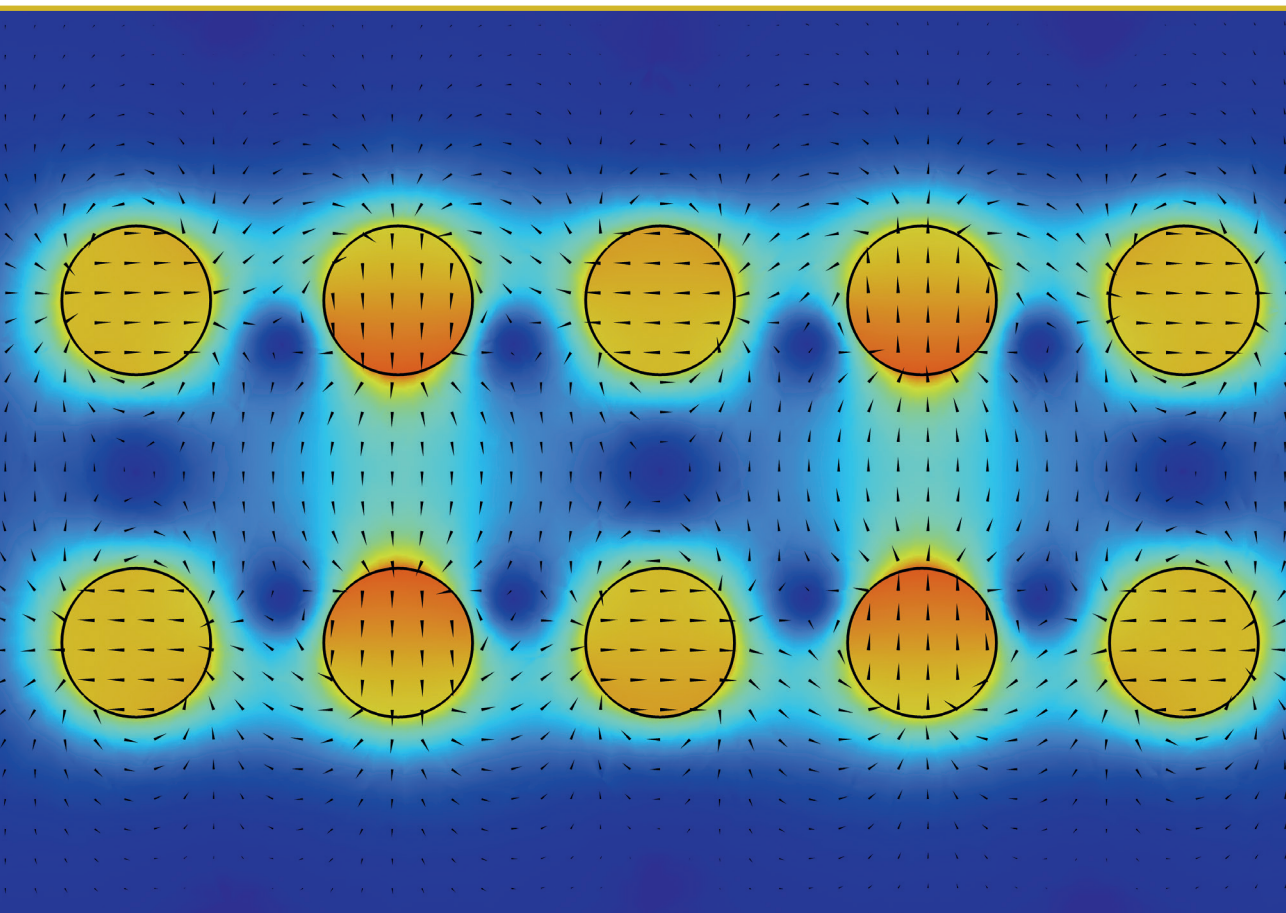


Matīss Kalvāns

METALURĢIJAI PAREDZĒTU ROTĒJOŠU PASTĀVĪGO MAGNĒTU DIPOLU SŪKŅU DINAMIKAS ANALĪZE UN OPTIMIZĀCIJA

Promocijas darba kopsavilkums



RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte
Mehānikas un mašīnbūves institūts

Matīss Kalvāns

Doktora studiju programmas “Inženiertehnika, mehānika un mašīnbūve” doktorants

METALURĢIJAI PAREDZĒTU ROTĒJOŠU PASTĀVĪGO MAGNĒTU DIPOLU SŪKŅU DINAMIKAS ANALĪZE UN OPTIMIZĀCIJA

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskie vadītāji:
profesors *Dr. sc. ing.*
JĀNIS AUZIŅŠ,

Dr. phys.
ANDRIS BOJAREVIČS

RTU Izdevniecība
Rīga 2023

Kalvāns M. Metalurģijai paredzētu rotējošu pastāvīgo
magnētu dipolu sūkņu dinamikas analīze un optimizācija.
Promocijas darba kopsavilkums.
Rīga: RTU, 2023. – 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar promocijas padomes
“RTU P-04” 2023. gada 2. jūnija lēmumu,
protokols Nr. 56.

Vāka attēla autors – Matīss Kalvāns

<https://doi.org/10.7250/9789934229619>
ISBN 978-9934-22-961-9 (pdf)

PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS ZINĀTNES DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ

Promocijas darbs zinātnes doktora (*Ph. D.*) grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2023. gada 20. septembrī plkst. 14.30 Rīgas Tehniskās universitātes Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultātē, Ķīpsalas ielā 6B, 521. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

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

Profesors *Dr. phys.* Andris Jakovičs,
Latvijas Universitāte, Latvija

Profesors *Dr.-Ing.* Egbert Baake,
Leibniz Universität Hannover, Vācija

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.

Vārds, uzvārds (paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, tajā ir ievads, četras nodaļas, secinājumi, literatūras saraksts, 98 attēli, piecas tabulas, viens pielikums, kopā 101 lappuse, ieskaitot pielikumu. Literatūras sarakstā ir 83 nosaukumi.

Saturs

TĒMAS AKTUALITĀTE.....	5
DARBA MĒRĶIS.....	5
ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE.....	5
PUBLIKĀCIJAS.....	6
1. VIENA PASTĀVĪGĀ MAGNĒTA DIPOLA SŪKŅI.....	8
1.1 Viena PM cilindra modeļa sūknis	8
1.2 Viena cilindra PM dipola sūkņa skaitliskā modelēšana	11
1.3 Viena PM sūkņa šķidra metāla plūsmas izpēte lineārā kanālā.....	15
1.4 Industriālais prototips	18
2. VAIRĀKU PASTĀVĪGO MAGNĒTU SŪKŅI	21
2.1 Divpusējais sūknis	21
3. ŠĶIDRA METĀLA MAISĪTĀJI.....	24
3.1 Modeļa eksperiments izkausēta metāla temperatūras homogenizācijai ar rotējošu pastāvīgo magnētu	24
3.2 Divu cilindru maisītājs.....	28
4. SECINĀJUMI.....	30
IZMANTOTĀ LITERATŪRA.....	31

TĒMAS AKTUALITĀTE

Šķidra metāla sūkņi galvenokārt tiek lietoti kodolreaktoros un metalurģijā. Elektromagnētiskās indukcijas sūkņi, kuros lieto strāvas vijumus, jau ir plaši zināmi, taču pastāvīgo magnētu ierīces ir pētītas salīdzinoši maz. Līdz ar retzemju pastāvīgo magnētu attīstību elektromagnētiskie indukcijas sūkņi, kuros izmanto pastāvīgos magnētus, ir kļuvuši arvien pieejamāki dažādiem lietojumiem.

DARBA MĒRĶIS

Promocijas darba mērķis ir izpētīt šķidra metāla sūkņus ar rotējošiem cilindriskiem magnētiem, kuru magnetizācija ir perpendikulāra to simetrijas asij, novērtēt šādu iekārtu lietojumu metalurģiskajos procesos un piedāvāt jauna veida elektromagnētiskās ierīces metalurģiskiem lietojumiem, izmantojot rotējošus pastāvīgo magnētu dipolus.

Lai sasniegtu promocijas darba mērķi, definēti vairāki uzdevumi.

- Veikt esošo pastāvīgo magnētu sūkņu izpēti un analīzi metalurģiskiem lietojumiem.
- Izpētīt pastāvīgo magnētu materiālus un to lietojumus metalurģijā.
- Veikt sūkņu ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem parametru teorētiskos aprēķinus.
- Veikt sūkņu ar pastāvīgajiem magnētiem elektromagnētisko parametru un radīto šķidra metāla plūsmu eksperimentālu izpēti.
- Atrast racionālus un optimālus sūkņu ar pastāvīgajiem magnētiem parametrus metalurģiskiem lietojumiem.
- Izstrādāt skaitliskos modeļus sūkņu parametru aprēķinam un veikt to verifikāciju un validāciju.

AIZSTĀVĒŠANAI IZVIRZĪTĀS TĒZES

- Šķidra metāla sūkņī, kurā pastāvīgo magnētu cilindri atrodas divās rindās, ir optimāls savstarpējo pastāvīgo magnētu magnetizācijas virzienu izkārtojums, kas nodrošina stabilu ierīces darbību.
- Pastāvīgo magnētu sūkņus var izmantot tādiem metalurģijas uzdevumiem kā maisīšana, sūkņēšana, ātrumu mērīšana, degazācija, kā arī hidrostatiskā spiediena radīšana.

ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE

Promocijas darbā pētītas dažādas MHD iekārtas, kas izmanto pastāvīgos magnētus metalurģijas vajadzībām. Ierosinātajās MHD ierīcēs ir iekļauti rotējoši radiāli magnetizēti pastāvīgie magnēti. Šajā pētījumā izstrādātā MHD ierīce ar vairākiem pastāvīgajiem magnētiem piedāvā jaunu tehnisku risinājumu, par ko iepriekš literatūrā nav ziņots. Darba gaitā noteikts optimāls magnētu izvietojuums šādas ierīces projektēšanai, kas nodrošina optimālu ierīces darbību. Šīs MHD sistēmas ir demonstrējušas augstu efektivitāti, padarot tās ideāli piemērotas izmantošanai metalurģijas krāsnīs, lai palīdzētu sajaukt un piegādāt kausētu metālu no krāsns uz kristalizētāju.

PUBLIKĀCIJAS

Galvenie darba rezultāti izklāstīti astoņās zinātniskās publikācijās žurnālos un recenzētos konferenču rakstu krājumos.

Publikācijas, kas indeksētas *SCOPUS* vai *Web of Science* datubāzēs

1. **Kalvāns, M.**, Bojarevičs, A., Beinerts, T., & Gaile, A. (2022). Single Dipole Permanent Magnet Induction Pump for Liquid Metals. *Magnetohydrodynamics* (0024-998X), 58.
2. Berga, K. K., Berenis, D., **Kalvāns, M.**, Krastiņš, I., Beinerts, T., Grants, I., & Bojarevičs, A. (2022). Model Experiment for Molten Metal Temperature Homogenization with Rotating Permanent Magnet. *JOM*, 74 (6), 2450–2460.
3. **Kalvāns, M.**, & Bojarevičs, A. (2020). Bilateral Liquid Metal Pump with Permanent Magnets. *Magnetohydrodynamics* (0024-998X), 56 (1).
4. Kaldre, I., Bojarevičs, A., Beinerts, T., Baranovskis, R., Nikoluskins, R., Milgrāvis, M., & **Kalvāns, M.** (2018, October). Contactless electromagnetic method for aluminium degassing. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 424, No. 1, p. 012057). IOP Publishing.

Patents

5. Bojarevičs, J. Geļfgats, T. Beinerts, **M. Kalvāns**, un R. Baranovskis, “Elektrovadošu metālistu un pusvadītāju kausējumu maisīšanas ierīce,” LV15144, 2016.

Publikācijas citos konferenču rakstu krājumos, žurnālos

6. Bojarevičs, R. Baranovskis, T. Beinerts, and **M. Kalvāns**, “Two Cylinder Permanent Magnet Liquid Metal Stirrer,” in Proceedings of the 10th PAMIR International Conference “Fundamental and Applied MHD,” 2016, pp. 431.–435.
7. **M. Kalvāns**, A. Bojarevičs, I. Kaldre, and T. Beinerts, “Assessment of Linear Permanent Magnet Liquid Metal Dispenser,” in Proceedings of the 10th PAMIR International Conference “Fundamental and Applied MHD,” 2016, pp. 289.–293.

Dalība starptautiskās konferencēs ar referātiem

8. **Kalvāns, M.**, Berga, K.K., Berenis, D. et al. “Model Experiment for Aluminum Melt Temperature Mixing With Rotating Permanent Magnets” 4th Conference & Exhibition on Light Materials, 02.–04. November 2021, Virtual Conference.
9. **M. Kalvāns**, A. Bojarevičs, “Viena pastāvīgā magnēta dipola indukcijas sūkņi šķidriem metāliem” LU 79. konferences sekcijas sēde “Materiālu elektromagnētiskās apstrādes un izpētes metodes” 2021. gada 26. februārī, Rīgā, Latvijā.

10. **M. Kalvāns**, A. Bojarevičs, and T. Beinerts, “Linear Permanent Magnet Liquid Metal Pump,” in 11th PAMIR International Conference – Fundamental and Applied MHD, 2019, pp. 312–316.
11. **M. Kalvāns**, A. Bojarevičs, T. Beinerts, “Desmit pastāvīgo magnētu divpusējais sūkņis” LU 76. konferences sekcijas sēde "Materiālu elektromagnētiskās apstrādes un izpētes metodes" 2018. gada 9. februārī, Rīgā, Latvijā.
12. **M. Kalvāns**, A. Bojarevičs, “Permanent Magnet Potential Difference Probe for 3D Liquid Metal Velocity Measurements”, 3rd International Workshop on Measuring Techniques for Liquid Metal Flows; no 2015. gada 13. līdz 18. aprīlim Drēzdenē, Vācijā.

1. VIENA PASTĀVĪGĀ MAGNĒTA DIPOLA SŪKŅI

1.1. Viena PM cilindra modeļa sūkņis

Ir zināms, ka pastāvīgo magnētu (PM) dipoli lielos attālumos no PM virsmas rada lielākas magnētiskā lauka vērtības nekā vairāku polu PM sistēmas [1]. To var izskaidrot, jo vairāku polu gadījumā notiek magnētiskā lauka dzēšanās starp poliem, kas kļūst nozīmīga, palielinoties attālumam. Ņemot vērā to, ka industriālos apstākļos darba vielām ir augsta temperatūra un tās atrodas noslēgtos traukos ar biežām keramikas sienām, attālumi starp PM virsmu un šķidro metālu ir lieli, tādēļ dipolu izmantošana ir piemērota.

Viena dipola pastāvīgā magnēta rotors, kas magnetizēts perpendikulāri rotācijas asij, rotējot rada skrejošu magnētisko lauku plakanā šķidra metāla kanālā un tiek izmantots, lai parādītu šķidrā metāla sūkņa efektivitāti. Skrejošs magnētiskais lauks šķidrā metāla iekšpusē rada virpuļveida elektrisko lauku. Inducētās elektriskās strāvas, mijiedarbojoties ar sākotnējo magnētisko lauku, rada spēku, kas proporcionāls magnētiskā lauka indukcijas intensitātes kvadrātam.

Ja tiktu izmantots biezs šķidra metāla kanāls, kanāla otrā pusē, kur magnētiskais lauks ir vājāks, izveidotos pretplūsma. Tātad pastāv optimāls kanāla biezums, kas nav ne pārāk plāns, kas radītu papildu hidrodinamisko pretestību, ne arī pārāk biezs. Līdzīgi jāņem vērā kanāla platums. Ir konstatēts, ka kanāla platumam jābūt mazākam par PM garumu, lai maksimāli palielinātu sūkņa efektivitāti, jo PM gala efekti samazina magnētiskā lauka intensitāti. Radītās strāvas kausējuma iekšpusē veido koncentriskas cilpas. Blakus sānu sienām inducētais strāvas virziens ir paralēls sienām un arī primārajam magnētiskajam laukam. Tādējādi magnētiskā lauka un inducēto strāvu vektoru reizinājums šajā reģionā ir nulle, tāpēc elektromagnētiskā spēka nav. To sauc par šķērsmalu efektu, un tas samazina šāda sūkņa efektivitāti, ja kanāla platums ir ierobežots.

Ņemot vērā praktisko mērķi transportēt šķidru alumīniju no kausēšanas krāsnis un pacelt to augstāk, tika izveidots eksperiments, kas parāda iespēju izmantot vienu rotējošu PM cilindru šķidro metālu sūkņēšanai un pēta šāda sūkņa radīto plūsmu. Šī eksperimenta rezultāti tiek izmantoti, lai apstiprinātu un pielāgotu viena PM rotora indukcijas sūkņu analītiskos aprēķinus.

Lai šos neliela mēroga eksperimentālos rezultātus pielāgotu rūpnieciska izmēra ierīcei, ir jāatbilst fizikālās līdzības kritērijiem. Tika izvēlēts eksperimentālais modelis, kas būtu sešas reizes mazāks nekā rūpnieciskā izmēra modelis. Pilnīgu fizikālo līdzību ir grūti sasniegt, tāpēc tika ņemti vērā tikai vissvarīgākie kritēriji. Vispirms tika novērtēta ģeometriskā līdzība ar atbilstošajiem bezdimensionālajiem lielumiem:

$$\frac{\tau}{h} = idem, \quad (1.1)$$

$$\frac{\tau}{W} = idem, \quad (1.2)$$

$$\frac{h}{R} = idem, \quad (1.3)$$

kur τ – raksturīgais garums, kas ir attālums, kurā magnētiskā lauka virziens mainās par 180° , h – kanāla augstums, W – kanāla platums un R – magnēta rādiuss. Katrs no parametriem τ , h , W un R rūpnieciskajam modelim ir sešas reizes lielāks.

Vissvarīgāk ir panākt dinamisko līdzību. Vispirms tika apskatīta bezdimensionālā frekvence. GaInSn modelim tika izmantots apzīmējums 1, alumīnija modelim – apzīmējums 2. σ ir elektrovadītspēja, ω – cikliskā frekvence, f – rotācijas frekvence, μ_0 – vakuuma caurlaidības konstante.

$$\Omega_d = \sigma \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \tau^2 = idem, \quad (1.4)$$

$$\sigma_1 \cdot \omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \tau_1^2 = \sigma_2 \cdot \omega_2 \cdot \mu_0 \cdot \tau_2^2, \quad (1.5)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (1.6)$$

$$f_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \cdot \frac{\tau_1^2}{\tau_2^2} f_1 = 0,023 f_1. \quad (1.7)$$

Tātad, lai sasniegtu tādu pašu hidrostatisko spiedienu, rūpnieciskajā modelī var izmantot 44 reizes mazāku PM rotācijas frekvenci. Tas samazina skinefektu rūpnieciskajam modelim, kas vēl vairāk palielina sūkņa efektivitāti. Tālāk tika apskatīts Stjuarta skaitlis. To definē kā elektromagnētisko un inerciālo spēku attiecību. ρ ir masas blīvums, B – PM paliekošā magnētiskā indukcija.

$$N = \frac{\sigma \cdot B^2 \cdot \tau}{\rho \cdot \omega \cdot \tau} = \frac{\sigma \cdot B^2}{\rho \cdot \omega} = idem \quad (1.8)$$

$$B_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1 \rho_1 \omega_1}{\sigma_2 \rho_2 \omega_2}} \cdot B_1 = 0,22 B_1 \quad (1.9)$$

Lai panāktu fizikālo līdzību, lielākajā modelī varētu izmantot gandrīz piecas reizes vājākus magnētus. Tika apskatīts arī Hartmaņa skaitlis, kas tiek definēts kā elektromagnētisko spēku attiecība pret viskozajiem spēkiem.

$$Ha = B \cdot \tau \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\nu}}, \quad (1.10)$$

kur σ – elektrovadītspēja, ν – kinemātiskā viskozitāte. 1.1. tabulā sniegts GaInSn un alumīnija modeļa svarīgāko parametru salīdzinājums.

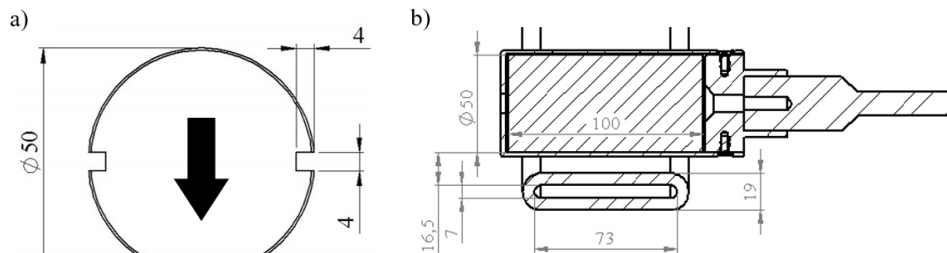
1.1. tabula

Galveno modeļa parametru salīdzinājums

	ρ , kg/m ³	σ , S/m	τ , mm	h , mm	W , mm	R , mm	L , mm	f , Hz
GaInSn	6360	$3,3 \cdot 10^6$	52	7	73	25	100	71
Alumīnijs	2400	$4 \cdot 10^6$	312	42	438	150	600	1,6

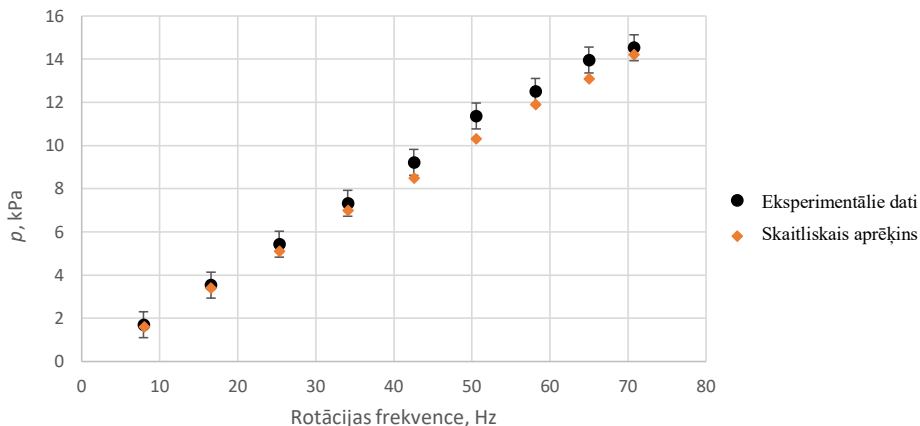
Eksperimentālo ierīci veido viens NdFeB PM cilindrs, kas ir magnetizēts perpendikulāri tā rotācijas asij. Tā magnetizācija ir $B = 1,4$ T. 1.1. attēlā redzama magnēta un kanāla shēma. Magnēta diametrs ir 50 mm, garums – 100 mm. Šim magnētam sānos ir 4 mm platas un 4 mm dziļas rievās visā tā garumā, kurām ir ļoti maza ietekme uz PM cilindra radīto magnētisko lauku. Lai novērstu

rotāciju starp magnētu un tā ietvaru, rievās tika ievietoti metāla stieņi, kas piestiprināti pie ārējā apvalka. Rievas atrodas perpendikulāri magnētiskajiem poliem, lai samazinātu magnētiskā lauka intensitātes zudumu, kas būtu lielāks citā pozīcijā.



1.1. att. a) Pastāvīgā magnēta šķēsgriezums; b) saplacinātas gumijas caurules ar PM rotoru šķēsgriezums.

Ekspimentāli izmērītais un skaitliski aprēķinātais hidrostatiskais spiediens redzams 1.2. attēlā. Skaitliskajā modelī spiediens tika aprēķināts sānu virsmas vidū, kas atbilst maksimālajam spiedienam domēnā. Iespējams, ka eksperimentālie dati ir lielāki nekā skaitliski aprēķinātie, jo skaitliskais modelis ņēma vērā mazāku apgabalu, bet elektromagnētiskā mijiedarbība izplatās vēl lielākā reģionā.



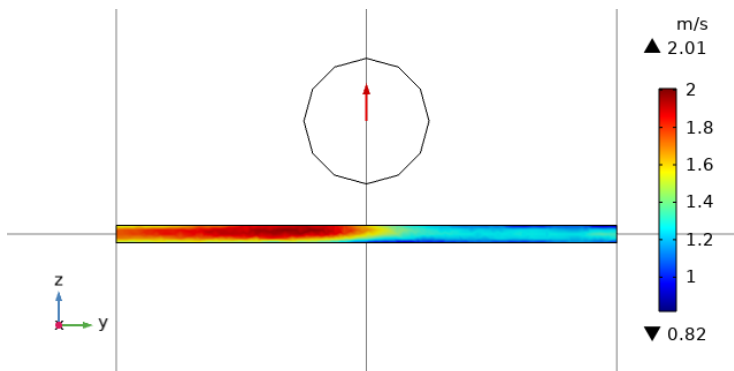
1.2. att. Šķidrā metāla hidrostatiskais spiediens atkarībā no rotācijas frekvences.

Var secināt, ka viena PM cilindru var izmantot efektīvai šķidrā metāla sūkņēšanai, ja tas ir novietots pie šaura kanāla. PM rotācija izraisa ievērojamu silšanu šķidrā metālā, kas samazina tā vadītspēju. Praktiskos lietojumos šis efekts ir labvēlīgs, jo metāla uzsildīšana metalurģijā vienmēr ir nepieciešama.

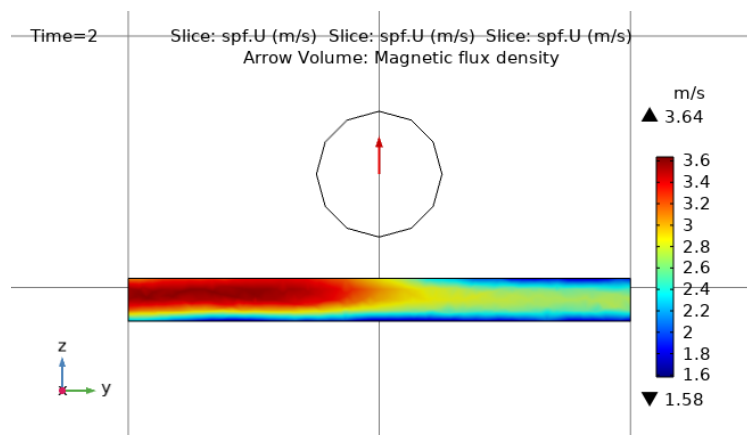
1.2. Viena cilindra PM dipola sūkņa skaitliskā modelēšana

Ņemot vērā iepriekšējā nodaļā apskatīto šķidra metāla sūkni, tika izveidots skaitliskais modelis, lai varētu prognozēt šāda sūkņa darbību pie citiem parametriem. Izmantojot programmu *Comsol Multiphysics*, tika modelēts rotējošs pastāvīgais magnēts ar šķidra metāla reģionu, lai noskaidrotu šāda sūkņa parametrus pie dažādiem kanāla izmēriem. Pastāvīgā magnēta rotācijas ātrums bija 25 Hz visos gadījumos. *Comsol* modelis izveidots ar *Magnetic Fields (mf)* un *Turbulent Flow, k-ε (spf)* fizikas paketēm. Ģeometriskais modelis tika izveidots no gaisa kuba, kura malas garums ir 0,3 m, kanāla un pastāvīgā magnēta. Kanāls faktiski sastāv no šķidra alumīnija, tāpat tā īpašības ir šādas: relatīvā caurlaidība $\mu_r = 1$; elektriskā vadītspēja $\sigma = 3,46 \cdot 10^6$; blīvums $\rho = 6440 \text{ kg/m}^3$; dinamiskā viskozitāte $\mu = 2,4 \cdot 10^{-3}$. Šķidrums tika iestatīts kā nesaspiežams, izvēlētais turbulences modeļa tips – *RANS*. Kanāla sānu sienām tika uzstādīts *no slip* robežnosacījums. Zem turbulentās plūsmas paketes tika izvēlēts tilpuma spēks kā *mf.FLtx*, *mf.FLty*, *mf.FLtz* attiecīgi pie x, y un z koordinātēm, lai ielasītu aprēķināto elektromagnētisko spēku magnētiskā lauka paketes. Pie *initial values* tika iestādīts – 2 m/s ātrums y asij, lai ātrāk iestātos stacionārs režīms, kā arī izvēlēts spiediens ar vērtību 0. Kanāla ieejas plaknē tika izvēlēts spiediena robežnosacījums, kura vērtība ir 0 Pa, plūsmas virziens – normāls. Kanāla izejas plaknē kā robežnosacījums tika izvēlēts spiediens ar vērtību 1 Pa, jo modelis nedarbojās, ja tika izvēlēts 0 Pa. Galīgo elementu tīkls tika izveidots no četrskaldņu trijstūriem (*free tetrahedral*). Gaisa telpas galīgo elementu tīkla izmērs tika izvēlēts kā *coarser* (maksimālais elementa izmērs 0,057 m). Magnēta reģiona režģa elementu izmērs tika izvēlēts kā *normal* (maksimālais elementa izmērs 0,057 m). Šķidrums reģiona režģa elementu izmērs tika izvēlēts kā *extremely fine*, taču maksimālais elementa izmērs tika manuāli modificēts uz vēl mazāku lielumu – 0,035 m. Vispirms tika atrisināts stacionārais modelis, kura rezultāti tika padoti laikā mainīgajam modelim, kas atrisināja modeli līdz 2 s ilgumam.

Izmantojot iepriekš aprakstīto modeli, tika apskatīts, kā mainās caurtece atkarībā no kanāla izmēriem. Kanāla platums tika mainīts tādā veidā, ka attālums no magnēta līdz kanāla tuvākajai malai palika nemainīgs. 1.3. attēlā redzams plūsmas ātrums kanālā ar augstumu 7 mm, platumu – 70 mm. Savukārt 1.4. attēlā redzams plūsmas ātrums kanālā ar augstumu 17 mm, platumu – 170 mm.



1.3. att. Šķidra metāla plūsmas ātrums z/y plaknes šķēlums kanāla vidus plaknē. Kanāla augstums 7 mm, platums 70 mm.

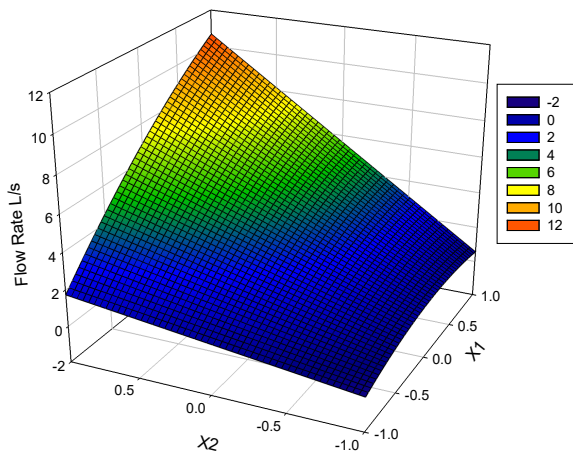


1.4. att. Šķidra metāla plūsmas ātrums z/y plaknes šķēlums kanāla vidus plaknē. Kanāla augstums 17 mm, platums 170 mm.

Aprēķinot, kāda ir caurtece pie katra no kanāla izmēriem, tika iegūti dati, kas apkopoti 1.2. tabulā.

Caurtece kanālā (l/s)		Kanāla augstums (mm)		
		7	12	17
Kanāla platums (mm)	70	0,83	1,83	2,90
	120	1,71	3,85	6,16
	170	2,22	5,17	8,4

Ņemot vērā šos deviņus punktus, tika izveidots optimizācijas uzdevums, kura rezultātā tika iegūta atbildes virsma, kas redzama 1.5. attēlā.

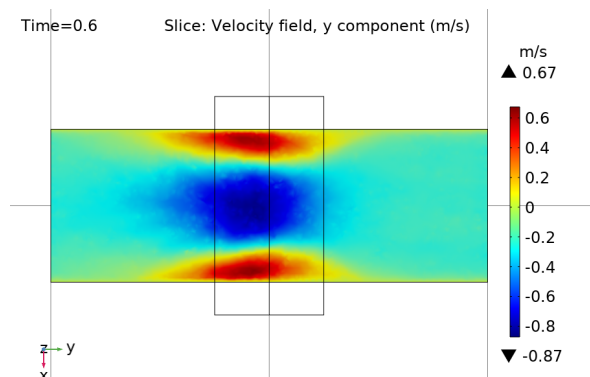


1.5. att. Ležandra polinomu metamodelis.

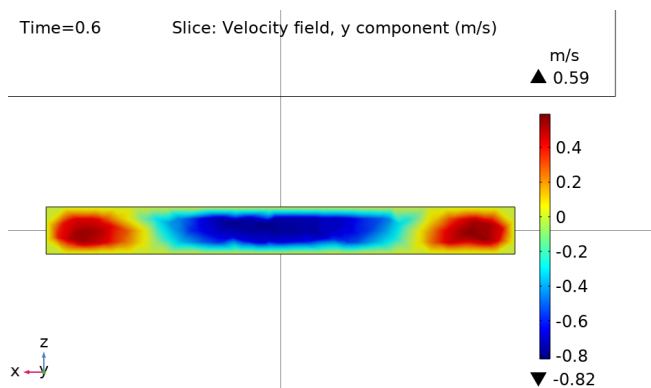
Aproximēšanai tika izmantots otrās kārtas regresijas modelis, kas nodrošināja 11,1 % relatīvo krosvalidācijas kļūdu un $R^2 = 0,998$. Šis modelis var palīdzēt izveidot optimālu kanāla konstrukciju, jo parāda, kādiem jābūt faktoriem, lai iegūtu optimālo atbildes vērtību. Šajā gadījumā modelis nesniedz būtisku informāciju, jo parāda, ka pie lielākiem kanāla izmēriem tiks iegūta lielāka caurplūde. Atbildes virsmu var izteikt kā otrās kārtas polinomu

$$F = -1,35333 + 0,01822x_1 - 0,06987x_2 - 0,00014x_1^2 - 0,00411x_1x_2. \quad (1.11)$$

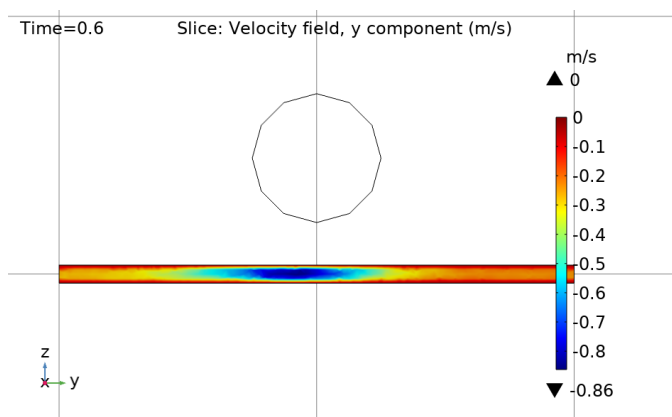
Lai modelētu situāciju, kurā sūknim ir jāspēj šķidrāis metāls pacelt augstāk uz kādu citu tvertni, skaitliskajā modelī tika ieviests lielāks pretspiediens kanāla izejā. Šajā gadījumā tika izvēlēts pretspiediens $p = 4000$ Pa. Kā redzams 1.6. attēlā, šādā situācijā plūsmai izveidojas recirkulējoša forma, kur kanāla sānos metāls atgriežas pretēji galvenajai plūsmai. 1.6. attēlā redzams x/y plaknes šķēlums, 1.7. attēlā – z/x plaknes šķēlums, 1.8. attēlā – z/y plaknes šķēlums. Plūsmas ātruma maksimums ar vērtību 0,87 m/s tiek sasniegts centrālajā daļā.



1.6. att. Šķidra metāla plūsmas ātrums x/y plaknes šķēlums kanāla vidus plaknē.

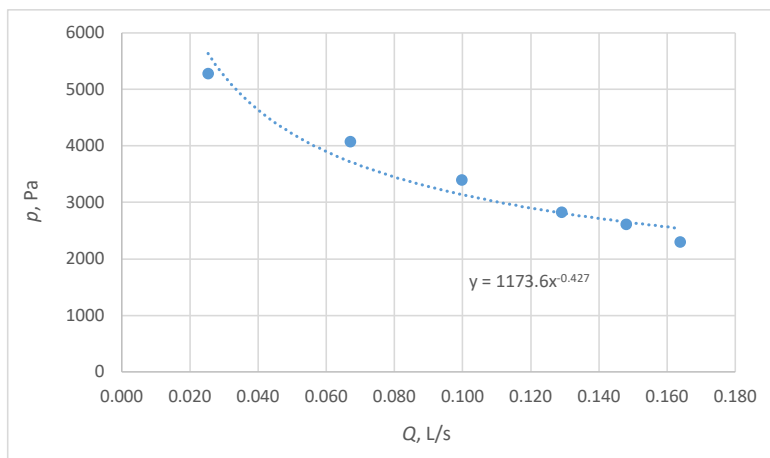


1.7. att. Šķidra metāla plūsmas ātrums z/x plaknes šķēlums kanāla vidus plaknē.



1.8. att. Šķidra metāla plūsmas ātrums z/y plaknes šķēlums kanāla vidus plaknē.

Veicot aprēķinus pie dažādām pretspiediena vērtībām, tika iegūta p - Q raksturlīkne, kas ir svarīgs parametrs jebkuram sūkņim (1.9. att.).

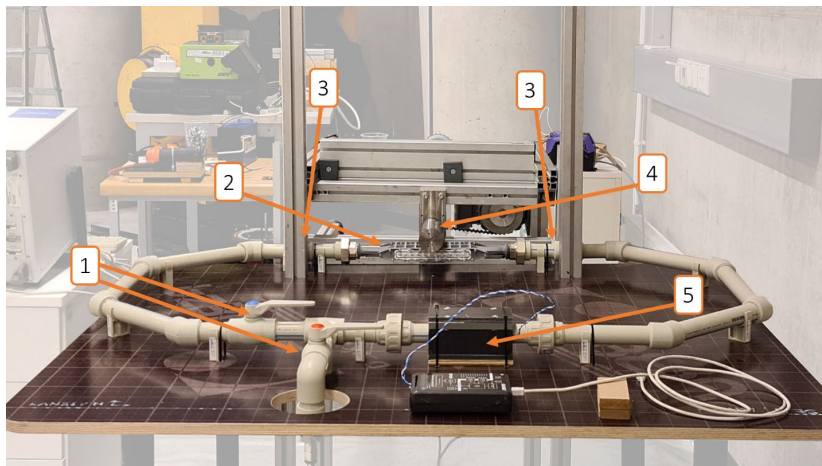


1.9. att. Sūkņa p - Q raksturlīkne.

1.3. Viena PM sūkņa šķidra metāla plūsmas izpēte lineārā kanālā

Šajā nodaļā pētīta šķidrā metāla plūsma taisnstūra šķērsriezuma kanālā, ko rada pastāvīgā magnēta sūkņi. Šķidra metāla plūsmu var izmantot dažādos metalurģijas procesos. Pirmkārt, ja kanāla gali ir atvērti, – šķidrā metāla transportēšanai no vienas ražošanas fāzes uz otru. Otrkārt, pievienoto daļiņu izkļiedēšanai un homogenizācijai kausējumā. Ja sakausējums tiek papildināts ar graudu smalcinātāju vai tiek ražots metāla matricas kompozīts, ir svarīgi, lai daļiņas būtu viendabīgi izkļiedētas visā kausējuma tilpumā. Viena no galvenajām problēmām metāla matricas kompozītmateriālu (*MMC*) ražošanā ir tā, ka nanodaļiņām ir tendence veidot lielus aglomerātus, ko ir grūti izkļiedēt. Ieviešot augstas intensitātes turbulentu šķidrā metāla plūsmu, var radīt pietiekamu nobīdes spēku, lai izkļiedētu aglomerātus un vienmērīgi sadalītu tos visā kausējuma tilpumā. Šāda intensīva kausējuma plūsma varētu rasties, ja abi kanāla gali ir aizvērti un kanāls darbojas kā noslēgta tvertne. Treškārt, bezkontakta kausējuma degazēšanas procesam. Ja abi kanālu gali ir aizvērti, koncepcija nodrošina stipri turbulentu plūsmu, kas varētu būt efektīva inertās gāzes burbuļu izkļiedēšanai un kausējuma degazēšanai. Alumīnija degazēšana ir nepieciešama, lai noņemtu kausējumā izšķīdušo ūdeņradi [2]. Ūdeņradis ir vislabāk šķīstošā gāze alumīnijā, un tā šķīdība šķidrā alumīnijā ir par vienu kārtu augstāka nekā cietā alumīnijā. Tādējādi kausējuma kristalizācijas laikā veidojas ūdeņraža poras, kas samazina gala materiāla mehānisko izturību [3]. Visizplatītākais veids, kā samazināt ūdeņraža koncentrāciju alumīnijā, ir kausējumā ievadīt inerti gāzi, piemēram, argonu, kurā var difundēt izšķīdušais ūdeņradis. Vienkārši sakot, ūdeņraža koncentrācija ievadītajos argona burbuļos ir nulle, tāpēc ūdeņradis izkļiedējas burbuļos, kurus no kausējuma tilpuma caur tā virsmu izvada Arhimēda spēks. Kad ūdeņradis atstāj kausējumu, tas saskarē ar skābekli sadeg. Metāla augstā virsmas spraiguma dēļ veidojas argona burbuļi ar zemu virsmas laukuma un tilpuma attiecību [4], tāpēc kausējuma degazēšanai nepieciešams liels daudzums inertas gāzes.

Darba gaitā ir izstrādāts eksperimentālais modelis, kas paredzēts spiediena, plūsmas ātruma, kā arī plūsmas struktūras mērīšanai taisnstūrveida kanālā. Eksperimentālais prototips tika veidots kā noslēgts kontūrs, jo eksperimentam bija pieejams ierobežots metāla daudzums, kā arī lai samazinātu noplūdes un metāla oksidēšanās varbūtību. Eksperimentālā sistēma redzama 1.10. attēlā. Sistēma ir sadalīta kanāla aktīvajās un perifērajās daļās.



1.10. att. Eksperimentālais modelis: kopskats, 1 – vārsts, 2 – 3D drukāta lineārā daļa, 3 – manometra atrašanās vieta, 4 – pastāvīgā magnēta rotors, 5 – plūsmas mērītājs; kvadrāti uz galda atbilst 10×10 cm.

Centrālā daļa sastāv no 3D drukātas detaļas, kuras iekšpusē ir taisnstūrveidā tilpums. 100 mm attālumā no taisnstūra kanāla pusēm ir novietots atmosfēras manometrs, lai mērītu spiediena kritumu sūkņēšanas reģionā.

Pastāvīgā magnēta rotora ierīce sastāv no cilindriskā pastāvīgā magnēta, vārpstas, zobratiem, zobsiksnas, trīsfāzu motora, frekvenču pārveidotāja un alumīnija profiliem magnēta novietojuma regulēšanai. Lai novērstu lielāko vibrāciju pārnesei, rotors un tā piedziņas mehānisms nav pievienots galdam, uz kura atrodas šķidrā metāla kanāls.

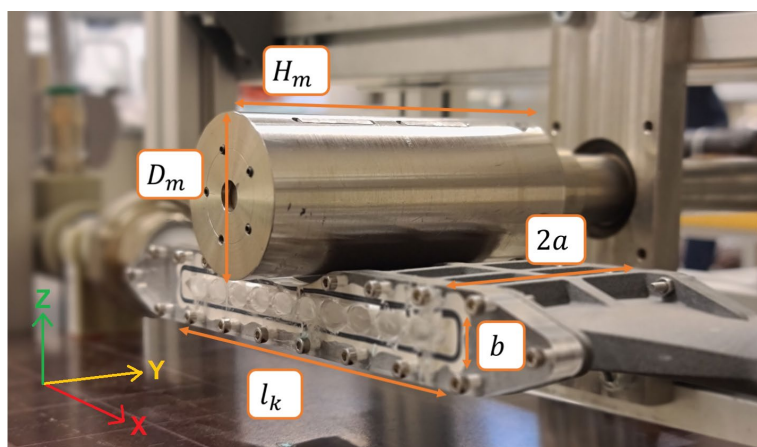
Rotors ir cilindrisks dipols ar diametru $D = 50$ mm un augstumu $H = 100$ mm, paliekošā magnetizācija $B = 1,4$ T ir vērsta perpendikulāri cilindra asij. PM rotors sastāv no viena NdFeB magnēta, kas ievietots 1 mm biezā nerūsējošā tērauda apvalkā. Magnēts tika pievienots lineārā kanāla sienas likumā, lai samazinātu attālumu starp magnētu un šķidro metālu. Nemagnētiskais attālums ir aptuveni $a = 5,2$ mm. Rotora ass sakrīt ar kanāla lineārās daļas viduspunktu. Tika novērota neliela magnēta rotācijas svārstība ar amplitūdu $< 0,2$ mm, ja magnēta rotācijas ātrums ir līdz 25 Hz. Ja ātrums ir lielāks, rotora svārstības samazinājās, bet kopējās ierīces mehāniskās vibrācijas palielinājās. Ierīces konstrukcijas dēļ bija iespējams rotoru darbināt no 5 Hz ātruma, kad tikko tika pārvarēta statiskā berze, līdz aptuveni 50 Hz, kad mašīnas mehāniskās vibrācijas apdraud precīzu magnēta novietojumu kanāla tuvumā.

Perifērā daļa tika izgatavota no PPR kausējamām caurulēm un savienojumiem ar iekšējo diametru $D_p = 23$ mm, lai nodrošinātu gan kanāla stiprību un hermētiskumu, gan ķīmisko inerci, gan vieglu montāžu. Kanālā ir iekļauti vārsti gan plūsmas kontrolei, gan metāla ieplūdes un

izplūdes atverei, kā arī kondukcijas plūsmas mērītājs. Kopējais kanāla tilpums ir ap 1,5 l. Kanāla uzpildīšana tika veikta caur speciāli izstrādātu nerūsējošā tērauda trauku, no kura metāls tika izspiests ar argona palīdzību, tādējādi nodrošinot zināmu tilpumu kanālā, kā arī pasargājot metālu no saskares ar gaisu.

Eksperimentālā sistēma tika veidota tā, lai to varētu izmantot divu veidu eksperimentos: noslēdzot vārstu un samazinot plūsmu kanāla perifērajā daļā, tiek simulēts degazācijas kanāls vai tvertne; savukārt ar atvērtu vārstu un maksimālo plūsmu ir iespējams simulēt metāla sūkņēšanu caur kanālu.

Centrālās daļas iekšējais šķēsgriezums ir taisnstūrveida ar augstumu b , platumu $2a$ un garumu l , kā redzams 1.11. attēlā. Lai iegūtu vēlamu formu, centrālajai kanāla detaļai tika izmantota 3D drukā. Pirms šī eksperimenta tika veikti testi, kuru rezultātā tika izvēlēts *PA12* materiāls. Lai nodrošinātu ātruma mērījumus ar *PUDV* metodi caur sāniem, tika izveidota 6 mm bieza organiskā stikla detaļa ar cilindriskiem urbumiem, lai varētu precīzi pozicionēt ultraskaņas manometrus. 3D drukātā detaļa ar organiskā stikla malām un blīvi redzama 1.11. attēlā. Šāda konstrukcija atvieglo šķidrā metāla plūsmas ātruma mērījumus; tā ir hermētiska, stingra un sastāv no ķīmiski inerta materiāla, lai tas nereaģētu ar GaInSn, kā arī materiāls nav elektriski vadošs, kas imitē keramikas sienas atbilstoši industriālajiem apstākļiem.



1.11. att. Eksperimentālā aparāta lineārās daļas tuvplāns, kas apzīmē pastāvīgā magnēta rotora un lineārā kanāla pozīciju, H – rotora augstums, D – rotora diametrs, $2a$ – kanāla platums y ass virzienā, b – kanāla augstums z ass virzienā, l – kanāla lineārās daļas garums x ass virzienā.

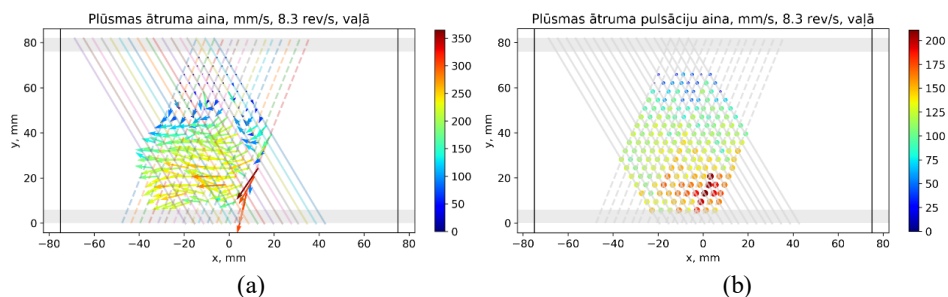
Ierīcei nebija paredzēta aktīvā dzesēšana, kā arī, lai samazinātu noplūdes risku, nebija paredzēta vieta tiešiem temperatūras mērījumiem saskarē ar šķidro metālu, tāpēc tika veiktas īsas eksperimentu sērijas un starp eksperimentiem tika dots laiks ierīcei atdzist. Lai gan kanāla tilpumu var uzskatīt par slēgtu, garas eksperimentu sērijas nav vēlamas, jo ātruma mērījumu kvalitāte ievērojami pasliktinās ilgstošas un intensīvas maisīšanas gadījumā. Situāciju uzlaboja GaInSn attīrīšana, filtrējot un karsējot argona atmosfērā, tādējādi atbrīvojoties no oksīdiem un izšķīdušajām gāzēm, kas metālā bija nonākušas no iepriekšējiem eksperimentiem.

Ātruma mērījumi tika veikti, izmantojot *Signal Processing* anemometru *DOP2000 v2125*, izmantojot impulsa ultraskaņas Doplera ātruma metodi (*PUDV*). Vienlaikus mērījumiem tika

izmantota tikai viena zonde. Metodes priekšrocības ir informācija par ātrumu telpisko sadalījumu, bet tās trūkums ir maksimālais vai ierobežotais ātrums un izmērītais attālums, kas atkarīgs no impulsa atkārtošanās frekvences f_{prf} , kā arī skaņas ātruma vidē c un raidītāja frekvences f .

Lai modelētu EM sūkni, tiek atvērti vārsti un iegūts maksimālais plūsmas ātrums. Rekonstruētais ātruma lauks šim režīmam redzams 1.12. a attēlā. Mērījumi tika veikti no $y = 82$ mm puses, un rezultāti liecina, ka tuvāk pretējai sienai var iegūt labākus datus. Pie sienas ātrums samazinās, bet nav nulle, ko iespējams izskaidrot ar to, ka ultraskaņas stars ir diverģējis apraksta lielāku tilpumu nekā zondes tuvumā.

Tika iegūta vienvirziena plūsma, kas plūst pret x asi ar vidējo ātrumu $v \sim 220$ mm/s un ātruma pulsācijām $v_{\text{sd}} = \pm 130$ mm/s, kā redzams 1.12. b attēlā. Pie sienas ātrums nedaudz samazinās, bet nav nulle.



1.12. att. (a) Šķidrā metāla plūsmas lauka rekonstrukcija EM sūkņa režīmā; pelēkais horizontālais laukums – organiskā stikla sienas, vertikālās līnijas norobežo kanāla lineāro daļu, slīpās līnijas – ultraskaņas stars, uz kura tiek veikti mērījumi gan straumes virzienā, gan pretēji; b) ātruma standartnovirze EM sūkņa režīmā.

Darba gaitā izstrādāts eksperimentālais modelis un tehnoloģijas mērogošanas aprēķinu pārbaude, kas apliecina, ka tehnoloģija ir perspektīva gan alumīnija degazēšanai, gan transportēšanai.

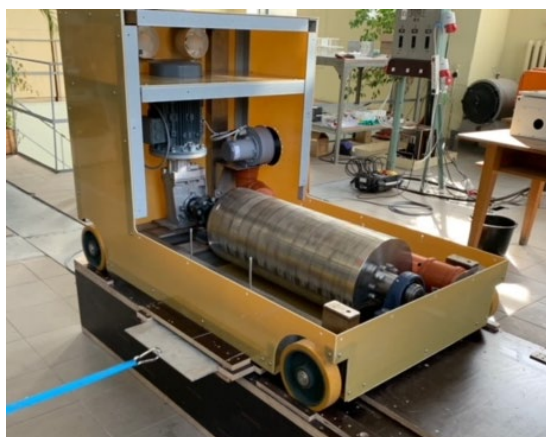
Ātruma sadalījuma eksperimentālie mērījumi ir sarežģīti un reizēm dod nekvalitatīvus datus. Tam ir divi galvenie iemesli. Viens no tiem ir tas, ka pēc ilgstošas intensīvas sajaukšanas GaInSn rodas piemaisījumi, kas izraisa sliktu UDV signālu. Otrkārt, vienā eksperimentā tika izmantota tikai viena UDV zonde, kas padara rezultātu kombināciju no vairākām pozīcijām un leņķiem jēgpilnu tikai tad, ja plūsmas modelis ir atkārtojams. Eksperimentālo mērījumu un skaitliskās simulācijas rezultātu nekonsekvences liecina, ka plūsmas modelis ir neprognozējams un var atšķirties starp eksperimentiem ar laika intervālu, kas mazāks par 30 s. Iespējamais risinājums būtu veikt eksperimentālus mērījumus ilgākā laika periodā, lai ilgstoši asimetriskie modeļi vidēji būtu tuvu nullei.

1.4. Industriālais prototips

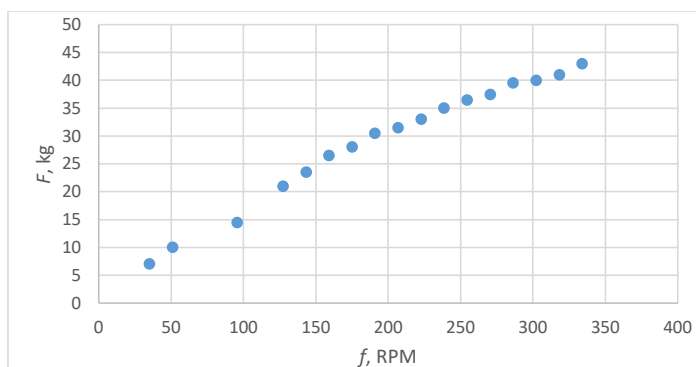
Balstoties skaitliskajos modeļos un eksperimentālajā pieredzē, tika izstrādāts industriāls prototips šķidrā metāla sūknim. Ņemot vērā to, ka pastāvīgo NdFeB magnētu maksimālais izmērs magnetizācijas virzienā ir 5 cm, lielāka izmēra magnētus nepieciešams salikt no mazākiem. Lai

drošā veidā saliktu šādus liela izmēra magnētus, nepieciešamas dažādas papildierīces, kas nodrošina darba drošību, lēnu magnētu satuvināšanu un magnētu salikuma strukturālo integritāti. Šis sūknis tika projektēts tā, lai tā ražība būtu 40 t/h šķidra alumīnija un tas spētu pacelt hidrostatisko stabu 1,5 m augstumā. Šajā ierīcē saliktā magnēta garums ir 70 cm, tā diametrs ir 15 cm.

Lai novērtētu ierīces veiktspēju, tika veikts eksperiments ar alumīnija loksni. Alumīnija loksne (izmērs $10 \times 500 \times 1000$ mm) tika novietota tieši zem rotora, pēc tam tika nomērīts radītais spēks pie dažādiem rotācijas ātrumiem. Ierīce redzama 1.13. attēlā, nomērītais spēks uz alumīnija loksni – 1.14. attēlā.

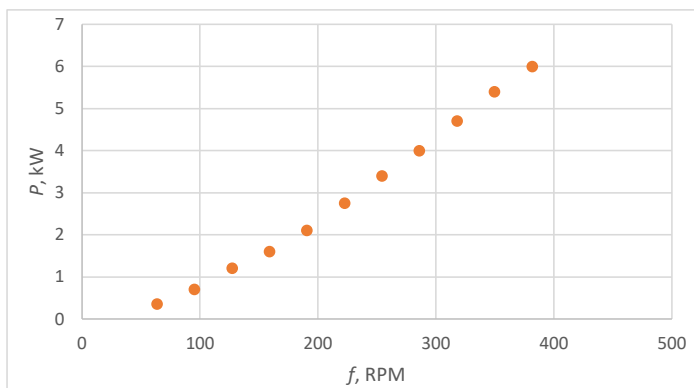


1.13. att. Eksperimenta, kurā tiek nomērīts horizontālais spēks uz alumīnija loksni, fotogrāfija.



1.14. att. Spēks uz loksni atkarībā no magnēta rotācijas ātruma.

Papildus tika nomērīta motora patērētā jauda atkarībā no magnēta rotācijas ātruma (1.15. att.).



1.15. att. Motora patērētā jauda atkarībā no magnēta rotācijas ātruma.

Tika veikts arī tests ar šķidru alumīnija rūpnieciskos apstākļos. Sūknis tika novietots pie speciāli izveidota taisnstūrveida kanāla, kas tālāk pāriet uz apaļu cauruli, kas paceļas 1 m augstumā. Šajā testā caurteces ātrums tika novērtēts, nomērot izplūdušā alumīnija daudzumu tvertnē, kur varēja redzēt, kā paceļas šķidruma līmenis. Rezultātā tika nomērīts ražīgums 10 t/h.



1.15. att. Iekārtas tests ar šķidru alumīniju.

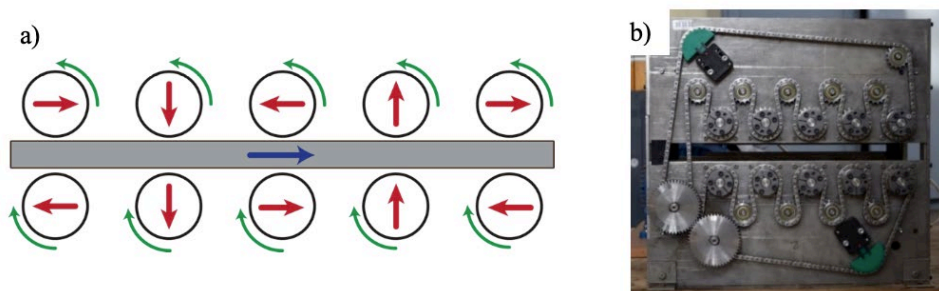
2. VAIRĀKU PASTĀVĪGO MAGNĒTU SŪKŅI

Šajā nodaļā tiek apskatītas iespējas izmantot sinhroni rotējošus vairākus cilindriskus PM, lai sūknētu šķidru metālu. Eksistē Halbacha salikums [5], kur magnēti tiek izvietoti vienā rindā tā, lai magnētiskā lauka virziens katram secīgajam magnētam pagriežas par 90° . Šādā veidā tiek panākts, ka magnētiskais lauks vienā pusē magnētu rindai ir stiprāks kā otrā pusē. Attiecīgi šādā veidā var izmantot mazāku daudzumu magnētiskā materiāla, lai sasniegtu nepieciešamo magnētiskā lauka intensitāti. Ņemot vērā to, ka lielu PM sūkņu dārgākā komponente ir pastāvīgie magnēti, šāds koncepts varētu dot būtisku ieguvumu.

2.1. Divpusējais sūknis

Lai izveidotu augstas veiktspējas šķidra metāla sūkni, tiek apskatīta konfigurācija, kur taisnstūrveida profila kanālam abās pusēs tiek novietoti PM cilindri tā, lai katrā pusē būtu rinda ar PM, kuru rotācijas ass ir paralēli kanāla sienām un perpendikulāri šķidra metāla plūsmas virzienam. Lai panāktu augstu šķidra metāla sūkņa veiktspēju, ir nepieciešams vienlaikus iegūt pēc iespējas augstāku plūsmas caurteci Q un spiedienu p .

Eksperimentālā prototipa centrālo daļu veido divas cilindrisku PM dipolu rindas, kas ir magnetizētas perpendikulāri to rotācijas asij (2.1. att.). Katra magnēta diametrs ir 50 mm, garums ir 200 mm. Attālums starp divām magnēta asīm vienā rindā ir 88 mm, starp magnētu asīm pretējās rindās – 115 mm. α ir leņķis starp divu secīgu magnētu magnetizāciju vienā rindā, β – leņķis starp pirmajiem diviem magnētiem pretējās rindās. Leņķis α ir ar negatīvu zīmi otrajā rindā. Praksē, uzstādot leņķus α un β , vienmēr būs neliela kļūda.

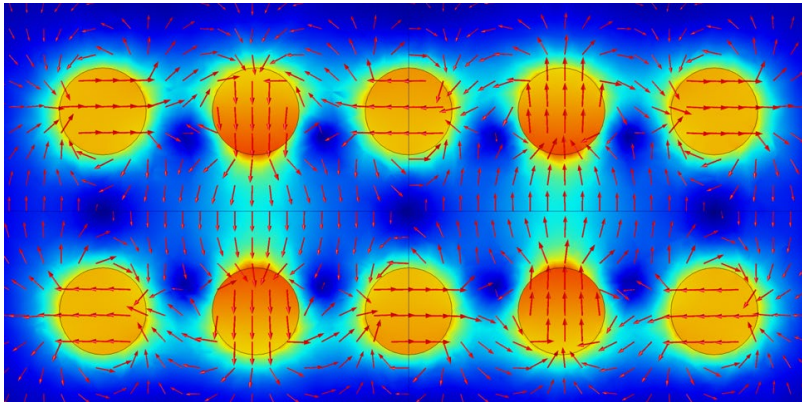


2.1. att. a) Magnētu shēma ($\alpha = 90^\circ$; $\beta = 180^\circ$); b) eksperimentālā iekārta.

Galvenais bezkontakta šķidra metāla sūkņēšanas princips ir skrejoša magnētiskā lauka izveidošana. Rotējot divus magnētiskos dipolus, magnētiskā lauka mijiedarbība starp tiem rada griezes momentu, kas laika gaitā ir sinusoidāls. Šis efekts rada lielas slodzes mehāniskajai piedziņai, apskatot jaudīgu liela mēroga sūkni. Praktiskiem lietojumiem šāda veida sūkņiem jābūt spēcīgam skrejošam magnētiskajam laukam un nelielam sistēmas griezes momentam. Visai PM sistēmai ir jāgriežas sinhroni, bet katrai rindai jāgriežas pretējos virzienos. To var panākt vairākos veidos, piemēram, ar zobratiem, siksnām un/vai ķēdēm. Neskatoties uz to, visi magnēti ir savienoti ar galveno piedziņas ierīci, kurai jāpārvar kopējais griezes moments. Šajā nodaļā tiek apskatīts, kā

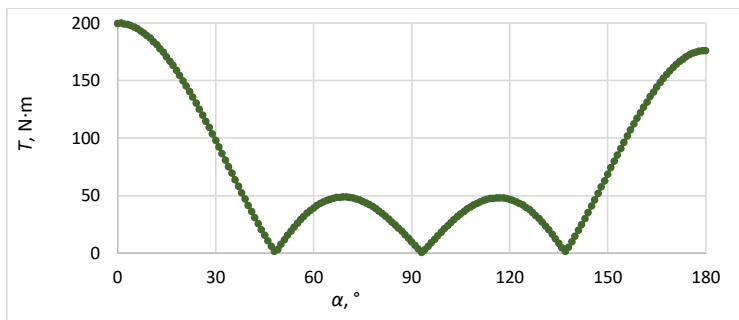
atrast optimālo PM magnetizācijas virzienu konfigurāciju, lai panāktu augstu PM rotācijas stabilitāti.

Stacionārs un parametriskais 3D aprēķins tika veikts, izmantojot *COMSOL Multiphysics* (2.2. att.). Izmantojot magnētiskā lauka moduli, parametriska analīze tiek iestatīta leņķim α un laikam t . Leņķa solis tika uzstādīts kā 1° , laika solis – $0,1$ s. Tika aprēķināts magnētiskais lauks telpā, lai varētu noteikt, kāds spēks tiek radīts uz vienu no PM. Aprēķinot griezes momentu uz katru individuālo PM, tie tika summēti, lai noskaidrotu sistēmas pretestību, veicot vienu rotāciju. Galīgo elementu tīkls tika izveidots no četrskaldņu trijstūriem (*free tetrahedral*), un modelī kopumā bija 55547 elementi.



2.2. att. 10 cilindri – magnētiskā lauka indukcijas amplitūda un virziens ($\alpha = 90^\circ$; $\beta = 180^\circ$).

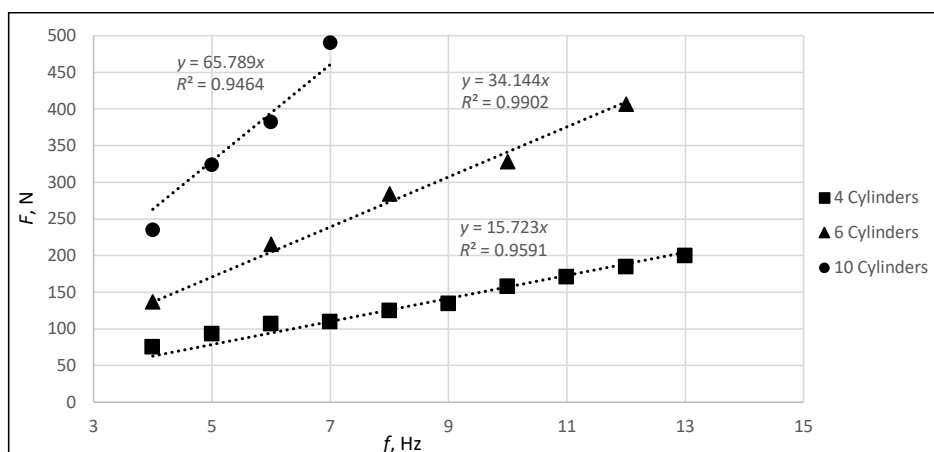
10 cilindru gadījumā sistēmas vidējais griezes moments T parāda trīs minimumus (2.3. att.). Tie atrodas pie $\alpha = 48^\circ$, kur $T = 1,57 \text{ N} \cdot \text{m}$, pie $\alpha = 93^\circ$, kur $T = 0,59 \text{ N} \cdot \text{m}$, un pie $\alpha = 137^\circ$, kur $T = 1,36 \text{ N} \cdot \text{m}$. Visiem trim minimumiem ir mazi griezes momenti, bet vidējam – mazākais. Sistēma ar leņķi $\alpha = 93^\circ$ ir visefektīvākā sūkņēšanas efektivitātes ziņā, un tā arī ir ļoti tuvu Halbaha izkārtojumam, kas starp rindām rada spēcīgāku magnētisko lauku nekā ārpusē.



2.3. att. 10 cilindri – sistēmas vidējais griezes moments ($\beta = 180^\circ$).

10 cilindru gadījumā griezes moments tika mērīts arī eksperimentāli, izmantojot vērtības $\alpha = 93^\circ$; $\beta = 180^\circ$. Mērīšana tika veikta tādā veidā, lai nomērītu maksimālo vērtību pie pilnas rotācijas un abos virzienos. Vidējais mērījumu rezultāts ir $T = 18,7 \text{ N} \cdot \text{m}$. Savstarpējo leņķu neprecizitātes un berzes spēku dēļ eksperimenta rezultāts ir nedaudz lielāks nekā teorētiski aprēķinātais. Citu fāzes nobīdes leņķu mērīšana nebija iespējama, jo tad tiek sasniegtas pārāk lielas griezes momenta vērtības, kas nebija pieļaujamas konkrētajā iekārtā. Jāatzīmē, ka reālas šāda tipa sistēmas ar vairāk PM dipoliem kļūst arvien nepraktiskākas, jo, pieņemot nelielu fāzes nobīdes leņķa kļūdu, summējot to uz visiem PM cilindriem, veidojas jau ievērojama kopējā nobīde un neliela nobīde no optimālā leņķa dramatiski palielina sistēmas griezes momentu.

Tika veikta eksperimentu sērija, lai novērtētu šī sūkņa sūkņēšanas jaudu. Starp magnētu rindām tika ievietota 5754 sērijas alumīnija sakausējuma plāksne (izmērs – $12 \times 180 \times 600 \text{ mm}$) un, izmantojot rokas svarus, loksnei pieliktais spēks tika izmērīts atkarībā no magnētu rotācijas frekvences (2.4. att.).



2.4. att. Sūkņa radītais spēks uz alumīnija loksni.

Izmantotajā četru cilindru konfigurācijā bija uzstādīts $\alpha = 95^\circ$ un $\beta = 90^\circ$. Izmantotajās sešu un 10 cilindru konfigurācijās tika uzstādīts $\alpha = 95^\circ$ un $\beta = 180^\circ$. Eksperimentu laikā tika novērots, ka alumīnija loksne uzsilst un tajā pašā laikā nomērītais spēks kļūst mazāks. Uzsilšanu izraisa džoula siltums, kad magnēti inducē strāvas, un šī iedarbība ir atkarīga no rotācijas frekvences. Palielinoties griešanās ātrumam, palielinās arī sildīšanas efekts. Turklāt, paaugstinoties alumīnija temperatūrai, tā vadītspēja samazinās, tāpēc radītais elektromagnētiskais spēks samazinās. Šo iemeslu dēļ starp katru mērījumu bija nepieciešama pauze, ja tika izmantots liels ātrums un ja ierīce bija ieslēgta ilgākā laika periodā.

Iespējams novērtēt, kādu spiedienu radītu šāds sūknis šķidrā alumīnijā. Tika apskatīta 10 cilindru konfigurācija. Attīstītais spiediens $p = 227 \text{ kPa}$ pie 7 Hz . Tādējādi spiediena staba augstums būtu

$$h = \frac{F}{S\rho g} = 9,75 \text{ m.} \quad (2.1)$$

Rezultāti rāda, ka divpusējs PM sūknis ar diviem rotējošu cilindrisku dipolu blokiem var būt praktiski izmantojams dažādām, tomēr specifiskām magnetizācijas virzienu konfigurācijām. Tika noteikti optimālie fāzes nobīdes leņķi četrū, sešu, astoņu un 10 magnētu rotoru konfigurācijām. Analītiskie aprēķini rāda, ka 10 magnētu griezes momenta minimumi ir pie $\alpha = 49,1^\circ, 92,8^\circ, 136,8^\circ$, kas ir ļoti tuvu tiem, kas aprēķināti skaitliski – $\alpha = 48^\circ, 93^\circ, 137^\circ$. Sūkņa darbība tika pārbaudīta eksperimentāli pie $\alpha = 93^\circ$, kas arī nodrošina vislielāko magnētiskās indukcijas vērtību starp magnētiem, un tika parādīts, ka sistēmai bija pietiekami stabila veiktspēja. Atšķirību optimālajam leņķim α varētu izskaidrot ar magnēta gala efektiem, kas analītiskajā modelī netiek ņemti vērā, un ar ierobežoto galīgo elementu tīkla izmēru skaitliskajā modelī. Tika veiktas eksperimentu sērijas ar alumīnija plāksni, kas liecina par lielu šāda sūkņa šķidra metāla sūknēšanas jaudas potenciālu. Tomēr, ņemot vērā to, ka reālā iekārtā vienmēr būs kāda fāzes nobīdes kļūda, liels skaits PM cilindru šādā sūknī nav vēlams.

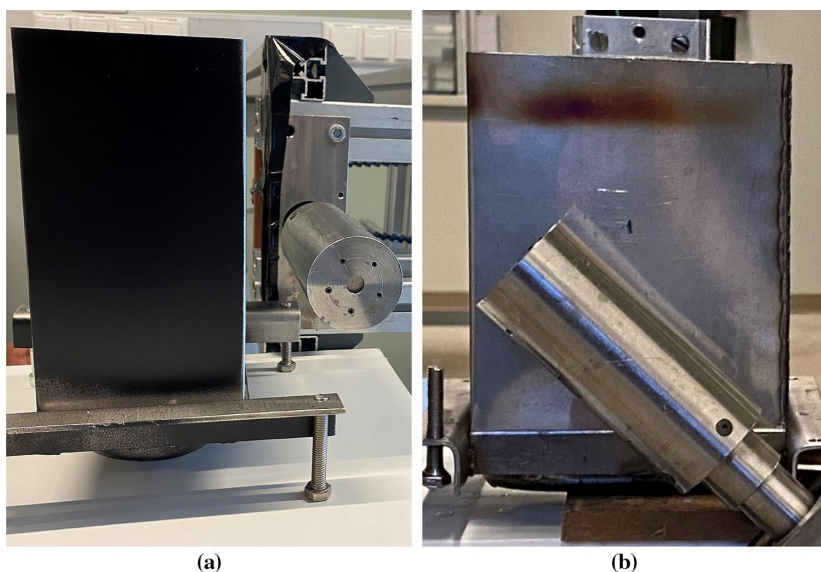
3. ŠĶIDRA METĀLA MAISĪTĀJI

3.1. Modeļa eksperiments izkausēta metāla temperatūras homogenizācijai ar rotējošu pastāvīgo magnētu

Metalurģijā alumīnija maisīšana, dozēšana un transportēšana ir izaicinoša, jo kausējumiem ir augsta temperatūra un tie ir ķīmiski agresīvi. Sajaukšana ir būtiska termiskai homogenizācijai un vienmērīga masas sastāva iegūšanai, kas ir kritisks nosacījums paredzamam un vienvērtīgam kristalizācijas rezultātam [6], [7]. Bezkontakta elektromagnētiskās sajaukšanas metodes arvien vairāk tiek izmantotas, kaut gan tās ir dārgākas, jo atļauj nepārtrauktu maisīšanu bez nepieciešamības atvērt krāsnī un prasa minimālu apkopi [6]–[8]. Maiņstrāvas induktori parasti tiek izmantoti, lai radītu skrejošu vai rotējošu magnētisko lauku, kas ir nepieciešams nosacījums, lai izraisītu plūsmu elektriski vadošā šķidrumā. Omiskā pretestība maiņstrāvas induktora tinumos rada ievērojamus jaudas zudumus siltuma formā. Līdz ar to šo metodi var uzskatīt par neefektīvu lielā enerģijas patēriņa dēļ [6], [7], [9], [10]. Savukārt pastāvīgo magnētu sistēmas nepatērē enerģiju, lai radītu magnētisko lauku. Enerģiju patērē tikai elektriskais motors, lai pagrieztu PM bloku un radītu kustību, pārvarot sekundāros magnētiskos laukus, kas tiek inducēti šķidrajā metālā. Neskatoties uz to, ir veikti salīdzinoši maz pētījumu, atstājot plašas iespējas jaunu lietojumu radīšanai [11], [12].

Lai iegūtu vienmērīgu šķidra metāla kausējuma termisko sadalījumu, piemēram, alumīnija krāsnīs, sajaukšanu var nodrošināt ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem. Šajā nodaļā tiek aprakstīts eksperimentāls un skaitlisks pētījums par temperatūras izlīdzināšanu ar pastāvīgo magnētu šķidra metāla tilpumā ar vertikālu temperatūras gradientu. Lai novērotu temperatūras dinamiku, tika izmantoti termopāri un termiskā kamera. Eksperimentālā ierīce sastāv no nerūsējošā tērauda konteinera, kas piepildīts ar GaInSn eitektisko sakausējumu, un cilindrisku NdFeB pastāvīgo magnētu, kas novietots pie sānu sienas. Tika veikta parametriskā skaitlisko eksperimentu sērija, mainot magnēta slīpuma leņķi, lai atrastu visefektīvāko pozīciju, kurā var visātrāk sasniegt termisko līdzsvaru.

Eksperimentā tika izmantots nerūsējošā tērauda konteiners (iekšējie izmērie – 0,15 m × 0,1 m × 0,2 m, sienu biezums – 0,5 mm; 3.1. att.). Tas no ārpuses tika nokrāsots matēti melnā krāsā ar aerosolu, lai palielinātu sienas izstarojuma koeficientu (ϵ). Ņemot vērā nezināmo lielumu skaitu eksperimentā, ir saprātīgi pieņemt konteiners sienu starojamību tuvu absolūti melnam ķermenim, proti, $\epsilon = 1$. Infrasarkanais konteiners sienu starojums tika reģistrēts ar termokameru, un tika aprēķināta temperatūra, pieņemot melnā ķermeņa starojumu. Tvertne tika piepildīta ar GaInSn eitektisko sakausējumu. Eksperimentālā ierīce sastāvēja no rotējoša pastāvīgā magnēta, kas tika novietots konteiners sānos. NdFeB pastāvīgā magnēta cilindrs ar magnetizāciju $B = 1,42$ T bija 0,05 m diametrā un 0,1 m augstumā. Tam bija 2 mm biezs ārējais apvalks, kas izgatavots no nerūsējošā tērauda. Attālums starp konteiners ārējo sienu un pastāvīgā magnēta rotora ārējo sienu bija 0,0375 m. Lai nodrošinātu atskaites mērījumus, šķidrajā metālā tika ievietoti divi termopāri. Tika izmantoti K tipa termopāri ar precizitāti $\pm 0,1$ °C.

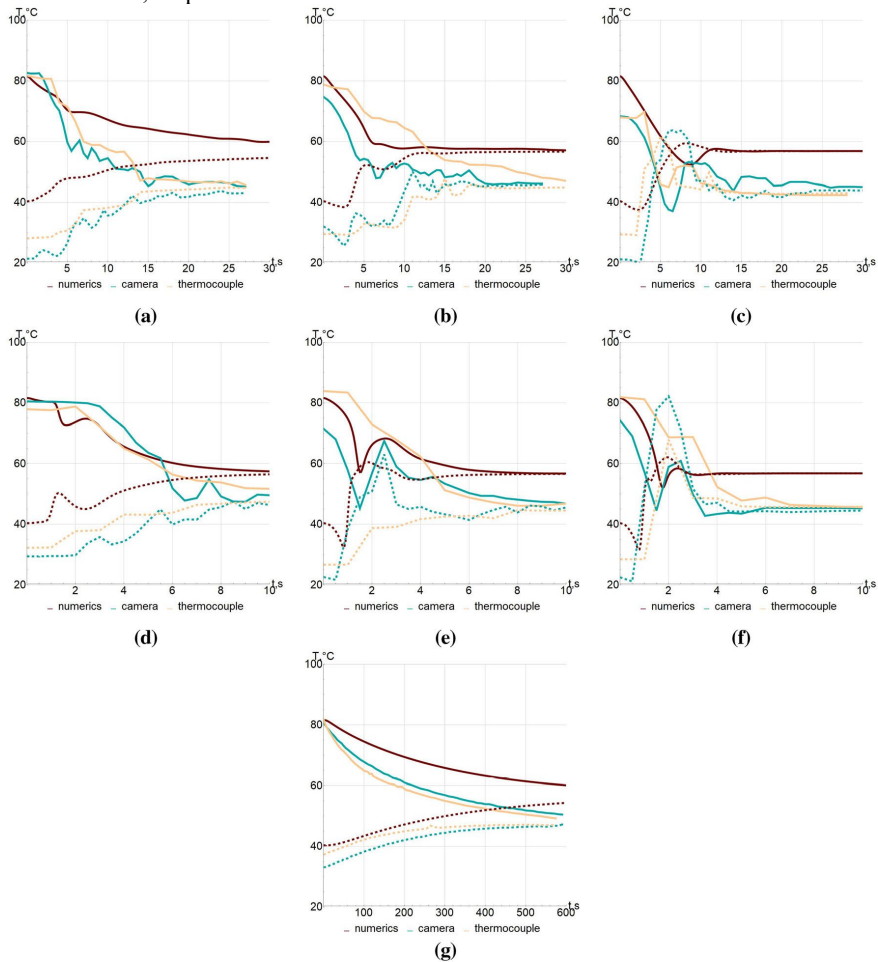


3.1. att. Eksperimentālais uzstādījums, kurā parādīta melnā konteiners sānu siena un blakus esošā magnēta pozīcija: (a) horizontāli; b) 45° slīpuma leņķī.

Vispirms GaInSn eitektiskais sakausējums tika atdzesēts līdz 22 °C, ievietojot metāla trauku aukstā ūdenī. Pēc tam augšējā šķidrā metāla virsma tika uzkaršēta ar gāzes degli, līdz augšējā termopāra rādījums bija 82 °C. Tvertnes augšējās daļas sildīšanas laikā temperatūra šķidrā metāla apakšējos slāņos neizbēgami arī nedaudz palielinājās. Eksperimenta sākumā apakšējā termopāra rādījums bija 24°C, taču eksperimentos tas varēja atšķirties par pāris grādiem. Visbeidzot tika iedarbināts pastāvīgā magnēta rotors. Tika izmantota infrasarkanā kamera *FLIR T650sc*, kuras sensoram ir 640 × 480 pikseli, un to precizitāte ir ± 1 °C. Viena konteiners puse tika filmēta ar infrasarkanā kameru, līdz termisko līdzsvaru novēroja gan termokamera, gan termopāri, un tajā brīdī eksperiments tika pārtraukts. Pastāvīgais magnēts vienmēr atradās konteiners platākās malas tuvumā, bet termiskās kameras filmēšana tika veikta gan platākajai, gan šaurākajai pusei secīgos eksperimentos. Konteiners siena ir izgatavota no plānas nerūsējošā tērauda loksnes, tāpēc

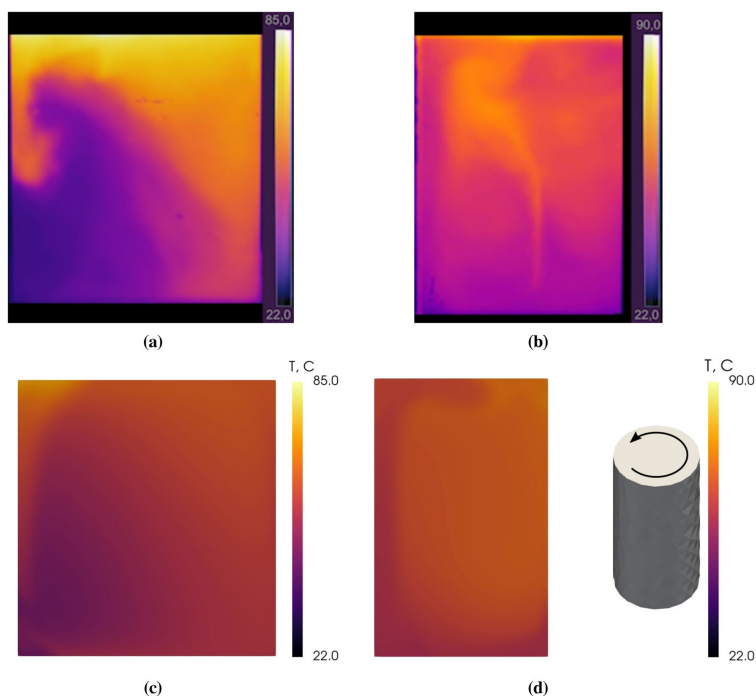
sagaidāms, ka siltuma pārnese būs ļoti ātra, un termokameras novērotā temperatūra ir tuvu šķidrā metāla temperatūrai aiz sienas. Eksperiments tika atkārtots dažādām magnēta orientācijām un rotācijas frekvencēm. Tika ņemtas vērā divas rotējošā pastāvīgā magnēta frekvences, $f = 1,1$ Hz un $f = 7,6$ Hz, un trīs orientācijas – vertikāla, horizontāla un 45° .

Abu mērinstrumentu, t. i., infrasarkanās kameras un termopāru, rezultāti tika salīdzināti ar skaitliskā modeļa rezultātiem. Šķidrā metāla temperatūras rādījumi tika veikti divās pozīcijās – tvertnes augšpusē, kur sākotnējā temperatūra ir augstāka, un apakšā, kur sākotnējā temperatūra ir zemāka. Katras pieejas temperatūras izmaiņas ir attēlotas kopā visiem PM novietojumiem un abām rotācijas frekvencēm, kā parādīts 3.2. attēlā.



3.2. att. Temperatūras salīdzinājums pie rotācijas frekvences 1,1 Hz (a-c), 7,6 Hz (d-f) un bez magnēta (g). Augšējā zonde un apakšējā zonde ir apzīmētas attiecīgi ar nepārtrauktām un pārtrauktām līnijām. Magnēta orientācija: (a, d) vertikāla; (b, e) 45° ; (c, f) horizontāli.

Kvantitatīvas salīdzināšanas nolūkā tiek parādīts arī gadījums bez maisīšanas. Temperatūras sadalījuma momentuzņēmumi no infrasarkanā kameru ierakstiem un skaitliskajiem aprēķiniem nodrošina kvalitatīvu eksperimenta un skaitliskā modeļa salīdzinājumu (3.3. att.). Karstā un aukstā šķidrā metāla apgabalu sajaukšanās paātrinās, palielinoties PM rotācijas frekvencei. Tātad, lai skaidri uztvertu sajaukšanas procesu un konvekcijas modeļus, kvalitatīvajā salīdzinājumā tiek izmantoti 1,1 Hz eksperimentu rezultāti.



3.3. att. Sānu sienas temperatūras sadalījums fizikālajā eksperimentā un skaitliskajā aprēķinā pie PM rotācijas frekvences 1,1 Hz, kad magnēts novietots 45° leņķī: a) fizikālais eksperiments – platākā puse; b) fizikālais eksperiments – šaurākā puse; c) skaitliskais aprēķins – platākā puse; d) skaitliskais aprēķins – šaurākā puse.

Skaitlisko aprēķinu rezultātiem nav ideāla sakritība ar eksperimentālajiem datiem. Visvairāk tas izpaužas sākotnējā un beigu temperatūrā. Visos gadījumos apakšējās zondes skaitlisko aprēķinu rādījums sākas nedaudz augstāk. To var attiecināt uz sākotnējo lineāro temperatūras sadalījumu skaitliskajā modelī. Eksperimenta sākumā siltums no gāzes degļa vēl nebija sasniedzis apakšējo zondes dziļuma līmeni, atstājot apakšējos slāņus istabas temperatūrā. Skaitliskā eksperimenta rezultātiem kopumā ir tendence uz augstāku beigu temperatūru nekā eksperimentālajiem rezultātiem. Daļēji tas ir saistīts ar sākotnējo vidējo šķidrā metāla temperatūru, daļēji tāpēc, ka skaitliskais modelis izmanto adiabatiskus sienas robežnosacījumus temperatūrai pretēji eksperimentam. Tomēr tas nenozīmē, ka siltuma zudumi spēcīgi ietekmē novēroto temperatūras homogenizācijas procesu.

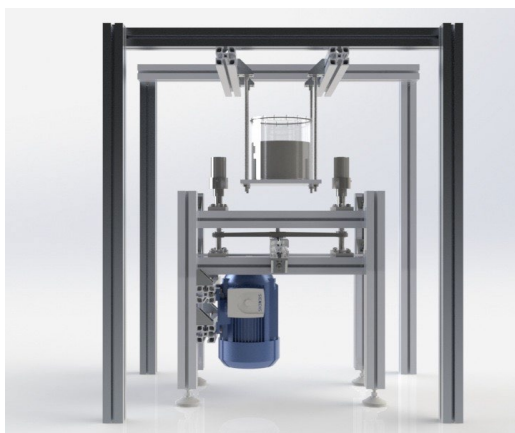
Ekspimentālais modelis veiksmīgi parādīja, ka nerūsējošā tērauda konteineri ar plānām sienām var izmantot kombinācijā ar termiskās attēlveidošanas kameru, lai novērotu dažādu temperatūru šķidrā metāla plūsmu. Tika parādīts, ka rotējošais pastāvīgais magnēts krasi uzlabo laiku, kas nepieciešams, lai sasniegtu termodinamisko līdzsvaru šķidrā metāla tilpumā. Ekspimentālie rezultāti liecina, ka vislabākais veids, kā sajaukt šķidro metālu, kuram ir vertikāls temperatūras gradients, ir tad, kad rotējošo pastāvīgo magnētu novieto horizontālā stāvoklī. Skaitliskās simulācijas kopumā labi saskan ar ekspimentālo modeli, ņemot vērā tā ierobežojumus. Tas ļauj attīstīt skaitlisko modeli un mērogot to rūpnieciska izmēra modelim nākotnē.

Ekspimentālo modeli var uzskatīt par veiksmīgu, jo tas parāda, ka viena dipola pastāvīgā magnēta maisītājs ir efektīvs risinājums termiskā līdzsvara sasniegšanai no augšas apsildāmās metāla kausēšanas krāsnīs. Turpmākajos pētījumos tiešos temperatūras mērījumus varētu uzlabot, nomainot termopārus korpusos ar plāniem termopāra vadiem, kas tiktu novietoti tieši uz konteineru sienas. Tam vajadzētu uzlabot saskāņu starp dažādām mērīšanas metodēm.

3.2. Divu cilindru maisītājs

Metālu kausēšanas krāsnīs, kur izmanto gāzes degļus, ir svarīgi šķidro metālu samaisīt, citādi veidojas liela temperatūras starpība starp augšējo un apakšējo slāni (tipiski no 50 °C līdz 80 °C) [13]. Augsta virsmas temperatūra palielina virsmas oksidēšanos, kas palielina sārņu veidošanos. Efektīva šķidrā metāla tilpuma apmaisīšana ir svarīgs process metālu ražotājiem, jo tas panāk ātrāku leģējošo materiālu iemaisīšanu, kā arī palielina ķīmiskā sastāva un temperatūras homogenizāciju. Šķidra metāla maisītājus var izmantot arī leģējošo materiālu iemaisīšanai, degazācijai un kristalizācijas struktūras maiņai.

Divu cilindru maisītājs tika izveidots, lai izpētītu šķidra metāla plūsmu cilindriskā traukā, kad tam sānos novieto divus PM. Ierīce redzama 3.4. attēlā. Šīs iekārtas galvenie uzdevumi bija izpētīt, kā radīt efektīvu šķidra metāla apmaisīšanu un daļiņu iemaisīšanu.

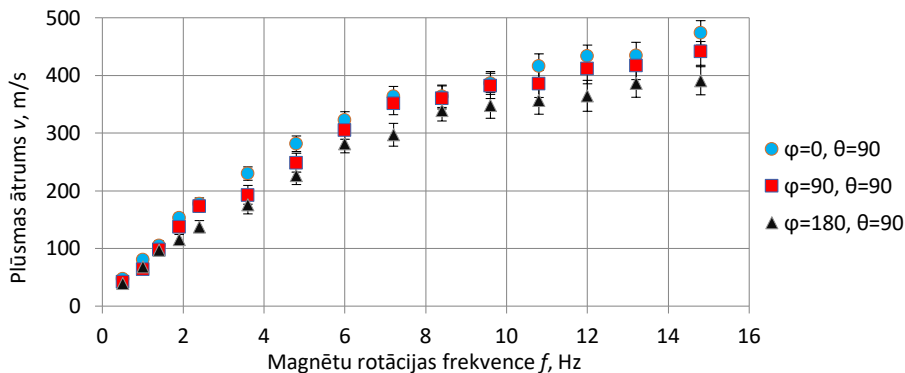


3.4. att. Ekspimentālās iekārtas datormodelis.

Sistēmai ir divas galvenās struktūras. Centrālās iekārtas pamatā ir divi cilindriski PM, kuru rotācijas asis ir paralēlas. Magnēti atrodas nerūsējošā tērauda ietvaros, kas ir nostiprināti uz cilindriskām asīm, kas savienotas ar motoru (*Siemens* trīsfāžu motors ar jaudu 0,55 kW un maksimālo ātrumu 1440 apgr./min) ar zobsiksnu un zobsiksnas rullīšu palīdzību. Divi spriegošanas rullīši nodrošina adekvātu siksnas nospieģojumu visos iespējamajos PM attālumos, kā arī dod iespēju magnētu savstarpējo rotāciju veikt vienā vai pretējos virzienos. Rāmis, uz kura ir novietots trauks ar šķidro metālu, ir atdalīts no PM rāmja, lai samazinātu vibrāciju pārnesei.

Papildus tam rāmi ar magnētiem iespējams sagāzt attiecībā pret šķidrā metāla trauku ar speciālu stiprinājumu palīdzību. Magnētu slīpums attiecībā pret zemi tiek apzīmēts ar leņķi θ . Magnētu sākotnējais magnetizācijas virziens savā starpā tiek apzīmēts ar φ . Šķidrā metāla traukam diametrs ir 130 mm, augstums 134 mm un tilpums $V = 1,7$ l.

Veicot ātrumu mērījumus, tika konstatēts, ka korotācijas režīmos fāzes nobīdes leņķis $\varphi = 0^\circ$ rada vislielākos plūsmas ātrumus, aptuveni par 5 %–10 % vairāk nekā pie $\varphi = 90^\circ$ vai $\varphi = 180^\circ$. Pretrotācijas režīmos izmērāma atšķirība netika novērota. Dažādu fāžu nobīdes ietekme šajā gadījumā ir minimāla, jo magnēti ir salīdzinoši tālu viens no otra. 5.16. attēlā redzami nomērītie plūsmas ātrumi attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu pie dažādām fāzes nobīdēm φ , kad $\theta = 90^\circ$.



3.5. att. Plūsmas ātrums attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu (korotācija).

Tika parādīts, ka PM sistēmu var izmantot intensīvas kustības radīšanai šķidrā metāla tilpumā. Princips tika pārbaudīts, izmantojot maza mēroga eksperimentālo ierīci. Tika realizēti dažādi plūsmas veidi cilindriskā traukā, ko nodrošināja iekārtas augstā pielāgojamība. Tika veikta bezdimensionālo lielumu analīze, lai parādītu, ka to var izmantot arī liela izmēra šķidrā alumīnija maisīšanai rūpnieciskos procesos. Magnētiskā lauka eksperimentālie mērījumi labi sakrīt ar skaitliskā modeļa rezultātiem un parāda to, ka *Comsol Multiphysics* var lietot PM sistēmu magnētiskā lauka aprēķināšanai. Šīs tehnoloģijas galvenās priekšrocības ir tās vienkāršība un energoefektivitāte, savukārt trūkumi ir nemainīgs magnētiskais lauks un ierobežota piemērojamība biezu sienu gadījumā.

4. SECINĀJUMI

1. Eksperimentāli parādīts, ka viena pastāvīgā magnēta cilindru var izmantot efektīvai šķidrā metāla sūkņēšanai, ja tas ir novietots pie plata kanāla ar nelielu augstumu. Parādīts, kā inducētie strāvas kontūri, iedarbojoties ar primāro magnētisko lauku, rada spēku uz šķidro metālu, kas izveido spiediena starpību 14 kPa lielumā pie 71 Hz magnēta rotācijas frekvences. Noskaidrots, ka konkrētajā sistēmā pastāvīgā magnēta rotācijas rezultātā inducētās strāvas rada 73 W lielu siltuma jaudu, kas atbilst 21 % no motora jaudas.
2. Secināts, ka, veicot bezdimensionālo lielumu analīzi, var veikt maza mēroga eksperimentālu šķidro metālu sūkņu mērogošanu uz lielāka izmēra industriālajām iekārtām.
3. Novērota viena PM sūkņa radīta recirkulējoša plūsma šķidra metāla kanālā, kas saistīta ar sānu efektiem.
4. Izstrādāta metodika cilindrisku PM dipolu savstarpējo spēku aprēķināšanai un realizēta analītiska, skaitliska un eksperimentāla izpēte sistēmām ar vairākiem PM cilindriem divās rindās.
5. Veikta dzinēja griezes momenta optimizācija, mainot PM izvietojumu. Noskaidrots, ka PM sistēmām ar tuvu stāvošiem PM dipoliem eksistē optimāls savstarpējo magnetizācijas virzienu fāžu nobīdes leņķis attiecībā pret sistēmas vidējo griezes momentu. Sistēmā ar sešiem cilindriem optimālais leņķis $\alpha = 97^\circ$. Sistēmā ar astoņiem cilindriem optimālais leņķis $\alpha = 78^\circ$, pie $\alpha = 112^\circ$. Sistēmā ar 10 cilindriem optimālais leņķis $\alpha = 48^\circ$, pie $\alpha = 93^\circ$ un pie $\alpha = 137^\circ$.
6. Skaitliskie un analītiskie aprēķini rāda, ka, lai izstrādātu ierīci ar vairākiem pastāvīgo magnētu cilindriem, kas spētu stabili darboties, ir nepieciešams iestatīt specifiskus magnetizācijas virzienu fāžu leņķus. Pat nelielas nobīdes no šiem optimuma leņķiem var radīt lielas slodzes piedziņas sistēmai.
7. Izstrādāta viena PM cilindra ierīce degazācijas procesa izpētei. Analītiskie un skaitliskie aprēķini rāda, ka šī konstrukcija spēj radīt pietiekamu šķidrā alumīnija plūsmu kamerā, lai veiktu degazāciju un sašķeltu gāzu burbuļus. Noskaidrots, ka ar feromagnētisko jūgu palīdzību var iegūt par 20 % stiprāku magnētisko lauku šķidrā metāla zonā.
8. Secināts, ka viena dipola pastāvīgā magnēta maisītājs ir efektīvs risinājums termiskā līdzsvara sasniegšanai no augšas apsildāmās metāla kausēšanas krāsnīs, kā arī horizontāli novietots magnēts samaisa šķidrumu vismaz divas reizes ātrāk.
9. Izstrādāta divu PM cilindru šķidra metāla maisīšanas ierīce un demonstrēts, ka to var izmantot intensīvas kustības radīšanai šķidrā metāla tilpumā. Realizēti dažādi plūsmas veidi cilindriskā traukā un demonstrēts, ka divu PM cilindru sistēmu var veiksmīgi izmantot šķidra metāla maisīšanai. Noskaidrots, ka lielākie ātrumi tiek sasniegti pie savstarpējā magnetizācijas fāžu nobīdes leņķa $\varphi = 0^\circ$ līdz pat 0,47 m/s, ja magnēta rotācijas frekvence ir 19,2 Hz.

5. IZMANTOTĀ LITERATŪRA

- [1] A. Bojarevics and T. Beinerts, "Experiments on liquid metal flow induced by a rotating magnetic dipole," *Magnetohydrodynamics*, vol. 46, no. 4, pp. 333–338, 2010.
- [2] L. Zhang, X. Lv, A. T. Torgerson, and M. Long, "Removal of Impurity Elements from Molten Aluminum: A Review," <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2010.483396>, vol. 32, no. 3, pp. 150–228, Jul. 2011, doi: 10.1080/08827508.2010.483396.
- [3] D. E. J. Talbot, "Effects of Hydrogen in Aluminium, Magnesium, Copper, and Their Alloys," <https://doi.org/10.1179/imtlr.1975.20.1.166>, vol. 20, no. 1, pp. 166–184, Jan. 2013, doi: 10.1179/IMTLR.1975.20.1.166.
- [4] G. K. Sigworth, E. M. Williams, and D. C. Chesonis, "Gas fluxing of molten aluminum: An overview," *TMS Light Metals*, pp. 581–586, 2008, doi: 10.1007/978-3-319-48228-6_9.
- [5] K. Halbach, "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material," *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 169, no. 1, pp. 1–10, Feb. 1980, doi: 10.1016/0029-554X(80)90094-4.
- [6] M. and I. S. and T. E. Cook Ray and Varayud, "Case Study of Magnetically-Stirred Casting Furnaces at New Zealand Aluminium Smelters Limited," in *Light Metals 2017*, A. P. Ratvik, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 909–915.
- [7] J. Herbert and B. Painter, "Case Study of Air Cooled Electromagnetic Stirred Melting Furnace at Hydro Henderson," in *TMS Annual Meeting & Exhibition*, Springer, 2018, pp. 1015–1023.
- [8] A. Peel and P. Y. Menet, "The application of MHD side stirring technology to aluminium melting furnaces for operational efficiency improvement—A case study," *Journal for Manufacturing Science and Production*, vol. 15, no. 1, pp. 59–67, 2015.
- [9] A. Bojarevičs, R. Baranovskis, I. Kaldre, M. Milgrāvis, and T. Beinerts, "Two cylinder permanent magnet stirrer for liquid metals," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2017, p. 012022.
- [10] J. Zeng, W. Chen, Y. Yang, and A. Mclean, "A review of permanent magnet stirring during metal solidification," *Metallurgical and materials transactions B*, vol. 48, no. 6, pp. 3083–3100, 2017.
- [11] I. Bucenieks, "Perspectives of increasing efficiency and productivity of electromagnetic induction pumps for mercury basing on permanent magnets," in *International Conference on Nuclear Engineering*, 2006, pp. 185–189.
- [12] I. Kaldre *et al.*, "Contactless electromagnetic method for aluminium degassing," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. doi: 10.1088/1757-899X/424/1/012057.
- [13] J. Andersson, "Optimized Electromagnetic Stirring in Melting and Holding Furnaces BT – Light Metals 2019," C. Chesonis, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 1179–1183.



Matīss Kalvāns dzimis 1989. gadā Rīgā. *Université Pierre-et-Marie-Curie* (Parīze, Francija) ieguvis bakalaura grādu fizikā (2012), *University of Glasgow* (Glāzgo, Lielbritānija) maģistra grādu mašīnbūvē (2014). Kopš 2014. gada strādā Latvijas Universitātes Fizikas institūtā, ieņemot pētnieka amatu. Zinātniskās intereses saistītas ar pastāvīgajiem magnētiem, metalurģiju un magnetohidrodinamiku.