

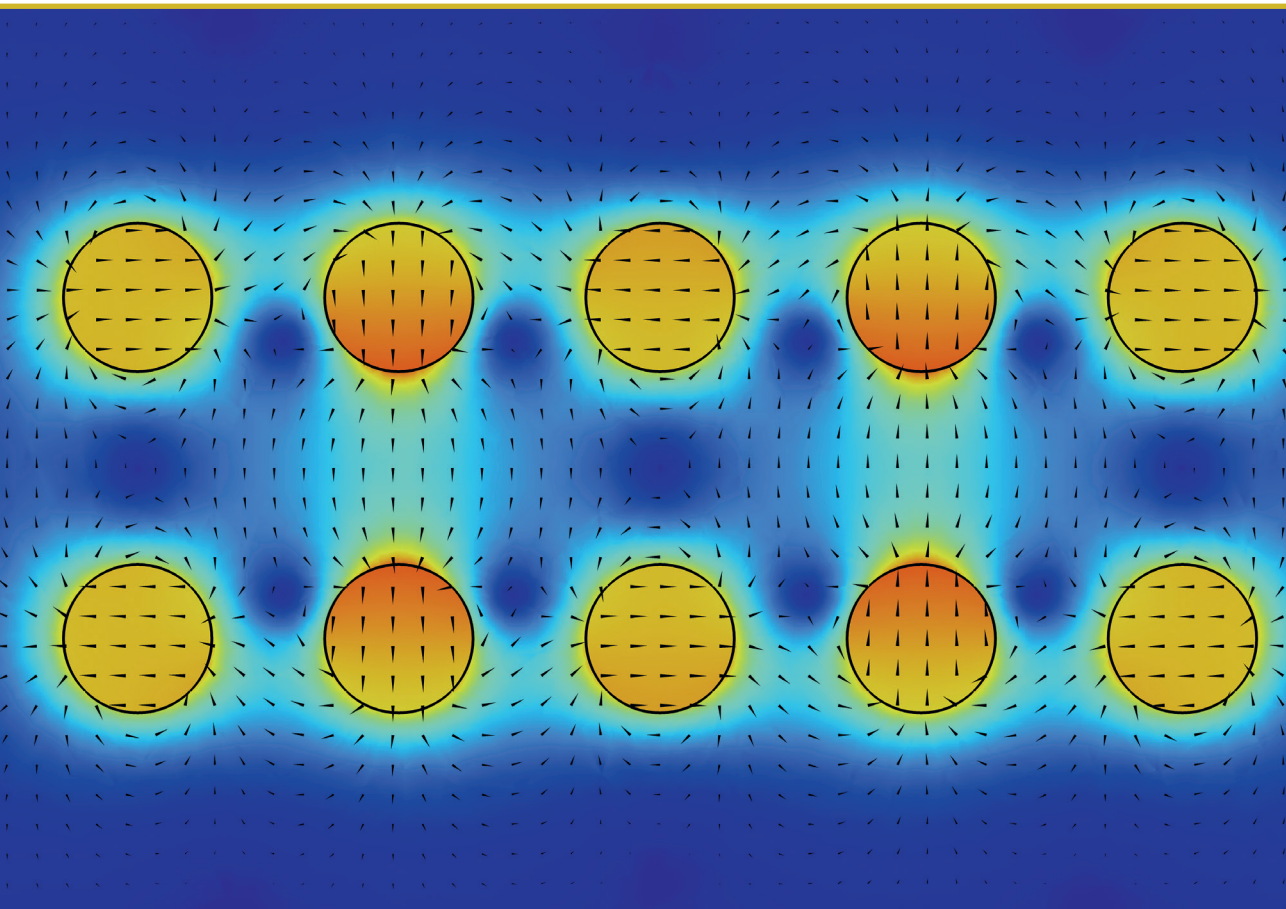


RĪGAS TEHNISKĀ  
UNIVERSITĀTE

**Matīss Kalvāns**

# METALURĢIJAI PAREDZĒTU ROTĒJOŠU PASTĀVĪGO MAGNĒTU DIPOLU SŪKŅU DINAMIKAS ANALĪZE UN OPTIMIZĀCIJA

Promocijas darbs



**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

Mašīnzinību, transporta un aeronautikas fakultāte  
Mehānikas un mašīnbūves institūts

**Matīss Kalvāns**

Doktora studiju programmas “Mašīnbūve un mehānika” doktorants

**METALURĢIJAI PAREDZĒTU ROTĒJOŠU  
PASTĀVĪGO MAGNĒTU DIPOLU SŪKŅU  
DINAMIKAS ANALĪZE UN OPTIMIZĀCIJA**

**Promocijas darbs**

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

*Dr. phys.*  
ANDRIS BOJAREVIČS

RTU Izdevniecība  
Rīga 2023

### Biežāk izmantoto apzīmējumu saraksts

Apzīmējums	Mērvienība	Apraksts
MHD	-	Magnetohidrodinamika
EM	-	Elektromagnētisks
PM	-	Pastāvīgie magnēti
UDV	-	<i>Ultrasound Doppler Velocimetry</i> (Ultraskaņas Doplera ātruma mērīšanas metode)
Re	-	Reinoldsa skaitlis
Ha	-	Hartmaņa skaitlis
N	-	Stjuarta skaitlis
Rem	-	Magnētiskais Reinoldsa skaitlis
$t$	s	Laiks
$f$	Hz	Frekvence
$\omega$	rad/s	Cikliskā frekvence
$\sigma$	S/m	Īpatnējā elektrovadītspēja
$\mu_0$	H/m	Magnētiskā konstante
B	T	Magnētiskā lauka indukcija
I	A	Strāvas stiprums
$\delta$	m	Skinefekta slāņa biezums
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	Kinemātiskā viskozitāte
$\eta$	Pa·s	Dinamiskā viskozitāte
P	W	Jauda
$p$	Pa	Spiediens
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Blīvums

# Saturs

<b>1. IEVADS</b> .....	<b>7</b>
1.1. DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS .....	9
1.1.1. <i>Tēmas aktualitāte</i> .....	9
1.1.2. <i>Darba mērķis un galvenie uzdevumi</i> .....	9
1.1.3. <i>Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes</i> .....	10
1.1.4. <i>Zinātniskā novitāte</i> .....	10
<b>2. ŠĶIDRA METĀLU SŪKŅU AR PASTĀVĪGAJIEM MAGNĒTIEM PĀRSKATS</b> .....	<b>11</b>
2.1. PASTĀVĪGIE MAGNĒTI .....	11
2.2. INGASŅI EITETISKAIS SAKAUSĒJUMS .....	14
2.3. ŠĶIDRA METĀLA SŪKŅI AR PM .....	15
2.4. EKSPERIMENTĀLĀS MĒRĪŠANAS METODES .....	19
2.4.1. <i>Strāvas mērījumi</i> .....	19
2.4.2. <i>Magnētiskais lauks</i> .....	20
2.4.3. <i>Ultraskaņas doplerogrāfija</i> .....	20
2.4.4. <i>Caurteces mērītājs</i> .....	22
<b>3. VIENA PASTĀVĪGĀ MAGNĒTA DIPOLA SŪKŅI</b> .....	<b>30</b>
3.1. VIENA PM CILINDRA MODEĻA SŪKNIS .....	30
3.1.1. <i>Bezdimensionālie kritēriji</i> .....	31
3.1.2. <i>Eksperimentālais modelis</i> .....	32
3.1.3. <i>Rezultāti</i> .....	34
3.1.4. <i>Secinājumi</i> .....	36
3.2. VIENA CILINDRA PM DIPOLA SŪKŅA SKAITLISKĀ MODEĻĒŠANA .....	36
3.2.1. <i>Plūsmas ātruma skaitliskais eksperiments</i> .....	36
3.2.2. <i>Caurteces optimizācijas skaitliskais eksperiments</i> .....	39
3.2.3. <i>Plūsma ar pretpiedienu</i> .....	41
3.2.4. <i>Noslēgts kanāls</i> .....	43
3.2.5. <i>Secinājumi</i> .....	44
3.3. VIENA PM SŪKŅA ŠĶIDRA METĀLA PLŪSMAS IZPĒTE LINEĀRĀ KANĀLĀ .....	45
3.3.1. <i>Eksperimentālā iekārta</i> .....	45
3.3.2. <i>Rezultāti</i> .....	49
3.3.3. <i>Secinājumi</i> .....	51
3.4. INDUSTRIĀLAIS PROTOTIPS .....	51
<b>4. VAIRĀKU PASTĀVĪGO MAGNĒTU SŪKŅI</b> .....	<b>55</b>
4.1. DIVPUSĒJAIS SŪKNIS .....	55
4.1.1. <i>PM sūkņa raksturlielumu novērtējums</i> .....	55
4.1.2. <i>Eksperimentālā iekārta</i> .....	56
4.1.3. <i>Teorētiskais modelis</i> .....	57
4.1.4. <i>Skaitliskie aprēķini</i> .....	58
4.1.5. <i>Sūkņa raksturlielumu novērtējumi</i> .....	65
4.1.6. <i>Secinājumi</i> .....	68
<b>5. ŠĶIDRA METĀLA MAISĪTĀJI</b> .....	<b>69</b>
5.1. BEZKONTAKTA ELEKTROMAGNĒTISKĀ METODE ALUMĪNIJA DEGAZĀCIJAI .....	69
5.1.1. <i>Eksperimentālā ierīce</i> .....	70
5.1.2. <i>Skaitliskais modelis</i> .....	72
5.1.3. <i>Secinājumi</i> .....	74
5.2. MODEĻA EKSPERIMENTS IZKAUSĒTA METĀLA TEMPERATŪRAS HOMOGENIZĀCIJAI AR ROTĒJOŠU PASTĀVĪGO MAGNĒTU .....	74
5.2.1. <i>Eksperimentālā ierīce</i> .....	76
5.2.2. <i>Rezultāti un secinājumi</i> .....	78
5.2.3. <i>Secinājumi</i> .....	84
5.3. DIVU CILINDRU MAISĪTĀJS .....	85
5.3.1. <i>Magnētiskais lauks starp magnētiem</i> .....	86

5.3.2.	<i>Bezdimensionālie parametri</i> .....	86
5.3.3.	<i>Plūsmas veidi</i> .....	87
5.3.4.	<i>Plūsmas ātrumi</i> .....	88
5.3.5.	<i>Secinājumi</i> .....	90
6.	<b>KOPSAVILKUMS UN SECINĀJUMI</b> .....	91
7.	<b>IZMANTOTĀ LITERATŪRA</b> .....	92
	<b>PATEICĪBAS</b> .....	97
	<b>PIELIKUMI</b> .....	98

## Darba aprobācija un publikācija

Galvenie darba rezultāti ir izklāstīti divpadsmit 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.** (October 2018). 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 metālisku 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, 2–4 November 2021, virtual conference.
9. **M. Kalvāns**, A. Bojarevičs, “Viena pastāvīgā magnēta dipola indukcijas sūknis 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 sūknis” 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. Ievads

Magnetohidrodinamika (MHD) ir zinātnes nozare, kas pēta elektriski vadošu fluīdu kustību. Visbiežāk pētītie elektrību vadošie fluīdi ir plazma un šķidri metāli. MHD teorijas pamatā ir elektriski vadošo šķidrums spēja radīt magnētisko lauku. Magnētiskā lauka esamība ietekmē pašu fluīdu, kas izmaina šī lauka ģeometriju un intensitāti. MHD pētniecība palīdz izskaidrot fenomenus tādās nozarēs kā astrofizika, ģeofizika, metalurģija un dažādos inženiertehniskos risinājumos. MHD praktiskie pielietojumi, ar kuriem nodarbojas arī Latvijas Universitātes Fizikas institūts (LUF), ir saistīti ar metalurģiju un atomenerģiju. Tur MHD principi tiek pielietoti, lai radītu plūsmu šķidros metālos bezkontakta veidā.

Metalurģija ir bijusi mūsu civilizācijas tehnoloģiskā progresa virzītājspēks kopš aizvēsturiskiem laikiem. Šķidro metālu apstrāde ir neatņemama metalurģijas sastāvdaļa, kas ļauj metālus veidot dažādās formās un sastāvos. Elektromagnētiskās ierīces var izmantot, lai radītu spēku uz šķidru metālu bez fiziska kontakta. Metalurģijā izmantotie metāli parasti ir ļoti karsti, pretstatā metāliem, kas ir šķidri istabas temperatūrā vai tuvu tai (Hg, Cs, Rb, Fr, Ga). Tādēļ tiek izmantoti konteineri ar biezu izolācijas slāni, kas nosaka, ka attālums starp elektromagnētisko ierīci un šķidro metālu ir salīdzinoši liels.

Metalurģijā izplatīts veids kā apmaisīt šķidru metālu kausēšanas krāsnī ir atverot tvertnes durvis un to apmaisot ar lāpstu, kas piestiprināta pie traktora. Līdzīgā veidā tiek realizēta alumīnija transportēšana, kad ar kausu, kas piestiprināts traktoram, tiek iesmelts šķidrāis metāls un transportēts uz nākamo tehnoloģisko procesu. Šāda veida darbības ir saistītas ar paaugstinātiem drošības riskiem, jo tiek atvērtas krāsns durvis un ir liela nozīme transportlīdzekļa vadītāja spējām, turklāt veidojas arī lieli siltuma zudumi. Vēl viens transportēšanas mehānisms tiek izmantots, kad krāsns tiek izbūvēta uz paaugstinājuma, lai šķidrāis metāls varētu iztecēt ārā ar gravitācijas palīdzību, kad visa krāsns tiek sagāzta. Šāds risinājums ir tehniski sarežģīts un dārgs, jo krāsns svārs pat nelielām krāsnīm ir vairāki desmiti tonnu.

Mehāniskie sūkņi ir visizplatītākais izkausēta alumīnija cirkulācijas tehnoloģijas veids, ko mūsdienās izmanto rūpniecībā. Tomēr, lai arī mehāniskiem sūkņiem ir zemas sākotnējās izmaksas, tiem ir vairāki raksturīgi dizaina trūkumi. Mehānisko sūkņu darba detaļām ir nepieciešams tiešs kontakts ar izkausētu alumīniju. Fiziskais kontakts strauji nolieto detaļas. Mehāniskajiem sūkņiem ir maza cirkulācijas spēja, un tiem ir nepieciešami īpaši uzstādīšanas parametri. Krāsnīs ir nepieciešams noteikts šķidrā metāla dziļums, lai mehāniskie sūkņi neierautu gaisu, tādējādi palielinot oksidāciju. Pirms uzstādīšanas ir nepieciešama arī iekārtas iepriekšēja uzsildīšana.

Pirmais elektromagnētiskās indukcijas šķidra metāla sūknis tika patentēts jau 1930.gadā, kad A.Einšteins ar L.Szilarrdu radīja sūkni leduskapjiem [1].

EM sūkņu un maisītāju priekšrocības metalurģiskām krāsnīm attiecībā pret mehāniskajām ierīcēm ir vairākas. Maisītāja izmantošana ļauj ātri un efektīvi visu partijas tilpumu sasildīt līdz optimālai temperatūrai, samazinot kausēšanas laiku un procesam iztērēto enerģiju un maksimāli palielinot krāsns produktivitāti [2]. Metāla oksidēšanās tiek samazināta, jo tiek palielināts kušanas ātrums un nav vajadzības pārkarsēt šķidrā metāla tilpumu, tādējādi



samazinot metāla zudumus. Lai nodrošinātu nemainīgu un paredzamu produktu kvalitāti, izkausētais metāls ir rūpīgi jāsamaisa no augšas uz leju.

Elektromagnētisko ierīču pielietojumi ir daudzi. Viena kategorija ir šķidra metāla sajaukšana, ko var izmantot tādos tehnoloģiskos procesos kā degazēšana, sakausēšana un temperatūras homogenizācija [3][4]. Otrā kategorija ir sūkņēšana, kas dod iespēju metālu pārvietot starp tehnoloģiskajiem procesiem, piemēram, no kausēšanas krāsnis uz liešanu. Sūkņus var izmantot arī sajaukšanai, kontrolētai dozēšanai un plūsmas apturēšanai [5].

Šķidra metāla pārvietošanai izmantotās EM ierīces var iedalīt divās kategorijās – kondukcijas un indukcijas sūkņos. Kondukcijas elektromagnētiskie sūkņi sastāv no metāla kanāla, kuram sānos, viens otram pretī, ir uzstādīti divi elektrodi un magnētiem, kas novietoti tā, lai magnētiskā lauka un elektriskās strāvas vektori būtu savstarpēji perpendikulāri [6]–[8]. Šo vektoru savstarpējā iedarbība rada elektromagnētisko spēku šķidrā metālā, kas liek tam plūst pa cauruli. Viens no kondukcijas sūkņu trūkumiem ir tāds, ka ir grūti nodrošināt stabilu elektrisko kontaktu starp elektrodiem un šķidro metālu, jo veidojas slihta slapināšana starp šiem materiāliem, tādējādi ir liela kontakta pretestība. Tādēļ, lai nodrošinātu vēlamu sūkņa efektivitāti, ir nepieciešams izmantot lielas strāvas vērtības, kas sadārdzina sūkņa konstrukciju. Parasti kondukcijas tipa sūkņos pielieto līdzstrāvu.

Elektromagnētiskās indukcijas sūkņi uz šķidro metālu iedarbojas pa attālumu – bez fiziska kontakta ar šķidro metālu. Sūkņi rada mainīgu magnētisko lauku, kurš inducē strāvas šķidrā metālā. Šīs strāvas rada pašas savu magnētisko lauku, kurš mijiedarbojas ar primāro magnētisko lauku,

Sūkņa radītā magnētiskā lauka mijiedarbība ar šķidrā metālā šī lauka inducēto lauku elektrisko strāvu rada elektromagnētisko spēku, kas virza šķidro metālu uz priekšu. Visplašāk tiek izmantoti trīsfāžu indukcijas sūkņi, kuru darbības pamatā ir maiņstrāvas elektromagnēti [9]. Lai inducētie elektromagnētiskie spēki būtu vērsti vienā noteiktā virzienā (nevis vienkārši pulsējoši spēki), jāizmanto īpašs mainīga magnētiskā lauka veids – periodisks skrejošs magnētiskais lauks [10]. Lai radītu nepieciešamo EM lauku, indukcijas sūkņu vijumi jāizveido specifiskā formā, kas bieži ir sarežģīti no izgatavošanas viedokļa, kā arī bojātu vijumu remonts ir praktiski neiespējams, jo vienkāršāk ir uzbūvēt jaunus vijumus. Elektromagnētiskajiem indukcijas sūkņiem ir augsts elektroenerģijas patēriņš, jo nepieciešamā magnētiskā lauka radīšanai izmanto lielas strāvas vērtības induktorā, kas rada lielu nelietderīgo Džoula siltumu. Lai noņemtu šo siltumu, ir jāizveido speciāli kanāli cauri induktora vijumiem, kas padara šādu konstrukciju sarežģītāku un arī rada papildus risku, šķidruma noplūdes gadījumā. Papildus tam, ir nepieciešams izmantot regulējamus strāvas avotus un kondensatoru baterijas, lai kompensētu reaktīvās jaudas. Tipiska trīsfāžu induktora strāvas stiprums var sasniegt pat 1kA un optimāli pie tādiem izmēri ir izmantot 1-3 Hz frekvenci, lai palielinātu virsmas slāni, kurā rodas inducētā plūsma. Lai panāktu vislielāko maisīšanas spēku, vislabāk ir izmantot 1 Hz frekvenci [11]. Elektromagnētiskie sūkņi un maisītāji, kuri izmanto labi vadošu metālu vijumus, metālu rūpniecībā jau ir izplatīti. Tomēr elektromagnētu aizstāšanai ar pastāvīgajiem magnētiem (PM) var būt daudz priekšrocību, piemēram, mazāks enerģijas patēriņš, vienkāršāka konstrukcija un lielāks attālums starp ierīci un darba vielu [12][13][14]. PM ir raksturīgs magnētiskais lauks, kas saglabā savu spēku

simtiem gadu, ja tie netiek pārkarsēti vai demagnetizēti ar ārēja magnētiskā lauka palīdzību. PM zaudē savu magnetizāciju, kad tos uzsilda virs Kirī temperatūras, tāpēc to aizsardzībai jāizmanto atbilstoša siltumizolācija. Šajā darbā tiek piedāvāta alternatīva maiņstrāvas indukcijas sūkņiem - rotējoši pastāvīgo magnētu sūkņi.

Lai radītu arvien lielākus cilindrisku PM sūkņus, kādi būtu nepieciešami metalurģijas tehnoloģijām, acīmredzama pieeja ir palielināt PM cilindra diametru, taču šādā veidā strauji pieaug izmantoto PM tilpums, kas ir dārgākā komponente PM sūkņiem. Viens veids kā risināt šo problēmu ir izvietot vairākus, mazākus sūkņus secīgi uz šķidrā metāla kanāla. Rodas jauna koncepcija – apvienot vairākus cilindriskus PM dipolus vienā sistēmā. Šis ir jauns risinājums, kas līdz šim nav ticis pētīts un rada jaunas fizikālas problēmas, tuvu stāvošo PM dipolu dēļ.

## **1.1. Darba vispārējs raksturojums**

### **1.1.1. 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.

### **1.1.2. Darba mērķis un galvenie uzdevumi**

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.

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

### **1.1.3. Aizstāvēšanai izvirzītās tēzes**

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

### **1.1.4. 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 izvietojumu 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.

## 2. Šķidra metālu sūkņu ar pastāvīgajiem magnētiem pārskats

### 2.1. Pastāvīgie magnēti

Mākslīgie magnēti iedalās divās kategorijās – pastāvīgie magnēti un elektromagnēti. Eksistē arī dabīgie magnēti, no kuriem visspēcīgākie sastāv no magnetizētas dzelzs rūdas (magnetīta), taču tie ir vāji, salīdzinot ar mākslīgajiem magnētiem. Elektromagnēti sastāv no elektriski vadošām stieplēm un magnētiskais lauks rodas, kad caur tām plūst līdzstrāva. Pastāvīgie magnēti sastāv no magnetizēta feromagnētiska materiāla. Tie saglabā savu iekšējā magnētiskā lauka vērtību ļoti ilgu laiku, ja tie netiek karsēti vai ietekmēti ar ārēju magnētisko lauku. Pētījumi liecina, ka neodīma magnēti pie 100 °C temperatūras zaudētu 1 % no magnetizācijas 30 gadu laikā [15].

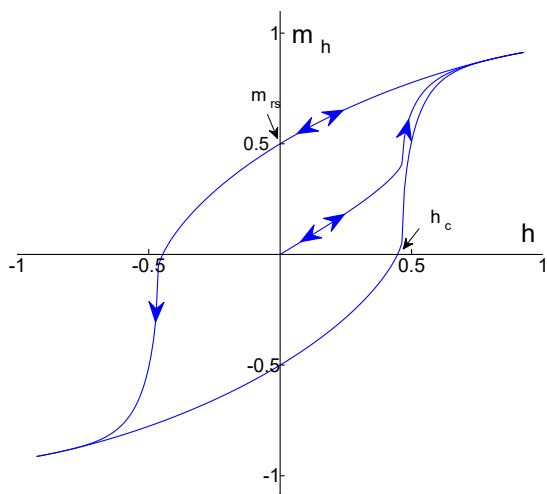
20.gs. sākumā bija zināmi tikai pastāvīgie magnēti izgatavoti no tērauda. 1931. gadā sākās Alnico attīstība, kad T. Mišima Japānā atklāja, ka dzelzs, niķeļa un alumīnija sakausējuma koercivitāte ir 400 oersteds (32 kA/m), kas ir divreiz lielāks par tā laika labākajiem magnētiskajiem tēraudiem [3]. Alnico magnētiem piemīt augsta paliekošā magnētiskā indukcija (līdz 1,2 T) un augsta maksimālā darba temperatūra (līdz 525 °C) [3]. Tomēr to trūkums ir tāds, ka tos ir relatīvi viegli demagnetizēt (koercitīvais spēks 10 reizes mazāks kā neodīma magnētiem).

Ap 1966. gadu iesākās pirmo retzemju metālu pastāvīgo magnētu izstrāde, kad ASV gaisa spēku laboratorijā tika atklāts, ka itrija un kobalta sakausējumam (YCo<sub>5</sub>) piemīt tajā brīdī vislielākā magnētiskās anizotropijas konstante [16]. Retzemju metālu magnēti ir līdz šim stiprākie zināmie pastāvīgie magnēti aizstājot iepriekš izplatītos ferītu un alumīnija-niķeļa-kobalta magnētus. Visizplatītākie retzemju metālu magnēti ir neodīma (NdFeB) un samārija-kobalta (SmCo) magnēti. Tie visbiežāk tiek izgatavoti presējot šī materiāla pulveri, tādēļ izgatavotie magnēti ir trausli un var saplaisāt. Samārija-kobalta magnēti ir dārgāki un ar mazāku magnētiskā lauka stiprību kā neodīma magnēti, taču tiem piemīt augstāka Kirī temperatūra, kas nosaka temperatūru pie kuras tie zaudē savas magnētiskās īpašības [17]. Neodīmam kā tīram materiālam Kirī temperatūra ir 19 K (– 254,2 °C), tādēļ tā magnētiskās īpašības parādās tikai pie ļoti zemām temperatūrām. Apvienojot neodīmu ar dzelzi un citiem materiāliem var panākt, ka radītā materiāla Kirī temperatūra ir krietni virs istabas temperatūras. Lai arī NdFeB magnētiem Kirī temperatūra ir starp 310 °C un 400 °C atkarībā no markas, to maksimālā pieļaujamā darba temperatūra, pie kuras to magnetizācija sāk samazināties, ir zemāka. Tabulā 2.1. ir parādītas dažādu NdFeB un SmCo magnētu markas un to īpašības [18], [19].

Dažādu retzemju pastāvīgo magnētu īpašības

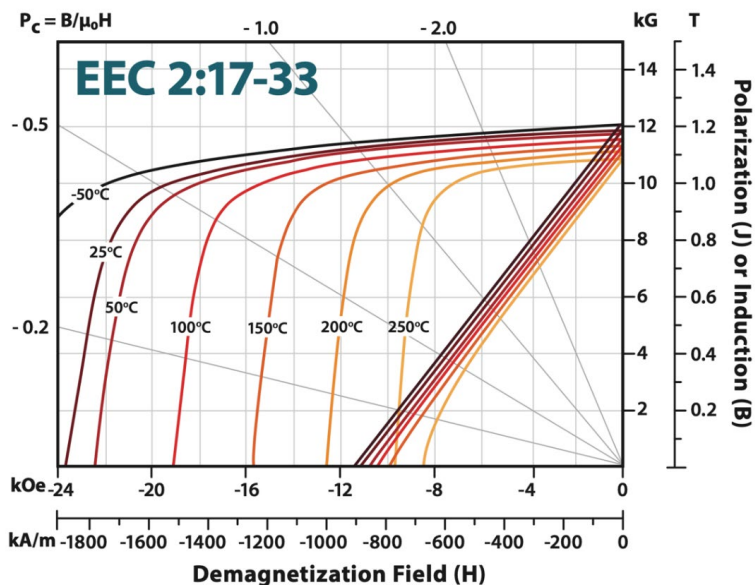
NdFeB magnēti			SmCo magnēti		
Nosaukums	Magnētiskā lauka intensitāte (T)	Maksimālā darba temperatūra (°C)	Nosaukums	Magnētiskā lauka intensitāte (T)	Maksimālā darba temperatūra (°C)
GSN-50	1,44	80	EEC 2:17-34	1,19	250
GSN-52	1,48	80	EEC 2:17-33	1,17	250
GSN-42M	1,33	100	EEC 2:17-31	1,15	300
GSN-45M	1,37	100	EEC 2:17-30	1,13	300
GSN-48M	1,41	90	EEC 2:17-29	1,10	320
GSN-50M	1,44	90	EEC 2:17-27	1,08	320
GSN-46H	1,38	120	EEC 2:17-24	1,00	320
GSN-48H	1,41	120	EEC 2:17-TC22	0,98	320
GSN-40SH	1,30	150	EEC 2:17-TC20	0,93	320
GSN-42SH	1,33	150	EEC 2:17-TC18	0,88	320
GSN-44SH	1,36	150	EEC 2:17-TC16	0,83	320
GSN-35UH	1,22	180	EEC 2:17-TC15	0,80	320
GSN-38UH	1,26	180	EEC 2:17-TC13	0,75	320
GSN-40UH	1,28	180	EEC 2:17-TC7	0,55	320
GSN-33EH	1,17	200	EEC 2:17-TC5	0,45	320
GSN-35EH	1,22	200	EEC 2:17-TC4	0,40	320
GSN-38EH	1,26	200	EEC 26-T350	1,05	350
GSN-25AH	1,02	220	EEC 24-T400	1,00	400
GSN-28AH	1,08	220	EEC 22-T450	0,96	450
GSN-30AH	1,14	220	EEC 20-T500	0,92	500
GSN-25BH	1,00	230	EEC 18-T550	0,87	550

Kad feromagnētisku materiālu ievieto ārējā magnētiskā laukā, tas magnetizējas. Atliekot uz horizontālās ass ārējā magnētiskā lauka stiprumu un uz vertikālās ass magnetizācijas stiprumu, iegūst histerēzes cilpu (2.1. attēls).



2.1. att. Histerēzes cilpa [20].

Līkni, kas atrodas histerēzes cilpas otrajā kvadrantā, sauc par atmagnetizēšanās līkni. Atmagnetizēšanās līkne parāda kāds ārējais magnētiskais lauks būtu jāizveido, lai magnēts zaudētu savu iekšējo magnetizāciju. Attēlā 2.2. redzama atmagnetizēšanās līkne SmCo EEC 2:17-33 markas magnētām, kura īpašības redzamas arī tabulā 2.1.



2.2. att. Atmagnetizēšanās līkne pie dažādām temperatūrām [18].

Šajā grafikā ir redzama arī temperatūras ietekme uz magnēta atmagnetizēšanās likni. Tas norāda arī uz to, ka ir jāpievērš papildus uzmanība, kad magnēti tiek lietoti paaugstinātā temperatūra un ārēja magnētiskā lauka tuvumā.

## 2.2. InGaSn eitektiskais sakausējums

Indija, gallija un alvas eitektiskais sakausējums, saukts arī par galinstānu, ir viela, kura šī darba izstrāde tikusi izmantota vairākkārtīgi. Samaisot šos trīs metālus specifiskās proporcijās (68,5 % Ga, 21,5 % In, un 10,0 % Sn pēc svara), iegūst homogēnu eitektisko sakausējumu, kura kušanas temperatūra ir viszemākā no visām proporcijām un ir zemāka kā katram materiālam atsevišķi. Galinstāna īpašības uzrādītas tabulā 2.2. [21], [22]

2.2. tabula

Galinstāna īpašības

Īpašība	Vērtība
Vārīšanās temperatūra	1300 °C
Kušanas temperatūra	-19 °C
Blīvums	6,44 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
Viskozitāte	0,0024 Pa·s (20 °C)
Elektriskā vadītspēja	3,46×10 <sup>6</sup> S/m (20 °C)
Termiskā vadītspēja	16,5 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
Piesātinātā tvaika spiediens	< 10 <sup>-8</sup> Torr (500 °C)
Īpatnējā siltumietilpība	296 J/(kg·K)

Galinstānam nav smaržas, tas nav toksisks, nešķīst ūdenī un organiskajos šķīdinātajos, tas slapina un pieķeras dažādiem materiāliem, tajā skaitā stiklam [23]. Paaugstinoties temperatūrai, GaInSn elektrovadītspēja samazinās [24].

Galvenā problēma, strādājot ar Gallija maisījumiem, ir tā tieksme oksidēties. Gallijs saskarē ar gaisu oksidējas un veido Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> piesārņojumu. Gallijs pieder alumīnija ķīmisko elementu grupai un līdzīgi kā alumīnijs, oksidējoties rodas caurspīdīgs, plāns oksīda slānis, kas pasargā dziļāk esošo metālu no tālākas oksidēšanās. Šķidrā galinstānā, kas tiek maisīts, šī plēve tiek pārrauta un veidojas jauns oksīdu slānis. Laika gaitā oksīdu plēve sakrājas un izveidojas lieli kunkuļi. Šī iemesla dēļ, vaļēji trauki ar galinstānu, kas tiek maisīti, ir nepiemēroti ilgstošam darbam. Savukārt noslēgtos kontūros, kas tiek izmantoti eksperimentiem, ir jāveic dažādi sagatavošanās darbi, lai nepieļautu šķidrā metāla saskari ar skābekli. Gallija oksīds pielīp gandrīz pie visa veida virsmām, kas apgrūtina konteineru un instrumentu tīrīšanu, kas ir bijuši saskarē ar to. Eksperimentu gaitā tika atklāts, ka 5% HCl šķīdums ir efektīvs, lai aizsargātu virsmas no gallija oksīdu pieķeršanās.

Galinstānu nedrīkst lietot kopā ar alumīnija detaļām, jo tas stipri reaģē saskarē ar to, padara to porainu kā rezultātā alumīnijs zaudē savu strukturālo integritāti. Galinstāns saskarē ar varu arī ir nevēlams, taču šajā gadījumā reakcija notiek daudz lēnāk un paātrinās paaugstinātā temperatūrā (>100 °C) [25].

### 2.3. Šķidra metāla sūkņi ar PM

Elektromagnētiskie sūkņi, kas paredzēti elektriski vadošiem šķidrumiem ir zināmi kopš 1940-ajiem gadiem. To darbības pamatā ir elektromagnētiskās indukcijas likums, kas nosaka, ka mainīgs magnētiskais lauks vadošā vidē inducē strāvas, kuras mijiedarbojas ar primāro magnētisko lauku, tādējādi radot Lorenca spēku. Galvenā EM sūkņu priekšrocība ir to spēja sūknēt šķidrumus pa attālumu, kas nodrošina to, ka sūknim nav jābūt fiziskā kontaktā ar darba vielu un to, ka šķidruma kanāls ir hermētiski noslēgts. Ņemot vērā, ka šķidri metāli parasti ir ļoti karsti (kušanas temperatūra līdz 1700° C), šī īpašība ir būtiska.

EM šķidra metāla sūkņi un maisītāji bieži pēc uzbūves ir ļoti līdzīgi – atliek tikai izmainīt formu traukam (krāsniņ), kur atrodas šķidr metāls un viena un tā pati ierīce var veikt gan maisīšanas, gan sūknēšanas uzdevumus. Tādēļ, apskatot EM maisītājus, daudzus secinājumus var attiecināt arī uz EM sūkņiem.

No EM sūkņiem šobrīd industrijā visplašāk tiek pielietoti 3-fāžu maiņstrāvas EM sūkņi. Šāda veida sūkņi izmanto dažāda veida elektriski vadošus vijumus, caur kuriem plūstot elektrībai, tiek radīts magnētiskais lauks. Šādi EM maisītāji ir sarežģīti, tiem nepieciešami transformatori, speciāli vadības paneļi, cauruļvadi, šķidruma dzesēšana (parasti) un smalkas uzstādīšanas pielaiides. EM indukcijas sūkņiem vijumos rodas liels Džoula siltums, tāpēc spoļu aizsardzībai parasti ir nepieciešama ūdens cirkulācija. Ūdens tuvu karstam, šķidram metālam rada lielu risku noplūdes gadījumā, kas var rezultēties ar apjomīgu sprādzienu.

3-fāžu induktoru sūkņu barošanai tiek izmantoti transformatori ar regulējamu spriegumu sūkņa ražotspējas regulēšanai. Šādi transformatori ir relatīvi dārgas elektriskās iekārtas un to izmaksas daudzos gadījumos var pārsniegt paša sūkņa cenu. Savukārt, PM sūkņu piedziņai izmanto relatīvi lētus rūpnieciskos elektriskos dzinējus, kuriem barošanu pievada caur lētu standarta frekvences pārveidotāju sūkņa ražotspējas regulēšanai, mainot sūkņa magnētiskās sistēmas rotācijas ātrumu. Turklāt, standartiem rūpnieciskiem dzinējiem aktīvās jaudas koeficients ir ļoti augsts (līdz pat 0,8), bet 3-fāžu induktoriem tas ir zems, labākā gadījumā 0,3. EM sūkņiem ir augstas uzturēšanas izmaksas, nemaz nerunājot par to, ka liels elektroenerģijas patēriņš nozīmē siltumnīcefekta gāzu veidošanos.

EM sūkņi ar pastāvīgajiem magnētiem tiek arvien plašāk pielietoti pēdējo 20 gadu laikā. Šis pieaugums saistīts ar retzemju PM pieejamību – tie ir kļuvuši spēcīgāki, lētāki un spēj izturēt augstākas temperatūras.

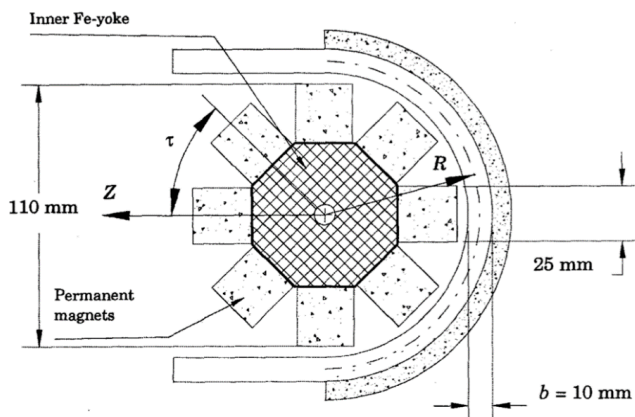
Pēdējo 20 gadu laikā LUFU ir izstrādāti daudzi vairākpolu PM sūkņu modeļi efektīvai šķidrā metāla sūknēšanai. Viens no galvenajiem novatoriem šajā jomā ir bijis I. Bucenijs, kura radītie sūkņi darbojas vairākos uzņēmumos pasaulē, kā arī dažādās pētniecības iestādēs, kā piemēram, *Paul Scherrer Institute (PSI)* Šveicē, *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)* ASV, *Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development (ENEA)* Itālijā, u.c.

Ir izveidoti vairāki sūkņi, kas iedarbojas uz Pb-Bi eitektisko sakausējumu, kas sasniedz 400° C temperatūru. 2000.gadā izstrādātais sūknis spēja attīstīt spiedienu līdz 600 kPa.

I. Bucenijs ir demonstrējis kā ar vairākpolu PM rotoru un feromagnētisku jūgu novietotu pretējā pusē kanālam var radīt stiprāku plūsmu kā bez jūga [26]. Feromagnētiskais jūgs rada

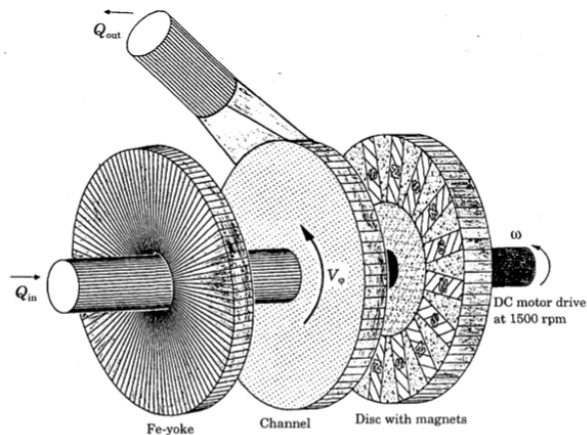


lielāku magnētiskā lauka stiprumu reģionā starp magnētiem un jūgu. Šajā koncepcijā magnēti ir izvietoti pa rotora ārējo diametru. Rotors ar magnētiem veido ārējo diametru 110 mm lielumā. Kanāla šķērsgriezuma laukums bija 10 mm x 100 mm un kanāla nerūsējošā tērauda sienīņu biezums 1 mm. Šim sūkņim tika izmantots 5 kW motors. Sūkņis spēj attīstīt 250 kPa lielu maksimālo spiedienu (pie  $Q = 0$ ) un 3 l/s lielu maksimālo caurteci pie 900 apgr./min. Sūkņa shematiskais attēls redzams 2.3. attēlā.



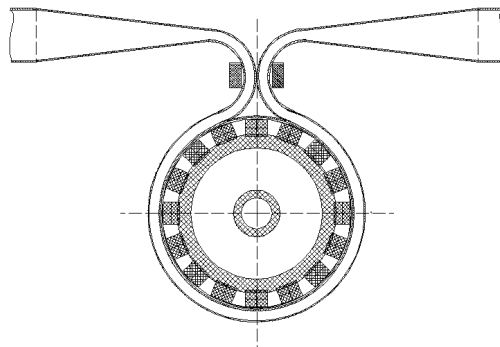
2.3. att. Vairākpolu GaInSn sūkņis ar PM [26].

Vēl viens sūkņa koncepts ir parādīts 2.4. attēlā [27]. Šajā koncepcijā tika izmantots diskveida rotors ar PM ar ārējo diametru 200 mm, lai sūknētu GaInSn eitetisko sakausējumu. Uz šī rotora tika novietoti 20 magnēti ar izmēru 50 mm x 15 mm x 10 mm ar mainīgu polarizācijas virzienu. Vidējā slānī atradās omega tipa kanāls ar 1mm biežām nerūsējošā tērauda sienām un šķidra metāla slāņa biezumu 10 mm. Šķidra metāla ieeja atradās pa rotācijas asi un izeja pa diska pieskari. Otrā pusē kanālam tika novietots feromagnētisks jūgs. Starp kanāla disku, jūgu un PM disku bija 1mm liela sprauga. Magnētiskā lauka stiprums uz pastāvīgo magnētu virsmas bija 0,5 T un vidējais magnētiskā lauka stiprums kanāla viduspunktā bija 0,2 T. Šis sūkņis attīstīja 60 kPa lielu spiedienu un 1 l/s lielu caurteci pie motora ātruma 1500 apgr./min.



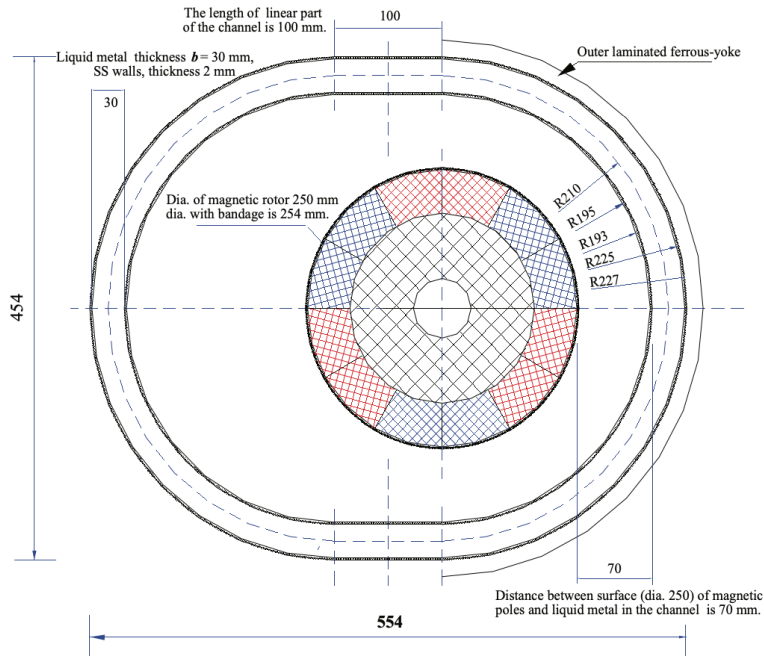
2.4. att. Diskveida PM sūknis [27].

Viens EM sūkņa koncepts tika radīts, lai sūknētu dzīvsudrabu priekš *European Spallation Source* (ESS), kur dzīvsudrabs tiktu izmantots kā dzesēšanas šķidrums un daļiņu neutralizētājs [28]. Magnētu rotora diametrs tika izvēlēts 50 cm liels. Aprēķini demonstrēja, ka šāds sūknis spēj radīt nepieciešamos plūsmas parametrus ( $Q = 10$  l/s;  $p = 500$  kPa) arī ar tādiem smagiem metāliem kā dzīvsudrabs. Sūkņa šķērsriezuma ilustrācija redzama attēlā 2.5..



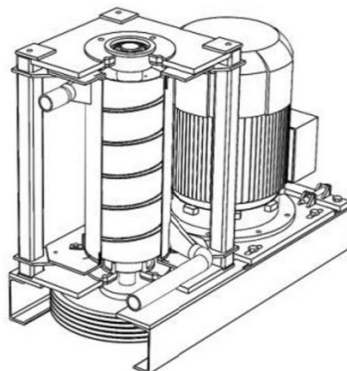
2.5. att. PM sūknis dzīvsudraba sūknēšanai [28].

EM sūkņu pielietojums alumīnija krāsnīm tiek apskatīts [29]. T.Beinerts et.al. ir demonstrējuši, ka ar PM centrālās dzesēšanas sūkni var panākt metalurģiski nozīmīgas plūsmas īpašības. Eksperimentālie rezultāti liecina, ka var sasniegt 4 m/s lielu šķidrā metāla plūsmu pat bez feromagnētiska jūga. Šie rezultāti iegūti ar nemagnētisko attālumu starp magnētu virsmu un šķidro metālu 70 mm lielumā. Sūkņa shēma redzama 2.6. attēlā.



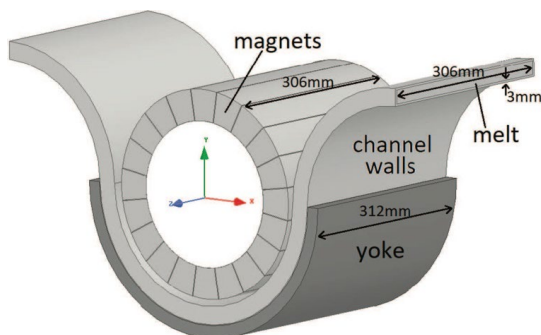
2.6. att. Centrālās sūkņa ar PM rotoru [29].

Sadarbībā ar Plazmas izpētes institūtu Indijā (IPR, India), I.Bucenijs et.al. izveidoja spirālveida PM sūkni [30]. Šis sūknis (2.7. attēls) tika radīts priekš svina-litija eitektiskā sakausējuma ar darba temperatūru 350 C. Sūkņa plānotie maksimālie plūsmas parametri bija  $p = 1300$  kPa un  $Q = 3$  L/s un testēšana parādīja, ka reālie parametri bija par 7 % - 10 % mazāki. PM rotoru diametrs bija 260 mm un augstums bija 600 mm. Piedziņai tika lietots 30 kW maiņstrāvas motors ar frekvenču pārveidotāju. Kanāls tika veidots no nerūsējošā tērauda, kas nodrošina labu slapināšanu ar Pb/Li sakausējumu. Tas ir svarīgi, lai nodrošinātu strāvu noslēgšanos cauri kanāla sienām, tādējādi veidojot lielu strāvas loku visa kanāla garumā, kas uzlabo sūkņa efektivitāti.



2.7. att. Spirālveida PM sūknis priekš Pb-Li eitektiskā sakausējuma [30].

2017.gadā V.Dzelme et.al. apraksta PMS darbību un tā 3D skaitlisko modeli [31]. Šis sūknis (skatīt 2.8. attēls), pielietoja PM Halbaha izkārtojumu un feromagnētisku jūgu kanāla pretējā pusē. Šī publikācija demonstrē to, ka 2D plūsmas modeļi šādām ierīcēm ir nepietiekami, lai precīzi paredzētu plūsmas parametrus un ir nepieciešami 3D skaitliski modeļi.



2.8. att. Pb-Bi PM sūknis [31].

## 2.4. Eksperimentālās mērīšanas metodes

### 2.4.1. Strāvas mērījumi

Lai nomērītu motora patērēto jaudu divpusējā sūkņa eksperimentā, tika izmantotas vairākas mērierīces. Tika pielietota Rogovska josta (*PEM Rogowski current waveform transducer Type CWT15LFR*, sērijas nr. 5298-6511) ar jutīgumu 2,00 mV/A, lai noteiktu maiņstrāvas stiprumu. Šī Rogovska josta spēj nomērīt strāvas maksimumu lielumus no 30 A līdz 600 kA ar precizitāti  $\pm 0,2\%$ . Rogovska josta ir elektriska ierīce maiņstrāvas vai ātru strāvas impulsu mērīšanai. Tā sastāv no spirālveida spoles, kur spoles gals atgriežas caur jostas centru uz otru galu tā, ka abi poli atrodas vienā un tajā pašā jostas galā. Rogovska josta tiek aptīta ap taisnu vadītāju, kura strāva ir jāmēra. Nav metāla (dzelzs) serdes. Tīkla blīvums, spoles diametrs un tinuma stingrība ir kritiski svarīgi, lai saglabātu imunitāti pret ārējiem laukiem un zemu jutību pret izmērītā vadītāja atrašanās vietu [1] [2].

Tā kā spolē ierosinātais spriegums ir proporcionāls strāvas maiņas (atvasinājuma) ātrumam taisnā vadītājā, Rogovska spoles izeja parasti tiek savienota ar elektrisko (vai elektronisko) integratora ķēdi, lai nodrošinātu izejas signālu, kas ir proporcionāls pašreizējam. Šim nolūkam bieži tiek izmantoti vienas mikroshēmas signālu procesori ar iebūvētu analogo-digitālo pārveidotāju.

Rogovska josta tika pievienota rokas osciloskopam (*Fluke 124 Industrial ScopeMeter® Hand Held Oscilloscope*, Sērijas nr. DM8380380), lai noteiktu vadā plūstošās strāvas lielumu. Sprieguma mērījumiem tika izmantots *MASTECH MAS838* digitālais multimetrs. 2.9. attēlā parādīti šo trīs ierīču attēli.



2.9. att. Digitālais multimetrs; Rogovska josta; Rokas osciloskops.

### 2.4.2. Magnētiskais lauks

Magnētiskā lauka mērījumiem tika izmantots kompānijas *MAGNET-PHYSIK Dr. Steingroever GmbH* ražotais gausmets FH 54 (skatīt 2.10. attēlu). Šī ierīce kopā ar tai paredzētajām zondēm spēj nomērīt no 3 mT līdz 3 T stipru lauku ar precizitāti 0,35 %.



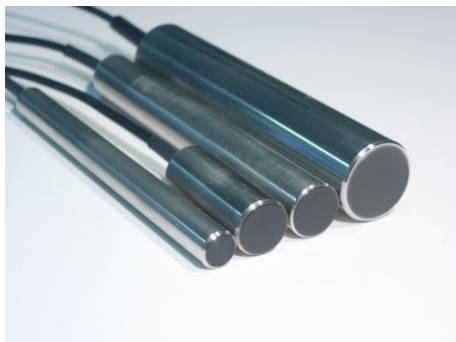
2.10. att. FH 54 Gausmets.

### 2.4.3. Ultraskaņas doplerogrāfija

Lai noteiktu šķidra metāla plūsmas ātrumu, var pielietot metodi, ko sauc par ultraskaņas doplerogrāfiju. Šī metode ar zondes palīdzību izstaro pulsējošus ultraskaņas signālus un uztver to atstarojumus no daļiņām šķidrā metāla tilpumā.

Tā vietā, lai izstarotu nepārtrauktus ultraskaņas viļņus, pulsētā Doplera ultraskaņas metodes emitētājs (redzams 2.11. attēlā) periodiski nosūta īsus ultraskaņas viļņus un uztvērējs nepārtraukti apkopo atbalsis no daļiņām, kas ir bijušas stara ceļā. Zinot laiku starp izsūtīto un

saņemto signālu, kā arī skaņas ātrumu vidē, var noteikt daļiņas attālumu no zondes. Daļiņas ātrumu nosaka, nomērot laika nobīdi starp diviem secīgiem signāla impulsiem.



2.11. att. Ultraskaņas zondes attēls [32].

Praktiskos pielietojumos ultraskaņas starā atrodas liels daļiņu daudzums un tās ir haotiski izvietotas. Tomēr eksistē laba korelācija starp dažādajiem signāliem un ir izveidoti algoritmi, kas iegūst ātruma informāciju, balstoties uz šo korelāciju.

Reģions, kas atrodas tuvu zondei, tiek saukts par tuvā lauku. Šajā zonā ultraskaņas stars principā ir cilindrisks un tā diametrs ir nedaudz mazāks par zondes diametru. Akustisko viļņu intensitāte oscilē pa devēja rotācijas asi. Ja šo oscilāciju izmērs ir daudz mazāks par mērāmo tilpumu, tad ievāktā signāla informācija netiek būtiski ietekmēta. Taču, ja tuvā lauka izmērs ir ievērojams, tad akustiskā viļņa oscilācijas ir daudz stiprākas un var ietekmēt mērījumus. Tādēļ nav ieteicams veikt mērījumus šajā reģionā. Tuvā lauka izmērs tiek definēts kā attālums līdz pēdējam akustiskās intensitātes maksimumam:

$$L = \frac{D^2}{4\lambda}, \quad (2.1)$$

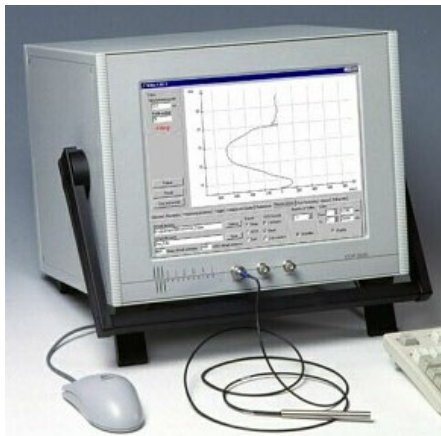
kur  $D$  ir skaņas signāla devēja diametrs un  $\lambda$  ir skaņas viļņa garums.

Reģions aiz tuvā lauka tiek saukts par tālo lauku. Akustisko viļņu intensitāte tālajā laukā samazinās proporcionāli attāluma kvadrātam. Lielākā daļa akustiskās enerģijas atrodas konusā, kurā pusleņķi  $d$  apraksta vienādojums

$$d = \arcsin\left(\frac{1,22\lambda}{D}\right). \quad (2.2)$$

Ultraskaņas lauka diverģence ir atkarīga no pjezo elementa diametra un skaņas frekvences. Parasti ir jāatrod kompromiss starp šiem diviem parametriem, lai iegūtu pēc iespējas šaurāku skaņas staru. Jāņem vērā, ka augstāka frekvence dod labāku aksiālo izšķirtspēju, bet arī noved pie straujākas ultraskaņas viļņu vājināšanās.

Šķidrā metāla ātruma mērīšanai tika izmantots *Signal Processing* anemometrs DOP2000 (2.12. attēlā). Šī ierīce spēj padot 1-10 Mhz augstu skaņas signālu un analizēt atstaroto signālu, lai iegūtu plūsmas ātruma profilu.



2.12. att. DOP2000 anemometrs [32].

#### 2.4.4. Caurteces mērītājs

Lai noteiktu šķidra metāla sūkņu veiktspēju, ir nepieciešams uzzināt šķidra metāla plūsmas ātrumu. Šim nolūkam tika izveidots šķidra metāla caurteces mērītājs. Tā darbības princips balstās uz to, ka elektriski vadošā šķidrumā, kurā perpendikulāri plūsmai tiek izveidots magnētiskais lauks, rodas elektriskais potenciāls. Šis efekts izriet no Oma likuma. Ja plūsmas, magnētiskā lauka un elektriskā lauka vektori ir perpendikulāri, tad

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (2.3)$$

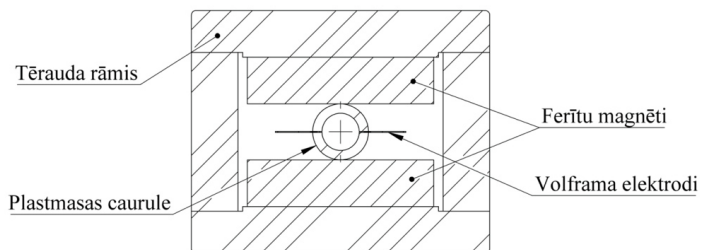
kur  $E$  ir elektriskais lauks,  $v$  ir šķidrā metāla ātrums un  $B$  ir magnētiskais lauks [33]. Vienkāršojot šo izteiksmi, iegūst

$$v = \frac{U}{2a \cdot B}, \quad (2.4)$$

kur  $a$  ir attālums starp elektrodiem un  $U$  ir elektriskā potenciāla starpība starp elektrodiem. Šī formula strādā ideālā gadījumā, bet izveidotā ierīce nav ideāla, tādēļ formulai pievieno koeficientu  $k$ , kurš tiek noskaidrots ierīci kalibrējot.

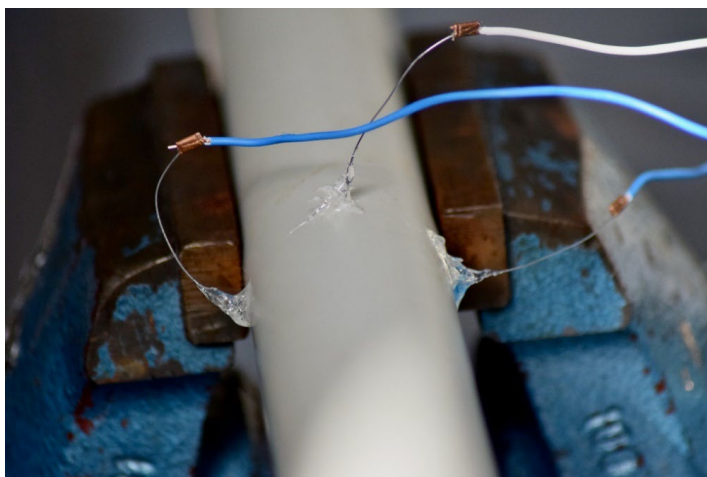
$$v = \frac{k \cdot U}{2a \cdot B}. \quad (2.5)$$

Caurteces mērītājs izveidots tā, lai pēc iespējas vairāk samazinātu dažādus nevēlamos elektriskos efektus un palielinātu signāla stiprumu. Plūsmas mērītāja shēma parādīta 2.13. attēlā.



2.13. att. Caurteces mērītāja shematiskais šķērsriezums.

Tika izmantoti 5 ferītu magnēti ar izmēru 40 x 20 x 10 mm katrā pusē, veidojot magnētiskā materiāla kopējo izmēru 100 x 40 x 10 mm. Gaisa spraugas izmērs starp magnētiem bija 12 mm. Ar Gausmetru nomērītais ferītu vidējais magnētiskais lauks uz PM virsmas bija 0,125 T. Centrālajā daļā atradās plastmasas caurule, kurai sānos bija ievadīti volframa elektrodi. Viens papildus elektrods tika ievietots starp diviem sānu elektrodiem (skatīt 2.14. attēlu). Trešais elektrods tika izmantots kā atskaites elektrods, lai varētu noteikt trokšņus un tos atņemt no mērītā signāla. Elektrodi ievietoti tā, lai to gali atrastos līdz ar caurules iekšējo sienīņu. Tas tika darīts, lai palielinātu attālumu starp abiem elektrodiem, kas tieši ietekmē signāla stiprumu, un samazinātu to ietekmi uz metāla plūsmu. Pie elektrodiem caurules ārpusē tika pievienoti vara vadi ar saspiesta vara kapilāra palīdzību. Volframa elektrodu garumam jābūt vienādam, lai nerastos termoelektriskie efekti. Vara vadi pēc savienošanas ar W elektrodiem apvienojas, izveidojot vīto pāri. Šādi tiek novērsta potenciālu starpības inducēšanās vados metāla plūsmas rezultātā. Caurules iekšējais diametrs  $d = 8$  mm.



2.14. att. Volframa elektrodi ielīmēti caurulē.

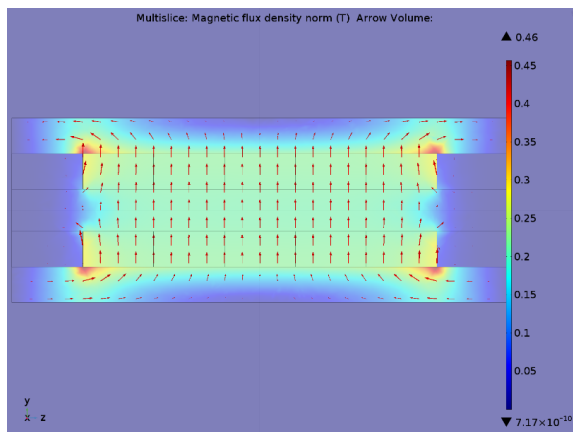


Lai novērtētu taisnstūrveida PM magnētiskā lauka indukcijas vērtību atkarībā no attāluma, var izmantot šādu tuvinājuma formulu [34]:

$$B_x(X) = \frac{B_r}{\pi} \left( \tan^{-1} \left( \frac{AB}{2X\sqrt{4X^2 + A^2 + B^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{AB}{2(L+X)\sqrt{4(L+X)^2 + A^2 + B^2}} \right) \right) \quad (2.6)$$

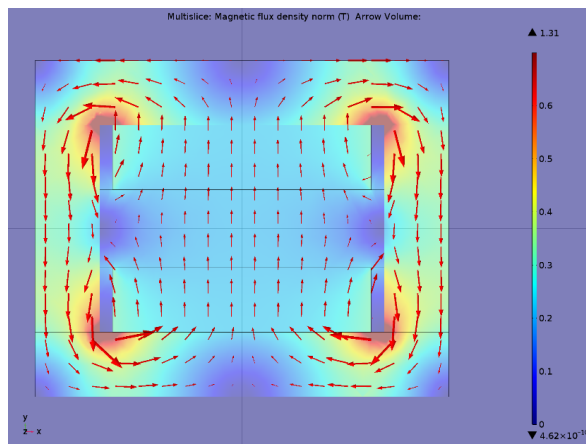
Ņemot vērā, ka dotajā konstrukcijā bija 10 mm biezi magnēti viens otram pretī, tad magnētiskais lauks starp tiem ir divas reizes lielāks kā katram atsevišķi. Kā arī zem magnētiem bija 10 mm biezas tērauda plāksnes, kuras palielina efektīvo PM biežumu divas reizes. Rezultātā magnētiskais lauks viduspunktā starp magnētiem bija 4 reizes lielāks kā šīs formulas dotais rezultāts. Veicot aprēķinu ar PM paliekošo magnetizāciju  $B = 0,35$  T, 6mm attālumā no magnētu virsmas lauka vērtība sanāk  $B = 0,212$  T.

Lai salīdzinātu šo rezultātu ar citu metodi un noskaidrotu magnētiskā lauka sadalījumu telpā, tika izveidots *COMSOL Multiphysics* 3D modelis. 2.15. attēlā parādīts magnētiskā lauka sadalījums pa caurteces mērītāja garumu (šķēlums pa z-y asi).



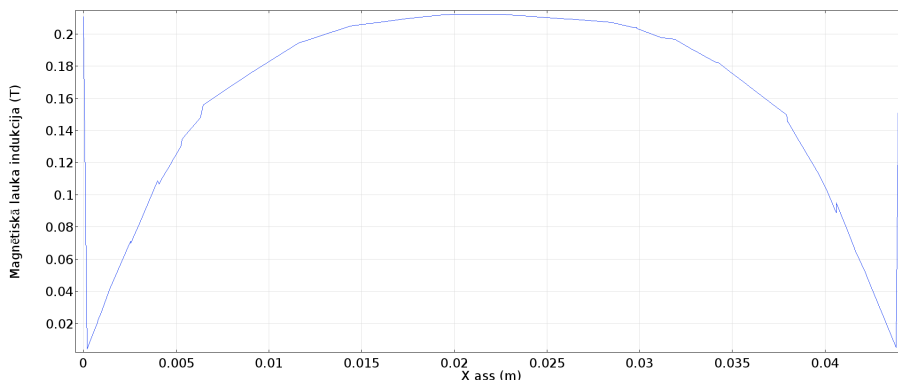
2.15. att. Magnētiskā lauka sadalījums pa caurteces mērītāja garumu (šķēlums pa z-y asi).

Redzams, ka magnētiskais lauks ir ļoti vienmērīgs pa caurteces mērītāja garumu un gala efekti parādās aptuveni pie 10 % no magnētu sistēmas garuma. Var novērot kā magnētiskā lauka intensitāte palielinās tērauda rāmī tuvu pie magnētu sistēmas galiem. Redzams arī, ka magnētiskais lauks tiek sakoncentrēts ierīces iekšpusē un ārpus tās tas ir tuvu nullei. 2.16. attēlā parādīts magnētiskā lauka sadalījums pa caurteces mērītāja platumu (šķēlums pa x-y asi).



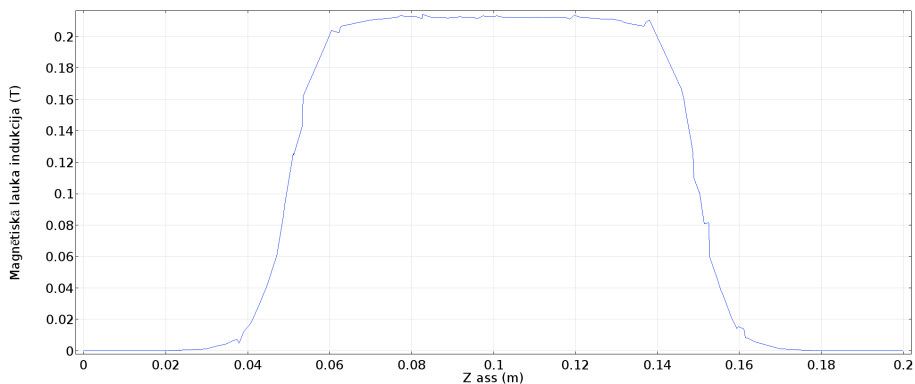
2.16. att. Magnētiskā lauka sadalījums pa caurteces mērītāja platumu (šķēlums pa x-y asi).

Tālāk tiek attēlota magnētiskā lauka vērtība caurteces mērītāja vidū pa x asi (skatīt 2.17. attēls). Iekšējais izmērs tērauda rāmim pa x asi bija 44 mm. Viduspunktā magnētiskais lauks sasniedz  $B = 0,212$  T lielu vērtību, kas precīzi atbilst iepriekš izmantotās formulas rezultātam. Redzams, ka magnētiskā lauka indukcijas vērtība pie  $x = 0$  strauji palielinās, kas atbilst vietai, kur sākas tērauda rāmis. Vēl var novērot, ka caurules iekšpusē, kur būtu šķidrums metāls, magnētiskais lauks mainās no 0,210 T – 0,212 T. Šāda izmaiņa ir ļoti maza, tādēļ varam uzskatīt, ka magnētiskais lauks caurules iekšpusē ir konstants.



2.17. att. Magnētiskā lauka sadalījums pa caurteces mērītāja platumu (x ass).

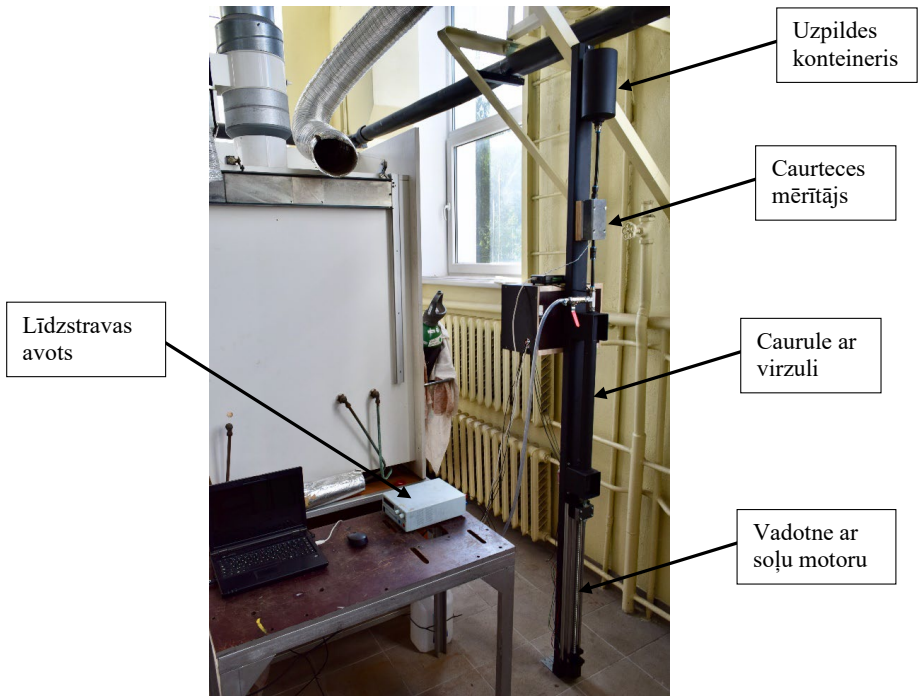
Visbeidzot tiek attēlota magnētiskā lauka vērtība caurteces mērītāja vidū pa z asi (skatīt 2.18. attēls). Tērauda rāmja garums bija 140 mm. Viduspunktā magnētiskais lauks sasniedz  $B = 0,212$  T lielu vērtību, kas precīzi atbilst iepriekš izmantotās formulas rezultātam. Vietā, kur beidzas magnēti, magnētiskā lauka indukcijas vērtība ir nokritusi līdz 0,11 T un vietā, kur beidzas tērauda rāmis līdz 0,001 T. Šis parāda gala lauka nozīmīgumu un iemeslu kādēļ magnētus ir nepieciešams novietot divas reizes lielākā garumā kā nepieciešamais magnētiskā lauka izmērs.



2.18. att. Magnētiskā lauka sadalījums pa caurteces mērītāja garumu (z ass).

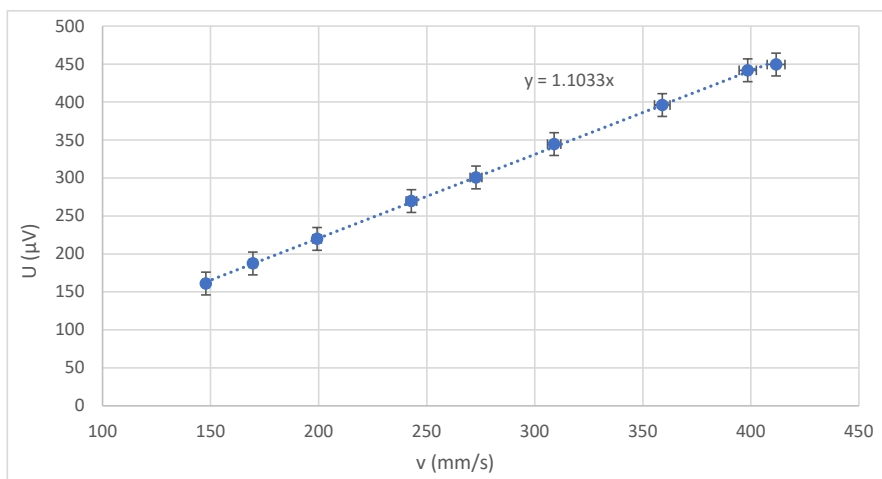
Lai arī tika ņemti vērā dažādi apsvērumi, lai pietuvinātu šo caurteces mērītāju ideālam caurteces mērītājam, tomēr tas nav ideāls, kā rezultātā ir jāveic kalibrēšana, kas ļauj noteikt kāda ir novirze no ideālā. Kalibrēšanas nolūkiem tika izveidots speciāls virzulis, kuru vada ar soļu motoru, lai nodrošinātu konstantu plūsmas ātrumu.

Kalibrēšanas iekārta sastāv no rāmja, uz kura ir novietots soļu motors kopā ar lineāro vadotni. Uz vadotnes ir nostiprināts stienis, kura galā ir virzulis, kas ievietots tērauda caurulē. Caurules iekšpusē atrodas šķidr metāls (GaInSn), kurš tiek spiests cauri caurteces mērītājam. Tērauda caurules galā, ar plastikāta caurulēm ir pievienots caurteces mērītājs un otrā galā atrodas vaļējs uzpildes trauks (skatīt 2.19. attēls).



2.19. att. Kalibrēšanas iekārta un tās galvenās komponentes.

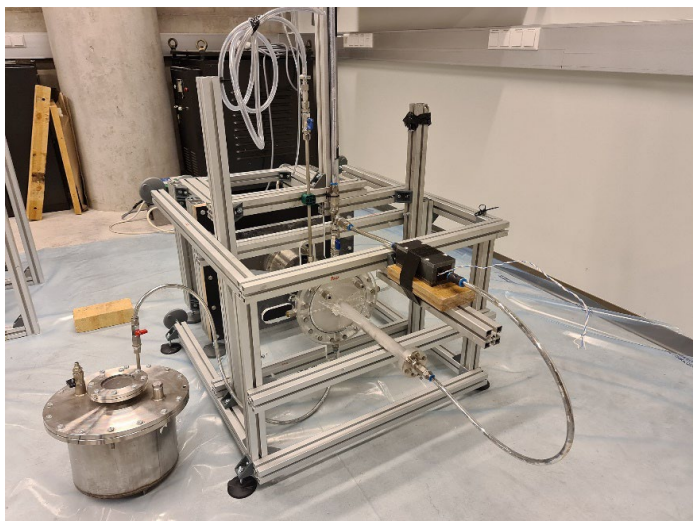
Soļu motora priekšrocība ir tāda, ka tie var nodrošināt konstantu ātrumu. Tādējādi, iestādot konkrētu motora ātrumu, tika nomērīts signāls no caurteces mēritāja par 10 sekundēm ilgākā diapazonā. Aprēķinot vidējo vērtību, tiek iegūts rezultāts ar augstu precizitāti. Zinot virzuļa kustības ātrumu, var aprēķināt šķidrā metāla caurteci. Pieņemot, ka šķidrā metāla kustība caurulē ir vienmērīga pa caurules šķērs griezumu, tiek izteikts vidējais šķidrums kustības ātrums. Attēlojot nomērīto signālu attiecībā pret šķidrā metāla kustības ātrumu caurteces mēritājā, tika iegūta kalibrācijas līkni (skatīt 2.20. attēls).



2.20. att. Kalibrācijas līkne.

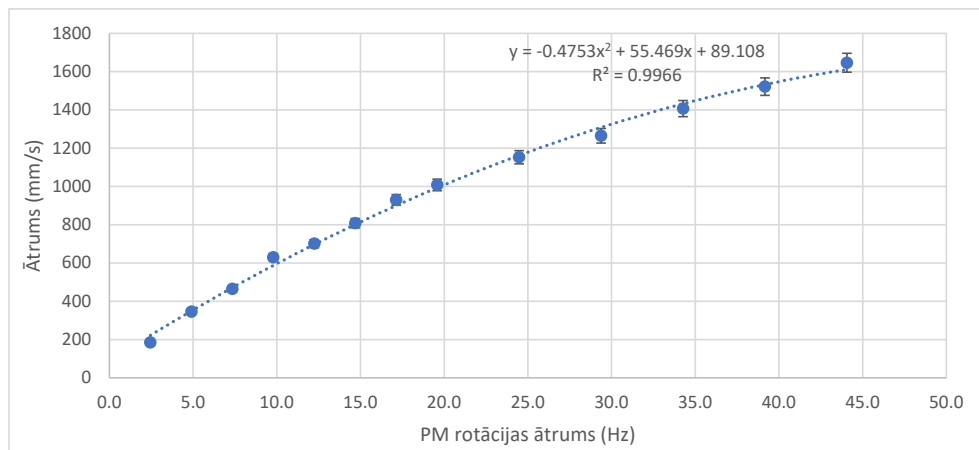
Kļūda pie 400mm/s ātruma bija  $\pm 4\%$  robežās, ar 95% ticamības līmeni (aprēķinot standartnovirzi) un relatīvi palielinās pie mazākiem ātrumiem, jo trokšņu līmenis mērīšanas sistēmā ir relatīvi lielāks, sasniedzot 8% pie  $v = 150$  mm/s. Iespējamais trokšņu cēlonis ir inducētās strāvas no netālu esošajām elektriskajām ierīcēm. Pie katra ātruma tika ievākti ap 500 mērījumiem. Var uzskatīt, ka visā kalibrācijas ātrumu diapazonā plūsma ir turbulenta, jo pie  $v = 150$  mm/s  $Re = 5000$ . Koeficients  $k$ , kas norāda cik liela atšķirība ir no teorētiski ideālā gadījuma sanāk  $k = 1,55$ .

Tika veikts tests caurteces mērītāja veiktspējai ar viena PM cilindra iekārtu, kas paredzēta degazācijas pētījumiem. Iekārta kopā ar caurteces mērītāju redzama 2.21. attēlā.



2.21. att. Viena PM cilindra degazācijas pētījumu iekārta.

Nomērītie plūsmas ātrumi atkarībā no magnēta rotācijas ātruma attēloti 2.22. attēlā. Aproximācijas līkne izveidota ar *Microsoft Excel*.



2.22. att. Plūsmas ātrums attiecībā pret PM rotācijas ātrumu.

Kļūda bija  $\pm 3\%$  robežās ar ticamības līmeni 95%. Šeit var novērot, ka palielinoties PM rotācijas ātrumam, ātrums palielinās lēnāk, kā lineāri, kas liecina par skinefektu un hidrauliskajiem zudumiem pie lielākiem ātrumiem. Pie 1 m/s plūsmas ātruma Reinoldsa skaitlis sasniedz vērtību  $Re = 40000$ , kas atbilst pilnībā attīstītai turbulencei.

### 3. Viena pastāvīgā magnēta dipola sūkņi

Magnetohidrodinamika (MHD) attiecas uz elektriski vadošu šķidrums mijiedarbību ar elektromagnētiskajiem laukiem. Tāpēc fiziskie likumi, kas regulē šādas parādības, ir gan Maksvela elektromagnētisma likumu, gan Navjē-Stoksa vienādojumu kombinācija, kas nosaka masas un impulsa saglabāšanu.

Pastāvīgo magnētu šķidru metālu sūkņu uzdevums ir radīt skrejošu elektromagnētisko lauku šķidrajā metālā. Šāds magnētiskais lauks ir mainīgs gan laikā, gan telpā. Arī viens rotējošs PM rada skrejošu magnētisko lauku.

Magnētisko lauku, ko rada pastāvīgais magnēts var interpretēt kā strāvas kontūru, kurš līdzīgā veidā rada magnētisko lauku ap sevi. Pēc šādas analogijas, lai radītu tādu pašu magnētisko lauku, kādu rada pastāvīgais magnēts ar paliekošo magnetizāciju 1,4 T, būtu jāizveido strāvas cilpa ar ekvivalento strāvu 1100 A uz 1 mm pastāvīgā magnēta biezumu. Pēc šādas interpretācijas ir skaidrs, ka pastāvīgo magnētu ieguvums ir būtisks, jo nav jātērē elektriskā enerģija magnētiskā lauku radīšanai.

Ir zināms, ka PM dipoli rada lielākas magnētiskā lauka vērtības kā vairāku polu PM sistēmas lielos attālumos no PM virsmas [35]. To var izskaidrot ar to, ka vairāku polu gadījumā notiek magnētiskā lauka dzēšanās starp poliem, kas kļūst nozīmīga, palielinoties attālumam. Ņemot vērā, 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.

Izstrādājot PM rotoru sistēmas, ir jāņem vērā, ka magnētu rotācijas ātruma palielināšanās sāk ierobežot sūkņēšanas efektivitāti tad, kad tiek sasniegtas lielas magnētiskā lauka svārstības frekvences – kad inducētās strāvas virsmas efekta lielums šķidrajā metālā kļūst mazāks par šķidrā metāla slāni kanālā un kanāla sienīņu biezumu, ja tās ir elektriski vadošas vai arī, kad parametrs  $\epsilon$  (magnētiskais Reynoldska skaitlis) sasniedz vērtību, kad elektromagnētiskās indukcijas sūkņa darbība var kļūt nestabila.

#### 3.1. Viena PM cilindra modeļa sūkņi

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. Bezdimensionālo parametru analīze tiek veikta, lai eksperimenta rezultātus varētu izmantot rūpnieciska izmēra dozatorā ar kura palīdzību varētu kontrolētā veidā izsūknēt šķidru alumīniju no pārkausēšanas krāsnis un aizvadīt to uz citiem tehnoloģiskajiem soļiem.

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 pretplūsmas. Tātad pastāv optimāls kanāla biezums, kas nav ne pārāk plāns, kas radītu papildu hidrodinamisko pretestību, ne arī pārāk biezs. Līdzīgi jāņem vērā kanāla platumus. 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 paralēls PM primārajam magnētiskajam laukam. Tādējādi magnētiskā lauka un inducēto strāvu vektora reizinājums šajā reģionā ir nulle, tāpēc elektromagnētiskā spēka nav. To sauc par šķērsmalu efektu un tas samazina šāda sūkņa efektivitāti, ja kanāla platumam ir ierobežots. Aprēķini rāda, ka bezgalīga kanāla platumam kopējais elektromagnētiskais spēks būtu 2 reizes lielāks. Šī ir turbulenta 3D MHD plūsma, kuru būtu grūti modelēt skaitliski. Ņemot vērā praktisko mērķi šķidru alumīniju transportēt no kausēšanas krāsns un pacelt to augstāk, šis eksperiments parāda iespēju izmantot vienu rotējošu PM cilindru šķidro metālu sūkņēšanai un pēta šāda sūkņa radīto hidrostatisko spiedienu. Šī eksperimenta rezultāti tiek izmantoti, lai apstiprinātu un pielāgotu viena PM rotora indukcijas sūkņu analītiskos aprēķinus.

### 3.1.1. Bezdimensionālie kritēriji

Lai šos neliela mēroga eksperimentālos rezultātus pielāgotu rūpnieciskā izmēra dozatoram, ir jāatbilst fizikālās līdzības kritērijiem. Tika izvēlēts, lai eksperimentālais modelis būtu 6 reizes mazāks kā 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:

$$\frac{\tau}{h} = idem, \quad (3.1)$$

$$\frac{\tau}{W} = idem, \quad (3.2)$$

$$\frac{h}{R} = idem, \quad (3.3)$$

kur  $\tau$  ir raksturīgais garums, kas ir attālums, kurā magnētiskā lauka virziens mainās par  $180^\circ$ ,  $h$  ir kanāla augstums,  $W$  ir kanāla platumam un  $R$  ir magnēta rādiuss. Katrs no parametriem  $\tau$ ,  $h$ ,  $W$  un  $R$  rūpnieciskajam modelim ir 6 reizes lielāks.

Vissvarīgāk panākt dinamisko līdzību. Vispirms tika apskatīta bezdimensionālā frekvence. GaInSn modelim tika izmantots apzīmējums 1, bet lielākajam alumīnija modelim apzīmējums 2.  $\sigma$  ir elektrovadītspēja,  $\omega$  ir cikliskā frekvence,  $f$  ir rotācijas frekvence un  $\mu_0$  ir vakuuma caurlaidības konstante.

$$\Omega_d = \sigma \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot \tau^2 = idem, \quad (3.4)$$

$$\sigma_1 \cdot \omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \tau_1^2 = \sigma_2 \cdot \omega_2 \cdot \mu_0 \cdot \tau_2^2, \quad (3.5)$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (3.6)$$



$$f_2 = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \cdot \frac{\tau_1^2}{\tau_2^2} f_1 = 0,023 f_1. \quad (3.7)$$

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.  $\rho$  ir masas blīvums un  $B$  ir PM paliekošā magnētiskā indukcija.

$$N = \frac{\sigma \cdot B^2 \cdot \tau}{\rho \cdot \omega \cdot \tau} = \frac{\sigma \cdot B^2}{\rho \cdot \omega} = idem, \quad (3.8)$$

$$B_2 = \sqrt{\frac{\sigma_1 \rho_1 \omega_1}{\sigma_2 \rho_2 \omega_2}} \cdot B_1 = 0,22 B_1 \quad (3.9)$$

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

$$Ha = B \cdot \tau \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\nu}}, \quad (3.10)$$

kur  $\sigma$  ir elektrovadītspēja un  $\nu$  ir kinemātiskā viskozitāte. Tabulā 3.1. tiek salīdzināti vissvarīgākie parametri starp GaInSn un alumīnija modeli.

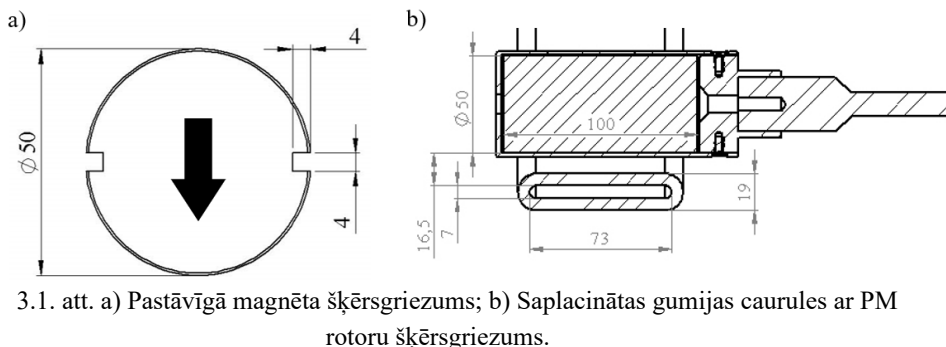
Tabula 3.1

Galveno modeļa parametru salīdzinājums

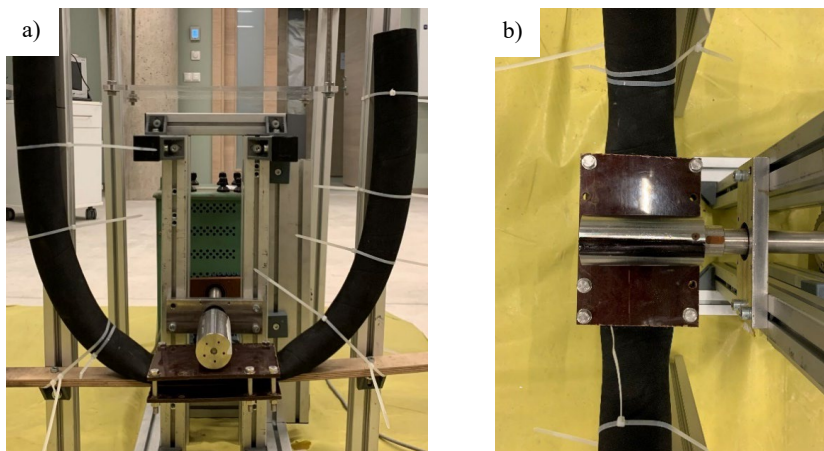
	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$\sigma$ , S/m	$\tau$ , mm	$h$ , mm	$W$ , mm	$R$ , mm	$L$ , mm	$f$ , Hz
GaInSn	6360	$3,3 \cdot 10^6$	52	7	73	25	100	71
Alumīnijs	2400	$4 \cdot 10^6$	312	42	438	150	600	1,6

### 3.1.2. Eksperimentālais modelis

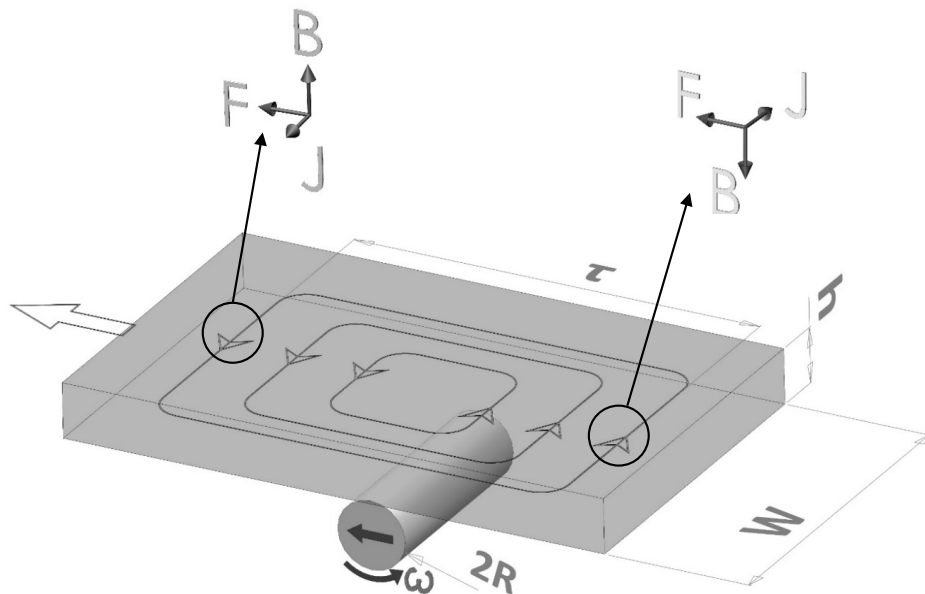
Eksperimentālo ierīci veido viens NdFeB PM cilindrs, kas ir magnetizēts perpendikulāri tā rotācijas asij. Tā magnetizācija ir  $B = 1,4$  T. 3.1. attēlā parādīta magnēta un kanāla shēma. Magnēta diametrs ir 50 mm, garums - 100 mm. Šim magnētam sānos ir 4mm platas, un 4mm dziļas rievās pa visu tā garumu, kurām ir ļoti maza ietekme uz PM cilindra radīto magnētisko lauku. Lai novērstu rotāciju starp magnētu un tā ietvaru, rievās tika ievietoti metāla stieņi un piestiprināti pie ārējā apvalka. Rievās atrodas perpendikulāri magnētiskajiem poliēm, lai samazinātu magnētiskā lauka intensitātes zudumu, kas būtu lielāks citā pozīcijā.



Magnēts ir ievietots nerūsējošā tērauda korpusā un piestiprināts pie 0,37 kW motora. Gumijas caurule ar iekšējo diametru 50 mm un sienas biezumu 6 mm tika saplacināta starp nemagnētiskām plāksnēm tā, lai tās iekšējā kanāla augstums būtu 7 mm un platums 73 mm. Nemagnētiskas nerūsējošā tērauda skrūves tika izmantotas, lai piestiprinātu plāksnes un lai vairāk enerģijas pārnestu uz kausējumu, neizmainot magnētisko lauku ar tuvumā esošiem feromagnētiskiem objektiem. Attālums starp PM rotācijas asi un kanāla augstuma viduspunktu ir 45 mm, tāpēc attālums starp magnēta virsmu un šķidro metālu ir 16,5 mm. Šajā eksperimentā tika izmantots GaInSn eitektiskais sakausējums, jo tas istabas temperatūrā ir šķidrums (kušanas temperatūra 11°C) un nav toksisks. Tā elektrovadītspēja  $\sigma = 3.3 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ , blīvums  $\rho = 6360 \text{ kg/m}^3$  (istabas temperatūrā). Elektrovadītspējas un blīvuma attiecība ir aptuveni puse no alumīnija attiecības, tāpēc, lai sasniegtu to pašu Stjuarta skaitli, ir jāizmanto stiprāks magnētiskais lauks vai zemāka rotācija frekvence. Caurule tika piepildīta ar šķidro metālu tā, lai šķidrā metāla augstums no apakšas līdz augšai būtu 300 mm. 3.2. attēlā parādīti attēli no eksperimenta.



Šajā eksperimentālajā ierīcē inducētās strāvas ir perpendikulāras plūsmas virzienam kanāla vidū. Tomēr netālu no kanāla sānu sienām inducētās strāvas ir paralēlas plūsmas virzienam, tāpēc nerodas elektromagnētiskais spēks (skatīt 3.3. attēlu). Tātad tas ir reģions, kurā plūsma var atgriezties, ja kanālā nav integrālās plūsmas. 3.3. attēlā parādīts arī tas, kā inducēto strāvu vektora reizinājums un sākotnējais magnētiskais lauks rada spēku tajā pašā virzienā abās magnēta pusēs.



3.3. att. Kanāla, magnēta, magnētiskā lauka, inducēto strāvu un magnētiskā spēka shēma šķidrā metāla slānī.

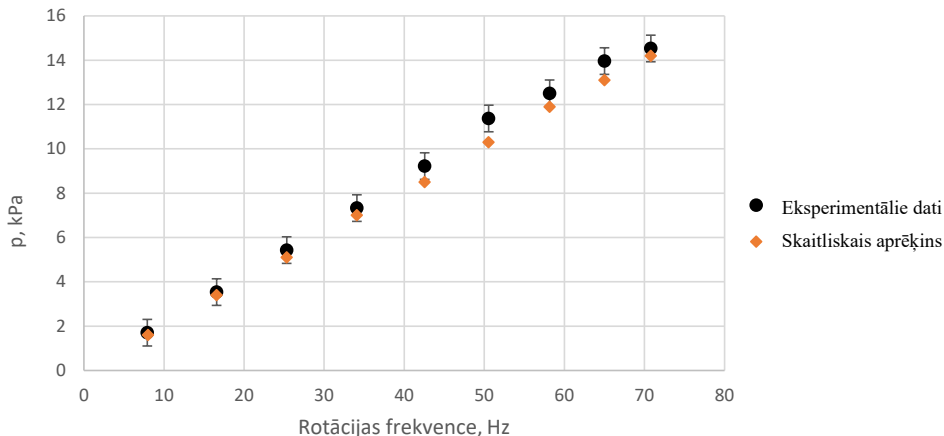
### 3.1.3. Rezultāti

Izkausētā metāla augstuma starpība atkarībā no PM rotācijas frekvences tika mērīta, izmantojot *Bosch Zamo* lāzera attāluma mērītāju. Dažas svārstības tika novērotas uz šķidrā metāla virsmas ~ 5 mm robežās. Tos var attiecināt uz šķidruma svārstībām U formas caurulē, kas ir klasiska fizikas problēma [36]. Uzsākot plūsmu, PM rada perturbāciju, kas eksperimenta laikā turpina svārstības zemās berzes dēļ. Hidrostatisko spiedienu  $p$  šķidrā metāla kolonnā aprēķina kā

$$p = \rho g \Delta h, \quad (3.11)$$

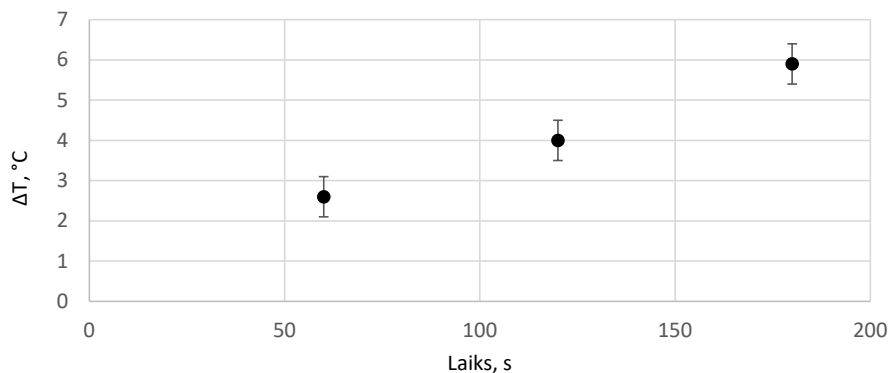
kur  $\Delta h$  ir šķidrā metāla augstuma starpība no līdzsvara stāvokļa. Iegūtais hidrostatiskais spiediens ir parādīts 3.4. attēlā. PM sūkņa hidrostatiskais spiediens pie 71 Hz rada 14440 Pa lielu spiedienu starpību. Tas parāda, ka pat viens PM dipols var radīt intensīvu šķidruma metāla plūsmu un to varētu izmantot kā efektīvu sūkni.

Eksperimentāli izmērītais un skaitliski aprēķinātais hidrostatiskais spiediens ir attēlots 3.4. attēlā. Skaitliskajā modelī spiediens tika aprēķināts sānu virsmas vidū, kas atbilst maksimālajam spiedienam domēnā. Iespējams, ka eksperimentālie dati ir lielāki kā skaitliski aprēķinātie, jo skaitliskais modelis ņēma vērā mazāku apgabalu, bet elektromagnētiskā mijiedarbība izplatās vēl lielākā reģionā.



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

Indukcijas sūkņi inducē elektriskās strāvas šķidrā metāla iekšpusē, kas rada Džoula siltumu. Kausējuma iekšpusē tika ievietots termopāris, lai izmērītu, cik ātri šķidrā metāls uzsilst. Termopāra kabeļa galu ievietoja caurules vidū, vistuvāk magnētam. Vads ir ļoti plāns, tāpēc elektromagnētiskais spēks un inducētās strāvas no PM rotora ir nenozīmīgas. 3.5. attēlā parādīta temperatūras maiņa laika gaitā ar PM rotācijas frekvenci 42 Hz.



3.5. att. Temperatūras pieaugums laika gaitā pie 42 Hz rotācijas frekvences.

Pēc 3 minūtēm kausējuma temperatūra palielinājās par 5,9 °C. Magnēta rotācijas ātrums tika iestatīts uz 42 Hz. Tas parādīja, ka hidrostatiskā spiediena mērījumi jāveic ātri, un starp katru eksperimentu jānogaida vismaz stunda, jo, paaugstinoties temperatūrai, šķidro metālu vadītspēja samazinās. GaInSn eitektikas īpatnējā siltumietilpība ir  $296 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . Tādējādi silšanai pievadītā jauda bija

$$P = \frac{C \cdot \Delta T \cdot V \cdot \rho}{t} = 73 \text{ W}, \quad (3.12)$$

kur  $C$  ir īpatnējā siltumietilpība,  $\Delta T$  ir temperatūras izmaiņa,  $V$  ir tilpums,  $\rho$  ir blīvums un  $t$  ir laiks. Tādējādi apmēram 20 % motora jaudas tika iztērēti kausējuma sildīšanai. Tomēr rūpnieciskajās krāsnīs kausējuma papildu sildīšana nav trūkums, bet tā jāņem vērā, lai uzlabotu sūkņa efektivitāti.

### 3.1.4. Secinājumi

1. Viena PM cilindrs var tikt izmantots efektīvai šķidrā metāla sūkņēšanai, ja tas ir novietots pie šaura kanāla. Bieza kanāla gadījumā rastos recirkulācijas plūsmas un netiktu radīts integrāls spiediens pa kanāla platumu.

2. Spiediena pieaugums attiecībā pret PM rotācijas ātrumu saglabā labu linearitāti līdz 50 Hz, kur sāk parādīties skinefekts.

3. PM rotācija izraisa ievērojamu silšanu šķidrā metālā, kas samazina tā vadītspēju. Praktiskos pielietojumos, šis efekts ir labvēlīgs, jo metāla uzsildīšana metalurģijā vienmēr ir nepieciešama.

## 3.2. 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.

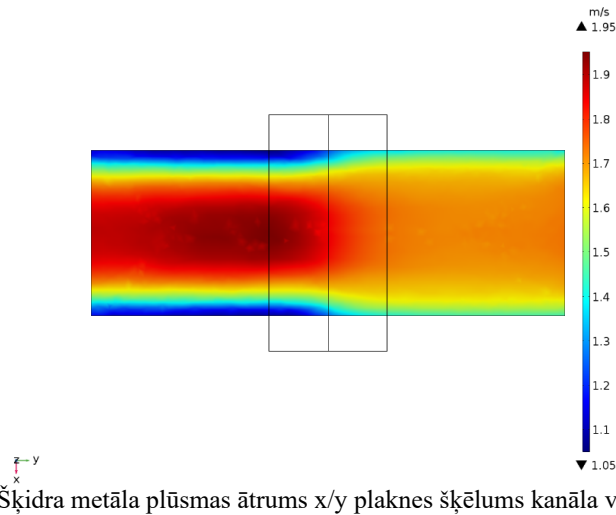
### 3.2.1. Plūsmas ātruma skaitliskais eksperiments

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.

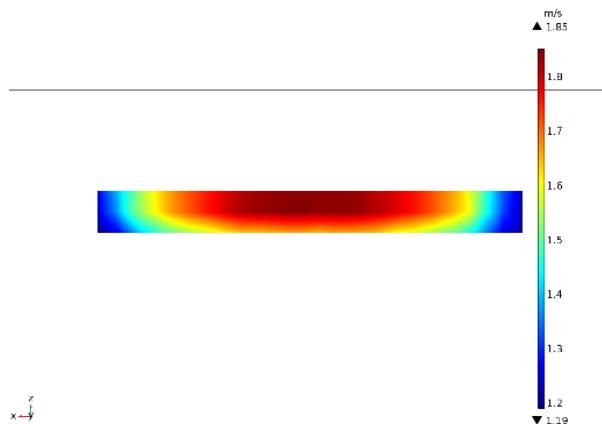
Comsol modelis izveidots ar *Magnetic Fields (mf)* un *Turbulent Flow, k-ε (spf)* fizikas paketēm. Ģeometriskais modelis tika izveidots no gaisa kuba ar malu 0,3 m, kanāla un pastāvīgā magnēta. Kanāls faktiski sastāv no šķidra alumīnija, tātad tā īpašības ir šādas – relatīvā caurlaidība  $\mu_r = 1$ ; 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 un turbulences modeļa tips tika izvēlēts RANS. Kanāla sānu sienām tika uzstādīts *no slip* robežnosacījums. Zem turbulētās plūsmas paketes tika izvēlēts tilpuma spēks kā mf.FLTzx, mf.FLTzy, mf.FLTzz 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 un plūsmas virziens ir 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). Šķidruma reģiona režģa elementu izmērs tika izvēlēts kā *extremely fine*, taču maksimālais elementa izmērs tika manuāli modificēts uz vēl mazāku lielumu - 0,035 m.

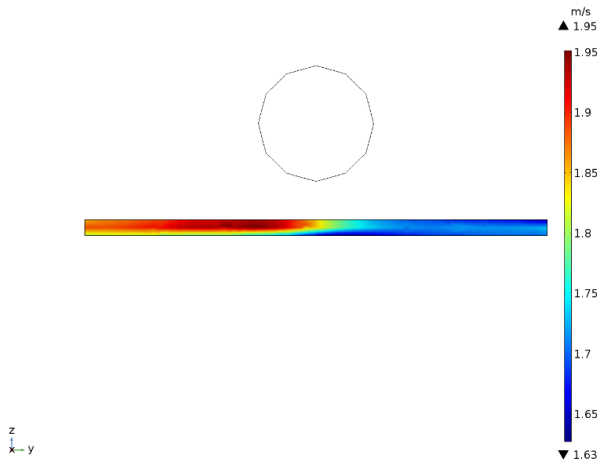
No sākuma tika atrisināts stacionārais modelis, kura rezultāti tika padoti laikā mainīgajam modelim, kurš atrisināja modeli līdz 2 s ilgumam. Pie šādiem nosacījumiem modelis tika atrisināts un iegūta zemāk redzamā plūsma. 3.6. attēlā attēlots x/y plaknes šķēlums, 3.7. attēlā attēlots z/x plaknes šķēlums un 3.8. attēlā attēlots z/y plaknes šķēlums.



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

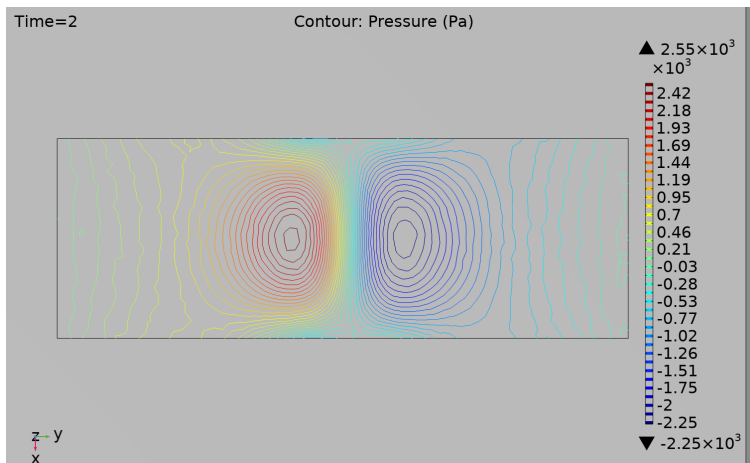


3.7. att. Šķidra metāla plūsmas ātrums z/x plaknes šķēlums kanāla vidus plaknē.



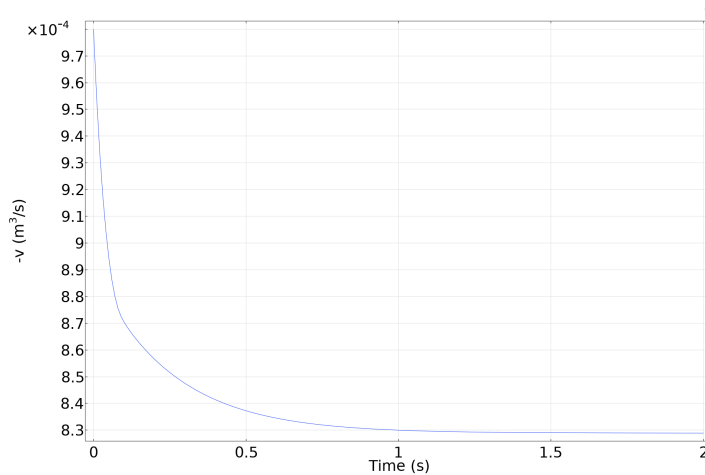
3.8. att. Šķidra metāla plūsmas ātrums  $z/y$  plaknes šķēlums kanāla vidus plaknē.

Šķidruma plūsmu rada spiedienu starpība, kas ir attēlota 3.9. attēlā.



3.9. att. Spiediens šķidrā metāla reģionā  $x/y$  plaknes šķēlumā kanāla vidus plaknē.

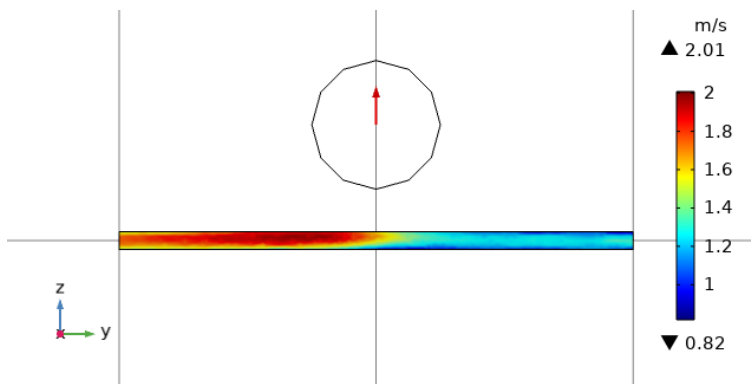
Lai novērtētu, kādu modelēšanas laiku uzdot, tika apskatīts kā mainās šķidruma caurtece kanāla izejā. 3.10. attēlā redzams, ka 2 sekunžu ilgums ir pietiekošs un modelī vairs nenotiek būtiskas izmaiņas.



3.10. att. Caurplūdes ātruma kanāla izejā izmaiņa laikā.

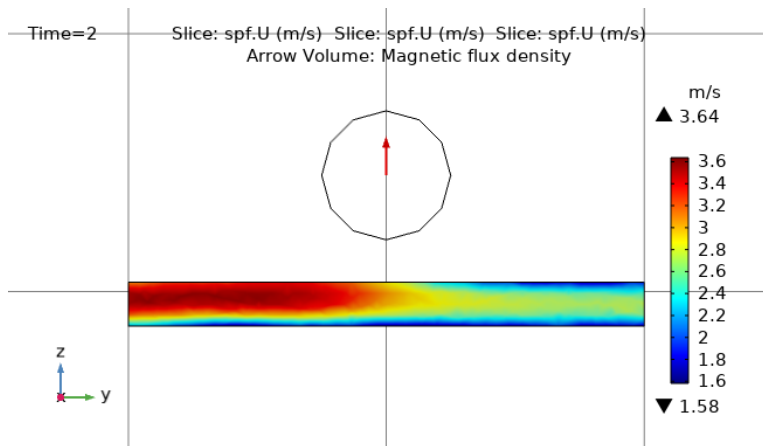
### 3.2.2. Caurteces optimizācijas skaitliskais eksperiments

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. 3.11. attēlā attēlots plūsmas ātrums kanālā ar augstumu 7 mm un platumu 70 mm. Savukārt 3.12. attēlā attēlots plūsmas ātrums kanālā ar augstumu 17 mm un platumu 170 mm



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





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

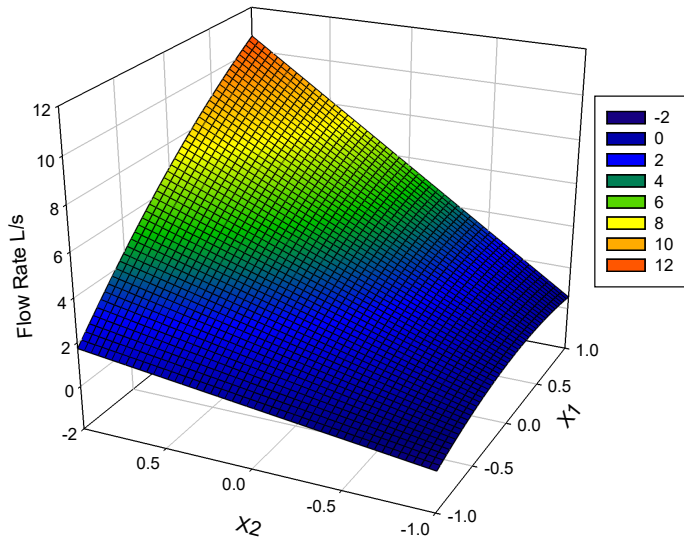
Aprēķinot kāda ir caurtece pie katra no kanāla izmēriem, tika iegūta Tabula 3.2.

Tabula 3.2

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

Ņemot vērā šos 9 punktus, tika izveidots optimizācijas uzdevums, kura rezultātā tika iegūta atbildes virsma, kas attēlotā 3.13. attēlā.

Legendre polynomial metamodel



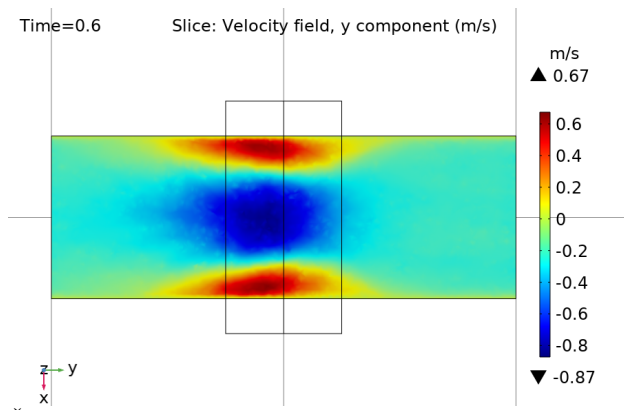
3.13. att. Ležandra polinomu metamodelis.

Aproksimēšanai 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 2.kārtas polinomu:

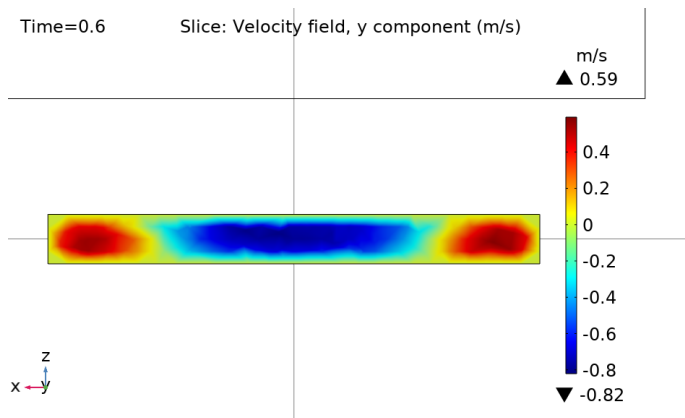
$$F = -1,35333 + 0.01822x_1 - 0,06987x_2 - 0,00014x_1^2 - 0,00411x_1 \cdot x_2 \quad (3.13)$$

### 3.2.3. Plūsma ar pretspiedienu

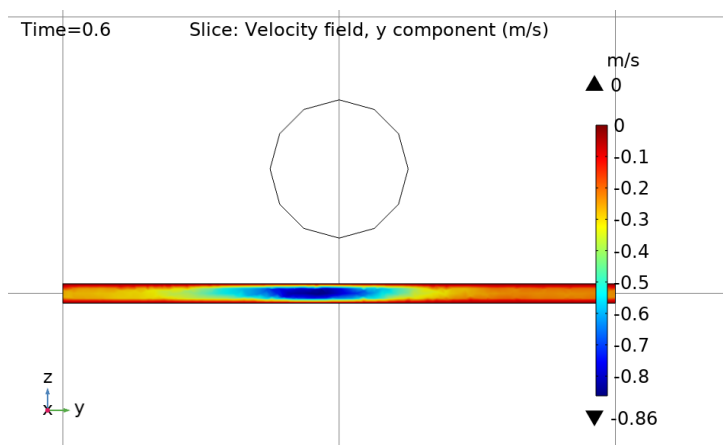
Lai modelētu situāciju, kurā sūknim ir jāspēj šķidrāis metāls pacelt augstāk uz kādu citu tvertni, skaitliskajā modelī tika ieviests lielāks pretspiediens kanāla izejā. Šajā gadījumā tika izvēlēts pretspiediens  $p = 4000$  Pa. Kā redzams 3.14. attēlā, šādā situācija plūsmai izveidojas recirkulējoša forma, kur kanāla sānos metāls atgriežas pretēji galvenajai plūsmai. 3.14. attēlā attēlots x/y plaknes šķēlums, 3.15. attēlā attēlots z/x plaknes šķēlums un 3.16. attēlā attēlots z/y plaknes šķēlums. Plūsmas ātruma maksimums tiek sasniegts centrālajā daļā ar vērtību 0,87 m/s.



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

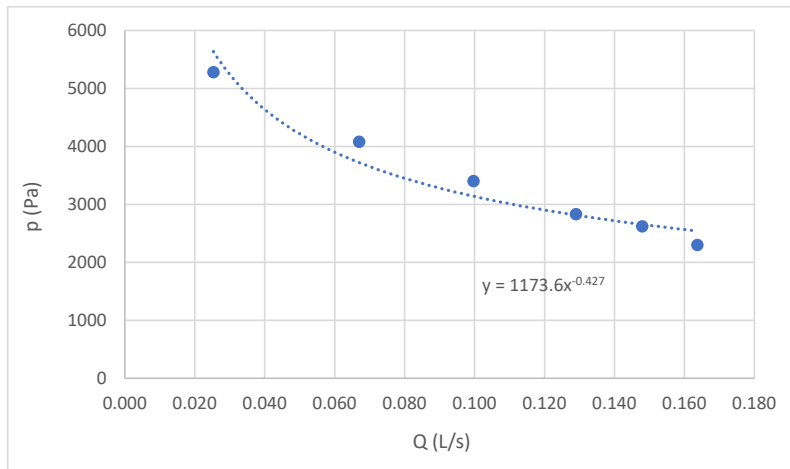


3.15. att. Šķidra metāla plūsmas ātrums z/x plaknes šķēlums kanāla vidus plaknē.



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

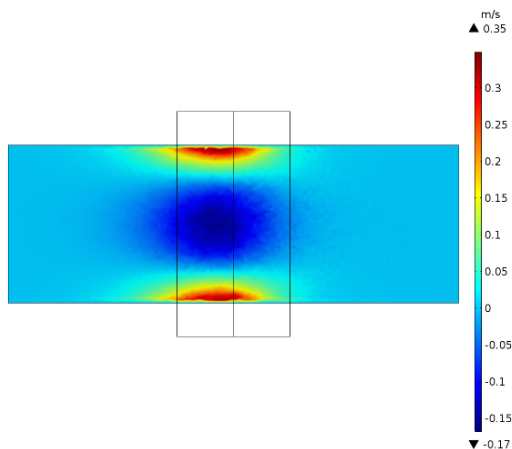
Veicot aprēķinus pie dažādām pretspiediena vērtībām, tika iegūta  $p - Q$  raksturlīkne, kas ir svarīgs parametrs jebkuram sūkņim (skatīt 3.17. attēlu)



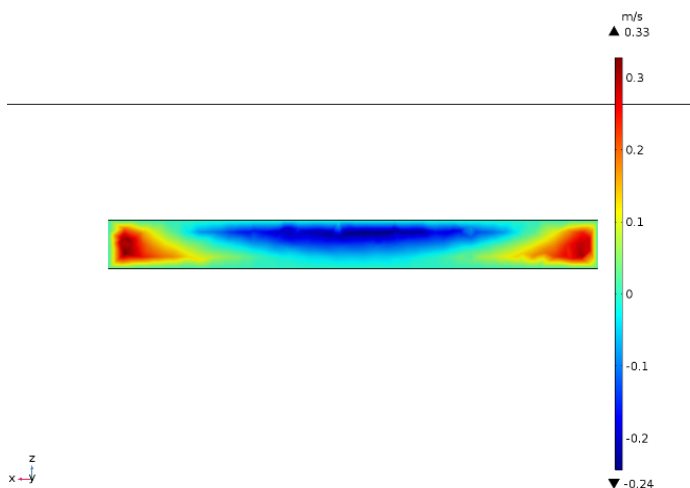
3.17. att. Sūkņa  $p - Q$  raksturlīkne.

### 3.2.4. Noslēgts kanāls

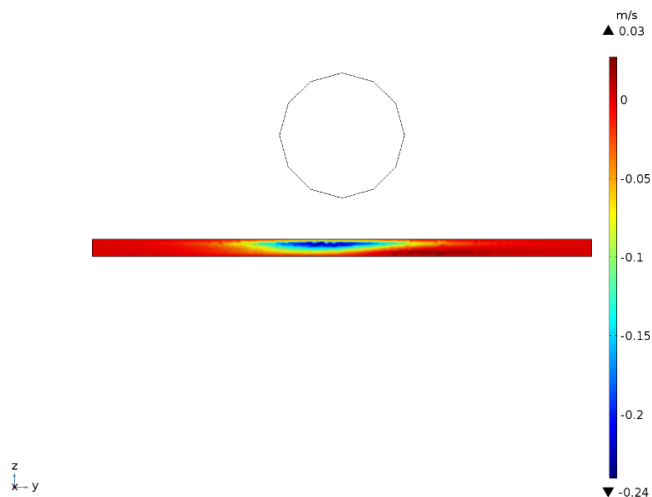
Kā papildus uzdevums tika aprēķināts modelis, kurā nav caurtece, attiecīgi kanāls tika pārvērst par noslēgtu tvertni. Šāda situācija modelē sūkni kā tas būtu šķidra metāla maisīšanas uzdevumos, kā piemēram degazācijā. 3.18. attēlā attēlots  $x/y$  plaknes šķēlums, 3.19. attēlā attēlots  $z/x$  plaknes šķēlums un 3.20. attēlā attēlots  $z/y$  plaknes šķēlums. Šajā gadījumā plūsmas ātruma maksimums tiek sasniegts sānu sienu tuvumā ar vērtību 0,35 m/s.



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



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



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

### 3.2.5. Secinājumi

Šajā nodaļā tika apskatīti šķidra metāla plūsmas skaitliskie modeļi.

1. Parādīts, ka var atrisināt turbulentus MHD uzdevumus ar *Comsol Multiphysics*. Situācijā, kur kanālā nav pretspiediena, tiek iegūta šķidrā metāla plūsma ar ātrumu līdz 1,95 m/s bez recirkulācijas (kanāla augstums 7 mm, platums 70 mm). Kad tiek ieviests pretspiediens, kanālā parādās recirkulējoša plūsma pie sānu sienām. Tas notiek tādēļ, ka sānu sienu tuvumā neveidojas elektromagnētiskais spēks.

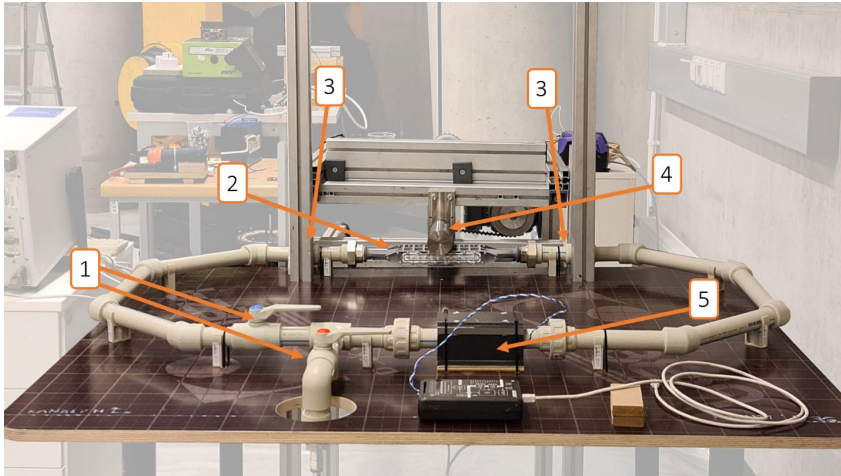
2. Noslēgta kanāla gadījumā veidojas recirkulējoša plūsma ar maksimālo ātrumu sānu sienu tuvumā.

### **3.3. Viena PM sūkņa šķidra metāla plūsmas izpēte lineārā kanālā**

Šajā nodaļā tika pētīta šķidrā metāla plūsma taisnstūra šķērsriezuma kanālā, ko rada pastāvīgā magnēta sūknis. Šķidra metāla plūsmas radīšanai lineārā kanālā var izmantot vienu PM rotoru. Savukārt šķidra metāla plūsma var tikt izmantota 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, kurus 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 [37]. 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 [38] mehānisko izturību. Visizplatītākais veids, kā samazināt ūdeņraža koncentrāciju alumīnijā, ir kausējumā ievadīt inertu 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 [39], tāpēc kausējuma degazēšanai nepieciešams liels daudzums inertas gāzes.

#### **3.3.1. Eksperimentālā iekārta**

Tika 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. Eksperimentālās sistēmas attēls ir parādīts 3.21. attēlā. Sistēma ir sadalīta kanāla aktīvajās un perifērajās daļās.



3.21. att. Eksperimentālais modelis: kopskats, kur 1 - vārsts, 2 – 3D drukāta lineārā daļa, 3 - manometra atrašanās vieta, 4 - pastāvīgā magnēta rotors, 5 - plūsmas mērītājs; kvadrāti uz galda atbilst 10x10 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.

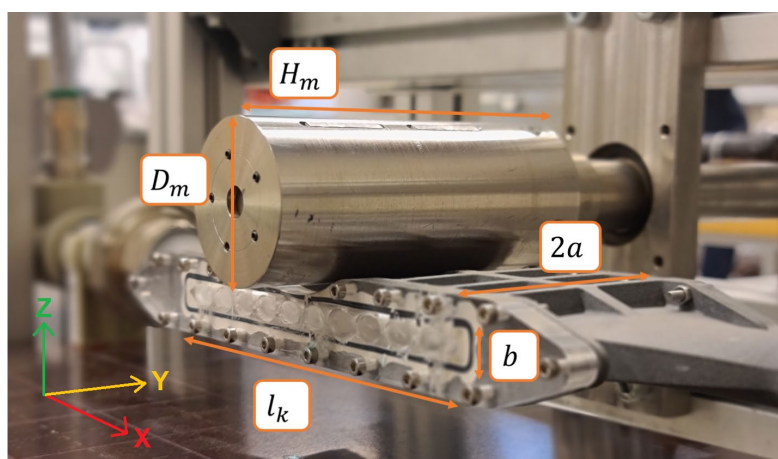
Pastāvīgā magnēta rotora ierīce sastāv no cilindriska pastāvīgā magnēta, vārpstas, zobratiem, zobsiksnas, trīsfāzu motora, frekvenču pārveidotāja un alumīnija profiliem magnēta novietojuma regulēšanai. Lai novērstu lielāko vibrāciju pārnesi, rotors un tā piedziņas mehānisms nav pievienots galdam, uz kuras 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 biežā nerūsējošā tērauda apvalkā. Magnēts tika pievienots lineārā kanāla sienas līkumā, lai samazinātu attālumu starp magnētu un šķidrā 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 pie magnēta rotācijas ātruma līdz 25 Hz. Pie lielāka ātruma 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 šķērsgriezums ir taisnstūrveida ar augstumu  $b$ , platumu  $2a$  un garumu  $l$ , kā redzams 3.22. attēlā. Lai iegūtu vēlamu formu, tika izmantota 3D drukāšana centrālajai kanāla detaļai. Pirms šī eksperimenta tika veikti testi, kuru rezultātā tika izvēlēts PA12 materiāls. Lai nodrošinātu ātruma mērījumus ar PUDV metodi caur sāniem, tika izveidota 6mm bieza organiskā stikla detaļa ar cilindriskiem urbumiem, lai varētu precīzi pozicionēt ultraskaņas manometrus. 3D drukātā detaļa ar organiskā stikla malām un blīvi ir redzama 3.22. attēlā. Šāda konstrukcija atvieglo šķidrā metāla plūsmas ātruma mērījumus; tā ir hermētiska, stingra un sastāv no ķīmiski inerta materiāla, lai tas nereagētu ar GaInSn, kā arī materiāls nav elektriski vadošs, kas imitē keramikas sienas atbilstoši industriāliem apstākļiem.



3.22. att. Eksperimentālā aparāta lineārās daļas tuvplāns, kas apzīmē pastāvīgā magnēta rotora un lineārā kanāla pozīciju, kur  $H$  - rotora augstums,  $D$  - rotora diametrs,  $2a$  ir 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

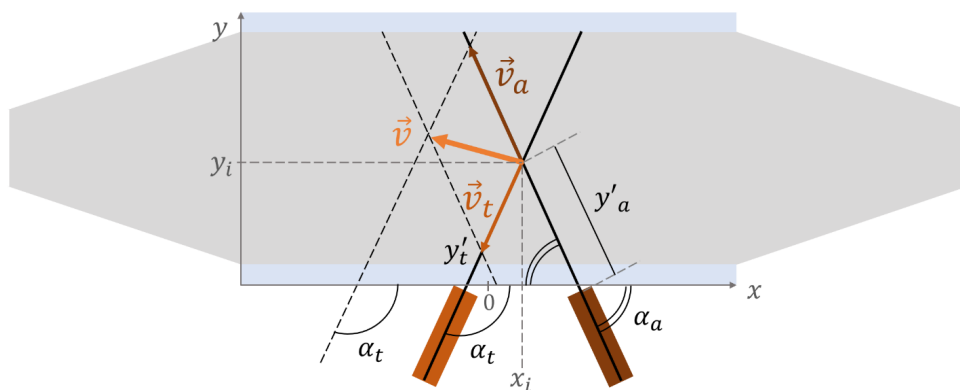


izmantota tikai viena zonde. Metodes priekšrocības ir informācija par ātrumu telpisko sadalījumu, bet tās trūkums ir maksimālais vai ierobežotais ātrums un izmērītais attālums, kas atkarīgs no impulsa atkārtošanās frekvences  $f_{prf}$ , kā arī skaņas ātruma vidē  $c$  un raidītāja frekvences  $f_e$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

Tika izvēlēta zonde ar  $f_e = 2$  MHz un  $f_{prf} = 4672$  Hz, laiks starp secīgiem mērījumiem bija 31 ms, kas neļauj pētīt ļoti smalkas plūsmas struktūras. Maksimālais izmērītais ātruma modulis bija  $v_{max} = 1,6$  m/s un mērīšanas dziļums  $x_{max} = 0,29$  m, kas ir daudzkārt lielāks par kanāla platumu  $2a = 0,07$  m. Raidītāja jauda tika iestatīta uz vidēju, savukārt uztvērēja telpiskā izšķirtspēja ir 4,39 mm. Signālam tika piemērots pastāvīgs 46 dB pastiprinājums.

Ātruma mērījumi tiek veikti  $|\alpha| \in [65,70]^\circ$  leņķī no  $x$  ass. Tāpat mērījumi tika veikti perpendikulāri ( $\alpha = 90^\circ$ ) kanāla malai diapazonā  $x \in [-65,0]$  mm, bet dati uzrādīja tikai haotisku troksni. Zemākos leņķos ( $|\alpha| < 50^\circ$  and  $|\alpha| > 130^\circ$ ) ātruma mērījumus nevarēja veikt sliktā skaņas kontakta dēļ, iespējams, gēla slānis bija pārāk biezs daļai stara, savukārt augstākos leņķos ( $85^\circ < |\alpha| < 95^\circ$ ) iegūtajā ātruma profilā bija tikai troksnis, iespējams, tāpēc, ka lielākā daļa staru atstarojās no kanāla pretējās sienas un nekavējoties atgriezās raidītājā.

Lai rekonstruētu plūsmas ātrumu, dati no diviem mērījumiem tika izmantoti vidējotā veidā, jo nav iespējams veikt vairākus vienlaicīgus mērījumus. Vidējošanai tika veikti vairāk nekā 1000 mērījumi laikā, kas aptver nedaudz vairāk par 30 sekundēm. Šāds intervāls tika izvēlēts kā optimāls plūsmas un apkopoto datu apjoma raksturošanai. Rekonstrukcijas ģeometriskais attēlojums ir parādīts attēlā 3.23., kas parāda gan globālās koordinātas  $x$  un  $y$ , gan  $y'$ , kas ir paralēla katram staram.



3.23. att. Ātruma lauka rekonstrukcija, izmantojot divus ātruma komponentu mērījumus:  $\alpha_a = 65^\circ$ ;  $\alpha_t = 115^\circ$ .

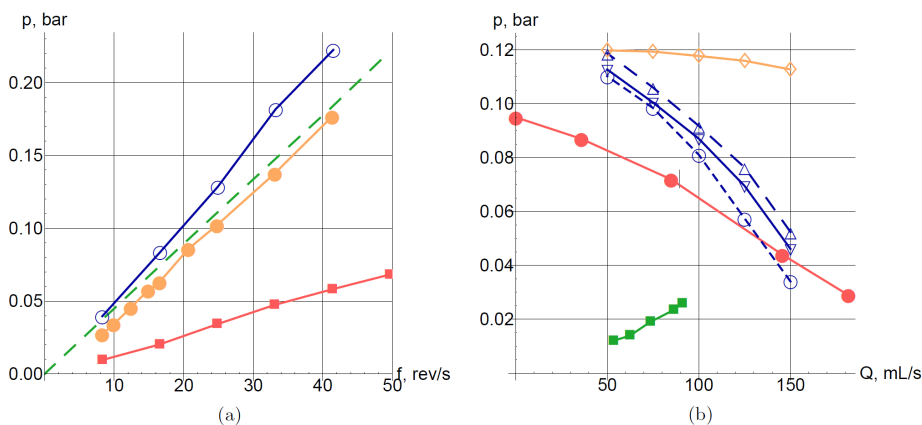
Tā kā mērījuma telpiskā izšķirtspēja ir 4,39 mm, blakus esošie mērījumu punkti tika pārvietoti par 3 līdz 4 mm, lai izmantotu pēc iespējas vairāk datu punktu. Konstrukcijas dēļ mērījumus nevar veikt tālāk par  $|x| > 65$  mm, kā arī no  $y = 82$  mm sānu mērījumus  $x = 0$  mm apgabalā ir sarežģīti veikt pastāvīgā magnēta rotora stiprinājuma dēļ. Pirmie 70 mm pie

zondes ir tā saucami *dead-zone* apgabali, kuros netiek iegūti mērījumi pārsātinātā signāla dēļ. Šis attālums dažādiem mērījumiem atšķirās un var būt saistīts ar sliktu skaņas signālu.

### 3.3.2. Rezultāti

Lai raksturotu sistēmas radīto spiedienu gan sūkņa, gan degazētāja režīmā, spiediena starpība abās kanāla pusēs kā funkcija no magnēta rotora rotācijas ātruma ir parādīta 3.24. a). attēlā. Eksperimentā pētītajā rotācijas ātruma režīmā līdz 50 Hz sakarība ir lineāra un nepiesātinās. Mērījumi sūkņa režīmā parādīti ar sarkanajiem kvadrātiem. Mērījumi degazatora režīmā parādīti ar oranžajiem aplīem. Skaitliskā aprēķina rezultāti parādīti ar ziliem aplīem. Analītiski aprēķinātais rezultāts parādīts ar zaļo līniju.

3.24. b) attēlā parādīta sūkņa raksturīgā spiediena un plūsmas ātruma līkne. Ar sarkanjiem aplīem atzīmēti mērījumi, kas veikti, mainot hidraulisko pretestību, pie nemainīga magnēta griešanās ātruma (24,8 Hz). Mērījumi, kas veikti, mainot rotora griešanās ātrumu, ir atzīmēti ar zaļiem kvadrātiem. Skaitliski spiediens sākotnēji tika aprēķināts atsevišķi taisnstūra apgabalā (oranži četrstūri) un pēc tam papildināts ar atsevišķi aprēķinātu spiedienu no konfuzora un difuzora, lai iegūtu aptuvenu sūkņa sekcijas spiediena kritumu (zili aplī). Papildus pievienoti rezultāti no skaitliski aprēķinātā sākotnējā simetriskā režīma (zili augšupvērsti trīsstūri) un pēc asimetriskā režīma iestāšanās (zili lejupvērsti trīsstūri) pilna sūkņa ģeometrijas simulācijā.

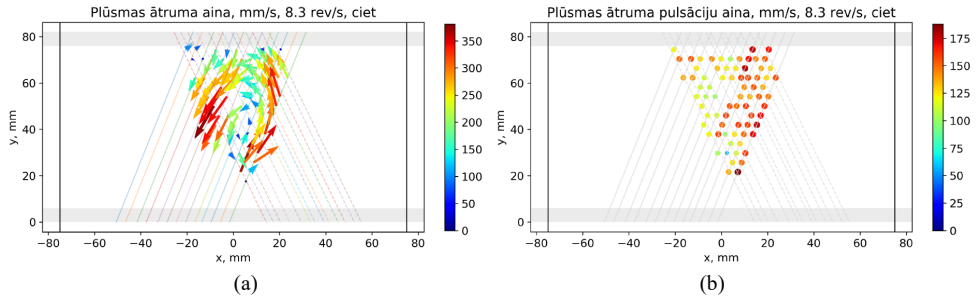


3.24. att. a) spiediena starpība abās kanāla pusēs kā funkcija no magnēta rotora rotācijas ātruma; b) EM sūkņa spiediena un plūsmas ātruma līknes.

Kanāla lineārajā daļā tika veikti ātruma mērījumi, izmantojot PUDV ierīci un iepriekšējā sadaļā aprakstītos parametrus. Tika veiktas vairākas eksperimentālās sērijas, starp kurām tika ieturēta pauze, lai izvairītos no metāla pārkaršanas un pārmērīgas oksīdu ievadīšanas kausējuma tilpumā. Mērījumi tika sākti dažas minūtes pēc rotora ieslēgšanas, lai neregistrētu nekādus efektus, kas izriet no neattīstītas plūsmas.

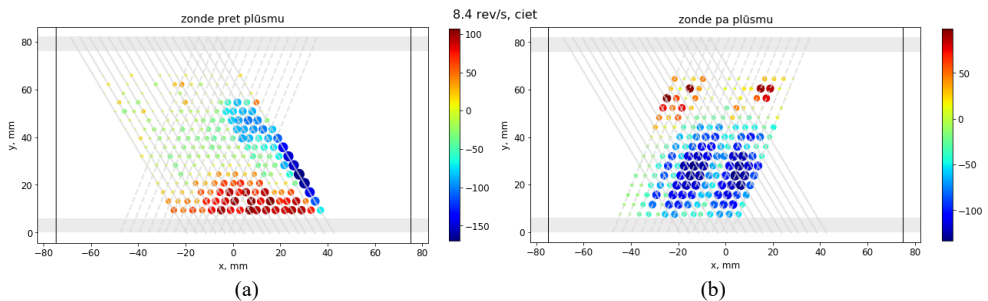
Attēlā 3.25.a ātruma lauks ir rekonstruēts no mērījumiem, kas veikti  $y = 0$  mm pusē, iegūstot plūsmu ar vienu virpuli. Veidojas plūsma ar vienu virpuli ap  $x = 0$  mm, maksimālā ātruma strūkļas ir pie  $|x| = 20$  mm ar  $v_{\max} = 300\text{--}350$  mm/s, vidējais ātrums mērīšanas zonā ir

$v_{avg} = 220$  mm/s. Ātruma pulsācijas sadalījuma grafiks redzams 3.25.b attēlā. Ātruma pulsācijas ir virs  $v_{sd} = \pm 100$  mm/s, un vidējā vērtība ir  $v_{sd} = \pm 130$  mm/s.



3.25. att. (a) Šķidrā metāla plūsmas lauka rekonstrukcija no  $y = 0$  mm degazētāja režīmā; pelēkais horizontālais laukums norāda uz organiskā stikla malām, vertikālās līnijas norobežo kanāla lineāro daļu, slīpās līnijas norāda uz ultraskaņas staru, uz kura tiek veikti mērījumi gan plūsmas virzienā, gan pretēji; b) ātruma standartnovirze, ko izmanto, lai raksturotu ātruma pulsācijas.

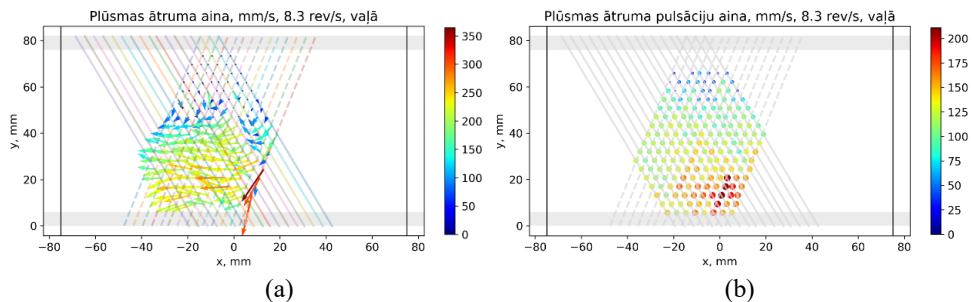
Bija sagaidāma plūsma ar diviem virpuļiem, kur pretplūsma atrastos gar kanāla sienām, bet 3.25.a attēlā šis nav novērojams. Ātrumu mērījumu nesakritība starp eksperimentiem, kas redzama 3.26. attēlā, norāda, ka plūsmas virpuļis bija kustīgs. Pie  $y = 82$  mm sienas netika iegūti kvalitatīvi dati pārsātinātā signāla dēļ. (a) gadījumā ātruma virziens maina zīmi pie  $y = 20$  mm, savukārt (b) izmaiņa notiek tuvu vidum. Eksperimenta ģeometrijas simetrijas dēļ būtu sagaidāms, ka (a) gadījumā ātrums atkal mainītos tuvu  $y = 60$  mm, bet tas netika novērots.



3.26. att. Nomērītais ātrums no  $y = 82$  mm puses degazētāja režīmā.

Lai modelētu EM sūkni, tiek atvērti vārsti un iegūts maksimālais plūsmas ātrums. Rekonstruētais ātruma lauks šim režīmam ir parādīts 3.27.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 kā zondes tuvumā.

Tika iegūta vienvirziena plūsma, kas plūst pret  $x$  asi ar vidējo ātrumu  $v \sim 220$  mm/s un ātruma pulsācijām  $v_{sd} = \pm 130$  mm/s, kā redzams 3.27.b. attēlā. Pie sienas ātrums nedaudz samazinās, bet nav nulle.



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

### 3.3.3. Secinājumi

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

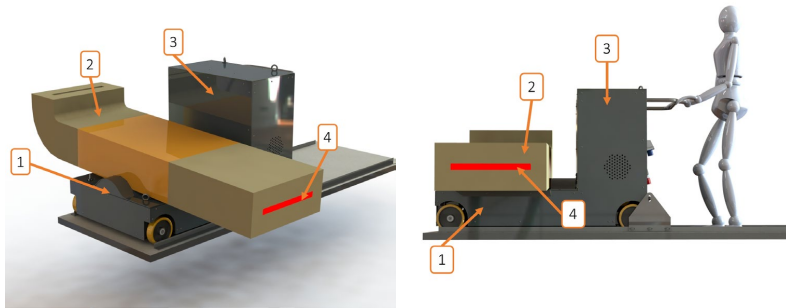
2. Ātruma sadalījuma eksperimentālie mērījumi ir sarežģīti un reizēm dod nekvalitatīvus datus. Ir divi galvenie iemesli, kas par to ir atbildīgi. Viens no tiem ir tas, ka pēc ilgstošas intensīvas sajaukšanas GaInSn rodas piemaisījumi, kas izraisa sliktu UDV signālu. Otrkārt, vienā eksperimentā tika izmantota tikai viena UDV zonde, kas padara rezultātu kombināciju no vairākām pozīcijām un leņķiem jēgpilnu tikai tad, ja plūsmas modelis ir atkārtojams.

3. Eksperimentālo mērījumu un skaitliskās simulācijas rezultātu nekonsekvences liecina, ka plūsmas modelis ir neprognozējams un var atšķirties starp eksperimentiem ar laika intervālu mazāku par 30 s. Iespējamais risinājums būtu veikt eksperimentālus mērījumus ilgākā laika periodā, lai ilgstoši asimetriskie modeļi vidēji būtu tuvu nullei.

## 3.4. Industriālais prototips

Balstoties uz skaitliskajiem modeļiem un eksperimentālo pieredzi, tika izstrādāts industriālais prototips šķidra metāla sūknim. Ņemot vērā, 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 spētu pacelt hidrostatisko stabu 1,5 m augstumā. Šajā ierīcē saliktā magnēta garums ir 70 cm un tā diametrs ir 15 cm. Datormodeļa ilustrācijas parādītas 3.28. attēlā.

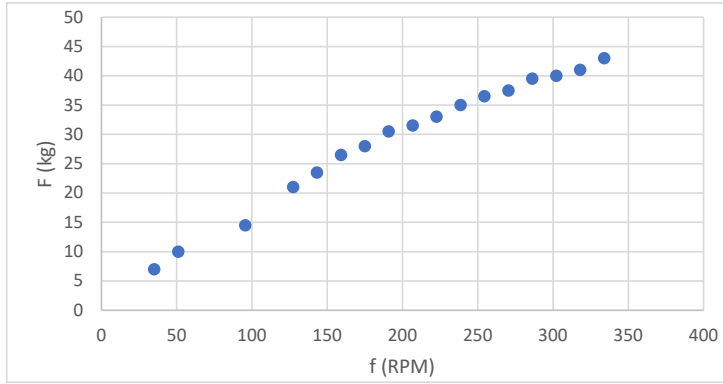


3.28. att. Industriāla izmēra šķidra metāla sūkņa datormodelis: 1-pastāvīgo magnētu rotors, 2-kanāla karkass, 3-rotora piedziņa, 4-šķidrā metāla kanāls.

Lai novērtētu ierīces veiktspēju, tika veikts eksperiments ar alumīnija loksni. Alumīnija loksne ar izmēru 10x500x1000 mm tika novietota tieši zem rotora un nomērīts radītais spēks pie dažādiem rotācijas ātrumiem. Ierīces fotoattēls redzams 3.29. attēlā. Nomērītais spēks uz alumīnija loksni parādīts 3.30. attēlā.

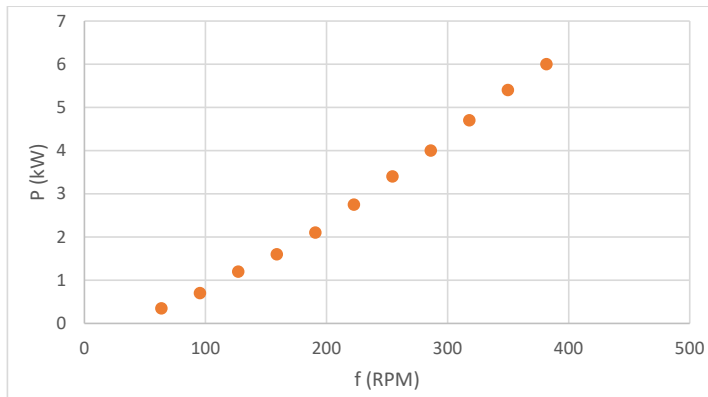


3.29. att. Foto no eksperimenta, kurā tiek nomērīts horizontālais spēks uz alumīnija loksni.



3.30. att. Spēks uz loksnī atkarībā no magnēta rotācijas ātruma.

Papildus tika nomērīta motora patērētā jauda atkarībā no magnēta rotācijas ātruma (3.31. attēlā).



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

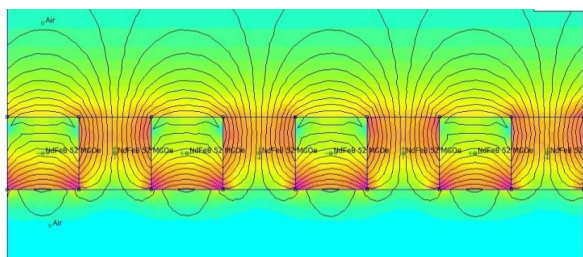
Tika veikts arī tests ar šķidru alumīnija rūpnieciskos apstākļos. Sūknis tika novietots pie speciāli izveidota taisnstūrveida kanāla, kurš tālāk pāriet uz apaļu cauruli, kura paceļas 1 m augstumā (3.32. attēlā). Šajā testā caurteces ātrums tika novērtēts nomērot izplūdušā alumīnija daudzumu tvertnē, kur varēja redzēt kā paceļas šķidruma līmenis. Rezultātā tika nomērīts ražīgums 10 t/h.



3.32. att. Iekārtas tests ar šķidru alumīniju.

## 4. Vairāku pastāvīgo magnētu sūkņi

Šajā nodaļā tiek apskatītas iespējas izmantot sinhroni rotējošus vairākus cilindriskus PM, lai sūknētu šķidru metālu. Eksistē Halbaha salikums [40], kur magnēti tiek izvietoti vienā rindā tā, lai magnētiskā lauka virziens katram secīgajam magnētam pagriežas pa 90°. Šādā veidā tiek panākts, ka magnētiskais lauks vienā pusē magnētu rindai ir stiprāks kā otrā pusē (skatīt 4.1. attēlu). Attiecīgi šādā veidā var izmantot mazāku daudzumu magnētiskā materiāla, lai sasniegtu nepieciešamo magnētiskā lauka intensitāti. Ņemot vērā, ka lielu PM sūkņu dārgākā komponente ir pastāvīgie magnēti, šāds koncepts varētu dot būtisku ieguvumu.



4.1. att. Halbaha salikuma radītais magnētiskais lauks [41].

### 4.1. 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 vienlaicīgi iegūt pēc iespējas augstāku plūsmas caurteci  $Q$  un spiedienu  $p$ .

#### 4.1.1. PM sūkņa raksturlielumu novērtējums

Lai novērtētu jebkura veida elektromagnētiskā indukcijas sūkņa raksturlielumus (neatkarīgi no mainīgā kustīgā magnētiskā lauka ģenerēšanas mehānisma) un to optimizāciju, izmanto Voldeka un Baranova atvasinātās pamatformulas [42]. Sūkņa radītais maksimālais spiediens  $p_{\max}$  ir

$$p_{\max} = \left(\frac{\sigma}{2}\right) V_B B^2 s l_{ch} k, \quad (4.1)$$

kur  $\sigma$  ir šķidrā metāla elektriskā vadītspēja kanālā,  $V_B$  ir mainīgā kustīgā magnētiskā lauka ātrums,  $B$  ir vidējais magnētiskā lauka stiprums šķidrā metāla slāņa platumā,  $s$  ir nobīde, kas nosaka relatīvo ātrumu magnētiskā laukā attiecībā pret šķidrā metāla ātrumu sūkņa kanālā,  $l_{ch}$  ir sūkņa kanāla aktīvās daļas garums (savienots ar magnētisko lauku), un  $k$  ir koeficients, ņemot vērā šķērseniskas gala nosacījumus, kas samazina sūkņa radīto maksimālo spiedienu. Sūkņa skrejošā magnētiskā lauka ātrumu nosaka kā  $V_B = 2\pi R f$ , kur  $f$  ir frekvence,  $R$  ir magnēta rotora rādiuss, nobīde  $s = (1 - V/V_B)$ , kur  $V$  ir vidējais šķidrā metāla ātrums sūkņa



kanālā, kas šajā gadījumā ir daudz mazāks nekā  $V_B$ , tāpēc var pieņemt, ka  $s = 1$ . Koeficientu  $k$  nosaka Verte [9]

$$k = \operatorname{Re} \left[ \frac{\alpha^2}{\lambda^2} \left( 1 - \frac{\operatorname{th}(\lambda a)}{\lambda a} \right) \right], \quad (4.2)$$

kur

$$\lambda^2 = \alpha^2(1 + iRm), \quad (4.3)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{\tau} \quad (4.4)$$

un  $R_m$  ir magnētiskais Reynolds skaitlis

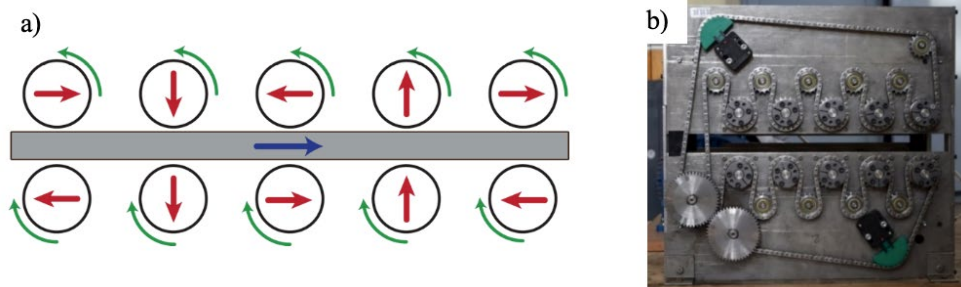
$$R_m = \sigma \mu_0 V_B S \frac{\tau b}{\pi \Delta}, \quad (4.5)$$

kur  $\Delta$  ir nemagnētiskās spraugas lielums,  $\tau$  ir magnētisko polu soļa garums,  $2a$  ir kanāla platums,  $b$  ir šķidrā metāla slāņa biezums sūkņa kanālā.

Lai panāktu labāku šķidro metālu pārvadāšanas efektivitāti starp metalurģiskiem procesiem, var izmantot slēgtus kanālus kombinācijā ar bezkontakta šķidro metālu sūkņiem. Tika apskatīta iespēja izmantot magnētisku cilindru virkni, kas magnetizēti perpendikulāri to asīm šķidro metālu sūkņēšanai. Tika pētīts kā izkārtot PM cilindrus, lai panāktu spēcīgāko sūkņēšanas iedarbību, vienlaikus ņemot vērā mehāniskos ierobežojumus.

#### 4.1.2. Eksperimentālā iekārta

Eksperimentālā prototipa centrālo daļu veido divas cilindrisku PM dipolu rindas, kuras ir magnetizētas perpendikulāri to rotācijas asij (4.2. attēls). Katra magnēta diametrs ir 50 mm un garums 200 mm. Attālums starp divām magnēta asīm vienā rindā ir 88 mm un starp magnētu asīm pretējās rindās ir 115 mm.  $\alpha$  ir leņķis starp divu secīgu magnētu magnetizāciju vienā rindā un  $\beta$  ir leņķis starp pirmajiem diviem magnētiem pretējās rindās.



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

Leņķis  $\alpha$  ir ar negatīvu zīmi otrajā rindā. Praksē, uzstādot leņķus  $\alpha$  un  $\beta$ , vienmēr būs neliela kļūda.

Galvenais bezkontakta šķidro metālu 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 pielietojumiem 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.

#### 4.1.3. Teorētiskais modelis

Bezgalīgi maza magnētiskā dipola momentu var aprēķināt, ja ir zināma PM paliekošā magnētiskā indukcija, kas parasti ir norādīta magnētu specifikācijā.

$$\mathbf{m} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}_r V, \quad (4.6)$$

kur  $B_r$  ir PM paliekošā magnētiskā indukcija un  $V$  ir magnēta tilpums.

Lai aprēķinātu spēku starp diviem magnētiskā dipola momentiem  $\mathbf{m}_1$  un  $\mathbf{m}_2$ , starp kuriem ir attālums  $\mathbf{r}$ , izmanto formulu [43]

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{B}_1), \quad (4.7)$$

jeb

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2) = \frac{3\mu_0}{4\pi r^5} \left[ (\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{r}) \mathbf{m}_2 + (\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{r}) \mathbf{m}_1 + (\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{m}_2) \mathbf{r} - \frac{5(\mathbf{m}_1 \cdot \mathbf{r})(\mathbf{m}_2 \cdot \mathbf{r})}{r^2} \mathbf{r} \right], \quad (4.8)$$

PM matemātiski var izteikt kā elektrisko strāvu cilpu summu. Katrā cilpā ir magnētiskais dipola moments

$$\mathbf{m} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{S}, \quad (4.9)$$

kur  $\mathbf{I}$  ir strāvas cilpa plaknē, kas norobežo laukumu  $S$ . Tiek pēfīts tikai griezes momenta vektors, kura virziens sakrīt ar magnēta rotācijas asi. Lai aprēķinātu griezes momentu, kas iedarbojas uz magnētu, izmanto šo formulu:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{m} \times \mathbf{B}, \quad (4.10)$$

kur  $\boldsymbol{\tau}$  ir griezes moments un  $\mathbf{B}$  ir ārējais magnētiskais lauks. Integrējot visu pārējo magnētu elektriskās strāvas cilpas, var aprēķināt ārējo magnētisko lauku. Tad ārējais magnētiskais

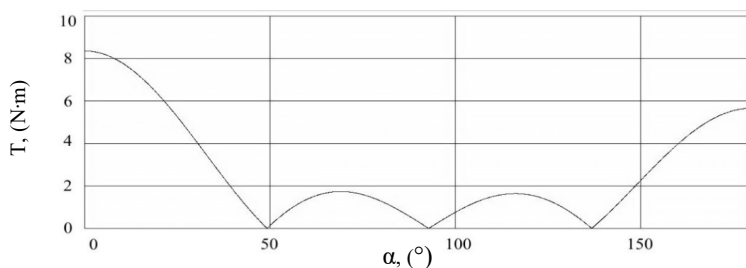
lauks tiek piemērots vienam no magnētiem, kas nav iekļauts ārējā laukā, un tiek aprēķināts griezes moments. Visbeidzot tiek iegūti visi atsevišķie magnēta griezes momenti. Tad tiek aprēķināta katra magnēta griezes momentu summa katrā rindā.

$$T_j = \sum_{i=1}^n \tau_i. \quad (4.11)$$

Lai aprēķinātu sistēmas griezes momentu  $T$ , ir jāskaita divu rindu griezes momenti. Jāņem vērā, ka griezes momentu moduļi ir jāatņem, jo tie griežas pretējos virzienos.

$$T = T_1 - T_2 \quad (4.12)$$

Šādi tika iegūts griezes moments, kas piedziņas blokam jāpārvar, lai pagrieztu visu magnētu sistēmu. Sistēmai rotējot, šis spēks laika gaitā mainās. Lai aprēķinātu vidējo sistēmas griezes momentu vienā apgriezienā, tiek saskaitīti momentāno griezes momentu moduļi un izdalīti ar izvēlēto griezes momentu skaitu. Visbeidzot, vidējā griezes momenta summa tiek attēlota attiecībā pret leņķi  $\alpha$  (4.3. attēls).

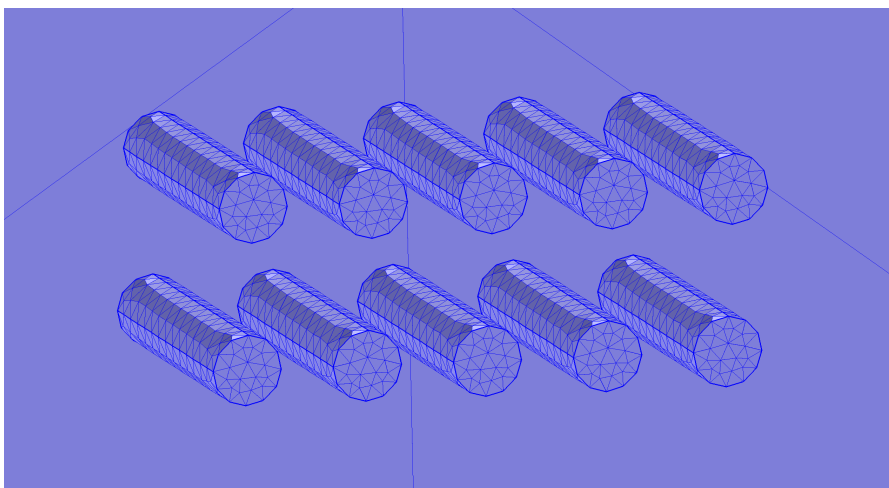


4.3. att. Analītisks atrisinājums 10 magnētiem - sistēmas griezes moments ( $\beta = 180^\circ$ ).

Sistēmas griezes momenta minimums 10 magnētiem tika atrasts pie  $\alpha = 49,1^\circ$ ;  $\alpha = 92,8^\circ$ ;  $\alpha = 136,8^\circ$ .

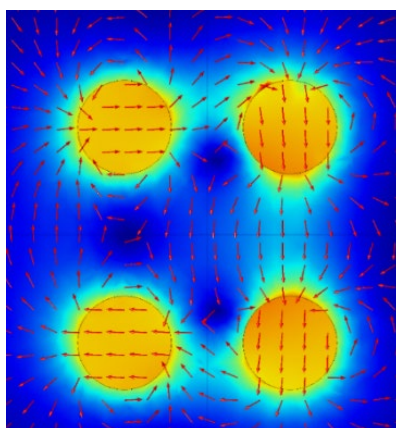
#### 4.1.4. Skaitliskie aprēķini

Stacionārs un parametriskais 3D aprēķins tika veikts, izmantojot *COMSOL Multiphysics*. Izmantojot magnētiskā lauka moduli, parametriskā analīze tiek iestatīta leņķim  $\alpha$  un laikam  $t$ . Leņķa solis tika uzstādīts kā  $1^\circ$  un 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 tiek summēti, lai noskaidrotu sistēmas pretestību veicot vienu rotāciju. Galīgo elementu tīkls tika izveidots no četrskaldņu trijstūriem (*free tetrahedral*) un modeļi kopumā bija 55547 elementi (skatīt 4.4. attēlu).

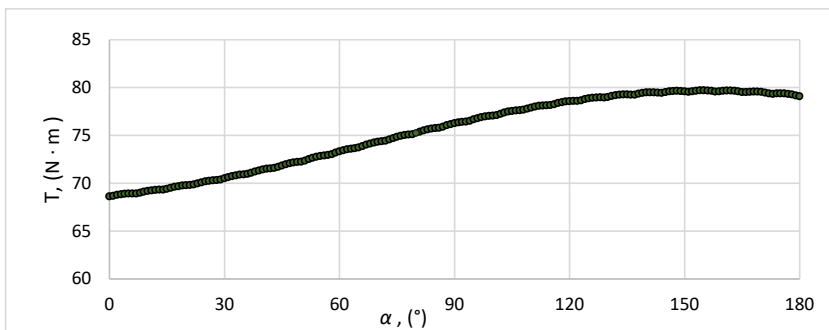


4.4. att. Galīgo elementu tīkls.

Vispirms tika apskatīta situācija, kad ir 2 PM katrā pusē. Magnētiskā lauka indukcijas lielums un vektori pie  $\alpha = 90^\circ$  un  $\beta = 180^\circ$  ir parādīti 4.5. attēlā. Sistēmas vidējais griezes moments atkarībā no leņķa  $\alpha$  ir parādīts 4.6. attēlā.

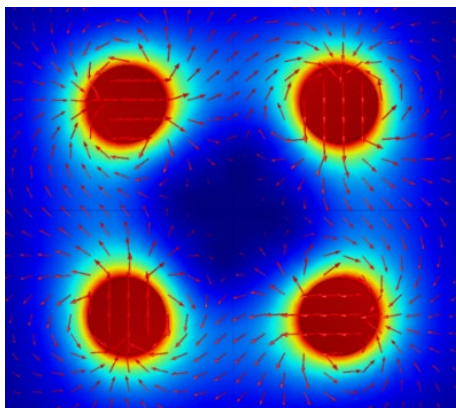


4.5. att. 4 cilindri – magnētiskā lauka indukcijas amplitūda un virziens ( $\alpha = 90^\circ$ ;  $\beta = 180^\circ$ ).

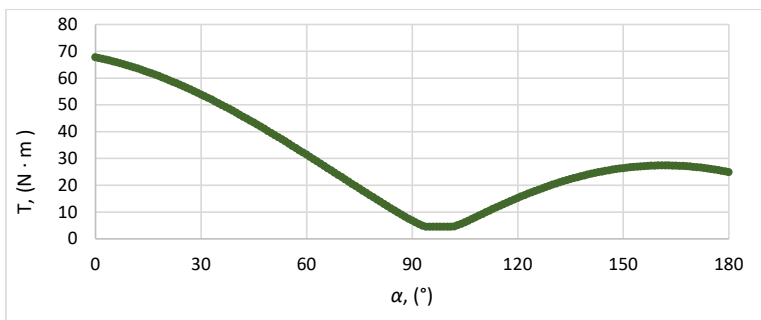


4.6. att. 4 cilindri – sistēmas vidējais griezes moments ( $\beta = 180^\circ$ ).

Šī konfigurācija nav īpaši praktiska, jo griezes moments ir liels pie visām  $\alpha$  vērtībām. Tika izpētīta vēl viena konfigurācija ar 4 magnētiem, pie  $\alpha = 90^\circ$  un  $\beta = 90^\circ$  (skatīt 4.7. attēlu un 4.8. attēlu).

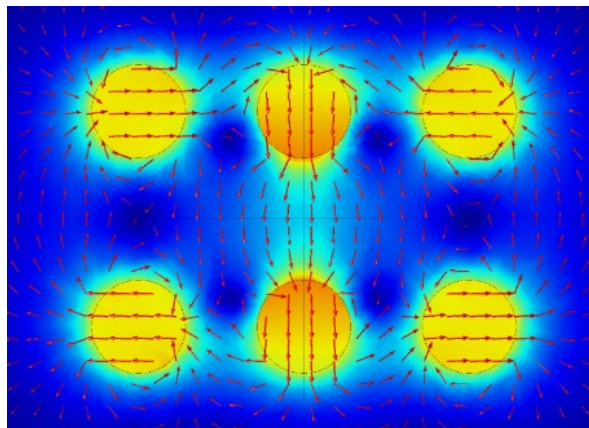


4.7. att. 4 cilindri – magnētiskā lauka indukcijas amplitūda un virziens ( $\alpha = 90^\circ$ ;  $\beta = 90^\circ$ ).

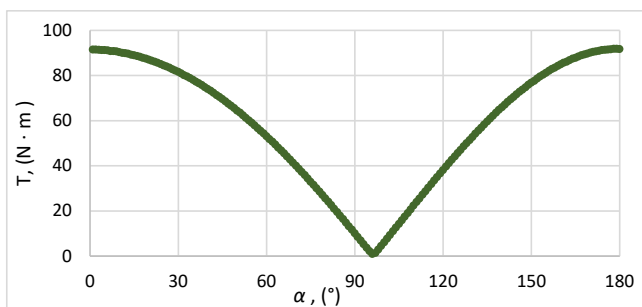


4.8. att. 4 cilindri – sistēmas vidējais griezes moments ( $\beta = 90^\circ$ ).

Šajā gadījumā sistēmas vidējais griezes moments  $T$  sasniedz minimumu pie  $\alpha = 100^\circ$ , kur  $T = 4,51 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Šī ir daudz labāka konfigurācija griezes momenta ziņā, taču tā rada aptuveni 2 reizes mazāku sūkņēšanas efektivitāti, jo netiek sasniegta tik liela magnētiskās indukcijas vērtība reģionā, kur atrastos kanāls. Nākamā tika apskatīta 6 cilindru konfigurācija. Magnētiskā lauka vektori attēloti 4.9. attēlā un sistēmas griezes moments 4.10. attēlā.

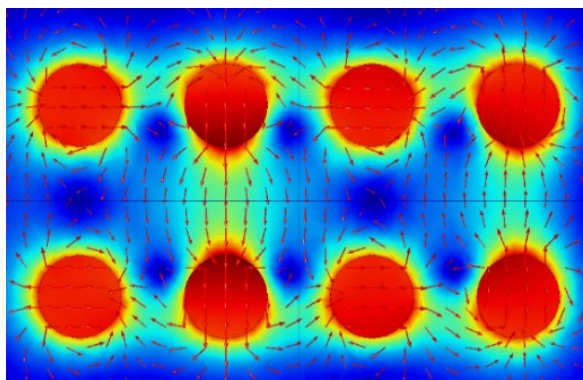


4.9. att. 6 cilindri – magnētiskā lauka indukcijas amplitūda un virziens ( $\alpha = 90^\circ$ ;  $\beta = 180^\circ$ ).

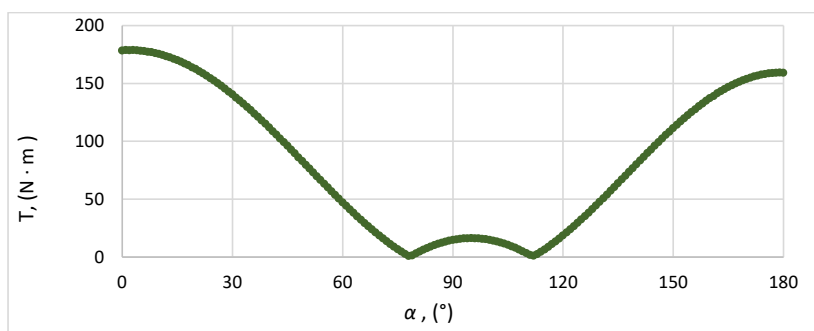


4.10. att. 6 cilindri – sistēmas vidējais griezes moments ( $\beta = 180^\circ$ ).

6 PM cilindru gadījumā sistēmas vidējais griezes moments  $T$  sasniedz minimumu pie  $\alpha = 97^\circ$ , kur  $T = 1,42 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Griezes moments minimumā ir ļoti mazs, tāpēc šī ir lieliska konfigurācija praktiskam sūknim. Nākamā tiek apskatīta 8 cilindru konfigurācija (skatīt 4.11. attēlā un 4.12. attēlā).

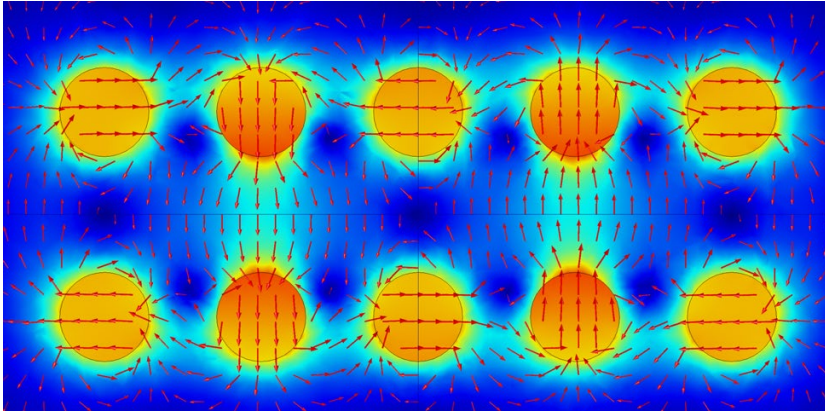


4.11. att. 8 cilindri – magnētiskā lauka indukcijas amplitūda un virziens ( $\alpha = 90^\circ$ ;  $\beta = 180^\circ$ ).

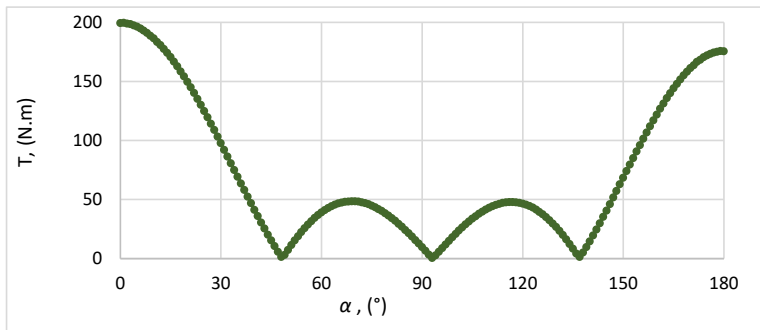


4.12. att. 8 cilindri – sistēmas vidējais griezes moments ( $\beta = 180^\circ$ ).

8 PM cilindru gadījumā sistēmas vidējam griezes momentam  $T$  ir divi minimumi – viens pie  $\alpha = 78^\circ$ , kur  $T = 0,86 \text{ N} \cdot \text{m}$  un otrs pie  $\alpha = 112^\circ$ , kur  $T = 1,04 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Šī ir arī ļoti laba konfigurācija, jo griezes moments ir mazs. Minimums pie  $\alpha = 78^\circ$ , ir nedaudz labāks, jo tas rada mazāku  $T$  vērtību, kā arī leņķis  $\alpha = 78^\circ$  ir tuvāk  $90^\circ$ , kas tuvāk atbilst Halbaha izkārtojumam un rada visspēcīgāko sūknēšanas efektu. Visbeidzot tiek apskatīta 10 cilindru konfigurācija (skatīt 4.13. attēlā un 4.14. attēlā).



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

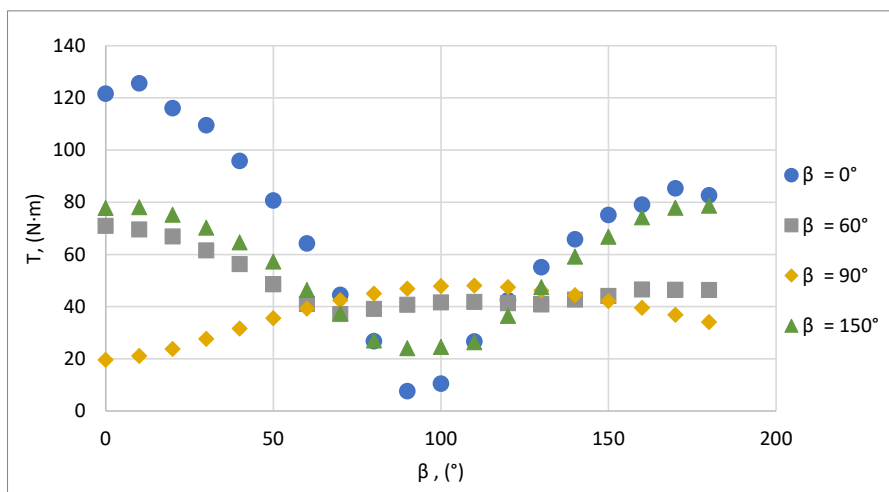


4.14. att. 10 cilindri – sistēmas vidējais griezes moments ( $\beta = 180^\circ$ ).

10 cilindru gadījumā sistēmas vidējais griezes moments  $T$  parāda trīs minimumus. 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 rada spēcīgāku magnētisko lauku starp rindām kā ārpusē.

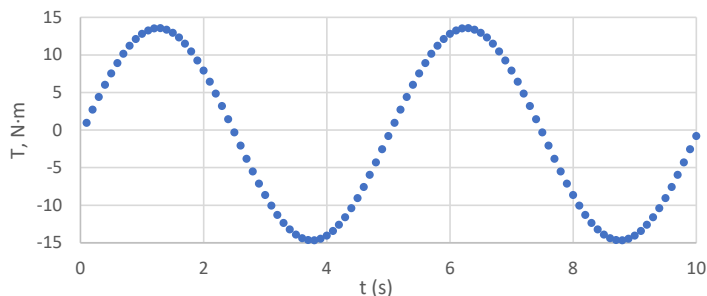
4.15. attēls parāda dažādu leņķu starp abām rindām ( $\beta$ ) nozīmi. Citiem gadījumiem nav ievērojamu minimumu, izņemot  $\beta = 0^\circ$  un  $\beta = 180^\circ$ . No šiem diviem  $\beta = 180^\circ$  ir labāks, jo sistēmas magnētiskā lauka līnijas tam dabiski izlīdzinās. Tas pats princips attiecas uz lielāku magnētu skaitu.





4.15. att. Dažādu leņķu  $\beta$  salīdzinājums starp rindām (6 magnēti).

Kaut arī sistēmas griezes moments ir mazs, katrs atsevišķais magnēts uzņem griezes momentu, kas var būt daudz lielāks atkarībā no tā, kur tas atrodas sistēmā, tāpēc sakabes mehānismam jābūt ļoti izturīgam. Pie  $\alpha = 90^\circ$  sistēma ir nepārtraukti rotējošs Halbaha salikums, kas rada spēcīgāku magnētisko lauku starp rindām un vājāku ārpusē. Jāatzīmē, ka, apsverot sistēmas vidējā griezes momenta vērtību, sistēmas momentānais griezes moments ir atkarīgs no rotācijas stāvokļa. 4.16. attēlā parādīts momentānais griezes moments magnētam rotējot (griešanās ātrums ir 0,1 Hz).



4.16. att. 10 cilindru sistēmas momentānais griezes moments ( $\alpha = 90^\circ$ ;  $\beta = 180^\circ$ ).

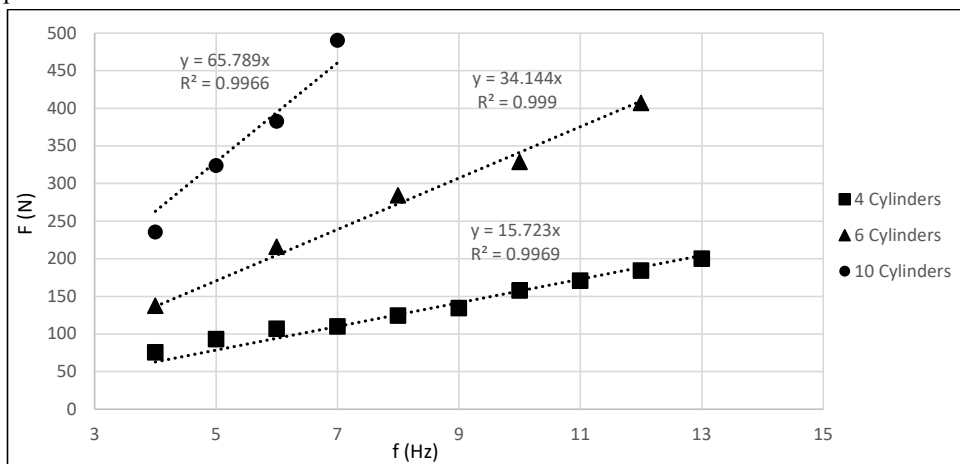
Kaut arī vidējais griezes moments ir  $T = 8,91 \text{ N}\cdot\text{m}$ , vienā pagriezienā tas svārstās no  $T = 14,7 \text{ N}\cdot\text{m}$  līdz  $T = -14,7 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Tātad sistēmas piedziņas mehānisms vienā brīdī uztver pretestību, un pēc  $\frac{1}{4}$  pagriezienu tas tiek stumts uz priekšu. Šis efekts var radīt lielu slodzi piedziņas blokam (ķēdei, siksnai, zobratiem, motoram).

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 kā 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, kopējā nobīde veidojas jau ievērojama un neliela nobīde no optimālā leņķa dramatiski palielina sistēmas griezes momentu.

#### 4.1.5. Sūkņa raksturlielumu novērtējumi

Tika veikta eksperimentu sērija, lai novērtētu šī sūkņa sūknēšanas jaudu. Starp magnētu rindām tika ievietota 5754 sērijas alumīnija sakausējuma plāksne ar izmēru 12x180x600 mm un, izmantojot rokas svarus, loksnei pieliktais spēks tika izmērīts atkarībā no magnētu rotācijas frekvences. 4.17. attēlā parādīti iegūtie rezultāti un 4.18. attēlā parādīts fotoattēls ar eksperimentālo ierīci.



4.17. att. Sūkņa radītais spēks uz alumīnija loksni.

Izmantotajā 4 cilindru konfigurācijā bija uzstādīts  $\alpha = 95^\circ$  un  $\beta = 90^\circ$ . Izmantotajās 6 un 10 cilindru konfigurācijās tika uzstādīts  $\alpha = 95^\circ$  un  $\beta = 180^\circ$ . Eksperimentu laikā tika novērots, ka alumīnija loksne uzsila un tajā pašā laikā nomērītais spēks kļuva 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 bija jāgaida starp katru mērījumu, ja tika izmantots liels ātrums un ja ierīce bija ieslēgta ilgākā laika periodā.

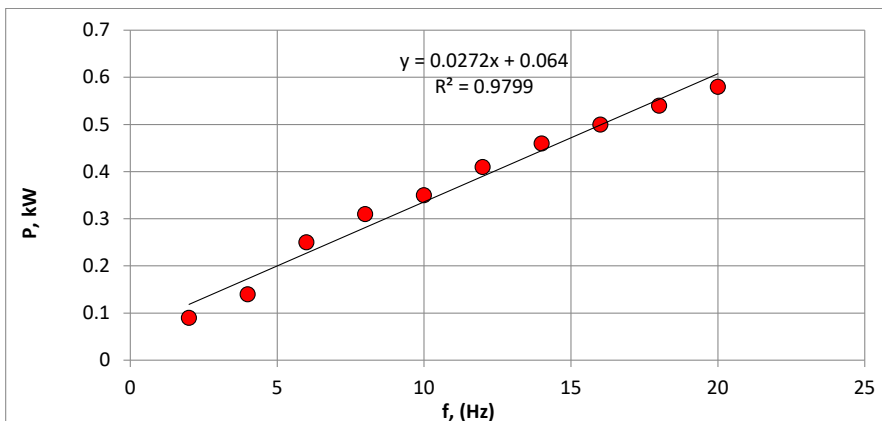


4.18. att. Mērīšanas sistēma ar alumīnija loksni.

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

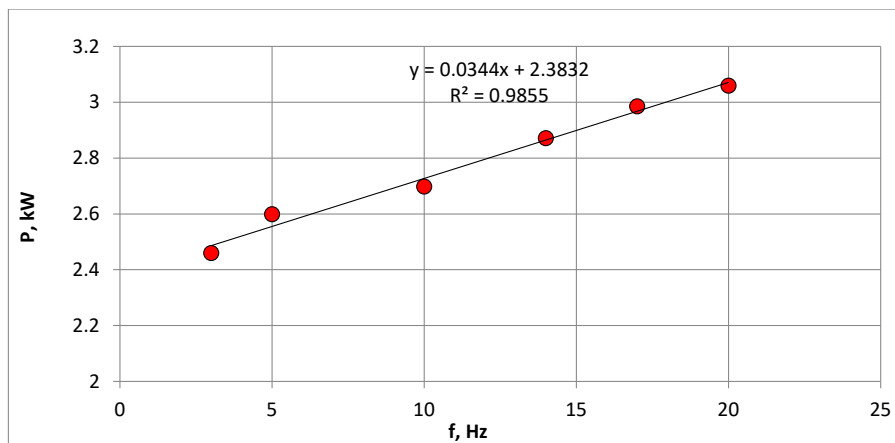
$$h = \frac{F}{S\rho g} = 9,75 \text{ m.} \quad (4.13)$$

Lai novērtētu mehāniskās piedziņas zudumus sistēmā, tika veikti mērījumi ar Rogovska jostas palīdzību, lai noskaidrotu motora patērēto jaudu atkarībā no rotācijas ātruma, kad sistēmā nav ievietotu PM (skatīt 4.19. attēlu). Šajā mērījumā ietilpst mehānisko elementu (ķēdes, zobratu, gultņu) savstarpējās berzes rezultātā radušies jaudas zudumi, kas rezultējās siltumā un nodilumā.



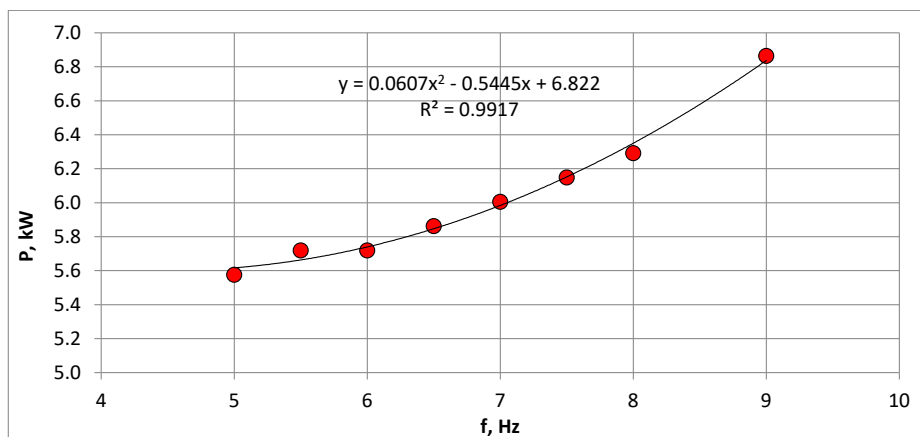
4.19. att. Motora patērētā jauda bez PM.

Pēc tam visi 10 PM tika ievietoti sūkņa iekārtā un vēlreiz nomērīta motora patērētā jauda atkarībā no rotācijas ātruma (4.20. attēls).



4.20. att. Motora patērētā jaudu atkarībā no frekvences ar 10 PM.

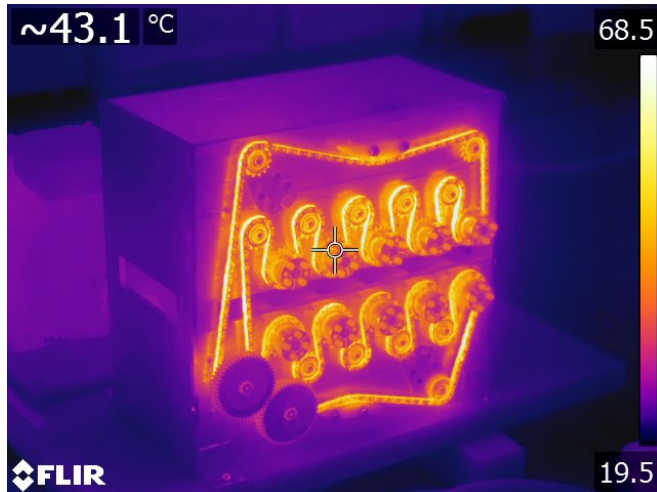
Pie lielāka motora ātruma, relatīvie jaudas zudumi mehāniskajā piedziņā ir mazāki attiecībā pret patērēto jaudu ar ievietotiem PM. Attiecīgi, pie lielākās nomērītās frekvences (20 Hz) mehāniskajai piedziņai tiek patērēti 20 % jaudas. Visbeidzot tika nomērīta motora patērētā jauda atkarībā no rotācijas ātruma sūknī ar 10 PM un 12 mm biezu alumīnija loksni (4.21. attēls).



4.21. att. Motora patērētā jaudu atkarībā no frekvences ar 10 PM un alumīnija loksni.

No šiem rezultātiem var secināt, ka šajā rotācijas ātrumu diapazonā, mehāniskās piedziņas patērētā jauda attiecībā pret magnētu sistēmas rotēšanas jaudu ir aptuveni 13 % pie 10 Hz. Pieaugot motora rotācijas ātrumam, patērētā jauda bez magnētiem pieaug ievērojami straujāk kā citos gadījumos. Visticamāk, ka mehāniskās piedziņas patērētā jauda palielinās, kad iekārtā ievieto PM, jo to savstarpējie pievilšanās spēki ir lieli un rada papildus slodzi uz gultņiem. PM rotoru savstarpējo fāzes leņķu nodrošināšanai visi rotoru ir savienoti ar zobratu un ķēdes

palīdzību. Ņemot vērā, ka divi savstarpējie magnēti viens uz otru rada griezes momentu vairāku desmitu N·m apmērā, tad ķēdes nospriegojums ir ļoti liels. Attiecīgi veidojas liela berze starp mehāniskajiem elementiem kā rezultātā izdalās siltums. 4.22. attēlā parādīts termokameras attēls pēc pusstundu ilgas iekārtas darbības.



4.22. att. Sūkņa piedziņas attēls uzņemts ar termokameru.

#### 4.1.6. Secinājumi

1. Rezultāti rāda, ka divpusējs PM sūknis ar diviem rotējošu cilindrisku dipolu blokiem var būt praktiski izmantojams dažādām, tomēr specifiskām magnetizācijas virzienu konfigurācijām.

2. Tika noteikti optimālie fāzes nobīdes leņķi 4, 6, 8 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 -  $\alpha = 48^\circ, 93^\circ, 137^\circ$ .

3. Sūkņa darbība tika pārbaudīta eksperimentāli pie  $\alpha = 93^\circ$ , kas arī nodrošina vislielāko magnētiskās indukcijas vērtību starp magnētiem, un tika parādīts, ka sistēmai bija pietiekoši stabila veiktspēja. Atšķirību optimālajam leņķim  $\alpha$  varētu izskaidrot ar magnēta gala efektiem, kas analītiskajā modelī netiek ņemti vērā, un ar ierobežoto galīgo elementu tīkla izmēru skaitliskajā modelī.

4. Tika veiktas eksperimentu sērijas ar alumīnija plāksni, kuras parāda lielu potenciālu šāda sūkņa šķidra metāla sūknēšanas jaudai. Tomēr, ņemot vērā, ka reālā iekārtā vienmēr būs kāda fāzes nobīdes kļūda, tad liels skaits ar PM cilindriem šādā sūknī nav vēlams.

## 5. Šķidra metāla maisītāji

### 5.1. Bezkontakta elektromagnētiskā metode alumīnija degazācijai

Kā jau minēts, PM dipolu sūkņus var izmantot arī kā maisītājus, izmainot šķidrā metāla konteineru ģeometriju. Šajā nodaļā ir aprakstīta elektromagnētiska alumīnija degazēšanas ierīces ideja, kā arī tās matemātiskais un skaitliskais apraksts. Eksperimentāla elektromagnētiska ierīce alumīnija sakausējumu atgāzēšanai tika izstrādāta un pārbaudīta, lai novērtētu šīs tehnoloģijas potenciālu pielietošanai industriālos apstākļos [44].

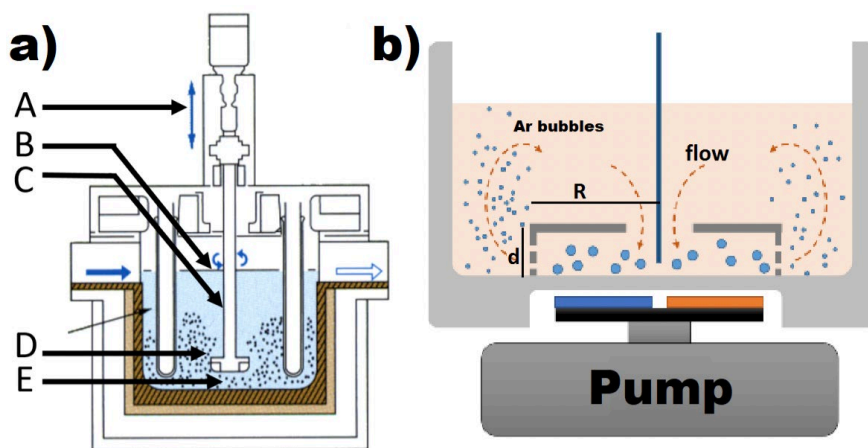
Šķidrums alumīnijs ir ķīmiski ļoti reaktīvs, tāpēc, nonākot saskarē ar mitru gaisu vai mitriem darbarīkiem, ūdens sadalās, izdalot ūdeņradi kausējumā. Ir labi dokumentēta negatīvā ietekme pārmērīgiem šīs izšķīdušās gāzes daudzumiem uz alumīnija lējumu mehāniskajām īpašībām [45][46]. Lai samazinātu gāzes daudzumu alumīnijā, ir jāsamazina ūdeņraža ievadīšanās daudzums kausējumā un pirms liešanas jānomēra un jāizvada ārā izšķīdušais ūdeņradis.

Visbiežāk izkausēta alumīnija degazāciju veic, izmantojot attīrīšanas gāzi, kuru ievada kausējumā ar rotējošu degazēšanas ierīci. Kad kausējumā tiek ievadīti attīrīšanas gāzes burbuļi, tie uzņem ūdeņradi un uzpeld uz šķidrā metāla brīvās virsmas. Ideālā gadījumā ar ūdeņradi piesātināti burbuļi atstāj kausējumu un samazina ūdeņraža koncentrāciju. Taču, samazinoties gāzes saturam kausējumā, samazinās arī ūdeņraža līdzsvara spiediens burbuļos, tāpēc jāpalielinās attīrīšanas gāzes daudzumam, kas vajadzīgs atlikušā ūdeņraža noņemšanai.

Gāzu atdalīšana no kausējuma ir tehnoloģisks posms alumīnija ražošanā starp metāla kausēšanu un liešanu. Lai rūpnieciskais process būtu efektīvāks, argona burbuļu lielumam jābūt pēc iespējas mazākam. Šī metode ir efektīva tikai tad, ja argona burbuļi ir mazi, pretējā gadījumā lieli burbuļi paceļas pārāk ātri, lai piesātinātos ar ūdeņradi. Otrs ieguvums ir tāds, ka tiek palielināta burbuļu virsmas un tilpuma attiecība, tādējādi ar vienādu daudzumu gāzes var panākt apjomīgāku ūdeņraža izvadīšanu.

Pašlaik visplašāk izmantotā burbuļu sašķelšanas metode ir mehāniska rotora ievietošana šķidra metāla tilpumā [47]. Lai arī šāda mehāniskā burbuļu smalcināšana pilda savu uzdevumu, tai ir arī ievērojami trūkumi, tāpēc tiek meklētas alternatīvas. Lai iegūtu mazus burbuļus, ir jāizveido turbulenta bīdes plūsma šķidrā metālā. Tradicionāla alumīnija degazācijas ierīce sastāv no speciāli veidota grafitā rotora ar caurumiem, kā parādīts 5.1. a) attēlā. Argons tiek piegādāts ātri rotējošā rotora centrā, un, burbuļiem izejot caur sprauslām, tie tiek sašķelti daudz mazākos izmēros. Rūpnieciskos uzstādījumos ātruma starpība starp rotora virsmu un šķidro metālu ir jābūt vismaz 4 m/s. Lielas ātruma starpības un spiediena svārstības, kas saistītas ar turbulentām plūsmām, sadala burbuļus, kā rezultātā tiek panākta daudz augstāka atgāzēšanas efektivitāte [48]. Šāda intensīva plūsma rada ātru rotora nodilumu, kas piesārņo metālu un rada papildu izmaksas. Galvenie mehāniskas degazācijas ierīces trūkumi ir norādīti ar burtiem 5.1. a) att: A) Motora piedziņas, rotora sajūga, gāzes ieplūdes sistēmas sarežģīta konstrukcija; B) Virsmas svārstības palielina oksīda plēves pārraušanos iespēju; C) Rotors bieži jāmaina; (D). Rotora nodilšana piesārņo metālu; E) Dažos lokālos apgabalos alumīnijs netiek atgāzēts.

Lai uzlabotu degazācijas procesu, tika izveidots modeļa eksperiments, kas pārbauda elektromagnētiski ierosinātu plūsmu šķidrā alumīnijā burbuļu sadalīšanai un degazācijai. Tika izstrādāta ierīce, kas ļauj izmantot bezkontakta metodi, lai izveidotu nepieciešamo plūsmu degazēšanai šķidrā metālā [49]. Eksperimentālās ierīces shēma ir parādīta 5.1. b) attēlā. Šķidrā metāla tvertnei ir speciāli izveidota iekšējā struktūra, kas ļauj veikt attiecīgu uzdevumu. Konstrukcija tika veidota tā, lai šķidrā metāla, kas satur lielus argona burbuļus, tiek izspiests caur maziem caurumiem kameras iekšējās sienās. Attiecīgajā brīdī šķidrā metāls tiek pakļauts spēcīgai bīdes plūsmai un argona burbuļi tiek sadalīti mazākos. Plūsmu bezkontakta veidā rada rotējošs PM rotors [50]. Atkarībā no magnēta rotora veida un lieluma kamerā var radīt dažādu Lorenca spēku formu un plūsmas veidus, taču visizteiktākā plūsma tiek radīta kā šķidrā metāla rotācija. Plūsma ir ļoti turbulenta, jo spēks ir lielāks tilpuma apakšā - tuvāk magnētiem. Argonu caur mazām caurulēm kamerā ievada nelielā attālumā no simetrijas ass. Kad reģionā ar nepieciešamo bīdes ātrumu un turbulenci tiek ievadīta inerta gāze, notiek degazācijas process, un mazi argona burbuļi notver ūdeņradi un izvada to no šķidrā metāla tilpuma uz virsmas. Viens no šīs ierīces ieguvumiem ir tas, ka plūsma tiek ierosināta bez kustīgām detaļām šķidrā metāla vidē. Izstrādāto tehnoloģiju var palielināt un integrēt ražošanas līnijā, kā arī pielāgot dažādiem alumīnija sakausējumiem, kā arī citiem metāliem un sakausējumiem, piemēram, titāna alumīnīdam [51].



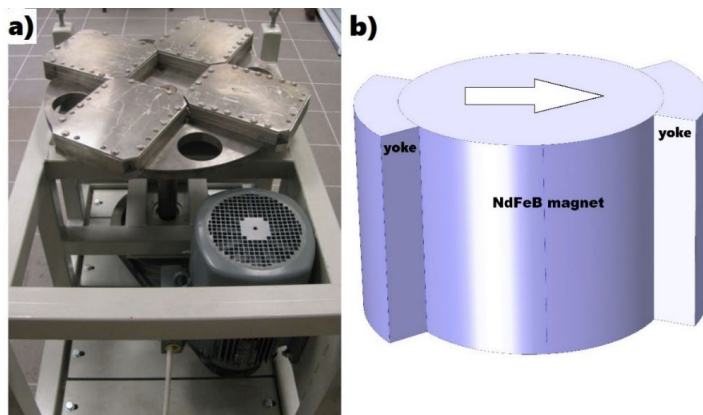
5.1. att. a) Klasiskais degazācijas process b) Jaunās degazācijas ierīces shēma.

### 5.1.1. Eksperimentālā ierīce

Lai demonstrētu ierosinātās degazācijas ierīces darbības principu, tika izstrādāta eksperimentālā iekārta un veikti eksperimenti. Viens no lielākajiem izaicinājumiem bija fakts, ka šķidrā alumīnija atrodas ugunsizturīgu materiālu konteineros, kuriem parasti ir biezas sienas labākai siltumizolācijai. Tas rada grūtības, jo pastāvīgo magnētu radītais magnētiskais lauks strauji samazinās palielinoties attālumam. Degazācijas iekārtai tika izveidots PM rotors, kas padara plūsmas inducēšanu šķidrā metālā pēc iespējas vienkāršāku.

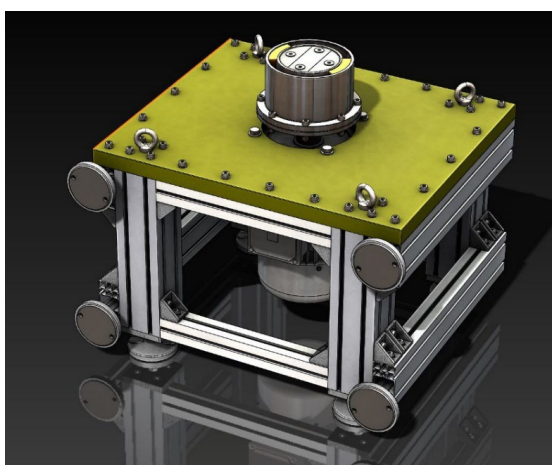
5.2. attēlā ir salīdzināti divi dažādi PM rotoru modeļi, kurus varētu izmantot. 5.2. a) attēlā parādīts cilindriskā elektromagnētiskā sūkņa [52] rotors, kurā uz dzelzs plāksnes ir novietoti

vairāki magnēta polu pāri. 5.2. b) attēlā parādīta koncepcija, izmantojot vienu pastāvīgā magnēta cilindru. Dzelzs jūgus magnetizācijas virzienā var izmantot, lai palielinātu lauka iespiešanās attālumu degazācijas iekārtā. Skaitliskās simulācijas un analītiskais risinājums rāda, ka pašreizējam uzdevumam labāk ir izmantot vienu pastāvīgā magnēta cilindru, jo šķidrā metāla kamera ir novietota tālu no magnēta virsmas un magnēta diametram jābūt pēc iespējas mazākam, jo ir grūti izgatavot lielu un plānu sienu alumīnija kamerā.



5.2. att. Divu dažādu pastāvīgā magnēta rotora konstrukciju salīdzinājums: a) četri taisnstūrveida magnēta poli uz magnētiska tērauda plāksnes; b) cilindrisks magnēts ar jūgiem magnētiskās plūsmas optimizēšanai.

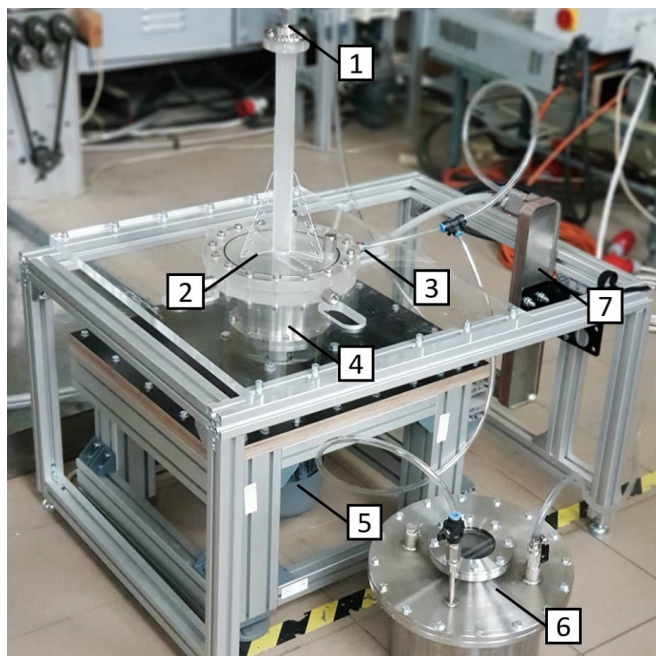
Eksperimentālā ierīce tika konstruēta priekš kameras ar iekšējo rādiusu  $R = 150$  mm un biezumu  $d = 20$  mm. NdFeB magnēta rotora diametrs bija 120 mm un augstums 100 mm. 20 mm biezi tērauda jūga segmenti ( $60^\circ$ ) tika novietoti pretējās magnēta pusēs. PM rotora ierīces 3D modelis parādīts 5.3. attēlā.



5.3. att. PM rotora 3D datormodelis.



Minimālais iespējamais attālums starp magnētu un šķidrā alumīnija apakšu tika izveidots 35 mm lielumā. Izgatavota degazācijas ierīce parādīta 5.4. attēlā. Ar cipariem attēlā atzīmētas ierīces galvenās sastāvdaļas. 1 – centrālā kolonna pa kuru novadīt gāzi; 2 – degazācijas tilpne; 3 – šķidrā metāla ievads; 4 – PM rotors; 5 – motors PM rotora piedziņai; 6 – šķidrā metāla uzglabāšanas konteineris; 7 – siltummainis.



5.4. att. Eksperimentālā iekārta.

### 5.1.2. Skaitliskais modelis

Magnētiskā lauka sadalījums ap magnēta rotoru tika aprēķināts ar 3D *Comsol* modeli. Salīdzinājums ar tērauda jūgiem un bez tiem parādīts 5.5. a), b), c) attēlā. Magnētiskā lauka sadalījums pa šķidrā metāla slāņa vidējo plakni (ar jūgiem) ir parādīts 5.5. d) attēlā. Jūgi palielina magnētisko lauku par aptuveni 20%, bet ieguvums ir arī efektīvā magnēta rādiusa palielināšana. Magnētiskais lauks 0,12 T lielumā ir novietots līnijā pa šķidrā metāla slāņa diametru.

Šķidrā metāla kolonnā cilindriskā traukā analizējuši vairāki autori [53], [54]. Lai panāktu pietiekamu plūsmas intensitāti degazēšanai, magnēta rotoru rotē ar vismaz 40 apgriezieniem minūtē. Hartmaņa skaitlis  $Ha$  (vienādojums (5.1)) ir saistīts ar attiecību starp elektromagnētiskajiem un viskozajiem spēkiem. Lorenca spēku pret inerci raksturo magnētiskās mijiedarbības parametrs  $N$  (vienādojums (5.2)). Mainīgā magnētiskā lauka raksturošanai tiek noteikts magnētiskais Reinoldsa skaitlis  $Rm$  (vienādojums (5.2)), kas parāda inducētā magnētiskā lauka un skinefeka nozīmīgumu.

$$Ha = BR \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}} \quad (5.1)$$

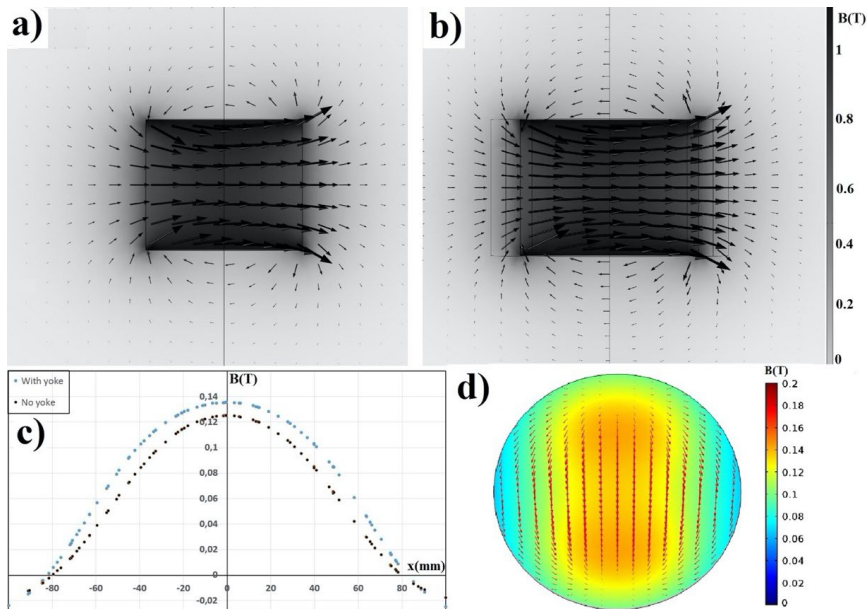
$$N = \frac{\sigma B^2 R}{\rho u}, \quad (5.2)$$

$$Re = \mu \sigma u R, \quad (5.3)$$

kur  $\sigma$  ir elektrovadītspēja,  $\mu$  ir dinamiskā viskozitāte,  $\rho$  ir blīvums. Izmantojot konstrukcijas parametrus un šķidrā alumīnija īpašības, tiek iegūts  $Ha = 200$ ,  $N = 1$  un  $R_m = 0,3$ . Šāda parametru kombinācija nozīmē, ka dominējošie spēki ir elektromagnētiski un inerciāli spēki, un tiem ir ievērojams skinefekts. Lorenca spēkam galvenokārt ir azimutālā sastāvdaļa, kas ir daudz lielāka šķidrā metāla kameras centra tuvumā. Vienkāršu analītisko novērtējumu var veikt, līdzsvarojot viskozos un elektromagnētiskos spēkus šķidrā metālā:

$$u = BR \sqrt{\frac{\sigma f}{\rho}}, \quad (5.4)$$

šķīdram alumīnijam šis novērtējums dod aptuvenu šķidrā metāla griešanās ātrumu 2 m/s.



5.5. att. Magnētiskā lauka indukcija: a) cilindra magnēts; b) cilindru magnēts ar jūgiem; c) B vertikālā komponenta salīdzinājums šķidrā metāla tilpuma vidējā plaknē; d) lauka sadalījums šķidrā metāla tilpuma vidējā plaknē.

### 5.1.3. Secinājumi

1. Analītiskie novērtējumi un skaitliskie aprēķini rāda, ka šī konstrukcija spēj radīt pietiekamu šķidrā alumīnija plūsmu kamerā, lai veiktu degazāciju.

2. Piedāvātā elektromagnētiskā sistēma ir vienkāršāka un ilgtspējīgāka kā iegremdētā rotora degazācijas ierīce, jo galvenās rotējošās detaļas atrodas ārpus šķidrā metāla, un remontdarbi un modifikācijas ir vieglāki.

## 5.2. Modeļa eksperiments izkausēta metāla temperatūras homogenizācijai ar rotējošu pastāvīgo magnētu

Lai iegūtu vienmērīgu šķidra metāla kausējuma termisko sadalījumu, piemēram, alumīnija krāsnīs, sajaukšanu var nodrošināt ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem. Rotējošais pastāvīgais magnēts ģenerē magnētisko lauku, kas inducē tilpuma spēku tuvējā šķidrā metālā. 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 konteinerā, kurš piepildīts ar GaInSn eitektisko sakausējumu un cilindrisku NdFeB pastāvīgo magnētu, kas novietots pie sānu sienas. Tika veikta parametriska skaitlisko eksperimentu sērija mainot magnēta slīpuma leņķi, lai atrastu visefektīvāko pozīciju, kurā var visātrāk sasniegt termisko līdzsvaru.

Metālurģijā 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 vienveidīgam kristalizācijas rezultātam [55], [56]. Bezkontakta elektromagnētiskās sajaukšanas metodes arvien vairāk tiek izmantotas kaut gan tās ir dārgākas, jo atļauj nepārtrauktu maisīšanu bez nepieciešamības atvērt krāsni un prasa minimālu apkopi [55]–[57]. Maiņstrāvas induktori parasti tiek izmantoti, lai radītu skrejošu vai rotējošu magnētisko lauku, kas ir nepieciešams nosacījums, lai izraisītu plūsmu elektriski vadošā šķidrūmā. Omiskā pretestība maiņstrāvas induktora tinumos rada ievērojamus jaudas zudumus siltuma forma. Līdz ar to šo metodi var uzskatīt par neefektīvu lielā enerģijas patēriņa dēļ [55], [56], [58], [59]. 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, kuri tiek inducēti šķidrā metālā. Neskatoties uz to, ir veikti salīdzinoši maz pētījumu, atstājot plašas iespējas jaunu pielietojumu radīšanai [60], [61].

Tikai pietiekami lielas un speciāli uzbūvētas PM sistēmas var radīt magnētisko lauku, kas var nodrošināt lielas nemagnētiskas spraugas, kādas ir izplatītas metalurģijas pielietojumos [62]. Rūpnieciskās alumīnija kausēšanas krāsnīs bieži tiek izmantoti gāzes degļi, kas atrodas kausēšanas kameras augšpusē. Sildīšana no augšas uz leju rada stabilu temperatūras gradientu kausējuma iekšpusē. Tātad, lai panāktu iegrimušās cietās frakcijas izkuššanu, virsējie slāņi tiek pārkarsēti. Tas noved pie palielinātas oksidācijas un materiāla un enerģijas zaudējumiem [57].

Kausējuma temperatūras un sastāva segregācijas rezultātā var tikt negatīvi ietekmēti kristalizācijas zonas ietilpības apstākļi, īpaši, ja kausēšanas zona ir tieši savienota ar kristalizācijas iekārtu. Ir pierādīts, ka PM radītā plūsma var radikāli ietekmēt lokālos temperatūras gradientus pie sacietēšanas frontes, kā arī dendrītu veidošanās mikrostruktūru [63], [64].

Ņemot vērā homogenizācijas nozīmi, ir nepieciešams atrast visus parametrus, kas ietekmē procesu un efektīvus līdzekļus tās kontrolei. Tas ļautu arī izstrādāt elektromagnētiskās ierīces šādiem nolūkiem un piemērotā izmērā, neradot risku, ka tās nedarbosies vai nebūs rentablas. Bojarevičs un Beinerts [62] radīja analītisko izteiksmi tipiskās inducētās plūsmas ātruma aprēķināšanai, ko var salīdzināt ar konteineru izmēriem, lai raksturotu kausējuma sajaukšanas efektivitāti. I.Granta [65] pētījums parādīja, ka ar raksturīgo plūsmas ātrumu vien nepietiek, lai aprakstītu sajaukšanos tīģelī, un ka rotējošā magnēta orientācija arī ir svarīga, jo tā ietekmē turbulento svārstību amplitūdu. Eksperimentāla šķidrā metāla plūsmas mērīšana pati par sevi ir izaicinājums, jo metāli ir gaismai necaurredzami. Visbiežāk izmantotās metodes citu starpā ietver ultraskaņas Doplera metodi [66], [67], neitronu radiogrāfiju un daļiņu attēlu ātrumveidošanas metodi [68]–[72]. Tiešāka pieeja termiskās sajaukšanas un homogenizācijas izpētei ir iegūt telpisku temperatūras sadalījumu. Piemēram, izmantojot termohromatiskos šķīdros kristālus [73]. Izmantojot plānus šķidro kristālu pārklājumus, ir iespējams iegūt precīzus temperatūras mērījumus virs virsmas. Ir zināms, ka tiem ir īss reakcijas laiks, un krāsu maiņa ir atgriezeniska un atkārojama. Tos var pat krāsot uz virsmas, tāpēc šī metode ir plaši pielietojama.

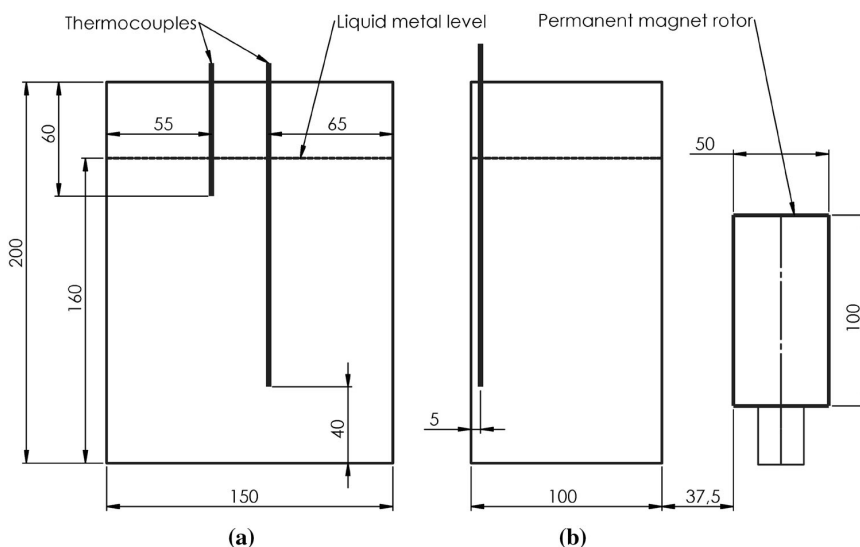
Daži pētījumi ir veikti izmantojot termiskās attēlveidošanas kameras lai iegūtu dažādus ātruma laukus šķidrums. [74], [75] Parasti izpētes objekts tiek filmēts tieši ar termokameru. Tas nederētu šķidrām metāliem, jo tie ir ļoti atstarojoši. Pētījuma gaitā netika atrasta neviena cita publikācija, kas aprakstītu šķidra metāla temperatūras mērīšanu caur cietu sienu, tāpēc šī tiek uzskatīta par jaunu metodi temperatūras izpētei. Skaitliskie modeļi piedāvā citu veidu, kā iegūt ieskatu EM inducētās plūsmas raksturlielumos un šķidro metālu maisīšanas efektivitātē [76]–[78]. Maisīšana ietekmi var raksturot ar dažādiem atvasinātiem fizikālajiem lielumiem - temperatūras homogenizācija, šķidrās frakcijas vai piemaisījumu homogenizācija. Nesen Dzelme et al. [79] ierosināja metodi, kurā izmanto PM maisītu šķidru metālu virsmas deformācijas, lai validētu skaitlisko modeli bez tiešas plūsmas ātrumu mērīšanas.

Šī darba mērķis bija trīskāršs. Pirmkārt, tika demonstrēts pastāvīgo magnētu pielietojums temperatūras homogenizācijai kausējumā. Otrkārt, tika ierosināts izmantot termiskās attēlveidošanas tehniku, lai uzņemtu siltuma konvekciju un pamatā esošo šķidrums plūsmu reālajā laikā. Šī metode ir neinvazīva, tā ir piemērojama augstām temperatūrām, tai nav nepieciešamas īpašas iekārtas un to var izmantot pat kristalizācijas novērošanai. Ierobežojošie faktori ir tādi, ka vienīgā pieejamā informācija nāk no virsmas, materiālu atstarojošās īpašības bieži ir sliktas vai nezināmas, un precīzai termokameras kalibrēšanai ir nepieciešamas zināšanas par eksperimenta apstākļiem. Papildus tam, šķidram metālam veidojas oksīda slānis, kas palielina virsmas emisijas spēju [80]. Lai gan tas var būt sarežģīts uzdevums izmērīt emisijas spēju ar augstu precizitāti, ir apsvērti citi temperatūras mērījumu paņēmieni, piemēram, izmantojot divu krāsu pirometru [81].

No otras puses, zemas temperatūras kausējumiem, piemēram, GaInSn, kas tika izmantots šajā modeļa eksperimentā, nav ievērojama oksīda slāņa, kas būtiski palielinātu virsmas emisijas spēju. Tā vietā virsma ir ļoti atstarojoša, kas traucē tiešiem temperatūras mērījumiem ar infrasarkanu kameru. To var atrisināt, uz konteineru sienām uzklājot mazāk atstarojošu materiālu. Infrasarkanu kameru var kalibrēt, izmantojot termopāru mērījumus. Visbeidzot, tika apstiprināts skaitliskais modelis, salīdzinot temperatūras homogenizācijas laikus dažādām pastāvīgo magnētu konfigurācijām.

### 5.2.1. Eksperimentālā ierīce

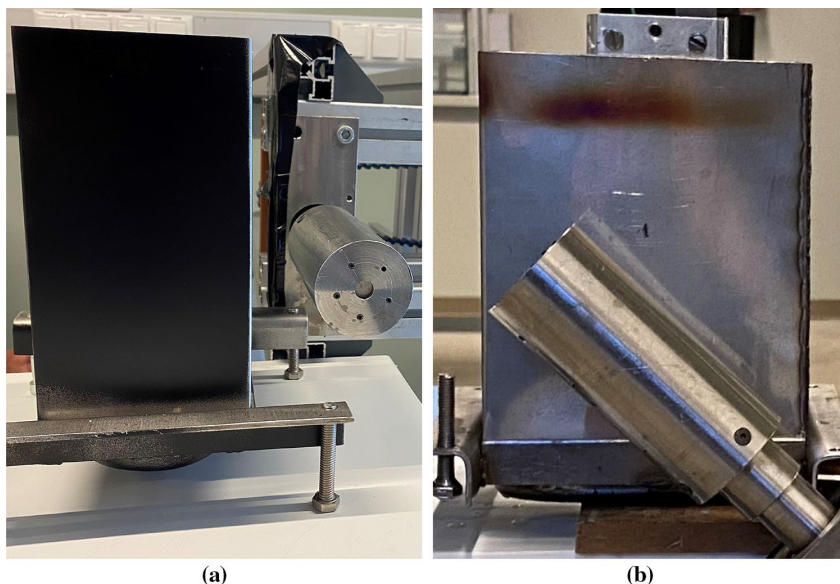
Eksperimentā tika izmantots nerūsējošā tērauda konteiners ar iekšējiem izmēriem - 0,15 m × 0,1 m × 0,2 m un sienu biezumu 0,5 mm (5.6. attēls). Tas no ārpuses tika nokrāsots matēti melnā krāsā ar aerosolu, lai palielinātu sienas izstarojuma koeficientu ( $\epsilon$ ). Ņemot vērā nezināmo lielumu skaitu eksperimentā ir saprātīgi pieņemt konteineru sienu starojamību tuvu absolūti melnam ķermenim, proti,  $\epsilon = 1$ . Infrasarkanais konteineru sienu starojums tika reģistrēts ar termokameru un tika aprēķināta temperatūra pieņemot melnā ķermeņa starojumu.



5.6. att. Modeļa skice: a) Skats no priekšpuses; b) Skats no sāna.

Iepriekš līdzīgs eksperiments ir veiksmīgi veikts gaisa plūsmas mērīšanai, kur izstarojošajai sienai tika izmantoti plāni materiāli ar nelielu termisko masu [82]. Šajā pētījumā tiek piedāvāta līdzīga metode zemas temperatūras kausēta metāla temperatūras mērīšanai. Tvertne tika piepildīta ar GaInSn eitektisko sakausējumu. Eksperimentālā ierīce sastāvēja no rotējoša pastāvīgā magnēta, kas tika novietots konteineru 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 konteineru ārējo sienu un pastāvīgā magnēta rotora ārējo sienu bija 0,0375 m. Lai nodrošinātu atskaites

mērījumus, šķidrā metālā tika ievietoti divi termopāri. Maisītāja shematiskais modelis ir parādīts 5.7. attēlā. Tika izmantoti K tipa termopāri ar precizitāti  $\pm 0,1$  °C.

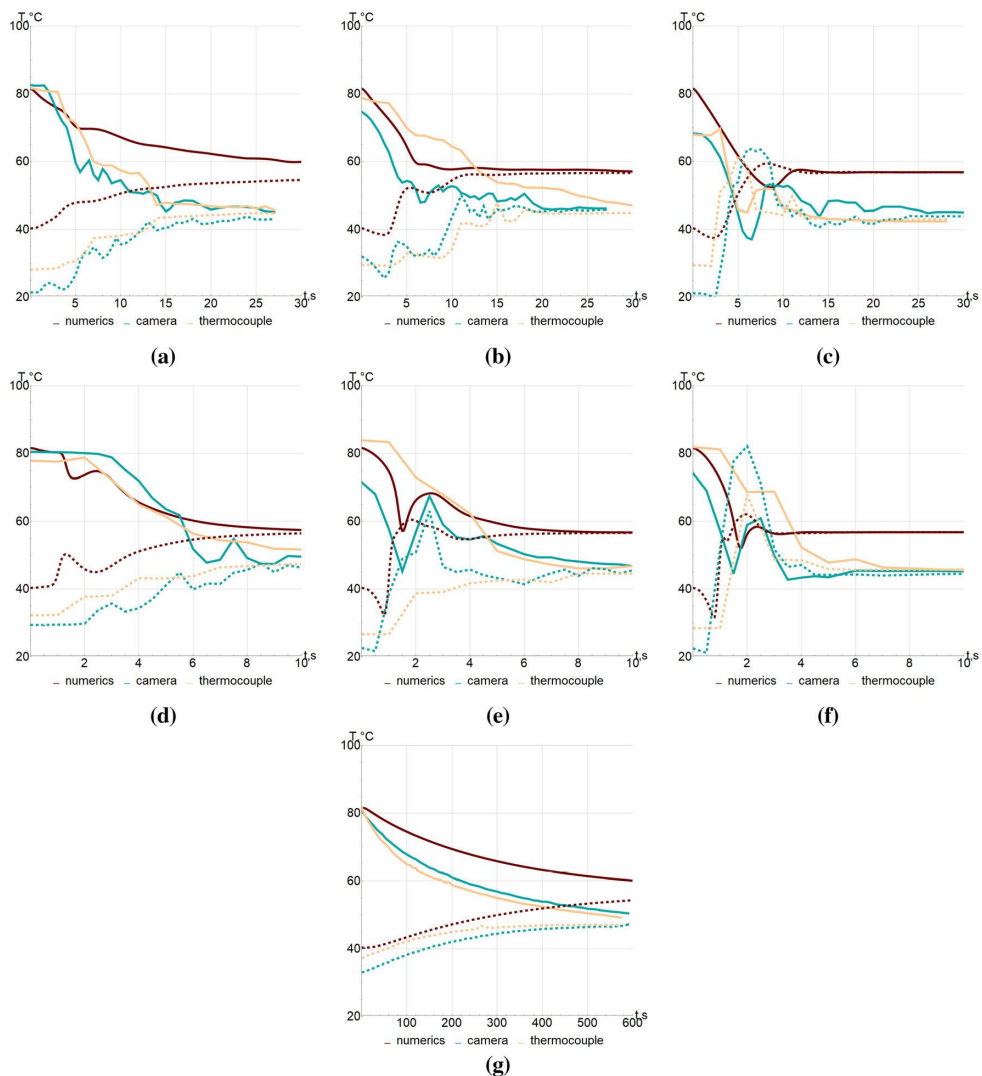


5.7. att. Eksperimentālais uzstādījums, kurā parādīta melnā konteina sēnu siena un blakus esošā magnēta pozīcija: (a) Horizontāli; b) 45 grādu slīpuma leņķī.

Eksperimenta procedūra bija sekojoša. Vispirms GaInSn eitektiskais sakausējums tika atdzesēts līdz 22 °C, ievietojot metāla trauku auksta ūdens baseinā. 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 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 infrasarkanajam sensoram ir 640x480 pikseļi, un to precizitāte ir  $\pm 1$  °C. Viena konteina puse tika filmēta ar infrasarkanu kameru līdz termisko līdzsvaru novēroja gan termokamera, gan termopāri, un tajā brīdī eksperiments tika pārtraukts. Pastāvīgais magnēts vienmēr atradās konteina platākās malas tuvumā, bet termiskās kameras filmēšana tika veikta gan platākajai, gan šaurākajai pusei secīgos eksperimentos. Tā kā konteina siena ir izgatavota no plānas nerūsējošā tērauda loksnes, 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 °.

### 5.2.2. Rezultāti un secinājumi

Abu mērinstrumentu, t.i., infrasarkanās kameras un termopāru, rezultāti tiek 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 5.8. attēlā. Kvantitatīvās salīdzināšanas nolūkā ir sniegts gadījums bez PM mijiedarbības. Temperatūras sadalījuma momentuzņēmumi no infrasarkanā kameru ierakstiem un skaitliskajiem aprēķiniem nodrošina kvalitatīvu eksperimenta un skaitliskā modeļa salīdzinājumu, skatīt 5.9, 5.10 un 5.11 attēlu. 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.



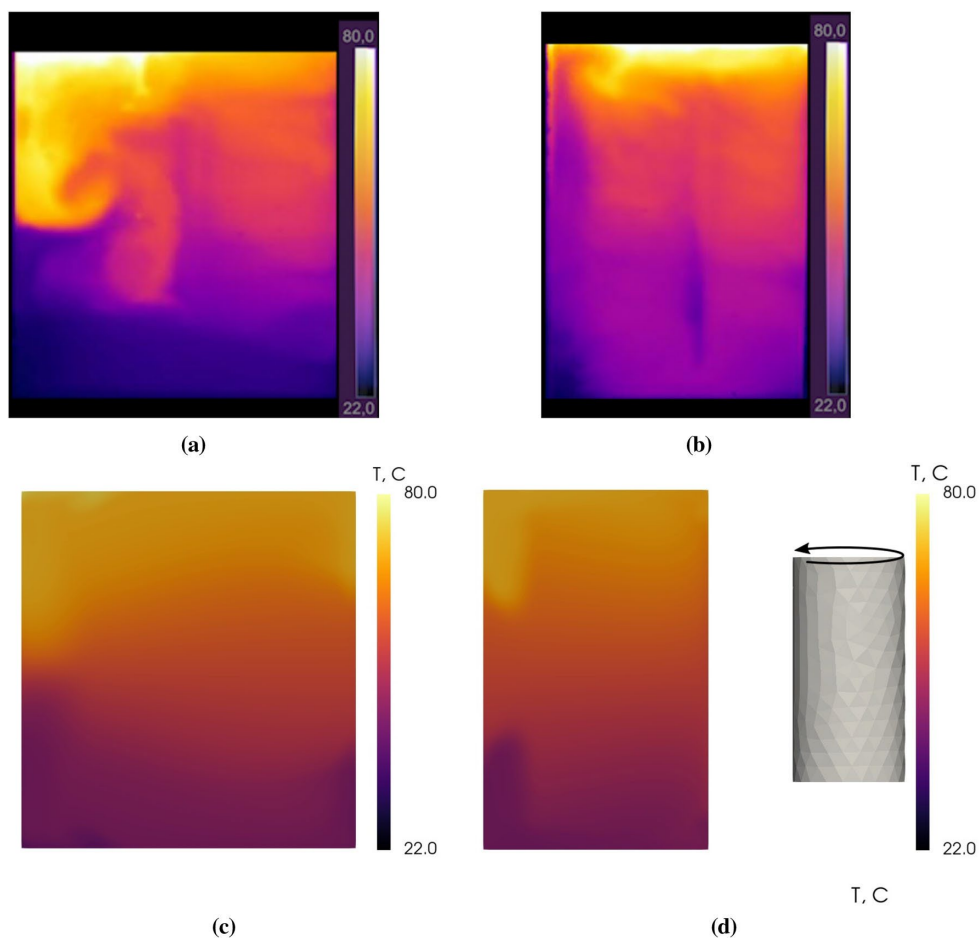
5.8. att. Temperatūras salīdzinājums pie rotācijas frekvences 1,1 Hz (a-c), 7,6 Hz (d-f) un bez magnēta (g). Augšējā zonde un apakšējā zonde ir apzīmētas attiecīgi ar nepārtrauktām un pārtrauktām līnijām. Magnēta orientācija: (a, d) vertikāli; (b, e) 45 grādi; (c, f) horizontāli.

Termokameras neapstrādātie dati nav kalibrēti. Kalibrēšanai tika izmantoti termopāra mērījumi eksperimenta beigās, lai izvairītos no svārstībām, kad mērījums var tikt aizkavēts vai citādi ietekmēts. Kalibrēšana tika veikta pēc formulas  $T_{new} = (T_{old} - T_{cam\_mean\_ref}) * k_{calib} + T_{th\_mean\_ref}$ , kur  $T_{old}$  un  $T_{new}$  ir termokameras temperatūras dati attiecīgi pirms un pēc kalibrēšanas. Kalibrēšanas koeficienti tika aprēķināti tikai no temperatūras datiem katra eksperimenta pēdējā laika punktā.  $T_{cam\_mean\_ref}$  ir vidējā temperatūra no kameras rādījumiem visu eksperimentu beigās.  $k_{calib}$  ir termopāra rādījumu vidējā novirze dalīta ar



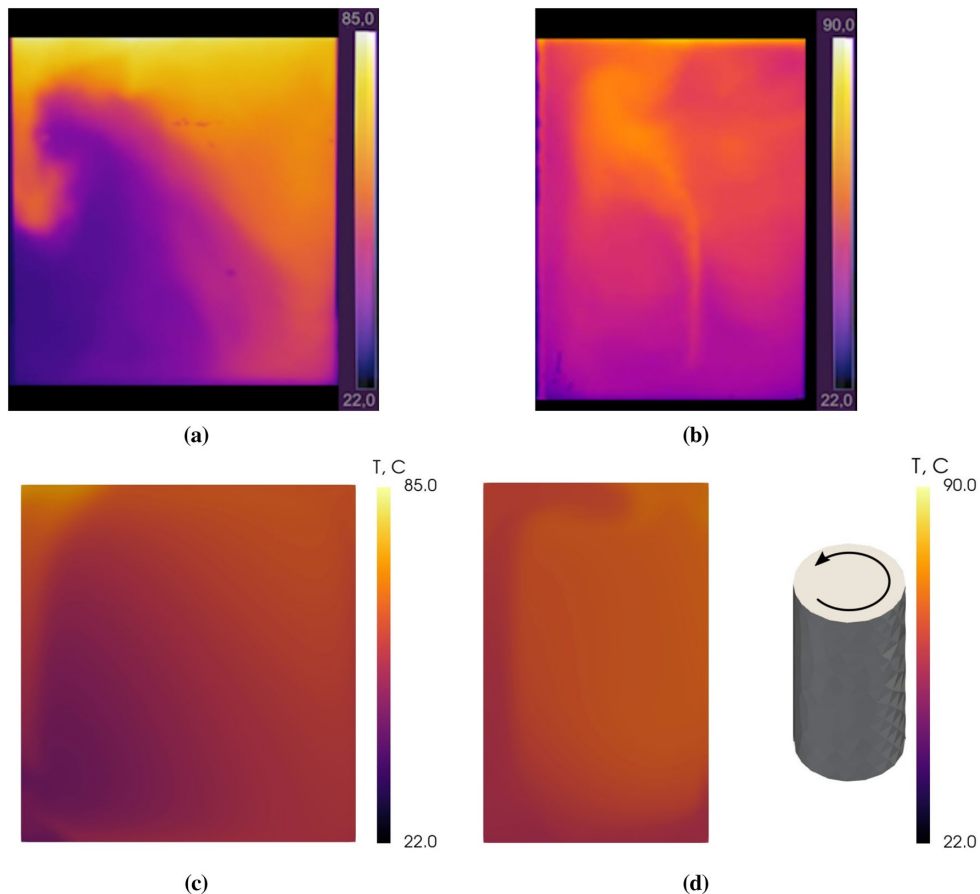
kameras rādījumu vidējo novirzi.  $T_{th\_mean\_ref}$  ir termopāra rādījumu vidējā temperatūra, kas aprēķināta vidējojot visu eksperimentu datus.

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. Eksperimentos siltums no gāzes degļa vēl nebija sasniedzis apakšējo zondes dziļuma līmeni, pirms sāka sajaukšanu, atstājot apakšējos slāņus istabas temperatūrā. Skaitliskajiem rezultātiem kopumā ir tendence uz augstāku galīgo vidējo temperatūru nekā eksperimentālajiem rezultātiem. Daļēji tas ir saistīts ar sākotnējo vidējo šķidrā metāla temperatūru un daļēji tāpēc, ka skaitliskais modelis izmanto adiabātiskus sienas robežnosacījumus temperatūrai pretēji eksperimentam. Tomēr tas nenozīmē, ka siltuma zudumi ietekmē novēroto temperatūras homogenizācijas procesu. Kopējos siltuma zudumus var novērtēt, pamatojoties uz eksperimentāli izmērītās sākotnējās un galīgās vidējās temperatūras starpību (5.8. attēls). Lai novērtētu siltuma zudumu nozīmi, var salīdzināt eksperimenta sākotnējo un beigu starpību starp šķidrums augšējo un apakšējo temperatūru. Piemēram, 5.8.f attēlā sākotnējie termopāra mērījumi ir attiecīgi 35,7 °C un 85,2 °C apakšējai un augšējai zondei. Pieņemot lineāru temperatūras stratifikāciju, vidējā temperatūra ir  $(35,7 \cdot 0,6 + 85,2 \cdot 0,4) = 55,5$  °C. Pēc 10 s termopāra rādījumi ir attiecīgi 54,5 °C un 54,5 °C apakšējai un augšējai zondei. Vidējā temperatūra eksperimenta beigās ir  $(53,4 \cdot 0,6 + 54,5 \cdot 0,4) = 54,06$  °C. Līdz ar to aprēķins liecina, ka vidējā temperatūra konteinerā ir pazeminājusies par  $(55,5 - 54,06) = 1,44$  °C. Vidējais temperatūras kritums ir tikai 2,9 % no sākotnējās temperatūras starpības. Tika pētīta temperatūras izmaiņa, kas bija  $(85,2 - 35,7) = 49,5$  °C. Aprēķins svārstās no 3–9 % atkarībā no mērījuma. Tomēr var secināt, ka temperatūras izmaiņas siltuma zudumu dēļ ir nelielas, salīdzinot ar piespiedu konvekciju.



5.9. att. Sānu sienas temperatūras sadalījums fizikālajā eksperimentā un skaitliskajā aprēķinā pie PM rotācijas frekvences 1.1 Hz, kad magnēts novietots vertikāli: a) fizikālais eksperiments – platākā puse; b) fizikālais eksperiments – šaurākā puse; c) skaitliskais aprēķins – platākā puse; d) skaitliskais aprēķins – šaurākā puse.

Saskaņa starp temperatūras pārdales dinamiku ir nedaudz labāka starp skaitlisko modeli un termokameru. Tas varētu būt tāpēc, ka termopāri atrodas 5 mm attālumā no sienas, kā arī tāpēc, ka termopāra korpusam ir zināma termiskā inerce, kas var samazināt jutību un izraisīt mērījumu aizkavēšanos. 5.8. attēlā var novērot, kad magnēts ir novietots vertikāli (5.8 attēlā a) un d)), temperatūras līknei ir mazāk zemas frekvences svārstību, salīdzinot ar citiem magnētu novietojumiem. Tas, visticamāk, izriet no ģenerētā plūsmas virziena attiecībā pret sākotnējo temperatūras gradientu tvertnē. Vertikālā magnēta orientācija virza blakus esošo šķidrumu ar dažādām temperatūrām paralēli viens otram, kā rezultātā notiek lēna sajaukšanās. No otras puses, horizontāli vai slīpi orientēts magnēts iespiež karsta šķidruma zonas aukstajos reģionos, lokāli radot pēkšņas temperatūras izmaiņas. Pastāvīgā magnēta rotācijas frekvences palielināšana līdz 7,6 Hz (5.8 attēlā d)–f)) ievērojami samazina termiskā līdzsvara sasniegšanas laiku.



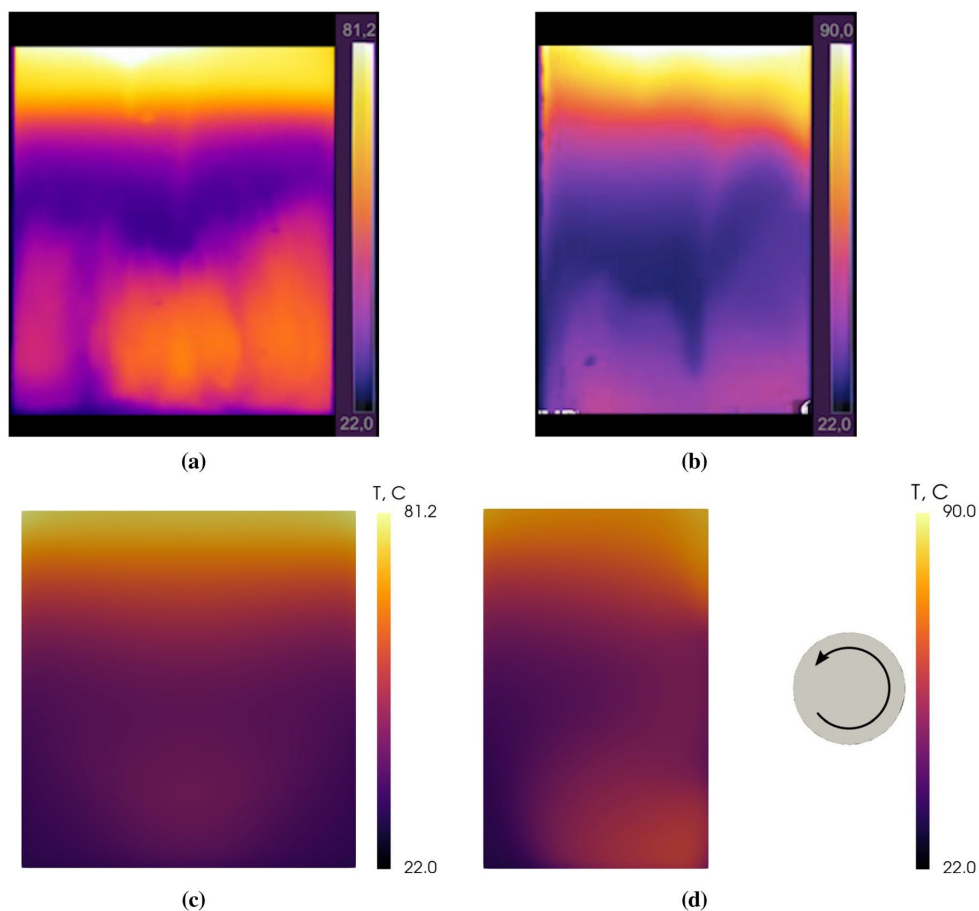
5.10. att. Sānu sienas temperatūras sadalījums fizikālajā eksperimentā un skaitliskajā aprēķinā pie PM rotācijas frekvences 1,1 Hz, kad magnēts novietots 45 grādu leņķī: a) fizikālais eksperiments – platākā puse; b) fizikālais eksperiments – šaurākā puse; c) skaitliskais aprēķins – platākā puse; d) skaitliskais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

Tomēr magnēta orientācija arī ir ļoti svarīgs parametrs, kas jāņem vērā. Ar 7,6 Hz rotācijas frekvenci un vertikālo magnēta orientāciju termiskais līdzsvars tiek sasniegts līdzīgā laika posmā kā ar daudz zemāku 1,1 Hz rotācijas frekvenci, bet horizontālo magnēta orientāciju. Sajaukšanas ar PM palīdzību ietekme uz temperatūras homogenizāciju ir skaidri redzama, kad aplūkojot tīri difūzu procesu bez magnēta mijiedarbības (skatīt 5.8. g) attēlu) un salīdzinot to ar piespiedu konvekcijas procesiem. Tīra temperatūras difūzija aizņem gandrīz 100 reizes ilgāku laiku nekā aktīva sajaukšana.

Salīdzinot temperatūras sadalījumu uz tvertnes sienām pēc aptuveni 4 sekunžu magnēta rotācijas (5.9., 5.10. un 5.11. attēls), vēlreiz redzams, ka vertikālā magnēta orientācija ir vismazāk efektīva. Jāņem vērā, ka eksperimentos magnēta paātrināšanās dēļ pastāv zināma nenoteiktība laika noteikšanai. Ja tiek izmantota vertikālā magnēta orientācija, temperatūras sadalījums pie 4 sekunžu (5.9. attēls) atzīmes nav tālu no sākotnēji stratificētā šķidrums,

izmantojot 45 grādos noliekto (5.10. attēls) un horizontāli orientēto (5.11. attēls) iestatījumus, lielākas karstā šķidrums daļas jau ir sajaukušās ar auksto šķidrumu.

Ekspimentāli reģistrētais temperatūras sadalījums parāda liela mēroga plūsmas struktūras (5.10. a) un 5.11. a) attēls), kuras nav novērotas skaitliskajos aprēķinos. Integrālā temperatūras novirze 5.12. a) attēlā ir aprēķināta saskaņā ar (5.5), kur  $\bar{T}$  ir tilpuma vidējā temperatūra šķidrā metāla traukā un  $V_0$  ir tvertnes tilpums.

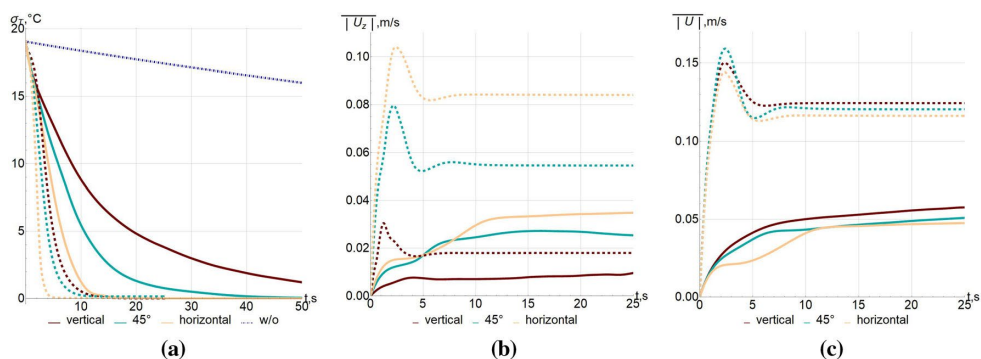


5.11. att. Sānu sienas temperatūras sadalījums fizikālajā eksperimentā un skaitliskajā aprēķinā pie PM rotācijas frekvences 1,1 Hz, ja magnēts novietots horizontāli: a) fizikālais eksperiments – plātākā mala; b) fizikālais eksperiments – šaurākā puse; c) skaitliskais aprēķins – plātākā puse; d) skaitliskais aprēķins – šaurākā puse.

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\int (T - \bar{T})^2 dV}{V_0}} \quad (5.5)$$

Pastāvīgā magnēta izmantošana šķidrā metāla sajaukšanai ievērojami samazina termiskā līdzsvara sasniegšanas laiku (skatīt 5.12. a) attēlu). Tomēr pastāv ievērojama efektivitātes atšķirība, kas ir atkarīga no magnēta orientācijas. Magnēta horizontālā orientācija ir visefektīvākā temperatūras novirzes izlīdzināšanai traukā gan pēc eksperimenta, gan skaitliskiem aprēķiniem, skatīt 5.8. attēlu un 5.12. attēlu a).

5.12. b) un c) attēlā ātruma lieluma un ātruma vertikālās komponentes absolūtās vērtības vidējais tilpums ir attēlots attiecīgi ar  $|\bar{U}|$  un  $|\bar{U}_z|$ .



5.12. att. Integrālās vērtības konteinerā: a) temperatūras novirze; b) ātruma vertikālās komponentes absolūtās vērtības vidējā vērtība; c) vidējā ātruma lielums. Rotācijas frekvences 1,1 Hz un 7,6 Hz ir attiecīgi apzīmētas ar nepārtrauktām un pārtrauktām līnijām.

Ātruma vidējā vērtība konteinerā var palīdzēt saprast, kāpēc horizontālā konfigurācija ir efektīvāka nekā vertikālā. Kamēr vidējais ātruma lielums konteinerā ir līdzīgs starp dažādām magnētu orientācijām, ātruma vertikālās komponentes absolūtās vērtības vidējā vērtība (5.12.c attēls) korelē ar temperatūras novirzes samazināšanos (5.12.a attēls). Šis rezultāts ne vienmēr nozīmē, ka horizontālā magnēta konfigurācija sniegs vislabākos rezultātus katrai krāsns ģeometrijai. Šeit horizontālais magnēts, visticamāk, ir labākā izvēle, jo tas rada vislielāko plūsmu temperatūras gradienta virzienā. Eksperimentā un aprēķinos netiek ņemtas vērā citas konteineru malu attiecības un magnēta novietojums netālu no citām konteineru malām. Tā kā rūpnieciskajām krāsnīm parasti ir atšķirīga ģeometrija, liela mēroga krāsns efektivitāti nevar tieši novērtēt no šī pētījuma rezultātiem. Neskatoties uz to, rezultāti ir ļoti daudzsoļi, un ir jāapsver papildu pētījumi, lai labāk novērtētu rotācijas PM efektivitāti temperatūras homogenizācijā rūpnieciskajās alumīnija krāsnīs.

### 5.2.3. Secinājumi

1. Eksperimentālais modelis veiksmīgi parādīja, ka nerūsējošā tērauda konteineri ar plānām sienām var izmantot kombinācijā ar termiskās attēlveidošanas kameru, lai novērotu dažādu temperatūru šķidrā metāla plūsmu.

2. Tika parādīts, ka rotējošais pastāvīgais magnēts krasi uzlabo laiku, kas nepieciešams, lai sasniegtu termodinamisko līdzsvaru šķidrā metāla tilpumā.

3. Eksperimentālie 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 eksperimentālo modeli, ņemot vērā tā ierobežojumus. Tas ļauj attīstīt skaitlisko modeli un mērogot to rūpnieciska izmēra modelim nākotnē.

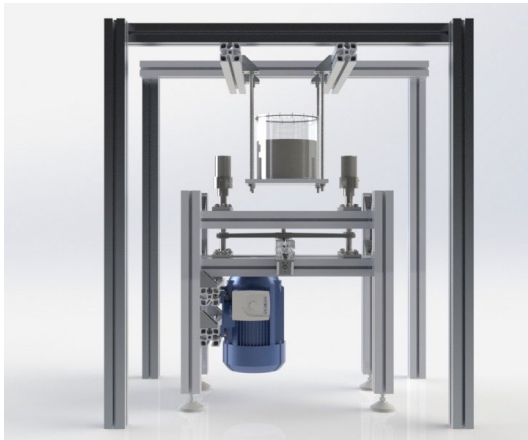
4. Eksperimentālo modeli var uzskatīt par veiksmīgu, jo tas parāda, ka viena dipola pastāvīgā magnēta maisītājs ir efektīvs risinājums termiskā līdzsvara sasniegšanai no augšas apsildāmās metāla kausēšanas krāsnīs.

Turpmākajos pētījumos tiešos temperatūras mērījumus varētu uzlabot, nomainot termopārus korpusos ar plāniem termopāra vadiem, kas tiktu novietoti tieši uz konteineru sienas. Tam vajadzētu uzlabot saskaņu starp dažādām mērīšanas metodēm.

### 5.3. 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 50 °C – 80 °C) [83]. Augsta virsmas temperatūra palielina virsmas oksidēšanos, kas palielina sārnū 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, degzācijai un kristalizācijas struktūras maiņai.

Divu cilindru maisītājs tika izveidots, lai izpētītu šķidra metāla plūsmu cilindriskā traukā, kad tam sānos novieto divus PM. Ierīce redzama 5.13. attēlā. Šīs iekārtas galvenie uzdevumi bija izpētīt kā radīt efektīvu šķidra metāla apmaisīšanu un daļiņu iemaisīšanu.



5.13. att. Eksperimentālās iekārtas datormodeļa attēls.

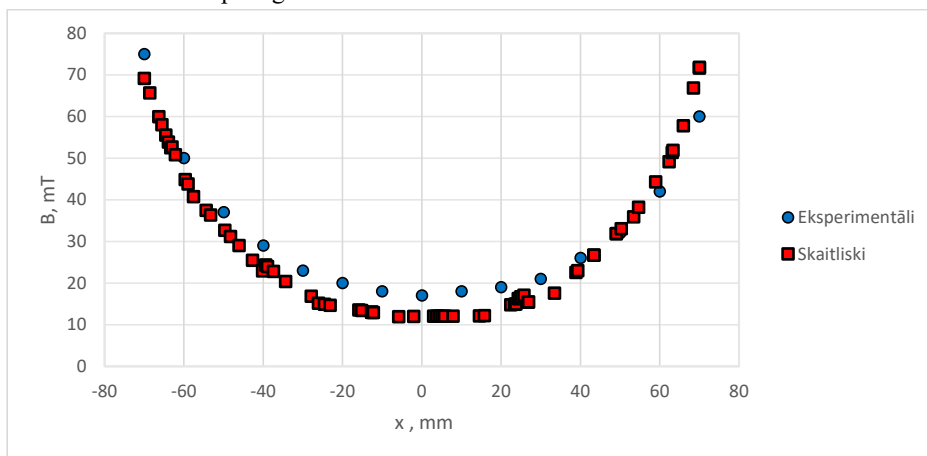
Sistēma sastāv no 2 galvenajām struktūrām. Centrālās iekārtas pamatā ir divi cilindriski PM, kuru rotācijas asis ir paralēlas. Magnēti atrodas nerūsējošā tērauda ietvaros, kuri ir nostiprināti uz cilindriskām asīm, kuras ir savienotas ar motoru (Siemens trīsfāžu motors ar jaudu 0,55 kW un maksimālo ātrumu 1440 apgr./min) ar zobsiksnu un zobsiksna rullīšu

palīdzību. Divi spriegošanas rullīši nodrošina adekvātu siksnas nospiegumu 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 pārnēsi.

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  $\theta$ . Magnētu sākotnējais magnetizācijas virziens savā starpā tiek apzīmēts ar  $\varphi$ . 5.13. attēlā redzama eksperimentālā iekārta. Šķidrā metāla traukam diametrs ir 130 mm, augstums 134 mm un tilpums  $V = 1,7$  l.

### 5.3.1. Magnētiskais lauks starp magnētiem

Magnētiskā lauka indukcija starp magnētiem, kad tie atrodas miera stāvoklī un ir vērsti vienā virzienā, svārstās no 18 mT konteinaera centrā līdz 75 mT konteinaera malās. Šīs vērtības nedaudz pārsniedz vai bija vienādas ar teorētiski aprēķinātajām vērtībām atkarībā no koordinātēm 5.14. attēlā. Magnētiskā lauka stiprums starp 2 magnētiem.  $D = 40$  mm  $H = 100$  mm. Attālums starp magnētu asīm 25 cm.



5.14. att. Magnētiskā lauka stiprums starp diviem pastāvīgajiem magnētiem.

### 5.3.2. Bezdimensionālie parametri

Ultraskaņas ātruma mērījumi tika veikti GaInSn sakausējuma eksperimentālajā ierīcē istabas temperatūrā un iegūtie rezultāti tika izmantoti mērogošanai dažādiem materiāliem un tīģeļa izmēriem. Modeļa eksperimentālā ierīce tika uzbūvēta 4,5 reizes mazāka kā plānotā reālajā mērogā. Analīzē tika ņemti vērā tādi bezdimensionālie lielumi kā Hartmaņa skaitlis  $Ha$ , magnētiskais Reynolds skaitlis  $R_m$ , kā arī skinefekts  $\delta$ . Skinefekts ierobežo maksimālo griešanās frekvenci. Ja  $\delta < R$ , leņķiskā rotācijas ātruma turpmākam palielinājumam nebūs lielas ietekmes. Šie kritēriji nosaka magnēta izmēru, lai sistēma darbotos efektīvi. Ideālā gadījumā vajadzētu sasniegt abus parametrus  $N$  un  $\Omega_d$ , taču PM materiāla paliekošā magnētiskās indukcijas izvēle bija ierobežota, tāpēc eksperimenti tika veikti ar prioritāti, lai saglabātu bezdimensionālās frekvences mērogu. Tabulā 5.1 ir parādīti eksperimentālās un

potenciālās reālā mēroga sistēmas galvenie parametri. Ja šie parametri ir līdzīgi, tad var sagaidīt līdzīgu spēka sadalījumu un plūsmas režīmus.

5.1. tabula

Galvenie eksperimentālās un reālā mēroga sistēmas parametri.

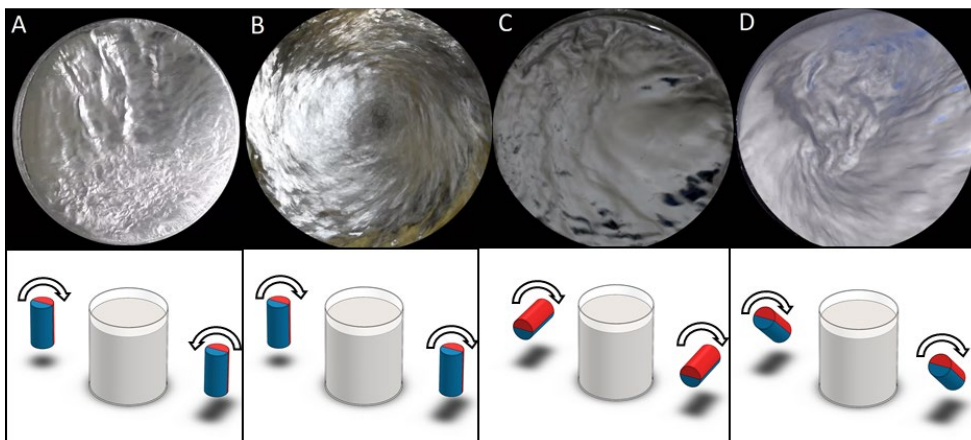
	$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$\sigma$ , S/m	$R$ , mm	$H$ , mm	$B$ , mT	$f$ , Hz	$N$	$\Omega_d$
GaInSn	6360	$3,3 \cdot 10^6$	70	130	20	2,9	0,0014	0,370
Sn-10%wt.Pb	7000	$2 \cdot 10^6$	30	100	50	10	0,0014	0,014
Aluminum	2400	$4 \cdot 10^6$	30	100	50	5	0,0211	0,177

### 5.3.3. Plūsmas veidi

Efektīvai maisīšanai ir svarīgs ne tikai plūsmas ātrums, bet arī plūsmas veids. Tika veikta plūsmas ātruma mērīšana ar Doplera sonogrāfiju. Magnētu rotācijas frekvence tika mainīta no 0,5 Hz līdz 19,2 Hz. Šī diapazona apakšējā robeža ir punkts, kurā sākās jebkādas izmērāmas un novērojamas kustības, un augšējā robeža ir vieta, kur plūsmas ātrumi bija lieli un skinefekts padarīja frekvences palielināšanu neefektīvu. Testi tika veikti 3 dažādos leņķos  $\theta = 0^\circ$  (vertikāli);  $\theta = 45^\circ$  (slīpi);  $\theta = 90^\circ$  (horizontāli). Visas konfigurācijas tika pārbaudītas vienlaikus ko-rotējošā un pret-rotējošā režīmā, lai novērotu un izmērītu dažādus plūsmas modeļus. Magnētu orientācija tika fiksēta attiecībā vienam pret otru eksperimenta sākumā. Tika pārbaudītas iepriekšminētās konfigurācijas ar fāzes nobīdi  $\phi = 0^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $180^\circ$ . Visi ātruma mērījumi tika veikti konteineru sienas vienā punktā 30 mm dziļumā, lai izvairītos no jebkādiem robežslāņiem. Mērķis bija atrast un izmērīt katra plūsmas veida raksturīgo ātrumu, tādēļ atkarībā no plūsmas veida tika reģistrēts tangenciālais vai azimutālais ātrums. 5.15. attēlā ir parādīta šķidrā metāla trauka brīvā virsma pie dažādām magnētu konfigurācijām un rotācijas virzieniem. A) gadījumā magnēti ir novietoti vertikāli ( $\theta = 0^\circ$ ) un to rotācijas virzieni ir pretēji. Šādā situācijā plūsma magnētu tuvumā ir vienā virzienā un izveidojas turbulenta pretplūsma trauka centrālajā daļā, kur veidojas plūsmas virzienu svārstības. B) gadījumā magnēti ir novietoti vertikāli ( $\theta = 0^\circ$ ), bet šoreiz to rotācijas virzieni ir vienādi. Rezultātā izveidojas izteikts virpulis, kura rotācijas virziens ir pretējs magnētu rotācijas virzienam. C) gadījumā magnētu simetrijas ass ir perpendikulāra traukam ( $\theta = 90^\circ$ ) un tiem ir vienāds rotācijas virziens. Šajā situācijā metāla plūsma vienā pusē ir vērsta uz leju, bet otrā pusē uz augšu. Tādējādi izveidojas turbulenta, apļveida plūsma.

D) gadījumā magnēti ir sagāzti līdz pusei starp horizontālo un vertikālo stāvokli ( $\theta = 45^\circ$ ) un rotē vienā virzienā. Šādi izveidojas rotējošs virpulis, līdzīgi kā B) gadījumā, bet tam ir arī vertikāla rotējoša plūsma.

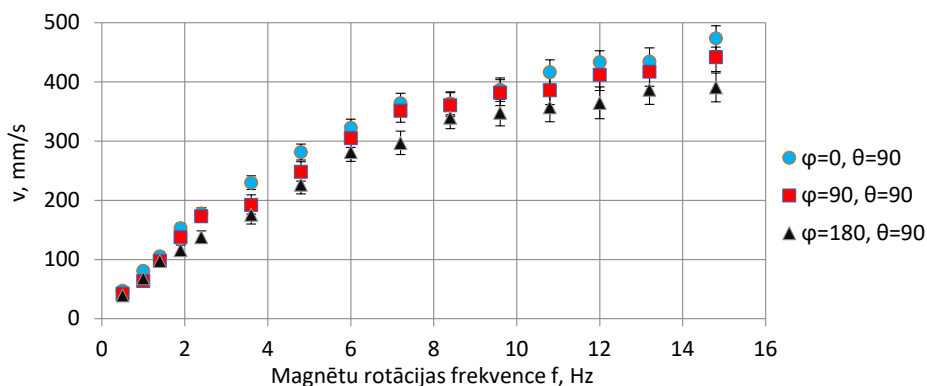




5.15. att. Četri raksturīgie plūsmas veidi, skats no augšas uz brīvo virsmu. A) Pret-rotācija,  $\theta = 0^\circ$ ; B) ko-rotācija,  $\theta = 0^\circ$ ; C) ko-rotācija,  $\theta = 90^\circ$ ; D) ko-rotācija,  $\theta = 45^\circ$ .

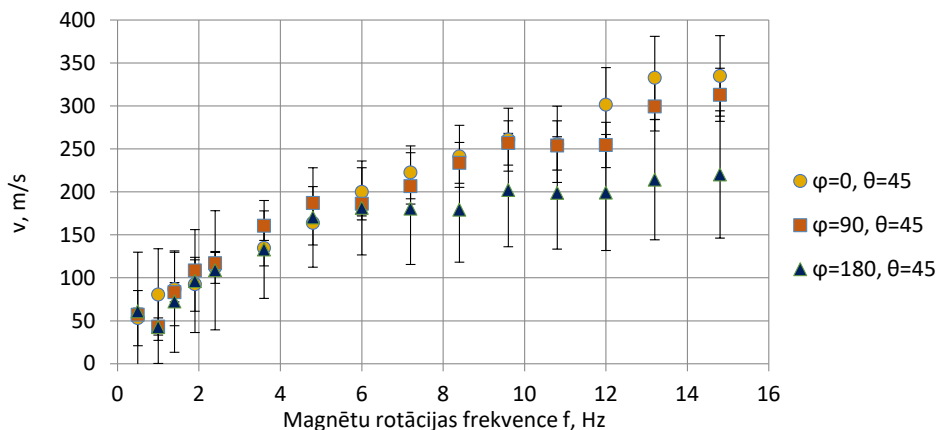
### 5.3.4. Plūsmas ātrumi

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



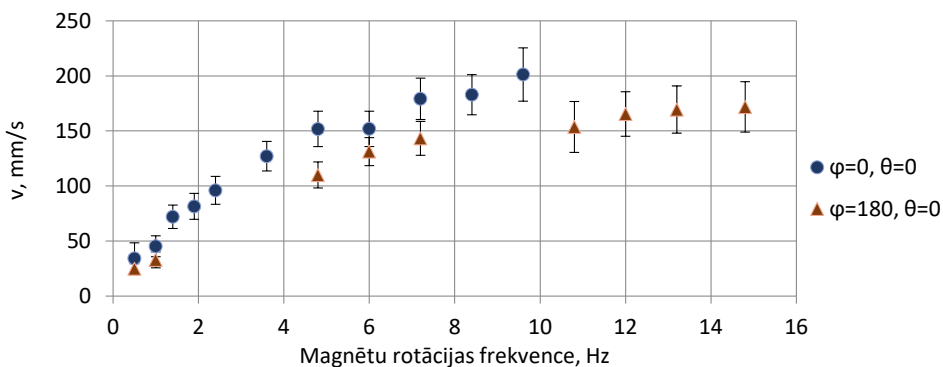
5.16. att. Plūsmas ātrums attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu (ko-rotācija).

5.17. attēlā parādīti nomērītie plūsmas ātrumi attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu pie dažādām fāzes nobīdēm  $\varphi$ , kad  $\theta = 45^\circ$ .



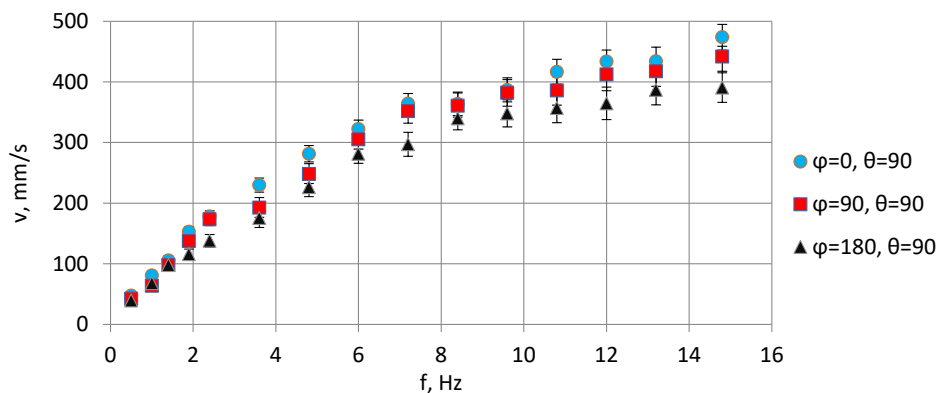
5.17. att. Plūsmas ātrums attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu (ko-rotācija).

5.18. attēlā parādīti nomērītie plūsmas ātrumi attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu pie dažādām fāzes nobīdēm  $\varphi$ , kad  $\theta = 0^\circ$ . Šajā režīmā novērojamas lielākas atšķirības starp dažādām fāzes nobīdēm līdz pat 35%.



5.18. att. Plūsmas ātrums attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu (ko-rotācija).

5.19. attēlā parādīti nomērītie plūsmas ātrumi attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu pie dažādām fāzes nobīdēm  $\varphi$ , kad  $\theta = 90^\circ$  un magnēti savā starpā ir pretēji rotējoši.



5.19. att. Plūsmas ātrums attiecībā pret magnētu rotācijas ātrumu (pret-rotācija)

### 5.3.5. Secinājumi

Tika parādīts, ka PM sistēmu var izmantot intensīvas kustības radīšanai šķidrā metāla tilpumā un patērējot nelielu elektroenerģijas daudzumu. 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.

1. Magnētiskā lauka eksperimentālie mērījumi labi sakrīt ar skaitliskā modeļa rezultātiem un parāda to, ka *Comsol Multiphysics* var tikt lietots 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.

2. Neskatoties uz to, eksperimentāli parādīts, ka divu PM cilindru sistēmu var veiksmīgi izmantot šķidra metāla maisīšanai.

## 6. Kopsavilkums un 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 izvietojumus. 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 procesu 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.

## 7. Izmantotā literatūra

- [1] E. Albert and S. Leo, “refrigeration.” Google Patents, Nov. 11, 1930.
- [2] ABB AB, “Electromagnetic stirrers for aluminium furnaces - ABB Metallurgy Products (Products).” <https://new.abb.com/metals/abb-in-metals/offering/products/metallurgy-products/electromagnetic-stirrers-for-aluminium-furnaces> (accessed Apr. 02, 2023).
- [3] T. Kalniņš, *MHD sūkņi*. Izdevniecība “Zinātne,” 1969.
- [4] K. Matsuzaki, T. Shimizu, Y. Murakoshi, and K. Takahashi, “Evaluation of effects of stirring in a melting furnace for aluminum,” in *Light Metals 2011*, Springer, 2011, pp. 1199–1203.
- [5] A. P. CEng and J. H. CEng, “Technology for electromagnetic stirring of aluminum reverberatory furnaces,” *Light Metals 2011*, pp. 1193–1198, 2016.
- [6] H. Carbonnel and R. Borie, “Immersion pump for pumping corrosive liquid metals.” Google Patents, Jan. 22, 1974.
- [7] P. O. Owen, “Electromagnetic pump.” Google Patents, Aug. 17, 1954.
- [8] D. A. Watt, “The design of electromagnetic pumps for liquid metals,” *Proceedings of the IEE-Part A: Power Engineering*, vol. 106, no. 26, pp. 94–103, 1959.
- [9] L. A. Verte, “Magnetohydrodynamics in metallurgy,” *Metallurgy, Moscow*, p. 288, 1975.
- [10] E. Koroteeva, M. Ščepanskis, I. Bucenieks, and E. Platacis, “Numerical modeling and design of a disk-type rotating permanent magnet induction pump,” *Fusion Engineering and Design*, vol. 106, pp. 85–92, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.03.030>.
- [11] C. Liu, S. Lin, W. Lee, and J. Chen, “Electromagnetic Stirring Systems,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 17, no. 2, pp. 38–43, 2011, doi: 10.1109/MIAS.2010.939813.
- [12] M. G. Hvasta, W. K. Nollet, and M. H. Anderson, “Designing moving magnet pumps for high-temperature, liquid-metal systems,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 327, pp. 228–237, 2018.
- [13] C. O. Maidana and J. E. Nieminen, “First studies for the development of computational tools for the design of liquid metal electromagnetic pumps,” *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 49, no. 1, pp. 82–91, 2017.
- [14] M. G. Hvasta, “Designing & Optimizing a Moving Magnet Pump for Liquid Sodium Systems.” The University of Wisconsin-Madison, 2013.
- [15] M. Haavisto, S. Tuominen, T. Santa-Nokki, H. Kankaanpää, M. Paju, and P. Ruuskanen, “Magnetic Behavior of Sintered NdFeB Magnets on a Long-Term Timescale,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, p. 760584, 2014, doi: 10.1155/2014/760584.
- [16] B. D. Cullity and C. D. Graham, “Hard Magnetic Materials,” *Introduction to Magnetic Materials*. in Wiley Online Books. pp. 477–504, Nov. 19, 2008. doi: 10.1002/9780470386323.ch14.
- [17] J. F. Liu and M. H. Walmer, “Thermal stability and performance data for SmCo 2:17 high-temperature magnets on PPM focusing structures,” *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 52, no. 5, pp. 899–902, 2005, doi: 10.1109/TED.2005.845868.
- [18] Electron Energy Corporation, “NEODYMIUM IRON BORON MAGNETS.” <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/4788906/NdFeB-Email/EEC-NdFeB-Sell-Sheet.pdf>
- [19] Goudsmit Magnetic Supplies B.V, “Permanent Magnets.” [https://www.goudsmitmagnets.com/data/repository/documents/Brochure\\_Permanent\\_magnets\\_EN.pdf](https://www.goudsmitmagnets.com/data/repository/documents/Brochure_Permanent_magnets_EN.pdf) (accessed Mar. 25, 2020).

- [20] “File:StonerWohlfarthMainLoop.svg - Wikimedia Commons.” <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:StonerWohlfarthMainLoop.svg> (accessed Apr. 10, 2023).
- [21] M. Hodes, R. Zhang, L. S. Lam, R. Wilcoxon, and N. Lower, “On the Potential of Galinstan-Based Minichannel and Minigap Cooling,” *IEEE Trans Compon Packaging Manuf Technol*, vol. 4, no. 1, pp. 46–56, 2014, doi: 10.1109/TCPMT.2013.2274699.
- [22] C. Karcher, V. Kocourek, and D. Schulze, “Experimental investigations of electromagnetic instabilities of free surfaces in a liquid metal drop,” in *International Scientific Colloquium, Modelling for Electromagnetic Processing*, 2003, pp. 105–110.
- [23] N. B. Morley, L. C. Cadwallader, N. B. Morley, J. Burris, and M. D. Nornberg, “GaInSn usage in the research laboratory,” *aip.scitation.org*, vol. 79, no. 5, 2008, doi: 10.1063/1.2930813.
- [24] Y. Plevachuk *et al.*, “Thermophysical properties of the liquid Ga–In–Sn eutectic alloy,” *ACS Publications*, vol. 59, no. 3, pp. 757–763, Mar. 2014, doi: 10.1021/je400882q.
- [25] E. F. Borra, G. Tremblay, Y. Huot, and J. Gauvin, “Gallium liquid mirrors: basic technology, optical-shop tests, and observations,” *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, vol. 109, no. 733, p. 319, 1997.
- [26] I. Buceniaks, “Perspectives of using rotating permanent magnets for electromagnetic induction pump design,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 36, no. 2, pp. 151–156, 2000.
- [27] I. Buceniaks, E. Sukkkovich, and E. Shcherbinin, “Centrifugal pump basing on rotating permanent magnets,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 36, no. 2, pp. 189–196, 2000.
- [28] I. E. Buceniaks, “High pressure and high flowrate induction pumps with permanent magnets,” *MHD*, vol. 39, no. 4, pp. 411–418, 2003.
- [29] T. Beinerts, I. Buceniaks, A. Bojarevičs, and Y. Gelfgat, “POSSIBILITY TO USE CYLINDRICAL PUMPS WITH PERMANENT MAGNETS IN METALLURGICAL FACILITIES FOR ALUMINIUM ALLOYS.,” *Magnetohydrodynamics (0024-998X)*, vol. 51, no. 4, 2015.
- [30] I. Buceniaks, E. Platācis, O. Mikanovskis, A. Zik, and V. Mehta, “HELICAL TYPE EM INDUCTION PUMP WITH PERMANENTLY MAGNETIZED ROTOR FOR HIGH PRESSURE HEADS.,” *Magnetohydrodynamics (0024-998X)*, vol. 53, no. 2, 2017.
- [31] V. Dzelme, A. Jakovičs, and I. Buceniaks, “NUMERICAL MODELLING OF A REAL ROTATING PERMANENT MAGNET BASED ELECTROMAGNETIC INDUCTION PUMP.,” *Magnetohydrodynamics (0024-998X)*, vol. 53, no. 4, 2017.
- [32] Signal Processing SA, “Transducers.” <https://www.signal-processing.com/trans-select.php> (accessed Aug. 06, 2020).
- [33] J. A. Shercliff, *The theory of electromagnetic flow-measurement*. CUP Archive, 1962.
- [34] IBS Magnet, “Formula to Calculate the Flux Density.” <https://www.ibsmagnet.com/knowledge/flussdichte.php> (accessed Sep. 07, 2020).
- [35] 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.
- [36] K. T. McDonald, “Oscillating fluid in a U-tube,” *Princeton, NJ: Joseph Henry Laboratories, Princeton Univ*, 2012.
- [37] 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.
- [38] 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.

- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] "File:Halbach array field.jpg - Wikimedia Commons." [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halbach\\_array\\_field.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halbach_array_field.jpg) (accessed Apr. 12, 2023).
- [42] A. I. Voldek, "Induction magnetohydrodynamic machines with a liquid metal working body," *Induction magnetohydrodynamic machines with a liquid metal working body Transl. into ENGLISH from the monograph"" Induktsionnye Magnitogidrodinamicheskie s Zhidkomelallicheskim Rabochim Telom''Leningrad, 1970 272 p, 1974.*
- [43] T. H. Boyer, "The force on a magnetic dipole," *Am J Phys*, vol. 56, no. 8, p. 688, Jun. 1998, doi: 10.1119/1.15501.
- [44] 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.
- [45] A. J. Gerrard, "Inclusions and hydrogen and their effects on the quality of direct chill cast and flat rolled aluminium alloys for aerospace applications." University of Birmingham, 2014.
- [46] D. E. J. Talbot, "Effects of Hydrogen in Aluminium, Magnesium, Copper, and Their Alloys," *International Metallurgical Reviews*, vol. 20, no. 1, pp. 166–184, Jan. 1975, doi: 10.1179/imtr.1975.20.1.166.
- [47] L. Zhang, X. Lv, A. T. Torgerson, and M. Long, "Removal of impurity elements from molten aluminum: A review," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 32, no. 3. Taylor & Francis Group , pp. 150–228, Jul. 2011. doi: 10.1080/08827508.2010.483396.
- [48] L. Zhang, X. Lv, A. T. Torgerson, and M. Long, "Removal of Impurity Elements from Molten Aluminum: A Review," *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 32, no. 3, pp. 150–228, Jul. 2011, doi: 10.1080/08827508.2010.483396.
- [49] A. Bojarevičs, R. Baranovskis, I. Kaldre, M. Milgravis, and T. Beinerts, "Two cylinder permanent magnet stirrer for liquid metals," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017. doi: 10.1088/1757-899X/228/1/012022.
- [50] T. Beinerts, A. Bojarevičs, I. Bucenieks, Y. Gelfgat, and I. Kaldre, "Use of Permanent Magnets in Electromagnetic Facilities for the Treatment of Aluminum Alloys," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 47, no. 3, pp. 1626–1633, 2016, doi: 10.1007/s11663-016-0646-5.
- [51] M. Adrian P., *Introduction to Aerospace Materials*. Woodhead Publishing, 2012.
- [52] A. Bojarevics, T. Beinerts, Y. Gelfgat, and I. Kaldre, "Permanent magnet centrifugal pump for liquid aluminium stirring," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 29, no. 3, pp. 154–157, May 2016, doi: 10.1080/13640461.2015.1120998.
- [53] Yu. M. Gelfgat, L. A. Gorbunov, and V. Kolevzon, "Liquid metal flow in a finite-length cylinder with a rotating magnetic field," *Exp Fluids*, vol. 15, no. 6, pp. 411–416, 1993, doi: 10.1007/BF00191782.
- [54] L. M. Witkowski and P. Marty, "Effect of a rotating magnetic field of arbitrary frequency on a liquid metal column," *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, vol. 17, no. 2, pp. 239–254, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0997-7546\(98\)80061-7](https://doi.org/10.1016/S0997-7546(98)80061-7).

- [55] 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] I. Buceniēks, “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.
- [61] 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.
- [62] A. Bojarevics and T. Beinerts, “Experiments on liquid metal flow induced by a rotating magnetic dipole,” *Magnetohydrodynamics*, no. 4, pp. 333–338, 2010, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79951704862&partnerID=40&md5=8ecd4e0ef2e9abda5923595df630c2a6>
- [63] B. Willers *et al.*, “Efficient melt stirring using pulse sequences of a rotating magnetic field: Part II. Application to solidification of Al-Si alloys,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 39, no. 2, pp. 304–316, 2008.
- [64] S. Eckert *et al.*, “Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys,” *Eur Phys J Spec Top*, vol. 220, no. 1, pp. 123–137, 2013.
- [65] I. Grants, “Rotating magnetic dipole-driven flows in a conducting liquid cylinder,” *Physics of Fluids*, vol. 33, no. 5, p. 055115, 2021.
- [66] S. Eckert and G. Gerbeth, “Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound Doppler velocimetry,” *Exp Fluids*, vol. 32, no. 5, pp. 542–546, 2002.
- [67] A. Cramer, C. Zhang, and S. Eckert, “Local flow structures in liquid metals measured by ultrasonic Doppler velocimetry,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 15, no. 3, pp. 145–153, 2004.
- [68] R. Baranovskis *et al.*, “INVESTIGATION OF PARTICLE DYNAMICS AND SOLIDIFICATION IN A TWO-PHASE SYSTEM BY NEUTRON RADIOGRAPHY.” *Magnetohydrodynamics (0024-998X)*, vol. 56, no. 1, 2020.
- [69] M. Ščepanskis *et al.*, “Assessment of electromagnetic stirrer agitated liquid metal flows by dynamic neutron radiography,” *Metallurgical and materials transactions B*, vol. 48, no. 2, pp. 1045–1054, 2017.
- [70] T. Lappan *et al.*, “Neutron radiography of particle-laden liquid metal flow driven by an electromagnetic induction pump,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 56, no. 2/3, pp. 167–176, 2020.
- [71] D. Musaeva, E. Baake, A. Koppen, and P. Vontobel, “Application of neutron radiography for in-situ visualization of gallium solidification in travelling magnetic field,” *Magnetohydrodynamics*, vol. 53, no. 3, pp. 583–594, 2017.



- [72] S. Eckert, A. Cramer, and G. Gerbeth, "Velocity measurement techniques for liquid metal flows," in *Magneto hydrodynamics*, Springer, 2007, pp. 275–294.
- [73] J. A. Stasiak and T. A. Kowalewski, "Thermochromic liquid crystals applied for heat transfer research," *Optoelectronics review*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2002.
- [74] L. N. Fletcher *et al.*, "Thermal structure and composition of Jupiter's Great Red Spot from high-resolution thermal imaging," *Icarus*, vol. 208, no. 1, pp. 306–328, 2010.
- [75] Y. Huang *et al.*, "Experimental study of induced airflow characteristics during liquid metal pouring process through PIV, thermography, and color schlieren imaging," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 170, p. 107144, 2021.
- [76] P. Oborin, S. Khripchenko, and E. Golbraikh, "Influence of conventional and reverse travelling magnetic fields on liquid metal stirring in an asymmetric cavity," *Magneto hydrodynamics*, vol. 50, no. 3, pp. 291–301, 2014.
- [77] O. Ben-David, A. Levy, B. Mikhailovich, M. Avnaim, and A. Azulay, "Impact of traveling permanent magnets on low temperature metal melting in a cuboid," *Int J Heat Mass Transf*, vol. 99, pp. 882–894, 2016.
- [78] K. Bolotin, I. Smolyanov, E. Shvydkiy, V. Frizen, and S. Bychkov, "Numerical simulation of the electromagnetic stirrer adapted by using magnetodielectric composite," *Magneto hydrodynamics*, vol. 53, no. 4, pp. 723–730, 2017.
- [79] V. Dzelme, A. Jegorovs, and A. Jakovics, "Liquid metal free surface dynamics in rotating permanent magnet stirrer," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2020, p. 012018.
- [80] L. del Campo, R. B. Perez-Saez, and M. J. Tello, "Iron oxidation kinetics study by using infrared spectral emissivity measurements below 570 C," *Corros Sci*, vol. 50, no. 1, pp. 194–199, 2008.
- [81] R. Monier, F. Thumerel, J. Chapuis, F. Soulié, and C. Bordreuil, "Liquid metals surface temperature fields measurements with a two-colour pyrometer," *Measurement*, vol. 101, pp. 72–80, 2017.
- [82] M. Cehlin, B. Moshfegh, and M. Sandberg, "Visualization and measurement of air temperature using infrared thermography," *Proceedings of Room-Vent*, pp. 339–347, 2000.
- [83] 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.

## Pateicības

Šo darbu finansiāli atbalstīja projekts “Rīgas Tehniskās universitātes un Banku augstskolas doktorantu un akadēmiskā personāla stiprināšana stratēģiskās specializācijas jomās”, Līguma Nr. 8.2.2.0/20/I/008.

NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

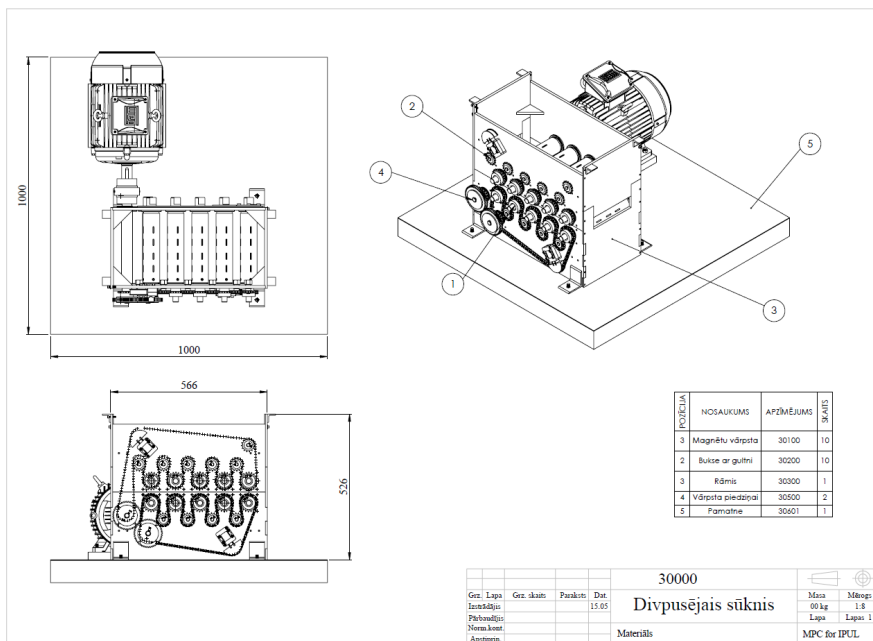
Eiropas Sociālais  
fonds

---

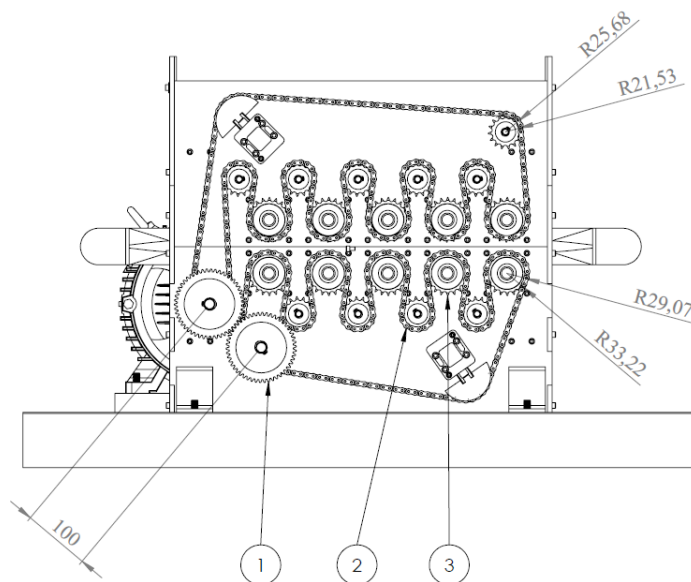
I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

Izsaku pateicību profesors *Dr. sc. ing.* Jānim Auziņam par vērtīgajām konsultācijām un palīdzību saistībā ar darba izstrādi. Pateicos *Dr. phys.* Andrim Bojarevičam par apmācību teorijas jautājumos kā arī praktiskajiem ieteikumiem eksperimentu realizācijā. Papildus pateicos Prof. Dr. hab. phys. Jurijam Gelfgatam par sniegtajām konsultācijām priekš disertācijas. Milzīga pateicība visam Latvijas Universitātes Fizikas institūta kolektīvam un īpaši Tomam Beinertam par nebeidzamo atbalstu un iesaisti gan zinātniskajos projektos, gan aktivitātēs ārpus tiem.

# PIELIKUMI

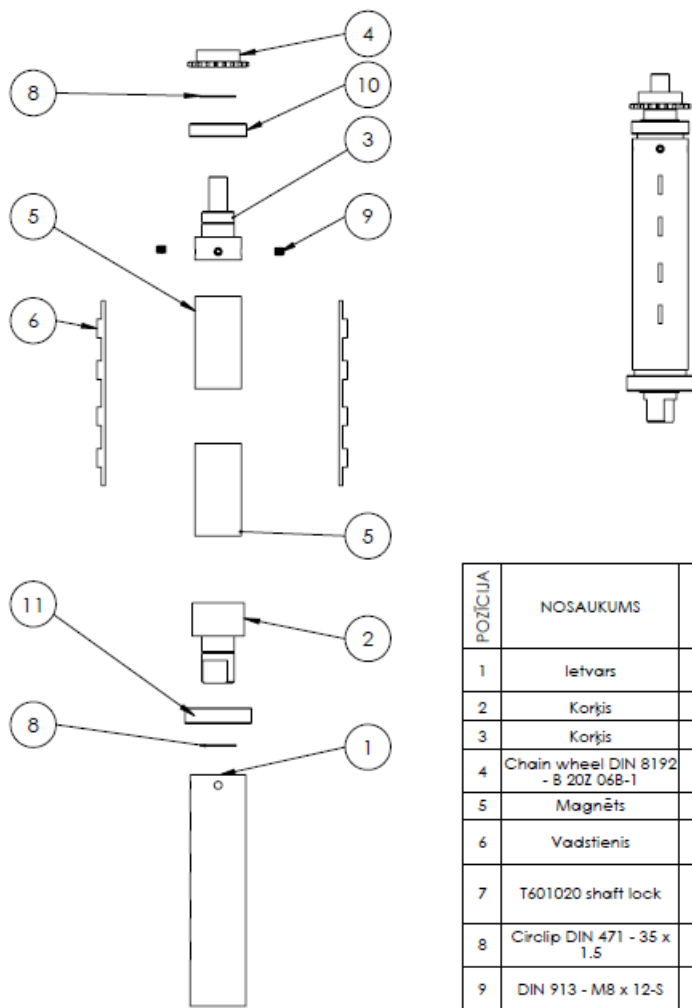


Divpusējā šķidra metāla sūkņa kopskata rasējums



Divpusējā sūkņa zobratu shēma

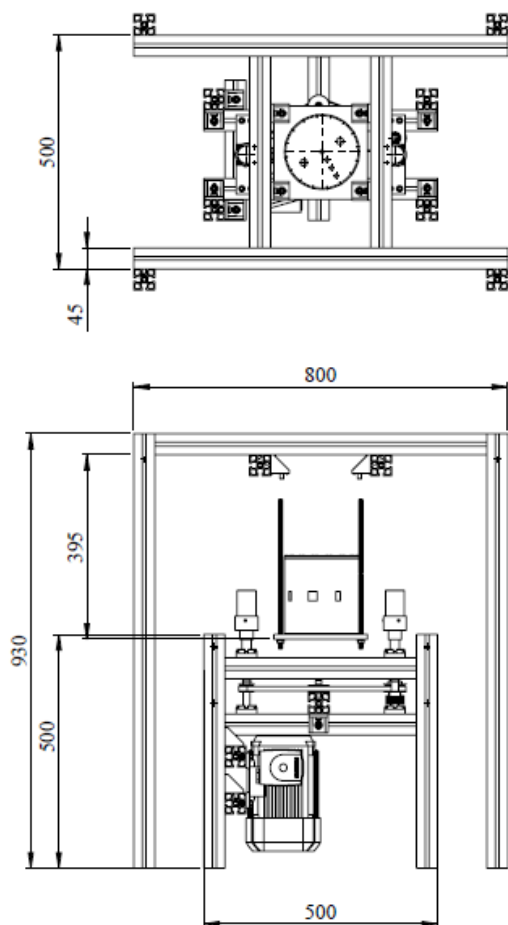
10 gabali



POZĪCIJA	NOSAUKUMS	APZĪMĒJUMS	SKAITS
1	Ietvars	30101	1
2	Korģis	30102	1
3	Korģis	30103	1
4	Chain wheel DIN 8192 - B 20Z 06B-1	30106	1
5	Magnēts	30104	2
6	Vadstienis	30105	2
7	T601020 shaft lock	Stiprināšanas bukse	1
8	Circlip DIN 471 - 35 x 1,5	Ierievja gredzens	2
9	DIN 913 - M8 x 12-S	Skrūve	4
10	DIN 625 - 6007 - Full,DE,AC,Full_68	Gultnis	1
11	DIN 625 - 6207 - Full,DE,AC,Full_68	Gultnis	1

				30100			
Grz. Lapa	Grz. skaits	Paraksts	Dat.	<b>Magnētu vārpsta KS</b>			
Izstrādājis			15.05	Materiāls			
Pārbaudījis				Masa			
Norm.kont.				kg			
Apsūpina.				Lapa			
				Mērogs			
				1:5			
				Lapas 1			
				MPC for IPUL			

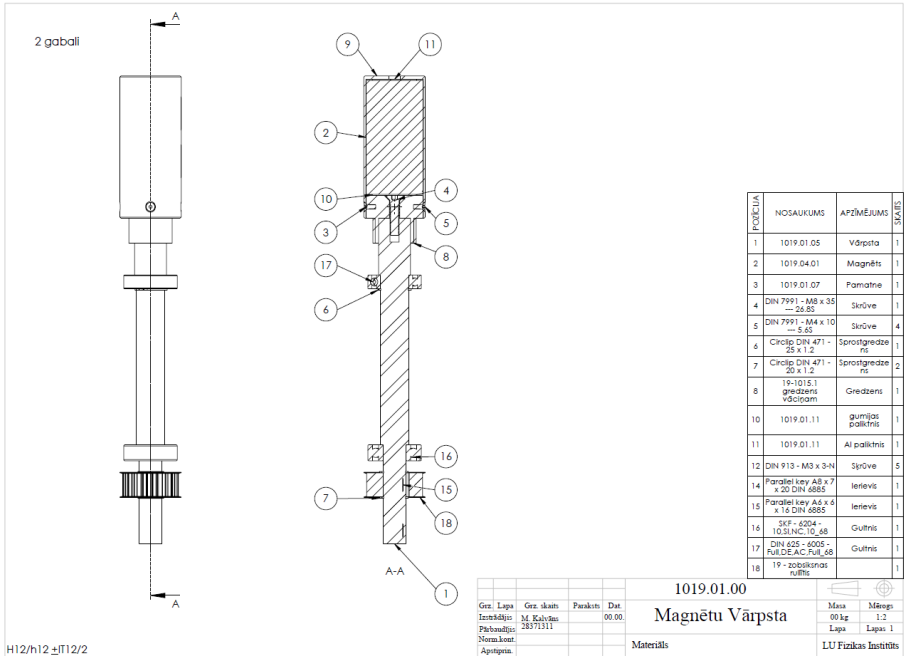
Divpusējā sūkņa pastāvīgo magnētu rotora kopskata rasējums



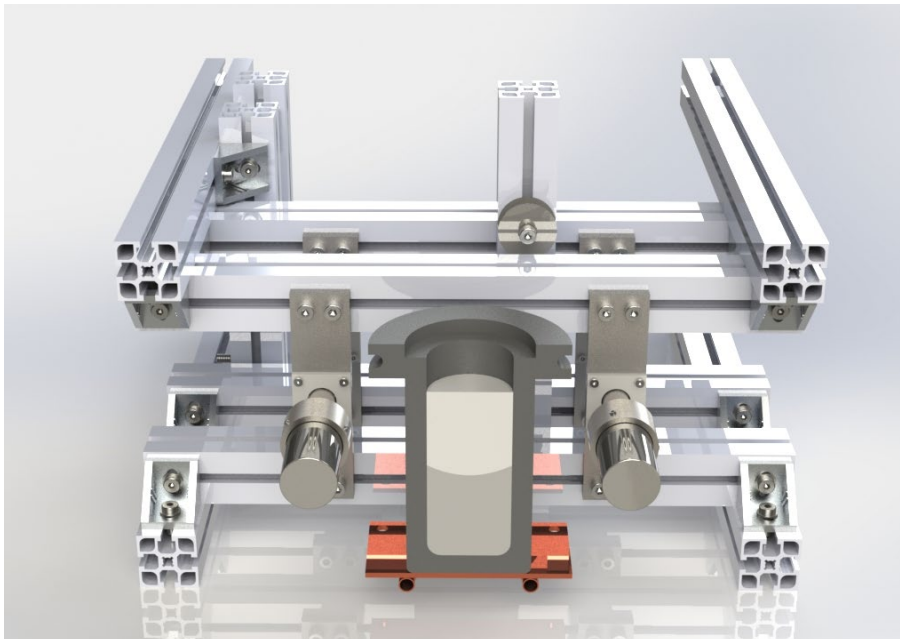
1. H13/h13 ±IT13/2

				19.ārējais rāmis			
Grz.	Lapa	Grz. skaits	Paraksts	Dat.	Masa [kg]	Mērogs	
Izstrādājis	M.Kalvāns			09.05.2019		1:10	
Pārbaudījis	T.Beinerts				Lapa	Lapas	
Tehnologs					<b>LUFİ</b>		
Apstiprin.	A.Bojarevičs						

Divu pastāvīgo magnētu maisītāja kopskata rasējums



Pastāvīgā magnēta rotora kopskats



Divu pastāvīgo magnētu maisītāja vizualizācija



**Matīss Kalvāns** dzimis 1989. gadā Rīgā. *Université Pierre-et-Marie-Curie* (Parīze, Francija) ieguvis bakalaura grādu fizikā (2012), *University of Glasgow* (Glāzgova, 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.