



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Justinas Rimkus

GRŪDĖTOJO ORO VALYMO FILTRO REGENERACIJOS TYRIMAS
RESEARCH OF EFFECTIVENESS OF REGENERATION OF
GRANULAR BED AIR FILTER

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2014

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Mindaugas Jurevičius
(Vardas, pavardė)

(Data)

Justinas Rimkus

GRŪDĖTOJO ORO VALYMO FILTRO REGENERACIJOS TYRIMAS
RESEARCH OF EFFECTIVENESS OF REGENERATION OF
GRANULAR BED AIR FILTER

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2014

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Justinas Rimkus, 20083946

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Mechanikos fakultetas

(Fakultetas)

Mechanikos inžinerija, AIfm-12

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2014 m. birželio 3 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Grūdėtojo oro filtro regeneracijos efektyvumo tyrimas“ patvirtintas 2014 m. kovo 24 d. dekanų potvarkiu Nr. 70me, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas doc. dr. Vytautas Striška.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Justinas Rimkus

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mechanikos inžinerijos katedra

ISBN
Egz. sk.
Data-.....-..... ISSN

Antrosios pakopos studijų **Mechanikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas 4

Pavadinimas **Grūdėtojo oro filtro regeneracijos efektyvumo tyrimas**

Autorius **Justinas Rimkus**

Vadovas **doc. dr. Vytautas Striška**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos pagrindinės grūdėtųjų oro filtrų konstrukcijos ir įkrovos regeneracijos būdai.

Darbo tikslas – ištirti vibracijų įtaką grūdėtojo oro filtro įkrovos regeneracijai esant skirtingiems vibracijų režimams.

Darbą sudaro trys pagrindinės dalys.

Pirmoje dalyje pateikiamos pagrindinės populiariausių oro filtrų konstrukcijos ir regeneracijos būdai. Taip pat pateikiamos alternatyvos grūdėtųjų oro filtrų įkrovos regeneracijai.

Antroje dalyje išnagrinėta monodispersinių dalelių elgsena veikiant vibracijai ir vibruojančios polidispersinės terpės segregacija.

Trečioje dalyje aprašomas tyrimo standas ir metodika, taip pat pateikiami ir apibendrinami tyrimo rezultatai.

Veliau pateikiamos bendros išvados ir literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 40 p. teksto be priedų, 24 iliustr., 1 lent., 34 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai darbo prieduose pridedamas straipsnis baigiamojo darbo tema..

Prasminiai žodžiai: Kietosios dalelės, grūdėtasis oro filtras, filtro įkrova, vibracija, regeneracija.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Mechanics
Department of Mechanical Engineering

ISBN _____ ISSN _____
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Mechanical Engineering** study programme Master Graduation Thesis 4
Title **Research of Effectiveness of Regeneration of Granular Bed Air Filter**
Author **Justinas Rimkus**
Academic supervisor **Assoc Prof Dr Vytautas Striška**

**Thesis
language:** Lithuanian

Annotation

The master thesis analyzes granular air bed filter design and bulk regeneration techniques.

The purpose is to investigate the effect of vibration on granular air bed filter bulk at different vibration regimes.

The thesis consists of three main parts.

The first part contains the main popular air filter design and regeneration techniques. It also provides an alternative techniques of granular bed air filter bulk regeneration.

The behavior the bulk monodisperse particles, due to vibrations, and vibratory bulk medium segregation is covered in second part.

The third section describes the methodology and stand of research as well summarizes the results of the study.

Then the general conclusion and references.

Thesis consist of: 40 p. text without appendixes, 24 pictures, 1 table, 34 bibliographical entries.

Separately Appendixes are attached with an article of the thesis topic.

Keywords: Solid particles, granular air bed filter, bulk, vibration, regeneration.

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS FAKULTETAS
MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H33001

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
prof. dr. M. Jurevičius
(Vardas, pavardė)
2013-01-24
(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui (ei)Justinui Rimkui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Grūdėtojo oro filtro regeneracijos efektyvumo tyrimas. Research of effectiveness of regeneration of granular bed air filter

patvirtinta 2012m. lapkričio 14 d. dekanų potvarkiu Nr. 259me

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2014m. gegužės 20 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Oro valymo užpiltine terpe metodų analizė ir naudojamų įrenginių konstrukcijų apžvalga; Grūdėtosios medžiagos regeneracijos metodų efektyvumo vertinimas; Birios terpės ir vibracijos sąveika; Eksperimento stendo paruošimas; Eksperimentiniai tyrimai; Tyrimų rezultatų analizė ir išvadų suformulavimas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

doc. dr. Vytautas Striška
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
Justinas Rimkus
(Vardas, pavardė)
2013-01-24
(Data)

Turinys

IVADAS.....	6
1. PROBLEMOS FORMULAVIMAS.....	8
1.1. Kietosios dalelės.....	8
1.2. Mechaninis oro filtravimas.....	8
1.3. Alternatyvūs įkrovos regeneracijos būdai.....	13
2. ANALITINĖ DALIS	16
2.1. Monodispersinių dalelių elgsena veikiant vibracijai	16
2.2. Polidispersinių dalelių segregacija.....	18
2.3. Dalelių judėjimas apribotoje erdvėje	22
3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	26
3.1. Tyrimų standas	26
3.2. Tyrimo metodika	26
3.3. Tyrime naudoti prietaisai ir medžiagos.....	28
3.4. Tyrimo supaprastinimas ir atsitiktinių paklaidų panaikinimas	35
3.5. Bandymų rezultatai	36
IŠVADOS	44
LITERATŪRA.....	45
PRIEDAI.....	47

Paveikslėlių sąrašas

1.1. pav. Rankovinio filtro schema (Denafas 2000b).....	9
1.2. pav. Grūdėtasis oro filtras su stacionaria įkrova (Denafas 2000b)	11
1.3. pav. Grūdėtasis oro filtras su judančia įkrova (Danfas 2000b).....	12
1.4. pav. Grūdėtasis oro filtras su akustine įkrovos regeneracija.....	13
1.5. pav. Suslėgto oro garso šaltinis.....	15
1.6. pav. Grūdėtasis oro valymo filtras su vibracine įkrovos regeneracija.....	Error! Bookmark not defined.
2.2. pav. Kai papurtome indelį su skirtingų dydžių riešutais, didžiausi riešutai iškyla į paviršių	18
2.4. pav. Dalelių segregacija pagal dydį, kai sistema vibruojama, sudėtingumas. Didelės dalelės gali leisti į dugną (a) arba kilti į paviršių (b), priklausomai nuo jų tankio ir kitų fizinių savybių	20
3.1. pav. Tyrimų stendo schema: a) su vienos krypties vibratoriumi; b) su dviejų krypčių vibratoriumi	27
3.3. pav. Tyrimų stendas su dviejų krypčių vibratoriumi	28
3.6.pav. Tyrime naudotas elektromagnetinis vienkryptis vibratorius	30
3.7.pav. Tyrime naudotas elektromagnetinis dviejų krypčių vibratorius.....	30
3.8.pav. Diferencialinis slėgio jutiklis <i>KIMO CP100</i>	31
3.9.pav. Virpesių matavimo sistema „Type 9727“ – mašinų diagnostikos įrankių dėžė	32
3.10.pav. Virpesių matavimo sistema „Type 9727“ – akselerometras	32
3.11.pav. Filtro įkrova – keraminiai rutuliukai	33
3.12.pav. Filtro įkrova – granuliuotas stiklas.....	33
3.13. pav. Filtro korpusas – bendras vaizdas	34
3.14. pav. Filtro korpusas – vidus	34
3.15. pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, prie didžiausių amplitudžių, naudojant stiklo granules	39
3.16. pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, esant didžiausioms amplitudėms, naudojant keraminius rutuliukus	40
3.17. pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, esant mažiausioms panašioms amplitudėms, naudojant stiklo granules	40
3.18. pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, esant mažiausioms panašioms amplitudėms, naudojant keraminius rutuliukus.....	41

Lentelių sąrašas

3.1.lentelė. Dvikrypčio elekteromagnetinio vibratoriaus vibracijų amplitudės esant nustatytai įtampai	29
--	----

IVADAS

Problema

Atmosferos tarša tapo viena iš aktualiausių šiuolaikinių problemų. Labiausiai teršiančios medžiagos yra dujinės prigimties ir kietosios dalelės, kurios gali būti perneštos dideliais atstumais ir lokalizuotis. Vilniuje 2013 m. KD_{10} dalelių ribinė paros koncentracija ore ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) buvo viršyta daugiau nei 35 kartus.

Didelės kietųjų dalelių koncentracijos ant žemės paviršiaus turi įtakos augalų ir gyvūnų gyvenimui vietiniu ir pasauliniu mastu. Daugelio gamybos šakų plėtra veikia gyvūniją ir augaliją, turi įtakos jos išteklių panaudojimui ir yra tiesiogiai susijusi su dulkėto oro srautų atskyrimo problemomis. Šios problemos sprendimas kasdien tampa aktualesnis, nes vis didėja pramoninių įmonių gamybinės teritorijos ir pajėgumai.

Dulkių mažinimo problema, atitiktis leistinoms dulkių koncentracijoms atmosferoje gali būti išspręsta, jeigu yra teisingai suprojektuotas ekonomiškai ir efektyvus dulkių gaudytuvas konkrečiam atvejui.

Yra naudojamos kelios dulkių valymo technologijos:

- mechaninis valymas vyksta dėl išorinių jėgų, valymas ciklonuose – išcentrinėmis jėgomis;
- šlapiasis valymas – dalelių savybė reaguoti su vandeniu ar emulsija;
- valymas filtrais – dalelių nusodinimas ant porėtosios medžiagos;
- valymas panaudojant elektrą.

Kietoms dalelėms iš oro išvalyti dažniausiai yra naudojami ciklonai arba filtrai.

Darbo aktualumas

Orui valyti dažniausiai naudojami filtrai, pagaminti iš audinio, porėtosios sintetinės medžiagos arba filtravimo popieriaus. Iš pradžių tokie filtrai veikia gana efektyviai, tačiau laikui bėgant filtruojančios medžiagos poros yra užkemšamos kietųjų dalelių, filtras sukuria didesnę nei įprastai pasipriešinimą oro srautui. Sumažėjus filtro praeinamumui reikia sunaudoti gerokai daugiau energijos tam pačiam oro kiekiui išpūsti, o galiausiai filtras visiškai užsikemša. Todėl filtrai yra periodiškai keičiami, o panaudoti filtrai truri būti utilizuojami.

Jei vietoje įprastų filtrų naudotume grūdėtuosius filtrus su nenutrūkstančia regeneracija, išvengtume dažno filtrų keitimo ir turėtume galimybę kaupti kietąsias daleles ir utilizuoti jas kaip antrinę žaliavą, pavyzdžiui, gamindami cementą ar kitas statybines medžiagas.

Darbo naujumas

Grūdėtųjų oro valymo filtrų regeneracijai dažniausiai naudojamas atbulinis švaraus oro srautas, mechaninės maišyklės arba vibratoriai, kurie priverčia filtro įkrovą chaotiškai judėti ir taip nupurtyti nuo savęs suspenduotas kietąsias daleles. Vis dėlto pritaikius pažangesnes įkrovos regeneracijos sistemas galima pagerinti filtro regeneraciją, sumažinti regeneracijai sunaudojamos energijos kiekį ir padidinti įrenginio patvarumą.

Šiame darbe įkrovos regeneracijai naudojami vienkryptis ir dviejų krypčių elektromagnetiniai vibratoriai.

Baigiamojo darbo tikslas

Darbo tikslas – ištirti vibracijų įtaką grūdėtojo oro filtro įkrovos regeneracijai esant skirtingiems vibracijų režimams.

1. PROBLEMOS FORMULAVIMAS

1.1. Kietosios dalelės

Kietosios dalelės – tai ore esančių dalelių ir skysčio lašelių mišinys, kurio sudėtyje gali būti įvairūs komponentai – sulfatai, nitratai, organiniai junginiai, metalai, dirvožemio dalelės, dulkės, suodžiai ir kt. Kuo dalelės smulkesnės, tuo giliau jos gali prasiskverbti į žmogaus organizmą ir tuo didesnę neigiamą poveikį turėti sveikatai. Pačios smulkiausios dalelės gali kauptis plaučių audiniuose ir sukelti rimtus ne tik kvėpavimo organų, bet ir širdies bei kraujagyslių funkcijos sutrikimus. Į žmogaus organizmą kietosios dalelės patenka kvėpuojant. Kietųjų dalelių poveikis organizmui priklauso nuo jų frakcijos dydžio, fizikinių ir cheminių savybių bei koncentracijos. Stambesnės dalelės sulaikomos viršutiniuose kvėpavimo takuose, todėl didelio pavojaus sveikatai jos nekelia. KD_{10} (kietosios dalelės iki 10 mikronų aerodinaminio skersmens) dalelės gali nusėsti bronchuose ir plaučiuose, sukeldamos kosulį ir čiaudulį. Tuo tarpu mažesnės nei 2,5 mikronų aerodinaminio skersmens $KD_{2,5}$ dalelės, patenkančios į plaučius ar kraujotakos sistemą, gali kauptis plaučių audiniuose ir sukelti rimtus ne tik kvėpavimo organų, bet ir širdies bei kraujagyslių funkcijos sutrikimus, skatinti astmos paūmėjimą, alergiją.

1.2. Mechaninis oro filtravimas

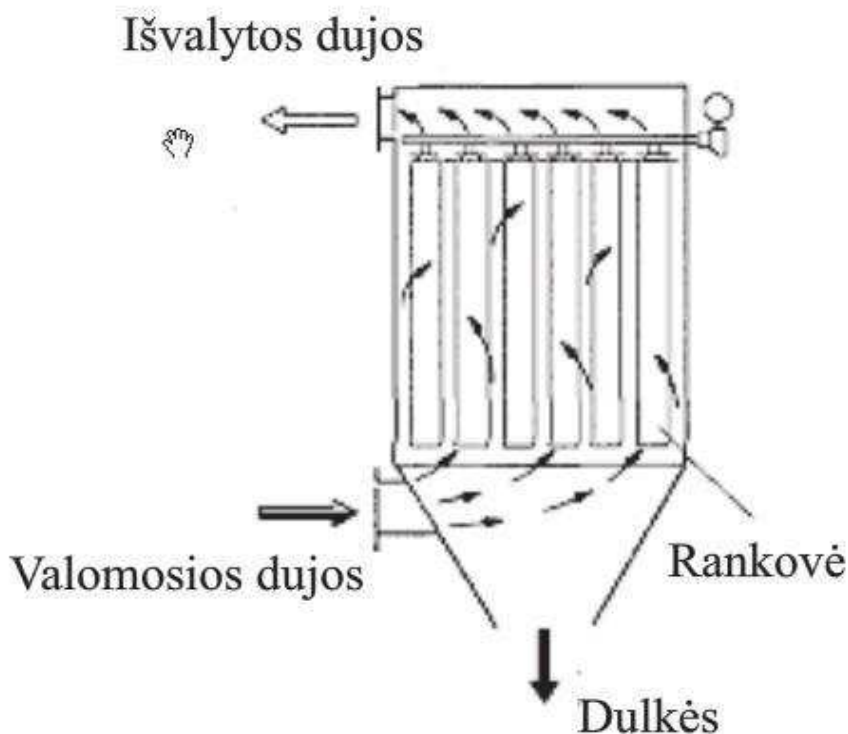
Kietųjų dalelių iš dujų srauto valymo procesas naudojant poringas medžiagas vadinamas filtravimu (Daunoravičienė 2010). Mechaninio filtravimo metu oro sraute esančios kietosios dalelės sulaikomos ant poringos medžiagos paviršiaus arba jos sluoksnio viduje. Dalelių sulaikymo efektyvumą lemia filtravimo medžiagos porų ir pačių dalelių dydis. Pagrindiniai filtravimo medžiagų (sluoksnių) tipai yra trys: audeklas, pluoštinė medžiaga, grūdelių sluoksnis. Audekliniai filtrai veikia paviršių, o pluoštiniai ir grūdėtieji – tūrį.

Pakankamai perspektyvūs įrenginiai mažo našumo katilinių išlakų kietosioms dalelėms gaudyti yra audekliniai filtrai. Jų privalumas – puikios filtracinės savybės (tinkamai parinkus audinio medžiagą ir jos apkrovą, oro išsivalymo laipsnis siekia 99,99 %, be to, jis mažai priklauso nuo pelenų ir dulkių dispersiškumo) bei aukštas terminis ilgaalaikis atsparumas (stiklo audiniai – iki 300 °C).

Audeklinių filtrų eksploatavimo pradžioje per švarią medžiagą gali praeiti 20–30 % kietųjų dalelių, tačiau veikiant filtrui poras tarp audinio pluoštų palaipsniui užpildo dalelės, kurios

sudaro antrą poringą gaudymo sluoksnį. Šis sluoksnis gali būti pakankamai storas, todėl gerai sulaiko mažesnes daleles. Tačiau didėjant sugautų dalelių sluoksnio storiui, t. y. kaupiantis lakiesiems pelenams ir suodžiams ant audeklo paviršiaus, labai padidėja filtro aerodinaminis pasipriešinimas ir audinį būtina regeneruoti. Ant audeklo paviršiaus susikaupęs dulkių sluoksnis pašalinamas suspaustu oru arba mechaniškai purtant. Regeneruojant filtrą suspaustu oru, pastarasis tiekiamas priešinga valomųjų dujų srautui kryptimi. Mažiau mechaniškai patvaraus audinio (pvz., stiklo pluošto) filtrai regeneruojami arba žemo slėgio oru, arba mechaniškai purtant. Visais regeneravimo atvejais nupurtytos dulkės surenkamos į bunkerį. Regeneracijos metu reikia nukratyti tik viršutinį dalelių sluoksnį, kad sumažėtų aerodinaminis pasipriešinimas, tačiau medžiagos porose dalelės turi likti.

Audekliniai filtrai būna dviejų pagrindinių tipų – rankoviniai ir plokštieji. Valant degimo išlakas daug pranašesni yra rankoviniai filtrai. Paplitusi rankovinio filtro forma (1.1 pav.) yra ant metalinių rėmų užvilktos 12–20 cm skersmens ir iki 5 m ilgio cilindrinės rankovės. Dujų srautas patenka iš apačios į viršų, toliau pro išorinę rankovės pusę į vidų. Tačiau dalelių sulaikymo rankovinėmis filtrais procese galima ir priešingos krypties valomųjų dujų eiga. Neretai gerai išvalytas oras grąžinamas tiesiog į gamybinę patalpą, o ne išmetamas į atmosferą.



1.1 pav. Rankovinio filtro schema (Denafas 2000b)

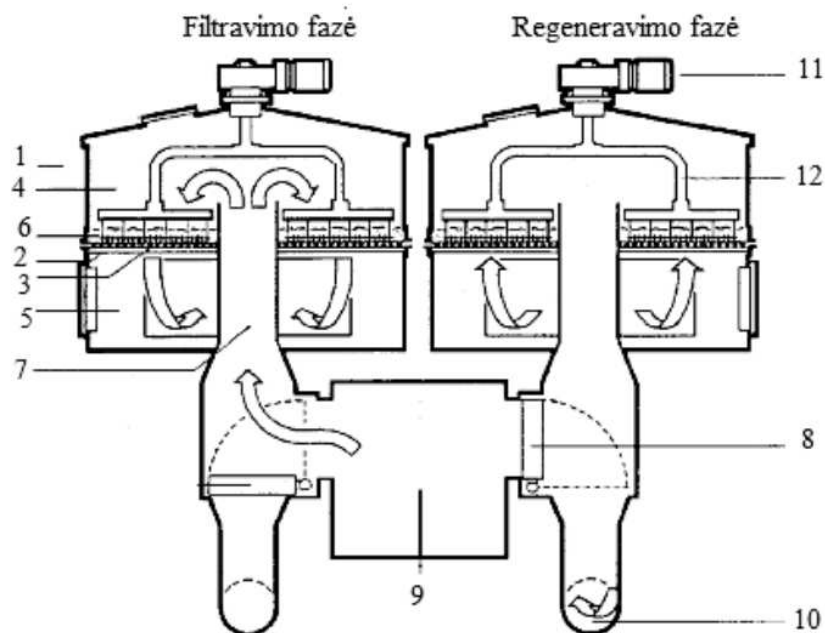
Pluoštinių filtrų paskirtis – gaudyti ir kaupti daleles pluošto tūryje. Valomasis elementas – specialios smulkaus pluošto medžiagos. Plačiai naudojamas audinys, kurį sudaro ultraploni (1,5–2,5 μm) perchlorvinilo pluoštai, uždėti ant marlinio pagrindo, taip pat audinys, kurį sudaro ultraploni (apie 1,5 μm) acetilceliuliozės pluoštai.

Grūdėtuosiuose filtruose filtravimo procesas vyksta kelių metrų aukščio 0,3–50 mm grūdelių įkrovoje. Iš pradžių procese dalyvauja visas įkrovos tūris, bet vėliau, susikaupus didesniam sulaikomų dalelių kiekiui, pagrindinį vaidmenį atlieka išorinis įkrovos sluoksnis. Tuo momentu pagerėja filtravimo efektyvumas, tačiau padidėja slėgio kritimas.

Grūdėtaisiais filtrais nepasiekiamas toks valymo efektyvumas, kaip gerais audekliniais filtrais. Esant didelėms apkrovoms yra realus „pramušimo“ pavojus, kai dalelės filtrą praeina kiaurai. Siekiant to išvengti, įkrovos grūdelių skersmuo turi būti mažas ($<0,5$ mm), o srauto linijinis greitis išilgai įkrovos sluoksnio taip pat nedidelis ($<0,1$ m/s). Grūdėtuosius filtrus tikslinga naudoti tuomet, kai negalima eksploatuoti audeklinių filtrų, pvz., esant aukštai temperatūrai ir slėgiui, užsiklijavimo dėl rasojoimo, sulaikomų dalelių abrazyvumo arba cheminio reakingumo sąlygomis. Kaip įkrova naudojami žvyras, smėlis, keramika, aktyvuota anglis ar kiti užpildai. Naudojant susmulkintus kalkakmenius, kartu galima pašalinti ir kitus dujinius teršalus (SO_2 , NO_x , CO), šiuo atveju įkrova veiktų kaip chemisorbentas.

Tam, kad įkrovą būtų galima regeneruoti, ji turi būti chemiškai ir mechaniškai atspari, atlaikyti aukštesnį slėgį ir temperatūrą. Išlakų valymo procesas gali vykti stacionarioje, slenkančioje ir „verdančioje“ įkrovoje.

Filtro su stacionaria įkrova pavyzdys pateiktas 1.2 pav. Dujos po pirminio valymo ortakiu (9) pro atidarytą sklendę (8) ir centrinį vamzdį (7) patenka į kamerą (4) ir toliau slenka iš viršaus į apačią pro įkrovos sluoksnį (6), kur smulkios dalelės nusėda ant grūdelių ar tarp jų.

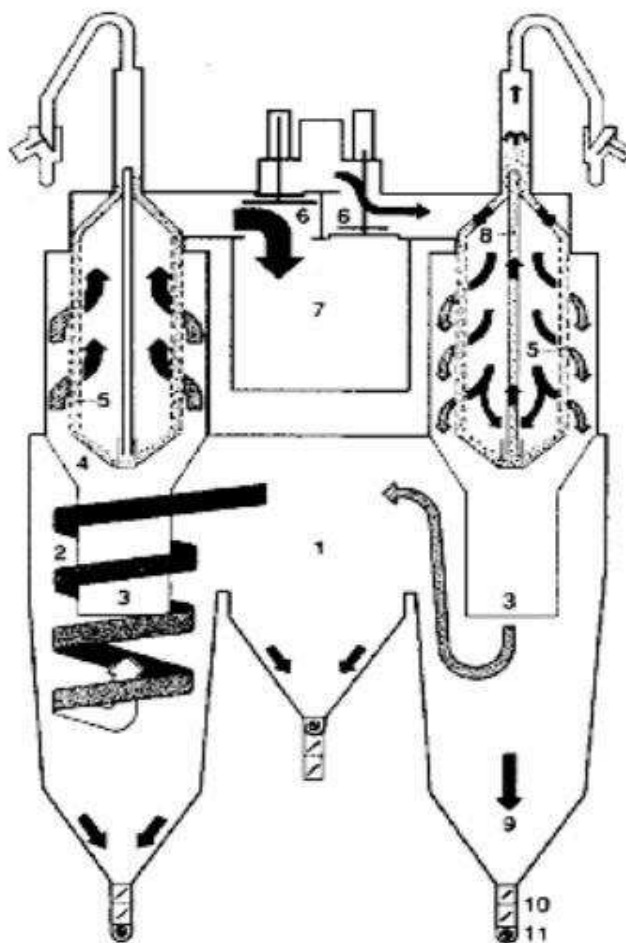


1.2 pav. Grūdėtasis oro filtras su stacionaria įkrova (Denafas 2000b)

Išvalytos dujos pasiekia kamerą (5) ir galiausiai išleidžiamos pro specialią angą. Filto įkrova regeneruojama taip: uždaroma sklendė (8), atidaromas kanalas (10). Jame esantis kompresorius regeneruojantį orą tiekia priešingai valomųjų dujų srauto kryptiai. Įkrova (6) tuo pat metu purenama maišykle (12). Nusiurbtos dalelės nusėda prieš kompresorių esančiame gaudytuve.

9 pav. matome filtro su judančia įkrova pavyzdį. Čia granulės slenka gyvatuko pavidalo vamzdeliuose. Tokia konstrukcija suderina įkrautinio filtro (atsparus trinčiai ir reikia nedaug priežiūros) ir rankovinio filtro (didelis sulaikymo laipsnis) privalumus:

- 1 – granulių įkrovos tankis prilįgsta rankovinio filtro audeklo tankiui;
- 2 – priešingai nei rankovinio filtro atveju, filtro medžiaga praktiškai nesunaikinama termiškai, chemiškai ir mechaniškai;
- 3 – plonas įkrovos sluoksnis sumažina slėgio kritimą ir įkrovai regeneruoti reikalingo oro kiekį.



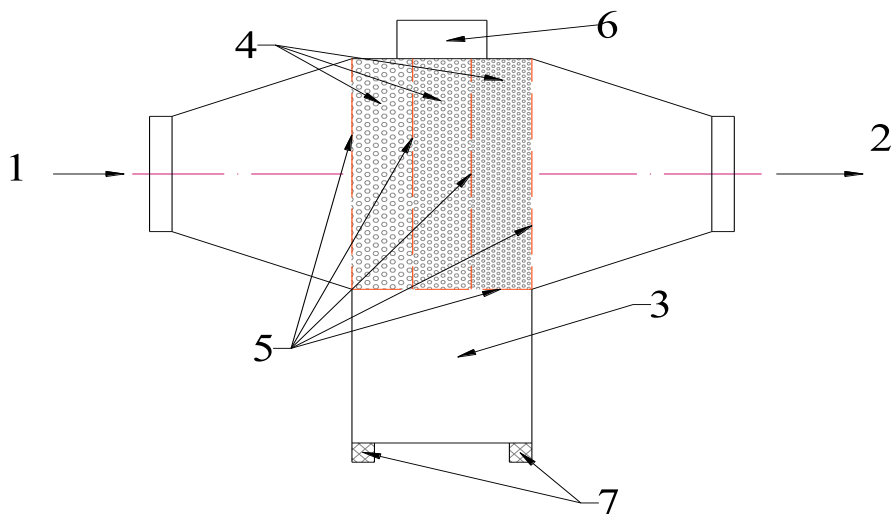
1.3 pav. Grūdėtasis oro filtras su judančia įkrova (Denafas 2000b)

Toks filtras naudojamas po pirminio dujų valymo. Kaip parodyta 1.3. pav., valomosios dujos pro kanalą (1) patenka į pirminio valymo cikloną (2) ir ten iš jų išvalomos dalelės, kurių skersmuo $>60 \mu\text{m}$. Po pirminio valymo dujos pro vidinį vamzdį (3) pakliūva į filtro kamerą (4) ir iš išorės į vidų skverbiasi pro skylėtą dvigubom sienom vamzdį su slenkančiomis granulėmis. Taip išvalytos dujos išleidžiamos pro filtro sklendę (6).

Grūdėtųjų filtrų privalumai – mažas hidraulinis pasipriešinimas, didelis veiksmingumas, nesudėtinga priežiūra. Statybinių medžiagų pramonėje tokiais filtrais dažnai iš oro valomas cementas, kalkių dulkės.

1.3. Alternatyvūs įkrovos regeneracijos būdai

Gera suprojektuotas ir pagamintas grūdėtasis oro valymo filtras savo savybėmis ir efektyvumu nenusileidžia kišeniniams ir pluoštiniais oro filtrams, tačiau kaip matome iš prieš tai aprašytų dažniausiai pramonėje naudojamų grūdėtųjų oro filtrų veikimo schemų (1.2.-1.3. pav.), šių filtrų konstrukcija yra gan sudėtinga – naudojamos sklendės, kitos judančios dalys, taip pat sunaudojama daug lakštinio plieno sudėtingos formoms įrenginiams pagaminti. Tokius konstrukcinius sprendimus primti tenka dėl įkrovos regeneracijos sprendimų naudojamų šiuose įrenginiuose. Jei įkrovos regeneracijai panaudotume mažiau judančių dalių reikalaujančius būdus, tokius kaip akustinė arba vibracinė regeneracija, galėtume maksimaliai supaprastinti grūdėtųjų oro filtrų konstrukciją.



1.4 pav. Grūdėtasis oro filtras su akustine įkrovos regeneracija

1.4 pav. pateikta supaprastinta grūdėtojo oro filtro su akustine regeneracija shema. Kietosiomis dalelėmis užterštas oro srautas (1) patenka į filtrą ir yra priverstas praeiti pro filtro įkrovą (4), kurią savo vietoje laiko grotelės (5), išvalytas oro srautas (2) tiekiamas tolesniam valymui arba naudojimui. Šio filtro įkrovos regeneracijai naudojamas prie filtro korpuso pritvirtintas garso šaltinis (6). Garso šaltinio sukuriama vibracija perduodama filtro įkrovai, taip nuo jos nupurtomos suspenduotos dalelės, o jos veikiamos sunkio jėgos subyra į uždarą bunkerį (3). Filtras pastatomas ant amortizatorių (7), kad korpuso vibracijos nepersiduotų į aplinką.

Garsas plačiai naudojamas pramonėje kaip vienas iš geriausių būdų įvairių pramoninių sistemų valymui (regeneracijai).

Akustiniai valytuvai montuojami į pramoninius katilus deginančius įvairų kurą, ten jie naudojami nuvalyti šilumą perduodančius paviršius. Palyginti su kitais būdais, katilų akustinis valymas yra pigus, mažai techninės priežiūros reikalaujantis valymo būdas, daug kur pašalinantis suslėgto garo naudojimo būtinybę.

Elektrostatiniuose nusodintuvuose akustinis valymas naudojamas bunkerių, elektrodų, laidų ir kitų sistemos elementų valymui nuo suspenduotų dalelių. Šis būdas naudojamas papildyti jau esamą mechaninį dalelių nupurtymo sprendimą arba jį pakeisti. Naudojant šį būdą netik greičiau regeneruojamas įrenginys, bet ir padidinamas jo efektyvumas.

Akustinės valymo sistemos buvo sėkmingai pradėtos naudoti pramoninių oro šildytuvų ir ortakijų valymui nuo susikaupusių kietųjų dalelių. Tokiu būdu pakeisti seniau naudoti mažiau našūs valymo būdai ir kiek įmanoma sumažinama rankinio valymo būtinybė.

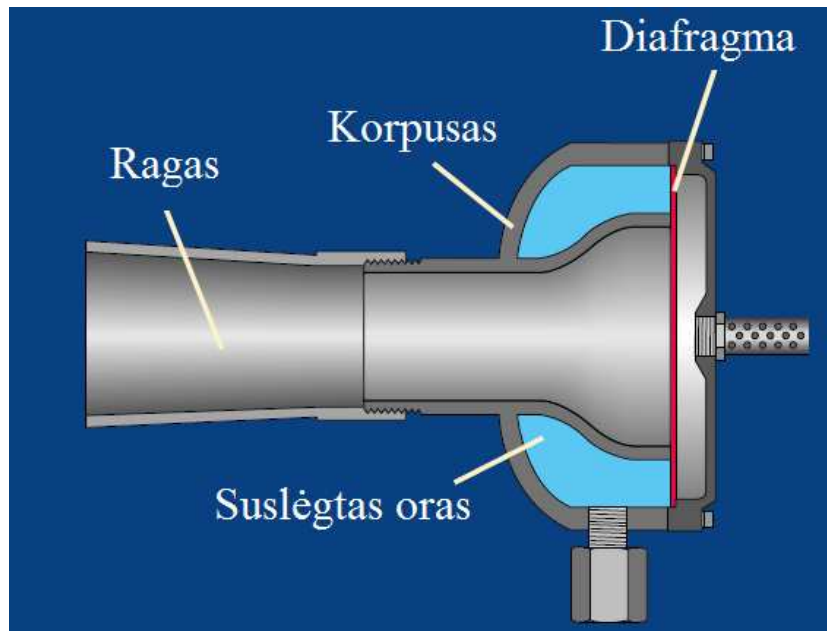
Kaip dar vieną potencialią akustinio valymo panaudojimo sritį galima paminėti įvairių ventiliatorių bei maišytuvų ir trintuvų valymą. Ventiliatoriai būna įvairių sudėtingų formų ir nevisada galima pritaikyti mechaninį ar rankinį jų valymo sprendimą, o akustiniu būdu sistemą galima valyti net neišjungus įrenginių, o tuo tarpu netgi padidinamas maišytuvų ir trintuvų efektyvumas.

Akustiniai valytuvai netik puikiai valo įvairius vamzdynus ir kitas pramonines sistemas, bet ir padidina tūrinio transporto naudingąją apkrovą pakrovimo metu, t.y. periodiškai paleidžiant akustinį valytuvą tūryje lygiau paskirstoma medžiaga todėl įmanoma pakrauti iki 10 % daugiau.

Kaip garso šaltinis, akustiniams įvairių įrenginių valymui dažniausiai naudojami suslėgtu oru varomi ragai (1.5 pav.). Suslėgtas oras tiekiamas į garso šaltinio korpusą kol pasiekiamas atitinkamas slėgis jo viduje, tada diafragma pradeda išsigaubti ir išleisti suspaustą orą kaip apsauginis vožtuvas, tačiau ji pagaminta iš kietos medžiagos (dažniausiai titano plokštelės), dėl to ji pradeda labai greitai vibruoti ir skleisti stiprų garsą, kuris vėliau papildomai sustiprinamas dėl rago formos.

Nepaisant visų akustinio valymo privalumų jo naudojimas filtro įkrovai valyti turi ir trūkumų:

- 1 – įrenginio veikimui būtinas papildomas suspausto oro šaltinis užtikrinantis stabilų ir kokybišką garso šaltinio darbą;
- 2 – Garso šaltinio sukuriama itin didelis triukšmas gali sukelti daug nemalonumų jei įrenginio darbo zona nėra gerai akustiškai izoliuota, ypač jei įrenginys sumontuotas netoli gyvenamos paskirties objektų.



1.5 pav. Suslėgtos oro garso šaltinis

Pakeitę 1.4 pav. pavaizduoto grūdėtojo oro valymo filtro regeneracijai naudojamą garso šaltinį pakeistę mechaniniu arba elektromagnetiniu vibratoriumi sumažintume įkrovos regeneracijos metu sklindantį garsą, pašalintume pneumatinės sistemos butinybę, taip pat dėl tirsiojinio vibratoriaus kontakto su filtro korpusu geriau perduotume mechaninę energiją filtro įkrovai.

Kaip ir anksčiau aprašytoje konstrukcijoje kietosiomis dalelėmis užteržtas oro srautas (1) patenka į filtrą ir yra priverstas praeiti pro filtro įkrovą (4), kurią savo vietoje laiko grotelės (5), išvalytas oro srautas (2) tiekiamas tolesniam valymui arba naudojimui. Šio filtro įkrovos regeneracijai naudojamas prie filtro korpuso pritvirtintas mechaninis arba elektromagnetinis vibratorius (6).

Vibratoriaus sukuriama vibracija perduodama filtro įkrovai, taip nuo jos nupurtomos suspenduotos dalelės, o veikiamos sunkio jėgos jos subyra į uždarytą bunkerį (3). Filtras pastatomas ant amortizatorių (7), kad korpuso vibracijos nepersiduotų į aplinką.

Vibracijoms sukelti galima naudoti įvairių konfigūracijų vibratorius, sukelenčius vibracijas vienoje arba keliuose plokštumose vienu metu.

2. ANALITINĖ DALIS

2.1. Monodispersinių dalelių elgsena veikiant vibracijai

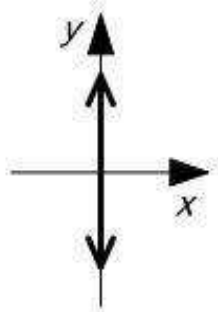
Masiniai detalių paviršiaus užbaigimo procesai žinomi kaip greitos, nuoseklios ir ekonomiškos pramoninės operacijos, kurių metu grūdinamas ir nuvalomas detalių paviršius. Perteklinės žaliavos pašalinimo nuo detalių paviršiaus susideda iš valymo, poliravimo, paviršiaus įtempių šalinimo ir net tam tikro dydžio detalės paviršiaus pažeidimo. Kai detalių paviršiaus tikslumas nėra labai svarbus, detalių paviršius dažniausiai valomas besikartojančio kontakto būdu, kurį sukelia laisvai aplink detales cirkuliuojanti biri terpė. Ši terpė susideda iš įvairios formos ir dydžio kietųjų dalelių.

Šiuo metu pramonėje yra naudojama daug skirtingų tipų masinio paviršiaus užbaigimo mašinų, tačiau vibracinės mašinos vartojamos dažniausiai, nes yra efektyvios, patikimos ir ekonomiškos.

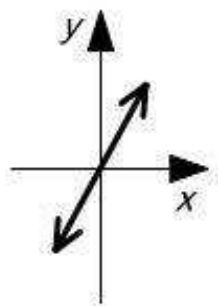
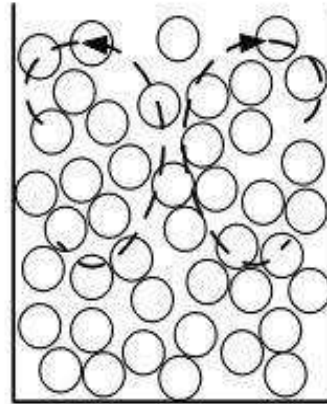
Žinias apie birios terpės elgseną veikiant vibracijoms šiuose įrenginiuose galima pritaikyti ir grūdėtųjų oro filtro užpildinės medžiagos regeneracijos veikiant vibracijai procesams nagrinėti.

Kai terpės judesys daugiausiai apsiriboja vienoje plokštumoje, vertikalios vibracijos veikiamos dalelės linkusios judėti dviguba trajektorija, kaip pavaizduota paveikslėlyje 2.1 (a) (Tai, Hsiau 2004; Hsiau 2000). Toks judėjimas yra simetriškas ir įtraukia mažiausią kiekį dalelių. Tai ir Hsiau (2004) nustatė stiprų ryšį tarp šio dalelių judėjimo užpildinėje terpėje ir talpos, kurioje terpė talpinama, vibracijų dažnio. Tai ir Hsiau išnagrinėjo šio dalelių srauto elgseną ir stiprumą naudodami panašias koncepcijas kaip ir skysčių mechanikoje, analizavo. dalelių temperatūrą, difuziją ir konvekciją. Srauto judėjimo modelis sudėtingesnis, kai padidinamas atstumas tarp priekinės ir galinės vibruojančio konteinerio sienelių (2.1 (a)) paveikslo z ašies kryptimi). Pakankamai padidinus šį atstumą, terpės dalelės pradeda laisvai judėti abiejose x–y ir y–z plokštumose (Tennakoon 1999).

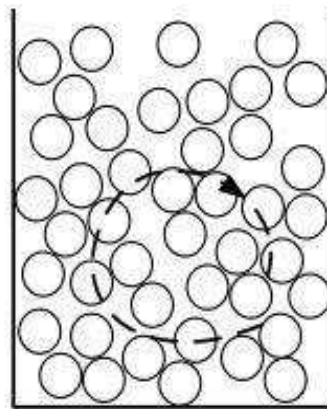
Grossmanas (1997) nustatė, kad vibracijos ciklo metu, kai konteinerio sienelės pakyla, užpildinė terpė susispaudžia prie konteinerio dugno, todėl terpės judėjimas sustabdomas. Kai konteineris pajuda žemyn, terpė tampa mažiau suspausta ir prie šoninių sienelių esančios dalelės, veikiamos sienelių trinties, truputį pajuda žemyn. Taip susidaro dvigubos simetriškos trajektorijos dalelių judėjimas (žr. 2.1 (a) pav.).



(a)



(b)



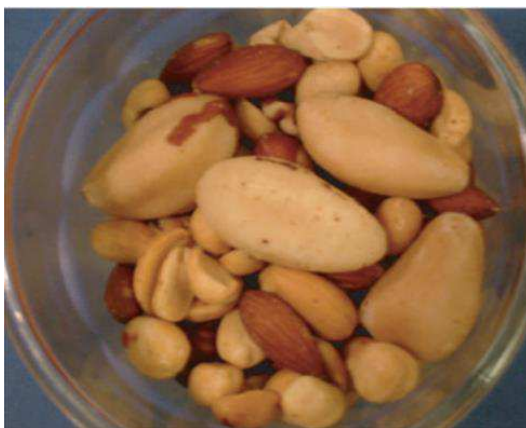
2.3 pav. Dalelių judėjimas užpildinėje terpėje veikiant vibracijai: a) vertikaliajai vibracijai; b) vibracijai su vertikaliąja dedamąja

Dalelių judėjimo trajektorija buvo ištirta ir veikiant vibracijai su vertikaliąja dedamąja. Šios vibracijos judesio kryptis pasvirusi pagal vertikale, horizontali vibracijos dedamoji palydi tos pačios fazės vertikaliąją dedamąją (2.1 (b) pav.) arba sukamojo judesio, kai konteineris juda uždara vibracijos trajektorija. Paveiksle (2.1 (b)) pavaizduotu atveju dešinė sienelė stumia užpildinę terpę žemyn, o kairė sienelė tuo pačiu metu stumia terpės daleles aukštyn. Taip gaunamas trajektorijos, pavaizduotos paveikslėlyje 2.1 (b), dalelių judėjimas.

2.2. Polidispersinių dalelių segregacija

Jeigu pakratytume dėžutę su avižomis, tai pamattume, kaip didžiausios avižos palyda į paviršių. Šis spontaniškas susigrupavimas iš pradžių atrodo nelogiškas, nes atrodo, kad objektai papurtyti skirtingomis kryptimis turi tiesiog susimaišyti. Dviejų skysčių mišiniuose (pvz., aliejus ir vanduo) lengvesnis skystis, veikiamas Archimedo dėsnio, būna susikaupęs viršuje. Priešingai nei skysčių mišiniuose didesnės avižos dėžutės viršuje turi daug didesnį tankį nei avižos apačioje. Avižos yra geras birios terpės pavyzdys. Jų susirikiavimas pagal dydį iš tikrųjų yra vienas įspūdingiausių sistemų, esančių ne pusiausvyroje savaiminio susirikiavimo pavyzdys (Rosato, Blackmore 2000).

Kaip ir skysčiai birios medžiagos yra sudarytos iš atskirų dalelių kurios gali judėti viena kitos atžvilgiu. Tačiau granulės juda lėtėjančiai ir greitai nustoja judėti, jei nesuteikiama pastovi mechaninė energija. Išsklaidyta energija pakelia dalelių atomų temperatūrą, tačiau nesukelia pastebimo pokyčio birių medžiagų sistemose. Taip yra dėl to, kad šiluminė energija tampa nereikšminga palyginti su potencine energija, reikalinga perkelti daleles vieną per kitą gravitaciniame lauke. Sustijusi sistema nebejuda kol jai nesuteikiama mechaninė energija. Todėl hidrodinaminės Stokso-Navje pusiausvyros lygtys, aprašančios skysčius, netinka birioms medžiagoms. Net ir ramybės būsenoje esanti birių dalelių sistema iš tikrųjų beveik niekada nebūna visiškos pusiausvyros, o greičiau „beveik pusiausvyros“ būsenos.



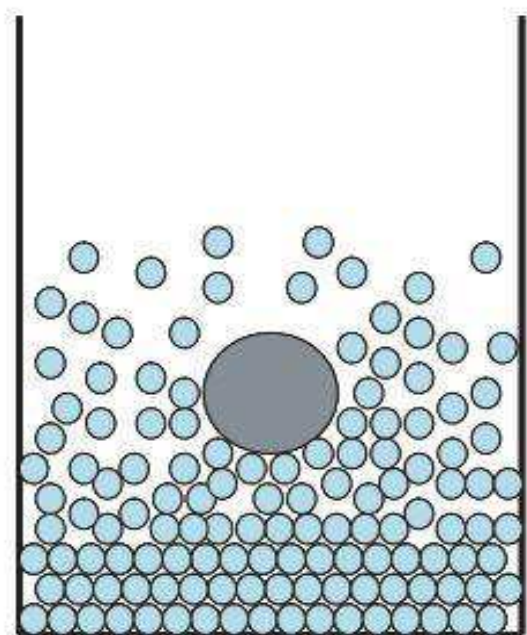
2.2 pav. Kai papurtome indelį su skirtingų dydžių riešutais, didžiausi riešutai iškyla į paviršių

Tipinėse biriose medžiagose jas sudarančios dalelės nebūna identiškos, skiriasi jų dydis, tankis, drėgmė arba kitos fizinės savybės. Biriose terpėse tokie skirtumai dažniausiai sukelia

dalelių pasiskirstymą sluoksnius (2.2 pav.), tačiau dydis dažniausiai laikomas pagrindiniu šio reiškinio veikdniu (Williams 1976; Bridgwater 1993). Tokios atskirties sunku išvengti, bet kai kuriose situacijose tai gali būti naudinga (Bates 1997). Dalelių atskyrimas pagal dydį yra nuolat nagrinėjamas dėl savo svarbos pramonėje

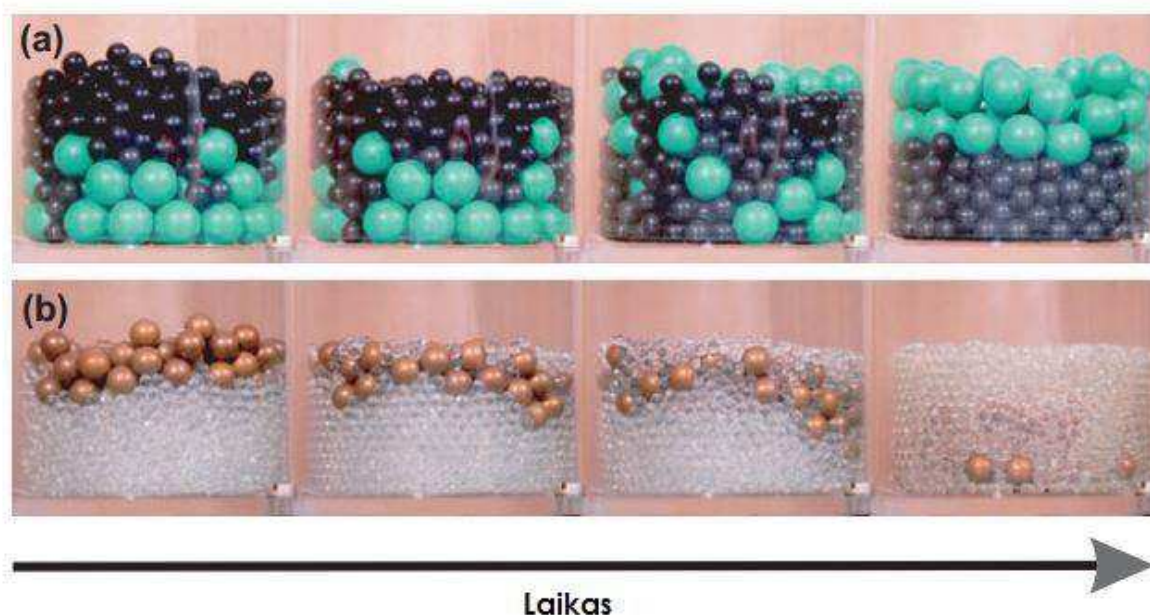
Vienas iš pirmųjų pranešimų apie vibracines dalelių sistemas, vibracijų poveikį transportuojant anglį (1939) buvo Brown. Brownas teigė, kad skirtumas tarp dalelių tankio šalia didesnio anglies gabalo suteikia daugiau laisvės laipsnių ir gali iškelti jį į paviršių net tada, kai jo tankis didesnis nei mažesnių anglies gabalėlių. Jis taip pat pastebėjo, kad jei kažkuriuo kasimo proceso metu kontaktinės jėgos tarp dalelių panaikinamos, tai didesnio tankio dalelės nusėda į dugną. Tokiu būdu atsirado poreikis eksperimentų, paaiškinančių ryšį tarp dydžio ir tankio.

Po kelių dešimtmečių Williamsas atliko sisteminius eksperimentus ir pasiūlė dalelių dydį laikyti pačia svarbiausia dalelių savybe, sukeliančia pasiskirtymą (1963). Tam, kad pademonstruotų, jog sijojimas nėra vienintelė priežastis, dėl kurios didesnės dalelės susikaupia viršuje, jis atliko eksperimentą, kurio metu į stačiakampį indą pripylė smulkių rutuliukų ir įmetė vieną didesnę rutulį (2.3 pav.). Kai indas su rutuliukais buvo atitinkamai vibruojamas, buvo galima matyti, kaip didesnis rutuliukas visada kyla į viršų. Williamsas teigė, kad didesnės dalelės kyla į viršų dėl to, kad mažesnės dalelės po juo nejudą ir neleidžia jam kristi žemyn, kol tuo tarpu dalelės aplinkui juda. Jeigu judančios dalelės verčia didesnę dalelę kilti į viršų, tada mažos dalelės suteka į apačią ir taip sukuria pagrindą didesnei dalelei (1963).



2.3 pav. Williamso bandymas su skirtingų dydžių rutuliukais

Kol pasirodė daugiau pranešimų apie atliktus bandymus šiuo klausimu (Olsen, Rippie 1964; Akmad, Smalley 1973; Ratkai 1976), Rosato teorinis tyrimas (1987) paaiškino ankstesnių dalelių atskyrimo pagal dydį geometrinį mechanizmą. Šie autoriai pritaikė Monte Carlo simuliacijos būdą, naudotą statinėje fizikoje, ir parodė, kad geometrinę tuštumą užpildantis mechanizmas gali nulemti dalelių susiskirstymą, kur didesnės dalelės būtų viršuje. Pagrindinės šių pranešimų išvados buvo pripažintos visuomenės ir bet koks pranešimas, teigiantis priešingai, buvo vertinamas skeptiškai.



2.4 pav. Dalelių segregacija pagal dydį, kai sistema vibruojama, sudėtingumas. Didelės dalelės gali leisti į dugną (a) arba kilti i paviršių (b), priklausomai nuo jų tankio ir kitų fizinių savybių

Knightas ir bendraminčiai (1993) ištyrė, kad paviršiai turi didelę įtaką segregacijai. Parodyta, kad dalelių trintis su indo sienelėmis gali sukelti konvekciją, dėl kurios, priklausomai nuo indo formos, didesnės dalelės gali nusėsti ant dugno. Pagal simuliacijas ir statistinius fizikos argumentus Hongas ir bendraminčiai (Hong, *et al* 2001) pasiūlė idėją, kad didesnės dalelės gali nusėsti į dugną, jei jos yra pakankamai sunkios. Jie suskirstė ryšį tarp dalelių dydžio ir tankio, kuris skirstomas fazių diagrama. Panašų kriterijų sudarė Jenkinsas ir Yoonas (2002), vienodai pakaitintų granulinų dujų tyrinėjimo gravitacijoje metu naudodami kinetinę teoriją. Šios teorijos priimė, kad susiduria tik dvi dalelės. Jos patvirtino Browno sudarytą tankių, prie kurių didesnės dalelės grimzdo, sistemą (Brown 1939). Paskutiniai eksperimentai patvirtina nustatytą

kriterijų pastovumą (2.4 pav.) (BreuAPJ 2003), tačiau pastebima, kad keletas prielaidų skaičiavimuose nėra tenkinama. Anksčiau Shinbrotas ir Muzzio (1998) parodė, kad lengva didesnė dalelė gali nusėsti į dugną veikiant vadinamajam atvirkštinio plūdrumo efektui. Paskutiniu metu buvo parodyta, kad intersticiniai skysčiai, taip pat ir oras, turi didelę įtaką dalelių segregacijai (Mobius, *et al* 2001; Yan *et al* 2003).

Taigi, akivaizdu, kad veiksniai, kurie iš pardžių atrodo nereikšmingi gali visiškai pakeisti stebimus reiškinius. Tai sukelia daug kėblumų, tiek teorinėms, tiek eksperimentinėms studijoms, kurios siekia palyginti rezultatus, tuo pačiu atrandant bendrus fizinius parametrus.

Taip pat svaru paminėti, kad dalelių susiskirstymo pagal dydį reiškinys nėra aunikalus nei granulinėms nei pusiausvyros neturinčioms sistemoms. Pavyzdžiui koloiduose, sudarytuose iš dviejų rūšių dalelių, kurių dydžiai skiriasi, pastebimas fazių susiskirstymas (Dijkstra, *et al* 1999). Tokiose sistemose, kurios yra natūraliai plūdrios, gravitacijos jėga nepanaikina vertikalios simetrijos, dėl to susiskirstymas fazėmis nėra taip aiškiai pastebimas kaip granulinėse sistemose. Tačiau teorijos paaiškinančios fazių atsiskyrimą dėl sistemos entropijos yra gerai išvystytos stabilioms koloidinėms sistemoms. Taigi iš šių idėjų apie dalelių sklaidą jų kontakto metu galima daug išmokti. Iš tiesų, mechanizmai, tokie kaip, dalelių tarpusavio traukos sukelta segregacija (pirmą kartą pastebėta bandant paaiškinti fazių susiskirstymą koloiduose) naudojami paaiškinti fenomenus pastebimus granulinėse sistemose (Kruelle, *et al* 2001).

Panagrinėkime dviejų rūšių, beveik sferines daleles, cilindro formos inde, kad vibruojančioje sistemoje suformuluotume dalelių segregaciją pagal dydį. Šios dalelės turi masės tankį ρ_i , diametrą d_i , ir skaitinį tankį n_i , kur i lygus L (larger) arba S (smaller), pagal dalelių dydį. Šis indeksas nenaudojamas, jei sistema sudaryta iš vienodo dydžio dalelių. Sąveika tarp dalelių, grūdelių lygmenyje, gali būti laikoma stipria stūmos reakcija. Dėl paviršių nelygumo, van der Wallso jėga nesukelia jokios traukos tarp dalelių. Taigi labai kietų dalelių sąveiką galima aprašyti tiesiog žingsnine funkcija su trimis parametrais: normaliniu ir tangencialiniu restitucijos koeficientais ϵ_{ij} ir trintimi tarp kontaktinių paviršių μ_{ij} (Foerster, *et al* 1994). Sąveika tarp dalelių ir jas talpinančio indo sienelių gali skirtis nuo sąveikos tarp diskrečių dalelių, taip atsiranda papildomi kintamieji.

Iš pradžių įdomu sužinoti ar sistemoje, kur dalelės pagamintos iš tos pačios medžiagos, įvyks dalelių segregacija pagal dydį, ir ar jai įvykus, didesnės dalelės iškils į viršų ar nusės indo dugne, kai dalelių dydžio santykis $r_d = d_L / d_S$. Taip pat įdomu, koks dalelių susiskirstymo fazėmis greitis ir kaip jis priklauso vibracijos parametrų ir kraštinių sąlygų. Įdomu ir kaip papildomi veiksniai, tokie kaip, dalelių tankio santykis $r_\rho = \rho_L / \rho_S$, paveiks sistemą. Galiausiai turi būti

įvertintas papildomų sąveikų, atsisrandančių dėl intersticinio skysčio, drėgmės ar dalelių įsimagnetinimo, buvimas.

Visų šių kintamųjų įtaka užpiltinei terpei nėra iki galo išnagrinėta ir procesai vykstantys grūdėtose medžiagose ir jų mišiniuose nėra visiškai aiškūs, tačiau vibracijos jau senai naudojamos įvairiose pramonės šakose, kur dirbama su kietosiomis dalelėmis ir stambesnėmis granulinėmis medžiagomis.

2.3. Dalelių judėjimas ribotoje erdvėje

Klasikinės mechanikos pagrindą sudaro trys Niutono dėsniai, o jos tyrimų objektą makroskopinių kūnų judėjimas, vykstantis greičiais mažais lyginant su Šviesos greičiu. Klasikinė mechanika yra skirstoma į statiką – mokslą apie kūnų pusiausvyrą veikiant jėgoms, kinematiką – mokslą apie geometrines kūnų judėjimo savybes ir dinamiką – mokslą apie kūnų judėjimą veikiant jėgoms.

Pagrindinių mechanikos dėsnių ir principų, o taip pat iš jų sekančių lygčių ir teoremų nagrinėjimas panaudojant matematinius metodus sudaro teorinės mechanikos pagrindą. Taigi, teorinė mechanika, pasinaudojus matematika, klasikinės mechanikos žinias perkelia į aukštesnį apibendrinimo arba teorijos lygmenį, tame tarpe nurodydama ir bendrus konkrečių uždavinių sprendimo būdus. Teorinės mechanikos rezultatai, sąvokos ir metodai yra taikomi kvantinėje mechanikoje, elektrodinamikoje, reliatyvumo teorijoje, optikoje ir kitur.

Dalelės judėjimas yra laikomas pilnai apibrėžtu. Jeigu galime nusakyti jos padėtis erdvėje bet kuriuo laiko momentu. Taigi, vien žinoti koordinates tam tikru laiko momentu maža, jeigu jos greitis nėra apibrėžtas, kadangi nuo jo priklausys dalelės koordinatės sekančiu laiko momentu. Taigi, kad dalelės judėjimas būtų pilnai apibrėžtas reikia žinoti jos greitį ir koordinates tuo pat metu. Šių dydžių pakanka, kad galėtume vienareikšmiai nustatyti pagreitį. Sąryšiai tarp pagreičio, dalelės koordinatės ir greičio yra vadinami judėjimo lygtimis.

Žemiau pateikiamos dalelių judėjimo plokštumoje kinematinės lygtys aprašančios dalelės padėtį (R), greitį (V) ir pagreitį (A), kur $\hat{e}_r$ ir $\hat{e}_\theta$ polinio kampo vektoriai (Szloga 2010).

$$R = r(r, \theta, t) = r\hat{e}_r, \quad (1)$$

$$V = \hat{e}_r \frac{dr}{dt} + r\omega\hat{e}_\theta, \quad (2)$$

$$A = \left(\frac{d^2 r}{dt^2} - r\omega^2 \right) \hat{e}_r + \left(r\alpha + 2\omega \frac{dr}{dt} \right) \hat{e}_\theta, \quad (3)$$

Taip pat galima užrašyti ir kinetines dalelės judėjimo erdvėje formules, kurios aprašo dalelės padėtį (R), greitį (V) ir pagreitį (A), kur $\hat{e}_r$, $\hat{e}_\theta$ ir $\hat{e}_\phi$ sferinio kampo vektoriai:

$$R = r(t) = r\hat{e}_r, \quad (4)$$

$$V = r\hat{e}_r + r \frac{d\theta}{dt} \hat{e}_\theta + r \frac{d\phi}{dt} \sin\theta \hat{e}_\phi, \quad (5)$$

$$A = \left(a - r \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \sin^2\theta \right) \hat{e}_r + \left(r \frac{d^2\theta}{dt^2} + 2v \frac{d\theta}{dt} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \sin\theta \cos\theta \right) \hat{e}_\theta + \left(r \frac{d^2\phi}{dt^2} \sin\theta + 2v \frac{d\phi}{dt} \sin\theta + 2r \frac{d\theta}{dt} \frac{d\phi}{dt} \cos\theta \right) \hat{e}_\phi, \quad (6)$$

Išilgai vienos linijos svyruojainčiai dalelei galima užrašyti paprastą harmoninio osciliatoriaus lygtį:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 x, \quad (7)$$

čia ω osciliacinio judesio kampinis dažnis (kintamojo x ženklas nurodo judesio kryptį), kuris yra susijęs su dažniu f ir laiko periodu T :

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T, \quad (8)$$

Harmoniniai svyravimai gali atsirasti bet kuria kryptimi:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\sum_n \omega_n^2 r_n, \quad (9)$$

Tam tikrose koordinatėse kiekvienas pozicijos elementas bus sinusoidinio harmoninio judesio superpozicija. Paprasto harmoninio judesio rotacinis analogas yra osciliacinis judesys aplink ašį arba tašką:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = -\omega^2 \theta, \quad (10)$$

čia ω vis dar osciliacinio judesio kampinis dažnis, o ne kampinis greitis.

Gali būti paprasta surašyti judesio lygtis vektorine Niutono judesio dėsnio forma, bet kintamieji gali kisti su koordinatėmis ir laiku ir juos surasti nėra paprasta. Dažniausiai turimas perdidelis kintamųjų skaičius, kad galėtume visiškai išspręsti lygtis. Bet yra keli skirtingi būdai kaip užrašyti ir naudoti antrąjį Niutono dėsnį:

$$F = \frac{dp}{dt}, \quad (11)$$

čia $p = p(t)$ pagreitis, o $F = F(t)$ yra išorinė jėga veikianti dalelę kiekvienu laiko momentu. Dėsnis dažniau užrašomas šia forma, nes niutoninėje mechanikoje masė yra konstanta:

$$F = ma, \quad (12)$$

čia m – masė; a – pagreitis.

Skaičiuojant kelių dalelių sąveiką, dinaminė judesio lygtis vienai dalelei i veikiamai kitų dalelių yra tokia:

$$\frac{dp_i}{dt} = F_E + \sum_{i \neq j} F_{ij}, \quad (13)$$

čia p_i dalelės i pagreitis, F_{ij} jėga dalelei i suteikta dalelės j , ir F_E atstatomoji išorinė jėga (Suteikiama bet kokio sukėlėjo, kuris nėra sistemos dalis), dalelė i nesuteikia sau sukimo momento.

Jei dalelė skaičiuojama ne kaip elementarus taškas, o kaip kietas kūnas, tada dalelių sąveikai užrašoma tokia lygtis:

$$\frac{dL_i}{dt} = \tau_E + \sum_{i \neq j} \tau_{ij}, \quad (14)$$

kur L_i dalelės i kampinis pagreitis, τ_{ij} dalelės j dalelei i suteiktas sukimo momentas ir τ_E yra atstatomoji jėga suteikta kito sukėlėjo, kuris nėra sistemos dalis. Dalelė i sukimo momento sau nesuteikia.

Dalelės judesiui aprašyti visos trys erdvės koordinatės nereikalingos jei sistemai suteikiami apribojimai. Apibendrintos koordinatės $q(t) = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]$, kur n yra visos sistemos laisvės laipsnių skaičius, šiomis koordinatėmis gali būti betkoks parametrų, aprašančių sistemą, rinkinys, pavyzdžiui, lanko ilgiai arba kampai. Sistemos apribojimų suteikimas smarkiai supaprastina dalelių judesio aprašymą, nes naudoja minimalų koordinatinių skaičių reikalingą aprašyti judesį, priešingai nei algebrinės lygtys, kur sistemos judesio suvaržymui reikalingos visos trys koordinatės.

Taigi apibendrintos lygtis dalelių judesiui:

- Apibendrinti greičiai:

$$\dot{q} = dq/dt; \quad (15)$$

- Lygtis dalelių pagreičiams

$$p = \partial L / \partial \dot{q} = \partial S / \partial q, \quad (16)$$

čia L yra q konfigūracijos funkcija bėgant laikui:

$$L = L[q(t), \dot{q}(t), t]; \quad (17)$$

- Apibendrinta greičio, pagreičio ir laiko funkcija:

$$H = H[q(t), p(t), t]; \quad (18)$$

- Hamiltono klasikinė funkcija:

$$S[q, t] = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt. \quad (19)$$

Tada sistemai parašoma Langranžo arba Hamiltono funkcija, kurios kintamieji q ir p , tada ši funkcija įrašoma į Eulerio–Langranžo arba Hamiltono lygtis. Taip gaunamos diferencialinės sistemos lygtis, kurias išsprendus gaunamos dalelių koordinatės ir pagreičiai.

Eulerio–Langranžo lygtis:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) = \frac{\partial L}{\partial q}; \quad (20)$$

Hamiltono lygtys:

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}; \quad (21)$$

$$\dot{q} = -\frac{\partial H}{\partial p}; \quad (22)$$

Hamiltono lygtis galima sujungti ir užrašyti vieną Hamiltono–Jacobi lygtį:

$$H = \frac{\partial S}{\partial t}; \quad (23)$$

Ši lygtis nesudėtingos formos, tačiau ji yra dalinai diferencialinė. Dėl veiksmo S ją galima naudoti surasti mechaninėje sistemoje sukauptus vienetus, net jei mechaninės sistemos uždavinys nėra pilnai išsprendžiamas, bet kokia diferencialinė fizinės sistemos judesio simetrija turi atitinkamą kaupimo dėsnį (Emmy Noether teorema).

Spartus kompiuterinių ir kitų technologijų vystymasis leido efektyviau tyrinėti dalelių sąveiką su vibracijomis ir kitomis dalelėmis, remiantis teorine dalelių mechanika sukurtos programos galinčios sumodeliuoti sudėtingas sistemas. Paskutiniu metu visame pasaulyje pradėti atlikinėti tyrimai, kuriuose skirtingų parametrų vibracijos sukeliamos keliose plokštumose vienu metu. Taip erdvėje sukuriama kryptingi dalelių srautai, o keičiant atitinkamus virpesių parametrus galima paveikti tam tikro dydžio ir kitų fizinių savybių daleles jas atskiriant nuo kitų terpėje esančių elementų. Dėl to galima daryti prielaidą, kad dviejų kryptingų vibratoriaus, naudojamas grūdėtojo oro filtro įkrovai regeneruoti, gali efektyviau išpurtyti suspenduotas kietasias daleles nei vienos krypties vibratorius.

3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

3.1. Tyrimų standas

Tyrimams naudojamas standas su keičiamu vibratoriumi (3.2 ir 3.4 pav.). Kaip matyti paveikslėliuose standą, sudaro elektromagnetinis vibratorius (2), grūdėtasis oro filtras (1), užpildytas įkrova (3), diferencialinis slėgio jutiklis (4) ir prie sistemos lanksčiais ortakiais prijungtas ventiliatorius (5).

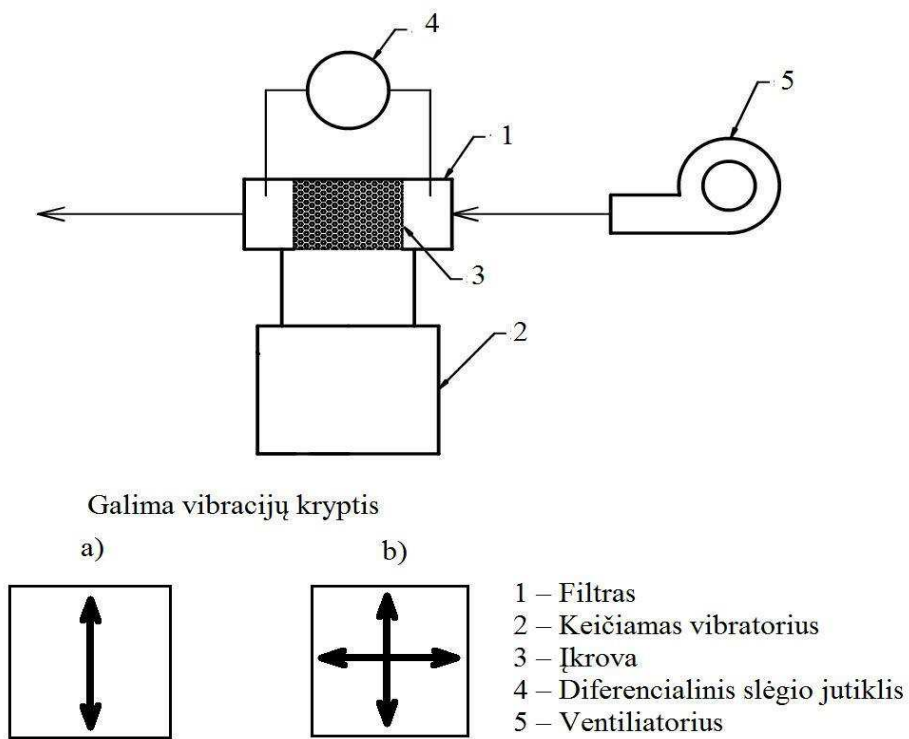
3.2. Tyrimo metodika

Tyrimo metu bandymai atliekami tokia tvarka:

- 1 – Vibracijų matavimo įrenginiu (3.9 pav.) išmatuojamos vibratorių amplitudės prie įvairių darbo režimų;
- 2 – Įjungiamas ventiliatorius ir diferencialinio slėgio jutiklis (3.8 pav.) išmatuojami slėgio nuostoliai esant neužterštai grūdėtojo filtro įkrovai;
- 3 – Per filtrą paleidžiamas kietosiomis dalelėmis užterštas oro srautas;
- 4 – Išmatuojamami slėgio nuostoliai esant užterštai grūdėtojo filtro įkrovai;
- 5 – Sustabdomas oro srautas;
- 6 – Nustatytą laiko tarpą įjungiamo filtro įkrovos regeneracija;
- 7 – Įjungiamas ventiliatorius;
- 8 – Išmatuojami filtro slėgio nuostoliai po įkrovos regeneracijos;
- 9 – Sustabdomas oro srautas, išvaloma filtro įkrova ir bandymas kartojamas esant kitiems kintamiesiems.

Bandymų kintamieji:

- 1 – Vibratoriai (viena vibracijų kryptis ir dvi kryptys);
- 2 – Vibratorių darbo režimai (vibracijų amplitudės);
- 3 – Filtro įkrova;
- 4 – Įkrovos regeneracijos trukmė;
- 5 – Oro srautą teršiančios dalelės.



3.1 pav. Tyrimų stendo schema: a) su vienos krypties vibratoriumi; b) su dviejų krypčių vibratoriumi



3.2 pav. Tyrimų stendas su vienos krypties vibratoriumi



3.3 pav. Tyrimų standas su dviejų krypčių vibratoriumi

Vietoje filtro grotelių, laikančių įkrovą, abiejuose stenduose panaudotas įtemptas akytas audinys. Audinį įtemptą laikė filtro atvamzdžiai. Atvamzdžiai buvo papildomai prisukami varžtais, kad nuo vibracijų audinys neatsipalaiduotų ir filtro viršuje neatsirastų erdvė neužpildyta įkrova.

3.3. Tyrime naudoti prietaisai ir medžiagos

Kaip jau minėjau anksčiau, tyrimuose naudoti du skirtingi elektromagnetiniai vibratoriai. Kaip vienos krypties vibracijų šaltinis naudotas elektromagnetinis vibratorius *PB-1601*. Šio vibratoriaus vibracijų dažnis nereguliuojamas ir yra lygus elektros tinklo dažniui (50 Hz). Vis dėlto yra galimybė keisti vibracijų amplitudę fiksuotais darbo režimais.

Galimi penki skirtingi amplitudžių dydžiai: 10, 11, 13, 14 ir 16 μm (amplitudės išmatuotos vibratoriumi dirbant su minimalia apkrova, t. y. vibruojant tik akselerometrą ir jo tvirtinimo elementus).

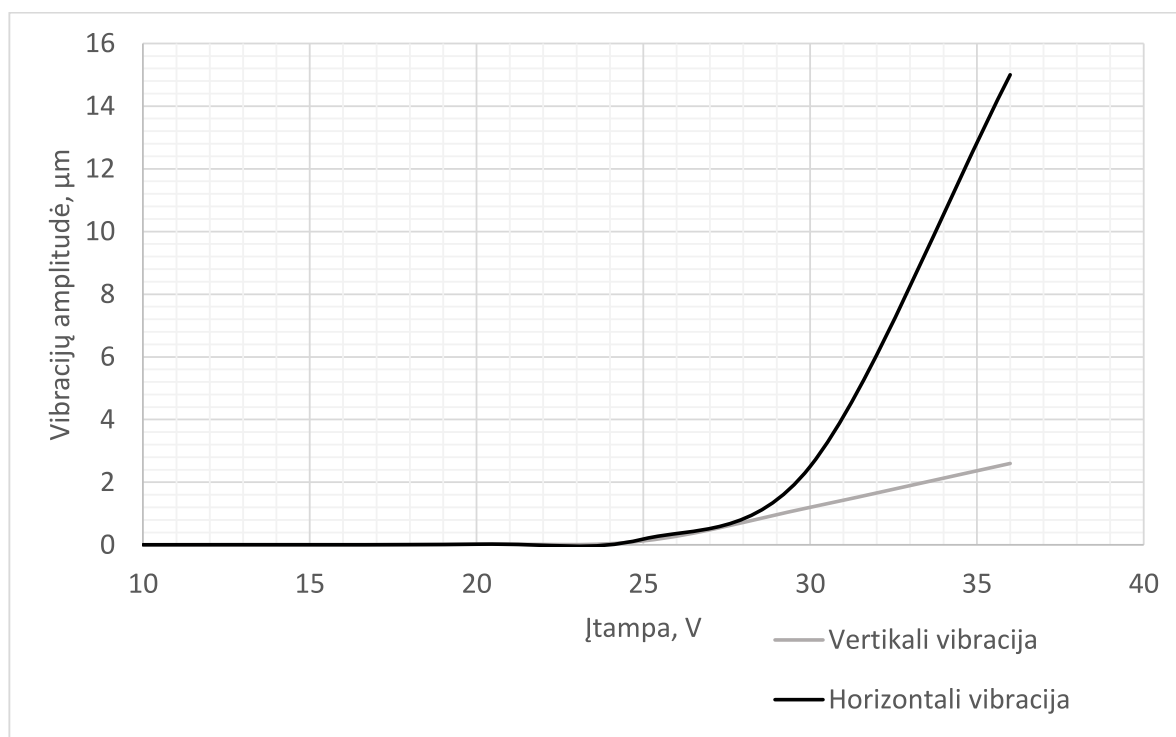
Kaip dviejų krypčių vibracijos šaltinis buvo panaudotas savadarbis 36V elektromagnetinis vibratorius. Šis vibratorius neturi galimybės pasirinkti amplitudės dydžio ir vibruoja fiksuotu dažniu (50 Hz), todėl prie jo papildomai buvo prijungtas reguliuojamas

reostatas ir voltmetras. Buvo išmatuotos vibracijų amplitudės, kai vibratorius dirba su 10, 20, 25, 30 ir 36V įtampa.

3.1 lentelė. Dvikrypčio elekteromagnetinio vibratoriaus vibracijų amplitudės esant nustatytai įtampai

Įtampa, V	10	20	25	30	36
Vertikali amplitudė, μm	0,006	0,023	0,130	1,200	2,600
Horizontali amplitudė, μm	0,006	0,024	0,188	2,500	15,000

Iš duomenų pateiktų 3.1 lentelėje matome, kad šio vibratoriaus vibracijų amplitudės priklausomybė nuo įtampos praktiškai tiesinė, kai pasiekama 30 V įtampa.



3.4 pav. Vibracijų amplitudės priklausomybė nuo įtampos.

Taip pat galime pastebėti, kad vibratoriumi tiekiant 10, 20 ir 25 voltų įtampą vibracijų amplitudės, esant 50 Hz darbiniam dažniui, nesiekia net vieno mikrometro, kai tuo tarpu vienos vibracijų krypties vibratorius, dirbdamas silpniausiu režimu, sukelia vibraciją, kurios amplitudė

10 μm . Tolesniuose bandymuose nenaudosime dvikrypčio vibratoriaus dirbančio su 10, 20 ir 25 voltų įtampa, nes nebus tikslinga lyginti tokius bandymu rezultatus.



3.5 pav. Tyrime naudotas elektromagnetinis vienkryptis vibratorius



3.6 pav. Tyrime naudotas elektromagnetinis dviejų krypčių vibratorius

Filtro įkrovos sukuriama pasipriešinimui matuoti naudojamas diferencialinis slėgio jutiklis *KIMO CP100* (3.7 pav.). Pagrindiniai šio matavimo prietaiso parametrai:

- Matavimo ribos nuo -500 iki +1000Pa;
- Galimos matavimų paklaidos iki 1,5%;
- Įrenginio reakcijos laikas 0,3s;
- Ekrane vaizduojami duomenys apvalinami iki sveikų skaičių.



3.7 pav. Diferencialinis slėgio jutiklis *KIMO CP100*

Vibratorių amplitudžių matavimams buvo naudojama *Bruel&Kjær* virpesių matavimo sistema „Type 9727“. Ji susideda iš mašinų diagnostikos įrankių dėžės, universalios programinės įrangos „Type 7910“, daugiakanalio duomenų bloko „Type PULSE 3560-B“, nešiojamojo „Dell“ asmeninio kompiuterio bei akselerometro (3.9. pav.).

Virpesių matavimo sistema matuoja ir fiksuoja virpesius. Juos fiksuoja akselerometras, įmontuotas ant elektromagnetinio vibratoriaus. Programine įranga analizuojami jutiklio užfiksuoti virpesių dažniai ir amplitudės laiko atžvilgiu.

Tyrimams buvo naudota dviejų tipų filtro įkrova (3.10, 3.11 pav.). Vienu atveju naudoti 6 mm skersmens keraminiai rutuliukai, kitu – įvairaus dyžio ir netaisyklingos formos stiklo granulės. Iš paveikslėlių akivaizdžiai matyti, kaip skiriasi įkrovų byrėjimo kampas. Keraminės įkrovos paviršius sąlyginai lygus, plika akimi matyti tik nedideli paviršiaus nelygumai. Stiklo granulių beveik plokšti, tačiau nusėti mažų duobučių.



3.9 pav. Virpesių matavimo sistema „Type 9727“ – mašinų diagnostikos įrankių dėžė

Akselerometras prie vibratorių pritvirtinamas magnetu, prie kurio kietais klijais tvirtai priklijuotas standus akselerometro laikiklis. Taip užtikrinamas pakankamas matavimo tikslumas ir patogus akselerometro tvirtinimas prie vibratorių. Jutiklis su mašinų diagnostikos dėže sujungiamas specialiu kabeliu.



3.9 pav. Virpesių matavimo sistema „Type 9727“ – akselerometras



3.10 pav. Filtro įkrova – keraminiai rutuliukai



3.11 pav. Filtro įkrova – granuliuotas stiklas

Filtro korpusas pagamintas iš 75 mm skersmens PVC vamzdžio movos, kurios vienoje vietoje suformuotas tinklelis filtro įkrovoje sulaikytoms kietosioms dalelėms išbūrėti. Kaip laikančioji konstrukcija, kuri atlieka ir bunkerio funkciją, iš organinio stiklo suformuota dėžutė.

Taip pat naudojant šią dėžutę sumažinamas virpesių slopinimas, kurį gali sukelti iš PVC pagamintas filtro korpusas.



3.12 pav. Filtro korpusas – bendras vaizdas



3.13 pav. Filtro korpusas – vidus

Filtro korpusas su atvamzdžiais jungiasi per guminę tarpinę, kuri užtikrina filtro sandarumą.

3.4. Tyrimo supaprastinimas ir atsitiktinių paklaidų panaikinimas

Beveik nėvienas eksperimentas neapsieina be matavimo. Bet kuris matavimas duoda ne tikslią matuojamo dydžio reikšmę, o tik apytikslę, t. y. daugiau ar mažiau artimą tiksliai. Tai yra dėl mūsų turimų įrankių ir prietaisų riboto tikslumo, be to, matavimo metu daromos įvairaus pobūdžio paklaidos.

Paklaidos būna sisteminės ir atsitiktinės.

Sisteminės paklaidos atsiranda netiksliai sudarius stebimą imtį, sugedus ar susidėvėjus tiriamą parametą matuojančiai aparatūrai, parametą matuojant nepakankamo tikslumo prietaisais, pagal klaidingą metodiką arba formulę kaičiuojant arba įvertinant kokį nors rezultatą.

Atsitiktinės paklaidos priklauso nuo daugelio priežasčių ir tos priežastys skirtinguose tyrimuose gali būti labai skirtingos. Sakykime, kad sveriamo detalę tiksliais svarstyklėmis. Bendra paklaida susidarys iš daug smulkių paklaidų, kurios priklauso nuo atmosferos sąlygų (oro drėgmės, temperatūros bei tankio svyravimo, įvairių oro srovių ir t. t.), nuo ant svarstyklių patenkančių dulkių, nuo svarstyklių pagrindo vibracijos. Taigi priežasčių, kurios sukelia nedideles paklaidas, yra gana daug, ir bendra paklaida yra daugelio atsitiktinių dydžių (nepriklausomų arba labai mažai priklausomų) suma. Vadinasi, ši suma (atsitiktinė paklaida) yra pasiskirsčiusi pagal normalųjį dėsnį. Eksperimentatorius turi labai gerai išanalizuoti tyrimams naudojamą metodiką ir ne tik numatyti atsitiktines paklaidas iššaukiančias priežastis, bet ir jas eliminuoti.

Paklaidos atsiranda, pavyzdžiui, nustatant medžiagos ištįsą paprasta tempimo mašina: rodyklė rodo, kad bandinys keliais milimetrais pailgėjo, o milimetro dalių nerodo, nes skalė milimetro dalimis nepadalinta. Mašinos skalės, rodančios jėgą, mažiausia padala yra, pavyzdžiui, 0,2 N. Todėl ir jėgos atskaita turi būti užrašoma realiu tikslumu, pvz., 10,2 N, 10,4 N, bet ne 10,3 arba 10,35 N, nes užrašytas per didelis nerealus tikslumas neduoda jokios naudos, tik apsunkina tolimesnius skaičiavimus ir kelia nepasitikėjimą gautais rezultatais.

Šiame tyrime naudojamas diferencialinis slėgio daviklis (3.7 pav.) nebuvo jungiamas, prie kompiuterio, o matavimo rezultatų stebėjimui buvo naudojamas prietaiso ekranas. Prietaiso ekrane matavimų rezultatai rodomi vieno paskalio tikslumu, dėl to tolesniuose skaičiavimuose oro srauto sukuriamas slėgis buvo apvalinamas iki sveikų skaičių.

Tam, kad išvengtume atsitiktinių matavimo paklaidų, pagal grūdėtosios medžiagos hidraulinių nuostolių skaičiavimo metodiką (Elinskij), buvo paskaičiuoti bandymams naudojamo

filtro teoriniai hidrauliniai nuostoliai su abiejomis įkrovomis, kai filtro įkrova švari. Eksperimento metu matavimo prietaisu fiksuojami duomenys buvo lyginami su anksčiau paskaičiuotais teoriniais hidrauliniiais nuostoliais. Stebint duomenų nuoseklumą buvo galima eliminuoti neįprastai didelius arba mažus prietaisų parodymus. Bandymai buvo kartojami panaikinus pastebėtus tyrimų stendo pakitimus. Taip buvo galima išvengti didelių atsitiktinių matavimo paklaidų.

Dėl nežymiai kintančių ventiliatoriaus apsisukimų matavimo duomenys prietaiso skydelyje visiškai nenusistovėdavo, tačiau užfiksuoti rezultatai buvo nuoseklūs. Atlikus kelis pakartotinius bandymus ir pastebėjus, kad tokiomis pačiomis sąlygomis atliekamų bandymų rezultatai kinta tik prietaiso paklaidos ribose, buvo nuspręsta sumažinti atliekamų matavimų skaičių.

3.5. Bandymų rezultatai

Tyrimo metu gauti filtro įkrovos hidrauliniai nuostoliai, matuojami paskaliais, kai įkrova yra švari, kai įkrova užteršta kietosiomis dalelėmis ir kai įkrovai atlikta regeneracija. Iš šių duomenų, pagal formules, išskaičiuojamas filtro regeneracijos naudingumo koeficientas, kuris pateikiamas procentais.

$$\Delta P_1 = P_{už} - P_{šv}, \quad (24)$$

čia $P_{už}$ – užkišto filtro hidrauliniai nuostoliai paskaliais; $P_{šv}$ – švarios filtro įkrovos hidrauliniai nuostoliai.

$$\Delta P_2 = P_{re} - P_{šv}, \quad (25)$$

čia P_{re} – filtro hidrauliniai nuostoliai po regeneracijos; $P_{šv}$ – švarios filtro įkrovos hidrauliniai nuostoliai.

$$\eta = \left| \frac{\Delta P_2 \cdot 100}{\Delta P_1} - 100 \right|, \quad (26)$$

čia η – įkrovos regeneravimo naudingumo koeficientas.

3.2 lentelė. Matavimų rezultatai prie didžiausių amplitudžių, kai įkrovai naudojamos stiklo granulės

Regeneracijos laikas, s	Filtro būklė	Hidrauliniai nuostoliai, Pa. Vienkryptė regeneracija	Hidrauliniai nuostoliai, Pa. Dvikryptė regeneracija
10	Švarus filtras	302	307
	Užterštas filtras	823	820
	Po regeneracijos	765	755
30	Švarus filtras	305	300
	Užterštas filtras	820	822
	Po regeneracijos	612	551
60	Švarus filtras	303	304
	Užterštas filtras	830	822
	Po regeneracijos	541	426

3.3 lentelė. Matavimų rezultatai prie didžiausių amplitudžių, kai įkrovai naudojami keraminiai rutuliukai

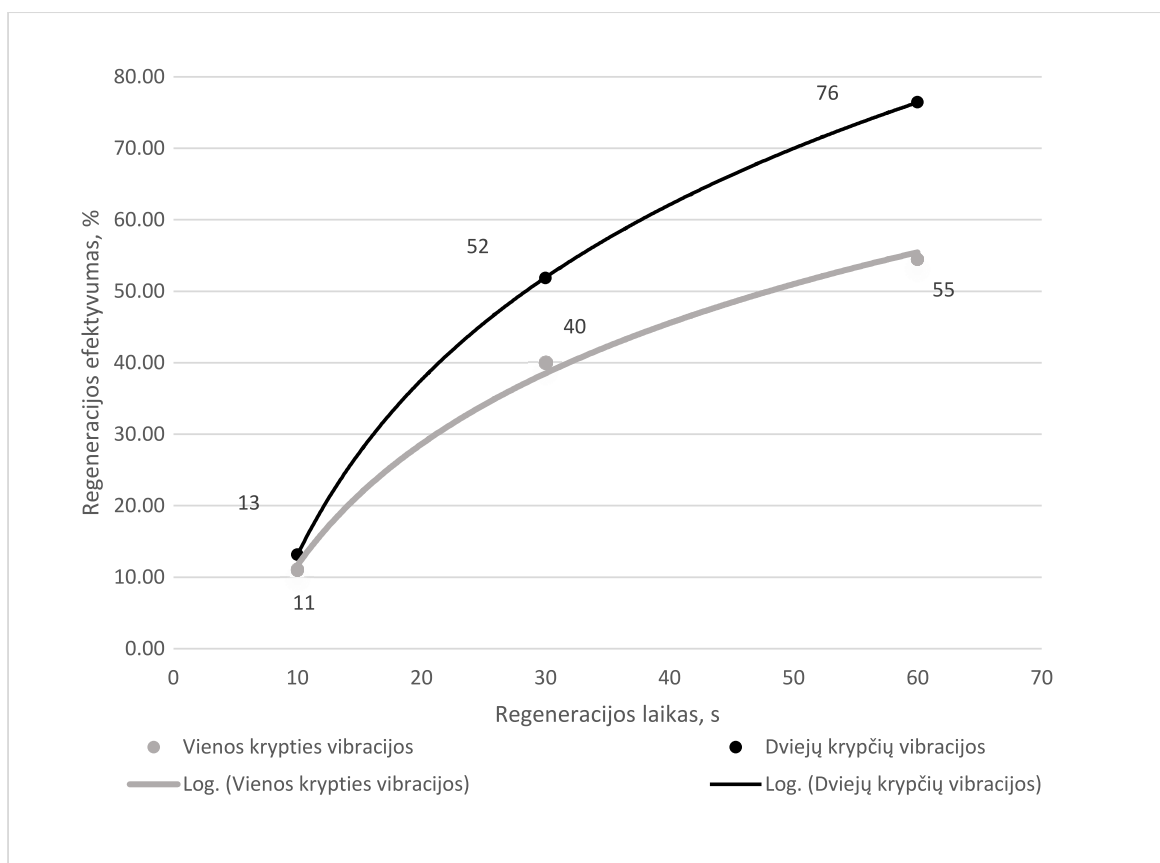
Regeneracijos laikas, s	Filtro būklė	Hidrauliniai nuostoliai, Pa. Vienkryptė regeneracija	Hidrauliniai nuostoliai, Pa. Dvikryptė regeneracija
10	Švarus filtras	305	304
	Užterštas filtras	819	820
	Po regeneracijos	792	777
30	Švarus filtras	299	303
	Užterštas filtras	821	824
	Po regeneracijos	559	561
60	Švarus filtras	300	300
	Užterštas filtras	821	822
	Po regeneracijos	430	420

3.4 lentelė. Matavimų rezultatai prie mažiausių amplitudžių, kai įkrovai naudojamos stiklo granulės

Regeneracijos laikas, s	Filtro būklė	Hidrauliniai nuostoliai, Pa. Vienkryptė regeneracija	Hidrauliniai nuostoliai, Pa. Dvikryptė regeneracija
10	Švarus filtras	300	303
	Užterštas filtras	821	823
	Po regeneracijos	780	767
30	Švarus filtras	301	303
	Užterštas filtras	820	820
	Po regeneracijos	625	560
60	Švarus filtras	301	301
	Užterštas filtras	822	823
	Po regeneracijos	545	447

3.5 lentelė. Matavimų rezultatai prie mažiausių amplitudžių, kai įkrovai naudojami keraminiai rutuliukai

Regeneracijos laikas, s	Filtro būklė	Hidrauliniai nuostoliai, Pa. Vienkryptė regeneracija	Hidrauliniai nuostoliai, Pa. Dvikryptė regeneracija
10	Švarus filtras	304	302
	Užterštas filtras	820	821
	Po regeneracijos	765	643
30	Švarus filtras	300	301
	Užterštas filtras	820	823
	Po regeneracijos	569	588
60	Švarus filtras	305	303
	Užterštas filtras	823	821
	Po regeneracijos	441	455

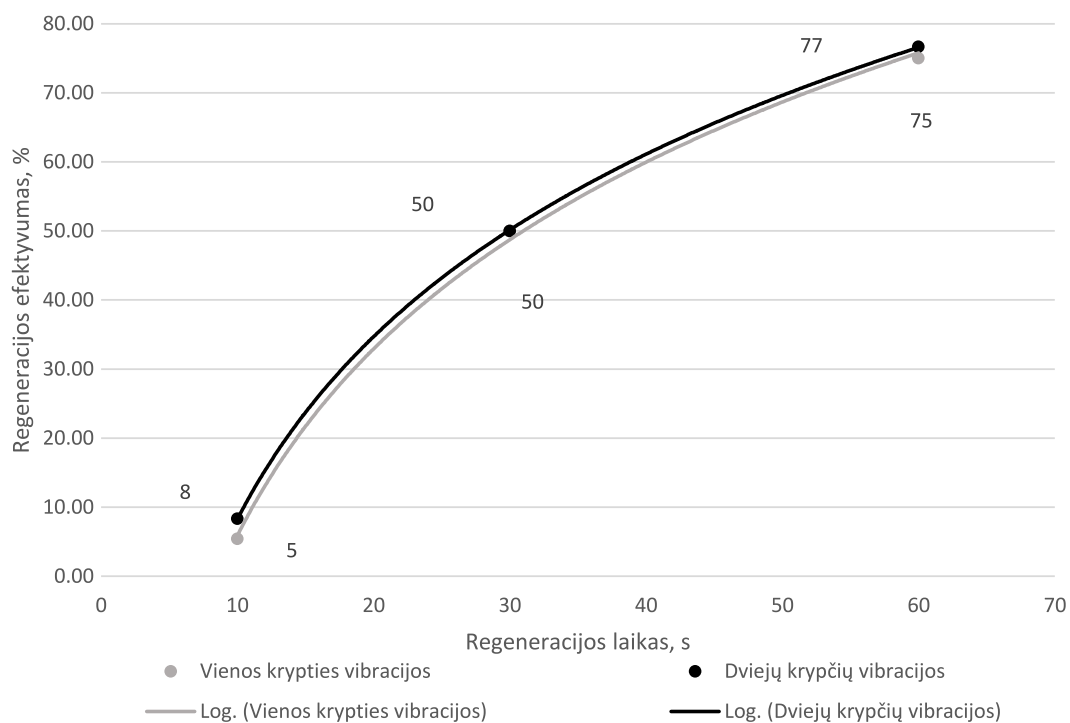


3.14 pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, prie didžiausių amplitudžių, naudojant stiklo granules

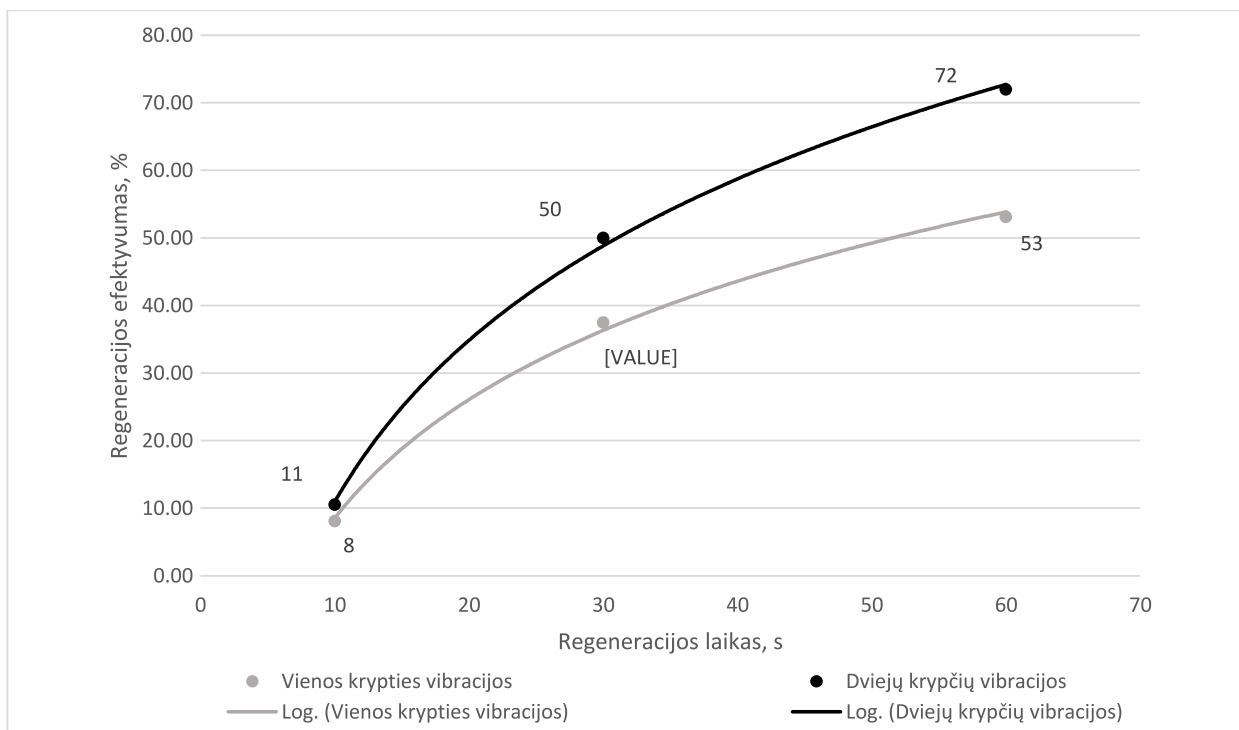
Vėliau iš gautų naudingumo koeficientų ir vykdytų bandymų salygų sudarytos kreivės atspindinčios tyrimo rezultatus. Iš 3.14 paveikslo matyti, kad filtro įkrovai naudojant netaisyklingos formos stiklo granules, įkrova geriau regeneruojama pritaikius dvikryptį elektromagnetinį vibratorių. Regeneruojant įkrovą trumpą laiką (10 s) dvikryptės regeneracijos privalumai sunkiai pastebimi, tačiau regeneraciją tęsiant ilgesnį laiką išryškėja dvikryptės įkrovos regeneracijos pranašumas, t.y. po 30 sekundžių įkrova regeneruojama 12% geriau, o po minutės net 21%.

Tačiau filtro įkrovai naudojant taisyklingos formos ir lygaus paviršiaus keraminius rutuliukus, ryškus dvikrypčio regeneracijos metodo pranašumas nepastebimas (3.15 pav.).

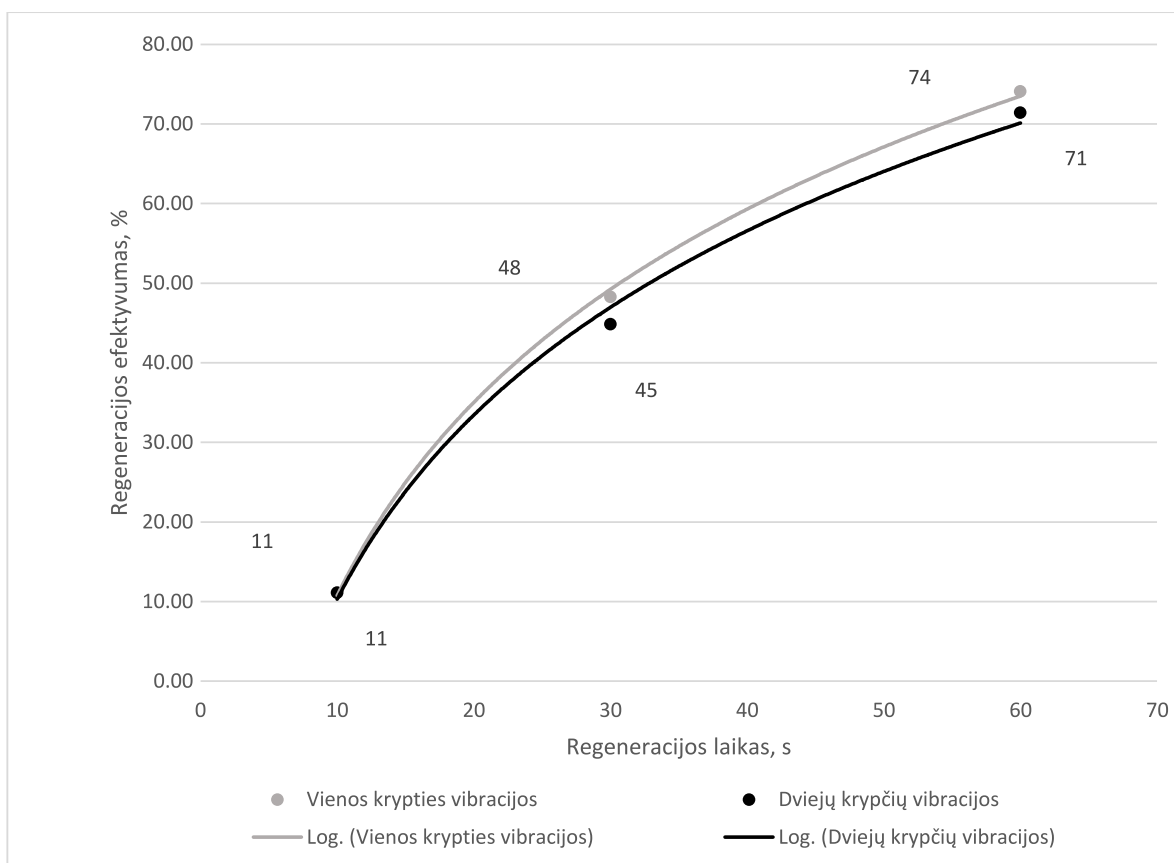
Kartojant bandymus su mažesnėmis vibracijų amplitudėmis (dvikryptis vibratorius dirba esant 30 V įtampai, o vienakryptis vibratorius naudojamas silpniausiu režimu, sumažinus dvikrypčio vibratoriaus įtampą iki 25 V, vibracijų amplitudė tesiekia 188 nanometrus, todėl šiuos vibratorius lyginti nebetikslinga) gaunami panašūs rezultatai, tačiau pastebimas nežymus naudingumo koeficiento mažėjimas ir stiklo granulių, ir keraminių rutuliukų regeneracijos proceso metu (3.16 ir 3.17 pav).



3.15 pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, esant didžiausioms amplitudėms, naudojant keraminius rutuliukus



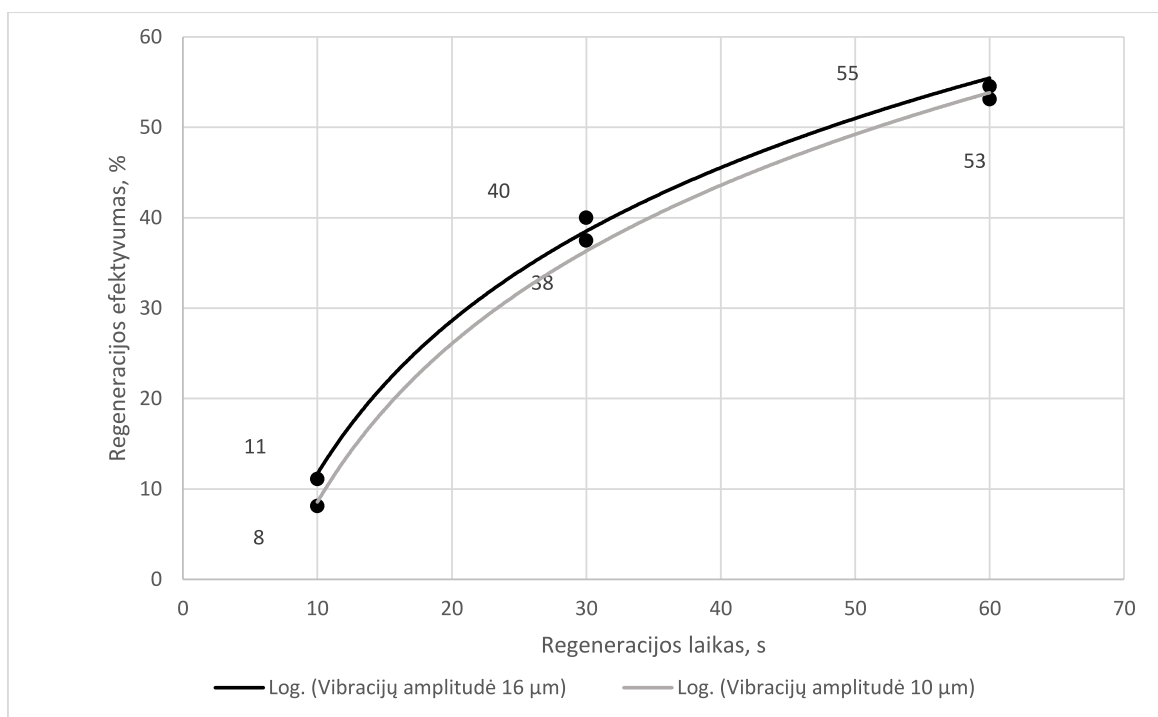
3.16 pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, esant mažiausioms panašioms amplitudėms, naudojant stiklo granules



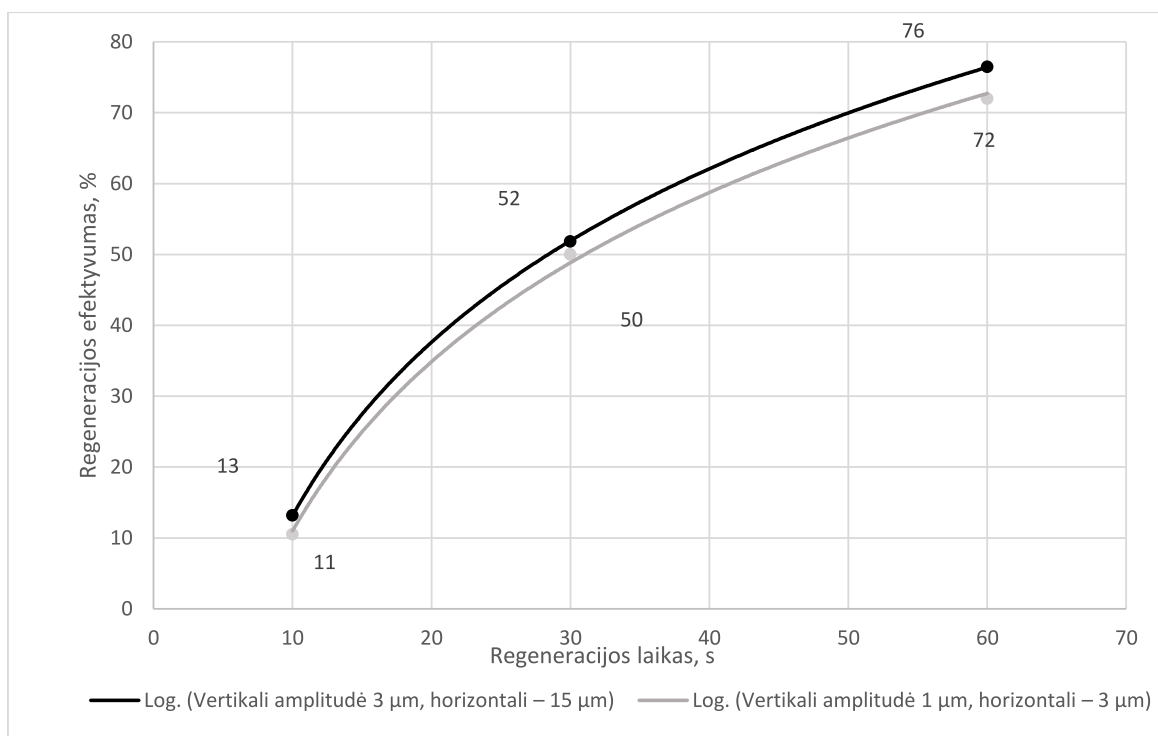
3.17 pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, esant mažiausioms panašioms amplitudėms, naudojant keraminius rutuliukus

Kelių procentų įkrovos regeneracijos naudingumo koeficiento sumažėjimą, bandymams naudojant mažesnę vibracijų amplitudę, galima paaikškinti ankstesniuose skyriuose aprašytais granulinių medžiagų ir vibracijos sąveikos savybėmis. Veikiamos vibracijos įkrovos dalelės juda tam tikra trajektorija. Sumažinus vibracijų amplitudę sumažėja per tą patį laiko tarpą ir dalelės nukeliamas atstumas erdvėje. Esant mažesniai dalelių judėjimo greičiui per tą patį nustatytą laiką iš įkrovos išbysa mažiau kietųjų dalelių.

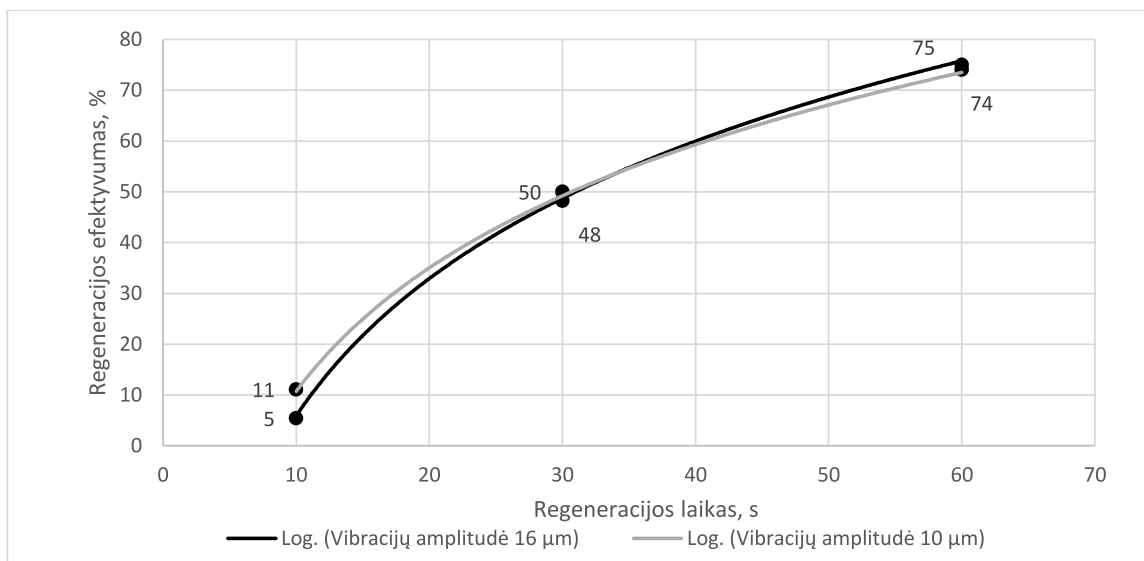
Iš žemiau pateiktų grafikų (3.18, 3.19, 3.20, 3.21 pav.) matyti, kad įkrovai naudojant keraminius rutuliukus, amplitudės sumažinimas regeneracijos efektyvumą sumažina beveik tolygiai, per visą regeneracijos laiką. Įkrovai naudojant stiklo graniules, amplitudės sumažinimas regeneracijos efektyvumą padidina, jei regeneruojama labai trumpą laiką, bet efektyvumas sumažėja regeneraciją atliekant ilgiau.



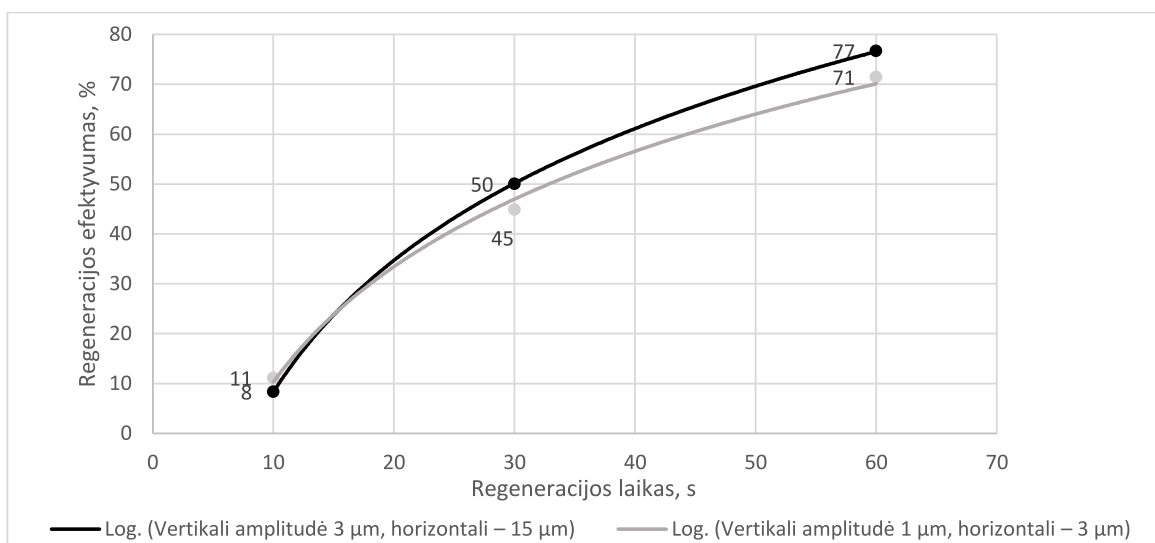
3.18 pav. Vienkrypčio vibratoriaus regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo amplitudės dydžio, kai įkrovai naudojami keraminiai rutuliukai



3.19 pav. Dvikrypčio vibratoriaus regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo amplitudės dydžio, kai įkrovai naudojami keraminiai rutuliukai



3.20 pav. Vienkrypčio vibratoriaus regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo amplitudės dydžio, kai įkrovai naudojamos stiklo granulės



3.21 pav. Dvikrypčio vibratoriaus regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo amplitudės dydžio, kai įkrovai naudojamos stiklo granulės

Tokie grafikų pokyčiai parodo, kad regeneracijos efektyvumui svarbūs ne tik vibracijos parametrai, bet reikia įvertinti ir įkrovos formą ir kitas fizines savybes.

IŠVADOS

1. Išnagrinėjus dalelių sąveikos teorijas galima daryti prielaidą, kad dviejų krypčių vibratoriaus, naudojamas grūdėtojo oro filtro įkrovai regeneruoti, gali efektyviau regeneruoti suspenduotas kietąsias daleles nei vienos krypties vibratorius.
2. Eksperimento rezultatai rodo, kad polidispersines granules, dvikryptė vibracinė regeneracija naudingesnė už vienakryptę. Įkrovą regeneruojant 30 s – 12 %, 60 s – 21 %.
3. Aiški dvikryptės vibracijos pranašumo priklausomybė nuo laiko, įkrovai naudojant polidispersines daleles, nenustatyta, nes per didelis tyrime naudojamų vibratorių amplitudžių nesutapimas, tačiau nustatyta, kad įkrovai naudojant taisyklingos formos monidispersines daleles, regeneracijos priklausomybės nuo vibracijų kryptingumo yra maža.
4. Nustatyta, kad esant didesnei vibracijų amplitudei regeneracijos efektyvumas yra didesnis, nepriklausomai nuo įkrovai naudojamos medžiagos.
5. Tyrimas parodė, kad filtro įkrovai naudojant netaisyklingos formos granules yra tikslinga naudoti dvikryptę vibracinę regeneraciją, nes ji yra iki 21 % efektyvesnė.

LITERATŪRA

- Ahmad K and Smalley I J 1973 Observation of particle segregation in vibrated granular systems *Powder Technol.* 869–75
- Aumaitre S, Kruehle C A and Rehberg I 2001 Segregation in granular matter under horizontal swirling excitation *Phys. Rev. E* 64 041305 (p 4)
- Bates L 1997 *User Guide to Segregation* (Bucks: British Materials Handling Board)
- Breu A P J, Ensner H-M, Kruehle C A and Rehberg I 2003 Reversing the Brazil-nut effect: competition between percolation and condensation *Phys. Rev. Lett.* 90 014302 (p 4)
- Bridgwater J 1993 Mixing and segregation mechanisms in particle flow *Granular Matter* ed A Metha (New York: Springer) pp 161–95
- Brown R L 1939 The fundamental principles of segregation *J. Inst. Fuel* 1315–19
- Brown R L and Richards J C 1970 *Principles of Powder Mechanics* (Oxford: Pergamon)
- Cizeau P, Makse H A and Stanley H E 1999 Mechanisms of granular spontaneous stratification and segregation in two-dimensional silos *Phys. Rev. E* 59 04408–21
- Daunoravičienė, A. 2010. *Technogeninių atliekų susidarymas, valymas ir utilizavimas*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 14-16 p.
- Denafas, G. 2000b. *Atmosferos apsauga. II dalis. Atmosferos taršos mažinimas*. Kaunas: Technologija. 90 p.
- Dijkstra M, van Roij R and Evans R 1999 Phase diagram of highly asymmetric binary hard-sphere mixtures *Phys. Rev. E* 59 05744–71
- Foerster S F, Louge M Y, Chang H and Allia K 1994 Measurements of collision properties of small spheres *Phys. Fluids* 6 1103–15
- Grossman, E.L. Effects of container geometry on granular convection. *Phys. Rev. E*, 56 (1997), 3290-3300.
- Harwood C F 1977 Powder segregation due to vibration *Powder Technol.* 1651–7
- Hong D C, Quinn P V and Luding S 2001 Reverse Brazil nut problem: competition between percolation and condensation *Phys. Rev. Lett.* 86 3423–6
- Hsiau S. S., Chen C. H. Granular convection cells in a vertical shaker. *Powder Technology*, 111 (2000), 210-217
- Yan X, Shi Q, Hou M and Lu K 2003 Effects of air on the segregation of particles in a shaken granular bed *Phys. Rev. Lett.* 91 014302 (p 4)
- Jenkins J T and Yoon D K 2002 Segregation in binary mixtures under gravity *Phys. Rev. Lett.* 88 194301 (p 4)

- Knight J B, Jaeger H M and Nagel S R 1993 Vibration-induced size separation in granular media: the convection connection *Phys. Rev. Lett.* 70 37 28–31
- Mobius M E, Lauderdale B E, Nagel S R and Jaeger H M 2001 Size separation of granular particles *Nature* 414 270
- Olsen J L and Rippie E G 1964 Segregation kinetics of particulate solids systems I, influence of particle size and particle size distribution *J. Pharmaceut. Sci.* 53 147–50
- Ottino J M and Khakhar D V 2000 Mixing and segregation of granular materials *Annu. Rev. Fluid Mech.* 32 55–91
- Parsons D S 1976 Particle segregation in fine powders by tapping as simulations of jostling during transportation *Powder Technol.* 13 269–77
- Ratkai G 1976 Particle flow and mixing in vertically vibrated beds *Powder Technol.* 15 187–92
- Rippie E G, Olsen J L and Faiman M D 1964 Segregation kinetics of particulate solids system II, particle density-size interactions and wall effects *J. Pharmaceut. Sci.* 53 1360–3
- Rosato A D and Blackmore D L (ed) 2000 *Segregation in Granular Flows* (Dordrecht: Kluwer)
- Rosato A, Stranburg K J, Prinz F and Swendsen R H 1987 Why the Brazil nuts are on top: size segregation of particulate matter by shaking *Phys. Rev. Lett.* 58 10 38–41
- S.G.K. Tennakoon, L. Kondic, R.P. Behringer. Onset of flow in a horizontally vibrated granular bed: Convection by horizontal shearing. *Europhysics Letters*, 45 (1999), 470-475
- Samadani A, Pradhan A and Kudrolli A 1999 Size segregation of granular matter in silo discharges *Phys. Rev. E* 60 7203–10
- Szloga V., 2010. Lecture notes and sample problems. *Theoretical mechanics*. 35- 42
- Shinbrot T and Muzzio F J 1998 Reverse buoyancy in shaken granular beds *Phys. Rev. Lett.* 81 4365–9
- Stephens D J and Bridgwater J 1978 The mixing and segregation of cohesionless particulate materials: Part II. Microscopic mechanisms for particles differing in size *Powder Technol.* 21 29–44
- Tai C.H., Hsiao S. S. Dynamic behaviors of powders in a vibrating bed. *Powder Technology*, 139 (2004), 221-232
- Williams J C 1963 The segregation of powders and granular materials *Fuel Soc. J.* 1429–34
- Williams J C 1976 The segregation of particulate materials: a review *Powder Technol.* 15 245–51

PRIEDAI

GRŪDĖTOJO ORO FILTRO REGENERACIJOS TYRIMAS

Justinas Rimkus

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas,
El. paštas: justinasrimkus@st.vgtu.lt;*

Anotacija. Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos pagrindinės grūdėtųjų oro filtrų konstrukcijos ir įkrovos regeneracijos būdai.

Darbo tikslas – ištirti vibracijų įtaką grūdėtojo oro filtro įkrovos regeneracijai esant skirtingiems vibracijų režimams.

Darbą sudaro trys pagrindinės dalys.

Pirmoje dalyje pateikiamos pagrindinės populiariausių oro filtrų konstrukcijos ir regeneracijos būdai. Taip pat pateikiamos alternatyvios grūdėtųjų oro filtrų konstrukcijos ir įkrovos regeneracijos būdai.

Antroje dalyje išnagrinėta birios terpės, sudarytos iš vienodo dydžio ir medžiagos, dalelių elgsena veikiant vibracijai ir vibruojančios birios terpės segregacija.

Trečioje dalyje aprašomas tyrimo standas ir metodika, taip pat pateikiami ir apibendrinami tyrimo rezultatai.

Veliau pateikiamos bendros išvados ir literatūros sąrašas.

Reikšminiai žodžiai: kietosios dalelės, grūdėtasis oro filtras, filtro įkrova, vibracija, regeneracija.

Įvadas

Atmosferos tarša tapo viena iš aktualiausių šiuolaikinių problemų. Labiausiai teršiančios medžiagos yra dujinės prigimtios ir kietosios dalelės, kurios gali būti perneštos dideliais atstumais ir lokalizuotis. Vilniuje 2013 m. KD10 dalelių ribinė paros koncentracija ore ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) buvo viršyta daugiau nei 35 kartus.

Didelės kietųjų dalelių koncentracijos ant žemės paviršiaus turi įtakos augalų ir gyvūnų gyvenimui vietiniu ir pasauliniu mastu. Daugelio gamybos šakų plėtra veikia gyvūniją ir augaliją, turi įtakos jos išteklių panaudojimui ir yra tiesiogiai susijusi su dulkėto oro srautų atskyrimo problemomis. Šios problemos sprendimas kasdien tampa aktualesnis, nes vis didėja pramoninių įmonių gamybinės teritorijos ir pajėgumai.

Dulkių mažinimo problema, atitiktis leistinoms dulkių koncentracijoms atmosferoje gali būti išspręsta, jeigu yra teisingai suprojektuotas ekonomišką ir efektyvų dulkių gaudytuvą konkrečiam atvejui.

Yra naudojamos kelios dulkių valymo technologijos:

- mechaninis valymas vyksta dėl išorinių jėgų, valymas ciklonuose – išcentrinėmis jėgomis;

- šlapiasis valymas – dalelių savybė reaguoti su vandeniu ar emulsija;
- valymas filtrais – dalelių nusodinimas ant porėtosios medžiagos;
- valymas panaudojant elektrą.

Orui valyti dažniausiai naudojami filtrai, pagaminti iš audinio, porėtosios sintetinės medžiagos arba filtravimo popieriaus. Iš pradžių tokie filtrai veikia gana efektyviai, tačiau laikui bėgant filtruojančios medžiagos poros yra užkemšamos kietųjų dalelių, filtras sukuria didesnę nei įprastai pasipriešinimą oro srautui. Sumažėjus filtro praeinamumui reikia sunaudoti gerokai daugiau energijos tam pačiam oro kiekiui išpūsti, o galiausiai filtras visiškai užsikemša. Todėl filtrai yra periodiškai keičiami, o panaudoti filtrai turi būti utilizuojami.

Jei vietoje įprastų filtrų naudotume grūdėtuosius filtrus su nenutrūkstancia regeneracija, išvengtume dažno filtrų keitimo ir turėtume galimybę kaupti kietąsias daleles ir utilizuoti jas kaip antrinę žaliavą, pavyzdžiui, gamindami cementą ar kitas statybines medžiagas.

Grūdėtųjų oro valymo filtrų regeneracijai dažniausiai naudojamas atbulinis švaraus oro srautas, mechaninės maišyklės arba vibratoriai, kurie priverčia filtro įkrovą chaotiškai judėti ir taip nupurtyti nuo savęs

suspenduotas kiektąsias daleles. Vis dėlto pritaikius pažangesnes įkrovos regeneracijos sistemas galima pagerinti filtro regeneraciją, sumažinti regeneracijai sunaudojamos energijos kiekį ir padidinti įrenginio patvarumą.

Šiame darbe įkrovos regeneracijai naudojami vienkryptis ir dviejų kryptių elektromagnetiniai vibratoriai.

Darbo tikslas – ištirti vibracijų įtaką grūdetojo oro filtro įkrovos regeneracijai esant skirtingiems vibracijų režimams.

Kietosios dalelės

Kietosios dalelės – tai ore esančių dalelių ir skysčio lašelių mišinys, kurio sudėtyje gali būti įvairūs komponentai – sulfatai, nitratai, organiniai junginiai, metalai, dirvožemio dalelės, dulkės, suodžiai ir kt. Kuo dalelės smulkesnės, tuo giliau jos gali prasiskverbti į žmogaus organizmą ir tuo didesnę neigiamą poveikį turėti sveikatai. Pačios smulkiausios dalelės gali kauptis plaučių audiniuose ir sukelti rimtus ne tik kvėpavimo organų, bet ir širdies bei kraujagyslių funkcijos sutrikimus. Į žmogaus organizmą kietosios dalelės patenka kvėpuojant. Kietųjų dalelių poveikis organizmui priklauso nuo jų frakcijos dydžio, fizikinių ir cheminių savybių bei koncentracijos. Stambesnės dalelės sulaikomos viršutiniuose kvėpavimo takuose, todėl didelio pavojaus sveikatai jos nekelia. KD10 (kietosios dalelės iki 10 mikronų aerodinaminio skersmens) dalelės gali nusėsti bronchuose ir plaučiuose, sukeldamos kosulį ir čiaudulį. Tuo tarpu mažesnės nei 2,5 mikronų aerodinaminio skersmens KD2,5 dalelės, patenkančios į plaučius ar kraujotakos sistemą, gali kauptis plaučių audiniuose ir sukelti rimtus ne tik kvėpavimo organų, bet ir širdies bei kraujagyslių funkcijos sutrikimus, skatinti astmos paūmėjimą, alergiją.

Mechaninis oro filtravimas

Kietųjų dalelių iš dujų srauto valymo procesas naudojant poringas medžiagas vadinamas filtravimu (Daunoravičienė 2010). Mechaninio filtravimo metu oro sraute esančios kietosios dalelės sulaikomos ant poringos medžiagos paviršiaus arba jos sluoksnio viduje. Dalelių sulaikymo efektyvumą lemia filtravimo medžiagos porų ir pačių dalelių dydis. Pagrindiniai filtravimo medžiagų (sluoksnių) tipai yra trys: audeklas, pluoštinė medžiaga,

grūdelių sluoksnis. Audekliniai filtrai veikia paviršių, o pluoštiniai ir grūdėtieji – tūrį.

Pakankamai perspektyvūs įrenginiai mažo našumo katilinių išlakų kietosioms dalelėms gaudyti yra audekliniai filtrai. Jų privalumas – puikios filtracinės savybės (tinkamai parinkus audinio medžiagą ir jos apkrovą, oro išsivalymo laipsnis siekia 99,99%, be to, jis mažai priklauso nuo pelenų ir dulkių dispersiškumo) bei aukštas terminis ilgalaikis atsparumas (stiklo audiniai – iki 300 °C).

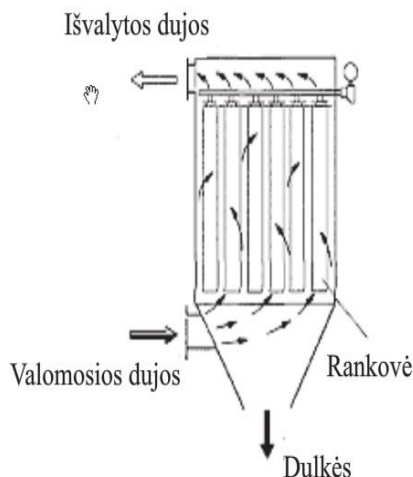
Audeklinių filtrų eksploatavimo pradžioje per švarią medžiagą gali praeiti 20-30% kietųjų dalelių, tačiau veikiant filtrui poras tarp audinio pluoštų palaipsniui užpildo dalelės, kurios sudaro antrą poringą gaudymo sluoksnį. Šis sluoksnis gali būti pakankamai storas, todėl gerai sulaiko mažesnes daleles. Tačiau didėjant sugautų dalelių sluoksnio storiui, t. y. kaupiantis lakiesiems pelenams ir suodžiams ant audeklo paviršiaus, labai padidėja filtro aerodinaminis pasipriešinimas ir audinį būtina regeneruoti. Ant audeklo paviršiaus susikaupęs dulkių sluoksnis pašalinamas suspaustu oru arba mechaniškai purtant. Regeneruojant filtrą suspaustu oru, pastarasis tiekiamas priešinga valomųjų dujų srautui kryptimi. Mažiau mechaniškai patvaraus audinio (pvz., stiklo pluošto) filtrai regeneruojami arba žemo slėgio oru, arba mechaniškai purtant. Visais regeneravimo atvejais nupurtytos dulkės surenkamos į bunkerį. Regeneracijos metu reikia nukratyti tik viršutinį dalelių sluoksnį, kad sumažėtų aerodinaminis pasipriešinimas, tačiau medžiagos porose dalelės turi likti.

Audekliniai filtrai būna dviejų pagrindinių tipų – rankoviniai ir plokštieji. Valant degimo išlakas daug pranašesni yra rankoviniai filtrai. Paplitusi rankovinio filtro forma (1. pav.) yra ant metalinių rėmų užvilkto 12-20 cm skersmens ir iki 5 m ilgio cilindrinės rankovės. Dujų srautas patenka iš apačios į viršų, toliau pro išorinę rankovės pusę į vidų. Tačiau dalelių sulaikymo rankovinėmis filtrais procese galima ir priešingos krypties valomųjų dujų eiga. Neretai gerai išvalytas oras grąžinamas tiesiog į gamybinę patalpą, o ne išmetamas į atmosferą.

Pluoštinių filtrų paskirtis – gaudyti ir kaupti daleles pluošto tūryje. Valomasis elementas – specialios smulkaus pluošto medžiagos. Plačiai naudojamas audinys, kurį sudaro ultraploni (1,5-2,5 μm) perchlorvinilo pluoštai, uždėti ant marlinio pagrindo, taip pat audinys, kurį sudaro ultraploni (apie 1,5 μm) acetilceliuliozės pluoštai.

Grūdėtuosiuose filtruose filtravimo procesas vyksta kelių metrų aukščio 0,3-50 mm grūdelių įkrovoje. Iš

pradžią procese dalyvauja visas įkrovos tūris, bet vėliau, susikaupus didesniai sulaikomų dalelių kiekiui, pagrindinį vaidmenį atlieka išorinis įkrovos sluoksnis. Tuo momentu pagerėja filtravimo efektyvumas, tačiau padidėja slėgio kritimas.



1. pav. Rankovinio filtro schema (Denafas 2000b)

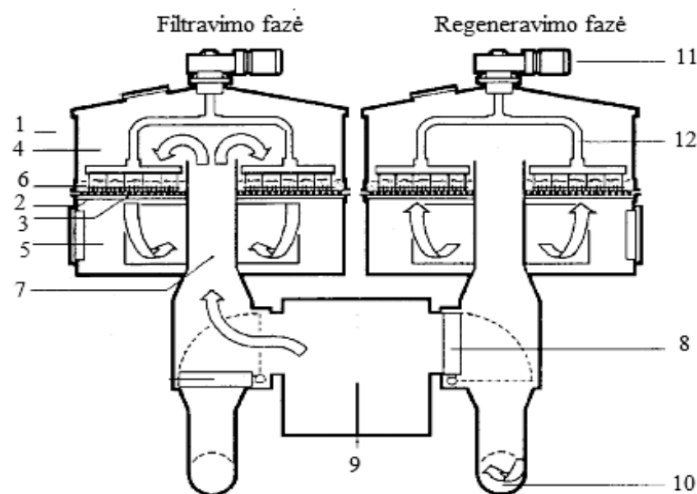
Grūdėtaisiais filtrais nepasiekiamas toks valymo efektyvumas, kaip gerais audekliniais filtrais. Esant didelėms apkrovoms yra realus „pramušimo“ pavojus, kai dalelės filtrą praeina kiaurai. Siekiant to išvengti, įkrovos grūdelių skersmuo turi būti mažas ($<0,5$ mm), o srauto linijinis greitis išilgai įkrovos sluoksnio taip pat nedidelis ($<0,1$ m/s). Grūdėtuosius filtrus tikslinga naudoti tuomet, kai negalima eksploatuoti audeklinių filtrų, pvz., esant aukštai temperatūrai ir slėgiui, užsiklijavimo dėl rasoavimo, sulaikomų dalelių abrazyvumo arba cheminio reaktingumo sąlygomis. Kaip įkrova naudojami žvyras, smėlis, keramika, aktyvuota anglis ar kiti užpildai. Naudojant susmulkintus kalkakmenius, kartu galima pašalinti ir kitus dujinius teršalus (SO_2 , NO_x , CO), šiuo atveju įkrova veiktų kaip chemisorbentas.

Tam, kad įkrovą būtų galima regeneruoti, ji turi būti chemiškai ir mechaniškai atspari, atlaikyti aukštesnį slėgį ir temperatūrą. Išlakų valymo procesas gali vykti stacionarioje, slenkančioje ir „verdančioje“ įkrovoje.

Filtro su stacionaria įkrova pavyzdys pateiktas 1.2. pav. Dujos po pirminio valymo ortakiu (9) pro atidarytą sklendę (8) ir centrinį vamzdį (7) patenka į kamerą (4) ir toliau slenka iš viršaus į apačią pro įkrovos sluoksnį (6), kur smulkios dalelės nusėda ant grūdelių ar tarp jų.

Išvalytos dujos pasiekia kamerą (5) ir galiausiai išleidžiamos pro specialią angą. Filtro įkrova regeneruojama taip: uždaroma sklendė (8), atidaromas kanalas (10). Jame esantis kompresorius regeneruojantį

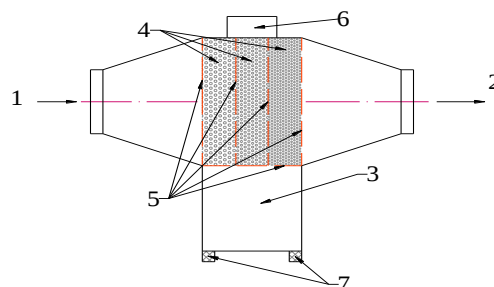
orą tiekia priešingai valomųjų dujų srauto kryptiai. Įkrova (6) tuo pat metu purenama maišykle (12). Nusiurbtos dalelės nusėda prieš kompresorių esančiame gaudytuve.



2. pav. Grūdėtasis oro filtras su stacionaria įkrova (Denafas 2000b)

Alternatyvi grūdėtųjų oro filtrų konstrukcija

Gera suprojektuotas ir pagamintas grūdėtasis oro valymo filtras savo savybėmis ir efektyvumu nenusileidžia kišeniniams ir pluoštiniais oro filtrams, tačiau kaip matome iš prieš tai aprašytų dažniausiai pramonėje naudojamų grūdėtųjų oro filtrų veikimo schemų (2. pav.), šio filtro konstrukcija yra gan sudėtinga – naudojamos sklendės, kitos judančios dalys, taip pat sunaudojama daug lakštinio plieno sudėtingos formos įrenginiams pagaminti. Tokius konstrukcinius sprendimus prisiima tenka dėl įkrovos regeneracijos sprendimų naudojamų šiuose įrenginiuose. Jei įkrovos regeneracijai panaudotume mažiau judančių dalių reikalaujančius būdus, tokius kaip akustinė arba vibracinė regeneracija, galėtume maksimaliai supaprastinti grūdėtųjų oro filtrų konstrukciją.



3. pav. Grūdėtasis oro filtras su akustine įkrovos regeneracija

3. pav. pateikta supaprastinta grūdetojo oro filtro su akustine regeneracija shema. Kietosiomis dalelėmis užterštas oro srautas (1) patenka į filtrą ir yra priverstas praeiti pro filtro įkrovą (4), kurią savo vietoje laiko grotelės (5), išvalytas oro srautas (2) tiekiamas tolesniam valymui arba naudojimui. Šio filtro įkrovos regeneracijai naudojamas prie filtro korpuso pritvirtintas garso šaltinis (6). Garso šaltinio sukuriama vibracija perduodama filtro įkrovai, taip nuo jos nupurtomos suspenduotos dalelės, o jos veikiamos sunkio jėgos subyra į uždarą bunkerį (3). Filtras pastatomas ant amortizatorių (7), kad korpuso vibracijos nepersiduotų į aplinką.

Pakeitę 3. pav. pavaizduoto grūdetojo oro valymo filtro regeneracijai naudojamą garso šaltinį pakeisę mechaniniu arba elektromagnetiniu vibratoriumi sumažintume įkrovos regeneracijos metu sklindantį garsą, pašalintume pneumatinės sistemos butinybę, taip pat dėl tirsio ginio vibratoriaus kontakto su filtro korpusu geriau perduotume mechaninę energiją filtro įkrovai.

Kaip ir ankščiau aprašytoje konstrukcijoje kietosiomis dalelėmis užterštas oro srautas (1) patenka į filtrą ir yra priverstas praeiti pro filtro įkrovą (4), kurią savo vietoje laiko grotelės (5), išvalytas oro srautas (2) tiekiamas tolesniam valymui arba naudojimui. Šio filtro įkrovos regeneracijai naudojamas prie filtro korpuso pritvirtintas mechaninis arba elektromagnetinis vibratorius (6). Vibratoriaus sukuriama vibracija perduodama filtro įkrovai, taip nuo jos nupurtomos suspenduotos dalelės, o veikiamos sunkio jėgos jos subyra į uždarą bunkerį (3). Filtras pastatomas ant amortizatorių (7), kad korpuso vibracijos nepersiduotų į aplinką.

Vibracijoms sukelti galima naudoti įvairių konfigūracijų vibratorius, sukurenčius vibracijas vienoje arba keliuose plokštumose vienu metu.

Birios terpės, sudarytos iš vienodo dydžio ir medžiagos dalelių, elgsena veikiant vibracijai

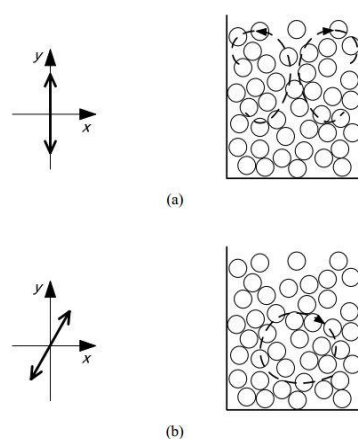
Masiniai detalių paviršiaus užbaigimo procesai žinomi kaip greitos, nuoseklios ir ekonomiškos pramoninės operacijos, kurių metu grūdinamas ir nuvalomas detalių paviršius. Perteklinės žaliavos pašalinimo nuo detalių paviršiaus susideda iš valymo, poliravimo, paviršiaus įtempimų šalinimo ir net tam tikro dydžio detalės paviršiaus pažeidimo. Kai detalių paviršiaus tikslumas nėra labai svarbus, detalių paviršius dažniausiai valomas besikartojančio kontakto būdu, kurį

sukelia laisvai aplink detales cirkuliuojanti biri terpė. Ši terpė susideda iš įvairios formos ir dydžio kietųjų dalelių.

Šiuo metu pramonėje yra naudojama daug skirtingų tipų masinio paviršiaus užbaigimo mašinų, tačiau vibracinės mašinos vartojamos dažniausiai, nes yra efektyvios, patikimos ir ekonomiškos.

Kai terpės judesys daugiausiai apsiriboja vienoje plokštumoje, vertikalios vibracijos veikiamos dalelės linkusios judėti dviguba trajektorija, kaip pavaizduota paveikslėlyje 4. (a) (Tai, Hsiau 2004; Hsiau 2000). Toks judėjimas yra simetriškas ir įtraukia mažiausią kiekį dalelių. Tai ir Hsiau (2004) nustatė stiprų ryšį tarp šio dalelių judėjimo užpildinėje terpėje ir talpos, kurioje terpė talpinama, vibracijų dažnio. Tai ir Hsiau išnagrinėjo šio dalelių srauto elgseną ir stiprumą naudodami panašias koncepcijas kaip ir skysčių mechanikoje, analizavo. dalelių temperatūrą, difuziją ir konvekciją. Srauto judėjimo modelis sudėtingesnis, kai padidinamas atstumas tarp priekinės ir galinės vibruojančio konteinerio sienelių (4. (a)) paveikslėlio z ašies kryptimi). Pakankamai padidinus šį atstumą, terpės dalelės pradeda laisvai judėti abiejose x–y ir y–z plokštumose (Tennakoon 1999).

Grossmanas (1997) nustatė, kad vibracijos ciklo metu, kai konteinerio sienelės pakyla, užpildinė terpė susispaudžia prie konteinerio dugno, todėl terpės judėjimas sustabdomas. Kai konteineris pajuda žemyn, terpė tampa mažiau suspausta ir prie šoninių sienelių esančios dalelės, veikiamos sienelių trinties, truputį pajuda žemyn. Taip susidaro dvigubos simetriškos trajektorijos dalelių judėjimas (žr. 4.(a) pav.).



4. pav. Dalelių judėjimas užpildinėje terpėje veikiant vibracijai: a) vertikaliajai vibracijai; b) vibracijai su vertikaliąja dedamąja

Dalelių judėjimo trajektorija buvo ištirta ir veikiant vibracijai su vertikaliąja dedamąja. Šios vibracijos

judesio kryptis pasvirusi pagal vertikale, horizontali vibracijos dedamoji palydi tos pačios fazės vertikalią dedamąją (4. (b) pav.) arba sukamojo judesio, kai konteineris juda uždara vibracijos trajektorija. Paveiksle (4. (b)) pavaizduotu atveju dešinė sienelė stumia užpildintą terpę žemyn, o kairė sienelė tuo pačiu metu stumia terpės daleles aukštyn. Taip gaunamas trajektorijos, pavaizduotos paveikslėlyje 4. (b), dalelių judėjimas.

Vibruojančios birios terpės dalelių segregacija

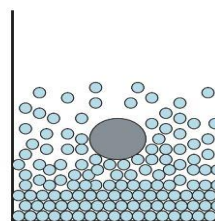
Jeigu pakratytume dėžutę su avižomis, tai pamatytume, kaip didžiausios avižos palyda į paviršių. Šis spontaniškas susigrupavimas iš pradžių atrodo nelogiškas, nes atrodo, kad objektai papurtyti skirtingomis kryptimis turi tiesiog susimaišyti. Dviejų skysčių mišiniuose (pvz., aliejus ir vanduo) lengvesnis skystis, veikiamas Archimedo dėsnio, būna susikaupęs viršuje. Priešingai nei skysčių mišiniuose didesnės avižos dėžutės viršuje turi daug didesnį tankį nei avižos apačioje. Avižos yra geras birios terpės pavyzdys. Jų susirikiavimas pagal dydį iš tikrųjų yra vienas įspūdingiausių sistemų, esančių ne pusiausvyroje savaiminio susirikiavimo pavyzdys (Rosato, Blackmore 2000).

Kaip ir skysčiai birios medžiagos yra sudarytos iš atskirų dalelių kurios gali judėti viena kitos atžvilgiu. Tačiau granulės juda lėtėjančiai ir greitai nustoja judėti, jei nesuteikiama pastovi mechaninė energija. Išsklaidyta energija pakelia dalelių atomų temperatūrą, tačiau nesukelia pastebimo pokyčio birių medžiagų sistemose. Taip yra dėl to, kad šiluminė energija tampa nereikšminga palyginti su potencine energija, reikalinga perkelti daleles vieną per kitą gravitaciniame lauke. Sustijusi sistema nebejudą kol jai nesuteikiama mechaninė energija. Todėl hidrodinaminės Stokso-Navje pusiausvyros lygtys, aprašančios skysčius, netinka birioms medžiagoms. Net ir ramybės būsenoje esanti birių dalelių sistema iš tikrųjų beveik niekada nebūna visiškai pusiausvyros, o greičiau „beveik pusiausvyros“ būsenos.

Vienas iš pirmųjų pranešimų apie vibracines dalelių sistemas, vibracijų poveikį transportuojant anglį (1939) buvo Brown. Brownas teigė, kad skirtumas tarp dalelių tankio šalia didesnio anglies gabalo suteikia daugiau laisvės laipsnių ir gali iškelti jį į paviršių net tada, kai jo tankis didesnis nei mažesnių anglies gabalėlių. Jis taip pat pastebėjo, kad jei kažkuriuo kasimo proceso metu kontaktinės jėgos tarp dalelių panaikinamos, tai didesnio

tankio dalelės nusėda į dugną. Tokiu būdu atsirado poreikis eksperimentų, paaiškinančių ryšį tarp dydžio ir tankio.

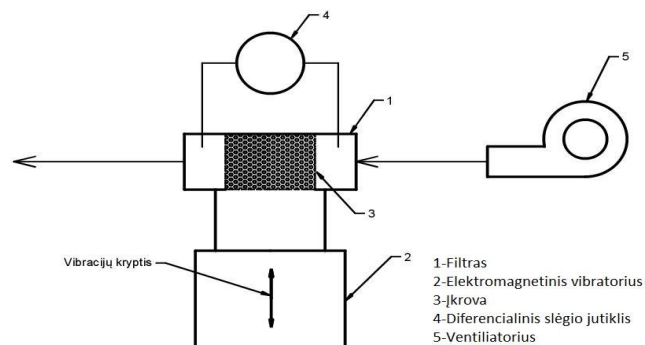
Po kelių dešimtmečių Williamsas atliko sisteminius eksperimentus ir pasiūlė dalelių dydį laikyti pačia svarbiausia dalelių savybe, sukeliančia pasiskirtymą (1963). Tam, kad pademonstruotų, jog sijojimas nėra vienintelė priežastis, dėl kurios didesnės dalelės susikaupia viršuje, jis atliko eksperimentą, kurio metu į stačiakampį indą pripylė smulkių rutuliukų ir įmetė vieną didesnį rutulį (5. pav.). Kai indas su rutuliukais buvo atitinkamai vibruojamas, buvo galima matyti, kaip didesnis rutuliukas visada kyla į viršų. Williamsas teigė, kad didesnės dalelės kyla į viršų dėl to, kad mažesnės dalelės po juo nejudą ir neleidžia jam kristi žemyn, kol tuo tarpu dalelės aplinkui juda. Jeigu judančios dalelės verčia didesnę dalelę kilti į viršų, tada mažos dalelės suteka į apačią ir taip sukuria pagrindą didesnei dalelei (1963).



5. pav. Williamso bandymas su skirtingų dydžių rutuliukais

Tyrimų stendas

Tyrimams naudojamas stendas su keičiamu vibratoriumi (3.2. ir 3.4. pav.). Kaip matyti paveikslėliuose stendą, sudaro elektromagnetinis vibratorius (2), grūdėtasis oro filtras (1), užpildytas įkrova (3), diferencialinis slėgio jutiklis (4) ir prie sistemos lanksčiais ortakiais prijungtas ventiliatorius (5).



6. pav. Tyrimų stendo su vienos krypties vibratoriumi schema

Metodika

Tyrimo metu bandymai atliekami tokia tvarka: Vibracijų matavimo įrenginiu išmatuojamos vibratorių amplitudės prie įvairių darbo režimų; Įjungiamas ventiliatorius ir diferencialinio slėgio jutiklis išmatuojami slėgio nuostoliai esant neužterštai grūdėtojo filtro įkrovai; Per filtrą paleidžiamas kietosiomis dalelėmis užterštas oro srautas; Išmatuojamami slėgio nuostoliai esant užterštai grūdėtojo filtro įkrovai; Sustabdomas oro srautas; Nustatytą laiko tarpą įjungiamo filtro įkrovos regeneracija; Įjungiamas ventiliatorius; Išmatuojami filtro slėgio nuostoliai po įkrovos regeneracijos; Sustabdomas oro srautas, išvaloma filtro įkrova ir bandymas kartojamas esant kitiems kintamiesiems.

Bandymų kintamieji: Vibratoriai (viena vibracijų kryptis ir dvi kryptys); Vibratorių darbo režimai (vibracijų amplitudės); Filtro įkrova; Įkrovos regeneracijos trukmė; Oro srautą teršiančios dalelės.

Vietoje filtro grotelių, laikančių įkrovą, abiejuose stenduose panaudotas įtemptas akytas audinys. Audinį įtemptą laikė filtro atvamzdžiai. Atvamzdžiai buvo papildomai prisukami varžtais, kad nuo vibracijų audinys neatsipalaiduotų ir filtro viršuje neatsirastų erdvė neužpildyta įkrova.

Kaip jau minėjau anksčiau, tyrimuose naudoti du skirtingi elektromagnetiniai vibratoriai. Kaip vienos krypties vibracijų šaltinis naudotas elektromagnetinis vibratorius PB-1601. Šio vibratoriaus vibracijų dažnis nereguliuojamas ir yra lygus elektros tinklo dažniui (50 Hz). Vis dėlto yra galimybė keisti vibracijų amplitudę fiksuotais darbo režimais.

Galimi penki skirtingi amplitudžių dydžiai: 10, 11, 13, 14 ir 16 μm (amplitudės išmatuotos vibratoriumi dirbant su minimalia apkrova, t. y. vibruojant tik akselerometrą ir jo tvirtinimo elementus).

Kaip dviejų krypčių vibracijos šaltinis buvo panaudotas savadarbis 36V elektromagnetinis vibratorius. Šis vibratorius neturi galimybės pasirinkti amplitudės dydžio ir vibruoja fiksuotu dažniu (50 Hz), todėl prie jo papildomai buvo prijungtas reguliuojamas reostatas ir voltmetras.

Filtro įkrovos sukuriama pasipriešinimui matuoti naudojamas diferencialinis slėgio jutiklis KIMO CP100 (7.pav.).



7.pav. Diferencialinis slėgio jutiklis KIMO CP100

Bandymų rezultatai

Tyrimo metu gauti filtro įkrovos hidrauliniai nuostoliai, matuojami paskaliais, kai įkrova yra švari, kai įkrova užteršta kietosiomis dalelėmis ir kai įkrovai atlikta regeneracija. Iš šių duomenų, pagal formules, išskaičiuojamas filtro regeneracijos naudingumo koeficientas, kuris pateikiamas procentais.

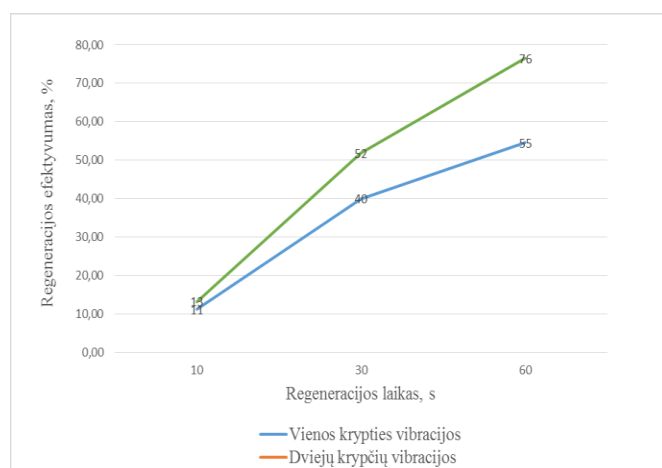
$$\Delta P_1 = P_{už} - P_{šv}; \quad (1)$$

Čia $P_{už}$ – užkišto filtro hidrauliniai nuostoliai paskaliais, $P_{šv}$ – švarios filtro įkrovos hidrauliniai nuostoliai;

$$\Delta P_2 = P_{re} - P_{šv}; \quad (2)$$

Čia P_{re} – filtro hidrauliniai nuostoliai po regeneracijos, $P_{šv}$ – švarios filtro įkrovos hidrauliniai nuostoliai;

$$\eta = \left| \frac{\Delta P_2 \cdot 100}{\Delta P_1} - 100 \right|; \quad (3)$$



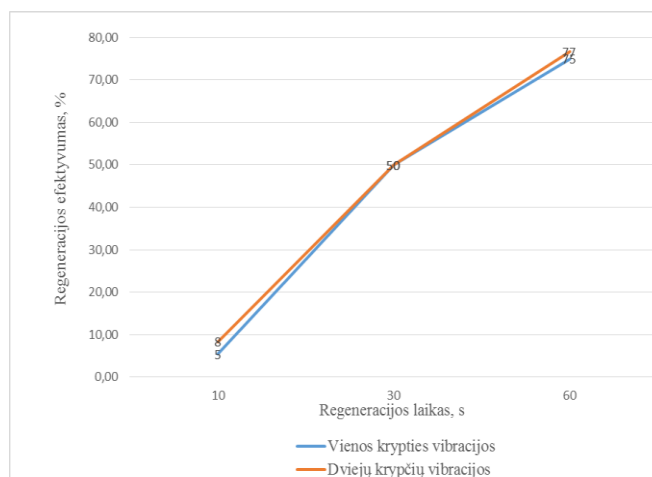
8. pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, prie didžiausių amplitudžių, naudojant stiklo granules

Vėliau iš gautų naudingumo koeficientų ir vykdytų bandymų sąlygų sudarytos kreivės atspindinčios tyrimo rezultatus. Iš 8. paveikslą matyti, kad filtro įkrovai naudojant netaisyklingos formos stiklo granules, įkrova

geriau regeneruojama pritaikius dvikryptį elektromagnetinį vibratorių. Regeneruojant įkrovą trumpą laiką (10 s) dvikryptės regeneracijos privalumai sunkiai pastebimi, tačiau regeneraciją tęsiant ilgesnį laiką išryškėja dvikryptės įkrovos regeneracijos pranašumas, t.y. po 30 s įkrova geriau regeneruojama 12%, o po minutės net 21%.

Tačiau filtro įkrovai naudojant taisyklingos formos ir lygaus paviršiaus keraminius rutuliukus, ryškus dvikrypčio regeneracijos metodo pranašumas nepastebimas (9. pav.).

Kartojant bandymus su mažesnėmis vibracijų amplitudėmis (dvikryptis vibratorius dirba esant 30 V įtampai, o vienakryptis vibratorius naudojamas silpniausiu režimu, sumažinus dvikrypčio vibratoriaus įtampą iki 25 V, vibracijų amplitudė tesiekia 188 nanometrus, todėl šiuos vibratorius lyginti nebetikslinga) gaunami panašūs rezultatai, tačiau pastebimas nežymus naudingumo koeficiento mažėjimas ir stiklo granuliu, ir keraminių rutuliukų regeneracijos proceso metu.



9. pav. Įkrovos regeneracijos efektyvumo

priklausomybė nuo regeneracijos trukmės ir būdo, esant didžiausioms amplitudėms, naudojant keraminius rutuliukus

Kelių procentų įkrovos regeneracijos naudingumo koeficiento sumažėjimą, bandymams naudojant mažesnę vibracijų amplitudę, galima paaiškinti ankstesniuose skyriuose aprašytomis granulinių medžiagų ir vibracijos sąveikos savybėmis. Veikiamos vibracijos įkrovos dalelės juda tam tikra trajektorija. Sumažinus vibracijų amplitudę sumažėja per tą patį laiko tarpą ir dalelės nukeliamas atstumas erdvėje. Esant mažesniai dalelių judėjimo greičiui per tą patį nustatytą laiką iš įkrovos išbyra mažiau kietųjų dalelių.

Išvados

1 –Grūdėtieji oro filtrai gan dažnai naudojami pramonėje, tačiau rankoviniai, kišeniniai ir pluoštiniai oro filtrai išlieka populiareni, nes šiuolaikinė grūdėtųjų filtrų konstrukcija ir įkrovos regeneracijos būdai nėra pakankamai ekonomiškai ir efektyvūs.

2 –Vis didėjančios vibracinių sistemų galimybės valdyti birios terpės srautus ir gilėjantis vibracijų ir įvairios terpės sąveikos supratimas leidžia daryti prielaidą, įvairių režimų vibracijų panaudojimui, grūdėtųjų oro filtrų įkrovai regeneruoti.

3 –Eksperimento rezultatai rodo, kad įkrovai naudojant netaisyklingos formos ir nelygaus paviršiaus stiklo granules, dvikryptė vibracinė regeneracija naudingesnė už vienakryptę. Įkrovą regeneruojant 30 s – 12%, 60 s – 21%.

4 –Aiški dvikryptės vibracijos pranašumo priklausomybė nuo laiko, įkrovai naudojant netaisyklingos formos ir nelygaus paviršiaus daleles, nenustatyta, nes perdidelis tyrime naudojamų vibratorių amplitudžių nesutapimas.

5 –Šio bandymo sąlygomis, įkrovai naudojant taisyklingos formos ir lygaus paviršiaus keraminius rutuliukus, regeneracijos priklausomybės nuo vibracijų režimo praktiškai nėra.

6 –Sumažinus vibracijų amplitudę, pastebėtas regeneracijos efektyvumo sumažėjimas, nepriklausomai nuo įkrovai naudojamos medžiagos.

Padėkos

Dėkoju doc. dr. Vytautui Striškai už pagalbą rengiant straipsnį. (Padėka vadovui rašoma tik tuo atveju,

Literatūra

- Daunoravičienė, A. 2010. *Technogeninių atliekų susidarymas, valymas ir utilizavimas*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 14-16 p.
- Denafas, G. 2000b. *Atmosferos apsauga. II dalis. Atmosferos taršos mažinimas*. Kaunas: Technologija. 90 p.
- Tai C.H., Hsiao S. S. Dynamic behaviors of powders in a vibrating bed. *Powder Technology*, 139 (2004), 221-232
- Hsiao S. S., Chen C. H. Granular convection cells in a vertical shaker. *Powder Technology*, 111 (2000), 210-217
- S.G.K. Tennakoon, L. Kondic, R.P. Behringer. Onset of flow in a horizontally vibrated granular bed: Con-

vection by horizontal shearing. *Europhysics Letters*, 45 (1999), 470-475

Grossman, E.L. Effects of container geometry on granular convection. *Phys. Rev. E*, 56 (1997), 3290-3300.

Rosato A D and Blackmore D L (ed) 2000 *Segregation in Granular Flows* (Dordrecht: Kluwer)

Williams J C 1976 The segregation of particulate materials: a review *Powder Technol.* 15245-51

Bridgwater J 1993 Mixing and segregation mechanisms in particle flow *Granular Matter* ed A Metha (New York:Springer) pp 161-95

Bates L 1997 *User Guide to Segregation* (Bucks: British Materials Handling Board)

Brown R L and Richards J C 1970 *Principles of Powder Mechanics* (Oxford: Pergamon)

Cizeau P, Makse H A and Stanley H E 1999 Mechanisms of granular spontaneous stratification and segregation in two-dimensional silos *Phys. Rev.*E594408-21

Samadani A, Pradhan A and Kudrolli A 1999 Size segregation of granular matter in silo discharges *Phys. Rev.*E 607203-10

Ottino J M and Khakhar D V 2000 Mixing and segregation of granular materials *Annu. Rev. Fluid Mech.*32 55-91

Brown R L 1939 The fundamental principles of segregation *J. Inst. Fuel* 1315-19

Williams J C 1963 The segregation of powders and granular materials *Fuel Soc. J.*1429-34

Olsen J L and Rippie E G 1964 Segregation kinetics of particulate solids systems I, influence of particle size and particle size distribution *J. Pharmaceut. Sci.*53147-50

Rippie E G, Olsen J L and Faiman M D 1964 Segregation kinetics of particulate solids system II, particle density-size interactions and wall effects *J. Pharmaceut. Sci.*531360-3

Ahmad K and Smalley I J 1973 Observation of particle segregation in vibrated granular systems *Powder Technol.*869-75

Parsons D S 1976 Particle segregation in fine powders by tapping as simulations of jostling during transportation *Powder Technol.*13269-77

Ratkai G 1976 Particle flow and mixing in vertically vibrated beds *Powder Technol.*15187-92

Harwood C F 1977 Powder segregation due to vibration *Powder Technol.*1651-7

Stephens D J and Bridgwater J 1978 The mixing and segregation of cohesionless particulate materials: Part II. Microscopic mechanisms for particles differing in size *Powder Technol.*2129-44

Rosato A, Stranburg K J, Prinz F and Swendsen R H 1987 Why the Brazil nuts are on top: size segregation of particulate matter by shaking *Phys. Rev. Lett.*5810 38-41

Knight J B, Jaeger H M and Nagel S R 1993 Vibration-induced size separation in granular media: the convection connection *Phys. Rev. Lett.*7037 28-31

Hong D C, Quinn P V and Luding S 2001 Reverse Brazil nut problem: competition between percolation and condensation *Phys. Rev. Lett.*863423-6

Jenkins J T and Yoon D K 2002 Segregation in binary mixtures under gravity *Phys. Rev. Lett.*88194301 (p 4)

Breu A P J, Ensner H-M, Kruehle C A and Rehberg I 2003 Reversing the Brazil-nut effect: competition between percolation and condensation *Phys. Rev. Lett.*90014302 (p 4)

Shinbrot T and Muzzio F J 1998 Reverse buoyancy in shaken granular beds *Phys. Rev. Lett.*814365-9

Mobius M E, Lauderdale B E, Nagel S R and Jaeger H M 2001 Size separation of granular particles *Nature* 414 270

Yan X, Shi Q, Hou M and Lu K 2003 Effects of air on the segregation of particles in a shaken granular bed *Phys. Rev. Lett.*91 014302 (p 4)

Dijkstra M, van Roji R and Evans R 1999 Phase diagram of highly asymmetric binary hard-sphere mixtures *Phys. Rev.*E595744-71

ARTICLE TITLE IN SUMMARY LANGUAGE

J. Rimkus

Summary

The master thesis analyzes granular air bed filter design and bulk regeneration techniques. The purpose is to investigate the effect of vibration on granular air bed filter bulk at different vibration regimes. The thesis consists of three main parts. The first part contains the main popular air filter design and regeneration techniques. It also provides an alternative design of granular bed air filter and bulk regeneration techniques. The behavior of the bulk medium composed of the same size and material particle, due to vibrations and vibratory bulk medium segregation is covered in second part. The third section describes the research methodology and stand as well summarizes the results of the study. Then the general conclusion and references.

Keywords: solid particles, granular air bed filter, bulk, vibration, regeneration.