



RĪGAS TEHNISKĀ
UNIVERSITĀTE

Ivo Vaicis

MEHĀNISKO SISTĒMU ELEMENTU FORMAS OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT NENOTEIKTĪBU

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte

Mehānikas un mašīnbūves institūts

Ivo Vaicis

Doktora studiju programmas “Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

**MEHĀNISKO SISTĒMU ELEMENTU FORMAS
OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT NENOTEIKTĪBU**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:

profesors *Dr. sc. ing.*

ALEKSANDRS JANUŠEVSKIS

profesors *Dr. sc. ing.*

JĀNIS AUZIŅŠ

RTU Izdevniecība

Rīga 2022

Vaicis I. Mehānisko sistēmu elementu formas optimizācija, ievērojot nenoteiktību. Promocijas darba kopsavilkums. – Rīga: RTU Izdevniecība, 2022. – 23 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes “P-04” 2021. gada 30. novembra lēmumu, protokols Nr. 48.

<https://doi.org/10.7250/9789934227363>
ISBN 978-9934-22-736-3 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2022. gada 10. martā plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors *Ph. D. Athanassios Mihailidis*,
Saloniku Aristoteļa Universitāte, Grieķija

Dr. habil. sc. ing. Grigorijs Panovko,
Krievijas Zinātņu akadēmija, Krievija

Profesors *Dr. sc. ing.* Andrejs Krasņikovs,
Rīgas Tehniskā universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis šo promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai. Promocijas darbs zinātniskā grāda iegūšanai nav iesniegts nevienā citā universitātē.

Ivo Vaicis (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, piecas nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 120 attēlu, trīs tabulas, trīs pielikumi, kopā 121 lappuse, ieskaitot pielikumus. Literatūras sarakstā ir 113 nosaukumu.

SATURS

TĒMAS AKTUALITĀTE	5
DARBA MĒRĶIS UN GALVENIE UZDEVUMI	5
PĒTĪJUMA OBJEKTS	6
DARBA HIPOTĒZE.....	6
ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE	6
DARBA REZULTĀTU PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA.....	6
PUBLIKĀCIJAS.....	7
DARBA STRUKTŪRA UN GALVENIE REZULTĀTI.....	9
1. GRANULĀRĀ MATERIĀLA RADIĀLĀS SEGREGĀCIJAS ANALĪZE.....	10
2. SEGREGĀCIJAS ANALĪZE PĀRKRAUŠANAS BUNKURĀ, IEVĒROJOT NENOTEIKTĪBU	12
2.1. Vertikālo svārstību ietekme uz segregāciju.....	12
2.2. Bunkura izplūdes leņķa un svārstību ietekme uz radiālo segregāciju.....	13
2.3. Nenoteiktības ietekmes vērtējums.....	16
3. BUNKURA CAURPLŪDES ANALĪZE, IZMANTOJOT FIZIKĀLO PROTOTIPU...	17
4. BUNKURA FORMAS OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT NENOTEIKTĪBU	20
5. SECINĀJUMI.....	22
Literatūras saraksts.....	23

TĒMAS AKTUALITĀTE

Zinātnē, tehnikā un tehnoloģiskajos procesos formas optimizācija ir trešais, visaugstākais līmenis optimizācijas problēmu risināšanā (pirmie divi līmeņi ir parametru optimizācija un procesu vadības optimizācija). Promocijas darbs veltīts šāda līmeņa problēmu optimizācijai, kas atšķiras ar to, ka mehāniskās sistēmas mijiedarbībās ievērotas tehnoloģiskā procesa nenoteiktības. Darbā sākotnējo miljoniem lielo mijiedarbību un brīvības pakāpju skaits ($\sim \infty DOF > 10^6$) ir reducēts uz tādu *DOF* uzdevumu skaitu, kas mazāks par vairākām kārtām, izmantojot metamodeļus (modelis – modelī), eksperimentālo datu aproksimācijas modeļus, modernās datorprogrammas – *SolidWorks*, *ANSYS* un *EDEMS*.

Formas optimizācijai ir liela nozīme dažādu jaunu produktu izstrādē, kā arī esošo produktu uzlabošanā. Formas optimizācija ļauj atrast optimālus produkta parametrus, sabalansējot produkta izmaksas. Izmantojot metamodeļos bāzētu formas optimizāciju, iespējams būtiski samazināt mašīnrēķināšanas laiku, ātrāk sagatavot produktu ražošanai, kā arī optimizēt ražošanas izmaksas, efektīvi plānojot materiāla izlietojumu.

Šajā darbā kā bāzes pētījums un jaunās metodes ilustrācija tiek parādīta un analizēta pārkraušanas bunkura un granulārā materiāla ietekme uz putekļu veidošanās procesu materiāla pārkraušanas laikā. Putekļu veidošanās saistās ar pastiprinātu gaisa piesārņojumu, kam īpaši būtiska nozīme ir industriālajās teritorijās, kas izvietotas tuvu pilsētām. Eiropas Savienībā īpaši aktuāla ir videi draudzīgu tehnoloģiju izstrāde, samazinot dabas, pilsētvides piesārņojumu, kā arī dabas resursu efektīva izmantošana.

DARBA MĒRĶIS UN GALVENIE UZDEVUMI

Darba mērķis ir izstrādāt jaunu metodi mehānisko sistēmu elementu formas optimizācijai, ievērojot šo elementu mijiedarbību ar daudzfāžu nenoteiktības vidi, kuras aproksimācijas modelis sasniedz ievērojamu brīvības pakāpju (*DOF*) skaitu (t. i., vairāk nekā miljons: $>10^6$). Lai sasniegtu darba mērķi, atrisināti vairāki uzdevumi.

1. Ievērojot nenoteiktības, izveidotas metamodelēšanas metodes un eksperimentu plāni formas optimizācijai, kas izmantoti datormodelēšanā ar programmu *EDEM*.
2. Izpētīti mehānisko sistēmu konstrukcijas optimizācijas gadījumi, ievērojot tehnoloģiskā procesa nenoteiktību.
3. Izveidots datormodelēšanas diskreto elementu metodes (DEM) lietojums mehānisko sistēmu elementu formas optimizācijai, ievērojot nenoteiktības. Izveidota eksperimentālā iekārta fizikālo eksperimentu veikšanai un skaitlisko modeļu validēšanai.
4. Veikta mehānisko sistēmu elementu formas optimizācija, ievērojot nenoteiktības, kas saistītas ar granulārā materiāla mehāniskajām īpašībām.
5. Izveidots algoritms kompleksai pārkraušanas bunkura formas optimizācijai, ievērojot nenoteiktības, kas lietots radiālās segregācijas analīzē.
6. Veikta bunkura formas optimizācija ietverot nenoteiktības, kas saistītas ar bunkura svārstībām un granulārā materiāla īpašībām.

PĒTĪJUMA OBJEKTS

Pētījuma objekts ir mehāniskā sistēma, kuras elementi mijiedarbojas ar daudzfāžu nenoteiktības vidi. Vides aproksimācijas modelis sasniedz ievērojamu brīvības pakāpju (*DOF*) skaitu (t. i., vairāk nekā miljons: $>10^6$). Aplūkojamā vide ietver:

- gāzes (gaisa) molekulu plūsmu;
- beramo vielu (granulu) kustību;
- putekļu mākonī.

Savukārt elementu formas var būt vienpusējas vai divpusējas telpiskas virsmas, ko apraksta ar analītiskiem saišu vienādojumiem.

DARBA HIPOTĒZE

Promocijas darbā tiek izvirzītas vairākas hipotēzes.

1. Ar metamodelēšanas metodi iespējams aprakstīt daudzfāžu, daudz brīvības pakāpju (t. i., vairāk nekā miljons: $>10^6$), nenoteiktības vidi.
2. Modernās datorprogrammas ļauj aprakstīt sīko materiālo objektu mijiedarbības mikropasaulē saskaņā ar klasiskās mehānikas likumiem makropasaulē.
3. Formas optimizācija segregācijas procesā ir iespējams nodrošināt tādu beramo vielu pārkraušanas procesu, kas pilnībā novērš putekļu izplūdi apkārtējā vidē.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Darba zinātnisko novitāti nosaka šādi rezultāti:

- 1) promocijas darbā izstrādāta jauna metode mehānisko sistēmu elementu formas optimizācijai, ievērojot šo elementu mijiedarbību ar daudzfāžu nenoteiktības vidi;
- 2) promocijas darba rezultātus var izmantot vides aizsardzības jomā, lai samazinātu putekļu veidošanos granulārā materiāla pārkraušanas laikā;
- 3) izveidots skaitliskais modelis granulārā materiāla mijiedarbībai ar ģeometriskajiem elementiem, izmantojot DEM;
- 4) atrasts jauns radiālas segregācijas modelis, kas apraksta daļiņu varbūtības blīvuma sadalījumu bunkura izplūdē; izstrādātais modelis ļauj analizēt un noteikt putekļu veidošanos bunkura izplūdē;
- 5) izveidoti metamodeļi bunkura formas optimizācijai, ietverot tādus parametrus kā bunkura vertikālo svārstību frekvenci un amplitūdu; metamodeļu izveidei lietoti ortogonālie eksperimentu plāni un Ležandra polinomi.

DARBA REZULTĀTU PRAKTISKĀ IZMANTOŠANA

Darbā iegūtajiem rezultātiem ir praktisks lietojums gan zinātnē, gan inženiertehnikā.

1. Rezultātus var izmantot mehānismu un iekārtu izstrādāšanai, kas paredzētas putēšanas samazināšanai granulārā materiāla pārkraušanas laikā.
2. Rezultātus var izmantot granulārā materiāla segregācijas pēc daļiņu izmēra analīzei un skaitliskai novērtēšanai.
3. Izstrādātā eksperimentālā iekārtu var izmantot pētījumos un laboratorijas darbos vertikālo svārstību ietekmes novērtēšanai uz granulārā materiāla segregāciju un granulārā materiāla caurplūdi bunkurā.

PUBLIKĀCIJAS

SCOPUS vai *Web of Science* datubāzēs indeksētās publikācijas

1. **Vaicis I.**, Spade K., Janushevskis A., Boiko A. Experimental Analysis of Bulk Material Flow Through Hopper. Proceedings of 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Vol. 19. Jelgava, 2020. ISSN 1691-5976. pp. 1653–1658.
2. Spade K., **Vaicis I.**, Vutukuru S., Irbe M. Analysis of Granules Layer Impact Interaction on a Vibrating 2D Prism. Proceedings of 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Vol. 19. Jelgava, 2020. ISSN 1691-5976. pp. 1463–1469.
3. Boiko A., Gavrilovs P., Ivanov V., **Vaicis I.** Estimating The Influence of Rail Shape on Lateral Wear on the Rail and Wheel After Grinding of 60E1 and R65 Rails. Proceedings of 19th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Vol. 19. Jelgava, 2020. ISSN 1691-5976. pp. 614–624.
4. **Vaicis I.**, Janushevskis A., Auzins J. Analysis and Optimization of Dust Control Hopper System. Lecture Notes Mechanical Engineering, Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Problems. Ch. 74. Springer Nature 2020.
5. **Vaicis I.**, Janushevskis A., Auzins J. Modeling and Analysis of Dust Control Hopper System. Proceedings of 18th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Vol. 18. Jelgava, 2019. pp. 1237–1242.
6. **Vaicis I.**, Janushevskis A. Cooling Fins Shape Optimization of LED Luminaire Body. Proceeding of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design. Albufeira, Portugal. INEGI – FEUP (2017), pp. 743–744.
7. Janushevskis A., Auzins J., Melnikovs A., Staltmanis A., **Vaicis I.**, Vība J. Wood Pole Overhead Line Strength Problems Under Extreme Weather Loads. Proceedings of 2th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. Vol. 12. Jelgava, 2012. pp. 267–272.

Publikācijas citos konferenču rakstu krājumos, žurnālos

1. **Vaicis I.**, Janushevskis A., Vikse I. Numerical Analysis of Air Flow Effect on Bulk Material Segregation In Hopper System. Proceedings of IRF2020: 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure, J.F. Silva Gomes and S.A. Meguid, INEGI – FEUP (2020), pp. 85–90.

2. **Vaicis I.**, Janushevskis A., Auzins J. Analysis of Bulk Material Segregation in Dust Control Hopper System. 5th International Conference on Engineering Sciences: Proceedings of the ICES201, Ankara, Yildirim Beyazit University, 2019. ISBN 978-1-68418-668-6. pp. 309–312.
3. **Vaicis I.**, Viksne I., Janushevskis A. European Platform for Innovation and Collaboration Between Engineering Students (EPICES) Project Accomplishment in Riga Technical University. 21st Annual International Conference on Innovation “Baltic Dynamics 2016”: Innovation and Technology Conference – Strategy for Smart Growth. 2016.
4. **Vaicis I.**, Janushevskis A. Finite Element Analysis of Wire Straightening Process. XXVII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов. Труды конференции. Москва. 2015. с. 56–59.
5. Januševskis A., Meļņikovs A., **Vaicis I.** Vidsprieguma gaisvadu elektropārvades līniju mehāniskās stiprības analīze. Mehānika. Nr. 36, 2015, 38.–44. lpp. ISSN 1407-8015.
6. Auziņš J., Januševskis A., Meļņikovs A., **Vaicis I.** Shape optimization of composite constructions under uncertainty using KEDRO. Kompozītmateriālu konstrukciju formas optimizācija ar KEDRO, ievērojot nenoteiktību. Mehānika. Nr. 36, 2015, 71.–76. lpp. ISSN 1407-8015.
7. **Vaicis I.**, Melngalvis M., Januševskis A. Spriegumu lauku analīze stieņu veidu sistēmās. SZT konferences materiāli. Rīga: RTU Izdevniecība 2010. 85 lpp.
8. **Vaicis I.**, Meļņikovs A., Januševskis A. Mobilās rampas stiprības aprēķini. SZT konferences materiāli. Rīga: RTU Izdevniecība 2011. 253 lpp.
9. Leonovs A, Ribaks D., **Vaicis I.**, Vjaters I. Triecienu Analīze Rotējošā Sistēmā. SZT konferences materiāli. Rīga: RTU Izdevniecība 2011. 76 lpp.

Dalība starptautiskās konferencēs ar referātiem

1. Engineering for Rural Development 2020. International Scientific Conference 20.–22.05.2020. Jelgava, Latvia.
2. 60th International Scientific Conference. Engineering, Mechanics and Mechanical Engineering. Riga Technical University. 16.10.2020. Riga.
3. 5th International Conference on Engineering Science (ICES 2019), 19.09.2019. Ankara, Turkey.
4. 14th International Conference on Vibrational Problems (ICOVP 2019). 1.09.–4.09. 2019. Crete, Greece.
5. 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design, Progress in Mechanics and Materials in Design. 11.06.–15.06.2017. Albufeira, Portugal.
6. 58th International Scientific Conference. Engineering, Mechanics and Mechanical Engineering. Riga Technical University. 14.10.–18.10.2017. Riga.
7. 21st Annual International Conference on Innovation “Baltic Dynamics 2016”, Third Generation of Universities, 15.10.–16.10.2016. Riga.
8. 57th International Scientific Conference. Engineering, Mechanics and Mechanical Engineering. Riga Technical University. 14.10.–17.10.2016. Riga.
9. XXVII International Innovation Conference of Young Scientists and Students, Institute of Machine Science. 2.12.–4.12.2015. Moscow, Russia.

10. 56th International Scientific Conference. Engineering, Mechanics and Mechanical Engineering. Riga Technical University. 14.10.–15.10.2015. Riga.

11. 55th International Scientific Conference. Engineering, Mechanics and Mechanical Engineering. Riga Technical University. 14.10.–17.10.2014. Riga.

DARBA STRUKTŪRA UN GALVENIE REZULTĀTI

Darba **pirmā nodaļa** veltīta literatūras apskatam par metamodelēšanas metodēm, praksē lietotajiem eksperimentu plāniem un optimizāciju.

Darba **otrajā nodaļā** aprakstīta konstrukcijas formas elementu optimizācija un formas optimizācijā izmantotās metodes, ievērojot nenoteiktību.

Darba **trešajā nodaļā** apskatīta diskreto elementu metode – diskreto metožu modelēšanas pieejas, granulārā materiāla plūsmas skaitliska modelēšana, izmantotie daļiņu savstarpējie mijiedarbības modeļi.

Ceturtajā nodaļā veikts literatūras apskats par granulārā materiāla segregācijas veidiem, to veidošanās cēloņiem. Apskatītas analītiskās sakarības segregācijas analizēšanai. Aprakstītas nenoteiktības granulārā materiāla mehāniskajās īpašībās.

Darba **piektajā nodaļā** veikta skaitliskā modelēšana granulārā materiāla plūsmai caur pārkraušanas bunkuru. Analizēta bunkura vertikālo svārstību ietekme uz granulārā materiāla radiālo segregāciju bunkura izplūdē. Definēts kvantitatīvs raksturlielums radiālās segregācijas novērtēšanai materiāla plūsmā. Šajā nodaļā ietvertas arī nenoteiktības, ko izraisa granulārā materiāla fizikālās īpašības, ietekmes uz caurplūdi un radiālo segregāciju novērtējums. Analizējot bunkuru izplūdes konusa formas parametru ietekmi uz segregāciju un caurplūdi, veikta tā formas optimizācija, novērtējot nenoteiktības ietekmi.

1. GRANULĀRĀ MATERIĀLA RADIĀLĀS SEGREGĀCIJAS ANALĪZE

Granulārā materiāla pārkraušanas procesa laikā, izmantojot pārkraušanas bunkurus, bieži novērojama materiāla segregācija. Pastāv dažādi granulāro daļiņu segregācijas veidi – pēc daļiņu izmēra, formas un blīvuma. [1]

Materiāla segregāciju bieži notiek, vertikālo svārstību, kas iedarbojas uz sistēmu, dēļ. Ja granulārais materiāls ir pakļauts vertikālām svārstībām, bieži novērojama daļiņu segregācija pēc to izmēra, smalkajām daļiņām tiecoties pārvietoties uz maisījuma apakšu, lielajām – paceļoties maisījuma virspusē, šis fenomens bieži tiek dēvēts par “Brazīlijas riekstu efektu”. [2] [3]

Šajā promocijas darbā granulārā materiāla daļiņu izmēra segregācija tiek analizēta *DSH* (*Dust Supression Hopper*) [4] bunkura izplūdē radiālā virzienā (1.1. att.). Caurplūdes bunkura skaitliskais DEM modelis izveidots, izmantojot divu dažādu izmēru – 2 mm un 0,4 mm smilts daļiņu maisījumu. Kontakta definēšanai starp daļiņām, daļiņām un ģeometriju tiek izmantots Herca–Mindlina kontakta modelis (1.1. formula). [5]

$$F_n = \frac{4}{3} E' \sqrt{R'} \sigma_n^{\frac{3}{2}}, \quad (1.1.)$$

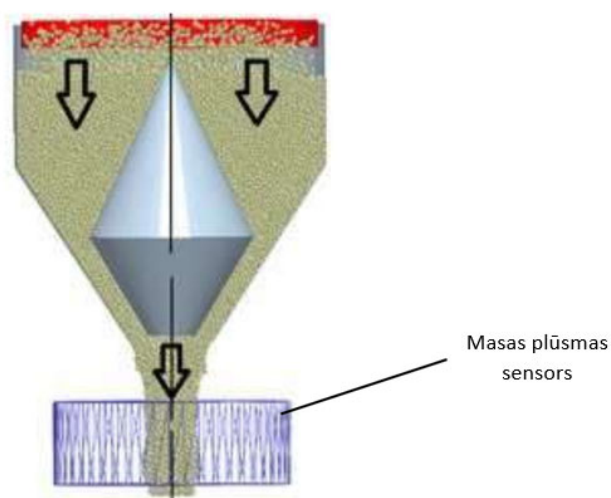
kur: F_n – spēks normāles virzienā, N;
 E' – ekvivalentais Junga modulis, MPa;
 R' – ekvivalentais rādiuss, m;
 σ_n – kontakta dziļums, m.

Skaitliskais modelis izveidots, izmantojot programmu *EDEM* [5]. Kopējais brīvības pakāpju skaits sistēmā ir atkarīgs no daļiņu skaita simulācijā, sasniedzot līdz pat 800 000 brīvības pakāpēm, tādējādi radot sarežģītus datoraprēķinus.

Daļiņu segregācija tiek analizēta masas plūsmas sensorā, kas atrodas zem bunkura izplūdes atvēruma. Lai aprakstītu segregāciju, tiek nomērīts katras daļiņas attālums no bunkura vertikālās centra ass, tādējādi iegūstot daļiņu sadalījumu masas plūsmas sensorā radiālajā virzienā (1.2. att.).

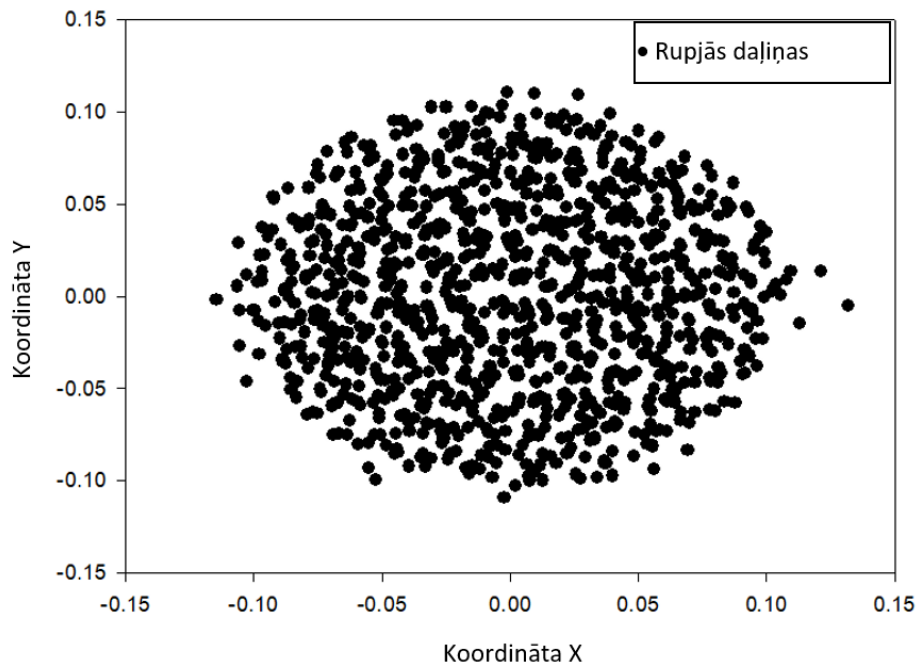


a



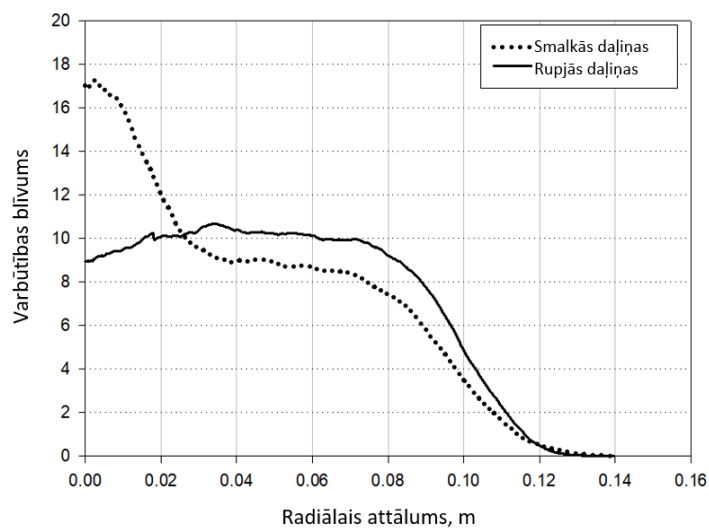
b

1.1. att. *DSH* caurplūdes bunkurs: a – smilts pārkraušanas process; b – caurplūdes bunkura skaitliskais modelis, izmantojot DEM.



1.2. att. Rupjo daļiņu sadalījums bunkura izplūdē.

Iegūtie dati tiek izmantoti, lai analizētu daļiņu varbūtības blīvuma sadalījumu (1.3. att.) skaitliskajos modeļos. Segregācijas definēšanai tiek lietota attiecība starp smalko un rupjo daļiņu vidējo radiālo attālumu no bunkura centra ass.



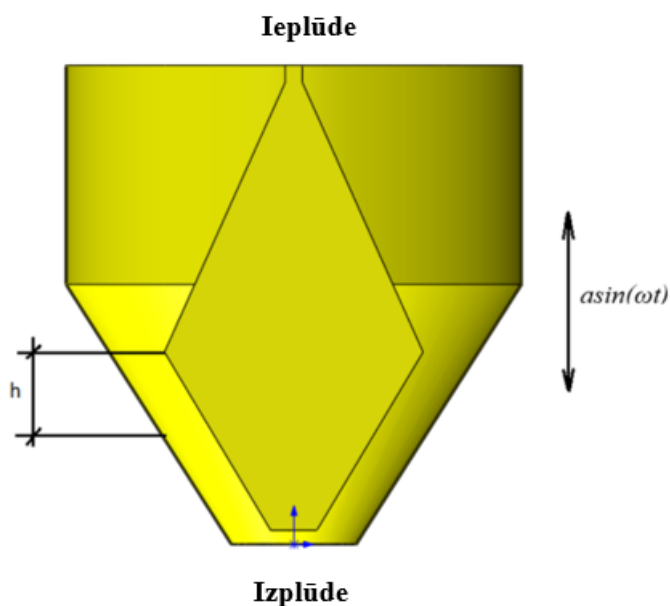
1.3. att. Varbūtības blīvuma sadalījums rupjajām un smalkajām daļiņām.

Kā papildu parametrs radiālās segregācijas novērtējumam radiālajā virzienā tiek lietota smalko daļiņu masas attiecība granulārā materiāla plūsmas ārējā gredzenā. Smalko daļiņu masas attiecība tiek analizēta ārējās plūsmas gredzenā ar dažādu gredzena biezumu – 2 %, 5 %, 10 %, 12 % no kopējā plūsmas šķēluma laukuma. Jo mazāka ir smalko daļiņu masas attiecība plūsmas ārējā gredzenā, jo mazāka ir putekļu veidošanās iespēja un to nokļūšana apkārtējā vidē, granulārajam materiālam izplūstot no bunkura.

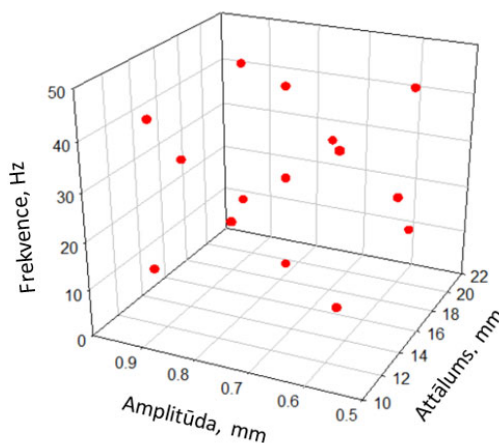
2. SEGREGĀCIJAS ANALĪZE PĀRKRAUŠANAS BUNKURĀ, IEVĒROJOT NENOTEIKTĪBU

2.1. Vertikālo svārstību ietekme uz segregāciju

Lai atrastu maksimālo daļiņu segregāciju skaitliskajā bunkura modelī (2.1. att.), tiek izmantots otrās kārtas ortogonālais eksperimentu plāns ar 15 eksperimenta punktiem. Maksimālā segregācija nodrošina smalko daļiņu koncentrēšanos plūsmas centrā, tādējādi neļaujot maisījuma smalkajām daļiņām nonākt plūsmas ārpusē un radīt putekļus bunkura ekspluatācijas laikā. Kā mainīgie ieejas parametri tiek izmantoti vertikālo svārstību amplitūda a , frekvence ω un vertikālais attālums h starp bunkuru un pludiņu.



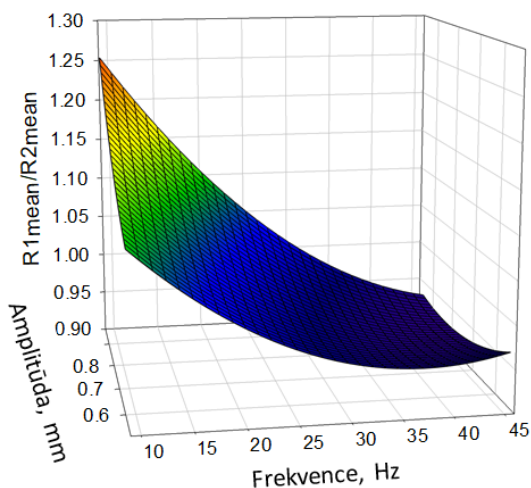
2.1. att. Bunkura konstrukcijas skaitliskais modelis.



2.2. att. Otrās kārtas ortogonālais eksperimentu plāns ar 15 eksperimentu punktiem.

Segregācijas analīzei tiek izmantots parametrs $RI_{\text{mean}}/R2_{\text{mean}}$, kas apraksta smalko un rupjo daļiņu varbūtības blīvuma attiecību. Lai analizētu skaitlisko modeļu atbildes, tiek izmantota otrās kārtas aproksimācija, iegūstot $\sigma_{\text{cross}} = 15\%$, kas norāda, ka aproksimācija ir lietojama

rezultātu apstrādei. σ_{cross} ir vidējā kvadrātiskā krosvalidācijas kļūdas attiecība pret standartnovirzi eksperimentālajām vērtībām no to vidējās vērtības.



2.3. att. $R1_{\text{mean}}/R2_{\text{mean}}$ atbildes virsma.

Iegūtais metamodelis norāda, ka maksimālo segregāciju var sasniegt pie svārstību amplitūdas $a = 0,899$ mm, vertikālā attāluma starp bunkuru un pludiņu $h = 10$ mm un pie maksimālās svārstību frekvences $f = 50$ Hz. Optimuma punktā daļiņu varbūtības blīvuma sadalījuma attiecība $R1_{\text{mean}}/R2_{\text{mean}} = 0,85$ (2.3. att.). Apskatītais modelis rāda, ka vertikālo svārstību frekvencei un amplitūdai ir būtiska ietekme uz daļiņu segregāciju radiālajā virzienā bunkura izplūdē.

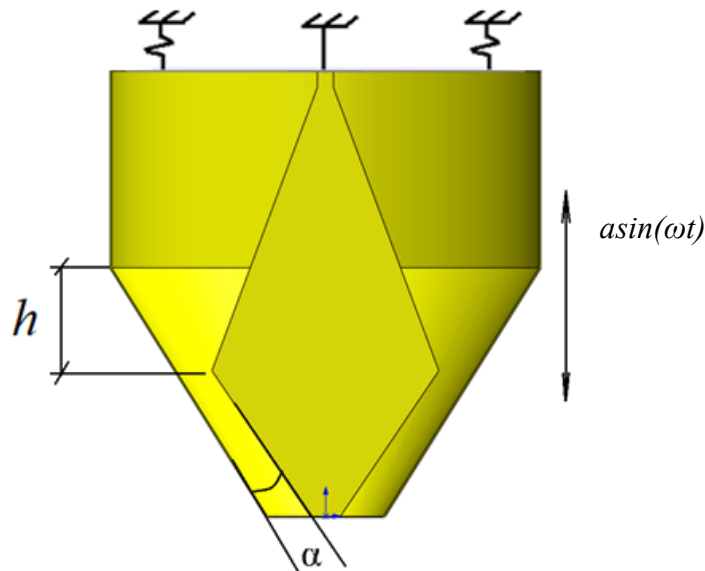
2.2. Bunkura izplūdes leņķa un svārstību ietekme uz radiālo segregāciju

Bunkura izplūdes leņķis ir kritiski svarīgs parametrs bunkura konstrukcijā. Atkarībā no granulārā materiāla praksē tiek izmantoti bunkuri ar dažādu izplūdes leņķi un diametru, ko var noteikt, izmantojot 2.1. analītisko vienādojumu. [6]

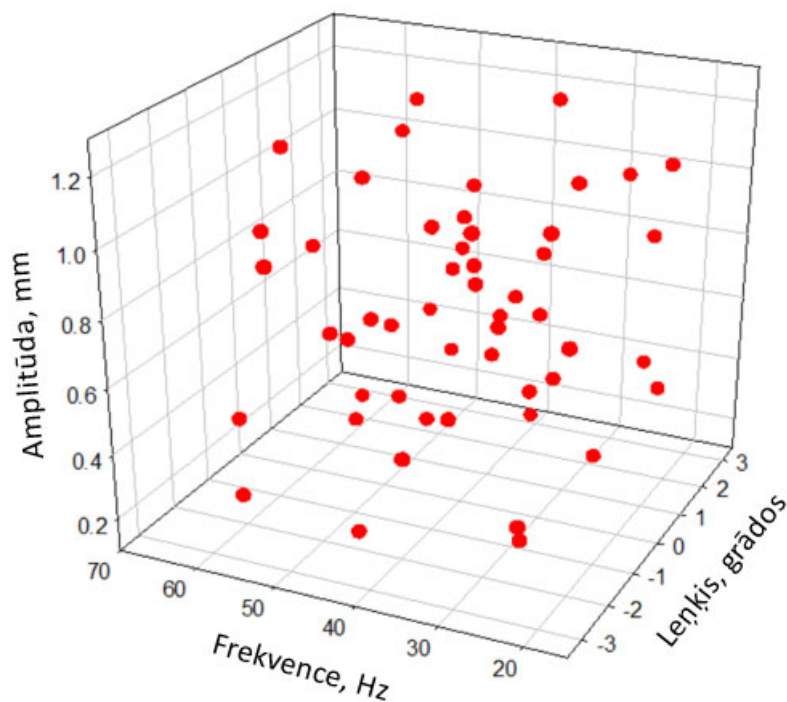
$$D = \left(2 + \frac{\alpha}{60}\right) \frac{\sigma_c}{\rho g}, \quad (2.1.)$$

kur: D – izplūdes diametrs, m;
 α – izplūdes leņķis, deg;
 σ_c – kritiskais spriegums, MPa;
 ρ – granulārā materiāla blīvums, kg/m^3 .

Lai novērtētu bunkura izplūdes leņķa ietekmi uz granulārā materiāla radiālo segregāciju, tiek izmantots otās kārtas ortogonālais eksperimentu plāns ar 51 eksperimenta punktu (2.5. att.). Kā ieejas mainīgie parametri tiek izmantoti: pludiņa augstums h , izplūdes leņķis α , vertikālo svārstību frekvence ω , svārstību amplitūda a (2.4. att.).



2.4. att. Skaitliskā modeļa šķērsriezuma skats: h – vertikālais attālums starp bunkuru un pludiņu; α – izplūdes leņķis.



2.5. att. Otrās kārtas ortogonālais eksperimentu plāns ar 51 eksperimentālo punktu.

Aproksimācijas relatīvā kļūda tiek noteikta kā kvadrātsakne no vidējās kvadrātiskās kļūdas attiecības pret eksperimentāli iegūtās funkcijas kvadrātisko novirzi no vidējās vērtības (2.2. formula).

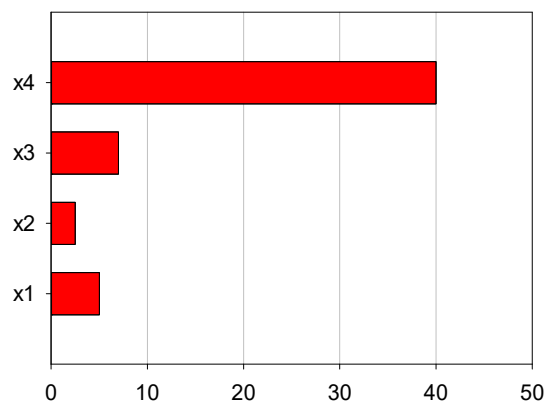
$$\sigma_{\text{test rel}} = 100\% \frac{\sigma_{\text{test}}}{\sigma_{\text{exp}}} = 100\% \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{y}(x_j^*) - y(x_j^*))^2}}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.2.)$$

kur: x_j^* – eksperimenta punkti;
 N – eksperimentu punktu skaits.

Aproksimācijas precizitātes novērtēšanai tiek izmantots R^2 (2.3. formula). [7]

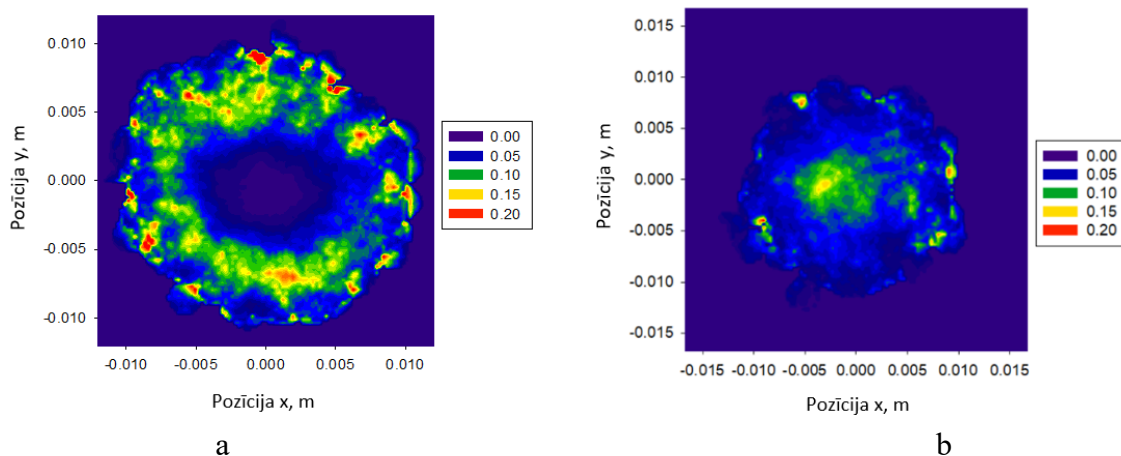
$$R^2 = 1 - \frac{\sigma_{\text{test}}^2}{\sigma_{\text{exp}}^2} = 1 - \left(\frac{\sigma_{\text{test rel}}}{100}\right)^2, \quad (2.3.)$$

Izmantojot otrās kārtas aproksimāciju, tiek iegūts metamodelis parametram RI_{mean} ar krosvalidācijas kļūdu $\sigma_{\text{cross}} = 16\%$ un $R^2 = 0,974$ un $R2_{\text{mean}}$ ar krosvalidācijas kļūdu $\sigma_{\text{cross}} = 18\%$ un $R^2 = 0,973$. Iegūtais metamodelis parāda, ka RI_{mean} un $R2_{\text{mean}}$ maksimālās vērtības palielinās, palielinoties izplūdes leņķim, svārstību frekvencei un svārstību amplitūdai. Pareto svarīguma sadalījums norāda, ka vislielākā ietekme uz granulārā materiāla segregāciju ir pludiņa augstumam h , otrs svarīgākais parametrs ir svārstību frekvence ω , kam seko izplūdes leņķis α un svārstību amplitūda a . (2.5. att.).



2.6. att. Pareto parametru svarīguma sadalījums.

Optimuma punkts ar vērtību $RI_{\text{mean}}/R2_{\text{mean}} = 0,692$ tiek iegūts pie svārstību frekvences $\omega = 57,348$ Hz, svārstību amplitūdas $a = 1,125$ mm, izplūdes leņķa $\alpha = -3,333^\circ$ un pie pludiņa augstuma $h = 25$ mm.



2.7. att. Smalko un rupjo daļiņu attiecība bunkura izplūdē: a – pirms optimizācijas; b – optimālajā modelī.

Sākotnējā modelī vērojama smalko daļiņu koncentrēšanās granulārās plūsmas ārējā gredzenā (2.7. a att.). Optimizācijas rezultātā iegūtajā modelī smalkās daļiņas koncentrējas tuvāk plūsmas centram, tādējādi samazinot putekļu veidošanās iespējamību (2.7. b att.).

Skaitlisko eksperimentu rezultāti parāda, ka ir iegūts jauns radiālās segregācijas modelis, kur smalko un rupjo daļiņu sadalījums ir atkarīgs no svārstību amplitūdas un frekvences. Iegūtajā modelī, kur smalkās daļiņas koncentrējas plūsmas centrā un ir ierobežotas no apkārtējās vides ar rupjo daļiņu plūsmu, tiek samazināta iespējamība smalkajām daļiņām veidot putekļus un nonākt apkārtējā vidē.

2.3. Nenoteiktības ietekmes vērtējums

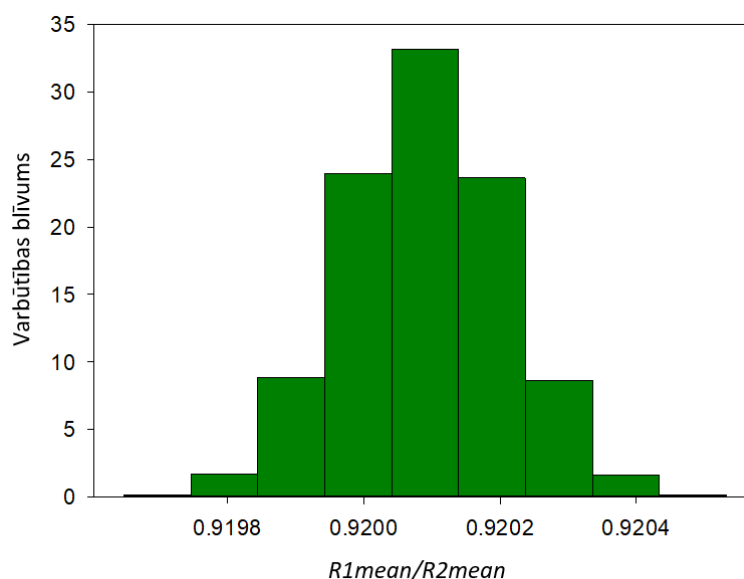
Pēc optimālā modeļa iegūšanas tiek veikts nenoteiktības ietekmes vērtējums uz segregāciju atkarībā no nenoteiktības granulārā materiāla īpašībām – blīvuma, atlēciena koeficienta un berzes koeficienta, izmantojot šo parametru vidējās vērtības un standarta novirzi:

- blīvuma vidējā vērtība $\rho_{vid} = 2400 \text{ kg/m}^3$;
- blīvuma standarta novirze $STD_{\rho} = 4 \%$;
- atlēciena koeficienta vidējā vērtība $e_{vid} = 0,6$;
- atlēciena koeficienta standarta novirze $STD_e = 5 \%$;
- berzes koeficienta vidējā vērtība $\mu_{vid} = 0,5$;
- berzes koeficienta standarta novirze $STD_{\mu} = 5 \%$.

Lai noteiktu granulārā materiāla īpašību ietekmi uz segregāciju optimālajā modelī, tiek izpildīts eksperimentu plāns, kur faktori ir daļiņu īpašības, un iegūts metamodelis, kas raksturo segregācijas atkarību no daļiņu mehāniskajām īpašībām.

Tiek iegūtas segregācijas vērtības normālais sadalījums (2.8. att.). Sadalījumam tiek noteiktas izkliedes robežas, izmantojot 95 % varbūtību.

Ievērojot nenoteiktību no granulārā materiāla blīvuma, segregācijas vērtība ar 95 % varbūtību nepārsniedz izkliedes robežu $R1_{mean}/R2_{mean} = 0,9203$. Ietverot nenoteiktību no granulārā materiāla berzes koeficienta un atlēciena koeficienta, segregācijas vērtība ar 95 % varbūtību nepārsniedz izkliedes robežu $R1_{mean}/R2_{mean} = 0,9202$.



2.8. att. Segregācijas varbūtības blīvuma sadalījums, ietverot nenoteiktību no granulārā materiāla blīvuma.

3. BUNKURA CAURPLŪDES ANALĪZE, IZMANTOJOT FIZIKĀLO PROTOTIPU

Svārstības bieži tiek izmantotas, lai pasargātu bunkuru no materiāla nosprostošanās. Bunkura izplūdes laikā daudzos gadījumos veidojas tuneļveida materiāla plūsma, kad daļiņas pielīp pie bunkura sienām. Gadījumos, kad bunkurs ir pakļauts horizontālām svārstībām, tuneļveida plūsma pārvēršas par apgriezto tuneļveida plūsmu, kad materiāls, kas atrodas tuvāk bunkura sienām, izplūst no bunkura ātrāk nekā daļiņas, kas atrodas bunkura centrā. [8] Lai analizētu plūsmas veidu un granulārā materiāla caurplūdi, tiek veikti fizikālie un skaitliskie eksperimenti.

Bunkura caurplūde samazinās, ja bunkurs tiek pakļauts vertikālām svārstībām, un tā ir atkarīga no svārstību paātrinājuma (3.1. formula) [9]:

$$\Gamma = \frac{a\omega^2}{g}, \quad (3.1.)$$

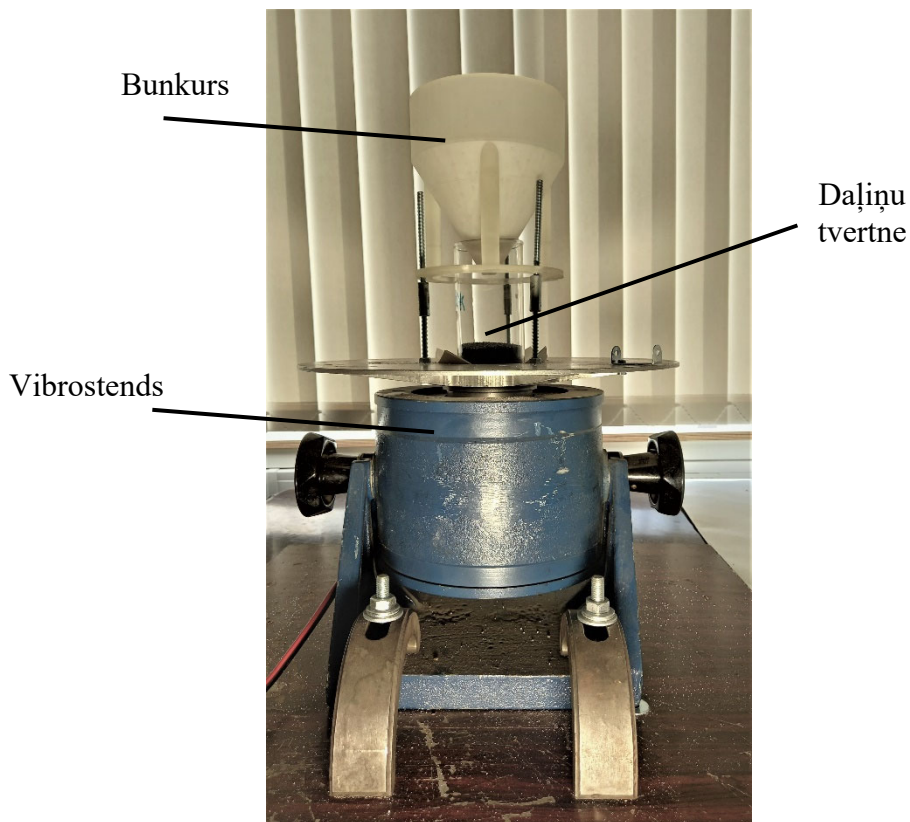
kur: Γ – bezdimensiju paātrinājums;
 a – svārstību amplitūda, m;
 ω – svārstību frekvence, rad/s
 g – gravitācijas paātrinājums, m/s².

Bunkuram, kam nav pieliktas vertikālas svārstības, caurplūdi var noteikt pēc 3.2. analītiskā vienādojuma:

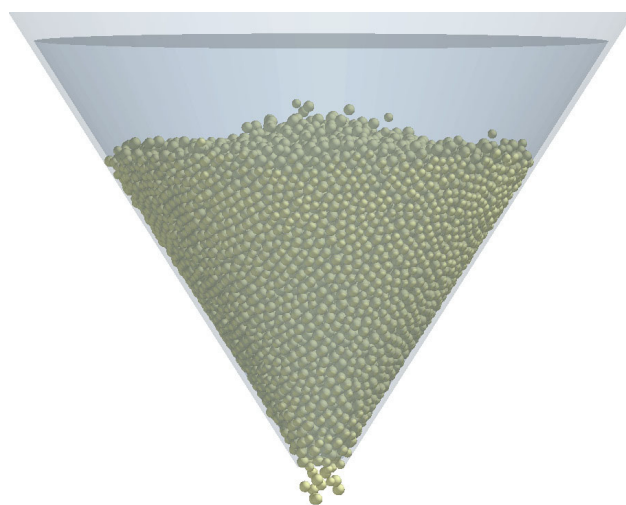
$$\dot{m} = \rho \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{Dg}{4\tan(\alpha)}}, \quad (3.2.)$$

kur: m – caurplūdes ātrums, kg/s;
 D – izplūdes diametrs, m;
 ρ – materiāla blīvums, kg/m³
 α – bunkura izplūdes leņķis, deg.

Šajā darbā bunkura izplūdes ātrums tiek analizēts, izmantojot bunkura fizikālu prototipu, kas ir fiksēts uz vibrostenda (3.1. att.), savukārt skaitliskais modelis izveidots, izmantojot *EDEM* (3.2. att.). Tiek apskatītas svārstības bezdimensiju paātrinājuma robežās $\Gamma = 0-5$, kur svārstību frekvence mainās robežās 0–35 Hz. Fizikālajiem un skaitliskajiem eksperimentiem tiek izmantotas stikla lodītes ar diametru 1,0–1,3 mm.



3.1. att. Fizikālā eksperimenta iekārta.



3.2. att. Skaitliskais modelis programmā *EDEM*.

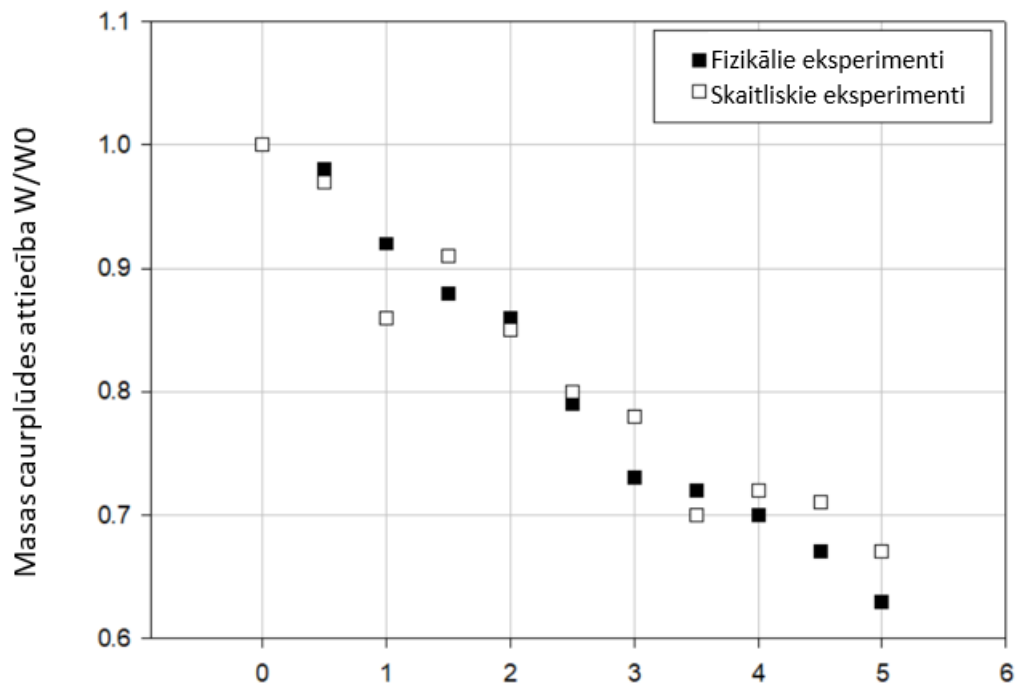
Fizikālie un skaitliskie eksperimenti tiek izpildīti, bunkuru pakļaujot vertikālām svārstībām. Tiek analizēta bunkura bezdimensijas masas caurplūdes attiecība (attiecība starp granulārā materiāla izplūdes ātrumu gadījumā ar svārstībām pret gadījumu bez svārstībām). Skaitliskajā modelī tiek izmantota berzes koeficienta teorētiskā vērtībā, un modelī iekļauta gaisa pretestība (3.2.) [10], kā arī ņemta vērā daļiņu kustības ierosinātā gaisa kustība.

$$F_d = C_d \frac{1}{2} \rho_a (v_a - v_p)^2 \frac{1}{4} \pi d_p^2 = C_d \frac{1}{2} \rho_a (v_a - v_p)^2 S, \quad (3.2.)$$

kur: v_a – gaisa plūsmas ātrums, m/s;
 v_p – daļiņas ātrums, m/s;
 ρ_a – gaisa blīvums, kg/m³;

d_p – daļiņas diametrs, m;
 S – daļiņas šķērsriezuma laukums, m^2 ;
 C_d – pretestības koeficients.

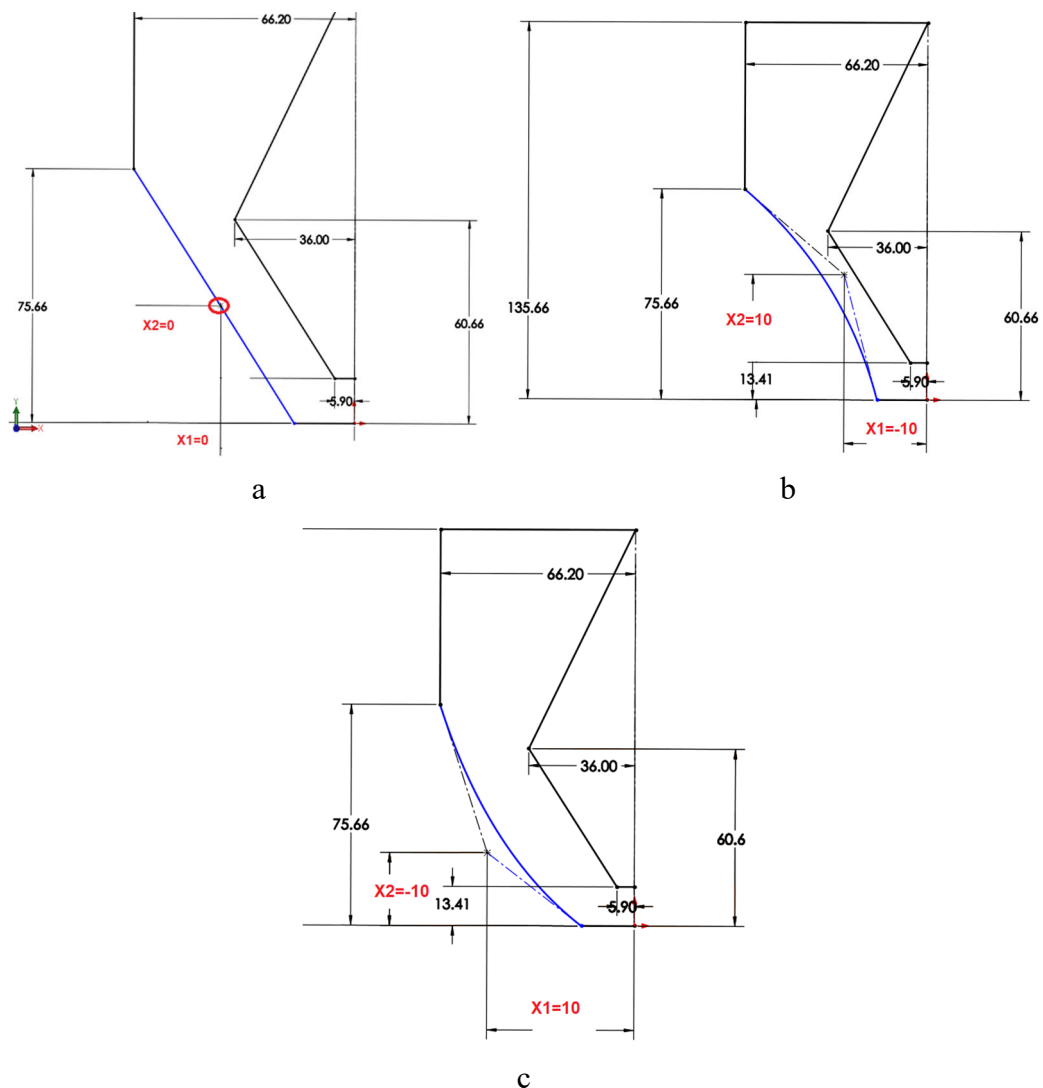
Fizikālie un skaitliskie eksperimenti parāda, ka bunkura izplūdes ātrums samazinās, pieaugot bezdimensiju svārstību paātrinājumam (3.3. att.).



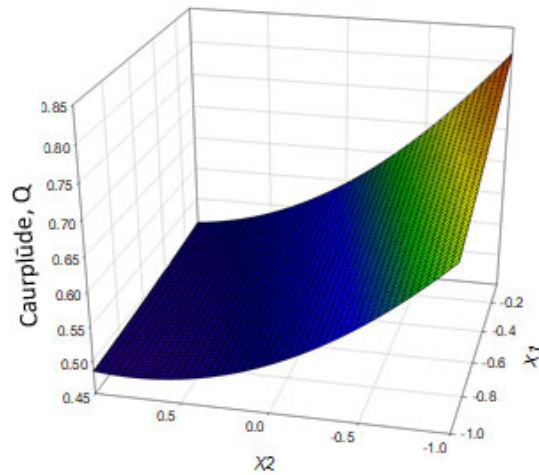
3.3. att. Bunkura bezdimensiju izplūdes ātrums fizikālajos un skaitliskajos eksperimentos.

4. BUNKURA FORMAS OPTIMIZĀCIJA, IEVĒROJOT NENOTEIKTĪBU

Tādu mehānismu un iekārtu kā caurplūdes bunkurs, formas optimizācija ir būtiska, jo optimizācijas rezultātā ir iespējams pilnveidot iekārtas darbību un padarīt to efektīvāku [11]. Bunkura izplūdes konusam ir būtiska ietekme uz daļiņu segregāciju un materiāla izplūdes ātrumu. Lai novērtētu bunkura konusa formas ietekmi uz caurplūdi un granulārā materiāla radiālo segregāciju un to optimizētu, tiek izmantots otrās kārtas ortogonālais eksperimentu plāns ar deviņiem eksperimenta punktiem. Bunkura konusa forma tiek definēta, izmantojot “B-splainu” ar kontroles punkta koordinātu $X1$ un $X2$. Kā eksperimentālais centra punkts tiek izmantots bunkurs ar klasisko formu, kur $X1 = 0$, $X2 = 0$ (4.1. a att.), ar minimālo vērtību $X1$ un maksimālo vērtību $X2$ tiek definēts ieliektas formas bunkurs (4.1. b att.), savukārt ar maksimālo $X1$ un minimālo $X2$ tiek definēts izliektas formas bunkurs (4.1. c att.).

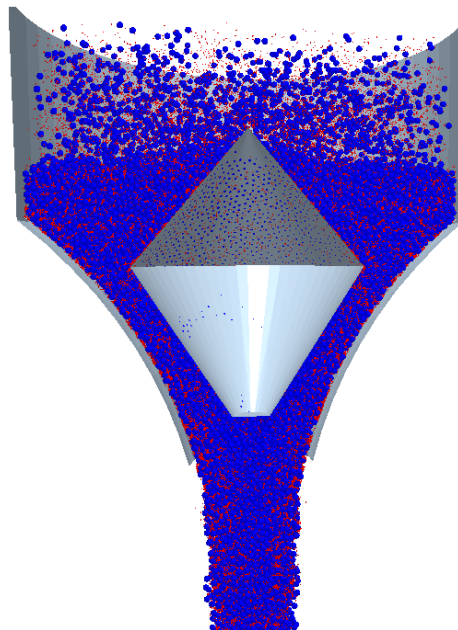


4.1. att. Bunkura formas parametri $X1$ un $X2$: a – sākotnējā forma; b – ieliekta forma; c – izliekta forma.



4.2. att. Atbildes virsma bunkura caurplūdei.

Izmantojot otrās kārtas aproksimāciju, tiek iegūta atbildes virsma bunkura caurplūdei. Aproksimācijas precizitāti raksturo $\sigma_{\text{cross}} = 14,89\%$ un $R^2 = 0,999$, norādot, ka aproksimācija ir lietojama. Iegūtais metamodelis norāda, ka maksimālo caurplūdi var sasniegt pie minimālām $X1$ un maksimālām $X2$ vērtībām noteiktajā dotajā diapazonā, tādējādi maksimālā caurplūde tiek iegūta bunkura modelī ar ieliektu formu (4.3. att.).



4.3. att. Bunkura optimizētais modelis.

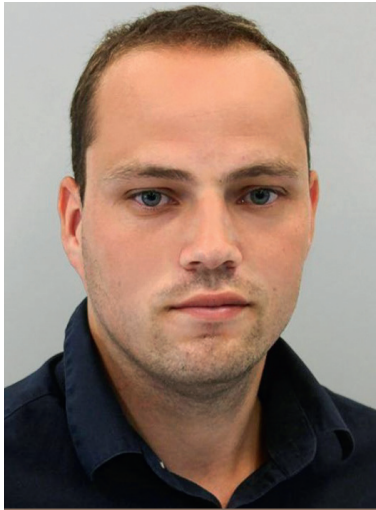
Optimālajā modelī bunkura caurplūde pieaug par 51,67 %, salīdzinot ar tradicionālās formas bunkuru (4.1. a att.).

5. SECINĀJUMI

1. Ir atklāts jauns segregācijas modelis pēc daļiņu lieluma radiālajā virzienā. Segregācijas modelis ir apstiprināts ar fizikālajiem un skaitliskajiem modeļiem. Maisījuma smalko un rupjo daļiņu segregācija radiālajā virzienā bunkura izplūdē ir atkarīga no vertikālo svārstību frekvences un amplitūdas. Palielinoties svārstību frekvencei, smalko daļiņu koncentrācija granulārā materiāla plūsmas ārējā gredzenā samazinās, tādējādi samazinot bīstamu materiālu putekļu veidošanos un vides piesārņojumu.
2. Veikts komplekss teorijas apskats par metamodelēšanas pieejām, eksperimentu plāniem un DEM. Aprakstīti dažādi caurplūdes bunkuri, kas izmantoti praksē dažādās jomās. Veikts apskats par granulārā materiāla segregācijas veidiem. Aprakstīts DEM lietojums granulārā materiāla plūsmas modelēšanā, veikts apskats par biežāk lietotajiem daļiņu savstarpējiem mijiedarbības modeļiem.
3. Izmantojot programmu *EDEM*, izveidots skaitliskais modelis granulārā materiāla plūsmas analīzei caurplūdes bunkurā, kas sastāv no vairāk nekā 1,2 milj. brīvības pakāpēm. Skaitliskais modelis ir bāzēts bunkura konstrukcijā, kas sastāv no ārējā konusa un iekšējā pludiņa. Ir veikti fizikālie eksperimenti granulārā materiāla caurplūdes ātruma noteikšanai, izmantojot 3D drukātu fizikālo prototipu un vibrostendu, lai validētu skaitlisko modeli.
4. Lai raksturotu materiāla segregāciju, lietota smalko un rupjo daļiņu varbūtības blīvuma vidējās vērtības attiecība.
5. Gaisa pretestības ietekme uz granulārā materiāla plūsmu analizēta, izmantojot programmas *SolidWorks Flow Simulation* un *ANSYS Fluent*. Novērtēta daļiņu kustības ierosinātās gaisa plūsmas ietekme uz granulārā materiāla plūsmu.
6. Izmantojot metamodeļus, novērtēta granulārā materiāla mehānisko īpašību ietekme uz daļiņu segregāciju bunkura izplūdē. Vislielākā ietekme uz segregāciju ir daļiņu atlēciena koeficientam un blīvumam. Būtiska ietekme ir arī daļiņu berzes koeficientam.
7. Ir noteikta bunkura formas ietekme uz granulārā materiāla caurplūdi un radiālo segregāciju. Iegūtie rezultāti izmantoti, lai veiktu bunkura formas optimizāciju, ietverot nenoteiktību no granulārā materiāla mehāniskajām īpašībām. Optimizācijas rezultātā iegūta ielikta bunkura forma, kas ļauj palielināt caurplūdes ātrumu par 51,67 %, salīdzinot ar tradicionālas formas bunkuru.
8. Metamodeļos noteiktas parametru izkliedes robežas, ietverot nenoteiktību. Skaitliskie rezultāti rāda, ka nenoteiktības no granulārā materiāla īpašībām – blīvuma, atlēciena koeficienta un berzes koeficienta – būtiski neietekmē bunkura optimālos parametrus, ietekmējot tos 2 % robežās.
9. Iegūtos rezultātus un izstrādāto metodi var izmantot turpmākai granulārā materiāla segregācijas izpētei, ievērojot tehnoloģiskā procesa nenoteiktību. Izveidotos skaitliskos modeļus var izmantot granulārā materiāla transportēšanas aprīkojuma optimizācijai.

LITERATŪRAS SARAKSTS

- [1] L. Bates, *User Guide to Segregation*, Elsinore House, Marlow, England: British Materials Handling Board, 1997.
- [2] A. Rosato, K. J. Strandburg, F. Prinz and R. H. Swendsen, "Why the Brazil Nuts are on Top," *Physical Review Letters*, vol. 58, pp. 1038–1040, 1987.
- [3] B. Andreotti, Y. Forterre and O. Pouliquen, *Granular Media. Between Fluid and Solid.*, Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] DSH Systems Ltd., "DSH Systems dust control products," [Online]. Available: <https://dshsystems.com/dsh-products/>. [Accessed 14. 10. 2020].
- [5] DEM Solution Ltd., *EDEM 2.6 Theory Reference Guide*, Edinburgh, 2014.
- [6] J. L. Amoros, G. Mallol, E. Sanchez and J. Garcia, "Design of Bins and Hoppers for the Storage of Particulate Materials. Problems Associated with the Discharge Operation," *Qualicer 2000*, pp. 41–58, 2000.
- [7] J. Auzins and A. Janusevskis, *Eksperimentu plānošana un analīze*, Rīga: RTU izdevniecība, 2007.
- [8] M. L. Hunt and R. C. Weathers, "Effects of horizontal vibration on hopper flows of granular materials," *Physics of Fluids*, vol. 11, pp. 68–75, 1999.
- [9] M. L. Hunt and C. Wassgren, "Effects of Vertical Vibration on Hopper Flows of Granular Material," *Physics of Fluids*, vol. 14, pp. 335–348, 2002.
- [10] D. Wang and L. Xiaochuan, "Study of Airflow Induced by Regular Particles in Freefall Trough Tubes," *Advanced Powder Technology*, vol. 31, pp. 169–180, 2020.
- [11] H. R. Myers, C. D. Montgomery and C. M. Anderson – Cook, *Response Surface Methodology. Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Fourth edition., New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.



Ivo Vaicis dzimis 1990. gadā Talsos. Rīgas Tehniskajā universitātē (RTU) ieguvis bakalaura grādu mehānikā un mašīnbūvē (2012) un maģistra grādu mehānikā un mašīnbūvē (2014). RTU strādā kopš 2016. gada, ieņemot lektora un pētnieka amatu. Zinātniskās intereses saistītas mehānisko sistēmu elementu formas optimizāciju un granulārā materiāla plūsmas pētīšanu.