

DALELIŲ AGLOMERACIJOS AKUSTINIAME LAUKE MODELIAVIMAS

Irina GRINBERGIENĖ¹, Audrius ČEREŠKA²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹irina.grinbergiene@vgtu.lt; ²audrius.cereska@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje pateikta dalelių aglomeracijos dėsnų analizė. Lygtimis aprašytos jėgos, veikiančios dalelę, judančią terpėje. Pateiktos dalelės judėjimo greičio ir trajektorijos nustatymo lygtys, atliktas dviejų vienodų (5 μm ir 5 μm) ir skirtingų (5 μm ir 10 μm) skersmenų dalelių aglomeracijos akustiniame lauke modeliavimas, taikant diskrečiųjų elementų metodą (DEM). Gavus rezultatus nustatyta, kad dviejų vienodo skersmens dalelių aglomeracijai gravitacija turi įtakos tik esant 8 kHz akustinio signalo dažniui.

Reikšminiai žodžiai: akustinis laukas, dalelės, aglomeracija, DEM.

Įvadas

Oro užterštumas kietosiomis dalelėmis – pagrindinė miestų aplinkos oro kokybės problema. Kietosios dalelės – tai ore esančių dalelių ir skysčio lašelių (aerozolių) mišinys, kurio sudėtyje gali būti įvairių komponentų: rūgščių, sulfatų, nitratų, organinių junginių, metalų, dirvožemio dalelių, dulkių, suodžių ir kt. Į orą išmetamos kietosios dalelės labai skiriasi savo fizine ir chemine sudėtimi, skirtingi yra dalelių dydžiai ir jų išmetimo šaltiniai.

Kuo mažesnis dalelių skersmuo, tuo gilesnius kvėpavimo takus jos pasiekia ir gali pradėti kauptis tam tikrose plaučių vietose ar netgi patekti į kraują. Dalelės (kurių dydis ore yra nuo 2,5 μm iki 10 μm) kelia didžiausią susirūpinimą, nes jos yra gana mažos, todėl gali prasiskverbti giliai į plaučius ir sukelti didelę grėsmę žmogaus sveikatai. Didesnės kietosios dalelės sulaikomos viršutiniuose kvėpavimo takuose ir dažniausiai čiaudint ar kosint iš jų pašalinamos.

Šiuo metu naujausios Europos Sąjungos direktyvos reikalauja kuo veiksmingiau mažinti į atmosferą išskiriamų smulkių dalelių kiekį. Tam tikslui kuriami įvairūs šiuolaikiniai oro valymo įrenginiai, būdai ir metodai. Vienas iš tokių būdų – dalelių, veikiančių akustinio lauko, aglomeracija (Čereška *et al.* 2016). Dalelės susijungia į stambesnius darinius ir dėl pasidėjusios masės yra greičiau ir efektyviau nusodinamos. Tačiau reikia žinoti, kokie mechanizmai ir jėgos turi įtakos šio proceso efektyvumui.

Prieš modeliuojant dalelių aglomeracijos procesą, svarbu išnagrinėti pagrindinius aglomeracijos dėsnius ir turėti pradinis duomenis, kurie padės sužinoti, ar dalelės

galės aglomeruoti. Norint gauti kuo tikslesnius rezultatus, svarbu įvertinti visas jėgas, kurios veikia daleles joms judant terpėje, tuomet užrašyti dalelių judėjimo lygtis.

Šio darbo tikslas – atlikti dviejų dalelių aglomeracijos akustiniame lauke modeliavimą, taikant DEM ir nustatyti proceso dėsningumus.

Dalelių aglomeracijos proceso matematinis modeliavimas

Modeliuojant dalelių aglomeracijos procesus, svarbu nustatyti minimalų atstumą tarp dalelių, kuriam esant jos gali koaguliuoti. Tarus, kad aerolinės dalelės yra pasiskirsčiusios tolygiai 1 cm³, atstumas tarp jų nustatomas taip (Mednikov 1963):

$$L_{m0} = \frac{1}{\sqrt[3]{n_0}}, \text{ cm.} \quad (1)$$

Po aglomeracijos pradinė dalelių koncentracija n_0 per laiką t sumažėja iki koncentracijos n , kartu aerolinių dalelių spindulys kinta nuo r_{p0} iki r_p , o jo reikšmė galima apskaičiuoti pagal šią formulę:

$$r_p = r_{p0} \sqrt[3]{\frac{n_0}{n}}. \quad (2)$$

Dalelių judėjimui oro sraute turi įtakos garso bangų poveikis. Garso bangos dažnis

$$f = \frac{3\mu_g}{2\pi\rho_p r_{p0}^2}. \quad (3)$$

Garso bangos sukelia periodinius aerozolio dalelių svyravimus. Pagal Stokso lygtį dalelės greitis terpėje gali būti išreikštas taip (Mednikov 1963):

$$U_p = \frac{U_g}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \sin(\omega t - \phi), \quad (4)$$

čia U_g – terpės greičio svyravimo amplitudė; τ – dalelių relaksacijos laikas, s:

$$\tau = \frac{2\rho_p r_p^2}{9\mu_g}, \quad (5)$$

čia μ_g – oro dinaminis klampis; ω – ciklinis virpesių dažnis, Hz, $\omega = 2\pi f$; ϕ – virpesių fazė, $t g \phi = \omega t$.

Tada gaunamas dalelės, kuri dalyvauja svyruojančios terpės judėjime, traukos koeficientas:

$$\eta_p = \cos \phi = \frac{U_p}{U_g} = \frac{x_p}{x_g} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}, \quad (6)$$

čia U_p ir U_g – dalelės ir terpės svyravimų greičio amplitudės; x_p ir x_g – dalelės ir terpės svyravimų poslinkio amplitudės.

Dalelės aptekėjimo terpėje koeficientas:

$$\eta_g = \sin \phi = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}. \quad (7)$$

Dalelės, judančios klampioje aplinkoje, paviršius apsitraukia plonu šios aplinkos sluoksniu ir ima judėti kartu su ja. Tarp prilipusio sluoksniu ir arti dalelės esančių kitų skysčio sluoksnių, kurie nejuda, susidaro greičio gradientas ir klamos jėgos. Kai greičiai maži ir sūkurių nėra, nustatyta, kad pasipriešinimo jėga yra tiesiogiai proporcinga aplinkos klampiui, dalelės judėjimo greičiui ir priklauso nuo dalelės formos bei matmenų. Sferos formos dalelėms ši jėga apskaičiuojama taip:

$$F_{St} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v, \quad (8)$$

čia F_{St} – Stokso jėga; η – aplinkos (skysčio) dinaminis klampis; r – dalelės spindulys; v – dalelės greitis.

Dalelės judėjimo skystyje vertikalia kryptimi lygtis tokia:

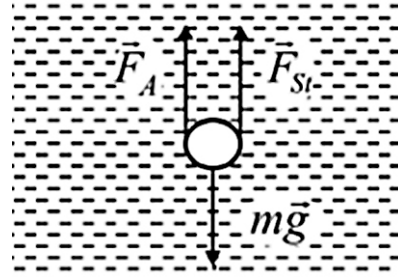
$$m \cdot \vec{a} = m \cdot \vec{g} + \vec{F}_A + \vec{F}_{St}, \quad (9)$$

čia $m \cdot \vec{g}$ – dalelės sunkis; m – dalelės masė; \vec{g} – dalelės laisvojo kritimo pagreitis; \vec{F}_A – Archimedo keliamoji jėga, kuri visada nukreipta vertikaliai aukštyn ir lygi dalelės išstumto skysčio sunkiui:

$$F_A = \rho_0 \cdot g \cdot V, \quad (10)$$

čia ρ_0 – skysčio tankis; V – dalelės tūris.

Minėtų jėgų poveikis dalelei pavaizduotas 1 pav.



1 pav. Jėgos, veikiančios dalelę skystyje

Fig. 1. Forces, acting on Particle

Kai aukštyn nukreiptos jėgos atsveria sunkio jėgą, dalelė juda tolygiai, be pagreičio:

$$m \cdot g - F_A - F_{St} = 0 \quad (11)$$

arba

$$\rho_d \cdot g \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 - \rho_{Sk} \cdot g \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 - 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (12)$$

Taikant (12) lygtį, skaičiuojamas skysčio klampis ir dalelių nusėdimo greitis (Navickas *et al.* 2008). Esant jau didesniems greičiams, nagrinėjant dalelės sąveiką su skysčiu, galioja Niutono lygtis:

$$\vec{F}_d = C_d \cdot \rho_f \cdot d_p^2 \cdot |\vec{u} - \vec{v}| \cdot (\vec{u} - \vec{v}) / 8, \quad (13)$$

čia \vec{F}_d – sąveikos jėga tarp dalelės ir terpės (pasipriešinimo jėga); C_d – terpės pasipriešinimo koeficientas ant dalelės; ρ_f – terpės tankis; d_p – dalelės skersmuo; u – terpės tekėmės greitis; v – dalelės perkėlimo greitis (Zhu *et al.* 2007).

Sąveikaujant dalelei ir terpei, veikia pasipriešinimo jėga, kuri priklauso nuo skysčio tankio, pasipriešinimo koeficiento, dalelės skersmens ir judėjimo greičio.

Žinant dalelės judėjimo terpėje dėsnį, galima nagrinėti akustinio lauko įtaką. Periodiškai veikiant terpę akustiniais virpesiais, dalelė juda su terpe. Atsiranda papildomų narių, tokių kaip akustinės bangos greitis, ir tuomet dalelės judėjimo skystyje lygtis gaunama tokia:

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d \cdot (\vec{u}_g - \vec{u}_p) + V_p \cdot (\rho_p - \rho_0) \cdot \vec{g}, \quad (14)$$

čia d – dalelės skersmuo; u_g – terpės, kurioje yra dalelė, judėjimo greitis dėl akustinės bangos poveikio; u_p – dalelės judėjimo greitis terpėje; t – laikas; η – aplinkos (skysčio) dinaminis klampis; \vec{g} – dalelės laisvojo kritimo pagreitis; ρ_p – dalelės tankis; ρ_0 – terpės (skysčio), kur yra dalelė, tankis.

Jei akustinė banga veikia pagal sinusoidės dėsnį, jos sužadintos terpės sklidimo greitis nustatomas taip:

$$u_g = U_g \sin(\omega t - kx), \quad (15)$$

čia U_g – terpės svyravimų amplitudė; ω – virpesių ciklinis dažnis; k – garso bangų skaičius; $k = \omega / c_g$; c_g – garso sklidimo greitis.

Garso slėgio amplitudė yra susijusi su garso greičiu ir terpės svyravimų amplitude:

$$P_g = \rho_0 \cdot c_g \cdot U_g. \quad (16)$$

Garso slėgio lygis apskaičiuojamas taip:

$$SPL = 20 \log \frac{P_{rms}}{20 \cdot 10^{-6} Pa}, \quad (17)$$

čia p_{rms} – vidutinė kvadratinė garso slėgio vertė, nustatoma pagal formulę:

$$p_{rms} = P_g / \sqrt{2}. \quad (18)$$

Yra nustatyta, kad pakibusios dalelės, veikiamos garso bangų, greitai koaguluoja, ypač kai gaunamas rezonansas. Dalelių padidėjimas, veikiant garso bangoms, buvo nustatytas matuojant jų kritimo greitį, ir šis padidėjimas priklausė nuo garso intensyvumo (Baltrėnas *et al.* 2008).

Dalelių greičių ir padėties nustatymas akustiniame lauke

Pagrindinė dalelės judėjimo lygtis šiuo atveju tokia:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = \partial m_p \frac{du_g}{dt} + \frac{1}{2} \partial m_p \frac{d(u_g - u_p)}{dt} + 6\pi\mu R(u_g - u_p) + 6R^2 \times \sqrt{\pi\mu\rho_g} \int_{-\infty}^t \frac{d(u_g - u_p)}{d\eta} \cdot \frac{d\eta}{\sqrt{t-\eta}}. \quad (19)$$

Šioje lygtyje u_p ir u_g – dalelės ir terpės judėjimo greičiai. Kairioji lygties pusė aprašo dalelę veikiančias jėgas. Pirmasis dešinėsios pusės narys – slėgio jėga, kuri sukelia terpės be dalelių, antrasis narys apibūdina jėgą, kuri sukelia terpės judėjimą tarp gretimų dalelių, trečiasis narys – Stokso jėga, paskutinis apibūdina dalelės greičio kitimą per laiką t .

Dalelių tankis yra kur kas didesnis negu terpės, todėl pirmasis ir antrasis lygties nariai gali būti nevertinami, kai terpės slėgis yra labai aukštas. Gaunama lygtis:

$$F_p = 6\pi\mu R(u_g - u_p). \quad (20)$$

Terpės greičio bangos lygtis:

$$u_g = u_0 \sin \omega t. \quad (21)$$

Gaunamas toks sprendinys:

$$u_p = \frac{u_0 \sin(\omega t - \phi)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_d^2}} + \frac{\omega \tau_d u_0 e^{-t/\tau_d}}{1 + \omega^2 \tau_d^2}. \quad (22)$$

Dalelės relaksacijos laikas τ_d yra gerokai trumpesnis negu garso bangos periodas, todėl dalelės judėjimo lygtis gali būti išreikšta taip:

$$u_p = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_d^2}} u_0 \sin(\omega t - \phi). \quad (23)$$

Virpesių lygtys terpėje, esant judančiajai ir stovinčiajai akustinio signalo bangai, užrašomos taip:

$$y_t(x, t) = A \sin(\omega t - kx) \\ y_s(x, t) = -A \cos(\omega t) \sin(kx). \quad (24)$$

Remiantis jomis, apskaičiuojami dalelių greičiai:

$$u_{pt}(x, t) = \mu_p \omega A \cos(\omega t - kx - \phi) \\ u_{ps}(x, t) = \mu_p 2\omega A \sin(\omega t - \phi) \sin(kx). \quad (25)$$

Tuomet nustatomi dalelių poslinkiai:

$$y_{pt}(x, t) = \mu_p A \cos(\omega t - kx - \phi) \\ y_{ps}(x, t) = -2\mu_p A \cos(\omega t) \sin(kx), \quad (26)$$

čia A – terpės virpesių amplitudė; k – svyravimų bangos eilės numeris. Šie parametrai išreiškiami taip:

$$A = \frac{\sqrt{2} p_e}{\rho_0 c_0 \omega} \quad k = \frac{2\pi f}{c_0}, \quad (27)$$

čia p_e – efektyvusis garso slėgis, kuris gaunamas iš garso slėgio lygio išraiškos (Zhou *et al.* 2016).

Turint visų dalelių parametrų lygtis, atliekamas skaitinis modeliavimas. Dažniausiai taikomas metodas dalelių sistemoms nagrinėti yra diskrečiųjų elementų (DEM). Praėjusio šimtmečio aštuntajame dešimtmetyje (1979) dabartinę DEM idėją ir sąvoką suformulavo Cundall (Cundall, Strack 1979). Darbe (Sallam *et al.* 2004) taikant DEM modeliuojamos įvairių formų dalelės.

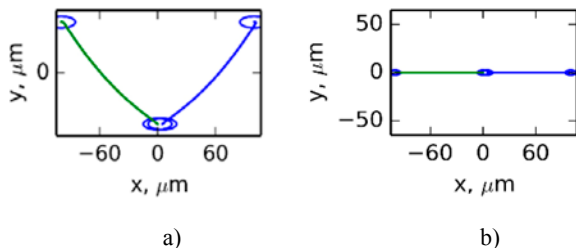
Diskrečiųjų elementų metodas nagrinėja materialias sistemas, sudarytas iš atskirų dalelių. Šiuo metodu fizinių dalelių visuma aprašoma kaip tam tikros formos diskrečiųjų elementų rinkinys. DEM yra dinaminis metodas, kuris aprašo sistemos būvį, judant dalelėms. Kiekvieno diskrečiojo elemento judėjimo parametrai (padėtis, posūkio kampai, greičiai ir pagreičiai) apskaičiuojami sprendžiant judėjimo lygtis. Sprendiniai gaunami taikant skaitinio integravimo metodus, dažniausia išreikštine forma. Žinant diskrečiojo elemento kinematinis parametrus fiksuotu laiko momentu, apskaičiuojamos veikiančios jėgos (Markauskas *et al.* 2014).

Dviejų dalelių sąveikos akustiniame lauke modeliavimas diskrečiųjų elementų metodu

Skaitinis modeliavimas suteikia daugiau galimybių įvertinti sąveikas tarp dalelių, esant įvairiems parametrams, ir leidžia nustatyti dalelių judėjimo trajektorijas. Taip pat galima apskaičiuoti, per kiek laiko įvyks dviejų dalelių aglomeracija. Modeliavimas atliktas VGTU Mechanikos mokslo instituto mokslininkų sukurta atvirojo kodo programa DEM Acoustics (Programinė įranga... 2015). Buvo nustatyti šie pradiniai parametrai:

- Dalelių tankis – 1500 kg/m^3 .
- Atstumas tarp dalelių – $200 \text{ }\mu\text{m}$.
- Elementaraus tūrio, kuriame nagrinėjama dalelių sąveika, matmenys – $2000 \times 2000 \times 2000 \text{ }\mu\text{m}$.

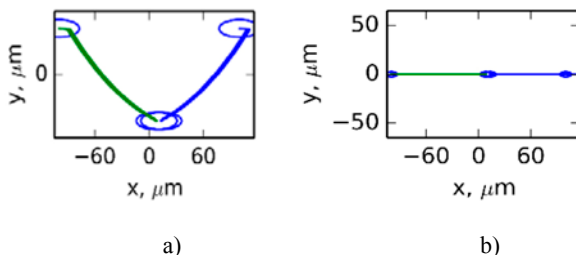
Kitų žingsniu nustatomi akustinio lauko parametrai: pirmuoju atveju akustinis signalas buvo generuojamas pjezokeraminiu garso generatoriumi, kurio garso bangos dažnis yra $24\,000 \text{ Hz}$, garso slėgis – 135 dB , garso bangos greičio amplitudė – $0,378 \text{ m/s}$. Antruoju atveju akustinis signalas buvo generuojamas Hartmano garso generatoriumi (švilpuku). Šio generatoriaus skleidžiamos garso bangos dažnis – 8000 Hz , garso slėgis – 138 dB , garso bangos greičio amplitudė – $0,534 \text{ m/s}$. Taip pat vertinamas svorio jėgos (gravitacijos) $F = ma$ poveikis dalelių aglomeracijos laikui ir judėjimo trajektorijos kitimui. Akustinė banga sklinda išilgai dalelių išsidėstymo ašies. Skaičiavimų rezultatai pateikti 2–5 paveiksluose.



2 pav. Dviejų vienodo skersmens dalelių ($5 \text{ ir } 5 \text{ }\mu\text{m}$) judėjimo trajektorijos, įvertinant gravitaciją (a) ir be jos (b) (akustinio signalo dažnis 24 kHz)

Fig. 2. Trajectories of two similar particles ($5 \text{ ir } 5 \text{ }\mu\text{m}$) including gravitation force (a) and without it (b) (Frequency of acoustic signal 24 kHz)

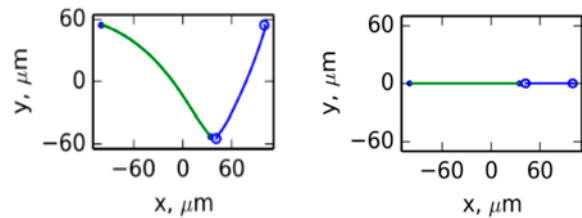
Vertinant dviejų vienodo skersmens dalelių aglomeracijos procesą, esant 24 kHz akustinio signalo dažniui, gauta jų aglomeracijos trukmė. Rezultatai parodė, kad abiem atvejais dvi dalelės aglomeravo per $3,297 \cdot 10^{-2}$ sekundės.



3 pav. Dviejų vienodo skersmens dalelių ($5 \text{ ir } 5 \text{ }\mu\text{m}$) judėjimo trajektorijos įvertinant gravitaciją (a) ir be jos (b) (akustinio signalo dažnis 8 kHz)

Fig. 3. Trajectories of two similar particles ($5 \text{ ir } 5 \text{ }\mu\text{m}$) including gravitation force (a) and without it (b) (Frequency of acoustic signal 8 kHz)

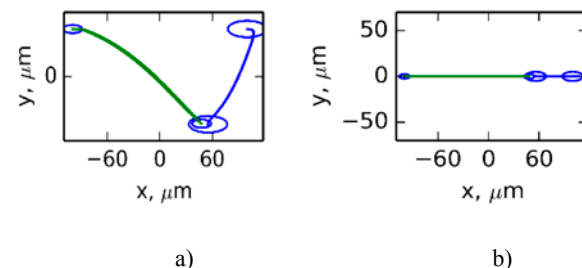
Apskaičiavus dalelių aglomeracijos laiką, esant 8 kHz akustinio signalo dažniui, nustatyta, kad jos, veikiamos gravitacijos jėgos, aglomeruoja per $1,623 \cdot 10^{-2}$ s, o nevertinant gravitacijos – per $2,411 \cdot 10^{-2}$ s.



4 pav. Dviejų skirtingų skersmenų dalelių ($10 \text{ ir } 5 \text{ }\mu\text{m}$) judėjimo trajektorijos, įvertinant gravitaciją (a) ir be jos (b) (akustinio signalo dažnis 24 kHz) (Kačianauskas *et al.* 2015)

Fig. 4. Trajectories of two different particles ($10 \text{ ir } 5 \text{ }\mu\text{m}$) including gravitation force (a) and without it (b) (Frequency of acoustic signal 24 kHz)

Apskaičiuotas dviejų skirtingų skersmenų dalelių aglomeracijos laikas, esant 24 kHz akustinio signalo dažniui, veikiant gravitacijos jėgai, yra $3,238 \cdot 10^{-2}$ s, o be gravitacijos – $2,591 \cdot 10^{-2}$ s.



5 pav. Dviejų skirtingų skersmenų dalelių ($10 \text{ ir } 5 \text{ }\mu\text{m}$) judėjimo trajektorijos, įvertinant gravitaciją (a) ir be jos (b) (akustinio signalo dažnis 8 kHz)

Fig. 5. Trajectories of two different particles ($10 \text{ ir } 5 \text{ }\mu\text{m}$) including gravitation force (a) and without it (b) (Frequency of acoustic signal 8 kHz)

Analogiškai apskaičiuotas dviejų skirtingų skersmenų dalelių aglomeracijos laikas, esant 8 kHz akustinio signalo dažniui ir veikiant gravitacijos jėgai, yra $1,659 \cdot 10^{-2}$ s, o be gravitacijos – $1,551 \cdot 10^{-2}$ s.

Lyginant $5 \text{ ir } 10 \text{ }\mu\text{m}$ skersmens dalelių aglomeracijos laikus, esant 24 kHz ir 8 kHz akustinio signalo dažniams, nustatyta, kad esant 24 kHz dalelės aglomeruoja greičiau, negu jas veikiant 8 kHz dažnio akustiniu signalu.

Gravitacija labiausiai veikia vienodo skersmens dalelių aglomeraciją ir esant 8 kHz akustinio signalo dažniui. Veikiant gravitacijos jėgai, aglomeracija vyko $0,788 \cdot 10^{-2}$ s greičiau negu be jos.

Išvados

1. Iš gautų rezultatų matoma, kad akustinio signalo dažnis turi įtakos dalelių aglomeracijos trukmei.
2. Išanalizavus modeliavimo rezultatus nustatyta, kad gravitacija turi įtakos ir skirtingo, ir vienodo skersmens dalelių aglomeracijai. Gravitacija labiausiai veikia

vienodo skersmens dalelių aglomeraciją ir esant 8 kHz akustinio signalo dažniui. Veikiant gravitacijos jėgai, aglomeracija vyko $0,788 \cdot 10^{-2}$ s greičiau negu be jos.

3. Dalelių sistemoms modeliuoti dažniausiai taikomas diskrečių elementų metodas. DEM yra dinaminis metodas, kurį taikant nagrinėjamos materialiosios sistemos, sudarytos iš atskirų dalelių.

Padėka

Tiriamoji publikacijos dalis atlikta Mokslininkų grupių projekto „Akustinio poveikio aerolio dalelių sistemoje modeliavimas diskrečių elementų metodu“ MIP-072/2013 lėšomis. Autoriai reiškia padėką šio projekto nariams už pagalbą naudojantis jų sukurta programine įranga.

Literatūra

- Baltrėnas, P.; Butkus, D.; Oškinis, V.; Vasarevičius, S.; Zigmontienė, A. 2008. *Aplinkos apsauga*. Vilnius: Technika. 545 p. <https://doi.org/10.3846/995-S>
- Cundall, P. A.; Strack, O. D. L. 1979. A discrete numerical model for granular assemblies, *Journal of Geotechnical Engineering* 29: 47–65.
- Čereška, A.; Tetsman, I.; Maskeliūnas, R.; Grinbergienė, I.; Paškevičius, P. 2016. Investigation of effect of acoustic field to coagulation of particles in air flow, *Journal of Vibroengineering* 18(3): 2004–2015. <https://doi.org/10.21595/jve.2016.16983>
- Kačianauskas, R.; Kačinskaja, I.; Maknickas, A.; Markauskas, D.; Rojek, J. 2015. *Simulation of attractive motion of silica microparticles in aerosol under acoustic excitation*. PCM-CMM 2015. Gdansk: Gdansk University of Technology, 563–564. ISBN 9788393210763
- Markauskas, D.; Kačianauskas, R.; Maknickas, A. 2014. Numerical particle-based analysis of the effects responsible for acoustic particle agglomeration, *Advanced Powder Technology* 26(3): 698–704. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.12.008>
- Mednikov, E. P. 1963. *Acoustic coagulation and precipitation of aerosols*. Consultant. New-York.
- Navickas, J.; Ambrasas, V.; Girdušienė, D.; Majauskienė, O.; Šaudienė, R. 2008. *Specialioji fizika*. Kaunas: Ardiva. 301 p.
- Programinė įranga DEM-Acoustics [interaktyvus]. 2015 [žiūrėta 2016 m. lapkričio 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://me.vgtu.lt/fakultetai/padaliniai/mechanikos-mokslo-institutas/kita-informacija/52624#102133>
- Sallam, A. M.; Ashmawy, A. K.; Runkles; B. D. 2004. Experimental validation of modelling irregular particle shapes using DEM, in *Numerical modeling in micromechanics via particle methods* London: Taylor and Francis group, 363–372.
- Zhou, D.; Luo, Z.; Fang, M.; Lu M.; Jiang, J.; Chen, H.; He, M. 2016. Numerical calculation of particle movement in sound wave fields and experimental verification through high-speed photography, *Applied Energy* 185(Part 2): 2245–2250. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.006>
- Zhu, H. P.; Zhou, Z. Y.; Yang, R. Y.; Yu, A. B. 2007. Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments, *Chemical Engineering Science* 62(13): 3378–3396. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.089>

MODELLING OF PARTICLES AGLOMERATION IN THE ACOUSTIC FIELD

I. Grinbergienė, A. Čereška

Abstract

The article includes particles agglomeration principles analysis. Forces describes with the equations operating particle of its moving in the vibes. It presents equations of particle movement speed and trajectory estimation. It have performed agglomerations simulation of two identical (5 μm and 5 μm) and different (5 μm and 10 μm) diameters particles in the acoustic field using the discrete element method (DEM). The results showed that the two equal diameter particle agglomeration gravity affects at 8 kHz acoustic signal frequency.

Keywords: acoustic field, particles, agglomeration, DEM.