



AKUSTINIO LAUKO ĮTAKOS AEROZOLIO DALELIŲ KOAGULIACIJAI EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

Ina TETSMAN¹, Irina GRINBERGIENĖ², Audrius ČEREŠKA³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹ina.tetsman@vgtu.lt; ²irina.grinbergiene@vgtu.lt; ³audrius.cereska@vgtu.lt

Santrauka. Atlikti labai mažo skersmens kietųjų dalelių koaguliacijos efektyvumo, priklausomai nuo akustinio lauko garso slėgio ir dažnio, tyrimai. Aprašytas tyrimams atlikti naudotas eksperimentinis stendas ir eksperimentų atlikimo metodika. Akustiniam laukui žadinti naudoti du garso generatoriai: pjezoelektrinis ir aeroakustinis. Atlikus tyrimus nustatyta, kad, didėjant akustinio poveikio dažniui, dalelių koaguliacijos greitis didėja, kai dalelių skersmuo neviršija 1 μm . Efektyviausiai dalelių iki 1 μm skersmens koaguliacijai reikia ultragarsinių dažnių, didesnio nei 1 μm skersmens dalelėms reikia žemesnio dažnio už ultragarsinį.

Reikšminiai žodžiai: akustinis laukas, garso dažnis, aerozolio dalelės, koaguliacija.

Įvadas

Koaguliacija – dalelių sukibimas į stambesnius agregatus. Svarbiausia fizikinio modelio dalis yra koaguliacijos mechanizmų apibūdinimas. Fizikinis modelis įvertina koaguliacijos efektą, atsirandantį dėl ortokinetinio ir hidrodinaminio akustinių bangų mechanizmo (Yun *et al.* 2014).

Koaguliacija dėl ortokinetinės sąveikos vyksta tarp dalelių, kurios juda akustiniu lauku paveiktoje terpėje, skirtingais greičiais ir skirtingomis amplitudėmis (Liu *et al.* 2009; Markauskas *et al.* 2014).

Pagrindinis veiksnys, nustatantis aerozolio dalelių judėjimo sraute ypatumus, yra tas, kad jų svoris, palyginti su aplinkos molekulems, kur kas didesnis (aerozolio dalelės stipriau nei dujų molekulės veikia inercijos jėga) (Vekteris *et al.* 2014).

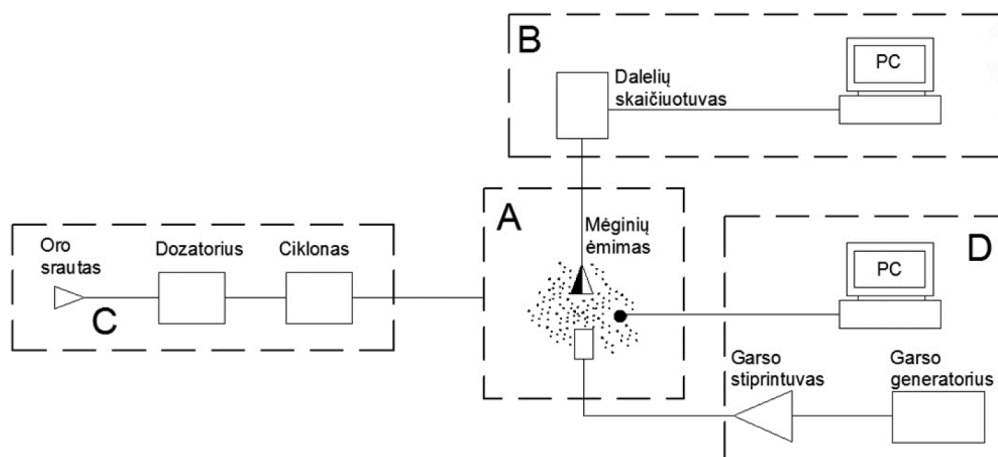
Mono- ir polidispersinių aerozolių mažinimas yra pagrindinė aplinkosaugos problema. Akustinė koaguliacija tinka aerozoliams, kurių dalelių dydis yra iki 10 μm . Bet ji mažai efektyvi mažos koncentracijos aerozoliams, nes dėl didelio atstumo tarp dalelių mažai tikėtina, kad pradės veikti hidrodinaminės jėgos. Dalelių judėjimo lygtys gaunamos remiantis žinomais klasikinės hidrodinamikos dėsniais.

Aerozolio dalelės dujinėje terpėje veikia išorinės jėgos – tarp dalelių esančios pasipriešinimo ir hidrodinaminės jėgos. Prie išorinių jėgų priskiriamos sunkio jėgos, elektrostatinės jėgos ir t. t. Jėgos, veikiančios dalelę iš judamos arba nejudamos terpės pusės, priskiriamos prie pasipriešini-

mo jėgų. Kai dalelės svyruoja akustiniame lauke, pasipriešinimo jėgas galima priskirti prie išorinių. Norint nustatyti akustinio poveikio režimus, reikia žinoti dujų dispersinės sistemos iširimo laiko priklausomybę nuo dydžių, charakterizuojančių tokį poveikį, tai yra, nuo akustinių virpesių dažnio ir garso slėgio. Šios priklausomybės nustatomos pagal dvejų fazių fizines savybes: dujinės fazės tankį ir slėgį, kietos fazės tankį ir tiriamo aerozolio dispersinę sąveiką.

Autoriai (Song *et al.* 1994; Hoffmann 2000; Ezekoye, Wibowo 1999), nagrinėjantys hidrodinaminę komponentę, sukeliančią susidūrimo tikimybę, nustatė, kad esant mažoms dalelėms (iki 10 μm), kai garso slėgis iki 137 dB, Reinoldso skaičius yra mažesnis negu 0,4. Santykinis vibracinių dalelių greitis yra artimas santykiniam nusistovėjimo greičiui, taigi ortokinetikos susidūrimas nebėra reikšmingas. Gravitacija nėra veiksminga skaičiuojant ortokinetikos susidūrimo ilgį, bet turi akustinį poveikį (Dong, Xianglin 2005).

Pažymėtina, kad dalelių pernašos proceso dujinėje aplinkoje problema apima daugiau įvairių uždavinių nei aprašo aerodinamikos lygtys. Dalelių judėjimas gali vykti dėl molekulinės kinetikos procesų dujinėje aplinkoje, pavyzdžiui, Brauno difuzijos. Tuo pačiu metu gali vykti šilumos ir masės mainų reiškiniai, taip pat fazinis virsmas, todėl tampa išties sunkiau aprašyti aerozolio judėjimą dujinėje aplinkoje.



1 pav. Tyrimų stendo schema: A – aerosolio dalelių koaguliacijos (aglomeracijos) zona – akustinė kamera, B – aerosolio dalelių koncentracijos stebėjimo zona, C – aerosolio dalelių tiekimo sistema, D – garso generacijos ir matavimo zona

Fig. 1. Scheme of a test stand: A – area of aerosol particles coagulation (agglomeration) – acoustic chamber, B – monitoring area of aerosol particles concentration, C – supply system of aerosol particles, D – sound generation and measurement area

Akustinės koaguliacijos teorija remiasi kelių fizinių uždavinių sprendimu: atskiros dalelės, kelių dalelių ir smulkiusių dalelių sistemos elgesio tyrimu garsiniame lauke. Sprendžiant šį uždavinį, galima iširti pagrindinius fizinio mechanizmo dėsninumus, būdingus dalelėms koaguliuojant akustiniame lauke.

Kai santykinis dalelių greitis yra artimas santykiniam nusistovėjimo greičiui, ortokinetikos susidūrimas nebėra reikšmingas.

Tyrimų tikslas – įvertinti aerosolio koaguliacijos efektyvumą priklausomai nuo akustinio lauko garso slėgio ir dažnio poveikio.

Tyrimų stendas ir tyrimo metodika

VG TU Mechanikos inžinerijos katedros laboratorinėje bazėje eksperimentiniams tyrimams buvo sukurtas eksperimentinių tyrimų stendas (1 ir 2 pav.), kuris sudarytas iš 4 zonų: dalelių koaguliacijos (aglomeracijos) zona – akustinė kamera, dalelių koncentracijos stebėjimo zona, dalelių tiekimo sistema, gaisro generacijos ir matavimo zona. Atliekant tyrimus, aerosolio dalelių tiekimo sistemoje ventiliatoriumi siurbiamas oras ir pučiamas į cikloną, kuris šalina iš oro srauto daleles, didesnes už 10 μm. Dozatoriumi į valomą oro srautą paleidžiamas sumaltas kvarcinis smėlis, kurio milteilių dydis sudaro iki 1 μm. Toliau oro srautas su kvarcinio smėlio dalelėmis per drošelį juda link akustinės kameros. Prieš akustinę kamerą sumontuotas vamzdis su aerosolio dalelių koncentracijos analizatoriumi APC ErgoTouch 2 (dalelių skersmuo (6 kanalai) – 0,3 μm, 0,5 μm, 1 μm, 3 μm, 5 μm, 10 μm; matavimo laikas – sekundės; tūris –

0,01±5 % l/min tikslumu). Fiksuojamas dalelių, esančių oro sraute, dydis ir kiekis pagal frakcijas prieš akustinio lauko poveikį. Oro srautas su kvarcinio smėlio dalelėmis patenka į akustinę kamerą, kurioje srautas yra veikiamas akustiniu lauku, generuojamu pjezoelektriniu garso generatoriumi. Tada įvertinamas aerosolio dalelių koncentracijos pokytis priklausomai nuo akustinio lauko garso poveikio laiko.

Akustinio lauko parametrų matavimams buvo naudojama Bruel&Kjær virpesių matavimo sistema „Type 9727“ (1 pav., D). Ją sudaro: programinė įranga „Type 7910“, daugiakanalis duomenų kaupimo blokas „Type PULSE 3560-B“, kompiuteris bei Bruel&Kjær hidrofonas 8104, (jautrumas – 211 dB 1 V/μPa ± 2 dB, dažnio atsakas nuo 0,1 Hz iki 100 kHz +1,5/–6,0 dB; nuo 0,1 Hz iki 180 kHz +3,5/–12,5 dB; horizontalia kryptimi (xy plokštuma) ±2 dB



2 pav. Tyrimų stendo nuotrauka
Fig. 2. Photo of the teststand

1 lentelė. Pagrindiniai sistemos parametrai

Table 1. The main parameters of system

Parametras	Matavimo vienetai	Reikšmė
Oro debitas sistemoje	m ³ /h	6–25
Aerzolių svorinė koncentracija ore	g/m ³	10–45
Aerzolio buvimo akustinėje kameroje laikas	s	0,5–3,5
Garso dažnis	kHz	8–24
Garso slėgio lygis akustinėje kameroje	dB	>120

dažnis 100 kHz; vertikalia kryptimi (xz plokštuma) ± 4 dB dažnis 100 kHz).

Naudojant programinę įrangą, analizuojami sensoriaus užfiksuoti virpesių dažniai ir garso slėgio amplitudės laiko atžvilgiu. Analizuojant matavimo rezultatus gauti akustinio lauko parametrai.

Ventiliatoriaus skleidžiamas akustinis triukšmas stabilus visame diapazone $\sim 70 \pm 10$ Pa. Kvarcinis smėlis buvo sveriamas svarstyklėmis „BLE-4“, padalos vertė – 0,001 g. Pagrindiniai sistemos parametrai reikalingi eksperimentui atlikti pateikti 1 lentelėje.

Akustinėje kameroje akustinis laukas nestabilus. Tyrimo metu hidrofonas turi būti sumontuotas lygiagrečiai garso bangos sklidimo kryptčiai, kad užtikrintų didžiausią hidrofono jautrumą. Didžiausias garso slėgis užfiksuotas arčiausiai akustinio lauko šaltinio, tolstant – mažėja.

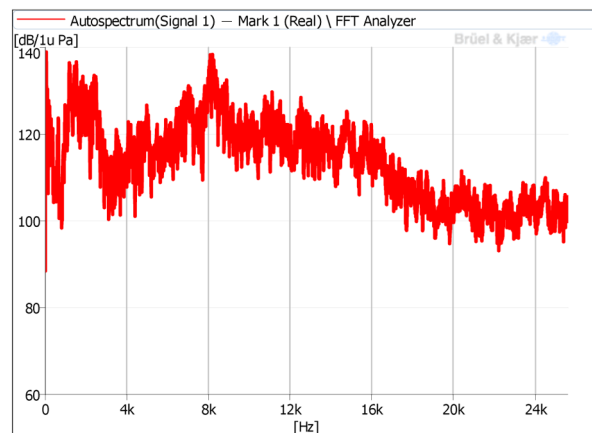
Tyrimo metu oro drėgnumas buvo 56,8 %, temperatūra – 18,7 °C.

Tyrimų rezultatai ir aptarimas

Eksperimentinių tyrimų stende buvo atlikti eksperimentiniai aerzolio koaguliacijos efektyvumo tyrimai pagal akustinio lauko garso slėgio ir dažnio poveikį. Akustinėje kameroje tyrimo metu akustinio lauko garso slėgis, naudojant pjezoelektrinį garso generatorių, buvo 136,6 dB esant 23,98 kHz dažniui, o naudojant aeroakustinio garso generatorių, garso slėgis buvo 138 dB, kai dažnis 8,08 kHz. Rezultatai pateikti 3 ir 4 pav.

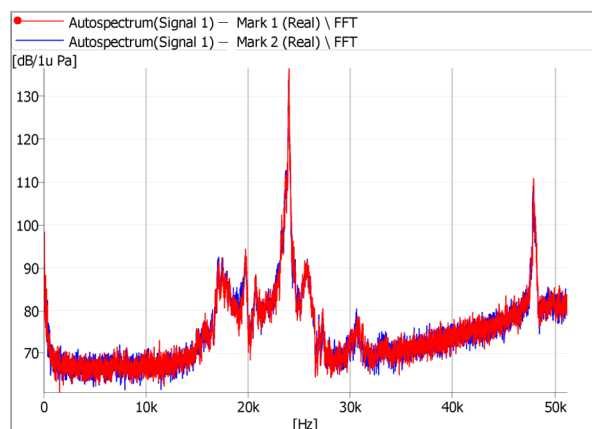
Gauti ekperimentinių tyrimų rezultatai polidispersnių dalelių sistemai:

- kai garso slėgis 138 dB, dažnis 8,08 kHz (5 pav.), n/n_0 su 0,5 μm skersmens dalelėmis kito nuo 0,42689 iki 0,38807, su 0,7 μm skersmens dalelėmis – nuo 0,31703 iki 0,30748, su 1 μm skersmens dalelėmis – nuo 0,17752 iki 0,16420, su 5 μm skersmens dalelėmis – nuo 0,05664 iki 0,07367, ir su 10 μm skersmens dalelėmis – nuo 0,02193 iki 0,06677;



3 pav. Akustinio lauko parametrai: aeroakustinio garso generatoriaus garso slėgio priklausomybė nuo dažnio: 138 dB esant 8,08 kHz dažniui

Fig. 3. Parameters of acoustic field: aeroacoustics sound generator sound pressure dependence on frequency: 138 dB at frequency of 8.08 kHz

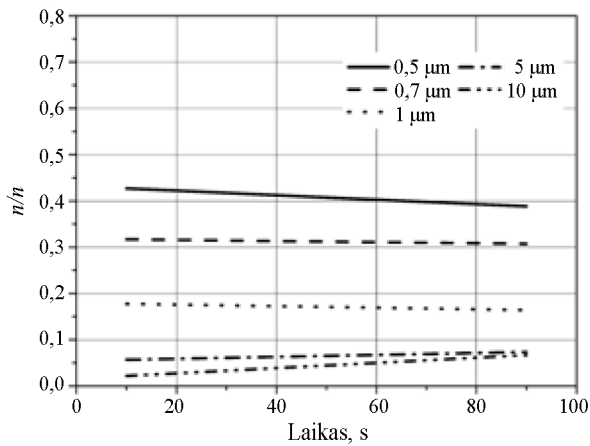


4 pav. Akustinio lauko parametrai: pjezoelektrinio garso generatoriaus garso slėgio priklausomybė nuo dažnio: 136,6 dB esant 23,98 kHz dažniui

Fig. 4. Parameters of acoustic field: piezo-electric sound generator sound pressure dependence on frequency: 136.6 dB at frequency of 23.98 kHz

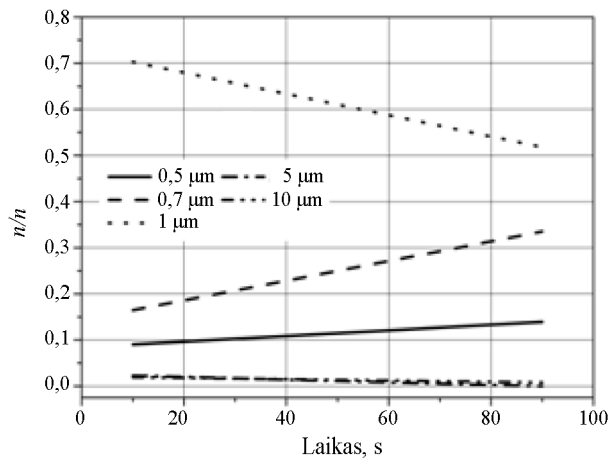
- kai garso slėgis buvo 136,6 dB, dažnis 23,98 kHz (6 pav.), n/n_0 su 5 μm skersmens dalelėmis kito nuo 0,090440575 iki 0,139182893, su 0,7 μm skersmens dalelėmis – nuo 0,164726397 iki 0,335110935, su 1 μm skersmens dalelėmis – nuo 0,702579154 iki 0,518249834, su 5 μm skersmens dalelėmis – nuo 0,022782394 iki 0,000373265, o su 10 μm skersmens dalelėmis – nuo 0,01947148 iki 0,007829603.

Dalelės virš 1 μm skersmens geriau aglomeruoja, kai garso virpesių dažnis yra iki 20 kHz. Dalelės iki 1 μm skersmens geriau aglomeruoja, kai garso virpesių dažnis yra virš 20 kHz.



5 pav. Dalelių koaguliacijos greičio priklausomybė nuo garso dažnio laike, kai garso slėgis 138 dB, o dažnis 8,08 kHz

Fig. 5. Dependence of Particle coagulation speed on sound frequency in time, when the sound pressure is equal to 138 dB, and frequency is 8.08 kHz



6 pav. Dalelių koaguliacijos greičio priklausomybė nuo garso dažnio laike garso slėgis 136,6 dB dažnis 23,98 kHz

Fig. 6. Dependence of particle coagulation speed on sound frequency in time, when the sound pressure is 136.6 dB, and frequency 23.98 kHz

Išvados

1. Didesnėms negu 1 μm skersmens dalelių aglomeracijai reikia dažnio, žemesnio už ultragarsinį, o dalelės, kurių skersmuo mažesnis nei 1 μm, efektyviausiai koaguliuoja ultragarsinių dažnių diapazone.
2. Jei dalelių išsidėstymas polidispersinis, būtina naudoti garso poveikį plačiame dažnių diapazone.

Literatūra

Dong, Ch. S.; Xianglin, S. 2006. Modelling of acoustic agglomeration processes using the direct simulation Monte Carlo method, *Journal of Aerosol Science* 37(1): 16–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.03.004>

Ezekoye, O. A.; Wibowo, Y. W. 1999. Simulation of acoustic agglomeration processes using a sectional algorithm, *Journal of Aerosol Science* 30(9): 1117–1138. [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502\(98\)00778-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00778-2)

Hoffmann, T. L. 2000. Environmental implication of acoustic aerosol agglomeration, *Ultrasonic* 38: 353–357. [http://dx.doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00184-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00184-5)

Yun, Z.; Xinwu, Z.; Changchao, G. 2014. Experimental research on acoustic agglomeration of fine aerosol particles in the standing-wave tube with abrupt section, *The Journal of the Acoustical Society of America* 135(4): 2375–2375. <http://dx.doi.org/10.1121/1.4877841>

Liu, J.; Zhang, G.; Zhou, J.; Wang, J.; Zhao, W.; Cen, K. 2009. Experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fly ash particles at low frequencies, *Powder Technology* 193(1): 20–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2009.02.002>

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2014.12.008>

Song, L.; Koopmann, G. H.; Hoffmann, T. L. 1994. An improved theoretical model of acoustic agglomeration, *Journal of Vibration and Acoustics* 116(2): 208–214. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2930414>

Vekteris, V.; Strishka, V.; Ozarovskis, D.; Mokshin, V. 2014. Experimental investigation of processes in acoustic cyclone separator, *Advanced Powder Technology* 25(3): 1118–1123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2014.02.017>

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ACOUSTIC FIELD INFLUENCE ON COAGULATION OF AEROSOL PARTICLES

I. Tetsman, I. Grinbergienė, A. Čereška

Abstract

There were made tests of coagulation efficiency of particulate matter (aerosol), which depends on the acoustic field sound pressure and frequency. Experimental stand was presented that was used to do research, and a methodology of experiments was described. Two sound generators for acoustic field excitation were used: piezo-electric and aero-acoustic. It was determined after researches that after increasing the frequency of the acoustic field, particle coagulation rate is increased, if particle diameter is not greater than 1 μm. For coagulation of particles having the diameter larger than 1 μm frequency lower than the frequencies of the supersonic band is required. Particles which have the diameter which is smaller than 1 μm coagulate most effectively in the band of supersonic frequencies.

Keywords: acoustic field, frequency, aerosol particles, coagulation.