-sized microparticles in the presence of gravitational effects, *Granular matter* 19: 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10035-017-0726-5>
- Maxey, M. R.; Riley, J. J. 1983. Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow, *Physics of Fluids* 26(4): 883–889. <https://doi.org/10.1063/1.864230>
- Mikhailov, M. D.; Freire, A. P. S. 2013. The drag coefficient of a sphere: an approximation using Shanks transform, *Powder Technology* 237(March 2013): 432–435. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.033>
- Omidvarborna, H.; Kumar, A.; Kim, D. 2015. Recent studies on soot modeling for diesel combustion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48(2015): 635–647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.019>
- Tiwary, R.; Reethof, G. 1986. Hydrodynamic interaction of spherical aerosol particles in a high intensity acoustic field, *Journal of Sound and Vibration* 108(1): 33–49. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(86\)80309-1](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(86)80309-1)
- Zaidi, A. A.; Tsuji, T.; Tanaka, T. 2015. Hindered settling velocity & structure formation during particle settling by direct numerical simulation, *Procedia Engineering* 102(2015): 1656–1666. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.302>
- Zhou, D.; Luo, Z.; Jiang, J.; Chen, H.; Lu, M.; Fang, M. 2016. Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment, *Powder Technology* 289 (February 2016): 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.009>
- Xiang, L.; Shuyan, W.; Huilin, L.; Goudong, L.; Juhui, C.; Yikun, L. 2010. Numerical simulation of particle motion in vibrated fluidized beds, *Powder Technology* 197(1–2): 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.08.016>

## **NUMERICAL MODELING OF PARTICLES MOVEMENTS IN ACOUSTIC FIELD**

**D. Vainorius**

Abstract

Numerical simulation of the acoustic agglomeration of micron-sized mono-dispersed aerosol particles is demonstrated in the article. The forces acting the moving particle into the moving fluid as well as the coordinates and velocities of the particles are described by the differential equations. Having calculated results it is concluded that the agglomeration time of the two identical particles decreases mainly due to the introduction of other particles into the multilayer system.

**Keywords:** acoustic agglomeration, aerosol particles, DEM.