



**LATVIJAS
UNIVERSITĀTE**

ANNO 1919

U N I V E R S I T Y O F L A T V I A
Latvijas Universitātes Fizikas institūts

**MHD SISTĒMU AR ROTĒJOŠIEM
MAGNĒTISKIEM DIPOLIEM RADĪTO
HIDRODINAMISKO PLŪSMU IZPĒTE**

PROMOCIJAS DARBS

Doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē
Apakšnozare: šķidrumu un gāzu mehānika

Toms Beinerts

Zinātniskais vadītājs: Prof. Dr. hab. phys. Jurijs Gelfgats

Rīga, 2019

Saturs

1. Ievads.....	3
1.1. Darba mērķis un uzdevumi.....	5
1.2. Darba struktūra	6
2. MHD sistēmu ar pastāvīgajiem magnētiem pārskats	8
3. Klasisko pastāvīgo magnētu sistēmu pielietojamības izpēte lieliem nemagnētiskajiem attālumiem	14
3.1. Cilindriska pastāvīgo magnētu sūkņa eksperimentāla izpēte	14
3.1.1. Cilindriska PM sūkņa raksturlielumu novērtējums	15
3.1.2. Cilindriska pastāvīgo magnētu sūkņa alumīnijam eksperimentāla izpēte	21
3.1.3. Cilindriskā PM sūkņa izpētē ar InGaSn sakausējumu iegūto rezultātu ekstrapolācija pielietojumiem ar šķidru alumīniju	26
3.1.4. Secinājumi par Cilindriska PM sūkņa pielietojamību alumīnija metalurģijā.....	28
3.2. Diskveida sūkņa centrālās sistēmas izpēte pielietojamībai alumīnija metalurģijā.....	29
3.2.1. Konceptijas un eksperimentālās iekārtas vispārējs apraksts.....	29
3.2.2. Magnētiskās sistēmas apraksts	31
3.2.3. Magnētiskā lauka aprēķins.	33
3.2.4. Sistēmas attīstīto parametru kārtas lielumu novērtējums	37
3.2.5. Eksperimentālā sistēmas izpēte	39
3.2.6. Centrālās sūkņa eksperimentāla pārbaude sistēmā ar šķidru alumīniju.....	42
3.2.7. Secinājumi par diskveida PM sūkņa centrālās sistēmu	54
4. MHD sistēmu ar rotējošiem magnētiskajiem dipoliem radīto hidrodinamisko plūsmu izpēte.....	56
4.1. Multipola un dipola salīdzinājums.....	56
4.2. Viena magnētiskā dipola radītās plūsmas izpēte	57
4.2.1. Viena rotējoša dipola radītās plūsmas raksturlielumu kārtas lieluma novērtējums	57
4.2.2. Viena cilindra detalizētāks analītisks apskats.....	63
4.2.3. Viena magnētiska cilindra magnētiskā lauka aprēķins.....	68
4.2.4. Eksperimentāla viena magnētiska dipola radītās plūsmas izpēte	70
4.2.5. Secinājumi par viena magnētiskā dipola radītās plūsmas izpēti.....	82
4.3. Sistēmas ar trīs rotējošiem dipoliem.....	85
4.3.1. Trīs rotējošu cilindru ar fāzes nobīdi radītās plūsmas teorētisks apskats	85

4.3.2.	Trīs rotējošu cilindru ar fāzes nobīdi radītās plūsmas eksperimentāla izpēte	92
4.3.3.	Industriāla mēroga trīs magnētisku dipolu sistēmas izpēte	103
4.3.4.	Secinājumi par trīs magnētisku dipolu sistēmu	105
4.4.	Citas dipolu sistēmas kustības inducēšanai kanālā	108
4.4.1.	Divi blakus novietoti magnēti zem šķidrā metāla rezervuāra.	108
4.4.2.	Divu cilindru sistēmas radīta plūsma starp tiem novietotā rezervuārā.	111
4.4.3.	Divpusējas četru dipolu radītās plūsmas un iemaisījumu kustības izpēte	121
4.4.4.	Magnētisko dipolu izmantošana šķidra metāla sūkņī	129
4.4.5.	Secinājumi	139
5.	Kopējie rezultāti, secinājumi un rekomendācijas pielietojumam.	143
6.	Pateicības	146
7.	Izmantotā literatūra un avoti	147
8.	Apzīmējumu saraksts	151
9.	Pielikumi	152
9.1.	pielikums. MHD sūkņi un maisītāji	152
9.2.	Pielikums. Vairāku esošu uzņēmumu piedāvātās MHD tehnoloģijas	154

1. Ievads

Magnetohidrodinamika (*turpmāk* MHD) kā atsevišķa zinātnes nozare pastāv salīdzinoši nesen. Pirmo reizi kā atsevišķu nozari literatūrā to minējis ir H. Alfens 1942. gadā [1]. Tās pētniecības objekti ir gan plazmas un kvantu fizikā, gan astrofizikā un ģeofizikā. No praktiskā pielietojuma aktuālākie MHD pētījumi saistīti ar procesiem elektrovadošās, nesaspiežamās vidēs, kuru pamatā apskatīti šķidrie metāli. Šīs nozares ir plaši apskatītas, tām veltītas vairākas monogrāfijas un nozares pārskati, tās idejas realizētas un pārbaudītas daudz dažādos eksperimentos, tehniskos risinājumos, t.sk. industriālos pielietojumos. Pielietojamās MHD pētniecības objekts pamatā ir šķidrums metāls, kas ir mākslīgs objekts, jo dabā nav brīvi sastopams[2]. Industrijā plaši izmantojamajiem metāla sakausējumiem piemīt visas nesaspiežamu, elektrovadošu šķidrums hidrodinamiskās un elektrodinamiskās īpašības, taču parasti tās atšķiras ar salīdzinoši augstām darba temperatūrām, ķīmisko agresivitāti un tipiski salīdzinoši lielākiem mērogiem.

MHD pielietojumus pēc pētniecības objekta var iedalīt:

1. Relatīvi zemas kušanas temperatūras un ķīmiski mazāk aktīvi metāli, kas ļauj izmantot relatīvi plānas kanālu un rezervuāru sienas un attiecīgi pieļaujot mazus nemagnētiskos attālumus (orientējoši <5cm). Šeit var minēt tādus metālus kā dzīvsudrabs, nātrijs, kālijs, litijs, gallijs un pat svins un šo un citu metālu eitektiskie savienojumi. Šādi metāli var tikt izmantoti, piemēram, kā siltumnesēji dažādās enerģētiskās iekārtās (piemēram, ātro neitronu reaktoros un šķidru metālu dzesēšanas sistēmās kodolsintēzes reaktoros), kā arī kā izpētes un modelējošā vide augstu kušanas temperatūru sistēmām [3];

2. Relatīvi augstas temperatūras un ķīmiski agresīvi metāli, piemēram, alva, alumīnijs, titāns, tērauds un citi, kuru izmantošanai šķidrā stāvoklī prasa paaugstinātas drošības un siltumizolācijas materiālus, kas rezultātā praktiski nozīmē, ka nemagnētiskais attālums starp šķidro metālu un elektromagnētisko sistēmu būs lielāks par orientējoši 5cm.

Tieši otrās kategorijas pētījumi ir ar visaugstāko industriālas pielietojamības potenciālu, jo ietver metālus, kas ir būtiski plaša spektrārūpniecībai, un ap kuru ieguvī un apstrādi ir izveidojušās salīdzinoši lielas metalurģijas nozares. Tā kā šiem metāliem ir augsta kušanas temperatūra un tie ir ķīmiski agresīvi, gan izpētes, gan industriāls darbs ar šiem metāliem ir īpaši sarežģīts, kas nostāda MHD nozari unikālā pozīcijā kā vienu no nedaudziem darba instrumentiem tajās[4];

Metalurģijā dažādi MHD pielietojumi aktuāli dēļ iespējas precīzi un bez fiziska kontakta atsevišķu industriālo procesu realizāciju, piedāvājot plašas automatizācijas iespējas, kā arī dēļ ekoloģiskiem apsvērumiem.

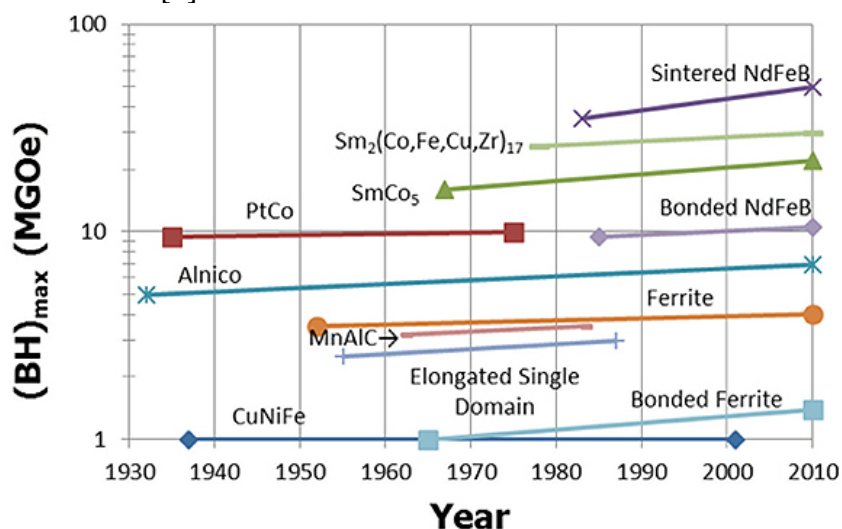
Pirmās MHD tehnoloģijas metalurģijai tika radītas vēl pirms atsevišķas nozares nodefinēšanas. Piemēram, elektromagnētiskā levitācija parādījās jau 1923. gadā, elektromagnētiskā maisīšana - 1932. gadā [5]. Šeit jāpiemin arī A. Einšteina un L. Szilarda patents par elektrodinamisko kustību šķidriem metāliem, īpaši dzesēšanas sistēmām, 1928. gadā, kurā faktiski pirmo reizi tiek piedāvāts maiņstrāvas elektromagnētiskais sūknis šķidriem metāliem [6].

MHD būtība ietver magnētiskā lauka izmantošanu. Līdz pat šim brīdim nepieciešamais

magnētiskais lauks galvenokārt tika realizēts, izmantojot strāvas vijumus. Šāda veida magnētiskā lauka radīšana (t.sk. kustības radīšanai elektrovadošā vidē) ir salīdzinot, piemēram, ar mehāniskiem līdzekļiem kustības radīšanai, neefektīva dēļ enerģijas zudumiem vijumos, kas rodas to elektriskās pretestības dēļ.

Magnētisko lauku iespējams radīt, izmantojot pastāvīgos magnētus (*turpmāk PM*), tādejādi nezaudējot enerģiju Džoula zuduma veidā strāvas vijumos, attiecīgi ļaujot radikāli palielināt iekārtu efektivitāti.

Šāda alternatīva apskatīta jau 50. - 60. tajos gados [7]. Tolaik pieejamo PM īpašības neatbilda augstu temperatūru metālu industriāliem procesiem atbilstošajiem temperatūras režīmiem, un attiecīgi kaut cik ievērojamu magnētiskā lauka intensitāti bija iespējams nodrošināt tikai tiešā magnētu tuvumā, ierobežojot pieļaujamo nemagnētisko attālumu starp magnētiem un darba vielu [8].



1.1.att. Pieejamo magnētisko materiālu un to maksimālās magnetizācijas pieejamība atbilstošajā laikā 20.gs.[8]

Īpaši pēdējo 15 gadu laikā PM materiāli ir strauji attīstījušies – skat. 1.1. attēlu. Šobrīd pieejami magnēti ar paliekošo magnetizāciju (remanenci) līdz pat 1,5 T, un darba temperatūru līdz pat 550 °C [9]. PM attīstoties, pakāpeniski paplašinājusies arī PM tehnoloģiju pielietojamība, sākot ar zemas metālu kušanas temperatūras metāliem, kur iespējamas salīdzinoši plānas sienas, kas ļauj samazināt attālumu starp elektromagnētisko sistēmu un darbu vielu. LUF1 vieni no pirmajiem pasaulē izstrādāja šādus PM sūkņus praktisku uzdevumu realizācijai. PM cilindriska tipa multipola sūkņi pasaulē pat tiek tā arī saukti: “Riga pump” [10] – [12]. PM sūkņos, kustības inducēšanai nepieciešamā, magnētiskā lauka *skriešana* tiek realizēta, magnētiem liekot fiziski kustēties pa apli vai disku [13]. Ir piedāvāti arī risinājumi magnētiem pārvietoties iestiprinātiem elastīgā lentā. Šāda tipa iekārtas šobrīd ir pielietojamas tikai zemu kušanas temperatūru metāliem un sakausējamiem. Attiecīgi arī analogisku risinājumu izmantojamība ar metalurģiju saistītos tehnoloģiskajos risinājumos saistīta ar :

1. Metalurģijā izmantoto sakausējumu ievērojami augstāko darba temperatūru.
2. Nepieciešamību izmantot drošības apsvērumu dēļ biezas kanālu un metāla rezervuāra sienas, kas ievērojami samazina šādu iekārtu efektivitāti.

Līdz šim klasiskās PM sistēmas netika šādam uzdevumam apskatītas – tikai sistēmām līdz 300 - 400° C, tāpēc tika nolemts šādu izvērtējumu veikt. To veicot, bija redzams, ka esošās koncepciju iespējas ir ierobežotas, tāpēc nepieciešams piedāvāt jaunas koncepcijas, kas arī tika darīts – piedāvājot rotējošu dipolu sistēmas.

Šajā darbā tiek piedāvātas un izpētītas jauna tipa MHD iekārtas ar PM, kas ļauj ievērojami palielināt iespējamo nemagnētisko attālumu starp magnētiem un darba vielu, joprojām saglabājot PM sistēmām raksturīgo zemāku elektroenerģijas patēriņu.

Līdz šim nav veikta detalizēta pat klasisko multipolu PM sistēmu izmantošanas iespēju metalurģijā reālajos tehnoloģiskajos uzdevumos ar temperatūru, kas pārsniedz 500° C izpēti. Attiecīgi darbs tika uzsākts ar secīgu divu zināmu risinājumu – diskveida un cilindruveida multipolu magnētiskajām sistēmām – pielietojamības izpēti šādu uzdevumu risināšanai. Pēc šīs izpēti, tiek piedāvāta jauna koncepcija, kuras pamatā ir pastāvīgo magnētu MHD sistēma ar rotējošiem magnētiskajiem dipoliem, ko iespējams realizēt ar diametrāli magnetizētiem cilindriem. Turklāt, izstrādātās sistēmas konstrukcija ir ievērojami vienkāršāka un potenciāli ekonomiski izdevīgāka. Šī ir oriģināla LUFU izstrāde [14], un līdzīgi risinājumi praktiski nav citur pētīti, tāpēc pilnvērtīgas sistēmas izpētei nepieciešams gan izstrādāt teorētisku aprēķinu modeli, gan eksperimentāli izpētīt sistēmas radīto plūsmu raksturu un atrisināt ar sistēmu izgatavošanu potenciāli saistītās galvenās fizikālās problēmas, gan izvērtēt izstrādātās koncepcijas potenciālo praktisko pielietojumu loku, īpaši pievēršot uzmanību jomām, kur līdzšinējās PM sistēmas nebija pietiekami efektīvas.

1.1. Darba mērķis un uzdevumi

Doktora darba **mērķis**: izpētīt elektromagnētiskās un hidrodinamiskās parādības MHD sistēmās ar rotējošiem magnētiskajiem dipoliem (rotējošiem cilindriskiem magnētiem, kuru magnetizācija ir perpendikulāra to asij), un to potenciālo pielietojumu vieglo metālu metalurģijas procesos tai skaitā:

1. Alumīnija maisīšana pārkausēšanas krāsnīs ar sienas biezumu līdz pat 500 mm.
2. Dozēšanas un metāla padošanas sistēmas.
3. Vairākiem pielietojumiem atbilstoši šķidrā metāla sūkņi.

Lai sasniegtu uzstādīto mērķi, bija izvirzīti šādi **uzdevumi**:

1. Izpētīt aktuālākos pastāvīgo magnētu materiālus, to pielietojumus; esošās MHD tehnoloģijas ar pastāvīgajiem magnētiem pielietojumiem metalurģijā.

2. Apkopot un piemērot metodiku un tehniku darbā apskatīto sistēmu analītiskai un eksperimentālai izpētei, t.sk. magnētiskā lauka novērtēšanas un mērīšanas metodes, kvalitatīvo novērtējumu metodiku, hidrodinamisko raksturlielumu mērījumu paņēmienus un to ierobežojumus, magnētisku sistēmu salikšanas un iekārtu veidošanas īpatnības.

3. Novērtēt vairāku magnētisko dipolu savstarpējās mijiedarbības radīto spēku un griezes momentu, un meklēt risinājumus šādu sistēmu praktiskai realizācijai;

4. Praktiski realizēt vairākas apskatītās konfigurācijas un ar eksperimentālu mērījumu palīdzību verificēt izstrādātos analītiskos un skaitliskos aprēķinu modeļus;

5. Apskatīt iespējas aplūkotajām sistēmām izpildīt vieglās metalurģijas industrijai atbilstošus tehnoloģiskos uzdevumus un novērtēt potenciālo industriālo iekārtu efektivitāti, īpaši apskatot alumīnija pārstrādes nozari.

6. Uz iegūto rezultātu bāzes, apstiprināt **hipotēzi**, ka rotējošu magnētisko dipolu sistēmas, kas realizējamās ar cilindriskiem magnētiem, kuru magnetizācija ir perpendikulāra to asij var efektīvi radīt dažāda veida šķidrā metāla plūsmas pie salīdzinoši lieliem nemagnētiskajiem attālumiem līdz darba vielai, kas savukārt ir aktuāli vairākos vieglās metalurģijas uzdevumos.

Darba **pētījuma objekts** ir oriģināla pastāvīgo magnētu sistēma bezkontakta kustības radīšanai šķidrā metālā, bet pētījuma **priekšmets** – šīs sistēmas analītiska, skaitliska un eksperimentāla izpēte.

1.2. Darba struktūra

Doktora darba ietvaros tiks analītiski, skaitliski un eksperimentāli izpētīta piedāvātā oriģinālā pastāvīgo magnētu sistēma dažādās konfigurācijās un apskatīti to pielietojumi metalurģijā.

Doktora darba struktūra – ievads, trīs daļas, secinājumi un priekšlikumi, bibliogrāfiskais saraksts un pielikumi.

Darba pirmajā daļā (2.nodaļa) Veikta zinātniskās literatūras analīze par MHD sistēmām PM t.sk. magnētiskajiem dipoliem, to sistēmām. Apskatīti pastāvīgie magnēti un to materiāli, kā arī iespēja tiem reprezentēt magnētiskos dipolus. Apkopotas esošās MHD sistēmas, kas tiek pielietotas konkrētajā industrijā, īpaši 3 - fāžu skrejošā lauka induktoriem šķidrā metāla maisīšanai, un esošās PM sistēmas. Izpētīta konkrēti alumīnija metalurģijas nozare un formulēts uzdevums potenciālajai sistēmai bezkontakta šķidra metāla kustības radīšanai.

Darba otrajā daļā (3.nodaļa) secīgās apakšnodaļās detalizēti aprakstītas divas klasiskās pastāvīgo magnētu sistēmas – cilindriskā un diskveida multipolu sistēmas.

Nodaļā izstrādāts sistēmu sasniedzamais kārtas lielumu analītisks novērtējums rotējošu magnētisko dipolu sistēmu radīto plūsmu hidrodinamiskiem parametriem (plūsmas ātrums, struktūra, spiediens), kā arī apskatītas iespējas modeli uzlabot, ieviešot vairākus uzlabojumus veiktajiem tuvinājumiem. Veikti mērogošanas aprēķini uz industriāla mēroga iekārtām.

Sistēmas izpētītas eksperimentāli, izveidojot katrai no šīm klasiskajām sistēmām vienu eksperimentālu, laboratorijas iekārtu, un veicot detalizētus sasniedzamos šķidrā metāla ātrumus pie dažādiem nemagnētiskajiem attālumiem un rotācijas frekvencēm. Diskveida iekārtas gadījumā izveidota un notestēta arī industriāla mēroga iekārta.

Darba trešajā daļā (4.nodaļa) apskatīta piedāvātā jaunā koncepcija – rotējošu magnētisku dipolu sistēma. Nodaļā sākumā salīdzināta šāda dipolu sistēma ar iepriekš apskatītajām klasiskajām, parādot atšķirības un priekšrocības. Tālāk secīgās apakšnodaļās aprakstīti dažādas sistēmas konfigurācijas, sākot ar vienkāršāko - viens rotējošs dipols, beidzot

ar divpusējām 10 dipolu sistēmām specifiskiem pielietojumiem.

Darba ietvaros izstrādāts skaitliskā aprēķina modelis sistēmas radītajam magnētiskajam laukam magnētisko elementu radītā mijiedarbības spēka un griezes momenta novērtēšanai. Izstrādāta metodika vairāku magnētisku dipolu savstarpējās mijiedarbības radīto spēku un griezes momentu novērtēšanai un aprēķināti šie raksturlielumi apskatītajām eksperimentālajām sistēmām, kā arī novērtēti sagaidāmie lielumi sistēmām mērogos, kas atbilst jau izvirzītajiem industriālajiem mērogiem. Piedāvāti mehānismi risinājumu praktiskai realizācijai.

Šīs nodaļas ietvaros realizētās 8 eksperimentālās iekārtas un izveidoti vēl 4 industriāla mēroga prototipi. Aprakstītas ar to praktisku realizāciju saistītas problēmas un industriālo testu rezultāti.

2. MHD sistēmu ar pastāvīgajiem magnētiem pārskats

Šī darba izpētes objekts ir šķidrā metāla kausējumi - augstas temperatūras, bieži ķīmiski agresīvi un elektrovadoši šķidrums, kas plaši sastopami dažādās industrijās: sākot ar metalurģiju un lējumu ražošanu līdz MHD metožu izmantošanai enerģijas pārvadē un kodolsintēzē. Praktiskos pielietojumos tie ir darba viela, kas kādā tehnoloģiskajā procesā tiek apstrādāta, (piemēram, ķīmiski-metalurģiskie procesi), vai arī kalpo kā pastarpināta darba viela specializētos tehnoloģiskajos procesos (piemēram, šķidro metālu sistēmu izmantošana kodolsintēzes reaktoru dzesēšanas sistēmās). Visos gadījumos ir rinda hidrodinamisko, elektrodinamisko, siltuma un masas pārnese u.c. raksturlielumu un parametru, kas nosaka apskatīto tehnoloģisko risinājumu efektivitāti un lietderību konkrētajos gadījumos. Tāpēc, pirmkārt, ir nepieciešams izpētīt fizikālos procesus, kas notiek šķidrā metālā dažādu elektromagnētisko lauku ietekmē. Tikai nākamajā posmā aktuāla mērķtiecīga un precīza šādu tehnoloģiju izstrāde un optimizācija ražošanas procesos. MHD t.sk. PM risinājumi var veicināt tehnoloģiskā procesa progresu intensitāti, rūpnieciskās ražošanas automatizāciju, uzlabot gala materiālu kvalitāti, lai samazinātu dabas resursu un enerģijas izmantošanu, kā arī ļautu realizēt nepārtraukta tipa un integrētus ražošanas procesus [15] – [17].

Veikt tehnoloģisko izpēti un izstrādāt ražošanas procesu iekārtām, kur iesaistītas tādas agresīvas vides kā šķidrā metāli, ir īpaši sarežģīti, tomēr tieši šeit arī ir lielākas perspektīvas MHD metodēm, jo iespējams nodrošināt nepieciešamos šķidro metālu procesus iedarbojoties bezkontakta viedā ar elektromagnētiskajiem tilpuma spēkiem (*turpmāk* EMTS). Apvienojot bezkontakta iedarbību un iespēju to precīzi vadīt un automatizēt MHD metodes daudzos gadījumos ir ar visvairāk priekšrocībām [18] – [20].

Lietišķā MHD ir pastāvīga un augoša zinātnes nozare, kas pamatā pēta dažādus uzdevumus kodolenerģētikā (piemēram, dzesēšanas sistēmu izstrādē) un metalurģijā (īpaši vieglo metālu), mērīšanas tehniku, tehnoloģiju izstrādi un citiem virzieniem. Visplašāko pielietojumu sasnieguši indukcijas un indukcijas MHD sūkņi. Ar tiem saistīto patentu skaits šobrīd sasniedz jau vairākus tūkstošus. Praktiski visi šāda tipa risinājumi, lai radītu magnētisko lauku, izmanto dažāda veida vijumus (spoles), caur kurām plūstot elektriskajai strāvai, tiek radīts pastāvīgs, mainīgs vai tā saucamais skrejošs magnētiskais lauks. Tā kā EM lauka radīšanai tiek izmantota elektriskā strāva, šāda tipa iekārtas saistītas arī ar lielākiem elektroenerģijas zudumiem, palielinātiem iekārtu izmēriem, kā arī nepieciešamību izmantot speciālus barošanas avotus [21] – [27].

Alternatīvi praktiski magnētisko lauku var iegūt izmantojot pastāvīgos magnētus. Tomēr vēl nesenu to pielietojums MHD tehnikā bija ierobežots pieejamo magnētisko materiālu ierobežoto īpašību dēļ. Pirmkārt, to maksimālā darba temperatūra (kuru pārsniedzot, to magnētiskās īpašības tiek zaudētas) nepārsniedza 100° C un, otrkārt, pieejamo pastāvīgo magnētu maksimālā iespējamā magnetizācija bija nepietiekama, lai būtu iespējams iegūt pietiekamu EM iedarbību pie iekārtas saprātīgiem izmēriem un izmaksām. Tāpēc MHD sistēmas ar pastāvīgajiem magnētiem ir joprojām salīdzinoši maz izpētītas un praktisku

pielietojumu atradušas faktiski tikai darbā ar zemas kušanas temperatūras metāliem (piemēram, sārnu metāli, dzīvsudrabs) [28], [29]. Plašāk par pirmās paaudzes MHD sūkņiem ar pastāvīgajiem magnētiem aprakstīts monogrāfijā [7]. Dažādu esošu MHD sūkņu un maisītāju skat. arī 9.1. pielikumā.

Pēdējo 10 - 12 gadu laikā pastāvīgo magnētu materiālu īpašības ir ievērojami uzlabojušās [30]. Industriālos apmēros šobrīd tiek ražoti pastāvīgie magnēti, kuru koercitīvais spēks ir ievērojami augstāks un darba temperatūra var sasniegt pat 500 ° C (skat. 2.1. tabulu).

2.1. tabula

Dažādu mūsdienu magnētisko materiālu īpašības [9]

	Marka	Br (KG)	Hcb (KOe)	Hci (KOe)	BHmax (MGOe)	Tmax, °C
NdFeB Sinterēti magnēti	N48	13.8-14.2	≥11.6	≥12.0	46-49	80
	N50	14.0-14.5	≥10.0	≥11.0	48-51	70
	N52	14.3-14.8	≥10.0	≥11.0	50-53	70
	48M	13.6-14.3	≥12.9	≥14.0	46-49	100
	50M	14.0-14.5	≥13.0	≥14.0	48-51	100
	45H	13.2-13.8	≥12.0	≥17.0	43-46	120
	48H	13.7-14.3	≥12.5	≥17.0	46-49	120
	45SH	13.2-13.8	≥12.6	≥20.0	43-46	150
	40UH	12.4-12.8	≥11.3	≥25.0	38-41	180
	38EH	12.2-12.5	≥11.3	≥30.0	36-39	200
NdFeB sakausēti magnēti	BDM-10	6.5-7.0	5.0-5.5	8-12	9-10	150
	BDM-12	7.0-8.0	5.5-6.0	9-11	10-12	80
Samārija Kobalta (Sm-Co)	YXG28	10.8-11.0	9.8-10.5	18-25	28-30	300
	YXG30B	10.8-11.0	5.2-5.6	5.5-6.5	28-30	300
Alumīnija Niķeļa Kobalta (AlNiCo) magnēti	LNG34	12.00	0.6		4.30	525
	LNG40	12.5	0.6		5.00	525
	LNG52	13.0	0.7		6.50	525
	LNGT60	9.00	1.38		7.5	550
	LNGT72	1.05	1.4		9.0	550
Keramiskie Ferītu magnēti	C5	3.8	2.4	2.5	3.4	460
	C7	3.4	3.23	4.00	2.75	460
	C8	3.85	2.95	3.05	3.5	460
	C8B	4.2	2.913	2.96	4.12	460
	C9	3.8	3.516	4.01	3.32	460
	C10	4.0	3.617	3.51	3.82	460
	C11	4.3	2.512	2.56	4.32	460

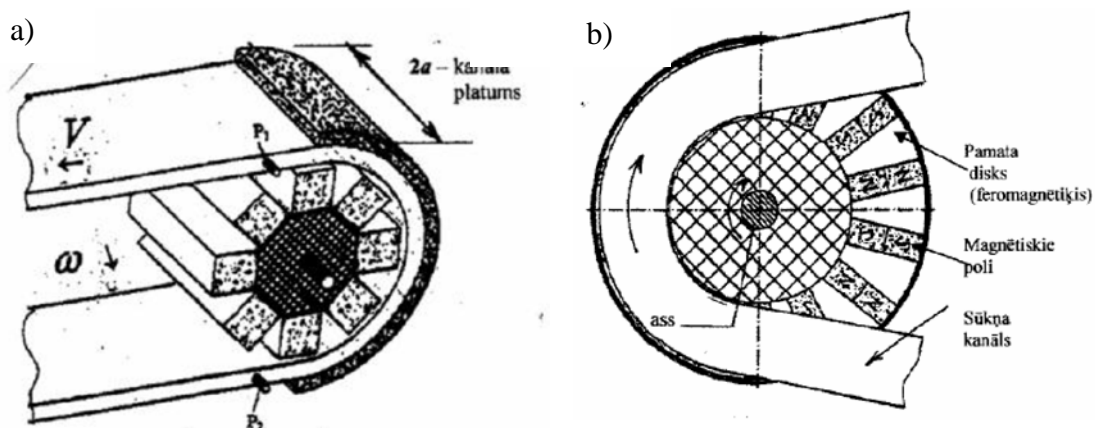
Attiecīgi bija pamats no jauna apskatīt un izstrādāt MHD iekārtas ar pastāvīgajiem magnētiem. Pirmie tika izstrādāti indukcijas sūkņi ar pastāvīgo magnētu rotoriem, kas ir domāti

zemas kušanas temperatūras metāliem, piemērotiem pamatā pētniecības uzdevumiem, kas saistīti ar šķidrā metāla dzesēšanas sistēmu izpēti kodolenerģētikas pielietojumiem. Iespēja strādāt pie ievērojami augstākām temperatūrām, un palielināt nemagnētisko attālumu ļāva šim uzdevumam izstrādāt pietiekami efektīvu risinājumu [3]. Īpaši aktīvi šis virziens ir attīstījies Latvijas Universitātes Fizikas institūtā (LUFI), kur, bez minētā, ir izstrādāts liels daudzums līdzīgu MHD sūkņu un iekārtu [31].

Visu iepriekšminēto tipu sūkņiem iedarbība uz šķidro metālu tiek realizēta ar skrejošu magnētisko lauku, kas tiek iegūts, izmantojot rotējošu pastāvīgo magnētu sistēmu, kurā pastāvīgie magnēti ar mainīgu polaritāti salikti uz kopēja rotora blakus, noteiktā attālumā vienam no otra. Atkarībā no magnētu izkārtojuma uz rotora un šķidrā metāla kanāla konfigurācijas, šos sūkņus var iedalīt divās grupās:

1. Diskveida sūknis ar plakanu kanālu;
2. Cilindriska veida sūknis ar plakanu kanālu.

Attēlā 2.1. redzamas šo divu veidu sūkņu principiālās shēmas.



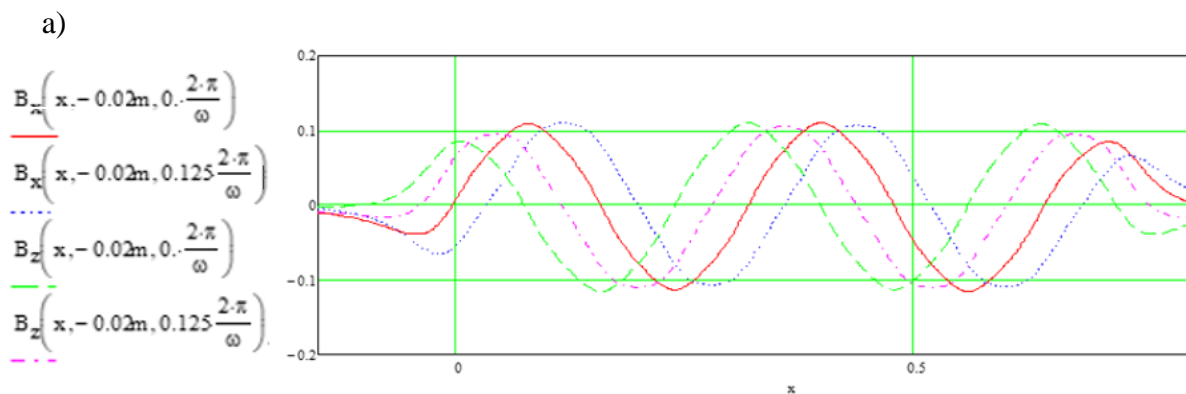
2.1. att. Klasiskie PM sūkņi shematisks attēlojums. Cilindriska a) un diskveida b) MHD sūkņa ar PM zemas kušanas temperatūras metāliem

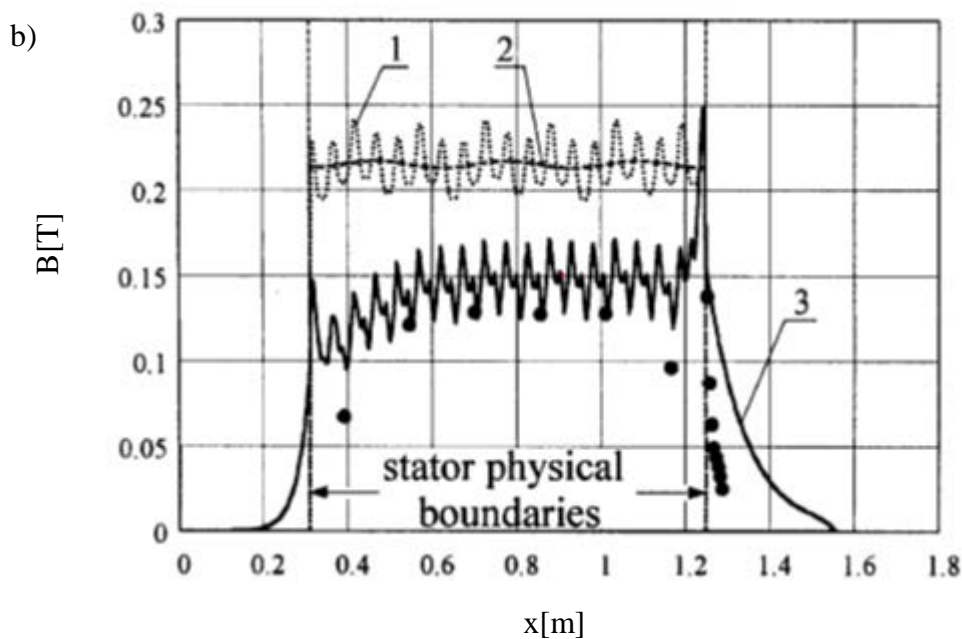
Savukārt attēlā 2.2. aplūkojami daži piemēri šādiem izgatavotiem sūkņiem LUFI.



2.2. att. Daži no LUFU izgatavotajiem MHD sūkņi ar pastāvīgajiem magnētiem

PM un maiņstrāvas MHD sūkņu radītais magnētiskā lauka sadalījums šķidrā metāla kanālā ir analogisks. 2.3. attēlā redzams, ka arī PM sistēmas – šinī gadījumā tieši magnētisko dipolu rindas – radītais lauks ir skrejošs lauks, turklāt tā forma šinī gadījumā ir vēl tuvāka klasiskai sinusoīdai, kā kādam konkrētam cilindriskam indukcijas sūknim. Minēto tipu PM sūkņu sasniedzamo parametru aprēķinu metodika arī ir analogiska. Turklāt tradicionālajiem indukcijas maiņstrāvas MHD sūkņiem aprēķinu metodika ir plaši pārbaudīta un verificēta ar labu aprēķinu un eksperimentālo mērījumu atbilstību [32].





2.3. att. PM un maiņstrāvas MHD sūkņu radītais magnētiskā lauka sadalījums: a) aprēķinātais magnētiskais lauks no 10 rotējošiem magnētiskajiem dipoliem; b) magnētiskā lauka sadalījums cilindriskā elektromagnētiskā sūknī t.sk. eksperimentāli nomērītais¹

LUFU izstrādāti PM MHD sūkņi darbam ar tādiem šķidro metālu kausējumiem kā Na, Pb, Pb-Bi, Pb-Li ar darba temperatūru atsevišķos gadījumos līdz 300 ° C un vairāk. Visos līdz šim izstrādātajos sūkņos šķidrā metāla kanāls ir veidots no tievām nerūsējošā tērauda 304 markas loksne. Šis tērauds nekorodē, ir pietiekami termiski un mehāniski izturīgs, lai varētu maksimāli samazināt nemagnētisko attālumu līdz magnētiskajiem poliem, kā arī ir nemagnētisks, līdz ar to neizmaina un nesamazina magnētisko lauku kanālā. Šāda tipa konstrukcijas nav iespējamās augstu kušanas temperatūru metālu (Al, Cu, Fe u.tml.) metalurģiskās tehnoloģijās [33] kausējumu augstās ķīmiskās agresivitātes un augstās kušanas temperatūras dēļ. Šeit nepieciešami speciāli keramiskie materiāli ar augstu siltumizturību, kas savukārt nozīmē ievērojamu kanālu un rezervuāru sienu biezumu palielinājumu, attiecīgi palielinot minimālo iespējamo nemagnētisko attālumu starp magnētiskajiem poliem un darba vielu. Tādēļ rodas perspektīva jauniem un oriģināliem praktisko problēmu risinājumiem metalurģijā, kur būtu iespējams izmantot MHD iekārtas ar pastāvīgajiem magnētiem.

Šajā darbā tiek piedāvāts izpētīt jauna tipa MHD iekārtas ar PM, kas ļauj palielināt šo nemagnētisko attālumu, un tādējādi ļaujot veidot plūsmu kanālus ar salīdzinoši biežām sienām ar atbilstošu nepieciešamo termoizolāciju. Šeit pamatā tiek piedāvāta faktiski jauna MHD iekārtu klase, kuras pamatā ir ideja, izmantot rotējošus magnētiskos dipolus, kas tiek realizēti, rotējot vairākiem cilindriskiem radiāli magnetizētiem (paralēli diametram) pastāvīgajiem magnētiem. Kā parādīja pirmie pētījumu rezultāti ([34], [35]) šādas MHD sistēmas var būt visai

¹ Two dimensional model for analysis of cylindrical linear induction pump characteristics: model description and numerical analysis. I.R. Kirillov *, D.M. Obukhov D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, 196641 Metallostroy, St. Petersburg, Russia. Energy Conversion and Management 44 (2003) 2687–2697. 28 January 2003.

efektīvas un var tikt izmantotas, piemēram, metalurģiskajās krāsnīs, kur nepieciešams realizēt maisīšanu un kausējuma padevi no krāsns kristalizatorā u.c. metalurģijas uzdevumos.

Joprojām ir pieprasījums pēc PM MHD iekārtām, kas spētu risināt minētos uzdevumus. Lai risinātu šādus pietiekami izaicinošus jautājumus, kas saistīts ar elektromagnētiskajiem un hidrodinamiskajiem procesiem un to raksturlielumiem, iekārtu projektēšanu un eksperimentālo izpēti, bija nepieciešams veikt šādus pētījumus:

1. Teorētiski magnētiskā lauka sadalījuma aprēķini vairākos sistēmas konfigurācijas variantos;
2. Skaitliskie radītās hidrodinamiskās plūsmas aprēķini;
3. Eksperimentāla piedāvāto MHD iekārtu hidrodinamisko un elektromagnētisko parametru izpēte;
4. Konceptiju dažādu MHD iekārtu iegūšanai izstrāde, kur pa pamatu tiek izmantoti rotējošu magnētisko dipolu sistēma;
5. Piedāvāto sistēmu izpēte industriālos apstākļos.

Šajā darbā tiek piedāvāti rezultāti no visiem augstāk minētajiem virzieniem.

Kopā darbā ir apskatītās dažādas, pēc būtības atšķirīgas, 4 PM sistēmas, ā, kā arī veikts teorētisks sistēmas apraksts pie katras no tām.

3. Klasisko pastāvīgo magnētu sistēmu pielietojamības izpēte lieliem nemagnētiskajiem attālumiem

Izstrādājot pastāvīgo magnētu sistēmu, kas būtu pielietojama augstu temperatūras metalurģijā, loģiski sākotnēji apskatīt iespēju attīstīt un pielāgot jau iepriekš pieminētās abas klasiskās pastāvīgo magnētu sistēmas: diskveida un cilindriska veida sūkņus. Klasiskajos uzdevumos sistēmas tiek optimizētas, meklējot minimālo rotoru izmēru un attiecīgi magnētiskā materiāla daudzumu, kas nepieciešams, lai sasniegtu šķidrā metāla sistēmā nepieciešamos parametrus. Parasti tiek apskatīti šķidru metālu kontūri, kur galvenie raksturlielumi ir spiediens un caurtece, un sūkņi var lielā mērā raksturot, konkrētajā sistēmā uzņemot spiediena-caurteces (P-Q) raksturlielni. Industrijā svarīgi arī citi parametri. Pirmkārt, nemagnētiskais attālums jeb iespējamais maksimālais termiskās izolācijas slāņa biezums starp sūkņi un darba vielu – šķidro metālu. Otrkārt, specifiskiem pielietojumiem var būt svarīgs arī maksimālais sasniedzamais absolūtais šķidrā metāla ātrums. Šo parametru kontekstā līdz šim pastāvīgo magnētu sūkņi paplašināti nav pētīti. Nākamajās divās apakšnodaļās ir apskatītas cilindriskā un diskveida PM sūkņa iespējas pielietot metalurģijā, bet tieši viena konkrēta uzdevuma no industrijas kontekstā: meklējot iespējas radīt šķidrā metāla plūsmu, kur lokāli absolūtais metāla ātrums sasniedz vismaz 4 m/s, bet tajā pašā laikā minimālais nemagnētiskais attālums ir 7 cm vai lielāks. Šeit minētie parametri ir izvēlēti pēc industrijas pārstāvju rekomendācijām. 4 m/s lielu šķidrā metāla ātrumu sasniegt aktuāli alumīnija metalurģijā degazācijas procesā, jo novērots, ka pie šāda ātruma, ievadot šāda ātruma reģionā argona gāzi, tā tiek sadalīta ievērojami mazos gāzes burbulīšos, kas savukārt ir nepieciešamais kritērijs, lai norisinātos degazācijas process, līdzīgi kā tas notiek rotējošu oglekļa gāzes ievadu gadījumā [36]. Šajā darbā degazācijas process netiks sīkāk apskatīts, bet konkrētais industriālā partnera uzdevums joprojām izmantots, lai izpētītu iespējas pielietot diskveida un cilindriska tipa sūkņus alumīnija un citu augstu kušanas temperatūras metālu metalurģijā.

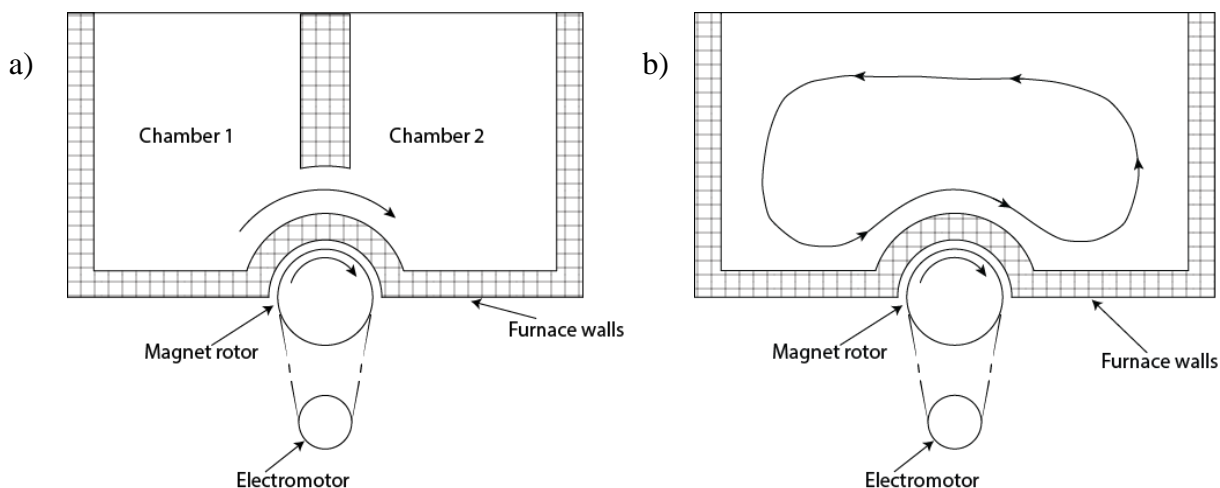
3.1. Cilindriska pastāvīgo magnētu sūkņa eksperimentāla izpēte

Šajā nodaļā aprakstīti teorētiski apsvērumi un prezentēti eksperimentu sērijas rezultāti, kas veikti, lai novērtētu iespējas cilindriska tipa pastāvīgo magnētu sūkņiem palielināt nemagnētisko attālumu līdz 7 cm, un vienlaicīgi sasniegt nepieciešamos plūsmas parametrus (šajā gadījumā 4 m/s plūsmas ātrumu), joprojām sistēmas izmēriem un kopējai iekārtas konstrukcijai paliekot reālistiskos izmēros, t.i. izgatavošanas un lietošanas izmaksām nepārsniedzot robežu, kas neļautu izstrādāto sistēmu ieviest ražošanā pārāk augstu izmaksu dēļ.

Klasisko PM sistēmu pielietojumi un līdzšinējā izpēte saistāma pamatā ar to izmantošanu šķidrā metāla kustības un spiediena radīšanai dažādos kontūros – noslēgta loka šķidrā metāla kanālam, kas sastāv no sūkņa sekcijas, kur atrodas pats sūkņis, darba sekcijas, kas veidota atbilstoši tehniskajam uzdevumam, un transporta sekcijām, kas abas iepriekš

minētās savieno. Metalurģijas, īpaši šajā darbā apskatītās alumīnija metalurģijas, gadījumā šāda tipa sistēmas nav aktuālas, jo tieši neatbilst kādam no tās tipiskajiem ražošanas posmiem. Šī iemesla dēļ, darba izvirzītā uzdevuma realizācijai, ir nepieciešams formulēt arī unikālu modelējamo sistēmu. Atšķirīga modelējamā sistēma ir pamatā arī prezentēto rezultātu unikalitātei – līdz šim modelēto sistēmu neatbilstība metalurģijas tehnoloģiskajiem procesiem nosaka, ka līdz šim veiktās PM sistēmas izpētes rezultāti nav tieši pārnesami, un attiecīgi ir nepieciešams veikt pārvērtējumu arī klasiskajām sistēmām.

Iepriekš minētajam nolūkam cilindriska PM sūkņa gadījumā tiek piedāvāts apskatīt sekojošas MHD sistēma alumīnija sūknēšanai (transportēšanai) (skat. 3.1.a) attēlu) un maisīšanai (skat. 3.1.b) attēlu). Modelējošās sistēmas izmēri, konfigurācija un elektromagnētiskā sūkņa novietojums ir izvēlēts atbilstoši ekspertu ar pieredzi metalurģijā rekomendācijām.

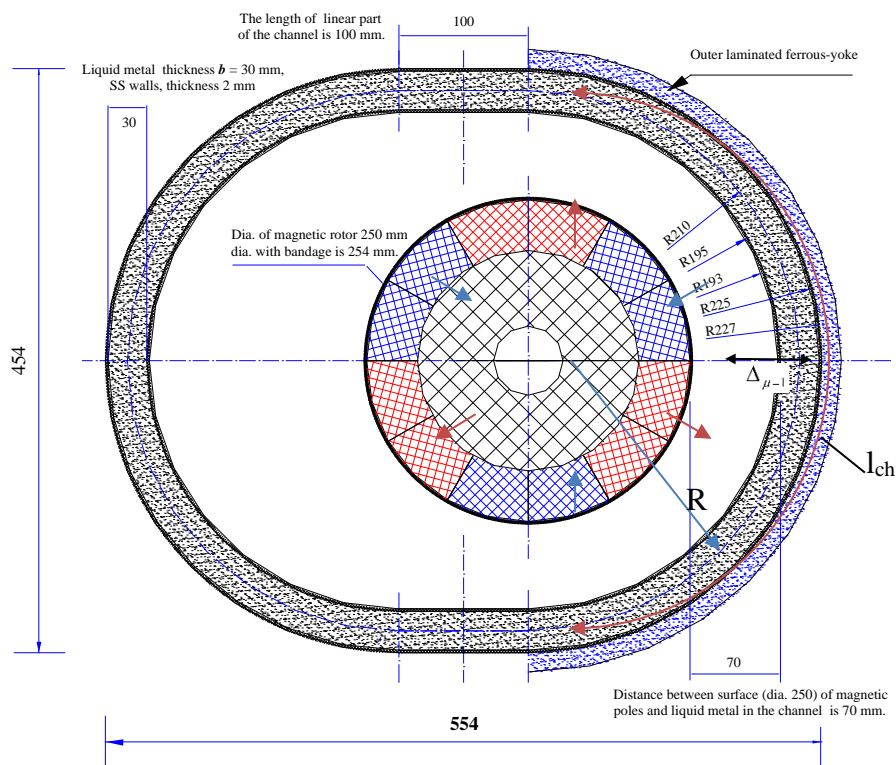


3.1. att. Shematisks metalurģiskas krāsns ar cilindrisku elektromagnētisko sūkni attēlojums: a) metāla sūknēšanai no vienas krāsns kameras uz otru divkameru krāsns gadījumā; b) metāla maisīšanai alumīnija krāsni

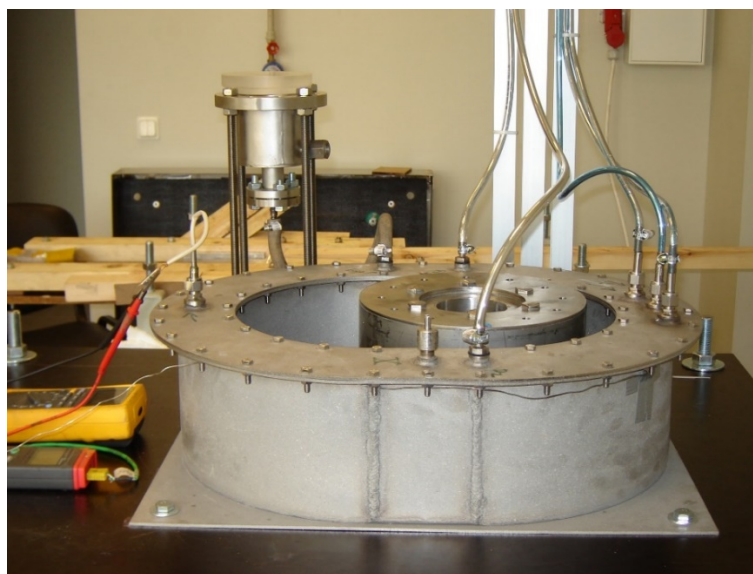
3.1.1. Cilindriska PM sūkņa raksturlielumu novērtējums

3.1. attēlā redzamā sistēmas konfigurācijas praktiski ir grūti tieši modelējama, jo nepieciešams ļoti liels daudzums darba vielas – šķidra metāla. Laboratorijas apstākļos ērti sākotnēji MHD sistēmas modelēt ar zemas kušanas temperatūras metāliem, piemēram, InGaSn eitektisko sakausējumu, kurš savukārt ir arī dārgs un attiecīgi stipri ierobežotā daudzumā. Attiecīgi pirmajam sistēmas novērtējumam 3.1. attēlā redzamā konfigurācija tika reducēta uz analogisku noslēgtu sistēmu ar izvēlētu cilindrisku PM sūkni ar trīs polu pāriem. Shematisks sistēmas attēlojums redzams 3.2. attēlā. Atbilstoši izgatavotas eksperimentālās iekārtas attēls redzams 3.3. un 3.9. attēlā. PM sūknis šeit ir integrēts hidrauliskā lokā, kas ietver arī caurteces mērītājus un vārstu, ar ko iespējams regulēt loka hidraulisko pretestību (PQ līkņu uzņemšanai). Kanālu tika nolemts veidot pusapļa (180° riņķa līnija loka) formā apkārt magnētiskajam rotoram. Kanāls noslēdzas pa otru tādu pašu loku otrā pusē rotoram, bet ievērojami lielākā attālumā. Šādā kanāla konfigurācijā iespējams ērti mainīt attālumu no rotora līdz darba vielai, kas ļauj attiecīgi eksperimentāli izpētīti, pie kāda nemagnētiskā attāluma iekārta vēl strādā

salīdzinoši efektīvi. Kanāla biezums izvēlēts liels, lai atbilstu modelējamajai sistēmai (skat. 3.1. attēlu). Kanāla taisnstūrveida šķēsgriezuma izmēri bija $2a \times b = 150 \times 30 \text{ mm}^2$ (skat. 3.2. attēlu). Klasiskos PM cilindriskos sūkņos plaši tiek izmantots papildus feromagnētiskais jūgs [37]. Arī šeit tika izvērtēta iespēja palielināt sūkņa efektivitāti, izmantojot eromagnētisku jūgu, to piestiprinot kanāla ārpusē (skat. 3.2. attēlu), lai arī tas tieši vairs neatbilst modelējamajai sistēmai.



3.2. att. Shematiskais cilindriskā PM sūkņa alumīnijam modelējošās sistēmas attēlojums



3.3. att. PM sūkņa alumīnijam modelējošās eksperimentālā iekārta

Lai novērtētu jebkura tipa elektromagnētiskā indukcijas sūkņa raksturlielumus, neatkarīgi no tā, kā tiek radīts nepieciešamais skrejošais magnētiskais lauks, un attiecīgi varētu veikt iekārtas optimizāciju, iespējams izmantot pamata formulas, kuras piedāvā, piemēram, A.G. Branans un K.T. Kalniņš [7], [32]. Atbilstoši maksimālais sūkņa attīstāmais spiediens P_{max} novērtējams no:

$$P_{max} = (\sigma/2) \cdot V_B \cdot B^2 \cdot s \cdot l_{ch} \cdot k \quad (3.1.)$$

Šeit σ ir šķidrā metāla elektriskā vadāmība, V_B – skrejošā magnētiskā lauka ātrums kanālā, B – maksimālā magnētiskā lauka vērtība, vidējota pa šķidrā metāla slāņa platumu, s – slīdes koeficients, kas raksturo attiecību starp magnētiskā lauka un šķidrā metāla ātrumiem, l_{ch} – sūkņa kanāla aktīvās daļas garums (kurā ir šis magnētiskais lauks), un k ir koeficients, kas ņem vērā negatīvos gala efektus, kas samazina sūkņa maksimālo attīstīto spiedienu (skat. 3.2. attēlu).

Konkrētajā apskatītajā sistēmā skrejošā magnētiskā lauka ātrumu V_B var aprēķināt kā $V_B = 2p \cdot R \cdot n$, kur R ir vidējais kanāla liekuma rādiuss, n – magnētiskā rotora apgriezību skaits laika vienībā, p – polu pāra skaits (šajā gadījumā $p=3$).

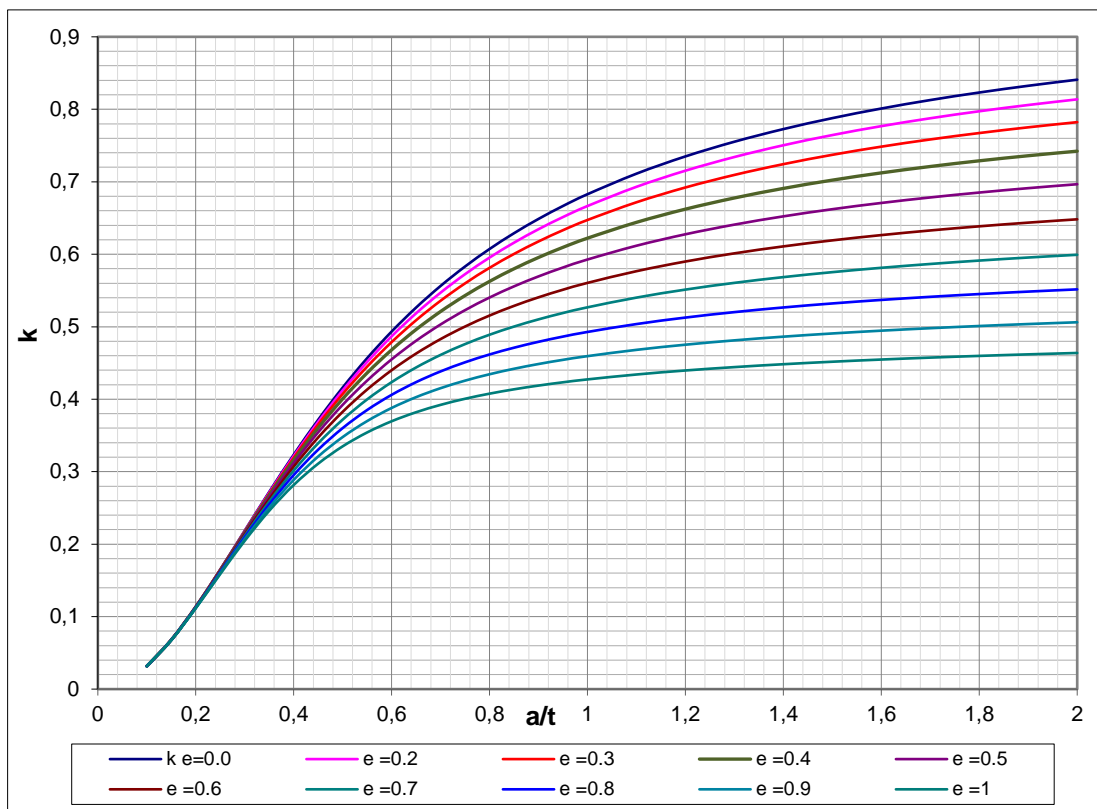
Slīdi s aprēķina $s = (1 - V/V_B)$, kur V ir vidējais šķidrā metāla ātrums kanālā. Koeficienta k var tikt aprēķināt kā to definējis ir A.L. Verte [33]:

$$k = \text{Re} \left[\frac{\alpha^2}{\lambda^2} \left(1 - \frac{th \lambda a}{\lambda a} \right) \right] \quad (3.2.)$$

kur $\lambda^2 = \alpha^2 (1 + i\varepsilon)$, $\alpha = \pi/\tau$ un ε ir magnētiskais Reinoldsa skaitlis

$$\varepsilon = \sigma \cdot \mu_0 \cdot V_B \cdot s \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot \frac{b}{\Delta_{\mu=1}} \quad (3.3.)$$

Šeit $\Delta_{\mu=1}$ ir nemagnētiskā attāluma izmērs, $\tau = 2\pi R/N$ ir magnētisko polu soļa garums, $2a$ – kanāla platums, b – biezums, N – kopējais magnētisko polu skaits. Gala efektu raksturojošā koeficienta k atkarību no attiecības starp kanāla pusplatumu un magnētiskā polu soļu garumu (a/τ) un magnētiskā Reinoldsa skaitļa ε var aprēķināt un ērtuma labad attēlot grafiski (skat. 3.4. attēlu), pēc tam nepieciešamo k vērtību nolaset atbilstoši konkrētam gadījumam.



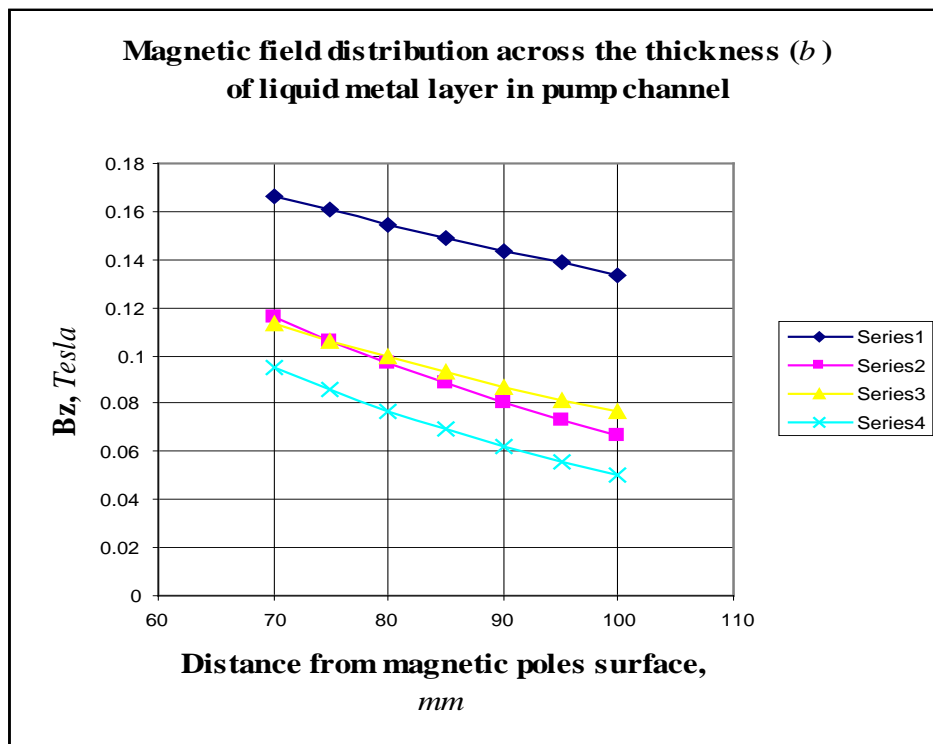
3.4. att. Gala efektu raksturojošā koeficienta k atkarība no attiecības starp kanāla pusplatumu un magnētiskā polu soļu garumu (a/τ) un magnētiskā Reynolds skaitļa ε (grafikā “ e ”) [38]

Tā kā vienādojumā (3.1.) magnētiskā lauka stiprums B darba vielā ir otrajā pakāpē, tas ir galvenais faktors, kas nosaka PM sūkņa efektivitāti. Magnētiskā lauka stiprums atkarīgs no:

1. Izmantoto pastāvīgo magnētu tipa (skat. 2.1. tabulu);
2. Attāluma starp magnētisko polu un šķidro metālu;
3. Pastāvīgo magnētu sistēmas konfigurācijas.

Eksperimentālajā iekārtā tika izmantoti NdFeB tipa N 48 markas magnēti, kuru īpašības attiecīgi arī izmantotas tālākos aprēķinos. Lai arī 2.1. tabulā redzams, ka magnētu materiālu īpašības ir stipri atšķirīgas, realitātē iespējas šo parametru izmainīt ir visai ierobežotas. Praktiski tiek identificēta konkrētajam uzdevumam pieļaujamā maksimālā temperatūra, un izvēlēti magnēti, kas pie šādas maksimālās darba temperatūras ir ar maksimālo magnetizāciju. Vēl bieži pašas spēcīgākās magnetizācijas magnētiem ir stingrāki ierobežojumi to maksimālajam izmēram. Eksperimentu plānošanas laikā attiecīgi tika izvēlēti minētā tipa magnēti.

Magnētiskais lauks atkarībā no attāluma no pastāvīgā magnēta dilst ļoti strauji. 3.5. attēlā aplūkojams magnētiskā lauka stipruma kritums konkrētajā eksperimentā izmantotajā kanālā. Redzams, ka arī pašā kanāla magnētiskā lauka stiprums var būt stipri mainīgs lielums. Jāatzīmē, ka šajā gadījumā, ja tiek izmantots ārējais pasīvais feromagnētiskais jūgs, iespējams ievērojami palielināt vidējo magnētisko lauku kanālā, kā arī uzlabot magnētiskā lauka viendabīgumu pa kanāla šķērsgrīzumu (paralēli 2 a platumam).



3.5. att. Aprēķinātais un izmērītais magnētiskā lauka sadalījums no cilindriskā sūkņa rotora šķidrā metāla slānim atbilstošos attālumos: 1 – teorētiski aprēķinātais ar feromagnētisko jūgu; 2 – eksperimentāli izmērīts gadījumā ar feromagnētisku jūgu; 3 – teorētiski aprēķinātais gadījumā bez feromagnētiskā jūga; 4 – eksperimentāli izmērītais gadījumam bez feromagnētiskā jūga

Lai novērtētu PM sūkņa efektivitāti, ir nepieciešams ņemt vērā arī elektriskos un hidrauliskos zudumus kanālā. Mainīgā magnētiskā lauka inducētās elektriskās strāvas dēļ kanālā izdalās enerģija Džoula siltuma veidā. Šos zudumus var novērtēt šādā veidā:

$$W_M = (\sigma/2) \cdot (V_B \cdot B \cdot s)^2 \cdot 2a \cdot b \cdot l_{ch} \cdot k. \quad (3.4.)$$

Metalurģiskos pielietojumos rezervuāru un kanālu veidošanai tiek izmantoti keramiski materiāli, kas ir elektriski nevadoši, attiecīgi arī siltuma zudumi kanālu sienās nav. Siltuma zudumi W_{Fe} ārējā feromagnētiskā jūgā arī ir relatīvi mazi, jo tas tiek veidots laminētā veidā, līdzīgi kā citur elektriskajās iekārtās (piemēram, transformatoru feromagnētiskajos serdeņos), kas nodrošina to, ka materiāls ir feromagnētisks, bet faktiski elektriski nevadošs (vismaz virzienā, kur tiek sagaidīta vislielākā elektrisko strāvu inducēšanās).

Kopējai sistēmas jaudai, kuru attiecīgi piedziņas motoram būs nepieciešams attīstīt, lai iekārta darbotos, ir jābūt tādai, lai kompensētu visus siltuma zudumus sistēmā un radīto šķidrā metāla hidraulisko enerģiju $P_{max} \cdot Q$, kur Q ir sūkņa radītā kopējā caurtece, bet P_{max} – maksimālais spiediens pie šīs caurteces. Apskatītajā gadījumā kopējai motora jaudai (attiecīgi arī iekārtas elektrības patēriņam) ir jābūt:

$$W_{motor} = W_M + W_{Fe} + P_{max} \cdot Q + W_O, \quad (3.5.)$$

Kur W_o ir jauda, ko motors patērē tukšgaitā – rotējot ar magnētisko rotoru, bet bez slodzes – šķidrā metāla klātbūtnes.

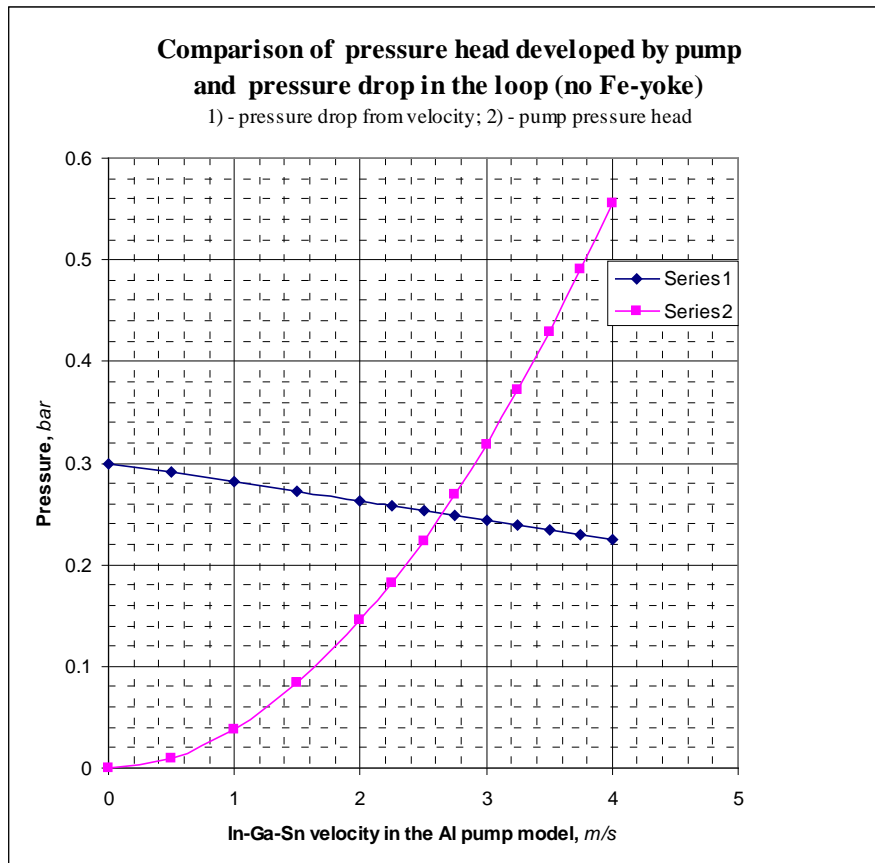
Vienādojums (3.1) ļauj novērtēt sūkņa attīstīto maksimālo spiedienu, bet dēļ iekšējiem hidrauliskajiem zudumiem kanālā P_{ch} , reālais maksimālais spiediens šķidrā metālā būs mazāks:

$$P = P_{max} - P_{ch} = P_{max} - \xi_{ch} \cdot [(\rho \cdot V^2)/2], \quad (3.6.)$$

kur ξ_{ch} ir kanāla iekšējo hidraulisko pretestību raksturojošs koeficients, ρ – šķidrā metāla blīvums, un V - vidējais šķidrā metāla ātrums kanālā, kur $V = Q/(2a \cdot b)$.

Pie kopējiem hidrauliskajiem zudumiem nepieciešams ņemt vērā arī zudumus, kas saistīti ar plūsmas pagriešanos – šajā gadījumā plūsma tiek pagriezta divas reizes pa 180° . Šajā gadījumā šie zudumi novērtēti, izmantojot piedāvātās standarta metodes, kā piemēram, *Idelchik* [39]. Atbilstoši šiem aprēķiniem novērtēts, ka sistēmā šķidrā metāla ātrumam esot diapazonā $V = 1 \div 4$ m/s, hidrauliskās pretestības koeficients visam kanāla garumā sasniedz $\xi = 1.25 \div 1.1$. Kopējie spiediena zudumi kanālā apskatītajā gadījumā ilustrēti 3.6. att. Šie spiediena zudumi ir jāsalīdzina ar spiedienu, ko attīsta konkrētā PM sistēma. Ievietojot vienādojumā (3.1.) visas atbilstošās vērtības $\sigma = 3.3 \cdot 10^6 \text{ Ohm}^{-1} \text{ M}^{-1}$, $V_B = 2\pi \cdot R \cdot n = 1.32 \cdot n$ m/s, $B = 0.085$ T (skat. 3.5. attēlu), $s = 1 - V/V_B$, $l_{ch} = \pi \cdot R = 0.66$ m, $k = 0.24$, var iegūt, ka, neizmantojot feromagnētisko jūgu un pie nulles caurteces ($Q=0$, $V=0$ un attiecīgi $s = 1$), maksimālais sūkņa attīstītais spiediens būs $P_{max} = 30\,000 \text{ Pa} = 0.3 \text{ atm}$.

Pie šķidrā metāla plūsmas kanālā, slīde s būs mazāka, līdz ar to arī sūkņa attīstītais spiediens būs zemāks. Pirmajā tuvinājumā, neņemot vērā slīdes ietekmi uz ϵ un κ , var pieņemt, ka sūkņa radītais spiediens ir proporcionāls slīdei. Tad no hidraulisko zudumu un sūkņa radītā spiediena balansa (skat. 3.6. attēlu.), var novērtēt maksimālo šķidrā metāla ātrumu, kas var tikt sasniegts konkrētajā kanālā ar apskatīto sūkni. No 3.6. attēla grafika redzam, ka abas līknes krustojas pie ātruma vērtības $V_{max}=2.6$ m/s. Papildus izmantojot feromagnētisko jūgu, kas ļauj iegūt gan stiprāku lauku, gan vienmērīgāku tā sadalījumu, iespējams maksimālais sūkņa attīstāmais spiediens var tikt palielināts gandrīz divas reizes un attiecīgi šķidrā metāla InGaSn ātrums modelī var sasniegt 4.0 m/s. Siltuma zudumu aprēķini parāda, ka siltuma zudumi nerūsējošā tērauda sienās ir vērā neņemami (nerūsējošā tērauda sliktās vadāmības un sienu biezuma salīdzinājumā ar šķidrā metāla slāņa biezuma dēļ). Kopējie siltuma zudumi sūkņa modelī gadījumā, kad netiek izmantota feromagnētiskais jūgs, novērtēti 2.0 kW apmērā. Ja tiek lietots feromagnētiskais jūgs – 4.0 kW [11]. Ņemot vērā šo tika novērtēts, ka eksperimentālajā modelī izmantojams 5 kW motors.

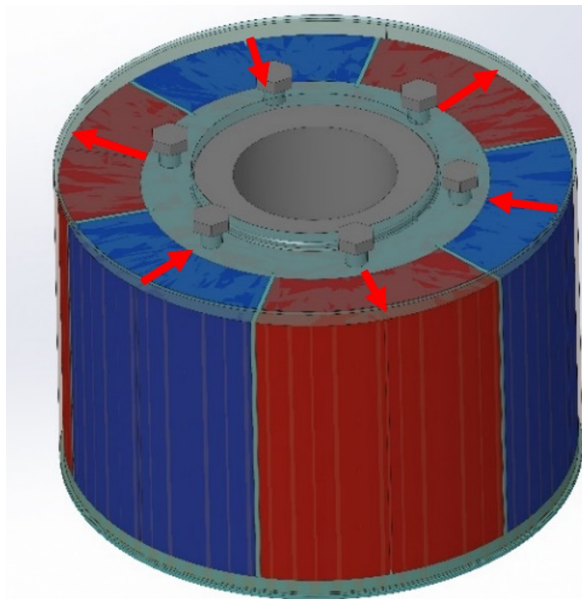


3.6. att. Sūkņa attīstītā spiediena un hidraulisko zudumu kontūrā atkarībā no plūsmas ātruma salīdzinājums: 1) hidrauliskie zudumi (*Series 1*); 2) sūkņa attīstītais spiediens (*Series 2*)

3.1.2. Cilindriska pastāvīgo magnētu sūkņa alumīnijam eksperimentāla izpēte

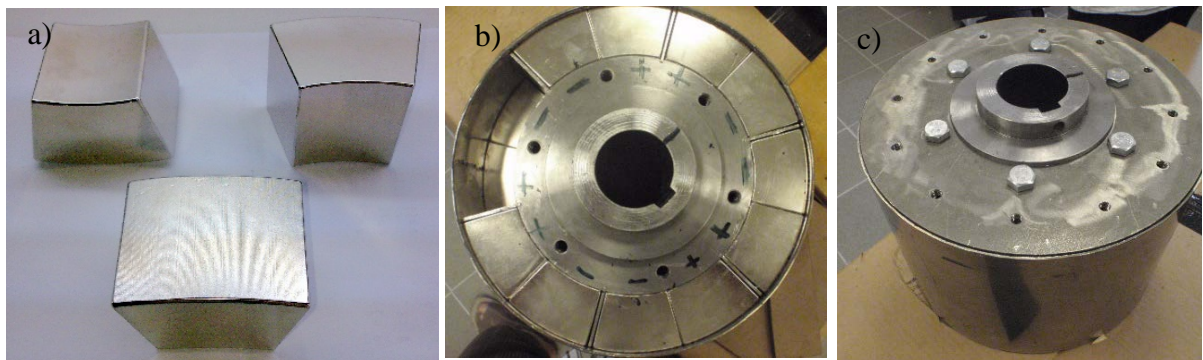
Balstoties uz aprēķināto sistēmas galveno parametru atbilstību industrijas uzstādītajam uzdevumam: vismaz 7 cm nemagnētiskais attālums un iespēja sasniegt 4 m/s lielu plūsmas ātrumu, tika izveidota arī speciāli konstruēts eksperimentālās modelēšanas stends (skat. 3.2. un 3.3. attēlu), izmantojot InGaSn eitektisko sakausējumu, kas ļauj veikt visus mērījumus istabas temperatūrā, jo sakausējuma kušanas temperatūra ir ~ 10 °C. Eksperimentālā iekārta tika veidota atbilstoši 3.1.a) attēlā redzama industriālā uzdevuma pārbaudei, bet iegūtie rezultāti principā ļauj izvērtēt izstrādātās PM sistēmas pielietojamību arī 3.1.b) attēlā redzamajam uzdevumam – alumīnija maisīšanai.

Eksperimentu realizācijai tika izgatavots magnētiskais rotors ar 3 polu pāriem ($N = 6$ vai $p = 3$). Plānotā magnētiskā rotora konstrukcija un magnētisko segmentu savstarpējā orientācija redzama 3.7. attēlā.



3.7. att. Magnētiskā rotora paredzētā konstrukcija un magnētu magnetizācijas virzieni attiecībā pret šķidro metālu

Magnētiskais rotors tika izgatavots no 36 atsevišķiem magnētiskiem segmentiem (skat. 3.8.a) attēlu), tos ievietojot atbilstoši 3.7. attēlā paredzētajam izkārtojumam speciālā nerūsējošā nemagnētiskā tērauda konstrukcijā (skat. 3.8.b) attēlu).

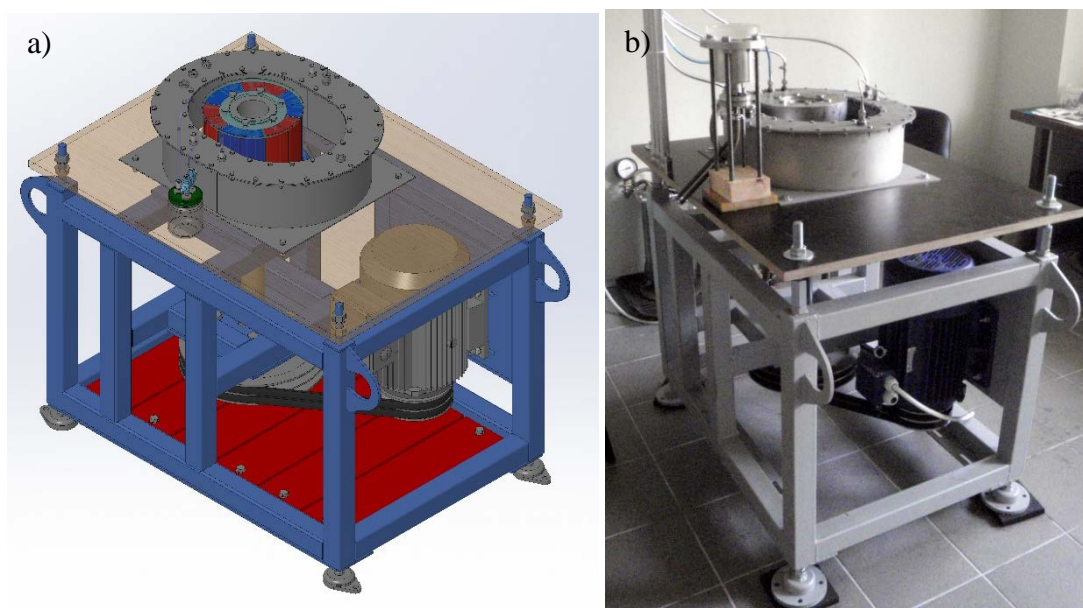


3.8. att. Magnētiskā rotora izgatavošanas process: a) magnētiskie segmenti, no kā tika izgatavots rotors; b) magnētiskais rotors salikšanas procesā; c) salikts magnētiskais rotors

Magnētu salikšana, t.sk. šādā izkārtojumā, magnētu savstarpējās mijiedarbības dēļ ir specifisks un grūts uzdevums. Magnētiskā rotora salikšana tiek sākta saliekot pa pāriem magnētus, kas savstarpēji pievelkas (šajā gadījumā no katra pola malas (atbilstoši 3.7. attēlam viens “zils” magnēts kopā ar vienu “sarkanu”). Tālāk visi saliekamie magnētiskie elementi viens no otra atgrūžas, līdz ar to nepieciešams pielietot speciālus paņēmienus un palīgmehānismus, lai magnētus būtu iespējams ievietot to paredzētajās vietās. Bez palīgmehānismu pielietošanas tas faktiski nav iespējams, jo magnētiskā mijiedarbība vairākas reizes pārsniedz maksimālo cilvēkam iespējamo pieliekamo spēku. Kad magnēti ir salikti, sistēma tiek nostiprināta ar nerūsējošā tērauda vāku (skat. 3.8.c) attēlu). Šeit vāka nostiprināšanas skrūves tiek izmantotas

arī kā gala magnētu ievietošanas palīglīdzeklis – pievelkot skrūves, nerūsējošā tērauda vāks iestumj savā vietā līdz galam visus magnētus, kas līdz tam dabīgi vēlas izkārtoties ar zināmu atstatumu savstarpējās atgrūšanās dēļ.

Magnētiskā rotora kustība tika nodrošināta ar elektromotora piedziņu. Atbilstoši iepriekš veiktajiem aprēķiniem, tika uzstādīts 5.0 kW lielas jaudas motors. Rotācijas ātrums ir viens no optimizējamiem parametriem, līdz ar to tika izvēlēts 3 - fāzu asinhronā motora piedziņu realizēt ar standarta frekvenču pārveidotāju, kas ļauj mainīt motora barošanas strāvas frekvenci sākot no 0.5 Hz līdz 100 Hz. Drošības apsvērumu dēļ piedziņa tika realizēta ar siksnas pievadu, kur, tā kā nebija sagaidāms, ka rotoru būs nepieciešams griezt ar 50 Hz lielu rotācijas frekvenci, tika realizēta papildus 1:2 rotācijas ātruma redukcija, izmantojot šādas attiecības atšķirīga izmēra siksnas pievada diskus. Iekārtas kopējā konstrukcija redzama 3.9. attēlā.



3.9. att. **Kopējā eksperimentālās iekārtas uzbūve:** a) izstrādātā iekārtas konstrukcija; b) izgatavotā eksperimentālās iekārtas ar jau uzstādītu mērīšanas aprīkojumu fotogrāfija

Šajā gadījumā kopējā atkarība starp motora barošanas frekvenci f_{motor} un magnētiskā rotora rotācijas ātrumu n_{rot} bija šāda: n_{rot} (rev/min) = $0.24117 \cdot f_{motor}$ (Hz).

Magnētiskā lauka frekvenci šķidrā metālā pie nulles caurteces ($Q = 0$, vai $s = 1$), var aprēķināt attiecīgi: $f_{ind} = n \cdot p$ Hz.

Izstrādātais magnētiskais rotors tika integrēts noslēgtā hidrauliskā kontūrā (skat. 3.2. un 3.8. attēlus), kur visa kontūra šķērsriezuma laukums bija nemainīgs – tāds pats kā aktīvajā kanāla daļā. Kontūra taisnajā daļā tika iestrādātas divas izejas (pirms un pēc kanāla aktīvās daļas – t.i. kanāla izejā un ieejā), PM sūkņa attīstītā spiediena mērīšanai un ātruma zonžu ievadei vidējota šķidrā metāla ātruma mērīšanai. Šķidrā metāla ātruma mērīšanai tika izmantota Pito caurule [40] un MHD kondukcijas tipa anemometrs analogiski kādu to piedāvāja C. Vives [41].

Kā iepriekš tika parādīts, izveidotā kontūra minimālā hidrauliskā tika novērtēta $\xi = 1.25$. Papildus kontūrā tika iestrādāts vārsts, kas ļāva gandrīz pilnībā noslēgt sistēmu, attiecīgi ļaujot palielināt hidraulisko pretestību.

Eksperimenti tika veikti, izpētot galveno sistēmas parametru – šķidrā metālā vidējo kustības ātrumu un attīstīto spiedienu šķidrājā metālā – mainot šādus ietekmes faktorus:

1. Magnētiskās sistēmas rotācijas ātrumu;
2. Sistēmas hidraulisko pretestību, pakāpeniski aizverot integrēto vārstu no pilnīgi atvērta līdz pilnīgi aizvērtam stāvoklim;
3. Izmantojot vai neizmantojot feromagnētisko jūgu;
4. Rotorā attālumu līdz kanāla aktīvajai daļai.

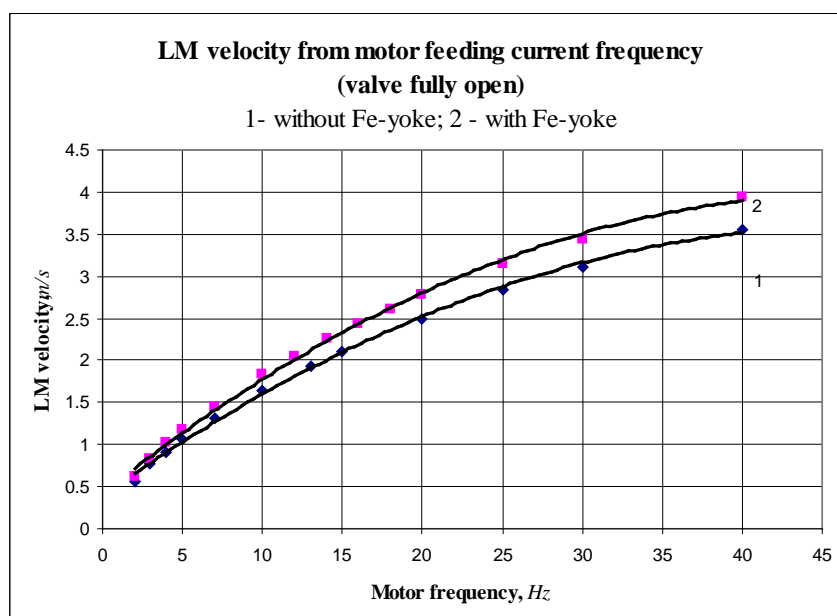
Kā galvenais sasniedzamais parametrs tika izvirzīts minētais tehnoloģiskais uzdevums sasniegt režīmu, kas atbilstu šķidra alumīnija plūsmai ar ātrumu $V = 1-4$ m/s analogiskā industriālā pielietojumā, pie iespējas liela nemagnētiskā attāluma. Eksperimentāli iegūtie rezultāti apkopoti 3.5., 3.6., 3.10., 3.11. attēlos un tabulā 3.1. 3.5.a) attēlā redzams magnētiskā lauka sadalījums pa sūkņa biezumu ($b = 30$ mm) diviem dažādiem gadījumiem: ar un bez feromagnētiskā jūga. Magnētiskais lauks tika mērīts, izmantojot Gausmetru LZ-630 (ražotājs: Linkjoin, Ķīna) ar Halla sensoru. Mērījumu precizitāte sasniedza 2 mT. Grafīkā 3.5. attēlā redzams, ka eksperimentāli nomērītās magnētiskā lauka stipruma vērtības ir mazākas salīdzinājumā ar teorētiski aprēķinātajām. Šo var izskaidrot, ņemto vērā, ka teorētiskie aprēķini tika veikti, izmantojot divu dimensiju tuvinājumu, neņemot vērā nozīmīgu magnētiskā lauka izkliedi dēļ magnētisko līniju noslēgšanās arī 3 dimensijā. Turklāt analītiski ir grūti absolūti korekti ņemt vērā magnētiskā lauka aprēķinā feromagnētiskās pamatnes ietekmi uz magnētisko lauku. Jāpiemin, ka reālajā saliktajā rotorā magnētiskā materiāla aizpildījums ir nedaudz sliktāks – tā kā konstrukcijā ievērotas tolerances pret magnētu izmēru iespējamo ražošanas kļūdu ± 0.1 mm – magnētiem ir niķeļa pārklājums un rodas papildus spraugas starp magnētiem. Papildus tam, reālajā salikumā iespējama neliela lauka samazināšanās mehānisko triecienu rotorā salikšanas procesā dēļ. Novērojams arī, ka, izmantojot feromagnētisko jūgu attiecībā pret rotoru otrā pusē kanālam, magnētiskā lauka stiprums pieaug no 1.3 līdz pat 1.5 reizēm, atkarībā no attāluma līdz magnētisko polu virsmas. 3.5. attēlā novērojams arī ievērojams magnētiskā lauka nevienmērīgums pa kanāla platumu.

Eksperimentāli nomērītā PM sūkņa radītā plūsmas ātruma un spiediena atkarībā no rotācijas frekvences abos gadījumos (ar un bez feromagnētiskā jūga) apkopoti 3.1. tabulā un grafiski attēloti 3.10. un 3.11. attēlā.

PM sūkņa radītā plūsmas ātruma un spiediena atkarībā no rotācijas frekvences

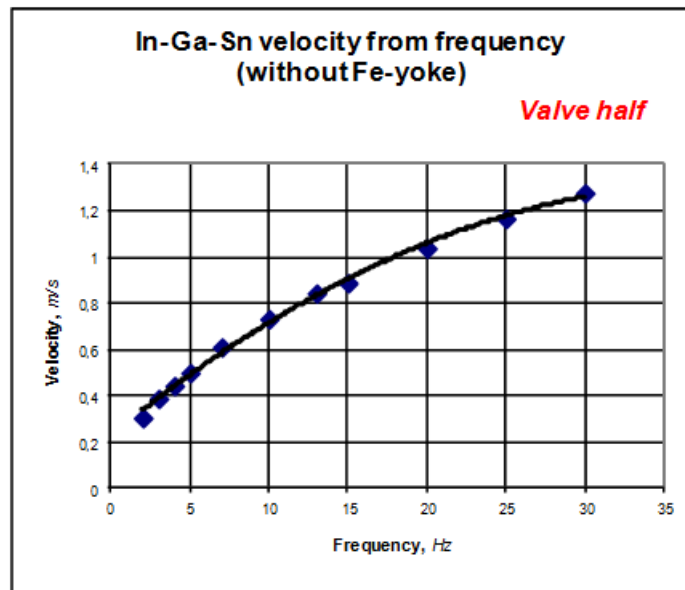
f, Hz	n, rev/s	V _{LM} , m/s bez Fe-jūga	P _{pump} , Pa bez Fe-jūga	V _{LM} , m/s ar Fe-jūgu	P _{pump} , Pa ar Fe-jūgu
5	1,2	1,07	500	1,18	375
10	2,4	1,65	875	1,83	1 313
20	4,8	2,50	2 250	2,78	3 000
30	7,2	3,11	3 438	3,44	4 188
40	9,6	3,56	4 000	3,94	6 188

Šeit redzams, ka pat bez feromagnētiskā jūga pie motora strāvas barošanas frekvences 40 Hz, kas atbilst 9.6 magnētiskā rotora apgriezieniem sekundē, tiek sasniegts $V = 3.5$ m/s liels vidējais šķidrā metāla ātrums kanālā. Izmantojot feromagnētisko jūgu, šādos pašos apstākļos ātrums pieaug līdz 4 m/s (par aptuveni 15%).



3.10. att. Vidējais šķidrā metāla ātrums kanālā atkarībā no magnētiskā rotora rotācijas frekvences: 1 – bez feromagnētiskā jūga, 2 – ar feromagnētisko jūgu

Šeit demonstrētā šķidrā metālā vidējā ātruma atkarība no magnētiskā rotora griešanās frekvences atbilst gadījumam, kad plūsmas hidrauliskā pretestība ir minimāla: kanālā iestrādātais plūsmas vārsts ir pilnībā atvērts un attiecīgi var uzskatīt, ka hidrauliskā pretestība ir $\xi = 1.15$. Ir acīmredzami, ka līdz ar hidrauliskās pretestības palielināšanos, novērojams vidējais šķidrā metāla ātrums samazināsies. Grafikā 3.11. attēlā novērojams, ka pie līdz pusei aizvērtā šīs plūsmas vārsta un attiecīgi aptuveni trīs reizes lielākas hidrauliskās pretestības, vidējais ātrums kanālā ievērojami palielinās. Salīdzinājumam redzams, ka pie frekvences $f = 25$ Hz šādā gadījumā ātrums ir tikai $V = 1.2$ m/s, bet, kad vārsts ir atvērts (skat. 3.10. attēlu), vidējais ātrums kanālā ir $V_{avr} = 2.9$ m/s.

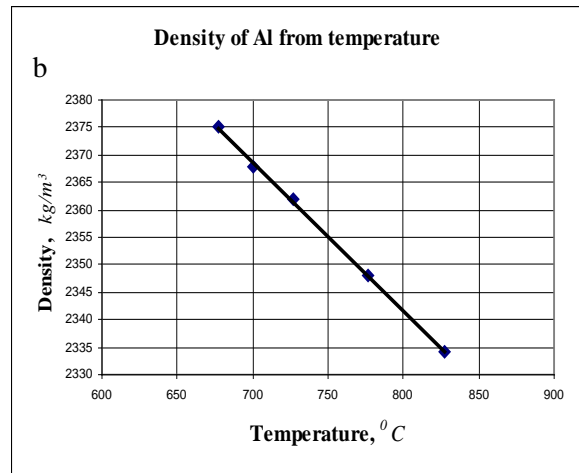
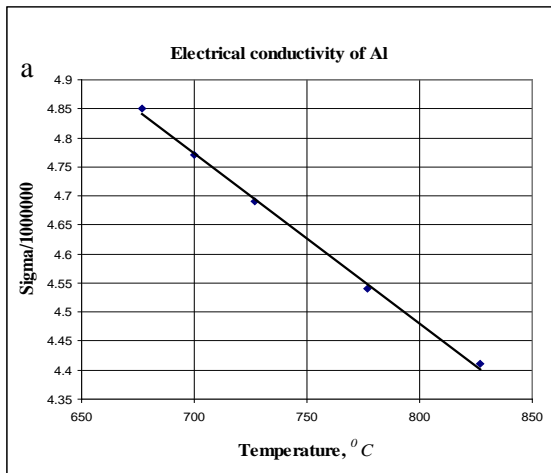


3.11. att. Šķidrā metāla vidējais ātrums sūkņa kanālā atkarībā no motora barošanas strāvas frekvences variantam bez feromagnētiskā jūga, bet ar līdz pusei aizvērtu kanālā iebūvēto plūsmas vārstu

Jāatzīmē, ka arī eksperimentāli novērotais ātrums $V = 1.0 \text{ m/s}$ ar atbilstošo caurteci $Q = 7.5 \text{ L/s}$ pie šāda nemagnētiskā 7 cm attāluma ir visai labs rezultāts, it īpaši ņemot vērā, ka reāli patērētā motora jauda varētu būt mazāka nekā 3 kW , un attiecīgi šāds risinājums varētu atbilst arī daudzām citām tehnoloģiskajām problēmām.

3.1.3. Cilindriskā PM sūkņa izpētē ar InGaSn sakausējumu iegūto rezultātu ekstrapolācija pielietojumiem ar šķidru alumīniju

Fizikālajā modelēšanā izmantotā InGaSn sakausējuma fizikālās īpašības tuvu atbilst šķidra alumīnija īpašībām (skat. 3.12. attēlu). Šī atbilstība ir arī galvenā priekšrocība, kāpēc šādas sakausējums tika izvēlēts. InGaSn sakausējumam ir relatīvi augsta elektrovadāmība, kas ir tikai par aptuveni 30% mazāka par alumīnija elektrovadītspēju reālos industriālos apstākļos. Viskozitāte InGaSn eitektikai un šķidram alumīnijam praktiski neatšķiras – InGaSn tā ir tikai nedaudz zemāka, bet šīs atšķirības ietekme uz sistēmas hidrauliskajiem parametriem ir praktiski vērā neņemama. Turklāt, ja PM sistēma tiek izmantota maisīšanai (nevis sūkņēšanai), lielākas viskozitātes metāls dos labākus rezultātus. Lielākā atšķirība šiem diviem sakausējumiem ir blīvumā: InGaSn blīvums ir 2.7 reizes lielāks nekā šķidram alumīnijam. Tā kā alumīnijam ir ievērojami zemāks blīvums pie vienādas spiediena starpības un hidrauliskās pretestības sistēmā, alumīnija gadījumā tiks sasniegti ievērojami augstāki šķidrā metāla ātrumi un caurteces.



3.12. att. Šķidra alumīnija fizikālo īpašību atkarība no temperatūras: a) elektriskā vadāmība; b) blīvums

Tātad InGaSn zemākas elektrovadāmības un augstāka blīvuma dēļ reālā darbā ar šķidru alumīniju konkrētā cilindriskā PM sūkņa (un jebkuras citas uz InGaSn modelētas MHD iekārtas) efektivitāte būs augstāka nekā eksperimentāli modelētā. Attiecīgi nepieciešams veikt parametru pārrēķinu. Pirmajā tuvinājumā sistēmas attīstītais spiediens ir proporcionāls elektriskajai vadāmībai, kā tas redzams vienādojumā (3.1.). Blīvuma atšķirības dēļ alumīnija plūsma būs aptuveni 1.6 reizes lielāka. Savukārt, sistēmā ar šķidru alumīniju var būt ievērojami augstāka hidrauliskā pretestība. Saskaņā ar [33], ξ_{Al} var būt 2 - 3 reizes augstāka salīdzinājumā ar modelējošo eksperimentu. Šajā gadījumā tātad alumīnija caurteci un plūsmas ātrumu var izteikt kā:

$$P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad \text{un} \quad V = \sqrt{\frac{2P}{\xi \cdot \rho}}; \quad (3.7.)$$

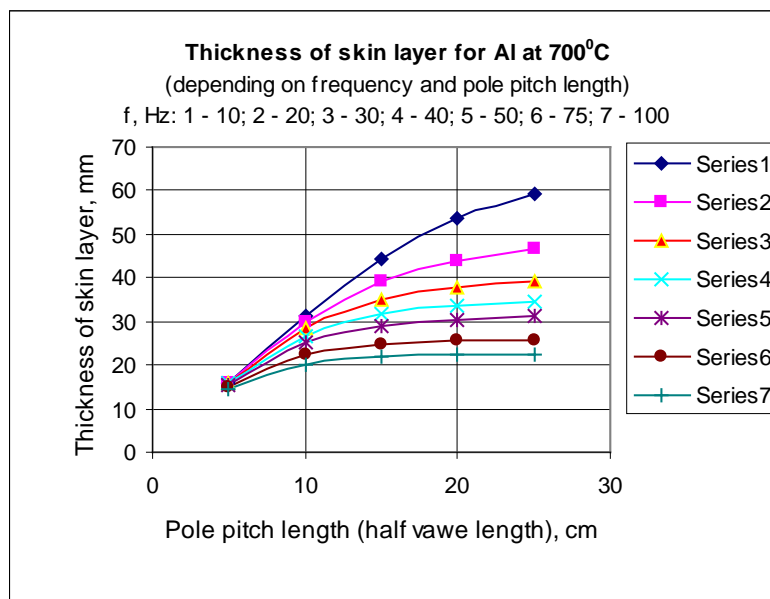
Līdz ar to ar vienādiem PM sūkņa parametriem un vienādas sistēmas kopējās ģeometrijas, pieņemot, ka ξ_{Al} ir 2-3 reizes lielāka, sagaidāmo ātrumu šķidrā alumīnijā un InGaSn novērtējot, iegūst:

$$\frac{V_{Al}}{V_{Mod}} = \sqrt{\left(\frac{2P_{Al}}{\xi_{Al} \cdot \rho_{Al}}\right) / \left(\frac{2P_{Mod}}{\xi_{Mod} \cdot \rho_{Mod}}\right)} = \sqrt{\frac{P_{Al}}{P_{Mod}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Mod}}{\rho_{Al}}} \cdot \sqrt{\frac{\xi_{Al}}{\xi_{Mod}}} \approx \sqrt{1.3 \cdot 2.7 \cdot 3} = 1.15;$$

Redzams, ka, ātrumu mērogs abos variantos ir vienāds, un alumīnijā sagaidāms, ka plūsmas ātrumi varētu būt aptuveni par 15% lielāki.

Tā kā alumīnijam un InGaSn atšķiras vadītspējas, mainās arī skinslāņa dziļums, kurā metālā tiek inducēti elektromagnētiskie spēki. Pie esošajiem modeļa parametriem, un kad magnētiskā laika skriešanas ātrums ir $V_B = 15.84$ m/s (pie rotora rotācijas frekvences $n = 12$ rpm), skinslānis InGaSn modelī $\delta_{mod} = 42$ mm, bet alumīnijā, pie šiem pašiem apstākļiem, $\delta_{Al} = 30$ mm. Attiecīgi var secināt, ka modelī izmantotais kanāla biezums (jeb modelī "b" izmērs)

30 mm ir tuvu optimālajai vērtībai. 3.13. attēlā apkopota skinslāņa δ_{Al} atkarība no rotācijas frekvences un polu soļu garuma τ (attāluma starp blakus esošajiem magnētiskajiem poliēm).



3.13. att. Skinslāņa biezums atkarībā no frekvences un polu soļu garuma

3.1.4. Secinājumi par Cilindriska PM sūkņa pielietojamību alumīnija metalurģijā

- Pastāvīgo magnētu cilindriskā sūkņa ar relatīvi lielu nemagnētisko attālumu teorētiskie aprēķini un eksperimentālie rezultāti pierāda, ka apskatāmajā variantā attiecīgajā MHD ierīcē aprēķinātais šķidrā metāla vidējais ātrums var sasniegt 3.5 – 4.0 m/s.
- Modeļu eksperimentos iegūtajos rezultātos parādīts, ka vidējais ātrums 4.0 m/s ar sakausējumu InGaSn ir sasniedzams tikai pielietojot feromagnētisko jūgu, bet plūsmā ar šķidro alumīniju tiktu sniegts arī bez tā.
- Konstatēts, ka norādītie ātrumi sasniedzami pie spraugām starp metālu un magnētu $d \leq 70$ mm. Šis ir minimālais industrijā pieļaujama attālums, bet noteikti ne vēlams, it sevišķi ņemot vērā kopējo tendenci sienu biezumus drošības nolūkos arvien palielināt. Lai būtu iespējams ar šeit apskatīto koncepciju strādāt pie lielākiem nemagnētiskajiem attālumiem iespējams:
 - Izmantot feromagnētisko jūgu;
 - Palielināt magnētiskā rotora izmērus – gan rotora diametru gan garumu.
- Lielākajā daļā industriālo pielietojumu t.sk. alumīnija metalurģijā nepieciešami ievērojami mazāki ātrumi par 4 m/s. Vienlaicīgi var būt nepieciešamas lielākas caurteces un/vai spiedieni. Līdz ar to iespējams, ka izstrādātā koncepcija ir drīzāk piemērotāka citu tehnoloģisko uzdevumu realizācijai. Lai to novērtētu nepieciešama papildus analīze analogiska šeit veiktajai un attiecīgi uzskatāms par vienu no nākamajiem soļiem koncepcijas tālākā attīstībā.
- Kā minēts 3.1.1. nodaļā, magnētisko lauku darba vielā iespējams palielināt arī mainot magnētiskā materiāla konfigurāciju. Attiecīgi kā nākamais solis šajā darbā tika izvēlēts

pārbaudīt iespēju šo un citus iepriekš uzstādītos uzdevumus risināt ar cita veida pastāvīgo magnētu sistēmām.

6. Galvenais koncepcijas trūkums ir tas, ka nevar izmanto kanālus ar sienu biezāku par 70 mm, jo pie biezākām sienām ievērojami samazinās maksimāli sasniedzamais magnētiskais lauks. Savukārt plāno sienu dēļ, palielinās temperatūra uz ārējās, piemēram, krāsns sienas un samazinās mehāniskā izturība, kas savukārt noved pie ierobežotas iespējamās konkrētās sistēmas industriālā pielietojuma.

Šajā nodaļā veikto pētījumu rezultāti atspoguļoti sekojošās publikācijās:

1. Beinerts, T., Buceniņš, I., Bojarevičs, A., Gelfgat, Yu. Possibility to use cylindrical pumps with permanent magnets in metallurgical facilities for aluminium alloys. *Magnetohydrodynamics*. 2015, 51(4), 757-769. ISSN 0024-998X
2. Bojarevičs, A., Beinerts, T., Gelfgat, Yu., Kaldre, I. Use of Permanent Magnets in Electromagnetic Facilities for the Treatment of Aluminum Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016, 47(3), 1626–1633. ISSN 1073-5615. e-ISSN 1543-1916. Available from: doi: 10.1007/s11663-016-0646-5.

3.2. Diskveida sūkņa centrālās sistēmas izpēte pielietojamībai alumīnija metalurģijā

3.2.1. Koncepcijas un eksperimentālās iekārtas vispārējs apraksts

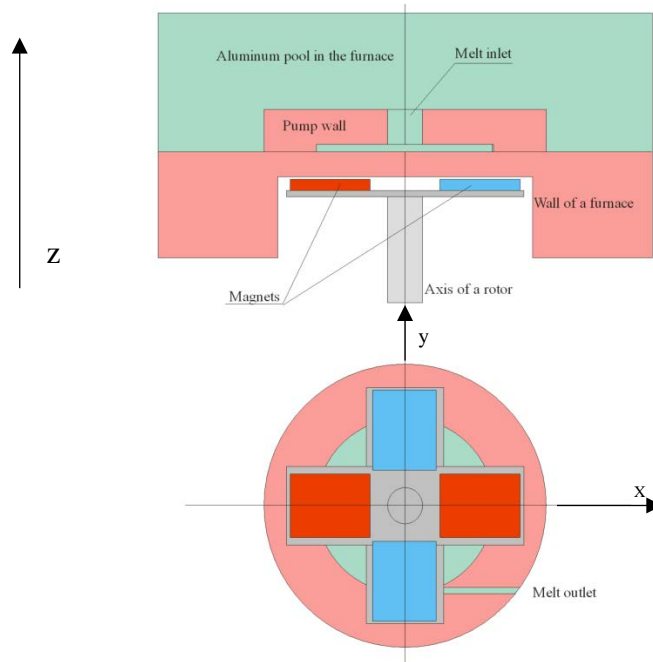
Iepriekšējā nodaļā tika parādīts, ka cilindriskā tipa sūknis spēj izpildīt konkrēto industriālo uzdevumu, bet koncepcijas kopējās pielietojamības robežas ir stipri ierobežotas. Nepieciešams meklēt koncepciju, kas var sasniegt industrijai atbilstošu šķidrā metāla plūsmu arī ar nemagnētiskajiem attālumiem lielākiem par 7 cm, un bez feromagnētiskā jūga izmantošanas, jo tā realizācija industriālos apstākļos ir praktiski neiespējama.

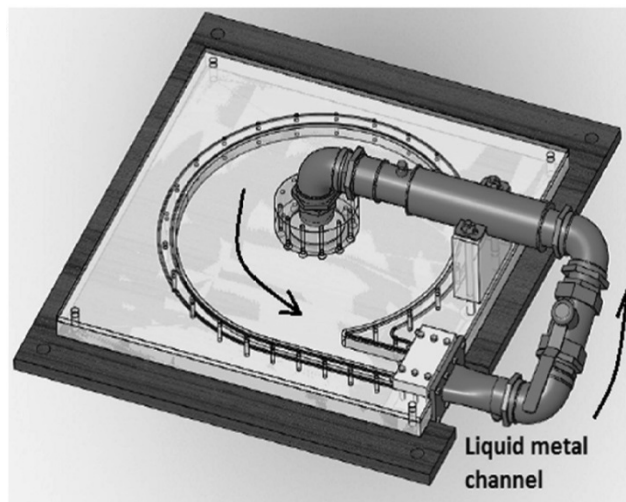
Ka minēts 2. nodaļā, šobrīd pētītās pastāvīgo magnētu MHD sistēmas var iedalīt cilindriskajās un diskveida. Līdzīgi kā cilindrisko sūkņu gadījumā, arī diskveida un centrālās tipa sūkņi ir samērā plaši iepriekš apskatīti literatūrā [35], [42], t.sk. salīdzinoši nesenos darbos [43]. Tomēr, pirmkārt, šādas sistēmas nav apskatītas tieši to pielietojamības augstu kušanas temperatūras metālu metalurģijas kontekstā, un, otrkārt, limitēta uzmanība veltīta pastāvīgo magnētu sistēmām centrālās sūkņu realizācijai. Jāatzīmē gan, ka Japānas uzņēmuma patentētā un industrijā izmantotā sistēmā ir saskatāmas zināmas analogijas (skat. 9.2. pielikumu), tomēr tā apskatīta nedaudz citiem pielietojumiem alumīnija metalurģijā, tur piedāvāts sistēmu pielietot būtiski atšķirīgās rezervuāra/krāšņu ģeometrijās un aprakstītā magnētiskā sistēma nav optimāla arī tur apskatītā uzdevuma risināšanai [61].

Attiecīgi kā nākamais uzdevums darba izvirzītā mērķa sasniegšanai bija izpētīt diskveida sūkņu pielietojamību augstas kušanas temperatūras metālu metalurģijā. Uzdevums tika realizēts analogiski cilindriskā tipa sūknim – sākot ar analītiskiem sistēmas novērtējumiem, beidzot ar eksperimentāliem p mērogotiem eksperimentiem un mērogošanas aprēķiniem. Arī šī sistēma tika izpētīta kontekstā ar industrijas uzstādīto uzdevumu radīt liela ātruma šķidrā metāla (alumīnija) plūsmu kādā krāsns apgabalā. Sistēmai ir potenciāls radīt pietiekami spēcīgu plūsmu maisīšanai maza izmēra alumīnija krāsnī vienmērīga kausējuma temperatūras un

sastāva sasniegšanai. Līdzīgi kā cilindriskā tipa PM sūkņa gadījumā, šeit magnētiskajam laukam jābūt pietiekami spēcīgam arī pie salīdzinoši liela nemagnētiskā attāluma. Magnētiskā lauka skriešanas ātrumu (rotācijas frekvenci) un efektīvā metāla slāņa augstumu joprojām ierobežos skinefekts. Galvenā motivācija atbilstoši 2. nodaļā minētajam ir potenciāli ievērojami augstāka efektivitāte salīdzinot ar tradicionālajiem 3 - fāzu strāvas skrejošā lauka induktoriem.

Apskatītā piedāvātā centrālās tipa pastāvīgo magnētu induktora shematiskais attēlojums redzams 3.14. att. Iekārtas uzbūves pamatā ir plaknē izvietoti 4 magnētiskie poli (2 polu pāri), kuri tiek rotēti ap asi, izmantojot piedziņu no elektromotora. Rotējoši pastāvīgo magnētu sistēma šķidrā metāla (alumīnija) tilpumā rada mainīgu magnētisko plūsmu, kas savukārt inducē virpuļveida elektrisko strāvu, kurai, līdzīgi kā visās MHD iekārtās, mijiedarbojoties atkal ar primāro magnētisko lauku, tiek radīts elektromagnētiskais spēks. Pie šāda magnētiskā lauka sadalījuma un rotācijas noteiktajā rezervuāra ģeometrijā tiek radīts virpuļveida elektromagnētiskais spēks, arī šķidrā metāls sāk rotēt, turklāt tajā pašā virzienā, kurā pastāvīgo magnētu sistēma. Līdzīgi kā klasiskā centrālās sūknī, nevienmērīgais centrālās sadalījums meridionālā virzienā rada papildus plūsmu arī šajā virzienā.





3.14. att. Piedāvātā PM centrālās tipa sūkņa (augšā) un attiecīgās eksperimentālās sistēmas (lejā) shematisks attēlojums

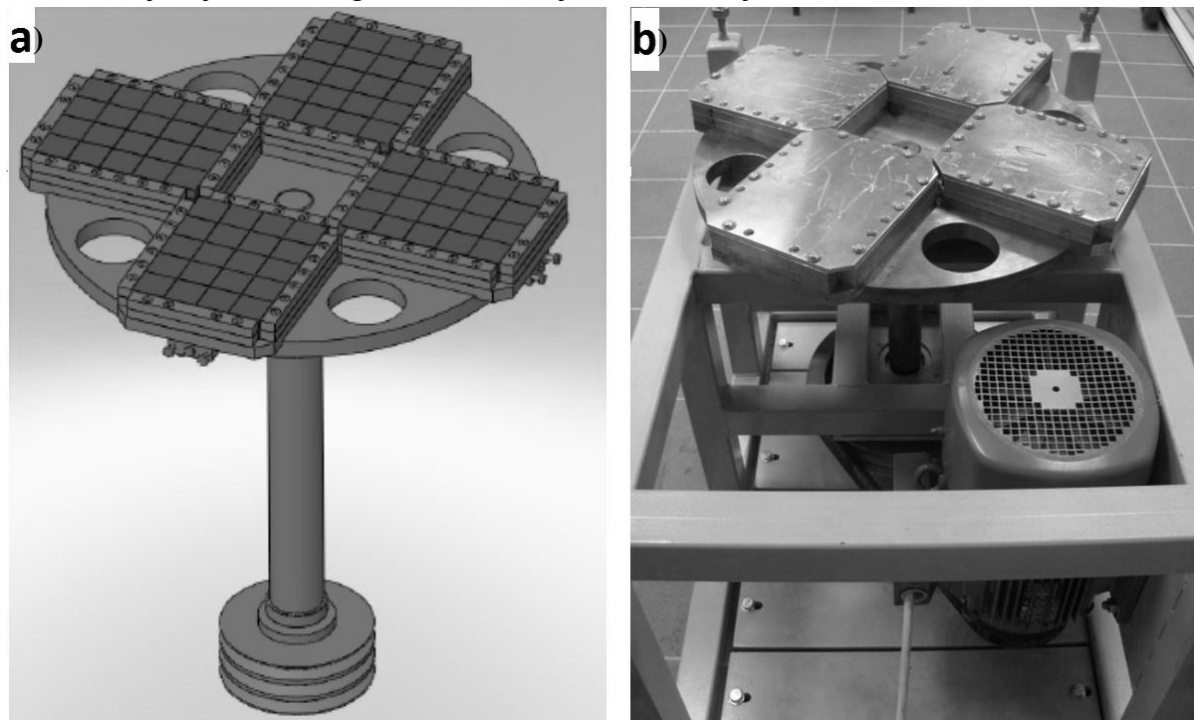
Lai radītu orientētu liela ātruma plūsmu mērķtiecīgam alumīnija transportam un uzdevuma risinājumam, kas atbilst arī iepriekšējā nodaļā apskatītas iekārtas uzdevumam, diskveida rezervuāram papildus tiek izveidota tangenciālā izeja. Turklāt arī pats rezervuārs tiek veidots ar mainīgu rādiusu, kur pirms izejas tas ir nedaudz lielāks, bet pēc – mazāks. Šāda “gliemežvāka veida” rezervuāra forma nodrošina izejā tangenciāli vērstu plūsma ar pilnu dinamisko spiedienu. Rezervuāra ieeja tiek veidota ar relatīvi lielu, 10 cm diametrā, ieeju tā centrā vertikāli no “augšas”, lai samazinātu hidraulisko pretestību. Jāatzīmē vēlreiz, ka citur [61], (skat. 8.2. pielikums) apskatīta pieeja maksimālas integrālās plūsmas radīšanai metāla transportam un šeit veidotā ģeometrija ir būtiski atšķirīga (īpaši iekārtas ģeometrija).

Sistēmas eksperimentālai pārbaudei tika izveidota modelējoša iekārta ar InGaSn sakausējumu, tomēr izveidotās eksperimentālās iekārtas magnētiskā sistēma tika veidota ar tādu aprēķinu, lai tā varētu strādāt arī sistēmā ar šķidru alumīniju gan minētās plūsmas radīšanai, gan kausējuma samaisīšanai. Turklāt, ja uzdevums ir kausējumu tikai samaisīt, tad rezervuāram nebūtu nepieciešamas nekādas papildus modifikācijas sienām vai grīdai (izņemot samazināto sienas biezumu sūkņa reģionā), kas ir īpaši tehniski sarežģīts uzdevums alumīnija gadījumā. Jāatzīmē, ka, sistēmu izmantojot kā maisītāju (nevis plūsmas radīšanai, tātad kā sūkni), maksimālais sasniedzamais ātrums būtu ievērojami mazāks, bet tilpuma caurtece – lielāka.

3.2.2. Magnētiskās sistēmas apraksts

Eksperimentālās iekārtas izveidošanai, tāpat kā 3.1. nodaļā aprakstītās sistēmas gadījumā, tika izmantoti NdFeB magnēti to pieejamās cenas un augstās paliekošās magnetizācijas $B_r = 1.4 \text{ T}$ dēļ. Katrs pols (skat. 3.14. attēlu) tika veidots 22.5 cm garš un 18 cm plats. Attālums starp poliem: 20 cm. Iekārta veidota gan laboratorijas testiem, kuros tiks izmantots zemas temperatūras InGaSn eitektiskais sakausējums, gan eksperimentiem alumīnija rezervuārā. Alumīnija testu gadījumā bija paredzams, ka būs ievērojami lielāks nemagnētiskais attālums, līdz ar to konstrukcijā paredzēta iespēja polu biezumu (augstumu) palielināt no 3 cm uz 4.5 cm. Rotējošā pastāvīgo magnētu pamatne ir veidota no feromagnētiskā tērauda, lai

pastiprinātu magnētiskā lauka plūsmu virs magnētiem, kā arī vienlaicīgi samazinātu magnētiskā lauka plūsmu citos virzieniem drošības apsvērumu dēļ. Kopējais magnētiskās sistēmas diametrs bija 690 mm, bet rotora izmērs: 713 mm. Rotora ass pie iekārtas rāmja stiprināta ar diviem liela izmēriem ruļļu tipa gultņiem. Ass rotācija tiek piedzīta izmantojot celiņsiksnu un 7.5 kW motoru. Rotora rotācijas ātrumu iespējams regulēt, izmantojot standarta frekvenču pārveidotāju, kurš maina motora barošanas strāvas frekvenci. Lai arī kopējie rotora izmēri (skat. izgatavoto rotoru 3.15. attēls) un svars bija ievērojams, mehāniskie testi parādīja, ka pie plānotā maksimālā apgriezienu skaita 12 Hz (720 apgriezieni minūtē), pat bez papildus balansēšanas, rotora rotācija bija vienmērīga un bez ievērojamām vibrācijām.

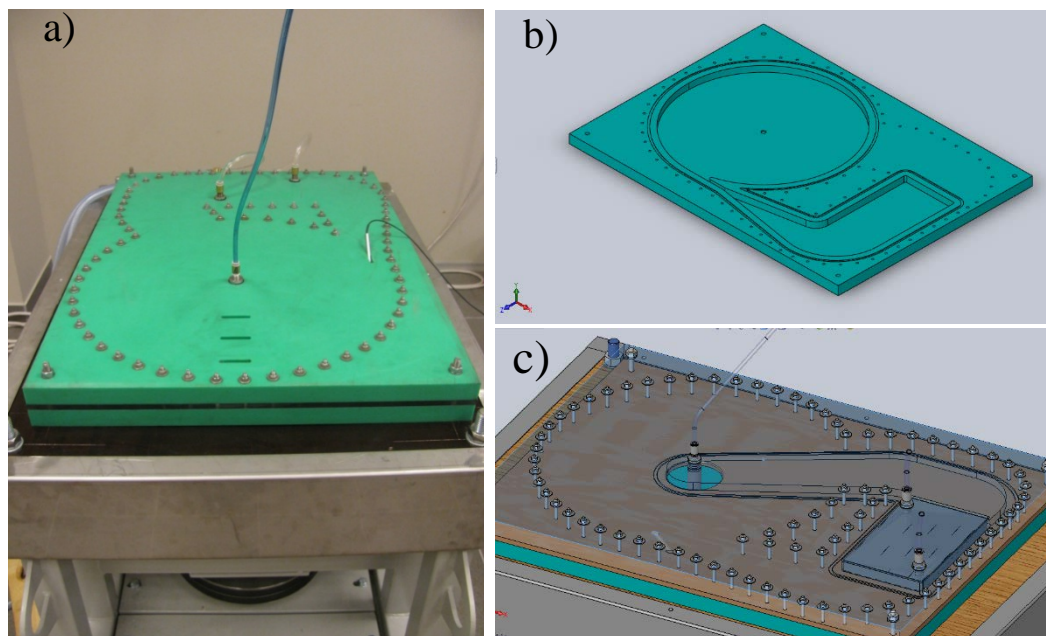


3.15. att. **Pastāvīgo magnētu rotors:** a) Rotora tehniskais zīmējums; b) izgatavotais magnētiskais rotors kopā ar elektromotoru un rāmi

Laboratorijas apstākļos eksperimentos ar šķidru InGaSn eitektiku nemagnētiskais attālums starp pastāvīgajiem magnētiem un šķidro metālu tika mainīts diapazonā no 57mm līdz 97 mm, kas ir tuvs industrijā minimāli izmantotajam.

Laboratorijas eksperimentos izmantoto kanālu tika izvēlēts izgatavot no plastmasas un organiskā stikla dēļ, pirmkārt, vienkāršākas mehāniskās apstrādes un iespējas izveidot salīdzinoši sarežģītus risinājumus, un, otrkārt, dēļ iespējas konkrētās izvēlētas plastmasas kanālus izmantot labi kopā ar ultraskaņas ātruma mērīšanas zondēm [62] dēļ līdzīgā skaņas ātruma šajā plastmasā un izmantotajā metālā. Eksperimentālajā izpētē izmantotais sakausējums bija pieejams ierobežotā daudzumā, līdz ar to nebija iespējams tieši izmantot 3.14. attēlā redzamo kanāla risinājumu, jo tas prasītu pārāk lielu šķidrā metāla daudzumu. 3.16.attēlā redzams izvēlētais kanāla risinājums, kas paredzēja vairākkārtēju plastmasas plāksņu salikumu, kur pirmajā plāksnē tika iestrādāts darba rezervuārs un izejas kanāls (3.16. b) attēls), bet augšējā

plāksnē atpakālejošais kanāls un papildus iestrādāts dzesētājs (3.16. c) attēls). Dzesētājs nepieciešams, lai noņemtu siltumu no šķidrā metāla, kas tajā radīsies tajā inducēto strāvu dēļ un attiecīgi Džoula silšanai.



3.16. att. Izgatavotās centrālās tipa iekārtas kanāla risinājums: a) izgatavotais kanāls; b) pirmā kanāla plāksne ar tajā iestrādātu šķidrā metāla rezervuāru un izejas kanālu; c) atpakāplūsmas kanāls ar iestrādātu ūdens dzesētāju

3.2.3. Magnētiskā lauka aprēķins.

Pastāvīgo magnētu rotora radītā magnētiskā lauka sadalījums vispirms tika novērtēts analītiski, izmantojot MathCad programmu, bet arī vēlāk tika aprēķināts trīs dimensijās, izmantojot Comsol skaitlisko aprēķinu programmatūru. Analītiskais aprēķins tika veidots pa pamatu izmantojot pieejamo analītisko izteiksmi magnētiskā lauka sadalījumam ap taisnstūrveida pastāvīgo magnētu [44], ieviešot vienotu koordinātu sistēmu diviem šādiem taisnstūrveida magnētiem, un tos izvietojot telpā atbilstoši piedāvātajai sistēmai (skat.3.14. attēlu). Tātad aprēķins tika veikts tikai diviem magnētiem, ņemot vērā magnētiskās sistēmas simetriju. Aprēķinā izmantotie mainīgie lielumi apkopoti 3.2. tabulā.

3.2. tabula

Aprēķinā izmantotie un nodefinētie mainīgie

Simbols	Vērtība	Mērvienība	Paskaidrojums
Br	1.4	T	Pastāvīgo magnētu remanence
a	0.225	m	Katra pola radiālais izmērs
b	0.18	m	Katra magnētiskā pola platums
h	0.016	m	Magnētiskā pola augstums (t.sk. efektīvais augstums ņemot vērā feromagnētisko pamatni)
Gap	0.2	m	Centrālais attālums starp poliem

Aprēķinā izmantotie un nedefinētie mainīgie (turpinājums)

gap	0.057	m	Vertikālais attālums no magnētiskajiem poliem līdz šķidrā metāla pamatnei
$\tau=a+Gap$			Solis
Mainīgais			Paskaidrojums
$x := -\left(a + \frac{Gap}{2} + 0.05\right), -\left(a + \frac{Gap}{2} + 0.049\right) .. a + \frac{Gap}{2} + 0.05$			Radiālās koordināte X un tās diapazons
$y := -b, -b + 0.001 .. b$			Azimutālā koordināte Y, un tās diapazons
$z := -0.04, -0.0399 .. 0.12$			Vertikālā koordināte Z, un tās diapazons
$m := 0 .. 1$			Pola numurs (1 vai 0)
$gxt_m := a + \frac{Gap}{2} - m \cdot \tau$			Papildus mainīgie vienādojumu vienkāršošanai
$gyt := \frac{b}{2}$			
$gzt := h + gap$			

Aprēķini un analītiskie pārveidojumi tika veikti programmā MathCad. Ievietojot atbilstošos mainīgos un veicot summēšanu pa diviem poliem var iegūt magnētiskā lauka aprēķināšanas izteiksmes, kas aprēķināmas joprojām arī analītiski. Magnētiskā lauka radiālo komponenti var aprēķināt:

$$B_{xt}(x, y, z) := \sum_{m=0}^1 \left[(1)^m \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left[(-1)^{i+j+k} \cdot \ln \left[\frac{y + gyt - (j-1) \cdot b + \sqrt{[x + gxt_m - (i-1) \cdot a]^2 + [y + gyt - (j-1) \cdot b]^2 + [z + gzt - (k-1) \cdot h]^2}}{[x + gxt_m - (i-1) \cdot a]^2 + [y + gyt - (j-1) \cdot b]^2 + [z + gzt - (k-1) \cdot h]^2} \right] \right] \right]$$

Magnētiskā lauka indukcijas azimutālā komponente:

$$B_{yt}(x, y, z) := \sum_{m=0}^1 \left[(1)^m \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left[(-1)^{i+j+k} \cdot \ln \left[\frac{x + gxt_m - (i-1) \cdot a + \sqrt{[x + gxt_m - (i-1) \cdot a]^2 + [y + gyt - (j-1) \cdot b]^2 + [z + gzt - (k-1) \cdot h]^2}}{[x + gxt_m - (i-1) \cdot a]^2 + [y + gyt - (j-1) \cdot b]^2 + [z + gzt - (k-1) \cdot h]^2} \right] \right] \right]$$

Magnētiskā lauka indukcijas vertikālā komponente:

$$B_{zt}(x, y, z) := \sum_{m=0}^1 \left[(1)^m \frac{B_r}{4\pi} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left[(-1)^{i+j+k} \cdot \left[\operatorname{atan} \left[\frac{[x + gxt_m - (i-1) \cdot a] \cdot [z + gzt - (k-1) \cdot h]}{[y + 0.00000001 + gyt - (j-1) \cdot b] \cdot \sqrt{[x + gxt_m - (i-1) \cdot a]^2 + [y + gyt - (j-1) \cdot b]^2 + [z + gzt - (k-1) \cdot h]^2}} \right] \dots + \operatorname{atan} \left[\frac{[x + gxt_m - (i-1) \cdot a] \cdot [z + gzt - (k-1) \cdot h]}{[x + 0.00000001 + gxt_m - (i-1) \cdot a] \cdot \sqrt{[x + gxt_m - (i-1) \cdot a]^2 + [y + gyt - (j-1) \cdot b]^2 + [z + gzt - (k-1) \cdot h]^2}} \right] \right] \right]$$

Ievietojot pētāmās sistēmas reālos parametrus var aprēķināt konkrētas magnētiskā lauka indukcijas vērtības. Šeit tālāk aprēķinātas magnētiskā lauka vērtības ap šķidrā metāla rezervuāra perimetru pie $x = 0.25$ m pie trīs vertikālām pozīcijām:

- 1) Rezervuāra augšpusē $z = 0.02$ m;
- 2) Izkusušā metāla vidū ;
- 3) Izkusušā metāla apakšā.

Izrēķinot iegūst:

$$B_{zt}(0.25, 0, 0.02) = -0.13529 \text{ T};$$

$$B_{zt}(0.25, 0, 0.001) = -0.12229 \text{ T};$$

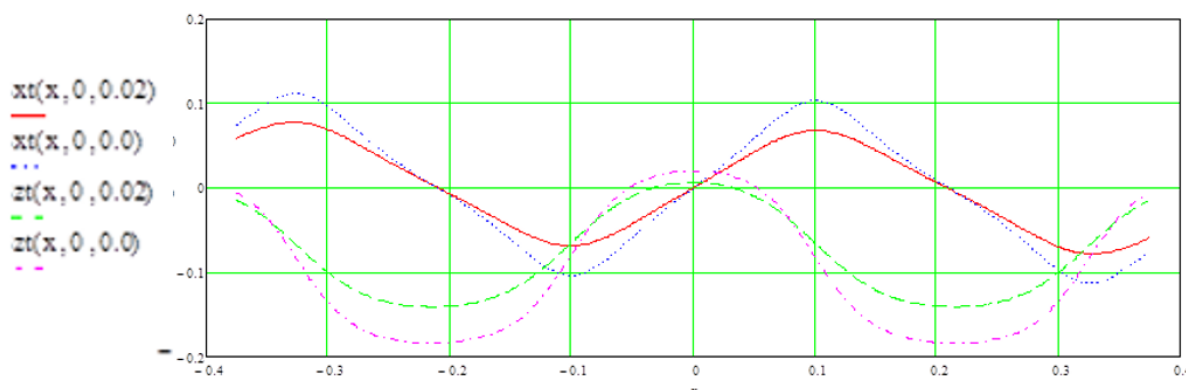
$$B_{zt}(0.25, 0, 0.0) = -0.17827 \text{ T};$$

$$B_{xt}(-.25, 0, 0.002) = -0.031 \text{ T};$$

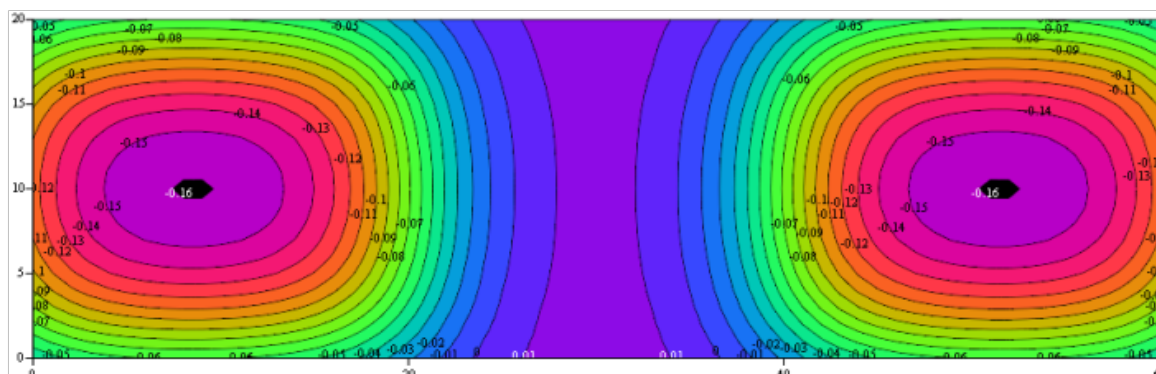
$$B_{xt}(-.25, 0, 0.001) = -0.035 \text{ T};$$

$$B_{xt}(-.25, 0, 0.0) = -0.038 \text{ T}.$$

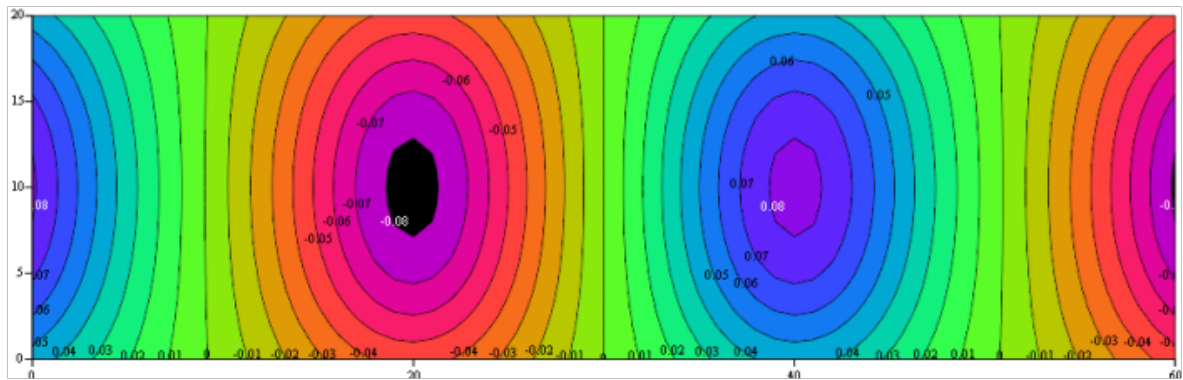
Magnētiskā lauka indukcijas gan radiālā, gan vertikālā komponente šķidrā metālā augšējā un apakšējā daļā grafiski atainota 3.17. attēlā, savukārt 3.18., 3.19. un 3.20. attēlos aplūkojamas magnētiskā lauka indukcijas raksturs rezervuāra vidū. Veidojot 3.20. attēlu ņemta vērā izmantotā simetrija attēla vidū.



3.17. att. Radiālā un vertikālā magnētiskā lauka indukcija atkarībā no radiālās pozīcijas x šķidrā metālā augšējā daļā pie $z = 0.02$ m un apakšējā daļā $z = 0$ m

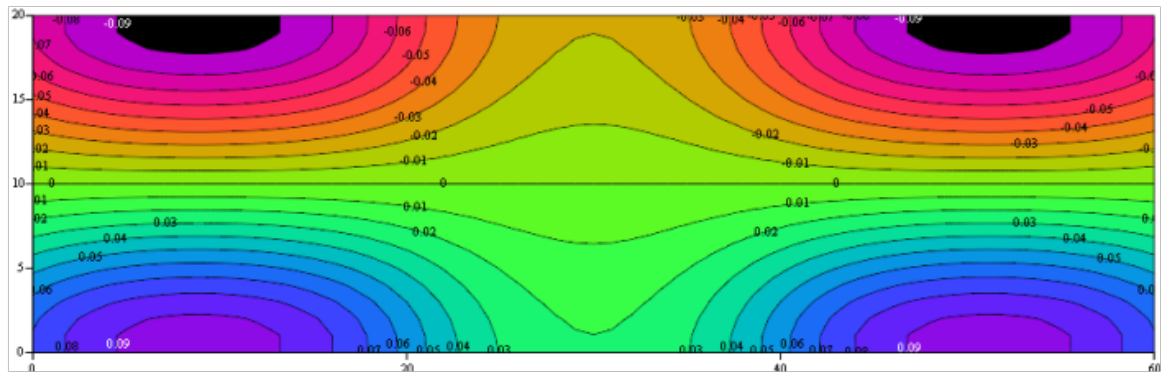


3.18. att. Magnētiskā lauka indukcijas vertikālās komponentes izolīniju grafiks pie $z = 0.01$ (rezervuārā vidus)



B_{xZ}

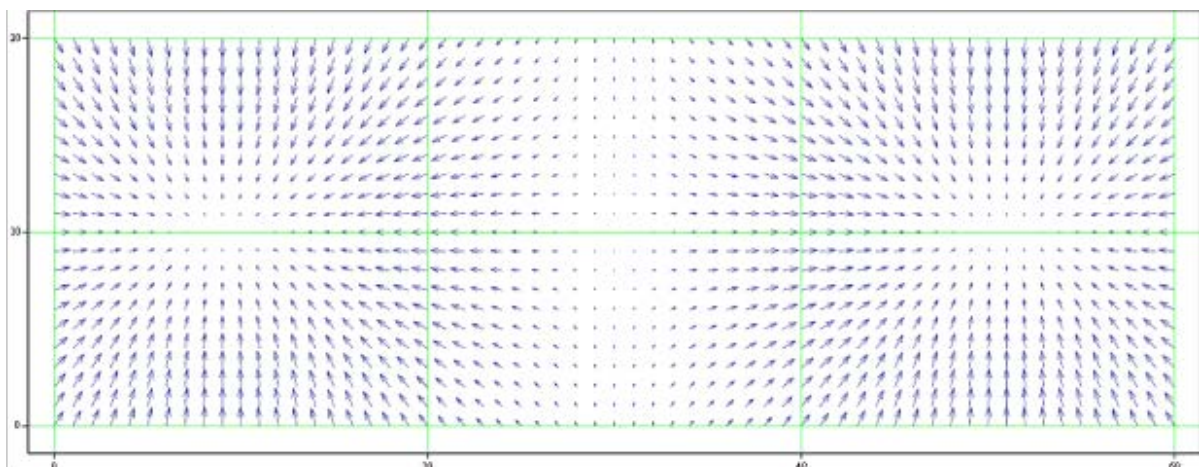
3.19. att. Magnētiskā lauka indukcijas radiālās komponentes izolīniju grafiks pie $z = 0.01$ (rezervuārā vidus)



B_{yZ}

3.20. att. Magnētiskā lauka indukcijas azimutālās komponentes izolīniju grafiks pie $z = 0.01$ (rezervuārā vidus).

Rezervuāra vidum izveidots arī magnētiskā lauka sadalījuma vektoru grafiks, kas aplūkojams 3.21. attēlā.



$B_{xZ} + i \cdot B_{yZ}$

3.21. Magnētiskā lauka sadalījuma vektoru grafiks pie $z = 0.01$ m (rezervuāra vidus)

Aprēķinātās lauka vērtības tika salīdzinātas ar eksperimentāli nomērītām pēc tam jau izgatavotajai iekārtai un tika iegūta laba atbilstība. Nelielās novērotās atšķirības var tik skaidrotas ar to, ka katrs pols ir salikts no 40 mazākiem magnētiem, un attiecīgi starp tiem ir nelielas nemagnētiskas spraugas, vismaz magnētiem lietotā niķeļa pārklājuma biežumā. Attiecīgi polu aizpildījums nav 100 %. Papildus tam salikšanas procesā var rasties nelieli mehāniski bojājumi, jo magnētu salikšanā jāpielieto ievērojams spēks.

Šeit apskatītajai centrālās sistēmai liela ātruma strūkļas alumīnijā radīšanai nepieciešamajam spiedienam ņemti vērā hidrauliskie zudumi ārējā kanālā dēļ straujas plūsmas izplešanās, šķidrums izejot no kanāla un tiekot ievadītam kopējā krāsns rezervuārā.

3.2.4. Sistēmas attīstīto parametru kārtas lielumu novērtējums

Šeit piedāvātajai centrālās sistēmai liela ātruma strūkļas radīšanai alumīnija, nepieciešamo spiedienu, lai šādu strūkļu radītu, noteiks hidrauliskie zudumi izejas kanālā, kas rodas dēļ straujas plūsmas izplešanās tai pārejot no kanāla uz krāsns tilpumu. Turbulentas plūsmas gadījumā lokālie spiediena zudumi pārejā no mazāka šķērsriezuma plūsmas uz lielāku atkarīgi tikai no šo šķērsriezumu laukumu attiecības, kā tas redzams (3.9).

$$K = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad \Delta P = \sum \left(K_i \cdot \frac{\rho U_i^2}{2} \right) \quad (3.9)$$

Kur i apzīmē katru no hidrauliskā ceļa posmiem, K_i ir plūsmas pretestības koeficients U_i ir plūsmas ātrums katrā no hidrauliskā ceļa posmiem. Ja hidrauliskais diametrs $D_H \ll L$ ir daudz mazāks kā šķidrā alumīnija rezervuāra garums, $K_{\text{ārējais}}$ tiecas uz 1. Līdz ar to spiediena zudums straujas kanāla izplešanās dēļ eksperimentālajā iekārtā ir $\Delta P = 21.5$ kPa. Jāatzīmē, ka arī šeit spiediena zudumi ir proporcionāli šķidrā metāla blīvumam ρ . Bet radītais spiediens arī ir proporcionāls blīvumam. Līdz ar to pie vienādas ģeometrijas un ātruma, attiecība starp radīto spiedienu un spiediena zudumiem paliks nemainīga pie jebkura šķidruma, ja joprojām iespējams viskozitāti neņemt vērā (kas ir pieļaujami pie inerces dominējošām plūsmām ar augstiem Reynolds skaitļiem ($Re \gg 10^5$)). Radītais spiediens (vienādojums (3.10.)) ir proporcionāls šķidrā metāla ceļa garumam, uz kuru iedarbojas elektromagnētiskais spēks L_{ch} , kvadrātiski atkarīgs no magnētiskā laika indukcijas B , reaktīvā magnētiskā laika ātruma attiecībā pret rotējošo šķidro metālu V_B , elektrisko vadītspēju σ , un bezdimensionālo koeficientu k_V , kurš savukārt atkarīgs no sūkņa ģeometrijas un sakausējuma skinslāņa, pie dotās frekvences, kā arī magnētiskā lauka sadalījumu atskaites sistēmā, kas rotē kopā ar plūsmu.

$$P = \frac{k_V \cdot \sigma \cdot V_B \cdot B^2 \cdot L_{ch}}{2} \quad (3.10.)$$

Veiktajam modelējošajam eksperimentam ar InGaSn sakausējumu, izvēloties $L_{ch} = 2\pi R_C$, k R_C ir 17.5 cm (magnētiskā pola centrs), novērtētais radītais spiediens ir 54.5 kPa. Šķidram alumīnijam šādi rēķinot iegūst 49 kPa. Šeit ir veikts pieņēmums, ka azimutālo plūsmas ātrumu jebkurā vietā nosaka elektromagnētisko spēku un pretēji vērsto inerces un viskozo spēku

līdzsvars. Šeit spēks tiek aprēķināts, to integrējot pa kausējuma dziļumu:

$$F_i \cdot H + F_v \cdot \delta = F_{el} \cdot H \quad (3.11.)$$

Kur δ ir viskozais robežslāņa biezums, H ir puse no šķidrā slāņa biezuma $H = b/2$. Šeit tiek pieņemts, ka par robežslāni var izvēlēties Hartmaņa robežslāni [63]:

$$\delta = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\rho \nu}{\sigma}}$$

Navjē-Stoksa vienādojumā dominējošais loceklis azimutālajai inerces spēka komponentei ir :

$$F_i = \rho \cdot \Omega \left(U_t + \Omega R \cdot \frac{\delta}{H} \right) \quad (3.12.)$$

Kur U_r ir radiālais plūsmas ātrums virzienā uz plūsmas vidu, kas sastāv no divām daļām – pārneses ātrumu, ja sūknis rada ne-nulles caurteci ārējā kanālā, un radiālā plūsma, kas rodas dēļ centrālās plūsmas caur viskozajiem robežslāņiem uz sūkņa kanāla apakšas un vāka. Novērtētais viskozais spēks var tikt uzrakstīts kā:

$$F_v = \rho \cdot \nu \frac{\Omega r}{\delta^2} \quad (3.16.)$$

Kur ν ir kausējuma kinemātiskā viskozitāte. Elektromagnētisko spēku var novērtēt šādā veidā:

$$F_{el} = \frac{k\sigma(\omega - \Omega)B^2 r}{1 + k \cdot Rm(1 - \Omega_d)} \quad (3.17.)$$

Esam ieguvuši vienādojumu (3.11.) bezdimensionālā formā, ieviešot šādus bezdimensionālos kritērijus un mainīgo:

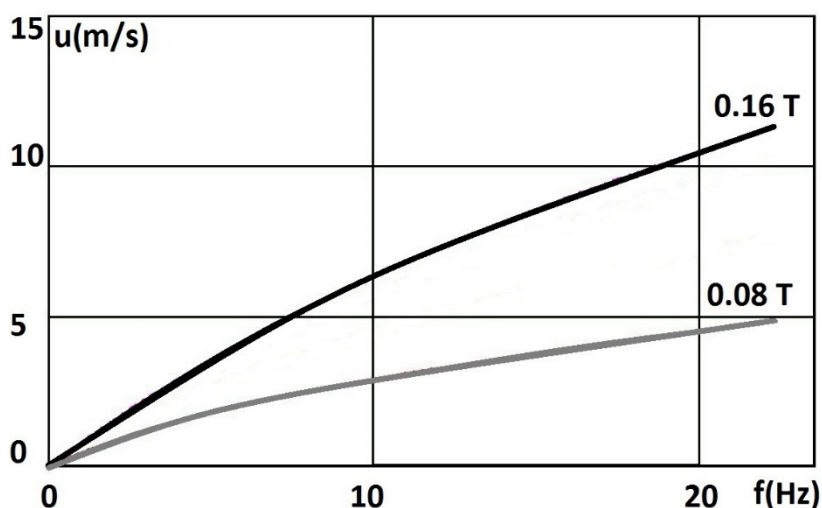
$$Ro = \frac{U_t}{\omega \cdot r} \quad Ha = HB \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \nu}} \quad Ek = \frac{\nu}{\omega H^2} \quad \Omega_d = \frac{\Omega}{\omega} \quad Rm = \mu \sigma UH$$

Kur Ro ir Rozbija skaitlis, Ha ir Harmaņa skaitlis, Ek ir Ekmaņa skaitlis, Ω_d ir bezdimensionālais leņķiskais plūsmas ātrums un Rm ir magnētiskais Reinoldsa skaitlis. Šo ievietojot attiecībā pret Ω_d iegūstam vienādojumu:

$$\Omega_d^2 + \left[Ro + Ha \cdot Ek + \frac{Ha^2 \cdot Ek}{\frac{1}{k} + Rm(1 - \Omega_d)} \right] Ha \cdot \Omega_d - \frac{Ha^3 \cdot Ek}{\frac{1}{k} + Rm(1 - \Omega_d)} \quad (3.18.)$$

Ievietojot skaitliskās vērtības azimutālajam ātrumam, leņķiskajam ātrumam un radītajam spiedienam, kas savukārt ir atkarīgi no magnētiskā lauka B , rotora leņķiskā ātruma

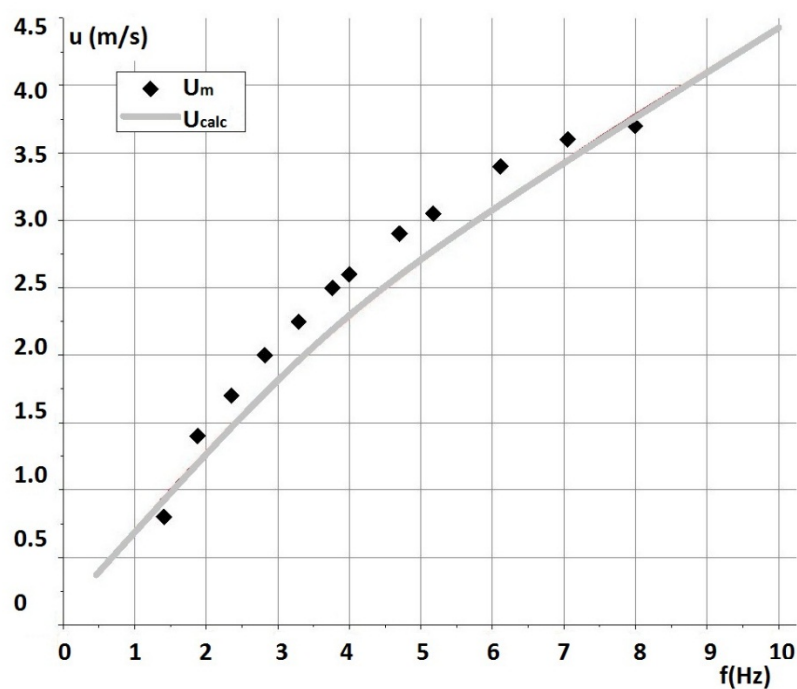
ω , kausējuma puses no dziļuma H , radiālās pozīcijas r atbilstoši vienādojumam (3.18.), var aprēķināt sagaidāmo caurteci un šķidrā metālā ātrumu. Gadījumā, ja tiek izmantots alumīnijs, kuram $\sigma = 4 \cdot 10^6$ S/m, $\rho = 2400$ kg/m³, $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$ m²/s, aprēķinātā caurtece pie 8 Hz eksperimentālajā modeli ir 2 l/s. Azimutālā ātruma atkarība no rotācijas frekvences pie divām magnētiskā lauka vērtībām 0.08 T un 0.16 T (kas atbilst attiecīgi 2 cm un 6 cm lieliem attālumiem starp šķidro metālu un magnētiem eksperimentālajā iekārtā) redzama 3.22. attēlā.



3.22. att. Azimutālā ātruma atkarība no rotācijas frekvences pie divām magnētiskā lauka vērtībām 0.08 T un 0.16 T

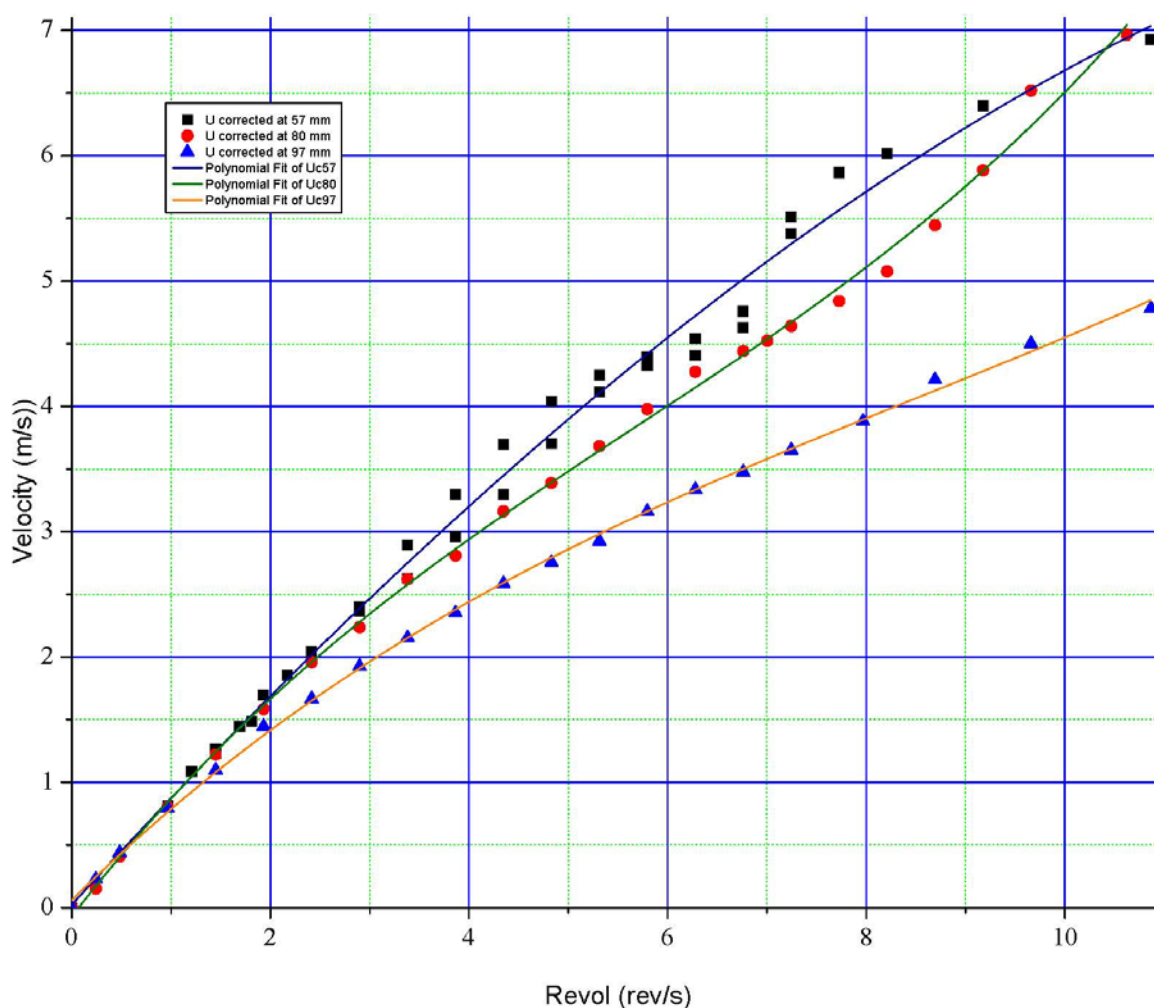
3.2.5. Eksperimentālā sistēmas izpēte

Eksperimentālā iekārta tika izmantota vairāku eksperimentu sēriju veikšanai pie dažādām rotācijas ātrumu un attālumu starp šķidro metālu un magnētiem kombinācijām. Lai mērītu šķidrā Gallija plūsmu eksperimentālajā iekārtā, tika izmantota ultraskaņas Doplera anemometra ātruma mērīšanas metode [62]. Ātrums tika mērīts centrālās sūkņa izejas kanālā, kur sagaidāms vislielākais ātrums. Ultraskaņas zonde tika ievietota rezervuāra un kanāla plastmasas vāka augšējā plāksnē speciāli izveidotā atverē, iegūstot tiešu mehānisko kontaktu ar šķidro metālu pārsedzoši organiskā stikla plāksni, attiecīgi iegūstot nepieciešamo skaņas kontaktu ar pašu šķidro metālu, kas ir pamata nosacījums šai ātruma mērīšanas metodei. Papildus kontakta nodrošināšanai tika izmantota speciālā ultraskaņas želeja. Tā kā mērāmais šķidrā metāla ātrums bija salīdzinoši liels (vairāki metri sekundē), nepieciešams izmantot arī biežu pulsu atkārtosnās frekvenci (*pulse repetition frequency*), savukārt zemu pašu izmantotās skaņas frekvenci – 1 Mhz. Šie parametri viennozīmīgi definē mērāmo telpisko ātruma izšķirtspēju, kas attiecīgi sanāca salīdzinoši zema, bet tā bija pieņemama, jo šim uzdevumam bija svarīga tikai vidējā šķidrā metālā ātruma vērtība. Ja tiktu izmantotas augstāka skaņas frekvence, būtu iespējams iegūt arī labu telpisko ātruma sadalījumu, bet šādā gadījumā palielinājās skaņas un atstaroto signālu pārklāšanās, kas deva neviennozīmīgus datu rādījumus. Izmērītais un aprēķinātais šķidrā metāla ātrums kanālā, atkarībā no rotācijas frekvences grafiski apkopots 3.23. attēlā.



3.23. att. Izmērītais un aprēķinātais šķidrā metāla ātrums kanālā, atkarībā no rotācijas frekvences

Eksperimentālajā modelī maksimāli sākotnēji tika sasniegts 3.7 m/s liels šķidrā metālā ātrums pie magnētiskā rotora rotēšanas ātruma 8 apgriezieni sekundē, kas labi saskanēja ar analītiski novērtēto (skat. 3.23. attēlu). Īslaicīgi palielinot rotācijas ātrumu (ilgstoši tas nebija iespējams iekārtas mehānisku ierobežojumu dēļ), vairs netika novērots ievērojams ātruma pieaugums, ļaujot secināt, ka jau tika iegūts piesātinājumam tuvs režīms.



3.24. att. Analītiski novērtētais šķidrā metāla ātrums atkarībā no magnētiskā rotora rotēšanas ātruma

Eksperimentālās sistēmas ar pastāvīgo magnētu centrālās sūkni izpēte tika turpināta, lai pārbaudītu vēlreiz kādus parametrus ir iespējams ar piedāvāto sistēmu sasniegt. Tika izpētīta arī attīstīto parametru atkarība no nemagnētiskā attāluma un uzlabota ātrumu mērīšanas sistēma. Izmantojot citu mērīšanas sistēmu (elektromagnētiskās indukcijas zondi [54]), tika atklāts, ka ātrumi līdz 7 m/s sasniedzami 8 cm (kurus veido 70 mm sienas biezums un 10 mm dzesēšanas sprauga) attālumā (skat. 3.24. att). Tomēr varēja secināt, ka esošo konfigurāciju iespējams optimizēt. Mērījumos ar ultraskaņu šķidrā metāla ātrums pārsniedza maksimāli sagaidāmo ātrumu, kādam tika uzstādīti mērīšanas sistēmas parametri. Mērījumi pie augstākām frekvencēm liedza eksperimentālās iekārtas tehniski ierobežojumi. Papildus tika pārbaudīts maksimālais spiediens, kādu šī sistēma var sasniegt bez caurteces. Tehnisko ierobežojumu dēļ mērījumi tika veikti tikai līdz 2 bāru spiedienam, kas izrādījās pietiekams, lai liecinātu par sakritību ar aprēķiniem.

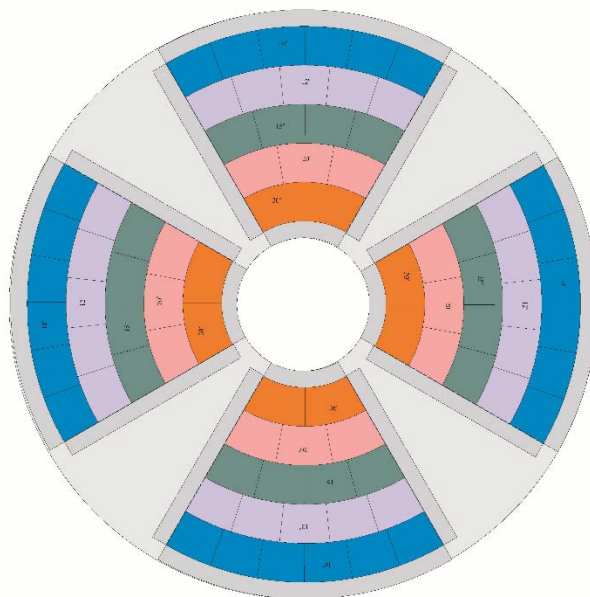
3.2.6. Centrbēdzes sūkņa eksperimentāla pārbaude sistēmā ar šķidru alumīniju.

Tā gan analītiskie novērtējumi, gan laboratorijā eksperimentālās sistēmas izpēte parādīja, ka sistēma var droši sasniegt nepieciešamos parametrus arī sistēmā ar šķidru alumīniju, un vienlaicīgi šāda koncepcija pati par sevi bija uzskatāma par oriģinālu, iepriekš neapskatītu piedāvājumu, kopā ar alumīnija nozares industriālajiem partneriem, kuri arī iepriekš faktiski bija uzstādījuši prasību pēc konkrētu parametru – 4 m/s plūsma un vismaz 7 cm nemagnētiskais attālums - sasniegšanas, tika nolemts veikt sistēmas testus ar alumīniju.

Tā kā 7 cm ir tikai minimālais attālums, bet optimāli būtu sasniegt vismaz 10 cm, turklāt iepriekšēja pieredze pastāvīgo magnētu sistēmām darbā ar šķidru alumīniju faktiski nebija ne tikai mums, bet visai limitēta arī pasaulē kopumā, tika nolemts, ka, ja ir iespēja šādus eksperimentus veikt, būtu vērts izvērtēt sistēmas efektivitāti vēl palielināt [64].

Kā minēts 3.2.2. nodaļā, svarīgākais parametrs ir radītais magnētiskais lauks. Tomēr, ja tiek apskatītas industriāli pielietojamas sistēmas, tad jāņem vērā tāds ne-fizikāls parametrs, kā izgatavojamās iekārtas izmaksu samērīgums, kas šajā gadījumā ir tieši atkarīgs no izmantojamā magnētiskā materiāla daudzuma, jo sastāda lielāko daļu no iekārtas izgatavošanas izmaksām. Papildus nepieciešams ņemt vērā arī rotora radiālā izmēra ierobežojumu. Pirmkārt, reālistiskai eksperimentālajai iekārtai (faktiski arī šeit interesējošajam konkrētajam potenciālajam industriālajam pielietojumam) rezervuāra plaknes laukums, kur sagaidāms, ka rotors atradīsies, ir ierobežota izmēra. Otrkārt, palielinoties centrālās sūkņa izmēriem, kvadrātiski pieaug arī centrālās spēki un inerces momenti, kas palielina sistēmas mehānisko slodzi un varbūtību iegūt nevēlamas rotora vibrācijas. Treškārt, nepieciešams ņemt vērā ierobežojumus, kas saistīti ar magnētiskās sistēmas salikšanu. Tālākās magnētiskās sistēmas ilustrācijās redzams, ka, tāpat kā iepriekš, liela izmēra polu nepieciešams salikt no atsevišķiem mazākiem magnētiem - starp kuriem joprojām ir ļoti lieli spēki. Katrā polā jeb katrā magnētā, katrs mazais magnēts atgrūžas no cita polu veidojoša magnēta, vienlaikus pievelkoties pie blakus pola. Turklāt jāņem vērā ne tikai ar atgrūšanās spēku, bet arī griezes momentu, jo magnēti "cenšas" apgriezties otrādi. Rezultātā nepieciešams paredzēt vietu magnētu fiziskai ievietošanai un nostiprināšanai.

Ņemot vērā iepriekš minēto, tika nolemts iespēju robežās palielināt rotora magnētisko polu augstumu un kopējo magnētiskā materiāla aizpildījumu, veidojot, nevis taisnstūrveida polus, kā iepriekšējai apskatītajai eksperimentālajai iekārtai, bet sektorveida segmentus, atbilstoši 3.25. attēlam, kurā redzama jau gala izvēlēta magnētu ģeometrija.



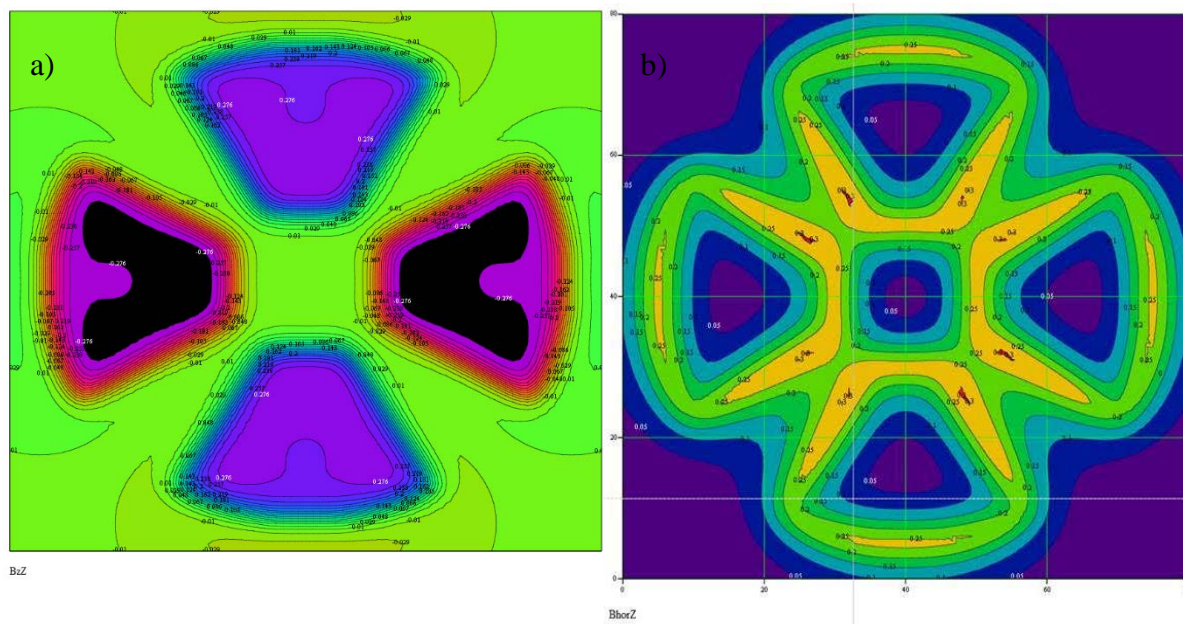
3.25. att. Sektorveida magnētiskā materiāla izkārtojums centrālās sistēmas industriālo testu eksperimentālās iekārtas realizācijai

Gala optimālās magnētiskā materiāla ģeometrijas izvēlei attiecībā pret radīto magnētisko lauku un izmantoto magnētisko materiālu ar ierobežotu ārējo aploces rādiusu, bija nepieciešams vēlreiz veikt magnētiskā lauka aprēķinu un optimizāciju pie jaunajiem parametriem.

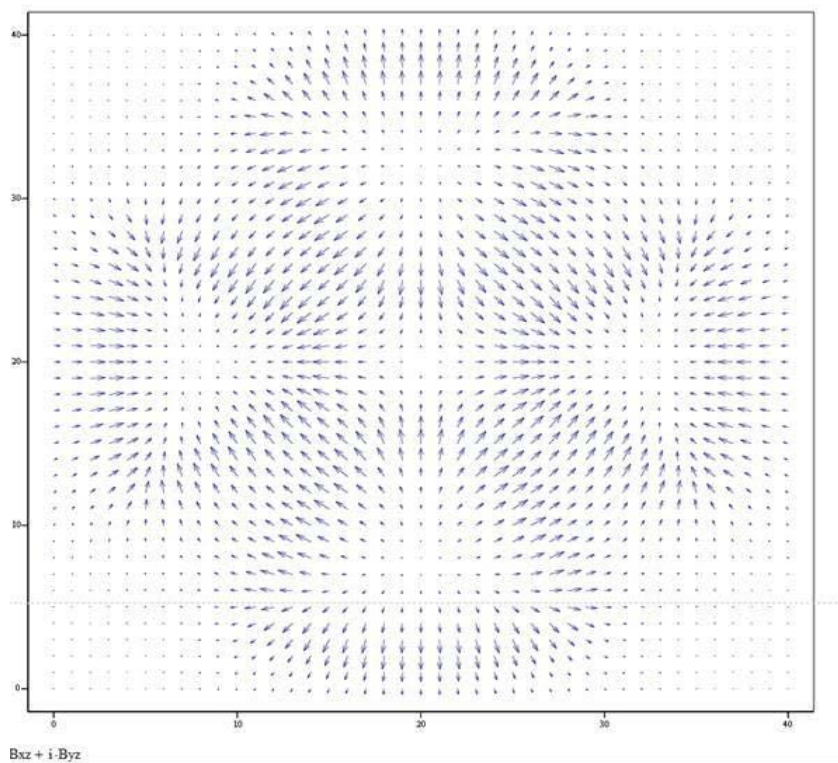
Lai arī pamata formulas arī analītiskajā novērtējumā ir analogiskas taisnstūrveida polu gadījumā, praktiska optimizācijas aprēķina realizācija ir sarežģītāka, jo nepieciešams pārveidot taisnstūrveida magnētu radītā magnētiskā lauka aprēķina formulas sektorveida magnētisko polu radītā lauka aprēķinam. Turklāt, tā kā magnētiskais materiāls ir ievērojami tuvāk, nepieciešams pārbaudīt, vai būtiski neizmainās magnētiskā lauka principiālais sadalījums – piemēram magnētiskā lauka plūsmas līnijas varētu sākt noslēgties pat ātrāk pie blakus poliem, neradot ievērojamu magnētisko lauku nepieciešamajā attālumā no pola virsmas. Zemāk 3.26. un 3.27. attēlos redzams aprēķinātais magnētiskā lauka sadalījums jau gala izvēlētajai optimizētajai ģeometrijai.

3.26. attēlā redzams sektorveida polu radītā magnētiskā lauka sadalījums gan vertikālajai gan horizontālo komponentu absolūtajai vērtībai. Savukārt 3.27. attēlā redzams radītā magnētiskā lauka horizontālo komponentu vektoriāls atspoguļojums. Pirmkārt, redzams, ka kvalitatīvi magnētiskā lauka sadalījums nav mainījies – joprojām arī 10 cm attālumā no krāsns tiek iegūts magnētiskā lauka sadalījums ar diviem maksimumiem un diviem minimumiem, līdz ar to sagaidāms, ka tam rotējot, tiks iegūts arī kvalitatīvi līdzīgs rotējošā magnētiskā lauka sadalījums, līdz ar to principiāli iekārta strādās līdzīgi. Otrkārt, redzamas asākas robežas starp magnētiskā lauka poliem saistībā ar polu fiziski tuvāku atrašanās vietu un lielākām lauka vērtībām. Straujāka lauka izmaiņa varētu radīt lielāku plūsmu. Treškārt, redzams, ka absolūtās lauka vērtības ar šādi veidotu magnētisko rotoru tiktu iegūtas lielākas. Iepriekš apskatītā rotora radītā magnētiskā lauka, piem., vertikālā komponente interesējošajā reģionā rezervuārā sasniedza aptuveni 0,16 T. Šeit tiek sasniegts pat 0,27 T liels lauks, turklāt

dēļ magnētiskā lauka nedaudz atšķirīgā sadalījuma, plašākā reģionā. Tā kā radītās plūsma no magnētiskā lauka indukcijas ir atkarīga kvadrātiski, tad pieaugums ir pat 1.8 reizes. Tādā ģeometrijas un magnētiskā materiāla apjoma palielinājumam ir bijis būtisks efekts.



3.26. att. Magnētiskā lauka sadalījums sektorveida polu gadījumā: vertikālā a) un horizontālo b) komponentu absolūtās vērtības



3.27. att. Horizontālo komponentu vektoriāls atspoguļojums sektorveida polu gadījumā

Kā minēts iepriekš no eksperimentālās sistēmas izveidošanas viedokļa, nepieciešamas izstrādāt speciālu sistēmu kā salikt aprēķinātos magnētiskos polus. Jau 3.25. attēlā redzams, kā piedāvāts magnētisko rotoru salikt no mazākiem sektora veida magnētiem. Maksimālā viena magnēta izmēru ierobežo to izgatavošanas tehnoloģija. Tuvināti magnēta vienas dimensijas maksimālais izmērs ir ~5 cm. Līdz ar to, konsultējoties ar magnētu izgatavotājiem un piegādātājiem vairākās Ķīnas rūpnīcās, tika noskaidrots, ka faktiski sistēma saliekama no 5 dažādas ģeometrijas magnētiem. 3.28. attēlā redzams viens no šiem magnētiem, salīdzinājumā ar cilvēka rokas izmēru. 3.25. attēlā katra veida magnēti atzīmēti ar atšķirīgu krāsu.



3.28. att. Viens no sektorveida polu salikšanai nepieciešamajiem magnētiem

Jāņem vērā, ka, jo vairāk magnēti, jo neizbēgami vairāk spraugas veidojas starp magnētiem galīgās magnētu izgatavošanas precizitātes un to niķeļa pārklājuma dēļ. Attiecīgi, jo lielāki būs magnēti, no kā tiks salikts pols, jo lielāks būs magnētiskā materiāla aizpildījums un attiecīgi lielāks sasniedzamais magnētiskais lauks, tādēļ tika nolemts polus salikt no minētajiem visai liela izmēra magnētiem.

Magnēti katrā no poliem savstarpēji atgrūžas. Turklāt pēdējais magnēts, kas tiek ievietots polā, atgrūžas no visa iepriekš saliktā pola, kas nozīmē, ka pārvaramais spēks jau ir ļoti ievērojams. Lai šos spēku pārvarētu, tika izmantoti šādi 3 galvenie mehānismi:

1. Magnēti tika virzīti pa feromagnētisko pamatni, un virs tiem tika likti feromagnētiski tērauda gabali jeb “tiltiņi”. Magnētu radītais magnētiskais lauks šādā gadījumā tiek noslēgts caur feromagnētiskajiem elementiem, nevis izkliedēts plašā telpā, kur ir arī pārējie magnēti. Attiecīgi magnēts tiek pie tiltiņiem, bet uz to darbojas ievērojami mazāks atgrūšanās spēks no citiem magnētiem;

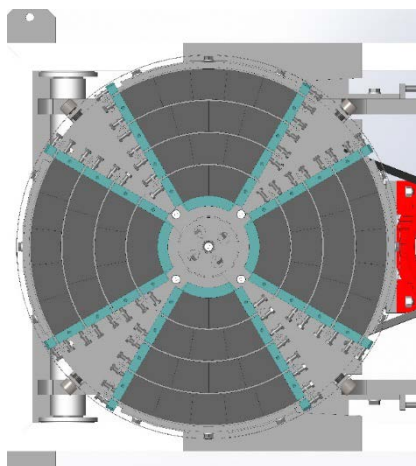
2. Tika izmantotas savilkšanas stīpas katrai rindai (skat. 3.29. attēlu), kas ļauj piespiest un nofiksēt katru no rindām. Šādi arī tiek novērsta nepieciešamība ar katras nākamās rindas magnētu likšanu piespiest arī iepriekšējās rindas līdz galam nenovietotos un nenofiksētos magnētus;

3. Tika izveidota speciāla pie rotora pamatnes piestiprināma magnētu stumšanai paredzēta iekārta (3.29. attēls). Sistēma lāva magnētu stumt nevis ar roku vai daudzot ar āmuru, bet izmantojot vītņstieņa mehānismu, kas ievērojami palielina iespējamo pieliekamo spēku. Šeit jāatzīmē, ka stumjošais mehānisms tika izveidots no alumīnija, tomēr tas izrādījās pārāk

mīksts materiāls, kas noveda pie tā, ka tam, slīdot pa vītņstieni, tas deformējās un mēdza iesprūst. Šo elementu būtu nepieciešams veidot ar lielākām pielaidēm un no mehāniski izturīgāka materiāla, piemēram, nerūsējošā tērauda.

4. Magnēti tika papildus pielīmēti pie rotora pamatnes ar spēcīgu divkomponentu epoksīdu līmi (3.30. b) attēls);

5. Virs magnētiem uzklāta 3 mm epoksīdu un kokskaidu kompozīta slānis, magnētu kopējai saturēšanai. Jāatzīmē, ka bez šī pēdējā soļa, konstrukcija nebija pietiekami stabila, kā tas redzams 3.30. b) attēlā, divi magnēti “izlēca” no konstrukcijas un pievilcās otrādāk pie pola.



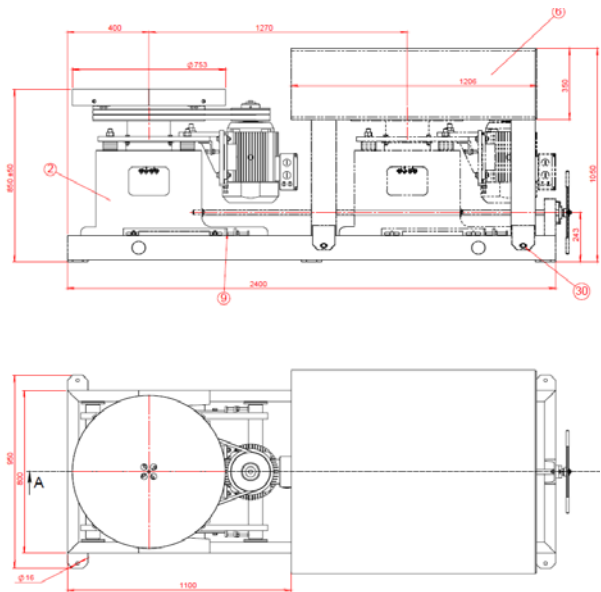
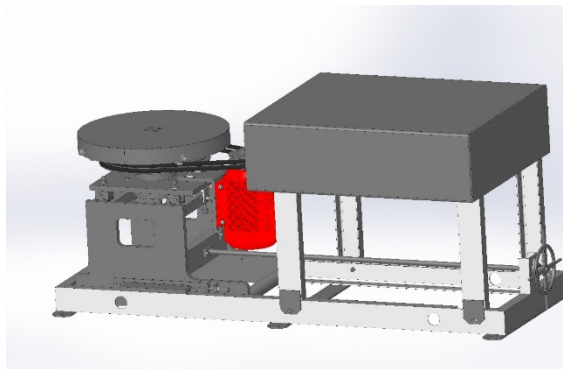
3.29.att. Izstrādātā magnētu stiprināšanas sistēma magnētisko polu izveidošanai, un izstrādātie un izgatavotie speciālie palīgīdzekļi magnētiskās sistēmas salikšanai



3.30.att. a) Magnētiskā rotora pamatne, uz kuras tika likti magnētiskie poli; b) salikts magnētiskais rotors ar nospriegotām magnētu noturēšanas stīgām un salīmētiem ar epoksīdu sveķiem; c) magnētiskais rotors ar pārklātu papildus epoksīdu un kokskaidu kompozītu slāni magnētu papildus nostiprināšana; d) feromagnētisko tiltiņu izmantošana salikšanas procesā

Bez speciālas un pārdomātas rotora konstrukcijas, arī citiem iekārtas elementiem plānotajā eksperimentālajā izpētē var būt kritiska nozīme. Kopējā gala izstrādātā iekārta un tās galvenie elementi redzami 3.31. attēlā. Pie svarīgākajiem elementiem var minēt:

1. Iestrādāta rotora dzesēšana caur rotējošu gaisa pievadu no apakšas, gaisam tālāk plūstot caur rotora asi un magnētu virsmu;
2. Feromagnētisks jumts, zem kura var pa sliedēm pabīdīt rotoru, lai ekranētu tā radīto magnētisko lauku. Šāda iespēja nepieciešama rotora drošai glabāšanai un krāsns apkopes laikā;
3. Smags, stabils kopējais rāmis kopējo vibrāciju samazināšanai;
4. Speciāli iestrādāti paliktņi rotora augstuma un attiecīgi nemagnētiskā attāluma, mainīšanai (skat. 3.31. attēlu).



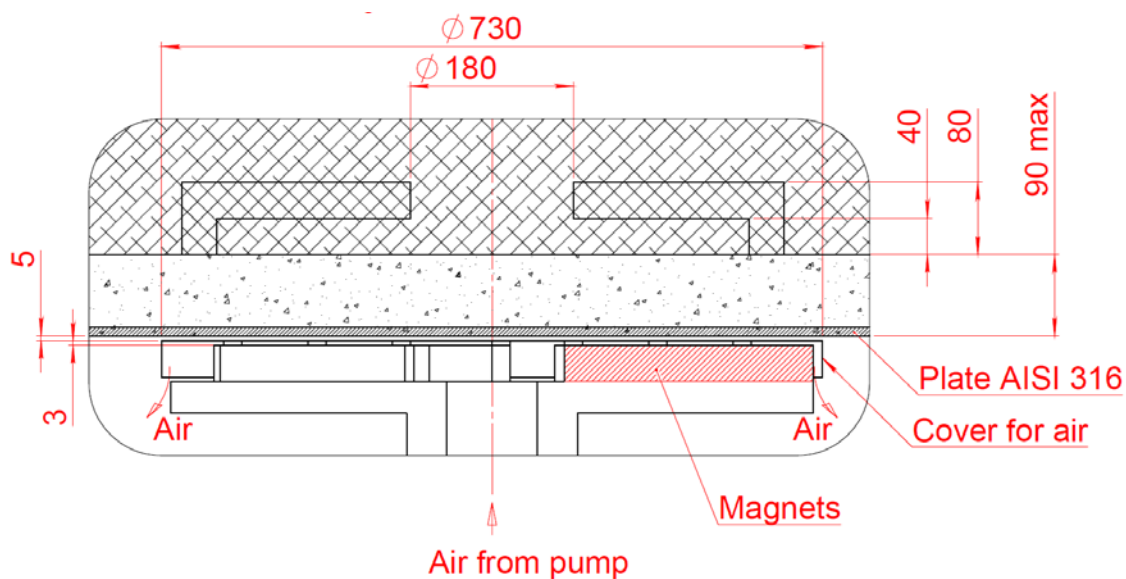
3.31.att. Kopējā izstrādātā iekārtas ģeometrija un galvenie izmēri



3.32.att. Centrbēdzes iekārta uzstādīta eksperimentālajiem testiem ar alumīniju

Izšķiroša ir ne tikai izstrādātā konstrukcija, bet arī izgatavotās konstrukcijas un to detaļu precizitāte. Pat nelielas kļūdas izmēros var rezultēties vai nu ievērojamās rotora vibrācijās vai pat neiespējamībā vispār magnētisko rotoru salikt. Šajā gadījumā mehānisko darbu veicējs tika veiksmīgi izvēlēts un šādu problēmu praktiski nebija.

Pēc iekārtas salikšanas, iegūtā magnētiskā lauka iegūšanas un salīdzināšanas ar aprēķinos iegūto, iekārta tika pārvietota uz eksperimentālās izpētes vietu un uzstādīta uz speciāli šim nolūkam izveidota alumīnija rezervuāra (skat. 3.33. attēlu).



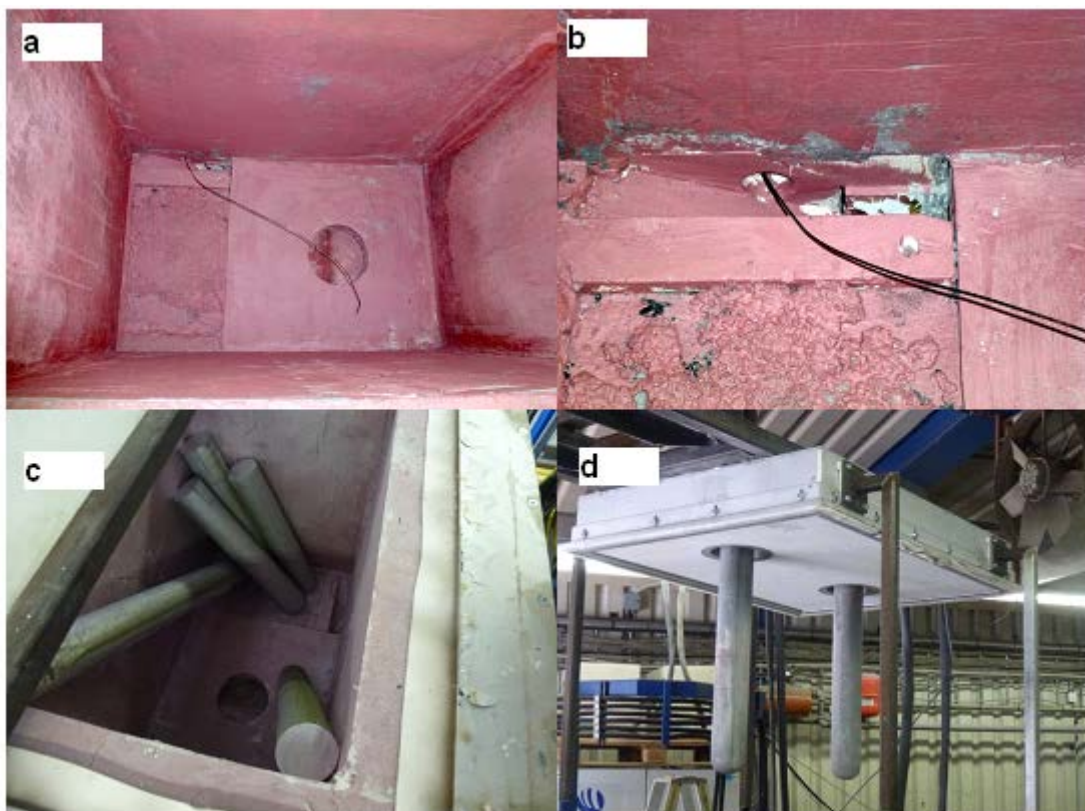
3.33.att. Alumīnija rezervuāra ģeometrijas galvenie izmēri

Šeit jāatzīmē, ka bija nepieciešams rezervuāra nerūsējošā tērauda pamatnē veikt radiālus iegriezumus (skat. 3.34. attēlu), lai ierobežotu rotora inducēto azimutālo strāvu noslēgšanos, attiecīgi limitējot pamatnes silšanu. Šādi iegriezumi limitē tikai azimutālo strāvu noslēgšanos, un arī tad nepilnīgi. Rotoru pievienojot pie pašas krāsns pamatnes un pie ~30 rotora apgriezieniem, pamatne sasila līdz pat kļuva viegli sarkana. Šis arī iemesls, kāpēc papildus dzesēšana tika uzstādīta ne tikai rotoram, bet arī pamatnei.



3.34.att. Alumīnija rezervuāra nerūsējošā tērauda apšuvumā iestrādāti speciāli iegriezumi inducēto elektrisko strāvu noslēgšanās un attiecīgi izdalītā Džoula siltuma ierobežošanai un papildus gaisa dzesēšanas pievads radītā siltuma aiznesšanai

Alumīnija rezervuāra ģeometrija bija veidota līdzīgi kā laboratorijas iekārtai – ar centrālās rezerve, no kura pa pieskari iziet kanāls, bet no augšas pa paplašinātu atveri, lai plūsma var atgriezties centrālās rezerve – skat. 3.35. attēlu. Šeit specifiska risināmā industriālā uzdevuma dēļ papildus izejošajā kanālā tika iestrādāts argona ievads.



3.35.att. a) Izveidotā speciālā alumīnija rezervuāra ar centrālās sūkņiem nepieciešamo speciālo kanāla ģeometriju un dubultu rezervuārā dibenu; b) Alumīnija izvades kanāls ar argona ievadi no sāna; c) izveidotajā rezervuārā pārkausētie alumīnija stieņi; d) gāzes degļi alumīnija pārkausēšanai, šķidra alumīnija iegūšanai

No eksperimenta realizācijas viedokļa diemžēl liels trūkums eksperimentiem ar šķidru alumīniju ir, ka praktiski nav iespējams veikt nekādus kvantitatīvus mērījumus. Līdz ar to eksperimenta rezultātu ieguve reducējās uz, pirmkārt, kvalitatīvu plūsmas novērošanu, novērojot gan plūsmas struktūru, gan virsmas deformācijas, ņemot vērā, ka virsmas deformāciju lielums ir proporcionāls plūsmas ātrumam ($\frac{\rho u^2}{2} \sim \rho gh$). Otrkārt, no citiem pētījumiem bija zināms, ka pie ~ 3.2 m/s liela plūsmas ātruma argona ievades reģionā, argona gāze tiek sašķelta mazos burbulīšos, kas savukārt ir kritērijs alumīnija sakausējuma degazācijai. Šī iemesla dēļ tika iestrādāts minētais argona ievads. Tātad aptuveni sagaidāms, ka plūsmas ātrumam pie argona ievada sasniedzot un pārsniedzot ~ 3.2 m/s, sāksies ūdeņraža izdalīšanās, ko būs iespējams novērot kā maza sadegošas liesmiņas uz alumīnija virsmas. Šis arī nav absolūti kvantitatīvs kritērijs, tomēr bija eksperimentāli novērojams, ka tiešām eksistē noteikts rotora rotēšanas ātrums, pie kuras šis process sākas. 3.36. b) attēlā redzamas 3 šādas mazas liesmiņas, kas, piemēram, 3.36. a) attēlā nav novērojamas.

Jāpiebilst, ka arī kvalitatīva virsmas novērošana t.sk. šo liesmiņu fiksēšana ir visai apgrūtināta, jo nav iespējams ilgstoši un ar augstu kvalitāti alumīnija virsmu filmēt, jo kopējais siltuma starojums no visas alumīnija virsmas ir ļoti liels. Jau pēc pāris sekundēm alumīnija virsmas novērošanas, fiksējošās fotokameras atsevišķi elementi uzrādīja kušanas pazīmes. Līdz

ar to iespējams bija veikt tikai īsus video vai momentuzņēmumus, pēc kuriem fotokamera tiek dzesēta.



3.36. att. Alumīnija plūsmas rezervuārā gadījumā, kad rezervuārs ir bloķēts, uzņemot fotogrāfijas bez a) un pie ~ pie 12 rotora apgriezieniem sekundē un ar b) zibspuldzi un pie ~10 rotora apgriezieniem sekundē

Veicot eksperimentu sēriju, tika iegūtas trīs principiāli atšķirīgas plūsmas. Pirmkārt, eksperimentus uzsākot, kanāls, kas savieno centrālās rezervuāru ar galveno rezervuāru bija nobloķēts. Visdrīzāk iemesls tam bija kanāla aizsalšana, kas savukārt varēja notikt dēļ tā, ka tas ir visvairāk izolēts no pārējā alumīnija tilpuma, kā arī krāsns priekš sildīšanas procesā tas netika pietiekami labi izkarsēts. Katrā ziņā pie aizsaluša kanāla bija iespējams novērot kāda tuvināti izskatītos plūsmas, ja rezervuāra ģeometrija būtu vienkārša, turklāt nemagnētiskais attālums būtu par centrālās rezervuāra izmēriem lielāks: + 80mm (skat. 3.33.attēlu), tātad minimāli vismaz 180 mm.

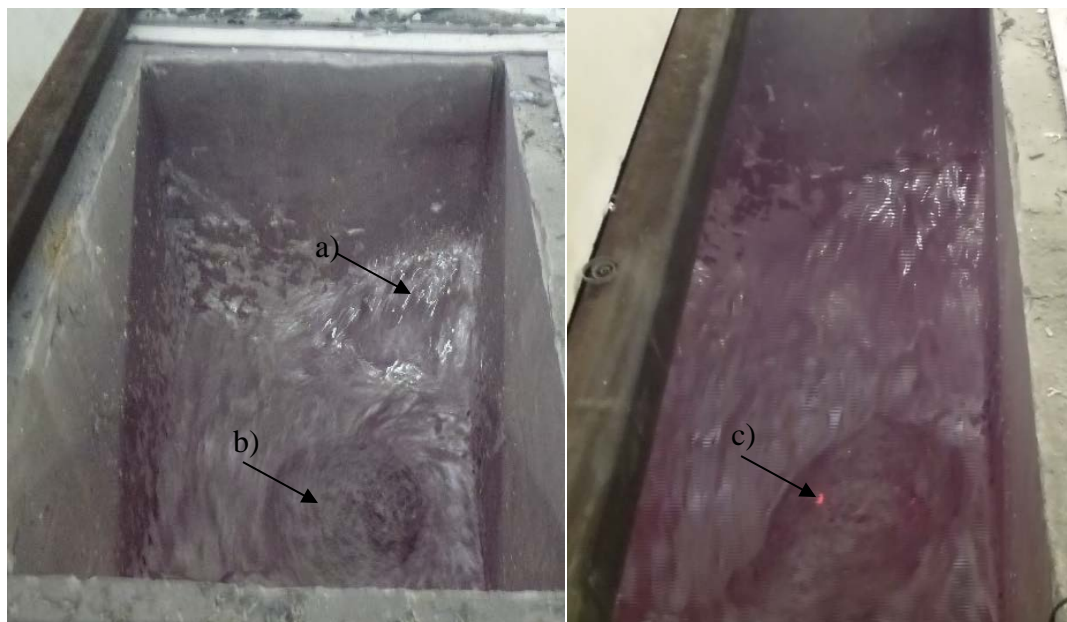
3.36. attēlā redzami plūsmas virsmas attēli šādos apstākļos. Pie šādas plūsmas konfigurācijas iegūtās virsmas deformācijas bija ar kārtas lielumu līdz 10 cm, kas tuvināti (izmantojot, $\frac{\rho u^2}{2} \sim \rho gh$) atbilst ~1,4 m/s lielam ātrumam. Vērojot virsmas deformācijas vizuāli, šķidrā metāla ātrums tika novērtēts ap 2 m/s. Vēl svarīgāk par visai lielo ātrumu ir novērotās ļoti lielās plūsmas pulsācijas un augstā turbulence. Par augstas turbulences plūsmu liecina arī

novērtētais Reinoldsa skaitļa kārtas lielums: $Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{2700 \frac{kg}{m^3} \cdot 1,5 \frac{m}{s} \cdot 0,5 m}{2,66 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{ms}} \sim 760\ 000$.

Kvalitatīvi redzams, ka viss tilpums tiek pilnībā samaisīts sekunžu laikā. Faktiski jau šāda plūsmas un attiecīgās virsmas deformācijas uzskatāmās par pārāk lielām alumīnijam, jo var izraisīt pārāk strauju virsmas oksidāciju. No otras puses šādi radītā plūsmas apstiprināja pirmo potenciālo centrālās sistēmas pielietojumu – tā var tikt izmantota kā maisītājs alumīnija

krāsniņim, kur iespējams nemagnētisko attālumu samazināt vismaz līdz 20 cm, un tilpums ir vismaz 1 tonna. Augšējā robeža tilpumam un nemagnētiskajam attālumam konkrētajai sistēmai netika noskaidrota. Orientējoši tā varētu būt ~10 t.

Rotora apgriezību turpinot palielināt līdz ~14 apgriezieniem sekundē, acīmredzot iepriekš nosprostotais kanāls atbrīvojās, un plūsmas struktūra kardināli izmainījās, atbilstoši 3.37. attēlā redzamajam, ka kanāla izejas reģionā plūsma spēcīgi triecas uz sienā un uz augšu pa rezervuāra malu. Šīs strūklas augstums ir drīzāk kvalitatīvi novērtēts kā nomērīts, ka tas bija aptuveni līdz pat 50 cm, kas, analogiski iepriekš veiktajam novērtējumam atbilstu 3,2 m/s lielam ātrumam. Atsevišķi pilieni ieguva tik lielu ātrumu, ka pat atstāja rezervuāru (jāatzīmē, ka tas padarīja šo eksperimentu un pat kvalitatīvu novērošanu nedaudz bīstamu). Atbilstoši iepriekš aprakstītajai tuvinātai ātruma novērtēšanas metodikai un izvirzītai hipotēzei, tika meklētas mazas liesmiņas, kas liecinātu par notiekošo degazācijas procesu (3.37. c attēls) redzamas šādas liesmiņas. Tātad plūsmas ātrums kanāla reģionā tiešām bija ar kārtas lielumu vismaz 3 - 4 m/s vai lielāks.



3.37. att. Alumīnija plūsma rezervuārā bez keramikas ieliktna un ar atvērtu kanālu

Lai arī plūsmas ātruma kārtas lielums nemainījās, plūsma ir kļuva radikāli haotiskāka, ar daudz lielākām ātruma pulsācijām un virsmas deformācijām, pat neņemot vērā vertikālo strūklu. Plūsma un virsmas deformācijas ir pārāk spēcīgas metalurģiskajam pielietojumam. Dažu minūšu laikā eksperimenta laikā izveidojās 3.37. a) attēlā redzamās alumīnija oksīdu sūkļveidīgās šļakas jeb alumīniju oksīdu sabiezējums. 3.38. attēlā redzams, ka pēc eksperimenta tas arī šādā veidā sacietēja un faktiski ir tīri metāla un iztērētās enerģijas zudumi. Arī tradicionālajā metalurģijas procesā rodas šie oksīdu zudumi jeb šļaka (*slag*), un tās rašanās minimizēšana un otrreizējā pārstrāde ir viena no aktuālākajām nozares problēmām.



3.38. att. Eksperimentu laikā radītie alumīnija oksīdi pārāk spēcīgas plūsmas dēļ

Lai samazinātu virsmas deformācijas un alumīnija oksidāciju, vienlaicīgi saglabājot lielu plūsmas ātrumu, vertikālā strūkļa tika bloķēta ar speciālās keramikas ieliktni (skat. 3.39. attēlu).



3.39. att. Alumīnija plūsma rezervuārā, izmantojot keramikas ieliktni vertikālās strūkļas bloķēšanai

Redzams, ka plūsma kļuva ievērojami sakārtotāka un vizuāli tuvojās tai, kas atbilda gadījumam ar bloķētu kanālu. Joprojām virsmas deformācijas bija pārāk lielas, tomēr šāda plūsma ir jau ievērojami tuvāka potenciālam industriālajam procesam. Svarīgi, ka arī pie šādas plūsmas tika novērotas mazas, sarkanas liesmiņas, tomēr tās sāka parādīties pie lielāka rotora rotācijas ātruma ~ 15 Hz. Tātad keramikas plāksnes ievietošana plūsmu ir nedaudz nobremzējusi, bet ne radikāli.

Izmantojot izveidoto eksperimentālo iekārtu, tika veikti arī kvantitatīvi degazācijas efektivitātes mērījumi, veicot degazācijas procesu atbilstoši 5, 10, 15 un 20 minūtes.

Sākotnējais sakausējuma ūdenraža saturs tika izmērīts 0.32 ml/100g apjomā. Pēc 5 minūšu sakausējuma apstrādes ievadot argonu izveidotajā plūsmā, gāzu saturs sakausējumā samazinājās līdz 0.17ml/100g. Atbilstoši pēc 10min - 0.1ml/100g; 15min -0.06ml/100g un 20min – 0.05ml/100g Al.

Šie rādītāji liecina par efektīvu degazācijas procesu. Konceptijas tālākai attīstībai nepieciešams testus turpināt, realizējot šo procesu jau reālā ražošanas līnijā ražošanas procesa laikā.

3.2.7. Secinājumi par diskveida PM sūkņa centrālās sistēmu

1. Lai, izmantojot šeit apskatīto diskveida sistēmu, varētu šķidrā alumīnijā radīt liela ātruma šķidrā metāla strūklu, pastāvīgo magnētu induktoru var novietot pie rezervuāra plakanas pamatnes vai sienas, bet obligāti ir nepieciešams centrālās sistēmām raksturīgais cilindriskais dobums, kas alumīnija gadījumā varētu būt izveidots no speciālas keramikas, bet jau iekšā alumīnija rezervuārā.

2. Eksperimentālā sistēmas izpēte parādīja, ka, ja izejas kanāla šķērsriezums nav pārāk liels, šādā eksperimentālajā modelī pat var tikt sasniegta 4 m/s liels ātrums. Turklāt eksperimentālajā modelī tika izmantots InGaSn, kuram ir ievērojami augstāks blīvums un sliktāka elektrovadāmība (skat. arī 3.1. nodaļu), attiecīgi pilnībā validējot iespēju šādu strūklu vienādos apstākļos sasniegt arī alumīnijā.

3. Novērota arī laba sakritība eksperimentālajiem datiem ar analītiskā modelī iegūtajiem, kas dod zināmu pamatu izmantot analītisko modeli sistēmas novērtēšanai pielietojamībai arī citiem uzdevumiem.

4. Novērots, ka eksperimentālajā sistēmā eksistē piesātinājuma sliekšnis, kuru sasniedzot, palielinot rotora apgriezību skaitu, šķidrā metālā ātrums vairs nepieaug. Šāda tendence nebija novērota analītiskajā modelī, kas norāda uz turpmāku nepieciešamību to pilnveidot, piemēram, ņemot vērā arī sekundāro, inducēto magnētisko lauku (skin efektu).

5. Analītiski un eksperimentāli parādīts, ka taisnstūrveida magnētiskos polus aizstājot ar sektorveida magnētiskajiem poliem, iespējams ievērojami palielināt rotora radīto magnētiskā lauka indukciju, palielinot potenciālo iekārtas efektivitāti un pielietojumu robežas. Iepriekš literatūrā apskatīti tikai taisnstūrveida magnētiskie poli. Šajā darbā parādīts, ka sektorveida magnētiskie poli var dot ievērojami lielāku magnētisko lauku.

6. Eksperimentāli validēta iespēja izstrādāto centrālās sistēmu pielietot metalurģijā un praktiski parādīta tās darbība ar šķidru alumīniju. Eksperimentos ar alumīniju novēroti papildus vērā ņemamas parādības, kas saistītas ar alumīnija oksidāciju un rezervuāra apšuvuma silšanu, ko nepieciešams ņemt vērā izstrādājot šādas sistēmas citiem industriālajiem pielietojumiem.

7. Izstrādātā sistēma faktiski radīja pārāk lielu plūsmu, līdz ar to būtu nepieciešams veikt precīzākus hidrodinamikas novērtējumus, kur ņemtu vērā arī potenciālās virsmas deformācijas. Šis ir ievērojami sarežģītāks uzdevums un būtībā risināms tikai skaitliski.

8. Izstrādāta tehnika un metodika liela izmēra konkrētās konfigurācijas – diskveida multipolu – salikšanai no maza izmēra magnētiem. Iepriekš literatūrā apskatīti diskveida sūkņi, kur kars magnētiskais pols ir atbilst vienam veselam magnētam. Šeit katrs pols sastāvēja no

desmitiem citu magnētu.

9. Lai arī tika parādīts, ka ar šo sistēmu iespējams praksē iegūt nepieciešamos hidrauliskās plūsmas parametrus, sistēmas radītās plūsmas struktūra kopā ar nepieciešamību samazināt attālumus starp magnētiem un kausējumu padara to praktisku īstenošanu problemātisku.

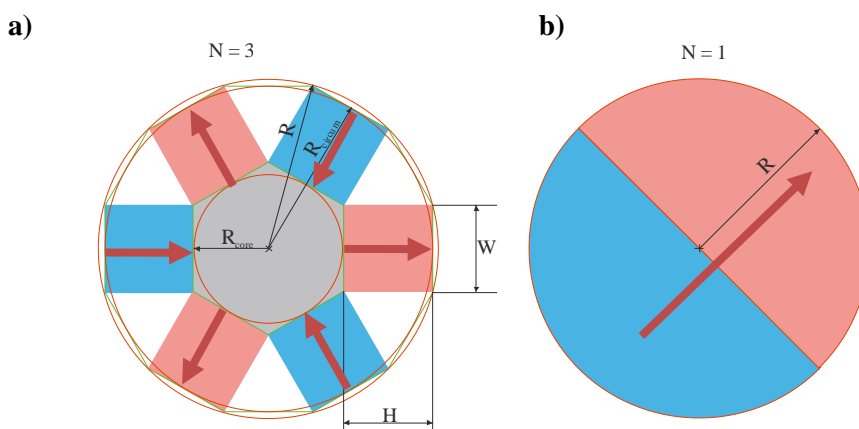
Šajā nodaļā veikto pētījumu rezultāti atspoguļoti sekojošās publikācijās:

1. Bojarevičs, A., Beinerts, T., Gelfgat, Y., Kaldre, I. Permanent magnet centrifugal pump for liquid aluminium stirring. *Journal International Journal of Cast Metals Research*. 2016, 29(3), 154-157. ISSN 1364-0461. e-ISSN 1743-1336. Available from: doi: 10.1080/13640461.2015.1120998.
2. Bojarevičs, A., Beinerts, T., Gelfgat, Yu., Kaldre, I. Use of Permanent Magnets in Electromagnetic Facilities for the Treatment of Aluminum Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016, 47(3), 1626–1633. ISSN 1073-5615. e-ISSN 1543-1916. Available from: doi: 10.1007/s11663-016-0646-5.
3. Kaldre, I., Bojarevics, A., Beinerts, T., Baranovskis, R., Nikoluskins, R., Milgravis, M., Kalvāns, M. Contactless electromagnetic method for aluminium degassing. **In:** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. ISSN 1757-899X. Available: doi: 10.1088/1757-899X/424/1/012057}.

4. MHD sistēmu ar rotējošiem magnētiskajiem dipoliem radīto hidrodinamisko plūsmu izpēte

4.1. Multipola un dipola salīdzinājums

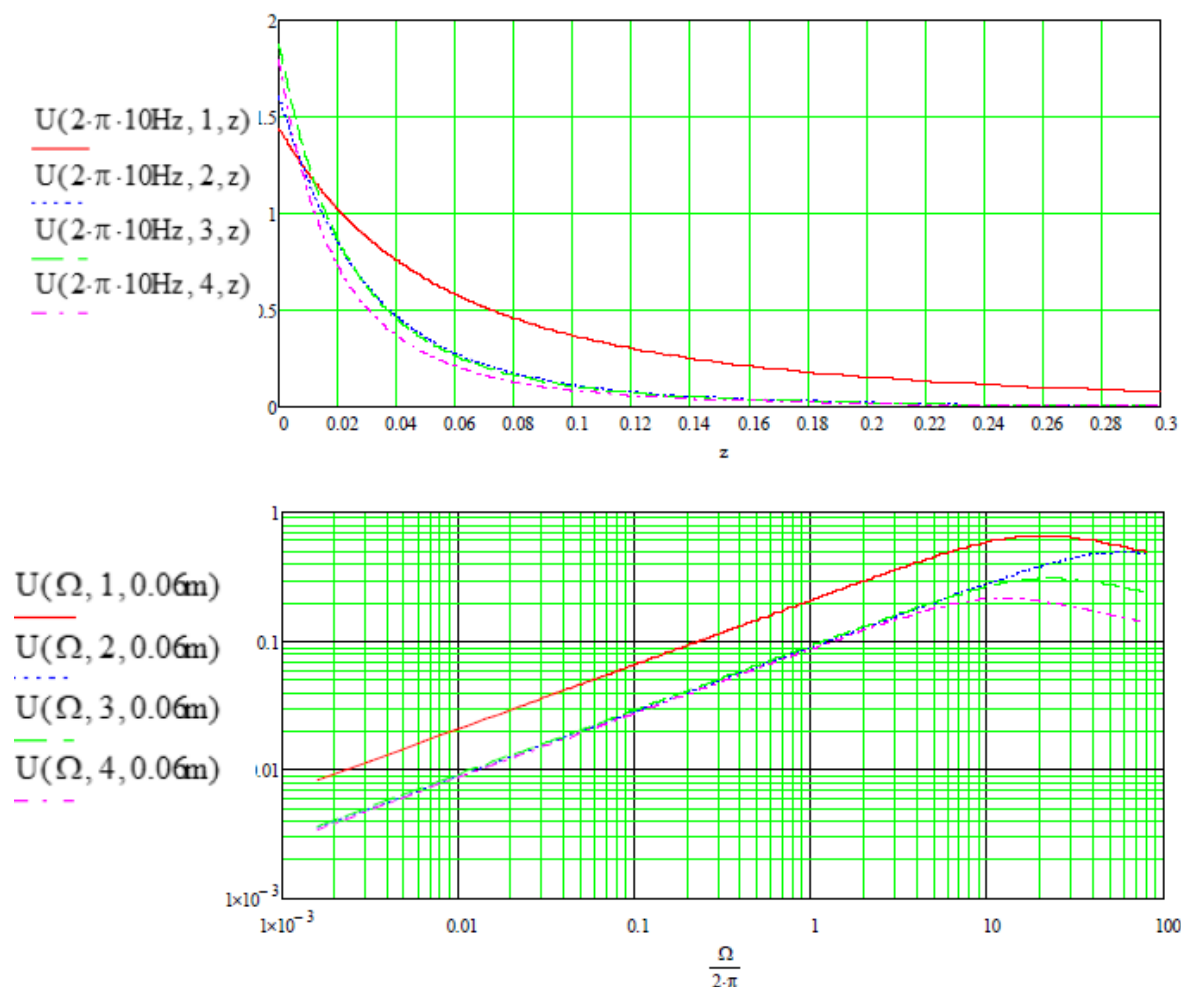
Iepriekš tika apskatītas sistēmas, kur skrejošs magnētiskais lauks tiek iegūts rotējot vairāku polu sistēmai. Šādām sistēmām lauka “skriešana” ir intuitīvi uztverama. Lai iegūtu spēcīgāku skrejošu lauku lielā attālumā no magnētu rotora, tika veikts iepriekš apskatītās cilindriskās sistēmas optimizācijas uzdevums pēc polu pāru skaita N - skat. 4.1. attēlā, kur attēloti gadījumu, kur $N = 3$ un $N = 1$.



4.1. att. Magnētiskā rotora aizpildījums gadījumā ar polu pāru skaitu $N = 3$ a); un $N = 1$ b)

Šeit redzams, ka $N = 1$ dod ievērojami lielāku rotora aploces aizpildījumu ar magnētisko materiālu, un, otrkārt, samazinātu blakus esošo pretējo polu radītā magnētiskā lauka dzēšanos dēļ to lielāka attāluma pa aploci [45], [46].

Veicot analītisku optimizācijas uzdevumu pret polu skaitu N , tika noskaidrots, ka gadījumā, kad attālums no rotora virsmas līdz šķidrajam metālam ir liels, viena pola cilindriskā pastāvīgo magnētu sistēma gan rada ievērojami lielāku magnētisko lauku, gan lielāku šķidrā metāla plūsmu – skat. 4.2. attēlu.



4.2. att. Raksturīgais šķidrā metāla ātrums rezervuārā, ko rada maisītājs ar atšķirīgiem polu pāru skaitu kā funkcija atkarībā no maisītāja attāluma līdz plūsmai pie maisītāja rotācijas frekvences 10 apgriezieni sekundē (augšējais grafiks) un kā funkcija no maisītāja rotācijas frekvences pie maisītāja attāluma līdz šķidrā metāla plūsmai 6cm (apakšējais grafiks)

Šajā darbā apskatīto industriālo uzdevumu kontekstā 1 polu pāru magnētiskie rotorī šeit izskatās perspektīvāki. Attiecīgi tālāk darbā pētīta šādi rotorī ar vienu polu pāru un šo rotoru dažādas kombinācijas, sākot ar vienkāršāko gadījumu – viens rotors (skat. 4.2. nodaļu). Tālāk redzams, ka šādas magnētisko dipolu sistēmas ir iespējams arī kombinēt – šķidrā metāla kustību iespējams radīt uz to iedarbojoties nevis ar vienu, bet ar vairākiem dipoliem vienlaicīgi. Darbā tālāk apskatītas dažādas kombinācijas arī diviem (skat. 4.4. nodaļu), trīs (skat. 4.3. nodaļu) un vēl citas dipolu kombinācijas, ko iespējams mainīt atbilstoši konkrētai apskatāmajai sistēmai.

4.2. Viena magnētiskā dipola radītās plūsmas izpēte

4.2.1. Viena rotējoša dipola radītās plūsmas raksturlielumu kārtas lieluma novērtējums

Iepriekšējā nodaļā tika parādīts, ka gadījumos, kad darba vielas attālums līdz

magnētiskajai sistēmai nav ļoti mazs, visefektīvākā ir sistēma ar magnētiskajiem dipoliem. Šajā nodaļā tiks apskatīta vienkāršākā no magnētisko dipolu sistēmām – viens rotējošs magnētiskais dipols.

Šeit apskatītā sistēma tiks rēķināta pakāpeniski – sākot ar vienkāršāko gadījumu un vairākiem tuvinājumiem. Vēlāk tiks samazināts pieņēmumu skaits un novērtēta veikto tuvinājumu un pieņēmumu precizitāte, palielinot sarežģītības pakāpi.

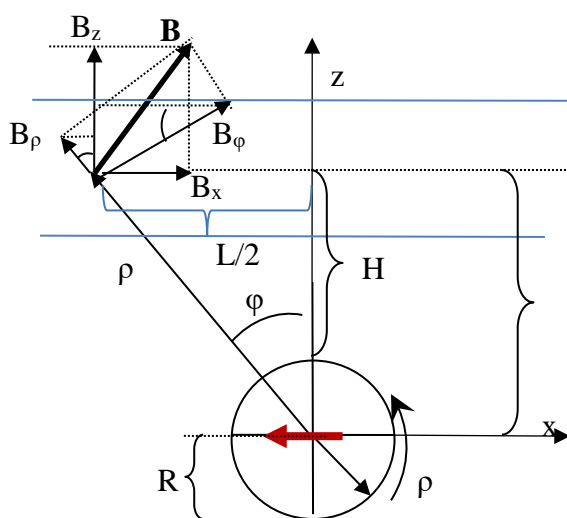
Sistēmas apskate tiks sākota ar viena, bezgalīgi gara magnētiska cilindra apskati divu dimensiju telpā. Lai vēl šo vienkāršotu, vispirms tiks novērtēti tikai sasniedzamie svarīgāko lielumu mērogi jeb kārtas lielumi.

Cilindriska magnēta, kas magnetizēts perpendikulāri tā asij, magnētisko lauku bezgalīgi gara cilindra tuvinājumā var aprakstīt ar vienkāršām izteiksmēm polārajās koordinātēs [47]:

$$B_{\rho} = \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \sin \varphi \quad (4.1.)$$

$$B_{\varphi} = \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \cos \varphi \quad (4.2.)$$

Šeit B_{ρ} – radiālā magnētiskā lauka komponente, B_{φ} – azimutālā magnētiskā lauka komponente, R – cilindra rādiuss, φ – leņķis no ass, kas ir ortogonāla cilindra un magnetizācijas asij, pretēji pulksteņa rādītāja virzienam, ρ – attālums līdz punktam no koordinātu sākumpunkta, B_r magnēta remanence (skat. 4.3. attēlu).



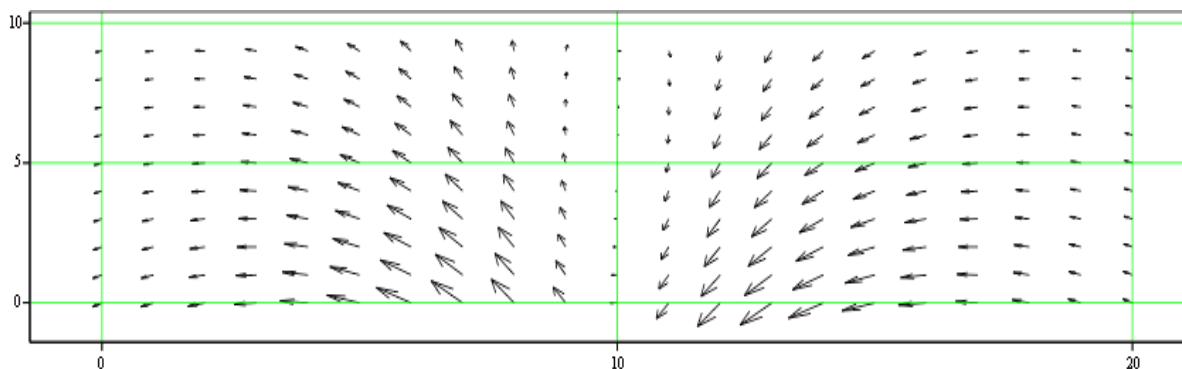
4.3. att. Sistēmas ģeometrija viena cilindra aprakstam

Šis tuvinājums strādā labi, ja magnēta augstums ir ievērojami lielāks par konkrētā punkta radiālo attālumu. Šādā gadījumā jebkurā punktā absolūtā magnētiskā lauka indukcijas vērtība ir konstanta, bet virziens rotē ar tādu pašu frekvenci kā cilindri. Tātad magnētiskā lauka moduļa sadalījums ir:

$$|\vec{B}| = \frac{B_r}{2} \cdot \left(\frac{R}{\rho}\right)^2 \quad (4.3.)$$

Šeit netiks ņemta vērā variācija pa rezervuāra platumu paralēli cilindra asij: $\frac{\partial}{\partial y} \equiv 0$.

Tāpat šeit tiks novērtēta cilindriska magnēta iespēja inducēt kustību, bet netiks apskatīts tieši kādu ātrumu sadalījumu tā rada, lai arī ir zināms, ka šādas sistēmas rada ne tikai translācijas kustību, bet arī virpuļveida spēku un attiecīgu kustību (skat. 4.4. attēlu).



4.4. att. Laikā vidējots elektromagnētiskā spēka sadalījums pēc precīzākiem novērtējumiem, kuros novērojams arī rotējošā magnēta inducētais virpuļveida spēks

Fizikālo procesa var aprakstīt ar Maksvela vienādojumiem, šajā gadījumā aktuāls Faradeja indukcijas likums:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times \vec{E} \quad (4.4.)$$

Vienādojums (4.4.) nosaka, ka mainīgs magnētiskais lauks inducē virpuļainu elektrisko lauku. Kārtas novērtējumos netiks rēķināti precīzi vienādojumi, bet gan tiks novērtēti attiecīgie lielumi.

Izrakstot (4.4.) pa komponentēm iegūstam:

$$\left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}\right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right) \mathbf{j} + \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right) \mathbf{k} = -\frac{\partial B_x}{\partial t} \mathbf{i} - \frac{\partial B_y}{\partial t} \mathbf{j} - \frac{\partial B_z}{\partial t} \mathbf{k} \quad (4.5.)$$

Tā kā tiek aplūkots bezgalīgi garš cilindrs, $\frac{\partial B_y}{\partial t} = 0 \Rightarrow \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right) \mathbf{j} = \mathbf{0}$ un $\frac{\partial E_z}{\partial y} = 0$; $\frac{\partial E_x}{\partial y} = 0$. Rezultātā tiek iegūti divi vienādojumi:

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial B_x}{\partial t} \quad (4.6.)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (4.7.)$$

Pieņemsim, ka raksturīgais izmērs, kurā tiek inducēts elektiskais lauks E_x ir L , bet raksturīgais z izmērs būs šķidrā metāla augstums – h . Raksturīgais laiks, kurā notiek magnētiskā

lauka izmaiņa ir vienāds ar magnētu rotācijas periodu T . Šeit izmantosim to, ka $T = \frac{1}{f}$. Šo saliekot kopā iegūstam:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \Rightarrow \frac{E_{yx}}{L} = -\frac{B_z}{1/f} \rightarrow \quad (4.8.)$$

$$\rightarrow E_{yx} = -B_z f L \quad \left[\frac{Tm}{s} = \left[T = \frac{Vs}{m^2} \right] = \frac{V}{m} \right] \quad (4.9.)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial B_x}{\partial t} \Rightarrow \frac{E_{yz}}{h} = \frac{B_x}{1/f} \rightarrow \quad (4.10.)$$

$$\rightarrow E_{yz} = B_x f h$$

Elektriskajam laukam darbojas superpozīcijas likums, līdz ar to elektriskais lauks ir:

$$E_y = E_{yx} + E_{yz} = -B_z f L + B_x f h = f(B_x h - B_z L) = 0.064 \frac{V}{m} \quad (4.11.)$$

Elektriskais lauks, saskaņā ar Oma likumu diferenciālā formā, rada elektrisko strāvu:

$$E = \frac{j}{k\sigma} \rightarrow j = kE\sigma = k\sigma f(B_x h - B_z L) = 115020 \frac{A}{m^2} \quad \left[\frac{V S}{m m} = \left[S = \frac{A}{V} \right] = \frac{A}{m^2} \right] \quad (4.12.)$$

Šeit j ir strāvas blīvums. Tāpat magnētu rotācijas dēļ šķidrā metālā sāk plūst strāva y ass virzienā. Lai varētu plūst strāva, tai ir jābūt noslēgtai, savukārt lai tā varētu „noslēgties” kāda brīdī, tai ir jāplūst arī perpendikulāri y asij. Šajā brīdī rodas strāvas zudumi, ja vien pretestība, caur kuru strāva noslēdzas nav vienāda ar 0. Tas būtu iespējams, ja būtu bezgalīgi plats šķidrā metāla rezervuārs vai tiktu lietotas speciālas sienas, kas ļoti labi vada elektrību. Tā kā tā nav, tad strāvai nekas cits neatliek, kā „noslēgties” šķidrā metālā. Precīzi aprēķināt caur cik lielu pretestību strāvas noslēgsies būtu ļoti sarežģīti. Tā kā šeit tiek veikts lieluma kārtas novērtējumi, šī efekta korekcijai tiks ieviests ļoti aptuvenš bezdimensionāls koeficients:

$$k = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{W}\right)^2}, \quad (4.13.)$$

kur W – rezervuāra platums. Šo koeficientu var uzskatīt par korekciju īpatnējai vadāmībai. Korekcijas būtība ir tāda, ka jo platāks kanāls, jo vairāk situācija līdzinās bezgalīgi platum kanālam, jo pretestība ir mazāka. Atkarību no x var interpretēt tā, ka, jo strāvas noslēdzas tālāk kanāla pa x asi, jo tām ir „jāveic” garāks ceļš, līdz ar to tādas strāvas tiek vairāk dzēstas. Funkcija būtībā „nodzēs” iespēju strāvām noslēgties ļoti tālu no vietas, kur tās tiek inducētas. Šī korekcija tiek izmantota precīzākos aprēķinos, kur tiek risināti pilni vienādojumi. Šajā gadījumā tiks izmantota integrālā k vērtība, ko iegūtu, ja nointegrētu pa visiem x :

$$k = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{W}\right)^2} dx = \frac{\pi}{\sqrt{W^2}} \quad (4.14.)$$

Pirmajā tuvinājumā tas tiek novērtēts kā 0.65.

Ja vadītājā plūst elektriskā strāva, tad uz to darbojas Lorenca spēks [48]:

$$\mathbf{F}_l = I \cdot \mathbf{W} \times \mathbf{B} \quad (4.15.)$$

\mathbf{W} -vektors, kura lielums ir vienāds ar vada garumu un ir vērš paralēli strāvas plūšanas virzienam. Šajā gadījumā $|\mathbf{W}| = W$. Saskaņā ar vektorālā reizinājuma likumu, šeit darbojas B_z magnētiskā lauka komponente. Magnētiskais lauks gan laikā gan telpā ir mainīgi. Šeit netiks ņemts vērā B lauka sadalījums, bet novērtēts raksturīgās magnētiskā lauka vērtības. Iepriekš tika pieņemts, ka elektriskais lauks tiek inducēts reģionā $x \in \left[-\frac{L}{2}; \frac{L}{2}\right]$. Šeit pieņemsim, ka strāvas un magnētiskā lauka mijiedarbība notiek šajā φ leņķī, kas atbilst L pozīcijai. Lai iegūtu (4.12.) un (4.13.) izteiksmi, tika veikta atvasināšana, kas fizikāli atbilst elektrisko lauka indukcijai atbilstoši magnētiskā lauka izmaiņai, nevis absolūtajai vērtībai. Tā kā \mathbf{B} laikā ir harmoniska funkcija, atbilstoši reizinātājam ir formulas (4.1.) un (4.2.), kas ir trigonometriskas funkcijas. Attiecīgi maksimālā izmaiņa tiek sasniegta, kad $B = 0$. Šajā gadījumā tiks apskatīta B_z komponente, kas virs cilindra ir vienāda ar B_ρ , līdz ar to brīdī, kad tiek inducēts maksimālais magnētiskais lauks, cilindrs ir pagriezies pa 90° no sākumstāvokļa – skat. 4.3. attēlu– šeit redzams, ka aptuveno B_z vērtību aprēķināt, kur ir strāvas un magnētiskā lauka mijiedarbības maksimums.

$$\begin{aligned} B_z &= B_r(\varphi, \rho) \cdot \cos(\varphi) + B_\varphi(\varphi, \rho) \cdot \sin(\varphi) = \left[\rho = \frac{L}{2\sin\varphi}; [4.]; [5.] \right] \\ &= \frac{B_r}{2} \frac{R^2}{\left(\frac{L}{2\sin\varphi}\right)^2} \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) + \frac{B_r}{2} \frac{R^2}{\left(\frac{L}{2\sin\varphi}\right)^2} \cos(\varphi) \cdot \sin(\varphi) \quad (4.16.) \\ &= \frac{2B_r R^2}{L^2} \sin^2\varphi \sin(2\varphi) = 49 \text{ mT} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_x &= B_\varphi(\varphi, \rho) \cdot \cos(\varphi) - B_r(\varphi, \rho) \cdot \sin(\varphi) = \left[\rho = \frac{L}{2\sin\varphi}; [4.]; [5.] \right] \\ &= \frac{B_r}{2} \frac{R^2}{\left(\frac{L}{2\sin\varphi}\right)^2} \cos(\varphi) \cdot \cos(\varphi) - \frac{B_r}{2} \frac{R^2}{\left(\frac{L}{2\sin\varphi}\right)^2} \sin(\varphi) \cdot \sin(\varphi) \quad (4.17.) \\ &= \frac{2B_r R^2}{L^2} \sin^2\varphi \cos(2\varphi) = 28 \text{ mT} \end{aligned}$$

Saskaņā ar (4.13.) un (4.14.) var aprēķināt spēku, kas darbojas uz šķidro metālu. Pirms tam, jāizdala (4.13.) ar W , lai iegūtu spēku uz tilpuma vienību F_V . Šeit redzams, ka, ja izmantotu no (4.3.) izteiksmes B moduļa vērtību, tad atšķirība būtu tikai par 30%, kas kārtas novērtējumiem ir pieņemama precizitāte.

$$F_V = j \times B = k\sigma f(B_x h - B_z L) B_z =$$

$$\begin{aligned}
&= k\sigma f \left(\frac{2B_r R^2}{L^2} \sin^2 \varphi \cos(2\varphi) h - \frac{2B_r R^2}{L^2} \sin^2 \varphi \sin(2\varphi) L \right) \frac{2B_r R^2}{L^2} \sin^2 \varphi \sin(2\varphi) = \\
&= k\sigma f \left(\frac{2B_r R^2}{L^2} \right)^2 \sin^4 \varphi \sin(2\varphi) (\cos(2\varphi) h - \sin(2\varphi) L) = 5657 \frac{N}{m^3}
\end{aligned}$$

$$\left[\frac{A}{m^2} T = \left[T = \frac{Vs}{m^2} \right] = \frac{VAs}{m^4} = \left[V = \frac{kg \cdot m^2}{As^3} \right] = \frac{As}{m^4} \frac{kg \cdot m^2}{As^3} = \frac{kg}{m^2 s^2} = \left[N = \frac{kg \cdot m}{s^2} \right] = \frac{N}{m^3} \right] \quad (4.18.)$$

Nākamajā solī tiks rēķināts spiediens, jo no tā savukārt varēs izrēķināt sagaidāmo ātrumu kanālā. Spiedienu var aprēķināt no:

$$\begin{aligned}
p &= \frac{F}{S} = \frac{F_V V}{hW} = \frac{F_V hWL}{hW} = F_V L = \\
&= k\sigma f L \left(\frac{2B_r R^2}{L^2} \right)^2 \sin^4 \varphi \sin(2\varphi) (\cos(2\varphi) h - \sin(2\varphi) L) = 0.4 \text{ kPa} \left[\frac{Nm}{m^3} = \frac{N}{m^2} = Pa \right]
\end{aligned}$$

Izmantojot vienkāršotu nesaspiežama šķidrums plūsmas vienādojumu [11]:

$$\frac{1}{\rho} dp + v dv = 0 \quad (4.19.)$$

Pieņemot, ka dots ideāls šķidrums, nav pretestības spēku, $dp = \Delta p = p$, $dv = \Delta v = v$, var tuvināti novērtēt šķidrums plūsmas lieluma kārtu:

$$\begin{aligned}
v_x &\approx \sqrt{\frac{p_x}{\rho}} = \sqrt{\frac{\sigma f L \left(\frac{2B_r R^2}{L^2} \right)^2 \sin^4 \varphi \sin(2\varphi) (\cos(2\varphi) h - \sin(2\varphi) L)}{\rho}} = \\
2B_r R^2 &\sqrt{\frac{\sigma f \sin^4 \varphi \sin(2\varphi) (\cos(2\varphi) h - \sin(2\varphi) L)}{L^3 \rho}} = \sqrt{\frac{391}{6400}} = 0.24 \frac{m}{s} \left[\sqrt{\frac{Pa}{\frac{kg}{m^3}}} = \right] \quad (4.20.) \\
\left[Pa = \frac{N}{m^2} \right] &= \sqrt{\frac{\frac{N}{m^2} m^3}{kg}} = \left[N = kg \cdot \frac{m}{s^2} \right] = \left(\frac{kg \cdot m^2}{kg \cdot s^2} \right)^{0.5} = \frac{m}{s}
\end{aligned}$$

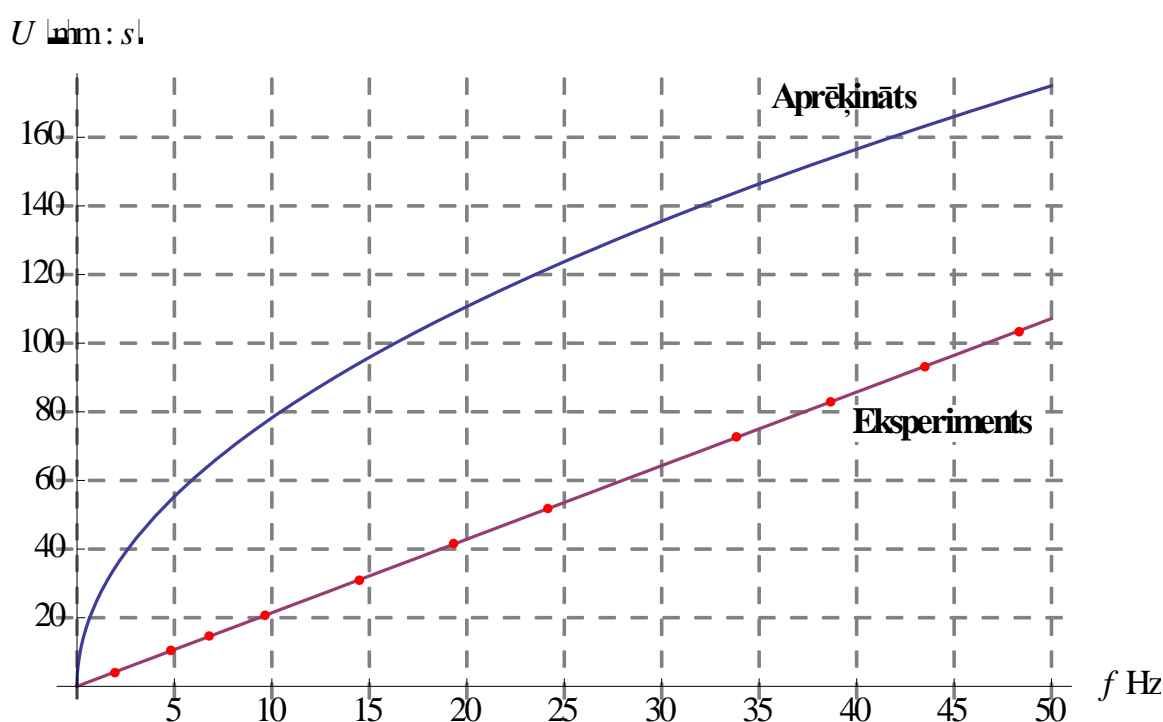
Lai būtu iespējams salīdzināt iegūto rezultātu, skaitlisko rezultātu iegūšanai tika lietotas tās pašas parametru vērtības, kas konkrētā eksperimentā. Šīs parametru vērtības ir apkopotas 4.1. tabulā, bet salīdzinājums ir redzams 4.5. attēlā.

4.1. tabula

Analītiskajos un eksperimentos izmantoto parametru vērtības un paskaidrojumi

Fizikālais lielums	Apzīmējums	Vērtība	Mērvienība
Elektrovadāmība	σ	$3.3 \cdot 10^6$	S/m
Remanence	Br	1.42	T
Blīvums	ρ	6400	kg/m ³
Attālums no cilindra ass līdz šķidrā metāla	H	0.06	m

viduspunktam			
Magnētiskā lauka rotācijas frekvence	f	25	Hz
Magnētu rādiuss	R	0.02	m
Korekcija elektrovadāmībai	k	0.65	
Leņķis, kas tiek atskaitīts no ass, kas ir perpendikulāra magnēta magnetizācijas virzienam.	φ	$\pi/6$	rad
Attālums, kurā tiek inducēts elektriskais lauks.	L	$2H \tan \varphi$	m
Šķidrā metāla augstums	h	0.03	m
Kanāla platums	W	0.05	m



4.5. att. Kārtas novērtējuma un eksperimenta salīdzinājums – inducētā integrālā ātruma U atkarība no magnētiskā lauka rotācijas frekvences f

4.5. attēlā redzams, ka kārtas novērtējumos aprēķinātais un eksperimentāli nomērītie rezultāti atšķiras aptuveni 2 reizes, kas ir uzskatāms par labu rezultātu, ņemot vērā daudzus pieņēmumus, kas tika veikti. Interesanti, ka arī atkarība no frekvences diezgan labi atbilst eksperimentāli novērotajai. Principā, lai vēl labāk varētu pārliecināties par novērtējumu atbilstību realitātei, būtu bijis vēlams, ja būtu vēl kāda līkne eksperimentāli uzņemta, piemēram, citā attālumā.

4.2.2. Viena cilindra detalizētāks analītisks apskats

Šajā nodaļā tiks vēlreiz apskatīts viens rotējošs cilindrs, kas magnetizēts perpendikulāri tā asij. Tomēr šoreiz aprēķina gaitai tiks iets cauri, mēģinot izdarīt mazāk pieņēmumus kā iepriekšējā nodaļā. Ja iepriekšējās nodaļas mērķis bija iepazīties un izprast darbā notiekošos

procesus, tad šīs nodaļas uzdevums būs iepazīties ar iespēju šos procesus aprakstīt formālāk ar matemātikas palīdzību. Abi šie starp-soļi ir izšķiroši nepieciešami pirms mēģinājuma modelēt 3 un vairāk cilindru sistēmu.

Magnētiskais lauks

Aprēķinus sāksim ar magnētisko lauku. Šī tad arī būs pirmā būtiskā atšķirība no kārtas novērtējumiem – tiks rēķināts viss sadalījums, nevis tikai paņemta magnētiskā lauka vērtība vienā punkta. Saprotams, ka šis ir ļoti nozīmīgs punkts, jo magnētiskais lauks tik tiešām ir ļoti atšķirīgs dažādos telpas punktos, līdz ar to ņemt vērā tikai divus punktus zināmā mērā ir pat absurdi. Pirmais, kas ir jāizdara, ir jāveic koordinātu transformācija, lai magnētiskais lauks aprakstītu magnētisko lauku koordinātu sistēmā, kas būtu ērti lietojama kanālam – respektīvi Dekarta koordinātu sistēma.

Šī transformācija ir jau sāкта iepriekšējā nodaļā, iegūstot (4.17.) un (4.18.). Tomēr gadījumā L un φ būs mainīgi lielumi, nevis kādas noteiktas vērtības, līdz ar to gala izteiksmes nevarēsīm izmantot, tomēr pirmais solis, kas principā ir visgrūtākais būs tāds pats. Transformācijā izmantosim šo pašu 4.3. attēlu, lai iegūtu ģeometriskās likumsakarības, tikai uzreiz jāatzīmē, ka z ass nulles punkts būs šķidrā metāla slāņa viduspunktā.

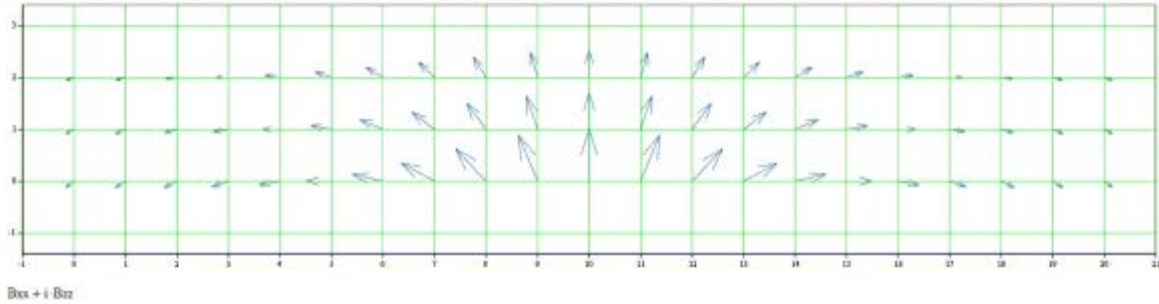
$$\begin{aligned}
 B_x &= B_\varphi(\varphi, \rho) \cdot \cos(\varphi) - B_\rho(\varphi, \rho) \cdot \sin(\varphi) \\
 &= \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \cos \varphi \cdot \cos(\varphi) - \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \sin \varphi \cdot \sin(\varphi) = \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \cos 2\varphi \\
 B_z &= B_\rho(\varphi, \rho) \cdot \cos(\varphi) + B_\varphi(\varphi, \rho) \cdot \sin(\varphi) = \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \sin \varphi \cdot \cos(\varphi) + \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \cos \varphi \cdot \\
 &\quad \sin(\varphi) = \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \sin 2\varphi
 \end{aligned} \tag{4.21.}$$

Tāpat šoreiz nepieciešams ieviest laiku jeb likt cilindriem rotēt. To dara pieskaitot leņķim φ laikā mainīgu fāzi $w \cdot t = 2\pi f t = \frac{2\pi t}{T}$ un ar šo jauno leņķi aizstāt φ (4.22.) izteiksmē:

$$\begin{aligned}
 \varphi_t &= \varphi + wt \\
 B_x &= \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \cos 2(\varphi + tw) = \left[\begin{array}{l} \rho = \sqrt{x^2 + (H + R + z)^2} \\ \varphi = \text{ArcTan} \left(\frac{x}{H + R + z} \right) \end{array} \right] \\
 &= \frac{BrR^2 \text{Cos} \left[2 \left(tw + \text{ArcTan} \left[\frac{x}{H + R + z} \right] \right) \right]}{2((H + R + z)^2 + x^2)} \\
 B_z &= \frac{B_r R^2}{2 \rho^2} \sin 2(\varphi + tw) = \frac{BrR^2 \text{Sin} \left[2 \left(tw + \text{ArcTan} \left[\frac{x}{H + R + z} \right] \right) \right]}{2((H + R + z)^2 + x^2)}
 \end{aligned} \tag{4.22.}$$

Šeit var ievērot, ka risinot problēmu ar mazāk pieņēmumiem un ar precīzākām matemātikas izteiksmēm, tās kļūst arī ievērojami garākas. Šī iemesla dēļ praktiski nekur vairs netiks rakstīti pilnie vienādojumi, bet gan tikai principiālas darbības un, kur būs iespējams un vērts, rezultāti tiks vizualizēti ar grafiku vai citu līdzekļu palīdzību. Šajā brīdī ir iegūta gara

izteiksme, kas apraksta magnētiskā lauka sadalījumu. Lai pārbaudītu, vai tā varētu atbilst realitātei, tā vizualizēta grafiski 4.6. attēlā.



4.6. att. Magnētiskā lauka sadalījums ap vienu cilindru, kad magnetizācija ir vērsta vertikāli augšup

Elektriskais lauks

Nākamais solis ir atkal atgriezties pie (4.7.) vienādojuma un meklēt elektrisko lauku integrējot (4.9.) un (4.10.) izteiksmi kā tas ir redzams šeit:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \rightarrow E_{yz} = -\int_{-L}^L \frac{\partial B_z}{\partial t} dx \quad (4.23.)$$

$$= -\int_{-L}^L \frac{2Brf\pi R^2 \cos\left[2\left(2f\pi t + \text{ArcTan}\left[\frac{x}{H+R+z}\right]\right)\right]}{x^2 + (H+R+z)^2} dx$$

$$= -\frac{2Brf\pi R^2 \cos[4f\pi t] \sin\left[2\text{ArcTan}\left[\frac{L}{H+R+z}\right]\right]}{H+R+z}$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial B_x}{\partial t} \rightarrow E_{yx} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{\partial B_x}{\partial t} dz \quad (4.24.)$$

$$= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} -\frac{2Brf\pi R^2 \sin\left[2\left(2f\pi t + \text{ArcTan}\left[\frac{x}{H+R+z}\right]\right)\right]}{x^2 + (H+R+z)^2} dz$$

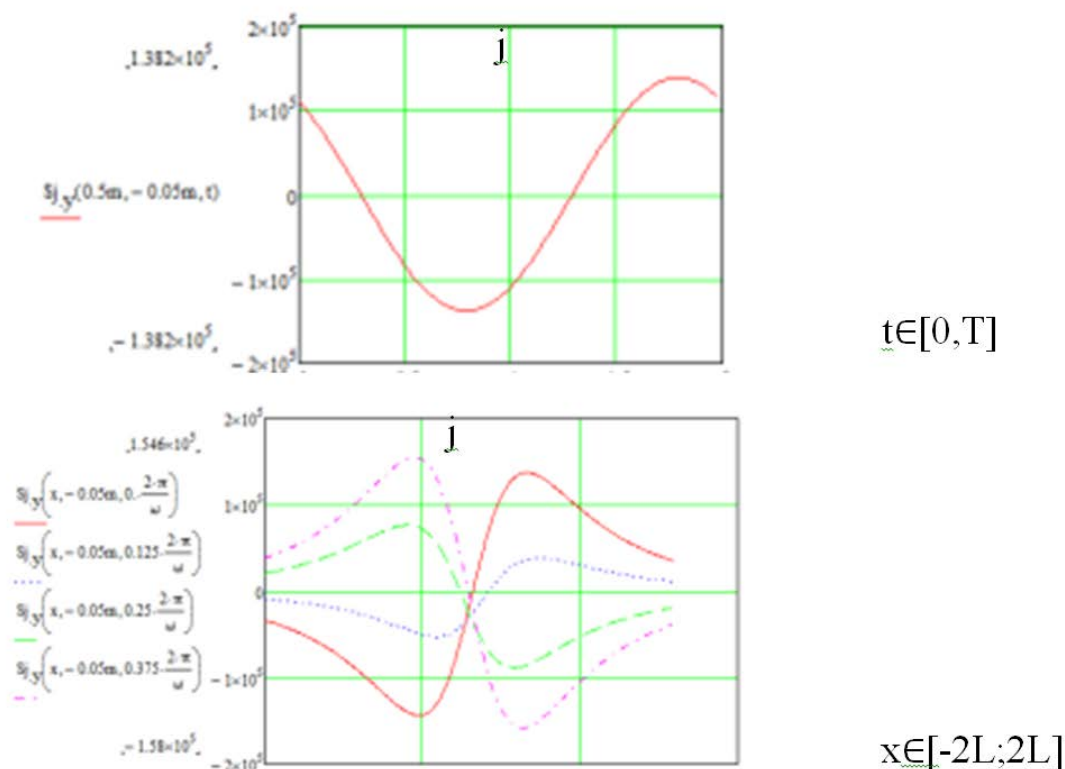
$$= -\frac{2Brf\pi R^2 \sin[4f\pi t] \sin\left[2\text{ArcTan}\left[\frac{h}{2(H+R+z)}\right]\right]}{H+R+z}$$

Tāpat kā kārtas novērtējumos (4.13.) izteiksmē tālāk tiek aprēķināts kopējais elektriskais lauks saskaitot (4.23) un (4.24.) izteiksmē iegūtos rezultātus $E_y = E_{yx} + E_{yz}$. Attiecīgi elektriskā strāva tagad tiek izrēķināta pierēzinot E_y klāt elektrovadāmību σ saskaņā ar Oma likumu diferenciālā formā un līdzīgu koeficientu kā kārtas novērtējumos:

$$k = \frac{1}{1+\left(\frac{x}{w}\right)^2} \quad (4.25.)$$

Šeit iespējams pielietot dažādu „strāvu dzēšanas” koeficientu dažādiem attālumiem x ,

kas fizikāli varētu tikt interpretēts tā, ka, jo strāva noslēdzas pa lielāku loku – tālāk no $z=0$ ass – jo lielāka pretestība tai ir jāpārvar, līdz ar to efektīvā strāvas vērtība, kas plūdis y ass virzienā kļūs mazāka. Integrējot noteiktā apgabalā iespējams novērtēt šo koeficientu kārtas novērtējumiem – tā tas arī tika darīts. Rezultātā iegūstam šādu izteiksmi elektriskajai strāvai: $j_y = k\sigma E_y$. Grafiski tas atainots 4.7. attēlā. Šajā grafikā īpaša uzmanība jāpievērš tam, lai integrālā strāva tiektos uz 0 – respektīvi, lai nebūtu tilpumā strāvas avotu.



4.7. att. Elektrisko strāvu sadalījums kanālā: augšējā grafikā attēlota strāvas maiņa viena perioda laikā: apakšējā grafikā redzams strāvas sadalījums pa x asi, kas pagājis 1/4 daļa no perioda

Spēks un spiediens

Šoreiz tiks aprēķināta spēkam arī z komponente. Līdzīgi kā kārtas novērtējumos, spēku var aprēķināt, izmantojot Laplasa likumu:

$$f_x = j_y B_z \quad (4.26.)$$

$$f_z = j_y B_x \quad (4.27.)$$

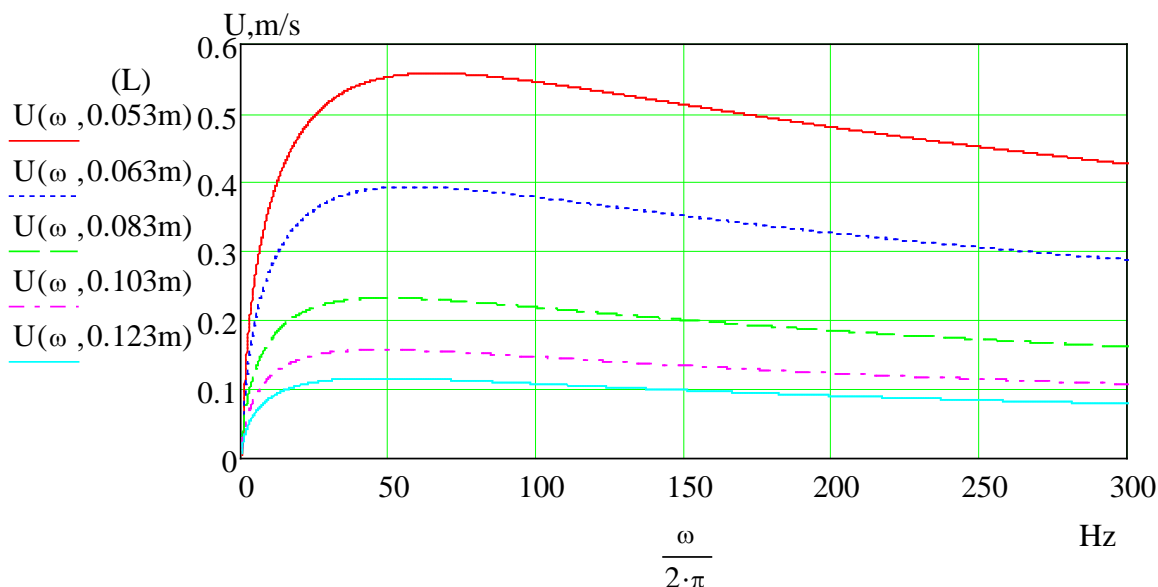
Jau ievērojām, ka pie elektriskā lauka analītiskās izteiksmes sanāk garas. Tāpēc turpmāk tiks attēloti tikai galvenie rezultāti. Pašas izteiksmes tiek rēķinātas programmās MathCad un Mathematica. Izpildot (4.23.) un (4.24.) formulā attēlotās darbības, iegūst spēka sadalījuma grafiku – skat. 4.4. attēlu.

Lai tieši salīdzinātu ar eksperimentu, laikā vidējotu spēka sadalījumu var aprēķināt, izmantojot šādas sakarības:

$$f_{vidx} = \frac{\int_0^T f_x dt}{T} \quad (4.28.)$$

$$f_{vidz} = \frac{\int_0^T f_z dt}{T} \quad (4.29.)$$

Zinot spēka sadalījumu kanālā, iespējams aprēķināt arī ātrumu sadalījumu – skat. 4.8. att.



4.8. att. Analītiski novērtētais šķidrā metāla ātruma rezervuārā sadalījums viena rotējoša dipola gadījumā atkarībā no attāluma L no cilindra ass līdz metāla viduspunktam un rotācijas frekvences

Eksperimentā bieži tiek nomērīti raksturīgie ātrumi, nevis precīzs ātruma sadalījums. Arī no šeit aprēķinātā sadalījuma var iegūt raksturīgos ātrumus, ņemot pa pamatu to pašu metodi, kas tika izmantota kārtas novērtējumos – respektīvi tiks meklējot līdzsvaru starp šķidruma inerciālajiem un inducētajiem elektromagnētiskajiem spēkiem. Tā kā šeit ir nevis viens konkrēts spēks, bet gan spēka sadalījums ar divām komponentēm, lai iegūtu spiedienu, šis spēks tiek integrēts pa tilpumu:

$$p_x = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{vidx} dx \quad (4.30.)$$

Raksturīgo ātrumu iespējams novērtēt saskaņā ar (4.20.) izteiksmi:

$$v_x \approx \sqrt{\frac{p_x}{\rho}}$$

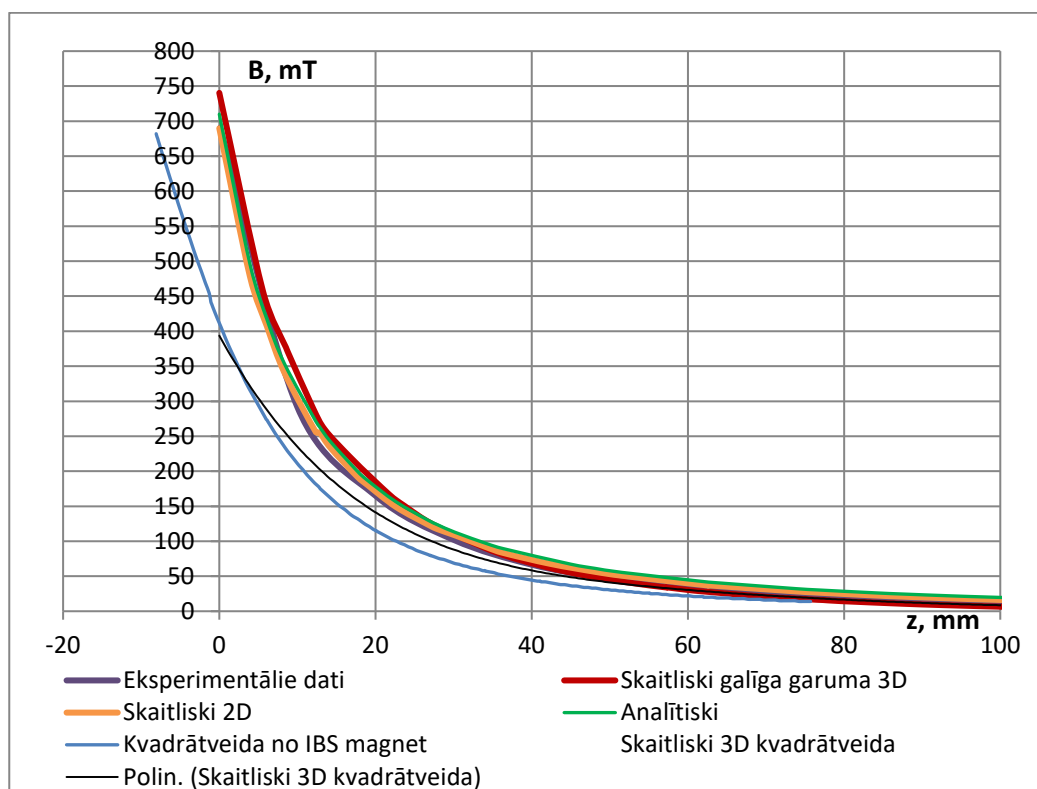
Līdzīgi (4.30.) izteiksmei nointegrējot spēka z komponenti (4.29.), var novērtēt sagaidāmās virsmas deformācijas:

$$p_z \approx \rho g h_d \Rightarrow h_d \approx \frac{p_z}{g\rho} \quad (4.31.)$$

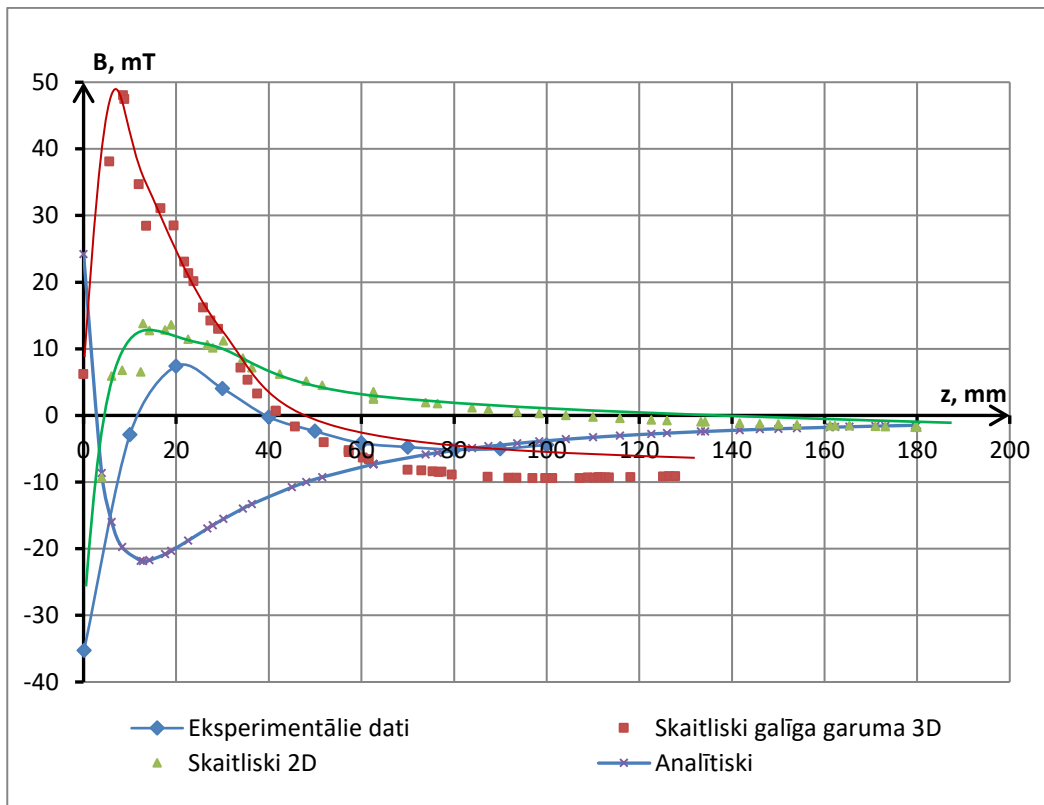
4.2.3. Viena magnētiska cilindra magnētiskā lauka aprēķins

Iepriekšējās divās nodaļās redzams, ka magnētiskā lauka intensitātei un sadalījumam ir izšķiroša nozīme pētāmo sistēmu efektivitātei. Šī iemesla dēļ nepieciešams magnētiskā lauka aprēķinus un novērtējumus papētīt mazliet tuvāk un salīdzināt tos ar eksperimentālajiem mērījumiem. Visos iepriekšējos aprēķinos tika izmantotas vienkāršās analītiskās izteiksmes: (4.4.) un (4.5.). Nepieciešams noskaidrot šo analītisko izteiksmju atbilstību dabā un veikt atbilstošas korekcijas magnētiskā lauka intensitātes novērtējumos. Šajā nodaļā tiks apskatīts viens cilindru. Arī sistēmām ar vairākiem dipoliem, kas tiks apskatītas vēlāk, magnētiskais lauks ir kritisks, bet tad laiku iespējams joprojām iegūt pēc superpozīcijas principa, jo trīs un vairāku magnētu radītais magnētiskais lauks atbilst summai no katra magnēta radītā magnētiskā lauka tāpēc, ka šim materiālam NdFeB magnētiskā caurlaidība ir ļoti tuva 1 (~1.05), kas nozīmē, ka šī materiāla klāt esamība magnētisko lauku praktiski neietekmē (nepastiprina). Turklāt vairāku dipolu radīto lauku ir grūtāk eksperimentāli nomērīt dēļ tā sarežģītības.

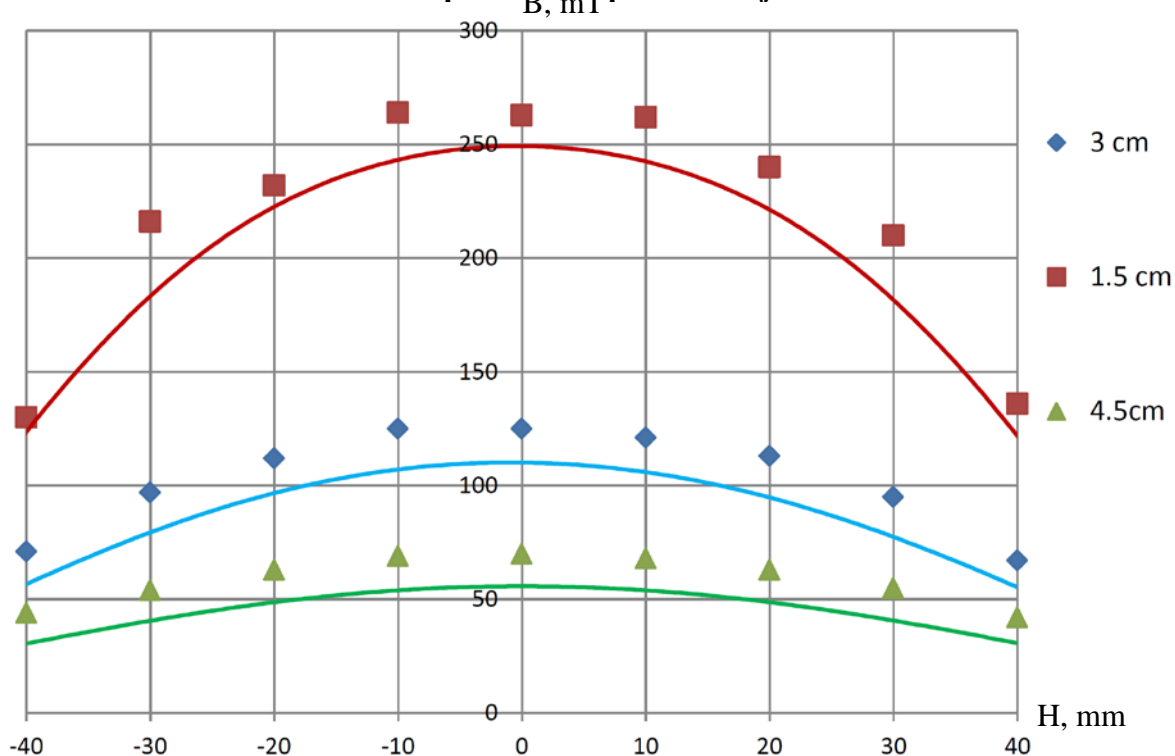
Salīdzināšanai vispirms tika izvēlēts magnētiskā lauka sadalījums perpendikulāri cilindra asij no cilindra vidus sākot no magnēta virsmas, jo šeit būs iespēja viegli salīdzināt savstarpēji gan analītiskos gan iegūt eksperimentālos rezultātus - tie apkopoti 4.09., 4.10. un 4.11. attēlos.



4.9. att. Magnētiskā lauka sadalījums 1 cilindram pa z asi no magnēta virsmas vidus



4.10. att. Absolūtā novirzē no eksperimenta, aproksimācijas datiem

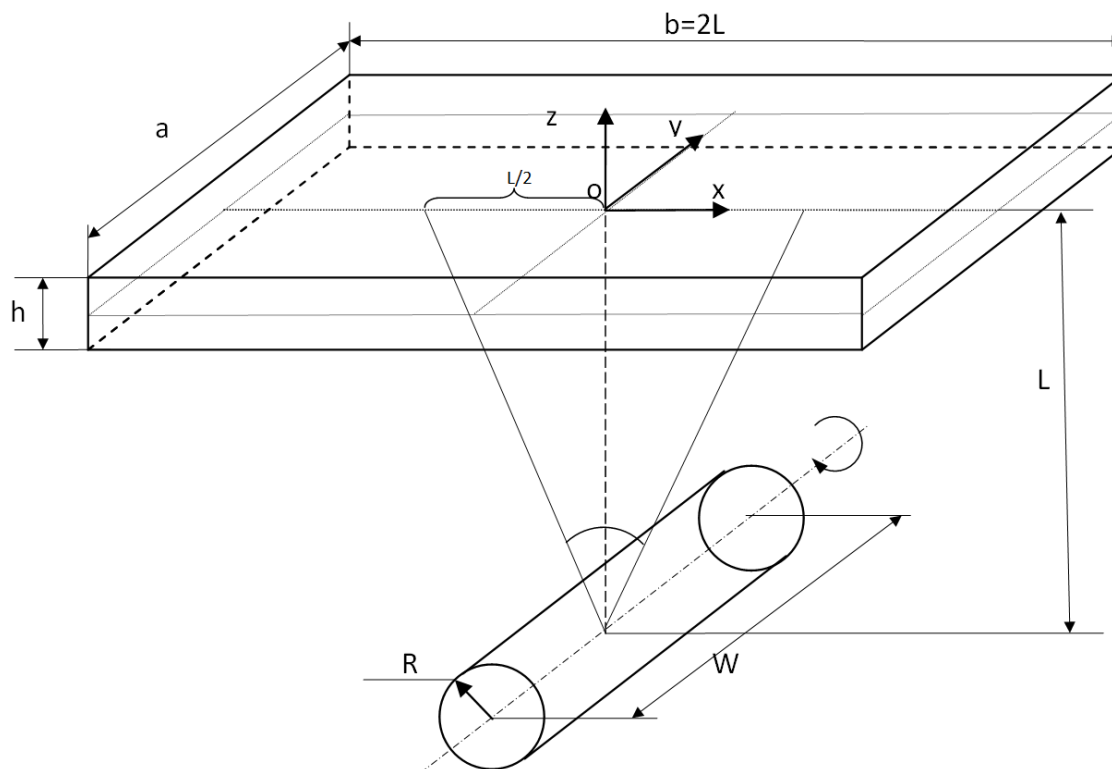


4.11. att. Skaitliski aprēķinātā (nepārtrauktās līnijas) un eksperimentāli izmērītā (punkti) magnētiskā lauka sadalījuma salīdzinājums cilindra asij paralēlu līniju

4.2.4. Eksperimentāla viena magnētiska dipola radītās plūsmas izpēte

4.2.4.1. Magnētiskās sistēmas zem rezervuāra radītās plūsmas izpēte

Analoģiski 3. nodaļā izpētītājām koncepcijām, arī viena cilindra radītā šķidrā metāla plūsmu nepieciešams izpētīt eksperimentāli t.sk. izveidotā analītiskā modeļa verificēšanai, kas nepieciešama iekārtas tālākai mērogošanai. Lai to izdarītu, tika izstrādāta eksperimentālās iekārtas koncepcija - skat. 4.12. attēlā – kas ietvēra taisnstūrveida InGaSn rezervuāru, zem kura novietots rotējošs pastāvīgo magnētu dipols.



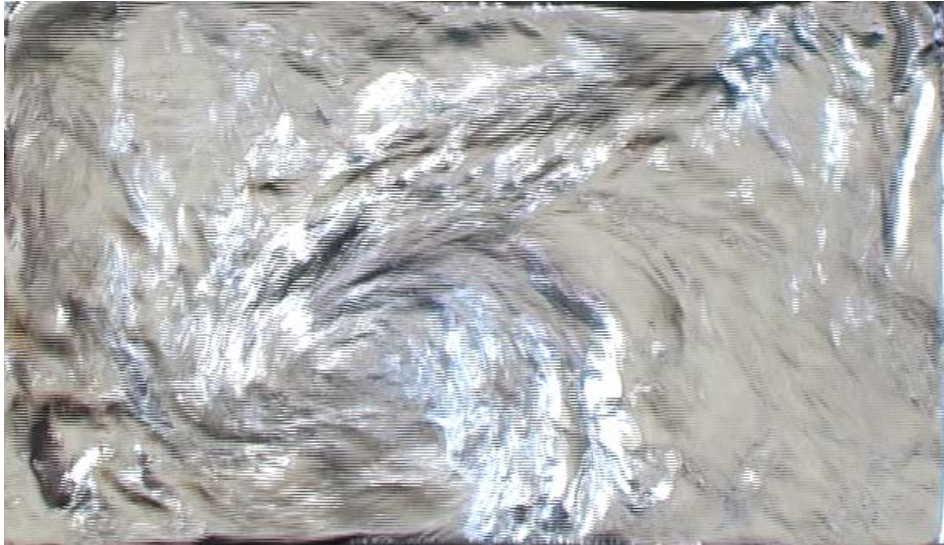
4.12. att. Viena magnētiska dipola radītās šķidrā metāla plūsmas eksperimentālās iekārtas shematisks attēlojums

Eksperimentālās iekārtas realizācijā (skat. 4.13. attēlu) tika izmantota vienkārša plastmasas vanna. Magnēta piedziņai izmantots 3kW motors ar siksnas piedziņu, kura rotācijas frekvenci bija iespējams kontrolēt izmantojot standarta frekvenču pārveidotāju. Šķidrā metāla ātrums tika mērīts izmantojot jau iepriekš aprakstīto Ultraskaņas Doplera anemometru. Te jāatzīmē, ka šeit zonde tika ievadīta tieši metālā, turklāt noteiktā leņķi pret metāla plūsmas ātruma mērījuma rādījumu, attiecīgi rezultātu koriģējot, izmantojot ģeometriskus apsvērumus.



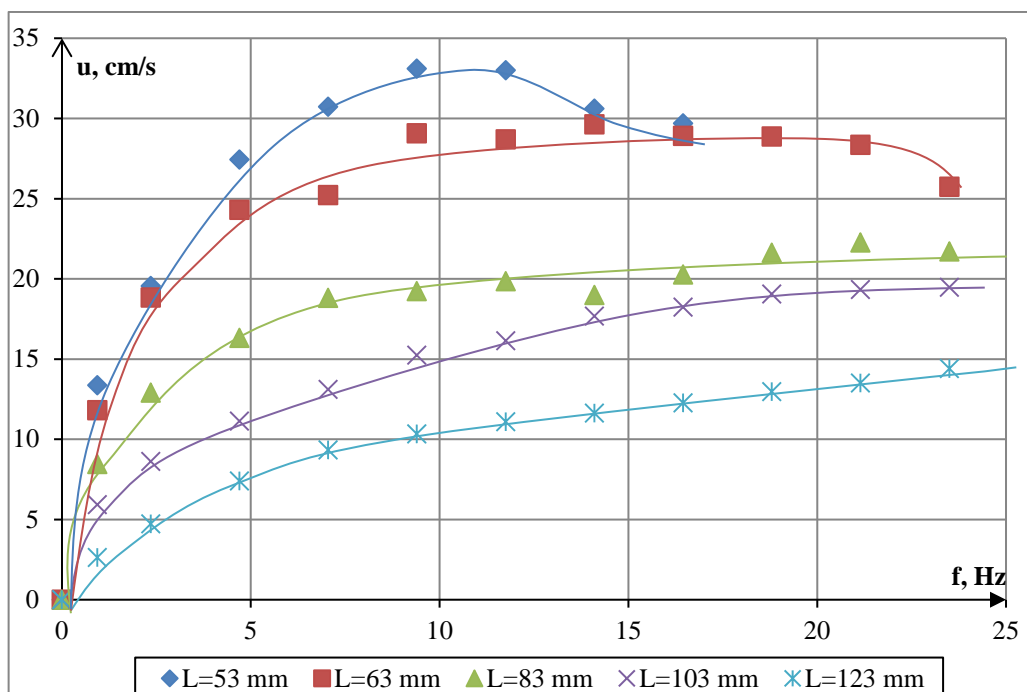
4.13.att. Eksperimentālā iekārta viena rotējoša magnētiskā dipola radītās plūsmas taisnstūrveida rezervuārā izpētei

Eksperimentos vispirms kvalitatīvi bija iespējams novērtēt magnētiskā dipola radītās plūsmas virsmas deformācijas. Kā iepriekš aprakstīts, virsmas deformācijas ir tieši saistītas ar šķidrā metāla ātrumu. Pēc plūsmas deformācijām var tuvināti spriest arī par pašas plūsmas struktūru, novērtējot, pirmkārt, metāla maisīšanās efektivitāti, un, otrkārt, plūsmas raksturīgo ātrumu reģionus, kur jēgpilni iespējams veikt detalizētākus šķidrā metāla mērījumus. 4.14. attēlā redzams, ka viens dipols rada makroskopisku šķidrā metāla virpuļi. Attiecīgi var secināt, ka, pirmkārt, notiek visai efektīva tilpuma maisīšanās, un, otrkārt, piemēram virpuļa centrā veikti šķidrā metāla ātruma mērījumi var neraksturot plūsmas intensitāti kopumā. Tāpēc detalizētiem mērījumiem tika izvēlēts reģions rezervuāra vidū, kur plūsma ir izteikta virzienā, kas ir perpendikulārs magnēta asij. Turklāt pēc virsmas deformācijas lieluma var spriest arī par raksturīgajiem plūsmu ātrumu kārtas lielumiem. Šāda “mērījumu metode”, protams, ir pārāk neprecīza, tomēr noder, lai pārliecinātos, ka iegūtie mērījumu rezultāti ar citu metodi ir saprātīgi.



4.14.att. Viena rotējoša magnētiskā dipola, kas novietots zem šķidrā metāla rezervuāra, radītās plūsmas virsmas deformācijas. $L = 0.05\text{m}$, $w = 80 \text{ rad/s}$

Detalizētāki šķidrā metāla ātruma mērījumi tika veikti ar Ultraskaņas Doplera anemometru. Ātruma mērījumi veikti ar vienu 10 MHz zondi, to tiešu iemērcot šķidrā metālā $\sim 30^\circ$ leņķī, un veicot ātruma kompensāciju atbilstoši ģeometriskiem apsvērumiem [49],[50]. Iegūtie ātruma mērījumu rezultāti konkrētajā sistēmā apkopoti 4.15. attēlā.



4.15. att. Ar Ultraskaņas Doplera anemometru iegūtie ātruma mērījumu rezultāti taisnstūrveida rezervuārā ar vienu rotējošu dipolu, atkarībā no attāluma starp cilindru un šķidro metālu L un magnēta rotācijas frekvenci f

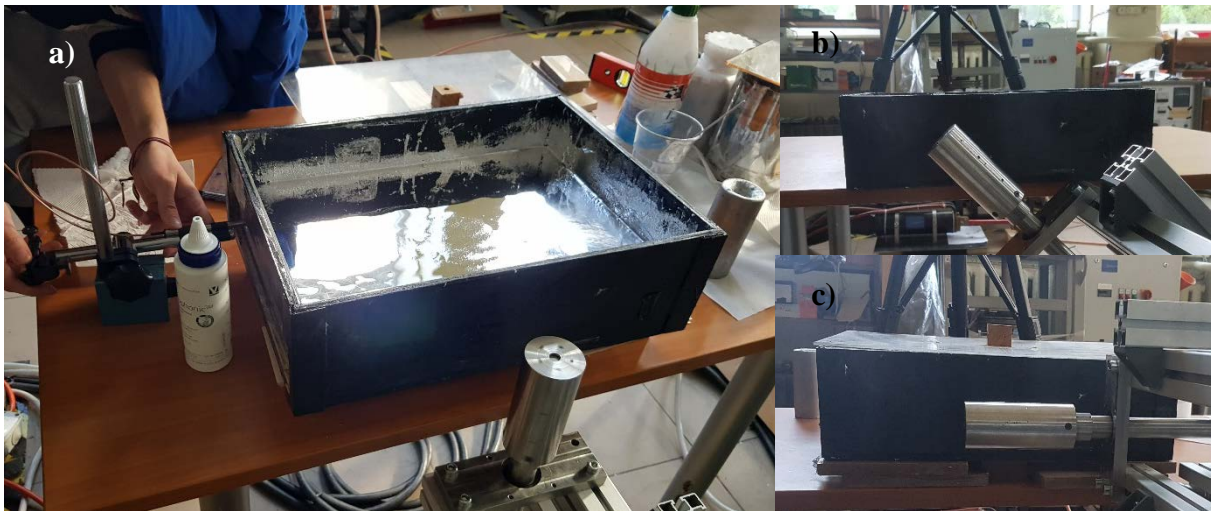
4.12. attēlā attēlotie laikā vidējie šķidrā metāla ir iegūti ar vismaz 25 % kļūdas diapazonu. Plūsmas struktūra bija laikā mainīga un jūtīga uz pat mazām ģeometrijas variācijām attiecībā uz dipolu un šķidrā metāla rezervuāra savstarpējo novietojumu. Raksturīgais liela mērogu plūsmu izmaiņas laiks sasniedza vairākas minūtes, tomēr pietiekami ilga katra mērījuma iegūšana un attiecīgi pienācīgi ilga vidējošana laikā nebija iespējama dēļ metāla virsmas straujās oksidācijas, it sevišķi pie salīdzinoši lieliem ātrumiem. Ātruma mērījumi tika iegūti katrā punktā veicot mērījumus vairākas minūtes, vizuāli novērojot vai plūsmas struktūra būtiski nav mainījusies.

4.12. attēlā redzams, ka ir novērota plūsmas ātruma piesātināšanās pie visai zemām dipolu rotācijas frekvencēm, gadījumā, kad attālums L starp dipolu asīm un šķidro metālu ir mazs. Šāds efekts netika novērots iepriekš veiktajos analītiskajos novērojumos (skat. 4.2.2. nodaļu). Var attiecīgi izteikt hipotēzi, ka šis efekts ir novērojams nevis magnētiskā lauka mijiedarbības dēļ, bet gan hidrodinamisku efektu dēļ – piemēram lielas plūsmas turbulences intensitātes un/vai spēcīgu brīvās virsmas deformācijas, un pārāk mazā rezervuāra lieluma pie lieliem plūsmu ātrumiem, kas plūsmas “nobremzē” vēl pirms tās ir sasniegušas magnētiskajiem parametriem atbilstošu maksimālo ātrumu.

4.2.4.2. Magnētiskās sistēmas blakus rezervuāra radītās plūsmas izpēte

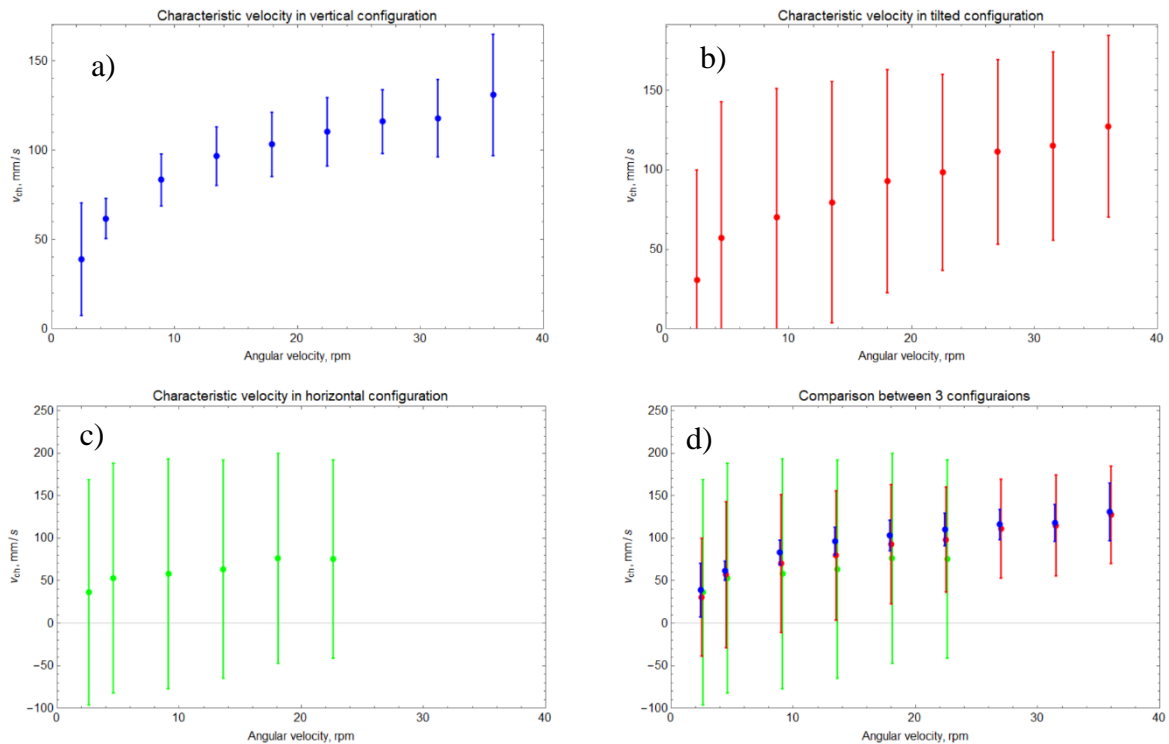
Iepriekš apskatītā sistēma atbilst industriālam pielietojumam, kur alumīnija pārkausēšanas krāsnij elektromagnētiskais maisītājs tiek novietots speciālā nišā zem krāsns (skat. arī 9.2. pielikumu) Šī ir visplašāk izmantotā elektromagnētiskā maisītāja izmantošanas koncepcija, tomēr bieži šādu nišu zem krāsns nav iespējams vai ir ļoti dārgi iebūvēt. Tāpēc ļoti populāra koncepcija ir maisīt šķidro metālu elektromagnētisko maisītāju novietojot rezervuāram no sāniem.

Apakšnodaļā apskatīti eksperimentālie rezultāti šādas iespējas izpētei, izmantojot analogisku taisnstūrveida InGaSn rezervuāru, kuram pie sāniem novietots pastāvīgo magnētu dipols (skat. 4.16. attēlu).



4.16. att. PM magnētiskā dipola novietojums eksperimentos ar elektromagnētisko maisīšanu no rezervuāra sāna. a) vertikāls, b) sagāzts 45 ° grādu leņķī c) horizontāls

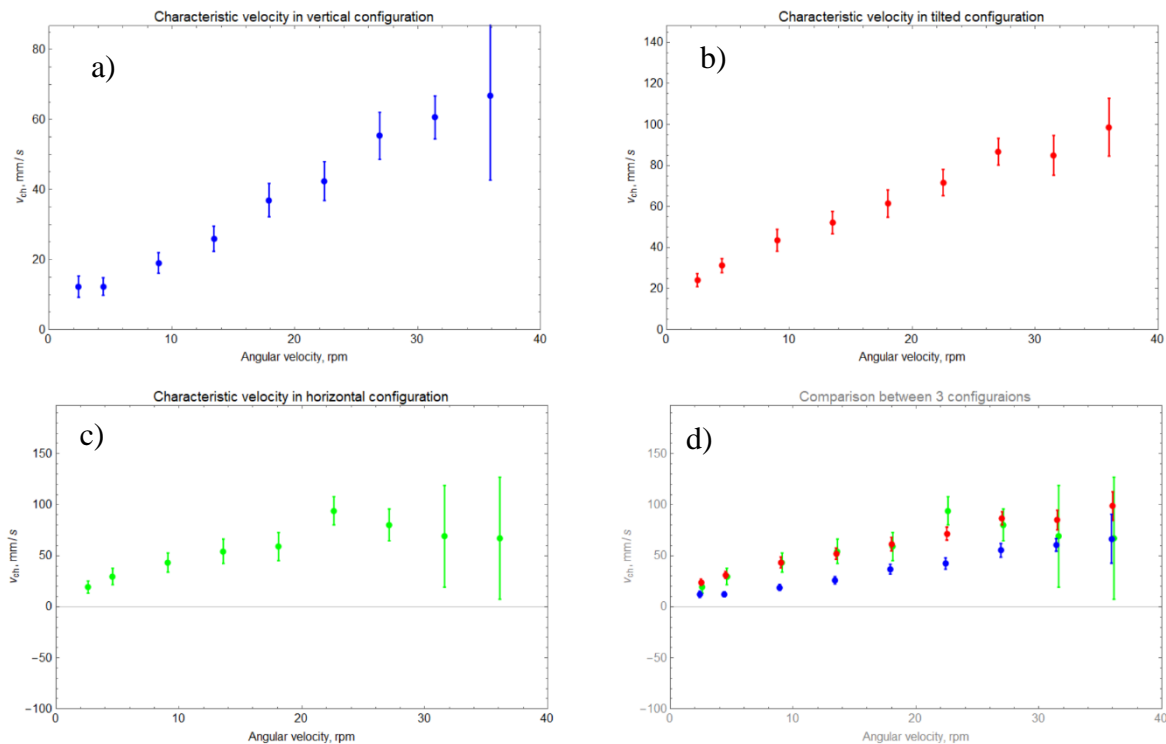
Šķidrā metāla tilpums (rezervuāra izmērs) šajos eksperimentos bija 420·300·55 mm. Magnēta attālums no metāla ir 50 ± 2 mm, kas šinī gadījumā sakrīt ar magnēta diametru. Šķidrā metāla ātrums tika mērīts, izmantojot Ultraskaņas Doplera anemometru. Rezultāti redzami 4.17.- 4.20. attēlos.



4.17. att. Salīdzinājums raksturīgā ātruma mērījumiem pie dipola 16mm attāluma no sānu sienas pie dipola novietojuma: a) vertikāli b) sagāztam c) horizontālam. d) visu 3 gadījumu salīdzinājums

Salīdzinājumā raksturīgajiem ātrumiem pie magnēta 16 mm attālumā no sienas (skat. 4.17. attēlu) tika aplūkotas trīs konfigurācijas. Vertikālā un sagāzta konfigurācija pie magnēta sienas dod vienlīdzīgu ātrumu, bet horizontālā nedaudz mazākus. Jāatzīmē, ka šķidrums

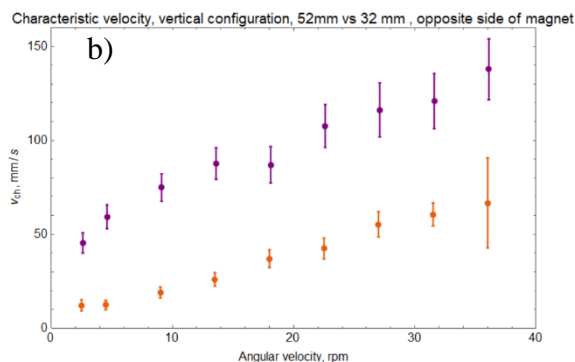
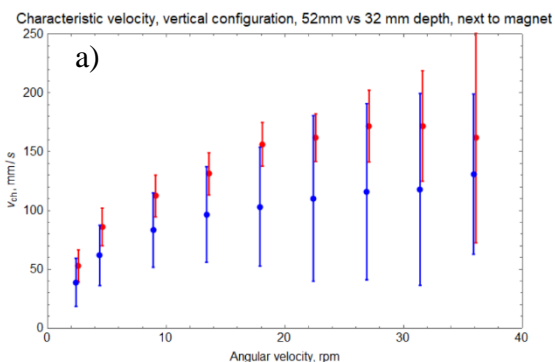
tilpumā mērītajiem ātrumiem sagāztā un horizontālā konfigurācijā spriežot pēc virsmas deformācijas varētu būt, ka ātrumi bija nedaudz lielāki, kā iegūts ar Ultraskaņas Doplera anemometru. Novērojams arī, ka horizontālā gadījumā ir lielākas plūsmas ātruma svārstības, sakrīt kvalitatīvi ar novēroto.



4.18. att. Salīdzinājums raksturīgā ātruma mērījumiem pie dipola 50 mm attāluma no sānu sienas pie dipola novietojuma: a) vertikāli b) sagāztam c) horizontālam. d) visu 3 gadījumu salīdzinājums

Gadījumā, kad tiek palielināts magnētiskā dipola attālums līdz šķidrajam metālam līdzvērtīgs ar magnēta diametru (šajā gadījumā 50 mm), labākie rezultāti novērojami pie sagāztās konfigurācijas. Šeit novērotas arī mazākas plūsmas ātruma svārstības, attiecīgi šiem mērījumiem ir augstāka ticamība.

Viena no būtiskiem aspektiem konkrētajam industriālajam pielietojumam – šķidra alumīnija maisīšanai – ir šķidrā metāla līmeņa mainība kausēšanas procesa laikā. Šī iemesla dēļ tika pastiprināti pētīta radītās plūsmas atkarība no šķidrā metāla daudzuma arī modelējošajā eksperimentā ar InGaSn. 4.19. attēlā redzams rezultātu salīdzinājums pie diviem dažādiem šķidrā metāla līmeņiem, kur zemākais atbilst pie salīdzinoši ļoti zema līmeņa atbilstošā alumīnija krāsni.



4.19. att. Salīdzinājums vertikālajai konfigurācijai pie diviem dažādiem dziļumiem metāla augstumiem – 33 mm un 52 mm: a) rezervuāra pusē pie magnēta b) rezervuārā magnētam pretējā pusē

Pie lielākā šķidrā metāla līmeņa tika nomērīts 1.4 līdz pat 3.0 reizes lielāks ātrums nekā pie zemākā. Šajos eksperimentos šķidrā metāla ātrums tika mērīts divās vietās – tiešā sienas pie elektromagnētiskā maisītāja tuvumā un pretējā pusē, jo vizuāli bija iespējams novērot, ka plūsmas ātrumi būtiski atšķiras. Novērots, ka atšķirība atkarībā no metāla līmeņa augstāka ir tieši zema līmeņa gadījumā (skat. 4.19. attēlu).



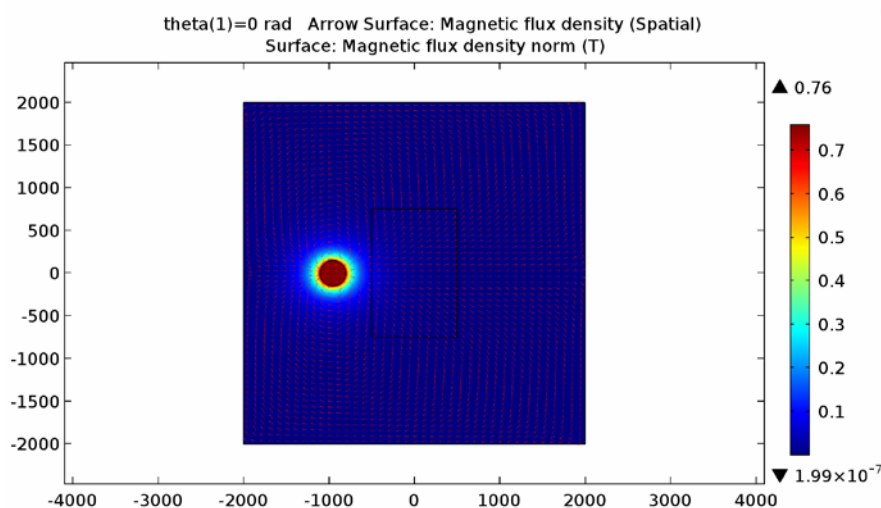
4.20. att. Vizuāli plūsmas un virsmas deformācijas novērojumi rezervuārā

Šajos rezultātos redzams, ka šķidrā metāla augstumam ir ļoti liela nozīme. Rezultāti liecina, ka slīpi ($\sim 45^\circ$) sagāzts magnētiskais dipols ir optimālā konfigurācija, kas arī spēj strādāt pie zema šķidrā metāla līmeņa, bet tajā pašā laikā pietiekami lielus plūsmas ātrumus. Pie vertikālās konfigurācijas 33 mm dziļuma šķidrā metāla ātruma piesātinājums (pie kuras frekvences pieaugums nerada būtisku ātruma pieaugumu) tik novērots pie aptuveni 30 Hz.

4.2.4.3. Bezdimensionālo sistēmas parametru analīze mērogošanas aprēķiniem

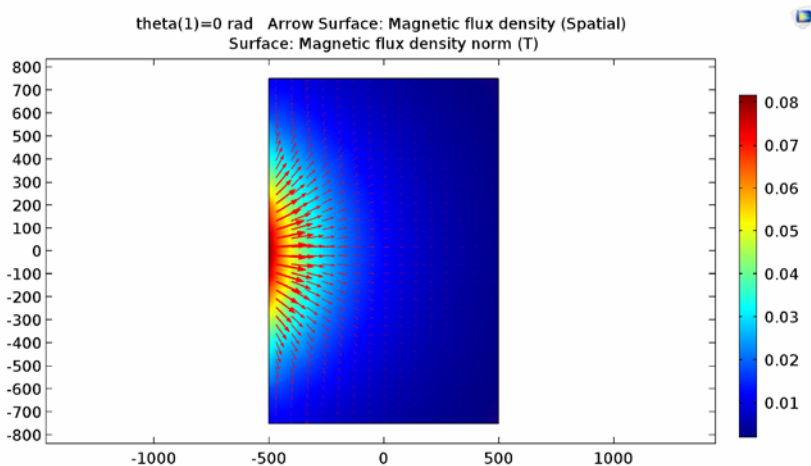
Kā iepriekš redzams 4.2.1. un 4.2.2. nodaļā, magnētiskajam laukam ir kritiska nozīme šķidra metāla plūsmas radīšanai. Attiecīgi industriāla mēroga viena cilindra maisītāja iekārtas izveide tiek uzsākta ar pārbaudi vai iespējams ar pastāvīgo magnētu radīt vismaz kaut cik atbilstošu magnētisko lauku šķidrā metāla tilpumā.

Šeit, lai aprēķinātu magnētisko lauku, tika izveidots atsevišķs skaitliskā aprēķina modelis programmā COMSOL 5.1. (skat. 4.21. - 4.23. attēlus).



4.21. att. Magnētiskā lauka vektorsadalījums vienam cilindram $d=30\text{cm}$ industriālajā 22 t krāsnī. Sienas biezums: 30 cm

4.21. attēlā redzama kopējā aprēķinātā ģeometrija. Redzams, ka magnētiskais lauks noslēdzas salīdzinoši ļoti pašā reģionā, t.sk. caur alumīnija krāsnī.



4.22. att. Magnētiskā lauka sadalījums šķidrā metāla apgabalā industriāla mēroga krāsnī, ko rada atbilstoša izmēra cilindrisks magnēts

Apskatot atsevišķi šķidrā metāla apgabalu, redzams, ka tiek sasniegtas visai lielas magnētiskā lauka vērtības, kas tuvojas pat 0.1 T. Šeit jāpiebilst, ka šeit parādīta gala konfigurācija, kas atrasta vairāku iterāciju rezultātā, kas sasniedz nepeieciešamos parametrus, nekļūstot nesamērīgi liela un/vai dārga, padarot tās industriālo pielietojamību neiespējamu.

Lai pārnestu iegūtos eksperimentālos rezultātus uz industriālu mērogu un novērtētu kādiem jābūt sistēmas parametriem, lai tā nodrošinātu pietiekamu maisīšanu vai attīstītu pietiekami lielu ātrumu arī alumīnija krāsnī, tiks izmantota dimensionālā analīze. Tai izmantosim pamatā četrus vienādojumus - Navjē-Stoksa vienādojumu, magnētiskā lauka, temperatūras un koncentrācijas pārneses vienādojumus (4.32. - 4.35.):

$$\text{Navjē-Stoksa vienādojums} \quad \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \mathbf{g} + \nu\nabla^2\mathbf{v} \quad (4.32.)$$

$$\text{Magnētiskā lauka pārneses vienādojums} \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \lambda\nabla^2\mathbf{B} \quad (4.33.)$$

$$\text{Temperatūras pārneses vienādojums} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = (\mathbf{v}\nabla)T + \alpha\nabla^2T \quad (4.34.)$$

$$\text{Koncentrācijas pārneses vienādojums} \quad \frac{\partial C}{\partial t} = (\mathbf{v}\nabla)C + D\nabla^2C \quad (4.35.)$$

Šie vienādojumi raksturo konkrēto lauka pārneses aprēķinus. Tiem var izdalīt konvektīvo un difūzo daļu. Difūzajās daļās katram no šiem vienādojumiem eksistē koeficients ar dimensiju m^2/s . Šos koeficientus var izteikt kā attiecības un iegūt bezdimensionālos lielumus, kuri raksturo doto sistēmu. Tādā pašā veidā var aplūkot arī konvektīvās daļas locekļus.

4.2. tabula

Izmantotie parametri bezdimensionālo lielumu aprēķināšanai

Nosaukums	Apzīmējums	Vērtība modeļa eksperimentā ar GaInSn	Vērtība industriāla izmēra alumīnija krāsnī
Raksturīgais izmērs	L[m]	0.1	0.6
Blīvums	$\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$	6360	2375
Temperatūra	K	298	950
Magnētiskais lauks	B[T]	0.02	0.06
Rotācijas frekvence	f[Hz]	80.0	0.6
Plūsmas ātrums	v[m/s]	0.2	0.2
Vadītspēja	$\sigma[\text{S}/\text{m}]$	$3.30 \cdot 10^6$	$4.85 \cdot 10^6$
Siltumvadītspēja	$k[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	16.5	32.8
Dinamiskā viskozitāte	$\eta[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$
Kinemātiskā viskozitāte	$\nu[\text{m}^2/\text{s}]$	$3.4 \cdot 10^{-7}$	$1.55 \cdot 10^{-6}$
Difūzijas koeficients	$D[\text{m}^2/\text{s}]$	$4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$
Siltumietilpība	$c_p[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{k})]$	371	1084
Magnētiskā caurlaidība	$\mu[\text{T}/\text{m}]$	$1.26 \cdot 10^{-6}$	$1.26 \cdot 10^{-6}$

Aprakstot sistēmu ar bezdimensionālajiem lielumiem, iespējams ievērojot ģeometrisko un fizikālo līdzību, ekstrapolēt modeļa eksperimentālos rezultātus citos mērogos, piemēram, liela izmēra alumīnija krāsnīm. Tāpat kā iepriekš, arī šeit tiek pieņemts, ka šķidrums ir nesaspiežams, tajā nav ne siltuma, ne masas avotu. Šeit bezdimensionālais modelis izmantots eksperimentu mērogošanai līdz industriālas 22 t alumīnija krāsns mērogiem ar atbilstošiem izmēriem un parametriem. Izmantotie parametri bezdimensionālo lielumu aprēķināšanai apkopoti 4.2. tabulā.

Tabulā 4.3 ir redzams bezdimensionālo lielumu salīdzinājums izveidotajai eksperimentālajai iekārtai un industriālai alumīnija krāsnij, kas ņemta kā paraugs. Ģeometriskās un fizikālās īpašības, kas izmantotas aprēķinos ir attēlotas 4.2. tabulā

4.3. tabula

Bezdimensionālo lielumu salīdzinājums

Nosaukums	Nozīme	Formula	Vērtība modeļa eksperimentā ar GaInSn	Vērtība industriālā izmēra alumīnija krāsnī	
Reinoldsa skaitlis	$\frac{\text{Inerciālie spēki}}{\text{Viskozie spēki}}$	$Re = \frac{u \cdot L}{\nu}$	$0.6 \cdot 10^5$	$2.2 \cdot 10^5$	(4.36.)
Magnētiskais Reinoldsa skaitlis	$\frac{B \text{ lauka indukcija}}{B \text{ lauka difūzija}}$	$Rm = \frac{a \cdot L}{\eta}$	0.082	5.3	(4.37.)
Peklē skaitlis siltum pārnesei	$\frac{\text{Advekcija}}{\text{Difūzija}}$	$Pe_\alpha = \frac{u \cdot L}{a}$	1429	9407	(4.38.)
Peklē skaitlis masas pārnesei	$\frac{\text{Advekcija}}{\text{Difūzija}}$	$Pe_D = \frac{u \cdot L}{D}$	$5 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$	(4.39.)
Hartmaņa skaitlis	$\frac{EM \text{ spēki}}{\text{Viskozie spēki}}$	$Ha^2 = \frac{\sigma}{\rho \cdot \nu} \cdot B^2 \cdot L^2$	81,6	5910	(4.40.)
Bezdimensionālā frekvence		$\Omega_d = \sigma \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot L^2$	20.8	59.7	(4.41.)
Stjuarta skaitlis	$\frac{EM \text{ spēki}}{\text{Inerciālie spēki}}$	$N = \frac{\sigma}{\rho} \cdot \frac{B^2}{\omega} = \frac{Ha^2}{Re}$	0.0004	14	(4.42.)
Skinslānis	Slānis kurā strāva samazinās e reizes	$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}}$	0.031	0.11	(4.43.)

Reinoldsa skaitlis (4.37.) ir ar kārtu 10^5 abos gadījumos, kas liecina par turbulentu plūsmu. Peklē skaitlis (4.38.) siltuma pārnesei ir ar kārtu 10^3 , kas nozīmē šķidrā metāla plūsma daudzkārt pātrinās temperatūras izlīdzināšanos abos gadījumos. To pašu var secināt par masas pārnesei (4.39.). Hartmaņa skaitlis (4.40.) liecina par to, ka ātruma profilu radītājās plūsmās būtiski ietekmēs elektromagnētiskie spēki. Skinslānis abos gadījumos limitē maksimālo frekvenci, ar kuru iespējams rotēt lauku. Respektīvi tad, kad tas kļūst daudz mazāks par trauka raksturīgo izmēru, frekvences palielināšana nedos pozitīvu efektu maisīšanai.

Ideālā gadījumā bezdimensionālā frekvence (4.41.) un Stjuarta skaitlim(4.42.) būtu jābūt vienādam abās iekārtās, taču praktiski to nav iespējams realizēt. Lai pilnībā izpildītu ģeometriskās un fizikālās līdzības nosacījumus, industriāla izmēra iekārtā būtu nepieciešami 20 reizes stiprāki magnēti.

4.2.4.4. *Industriāla mēroga viena magnētiskā dipola iekārtas izveide un eksperimenti*

Veiktie kārtas un arī precīzāki aprēķini, lai arī ne ideāli, liecina, ka ar piedāvāto koncepciju ir iespējams sasniegt nepieciešamo ātrumu kārtas lielumu arī industriāla izmēra alumīnija krāsnī. Attiecīgi nākamais solis ir to pārbaudīt arī eksperimentāli.

Dažādu faktoru dēļ piemērotas un pieejamas industriālas krāsns, kur šāda tipa maisītāju būtu iespējams uzstādīt un izmēģināt ir ļoti ierobežotā daudzumā. Šajā gadījumā tika izvēlēta (pierunāta) alumīnija pārkausēšanas krāsns Norvēģijā, AS “Metallco Aluminium” rūpnīcā. Krāsns ietilpība bija 22 t alumīnija, sienas biezums: 30 cm. Nerūsējošā tērauda apšuvuma biezums: 12 mm. Veicot mērogošanas aprēķinus, tika noskaidrots, ka optimāls risinājums būtu magnētiskais dipols, kas realizēts kā pastāvīgo magnētu cilindrs ar diametru 30cm un augstumu 75 cm. Šādu pastāvīgo magnētu nav iespējams izgatavot vienu veselu. To ir nepieciešams salikt no daudz mazākiem pastāvīgo magnētu gabaliem. Tomēr jāņem vērā, ka starp atsevišķiem magnētiem šāda mēroga salikumā ir milzīgi savstarpējās mijiedarbības spēki. Līdz ar to pašas sistēmas salikšana ir nopietns izaicinājums un prasa speciālas magnētu salikšanas sistēmas izveidi.

Šinī gadījumā tika izvēlēts cilindrisko magnētu veidot divās pakāpēs:

1. Vispirms mazāka izmēra magnēti tika ievietoti speciāli sagatavotos nerūsējošā tērauda diskveida ietvaros.
2. Nerūsējošā tērauda ietvari savilkta kopā, izmantojot vītņstieņus (skat. 4.23. attēlu a)). Jāatzīmē, ka gala savilkta stāvoklī (skat. 4.23. attēlu b)) diski atgrūžas ar ~3000 N lielu spēku, padarot magnētu salikšanu netriviālu.



4.23. att. Industriāla mēroga pastāvīgo magnētu dipola salikšana, izmantojot diskveida nerūsējošā tērauda ietvaru: a) cilindrs salikšanas procesā; b) salikts cilindrs jau ievietots rāmī

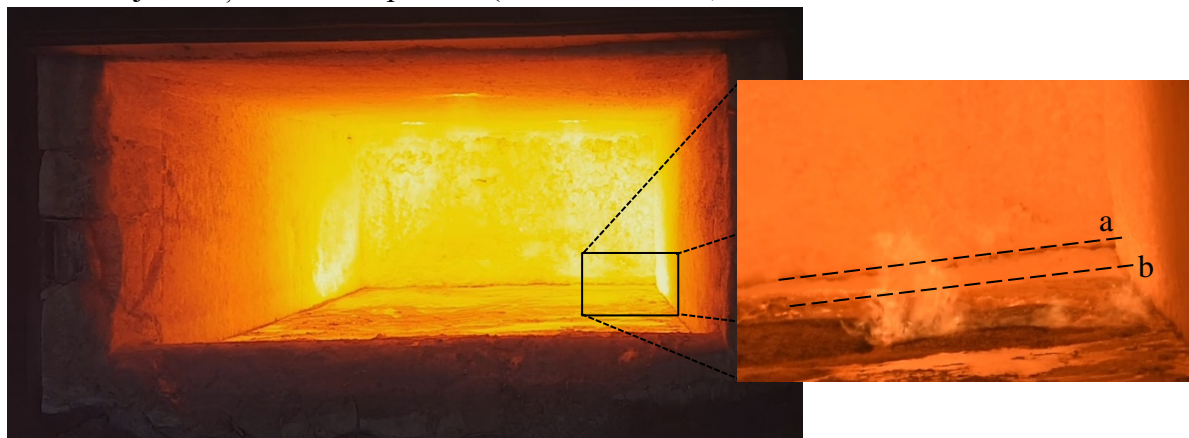
Tā kā iekārtu nepieciešams pārbaudīt industriālā mērogā uz industriālas krāsns, tai nepieciešams atbilst arī virkni citiem industriāliem noteikumiem un jāspēj darboties atbilstošos apstākļos. Attiecīgi atšķirībā no laboratorijas iekārtas, šeit papildus ir uzstādīta gaisa dzesēšanas sistēma un iekārta novietota uz sliedēm, pa kurā, nepieciešamības gadījumā, iespējams iekārtu ātri atvirzīt no krāsns (skat. 4.24. attēlu).



4.24. att. Izveidotā industriālā mēroga viena dipola iekārta, uzstādīta uz 22 t alumīnija krāsns

Kvantitatīvu rezultātu iegūšana šāda mēroga un konfigurācijas krāsni ir vismaz stipri apgrūtināša, un šobrīd nav pieejamu risinājumu, piemēram, šķidra alumīnija ātruma mērīšanai

šādos apstākļos. Būtībā, ja mērķis ir izstrādāt iekārtu, kas var veikt industriālo uzdevumu – maisīt šķidro metālu – precīzam ātruma nav arī praktiska nozīme. Svarīgi ir vai iekārta nodrošina pietiekami spēcīgu maisīšanu, lai paātrinātu metāla kausēšanas process un šķidrā metāla un temperatūra homogenizāciju. Pirmie industriālie testi parādīja, ka izstrādātā iekārta rada ievērojamu šķidrā metāla plūsmu (skat. 4.25. attēlu).



4.25. att. Industriāla mēroga magnētiskā dipola radītā virsmas deformācija 22 t alumīnija krāsns stūrī: a – radītās virsmas deformācijas augšpuse; b – alumīnija līmenis miera stāvoklī

Īpaši spēcīga plūsma novērota metāla rezervuāra stūrī, kurā tiek virzīta pamata šķidrā metāla plūsma (skat. 4.25. attēlu), kas atbilst tam, kas novērots kvalitatīvi arī modeļa eksperimentā. Stūrī novērota virsmas deformācija, kas atbilst vizuāli pat 2 - 3 cm. Šeit jāpiebilst, ka relatīvi deformācijas ir ļoti mazas un grūti saskatāmas attēlos, kuru kvalitatīvas uzņemšanas iespējas ir ierobežotas dēļ augstās metāla temperatūras un attiecīgi lielā siltuma starojuma dēļ, ņemot vērā lielo metāla virsmas laukumu. Plūsmu labāk iespējams novērot iegūtajos video uzņēmumos, kurus, diemžēl tehnisko iemeslu dēļ, šeit nav iespējams tieši pievienot.

Kā minēts ir salīdzinoši grūti veikt izstrādātās iekārtas tiešus efektivitātes mērījumus. Par iekārtas gala efektivitāti tomēr liecinās konkrētā tehnoloģiskā procesa kopējais efektivitātes pieaugums: samazinātais gāzes patēriņš, samazinātais izmešu daudzums un samazinātais kausēšanas cikla ilgums. Maisīšana nav vienīgais šo makroskopisko rādītāju ietekmējošais parametrs – tie neatkarīgi no maisīšanas nepārtraukti fluktuē no viena kausēšanas cikla uz otru. Ir zināms, ka elektromagnētiska šķidra metāla maisīšana tā pārkausēšanas cikla laikā var dot sekojošu ieguvumus [59]:

1. Palielina krāsns efektivitāti par līdz pat 25 %;
2. Samazina gāzes patēriņu par līdz 15 %;
3. Samazina kausējuma metāla zudumus par līdz pat 30 %;
4. Paātrina kausējuma ķīmisko un temperatūras homogenitāti

Līdz ar to, lai iegūtu viennozīmīgu rezultāti, nepieciešams veikt salīdzinoši daudz kausēšanas ciklu. Novērtēts, ka šādu slēdzienu būs iespējams izpētīt gada laikā.

4.2.5. Secinājumi par viena magnētiskā dipola radītās plūsmas izpēti

Veiktie analītiskie novērtējumi un eksperimentālā izpēte laboratorijas un industriālā mērogā ļauj izdarīt sekojošus secinājumus:

1. Veikti analītiski un skaitliski elektromagnētisko lauku un spēku aprēķini cilindriskās pastāvīgo magnētu sistēmās ar dažādiem polu pāru skaitiem;
2. Atbilstoši veiktajam magnētiskā laika aprēķina rotoriem ar dažādu polu skaitu (skat.4.2.attēlu) var secināt, ka viena polu pāra magnētiskie rotori jeb magnētiskie dipoli dod ievērojami lielāku magnētisko lauku attālumā, kas, salīdzinot ar dipola izmēru, nav mazs. Attiecīgi var secināt, ka industriāliem pielietojumiem ar lielu nemagnētisko attālumu šādas sistēmas ir perspektīvākas;
3. Parādīts, ka magnētiskus dipolus iespējams praktiski realizēt izmantojot cilindriskus magnētus, kas magnetizēti perpendikulāri to asij. Šādu cilindru magnētisko lauku joprojām var tuvināti aprēķināt izmantojot tuvinātas dipola lauka aprēķina formulas (4.1. un 4.2.), jo novērota laba sakritība starp analītisko un skaitlisko aprēķinu, un eksperimentāli nomērītajiem rezultātiem, kas redzama 4.9. un 4.11.attēlus;
4. Atbilstoši dipola magnētiskā lauka tuvinātai aprēķina formulai (4.1. un 4.2.) un 4.4., 4.6. un 4.7. att. var secināt, ka viens magnētiskais dipols rada skrejošu magnētisko lauku, kas ir nepieciešams, lai radītu elektrovadošā vidē organizētu kustību;
5. Veikti radīto plūsmu ātrumu un struktūru eksperimentālie pētījumi dažādos variantos ar rotējošiem magnētiskiem dipoliem variantos un konstatēts, ka, salīdzinot 4.5. attēlu eksperimentāli iegūtos rezultātus ar tiem, kas iegūti ar 4.2.1. nodaļā aprakstītajiem vienkāršota aprēķina modeļi, redzams, ka arī šādu tuvinātu modeļi iespējams izmantot sistēmas pirmajai novērtēšanai, tomēr konkrētu industriālu iekārtu projektēšanai būtu nepieciešami precīzāki novērtējumi. Vienlaicīgi jāatzīmē, ka 50 % atšķirība bieži konkrētajā industrijā uzskatāma par pietiekamu, un citi modeļi nemēdz būt īpaši precīzāki;
6. 4.2.2. nodaļā izstrādātajā precīzākā analītiskajā sistēmas parāda (skat. 4.8.attēlu), ka magnētiskajai sistēmai attiecībā pret rotācijas frekvenci ir t.s. piesātināšanās frekvence, kuru pārsniedzot, radītā šķidrā metāla plūsma vairs nepieaug, bet samazinās;
7. Veikta eksperimentālu pētījumu sērija ar sistēmām ar piedāvātajiem magnētiskiem dipoliem un konstatēts, ka magnētisks dipols var ierosināt ievērojamu šķirā metāla kustību gan novietojumā zem rezervuāra (skat. 4.15. attēlu) gan pie tā sāna siena (skat. 4.17.attēlu), turklāt ar nemagnētisko attālumu, kas salīdzināms vai pat lielāks par dipola izmēru (skat. 4.18.attēlu);
8. Mainot magnētiskā dipola ass leņķi attiecībā pret metāla virsmu būtiski mainās gan radītais šķidrā metāla ātrums (skat. 4.17. un 4.18.attēlus) gan plūsmas struktūra. Tuvināti noskaidrots, ka 45° sagāzums varētu būt optimālākais rezervuāra efektīvākajai samaisīšanai;
9. Veicot sistēmas bezdimensionālo analīzi 4.2.5.1. var secināt, ka dipola radītā plūsma gan modeļa gan industriālā mērogā ir turbulenta (Reinoldsa skaitlis (4.37.) ir ar kārtu 10^5), šķidrā metāla plūsma daudzkārt paaugstinās temperatūras izlīdzināšanos (Peklē skaitlis (4.38.) siltuma pārnesei ir ar kārtu 10^3). Hartmaņa skaitlis (4.40.) liecina par to, ka ātruma profilu radītājās plūsmās būtiski ietekmēs elektromagnētiskie spēki. Tāpat apstiprināts atbilstoši iepriekš veiktajiem novērtējumiem, ka skinslānis abos gadījumos limitē maksimālo frekvenci, pie kuras pieaug radītā plūsma;
10. Izmantojot 4.2.2. izstrādāto analītisko modeļi un veikto bezdimensionālo analīzi noskaidrots, ka industriālā mērogā (krāsns tilpums 22 t, sienas biezums 30 cm), metāla rezervuāra efektīvu maisīšanu varētu cilindrisks magnēts ar 30 cm lielu diametru un 70 cm lielu

augstumu;

11. Liela mēroga magnētiskos dipolus iespējams salikt (skat. 4.32.b.attēlu) no mazāka izmēra magnētiem, piemēram, izmantojot speciālu salikšanas sistēmu, kā redzams 4.23.a) attēlā;

12. Izveidota industriālā mēroga viena dipola iekārta, uzstādīta uz 22 t alumīnija krāsns (skat. 4.24. attēlu), un iekārta pārbaudīta eksperimentāli. Redzams 4.25. attēlā, ka šāda iekārta rada ievērojamas virsmas deformācijas, kas liecina par pietiekamu šķidrā metāla plūsmu rezervuāra samaisīšanai. Papildus samazinātais ražošanas cikla laiks liecina, apstiprina, ka viena rotējoša dipola sistēma ir pielietojama industriālos apstākļos.

Šajā nodaļā veikto pētījumu rezultāti atspoguļoti sekojošās publikācijās:

1. Bojarevics, A., Beinerts, T. Experiments on liquid metal flow induced by a rotating magnetic dipole. *MAGNETOHYDRODYNAMICS*. 2010, 46(4), 333–338. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Andris_Bojarevics/publication/283814377_Experiments_on_liquid_metal_flow_induced_by_a_rotating_magnetic_dipole/links/584fbc7408aecb6bd8d1da3a/Experiments-on-liquid-metal-flow-induced-by-a-rotating-magnetic-dipole.pdf

2. Conference proceedings: A. Bojarevičs, T. Beinerts. Experiments on Liquid Metal Flow Induced by Rotating Magnetic Dipole Moment. International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, September 16-17, 2010, pp. 309-314.

3. Beinerts, T., Bojarevičs, A. „Experiments on liquid metal flow induced by a rotating magnetic dipole”. 54ths Physics and natural sciences student scientific conference in Vilnius „Open Readings 2011” 17.-19. March, 2011.

4. EPM RĪGA SIA. *Metāla sakausējuma sūkņēšanas un maisīšanas paņēmieni un iekārta tā realizēšanai*. A. Bojarēvičs, J. Geļfgats, T. Beinerts, I. Buceniēks (izgudrotāji). Int.Cl.: H02K44/00; F27B17/00. Iesniegšanas datējums 2011-05-30. Patenti un peču zīmes LV14404 B 2011-08-20

5. Beinerts, T., Bojarevics, A., Baranovskis, R., Milgravis, M., Kaldre, I. Permanent magnet dipole stirrer for aluminium furnaces. **In:** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, 424. ISSN 1757-899X. Available: doi: 10.1088/1757-899X/424/1/012037.

4.3. Sistēmas ar trīs rotējošiem dipoliem

Iepriekšējo nodaļu rezultāti parādīja, ka metalurģiskiem pielietojumiem visoptimālākā ir pastāvīgo magnētu sistēma, kurai magnētiskais polu pāra skaitlis ir viens, jeb viens magnētisks dipols.

Tomēr, kā iepriekš minēts, industriālie pielietojumi ir ļoti dažādi, līdz ar to arī viena dipola sistēma varētu nebūt pati optimālākā pilnīgi visos. Piemēram novērots, ka viens magnētiskais dipols rada salīdzinoši lielu plūsmas virpuļainību, salīdzinot ar lineāriem induktoriem vai pat pastāvīgo magnētu multipolu sistēmu. Liela virpuļainība varētu atbilst zināmai neefektivitātei īpaši sistēmās, kur primārais uzdevums būtu darba vielas transports, nevis tikai tā maisīšana.

Attiecīgi šajā nodaļā tiks veikta tālāka magnētisko dipolu sistēmas izpēte un attīstīšana. Kā nākamais būtiskais sistēmas attīstības solis tika identificēts izskatīt iespēju magnētisko sistēmu veidot no vairākiem atsevišķiem dipoliem.

Šajā nodaļā tiks apskatīta trīs rotējošu dipolu sistēma, kas realizēta kā trīs rotējoši cilindriski magnēti, kuri ir magnetizēti perpendikulāri to asīm, bet magnetizācijas ir savstarpēji orientētas dažādos leņķos jeb ar fāzes nobīdi. Iepriekšējās divās nodaļās tika apskatīta viena magnētiskā dipola radītā kustība. Apskata ietvaros tika arī izstrādāts matemātiskais modelis sistēmas radītās plūsmas novērtēšanai. Šis modelis tiks izmantots arī par pamatu trīs dipolu radītās plūsmas novērtēšanai.

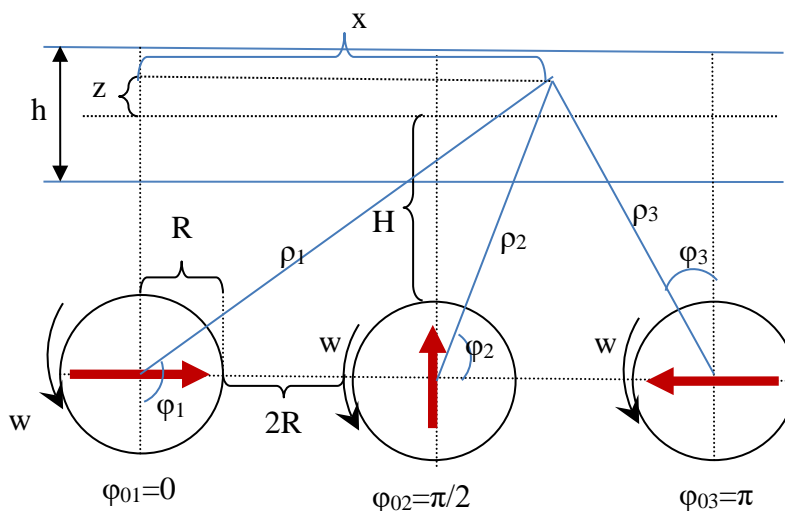
Uzreiz jāatzīmē, ka sistēmām, kas sastāv no diviem un vairākiem atsevišķiem rotējošiem dipoliem, kritiska nozīme ir leņķim starp dipolu magnetizācijas virzieniem jeb fāzu nobīdei. Gan analītiskajos aprēķinos gan eksperimentālajos rezultātos redzams, ka neievērojot precīzu fāzes nobīdi, sistēma ir neefektīva. Fāzes nobīde parāda arī šādu magnētisko dipolu sistēmu nelinearitāti – kopējā efektivitāte nav vienāda ar atsevišķu elementu summu.

MHD sistēmu veidošana no vairākiem neatkarīgi rotējošiem elementiem ir unikāla, līdz šim nekur citur neapskatīta, un uzskatāma par radikālu inovāciju nozarē, ne tikai attiecībā uz magnētiskajiem dipoliem, kas apskatīti šajā darbā. Darbā parādīts, ka fāzu nobīdei ir kritiska nozīme. Šauris pieļaujama fāzes nobīdes leņķis uzskatāms par vienu no iemesliem, kāpēc šādas sistēmas netika iepriekš apskatītas. Ir zināmi pat mēģinājumi šādas sistēmas radīt, bet tie bijuši nesekmīgi tieši dēļ fāzes nobīdes neievērošanas [65]. Tāpēc tiks nepārtraukti salīdzināta sistēmas ar un bez fāzes nobīdēm. Bez tam pētītā sistēma ir interesanta ar to, ka var tikt veidotas pilnīgi jaunas sistēmas - piemēram ķēdes no šādiem cilindriem – piemēram no 5 vai 9 rindā rotējošiem cilindriem. Tāpēc, aprakstot 3 rotoru sistēmu, svarīgi to darīt tā, lai pēc tam būtu viegli aprakstīt arī vairāku rotoru sistēmas.

4.3.1. Trīs rotējošu cilindru ar fāzes nobīdi radītās plūsmas teorētisks apskats

Lai sistēmu varētu aprakstīt pēc iepriekšējās metodikas, vispirms nepieciešams atrast sistēmas radīto magnētiskā lauka sadalījumu vairāku dipolu, šinī gadījumā 3, gadījumam. Tiks ieviesti jauni mainīgie un izveidota attiecīgā ģeometrija, kas ir redzama 4.8. attēlā. Par pamatu kopējā radītā magnētiskā lauka sadalījuma iegūšanai tiks izmantots superpozīcijas princips – katrā punktā esošais magnētiskais lauks tiek radīts kā summa no katra cilindra radītā magnētiskā

lauka šajā punktā. Līdz ar to galvenais uzdevums ir panākt, lai katra cilindra magnētiskais lauks tiktu aprakstīts vienā kopējā koordinātu sistēmā. Koordinātu transformācijai tiks izmantots 4.26. un 4.27. attēlā.



4.26. att. Trīs rotējošu cilindru aprakstam nepieciešamā ģeometrija

Vispirms nepieciešama transformācija leņķiem $\varphi_1; \varphi_2; \varphi_3 \dots \varphi_i$:

$$\varphi_i(x, z, i) = \text{ArcSin} \left[\frac{x - \tau \cdot i}{\sqrt{(x - \tau \cdot i)^2 + (z + H + R)^2}} \right]$$

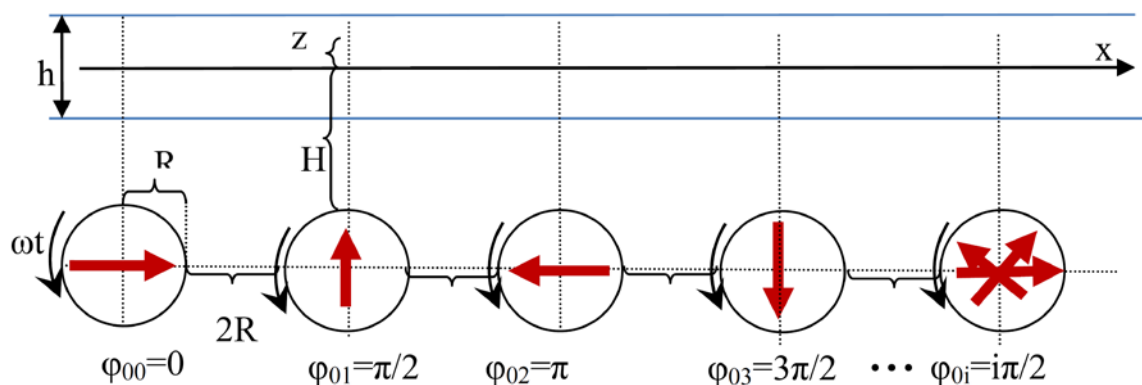
kur τ – attālums starp i un $i+1$ cilindru. Šeit apskatītajā gadījumā $\tau=4R$. i – cilindra kārtas numurs.

Katra cilindra magnētiskais lauks tiek transformēts, izmantojot izteiksmes:

$$B_{\rho i} = \frac{B_r R^2}{2 \rho i^2} \sin \varphi = \frac{B_r R^2}{2 (x - \tau \cdot i)^2 + (z + H + R)^2} \sin(wt + i \cdot \alpha - \varphi_i) \quad (4.32.)$$

$$B_{\varphi i} = \frac{B_r R^2}{2 (x - \tau \cdot i)^2 + (z + H + R)^2} \cos(wt + i \cdot \alpha - \varphi_i) \quad (4.33.)$$

Šeit α ir fāzes nobīde. Darbā tiks apskatīts gadījums, kad $\alpha = i \frac{\pi}{2}$, kā sākotnēji novērtēts kā visoptimālākais gan no radītās plūsmas gan dipolu savstarpējās mijiedarbības viedokļa, bet principā šeit var būt jebkurš leņķis.



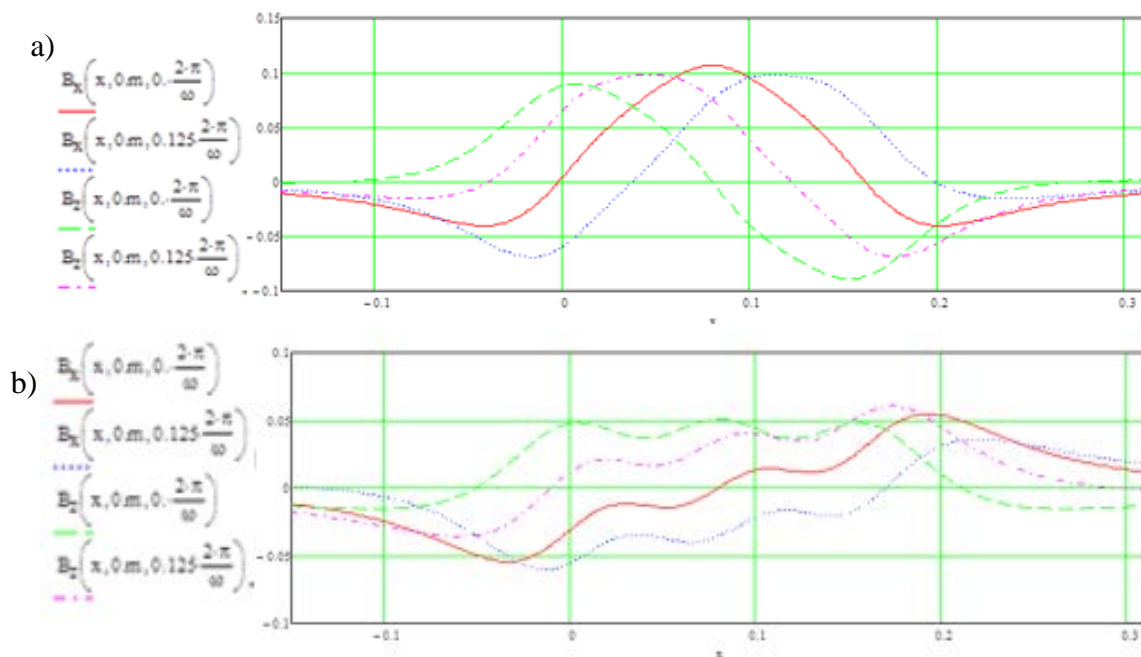
4.27. att. Dipolu rindas ar i elementiem ģeometriskais attēlojums

Nākamais solis ir pāriet uz Dekarta koordinātu sistēmu analogiski kā 4.2.2. nodaļā, tikai veicot summēšanu par visiem cilindriem, jeb indeksiem i :

$$B_x = \sum_0^i (B_{\varphi i}(\varphi_i, x, z) \cdot \cos(\varphi_i) - B_{\rho i}(\varphi_i, x, z) \cdot \sin(\varphi_i)) \quad (4.34.)$$

$$B_z = \sum_0^i (B_{\varphi i}(\varphi_i, x, z) \cdot \cos(\varphi_i) + B_{\rho i}(\varphi_i, x, z) \cdot \sin(\varphi_i)) \quad (4.35.)$$

Veicot šo summēšanu un attēlojot grafiski, tiek iegūts 4.28. att.

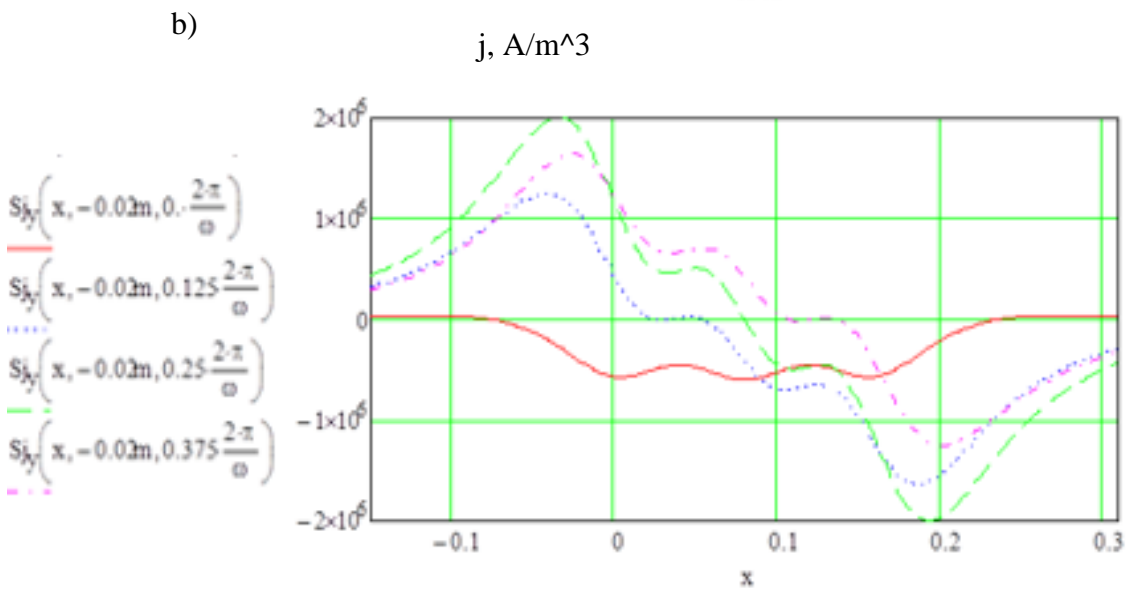
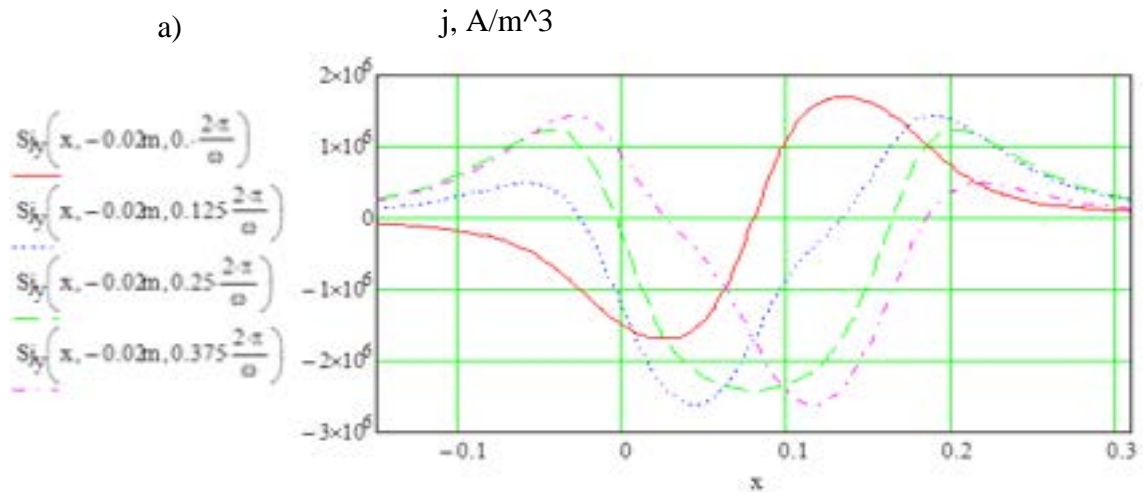


4.28. att. Magnētiskā lauka horizontālais sadalījums 2 perioda momentos: a) Fāzes nobīde $a=\pi/2$ b) Fāzes nobīde $a = 0$.

Spēka sadalījuma, spiediena un ātruma atkarība no frekvences iegūstama analogiski 3.2. nodaļā apskatītajam tikai ievietojot magnētiskajam laukam (4.34. - 4.35.).

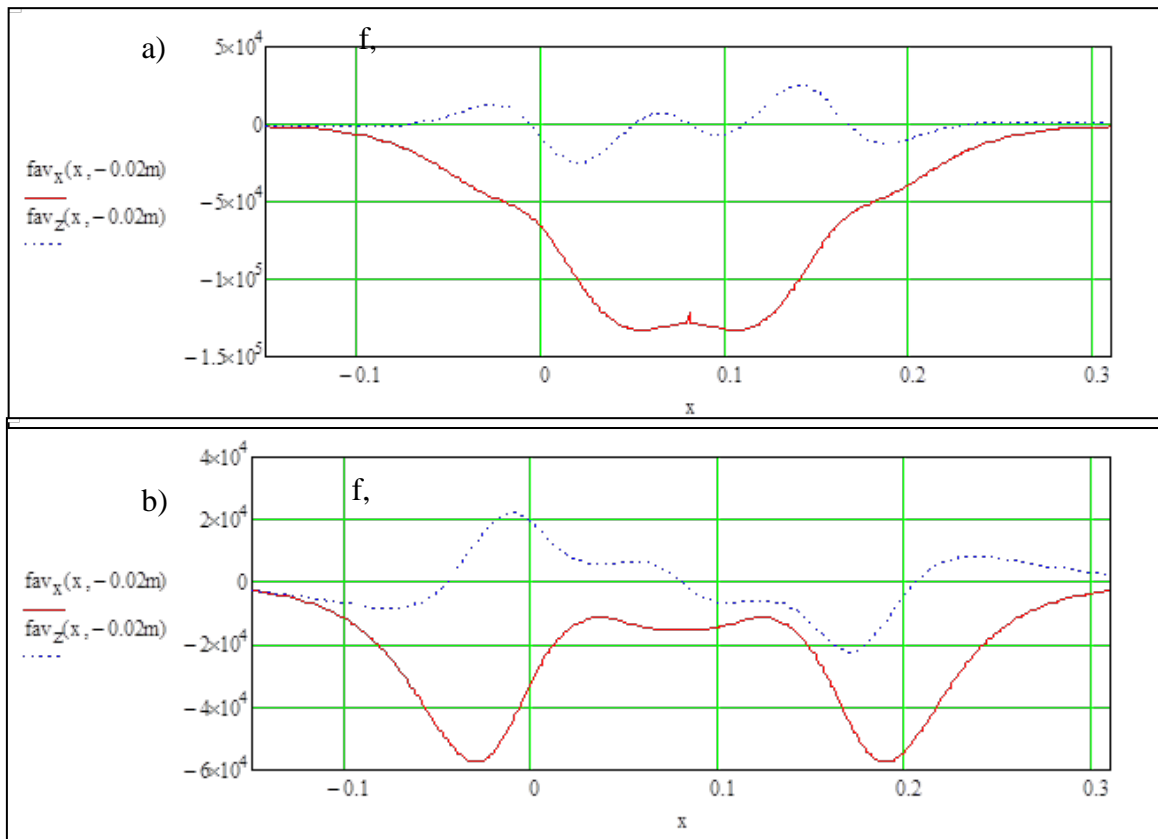
Visi aprēķini veikti, izmantojot sekojošus parametrus:

$R = 2 \text{ cm}$ – cilindru rādiuss;
 $t = 8 \text{ cm}$ – attālums starp asīm;
 $H = 6 \text{ cm}$ – attālums līdz metālam;
 $f = 20 \text{ Hz}$ – magnētiskā lauka griešanās frekvence.
 Aprēķini veikti, izmantojot datorprogrammu MathCad.



4.29. att. Vienpusēja trīs rotējošu cilindru sistēmas inducētās strāvas horizontālais sadalījums 4 perioda momentos; a) Fāzes nobīde $\alpha = -\pi/2$; b) Fāzes nobīde $\alpha = 0$

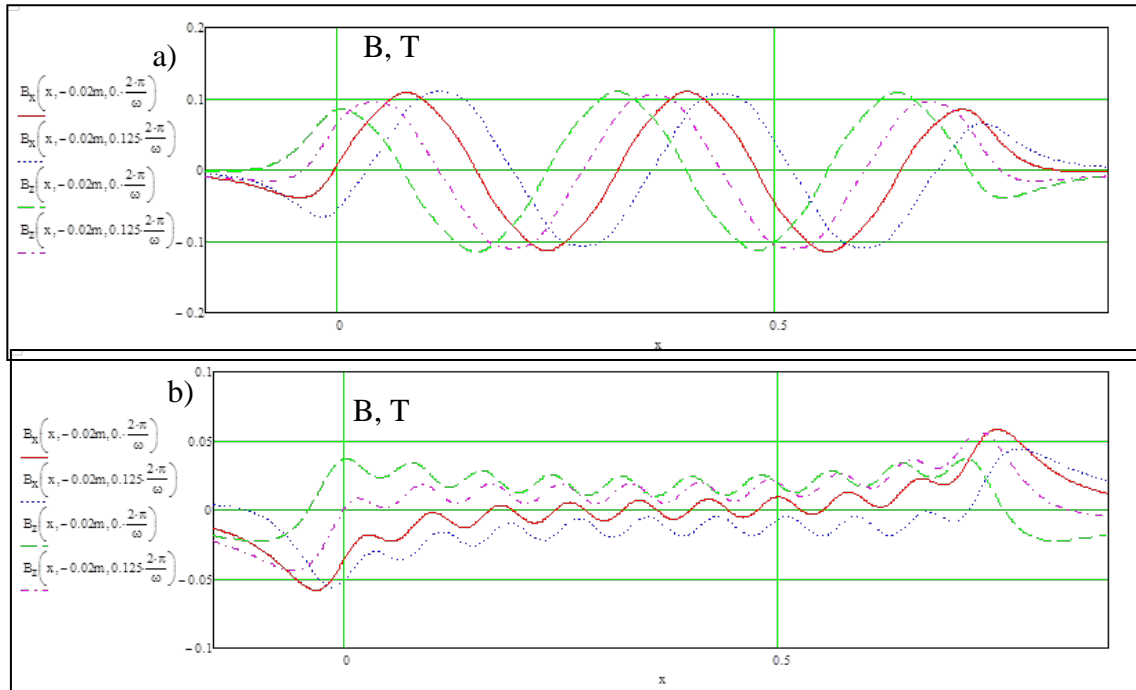
Redzams 4.29. attēlā, ka gadījumā, ja starp dipoliem tiek ievērota fāzes nobīde, veidojas viens izteikts inducētās strāvas maksimums un minimums (sākuma fāzē), kuri atbilst pa 90° nobīdītam magnētiskajam laukam. “Sareiznot” 4.28. un 4.29. attēlā redzamos datus iegūst ainu, kas ir analogiska spēka sadalījumam, kurš redzams 4.30. attēlā.



4.30. att. Laikā vidētotā EM-spēka blīvuma horizontālais sadalījums spēka z (f_{av_z}) un x (f_{av_x}) komponentei : a) Fāzes nobīde $\alpha = -\pi/2$; b) Fāzes nobīde $\alpha = 0$

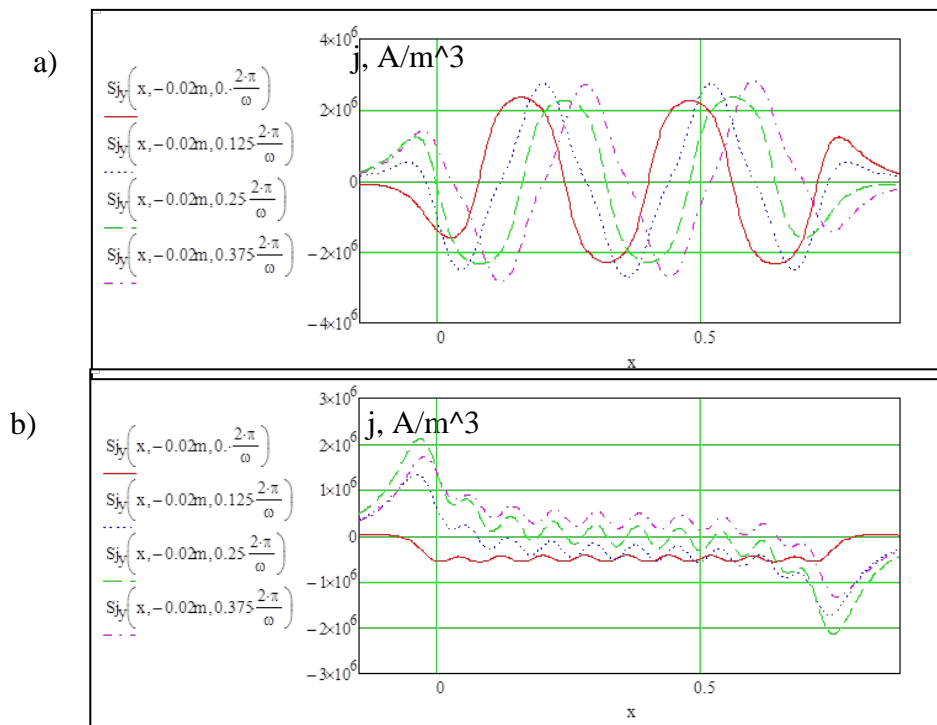
4.30. attēlā redzams, ka ieviešot fāzes nobīdi starp cilindriem, iegūstams par kārtu lielāks elektromagnētiskā spēka blīvums darba vielā.

Sistēmas aprēķins veidots tā, lai būtu iespējams ērti palielināt magnētisko dipolu skaitu. Palielinot i , redzams, ka fāzes nobīdes loma tikai palielinās. 4.30. attēlā redzams, ka, ja $i = 10$, gadījumā bez fāzes nobīdes veidojas drīzāk viens "vilnis", ko pat grūti uzskatīt par skrejošu.



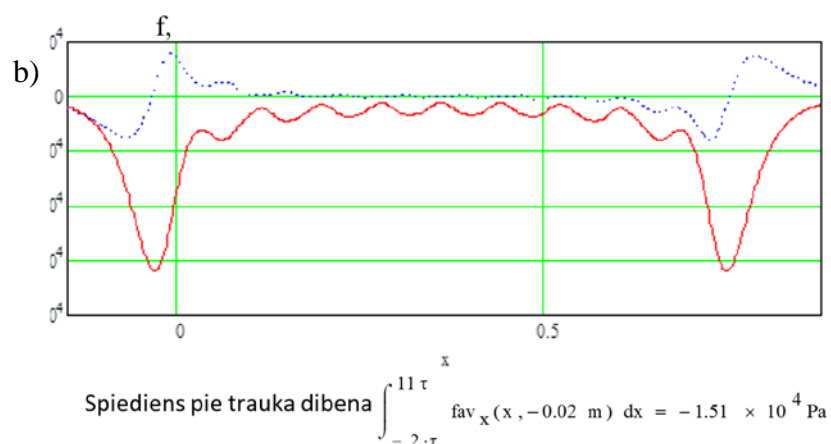
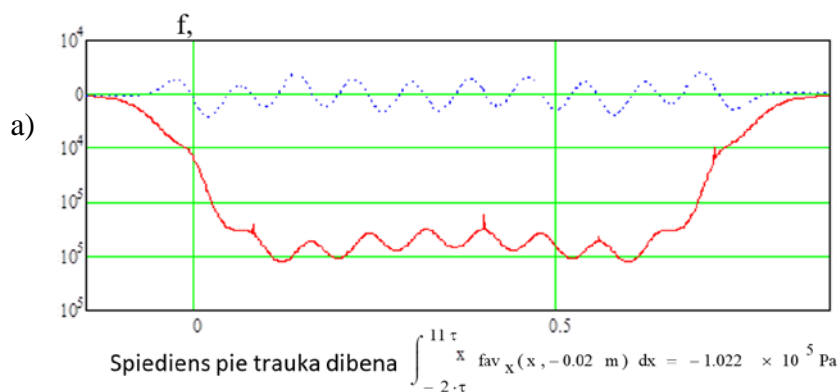
4.31. att. Vienpusēja desmit cilindru sistēmas radītais magnētiskā lauka horizontālais sadalījums 2 perioda momentos 10 cilindru sistēmai: a) Fāzes nobīde $\alpha = -\pi/2$ b) Fāzes nobīde $\alpha = 0$

4.31. redzams, ka, ja tiek ieviesta fāzes nobīde starp cilindriem, tie veido vairākus pilnus viļņus, kas turklāt “skrien” (laika nobīde redzama pēc citas krāsas grafika). Var izteikt hipotēzi, ka skrejošo pilno viļņu daudzums ir aptuveni vienāds ar kopējo magnētu skaitu izdalītu ar magnētu skaitu, kas nepieciešami, lai izveidotu pilnu vilni.



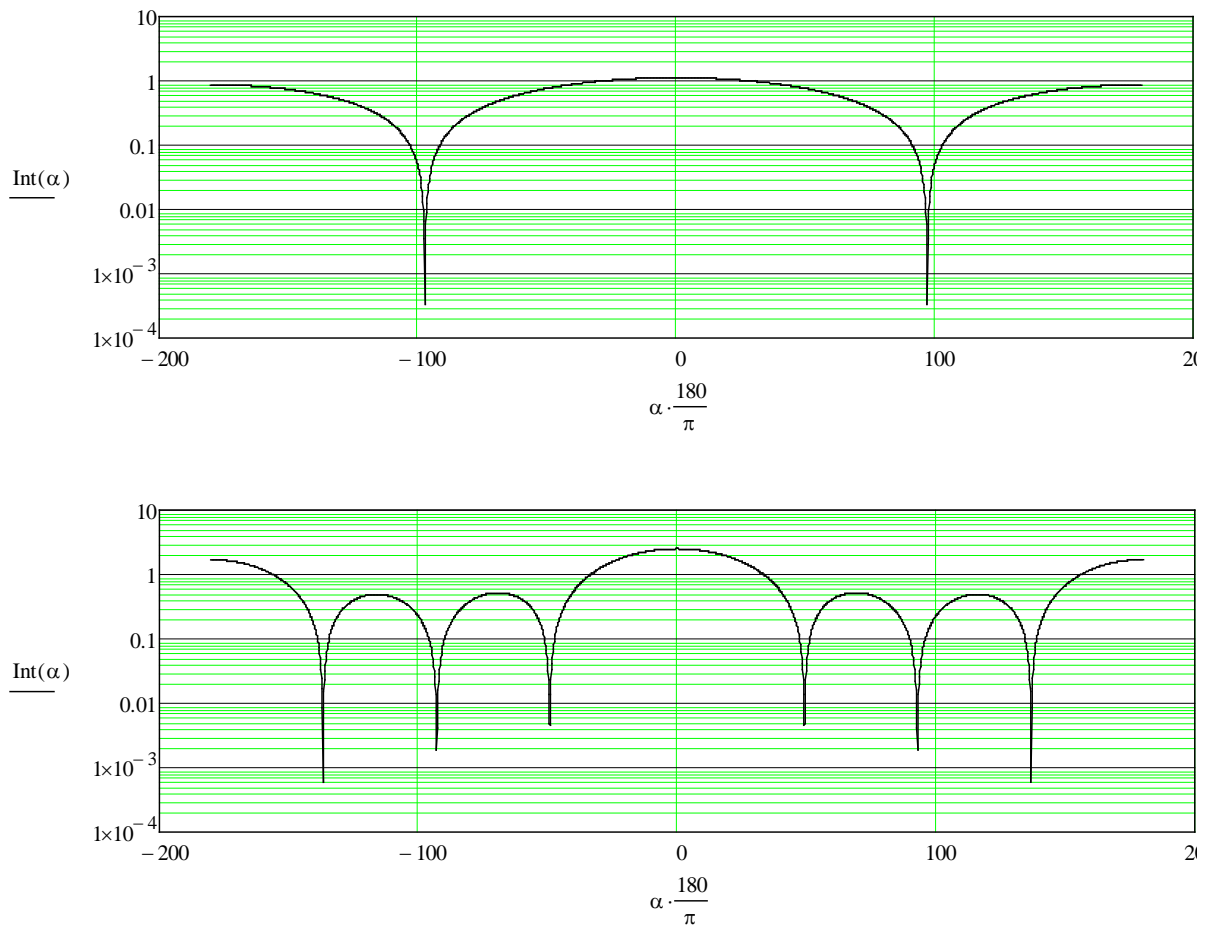
4.32. att. Inducētās strāvas horizontālais sadalījums 4 perioda momentos 10 cilindru sistēmai: a) Fāzes nobīde $\alpha = -\pi/2$ b) Fāzes nobīde $\alpha = 0$

4.32. attēlā redzams, ka, ja netiek ievietota fāzes nobīde starp dipoliem, faktiski katra atsevišķā cilindra inducētā strāva “nodzēs” nākamā. Rezultātā arī inducētais elektromagnētiskais spēks strādā tikai sistēmas galos, kur nav blakus cilindru abās pusēs, kas nodzēstu elektromagnētisko spēku. Savukārt gadījumā ar fāzes nobīdi, tiek iegūts salīdzinoši vienmērīgs spēks visā reģionā (skat. 4.33. attēlu).



4.33. att. Laikā vidējotā EM-spēka blīvuma horizontālais sadalījums spēka z (f_{av_z}) un x (f_{av_x}) komponentei 10 cilindru sistēmai: a) Fāzes nobīde $\alpha = -\pi/2$ b) Fāzes nobīde $\alpha = 0$

Kā minēts sistēmai, kas sastāv no vairākiem elementiem svarīga ir ne tikai radītās plūsmas parametri, bet nepieciešams novērtēt arī sistēmas elementu mijiedarbību vienam ar otru, lai pārbaudītu vai mehāniski vispār iespējams šādu sistēmu realizēt. Turklāt konkrētā gadījumā nepieciešams noskaidrot vai konkrētā fāzes nobīde ir pati optimālākā. Šāds aprēķins tika veikts un rezultāti redzami 4.34. attēlā.



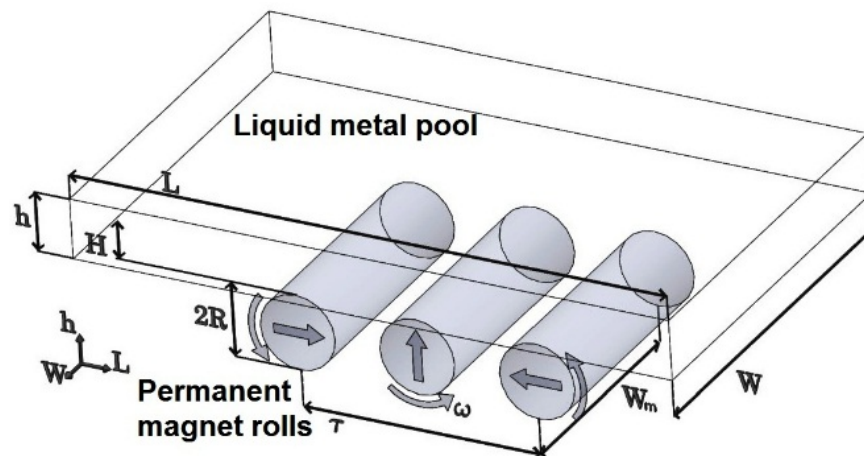
4.34. att. **Integrālais griezes moments, ko rada mehāniski sajūgti cilindri atkarībā no fāzu nobīdes:** (augšējais grafiks) 3 cilindri; (apakšējais grafiks) 5 cilindri. Pie patvaļīga cilindru skaita $N > 3$ integrālā griezes momenta minimumu skaits diapazonā no 0° līdz 180° ir $(N - 2)$

4.34. attēlā redzams, ka ir salīdzinoši šauri definēts fāzes nobīdes diapazons, kur integrālais sistēmas griezes moments tiecas uz 0. Turklāt jo vairāk sistēmas elementu, jo vairāk ir šādu iespējamo fāzes nobīdes leņķu. Redzams, ka līdz šim un turpmāk pamatā apskatītā fāzes nobīdes leņķa vērtība 90° ir optimāla.

4.3.2. Trīs rotējošu cilindru ar fāzes nobīdi radītās plūsmas eksperimentāla izpēte

Magnētisku dipolu rindas radītās šķidrā metāla kustības eksperimentālai izpētei tika izstrādāta eksperimentālā modeļa izkārtojums atbilstoši 4.35. attēlā.

Eksperimentālās izpētes mērķis ir verificēt teorētiskos aprēķinus, lai būtu iespējams sistēmu mērot industriālos mērogos, kā tas atbilstoši tika aprakstīts viena dipola gadījumam 4.2. nodaļā.



4.35. att. Trīs magnētisko dipolu eksperimentālā modeļa izkārtojums atbilstoši

Arī šajā gadījumā eksperimentālā modeļa ģeometriskā līdzību lielizmēra alumīnija maisītājam nodrošina sekojoši galvenie bezdimensionālie parametri: $h/\tau = 0.25$; $H/\tau = 0.6$; $W/\tau = 0.93$; $L/\tau = 2.7$; $W_m/\tau = 1.9$, kur H – attālums no magnētiem līdz šķidrājam metālam (šķidrā metāla baseina apakšai); W – cilindrisko magnētu garums; R – šo magnētu rādiuss; $\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu}}$ – šķidrā metāla skinslāņa biezums pie magnētiem rotējot ar leņķisko frekvenci ω . Fizikālo atbilstību starp modeli un īstu krāsni veido šādi bezdimensionālie parametri:

$$\Omega_d = \left(\frac{\tau}{\delta}\right)^2 \text{ un } N = \frac{B}{\omega\tau\sqrt{\mu\rho}} \quad (4.41.)$$

Šeit ρ ir kausējuma (šķidrā metāla) blīvums, μ – magnētiskā caurlaidība, B – magnētiskā lauka indukcija šķidrā metālā, Ω_d – bezdimensionālā frekvence un N – elektromagnētiskās mijiedarbības parametrs. Eksperimentālais modelis veidots tā, lai tas atbilstu 7.5 reizes lielākam šķidrā alumīnija rezervuāram. Tā kā abus fizikālās atbilstības kritērijus (Ω_d un N) nav iespējams sasniegt vienlaicīgi eksperimentālajā modelī un industriālā mērogā, kā prioritārā pieņemta bezdimensionālās frekvences identitātes atbilstība (nepieciešams, lai skinslāņa biezums nepārsniegtu šķidrā metāla baseina dziļumu). Gan eksperimentālajā modelī, gan lielizmēra alumīnija rezervuārā dabiskais elektromagnētiskās mijiedarbības parametrs būtu ļoti mazs ($N \ll 1$), bet eksperimentālajā modelī tas būtu par kārtu mazāks kā lielizmēra alumīnija baseinam. Arī šeit uzdoto N (vienlaicīgi ar uzdoto Ω_d) nevarēja sasniegt fizikālu ierobežojumu dēļ, kurus noteica pastāvīgo magnētu materiāla paliekošā magnetizācija. Kā nākamais solis tika apsvērta cits eksperimentālais modelis, kurā varētu sasniegt uzdoto N (bet nevarētu apmierināt nepieciešamo Ω_d). Eksperimentā arī šajā gadījumā kā šķidrā metāls tika izmantota In-Ga-Sn eitektika (blīvums 6400 kg/m^3 , elektriskā vadītspēja $3,3 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, kinemātiskā viskozitāte $3,1 \cdot 10^7 \text{ m}^2/\text{s}$). Tīra alumīnija parametri tika izmantoti atskaites šķidrumam.

No eksperimentālās iekārtas praktiskās realizācijas (un pēc tam industriālās iekārtas) jāņem vērā, ka gadījumā, kad sistēma tiek veidota no vairākiem magnētiskiem elementiem, tās realizācijā ir jāņem vērā papildus būtiski aspekti:

1. Starp magnētiem, ja tie atrodas viens otram relatīvi tuvu, darbojas pievilkšanās spēki. Ja magnēti rotē, tad šis spēks ir laikā mainīgs. Tas savukārt nosaka to, ka:

- a. Magnētu stiprinājumiem ir jābūt precīziem un izturīgiem, jo bez tradicionālās mehāniskās slodzes, sistēmai ir papildus magnētiskie spēki;
- b. Jābūt pārdomātai sistēmas salikšanas metodikai, jo bieži magnētiskie spēki ir tik lieli, ka nepieciešamas pat speciālas palīgiekārtas spēku pārvarēšanai. Šādas sistēmas bija nepieciešamas visu šajā darbā apskatīto sistēmu realizācijai;
- c. Praktiski liels pievilkšanās un atgrūšanas spēks nozīmē arī palielinātu berzi un attiecīgi, pirmkārt, palielinātu atsevišķu elementu nodilumu un, otrkārt, palielinātu nepieciešamo pastāvīgo griezes momentu sistēmas griešanai kā arī papildus jaudas zudumus šīs berzes pārvarēšanai. Piemēram, šeit apskatītajai sistēmai, bija nepieciešams nomainīt slīdes gultņus pret lodīšu. Tāpat tika izmantots motors ar vairāk kā 2x jaudas rezervi, attiecībā pret aprēķinu, kas tika veikts 3.1. nodaļā apskatītas atbilstošas sistēmas gadījumā;

2. Starp dipoliem darbojas griezes moments. Tas savukārt uzliek papildus slodzi uz pievades sistēmu. Šeit iestādīts fāzes nobīdes leņķis, kas situācijai, kad sistēmas integrālais griezes moments tiecas uz nulli, tikai daļēji atrisina mehāniskās sajūgšanas un piedziņas problēmu, jo uz katru konkrēto elementu joprojām darbojas ievērojami griezes momenti, kuri tad attiecīgi mehāniski ir jāiztur piedziņas sistēmai;

3. Paši magnēti ir trausli un ar neizturīgu pārklājumu, kas prasa speciālu magnētu stiprinājums, lai neļautu tiem griezties stiprinājumā;

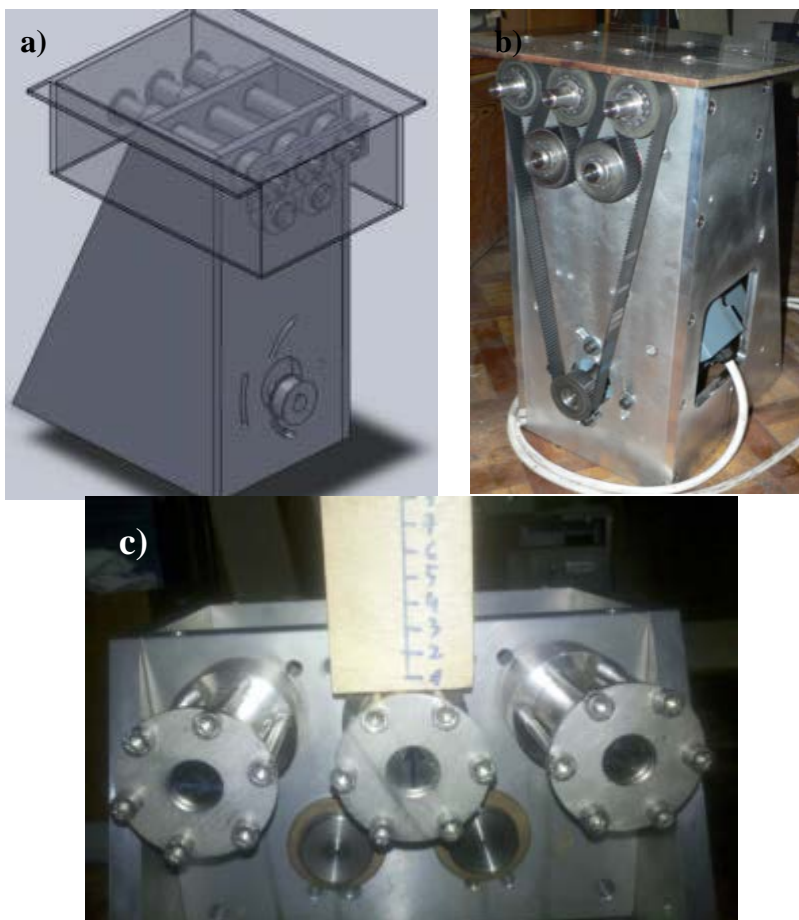
4. Limitēta iespēja izmantot feromagnētiskus materiālus. Šie materiāli ne tikai pievilkās pie magnētiem, radot mehāniskajai sistēmai papildus slodzi. Būtisks aspekts ir arī darbā ar sistēmu būt uzmanīgiem ar instrumentiem un palīglīdzekļiem, kur pilnībā izvairīties no feromagnētisko materiālu lietošanas praktiski ir nepiespējams;

5. Silšana. Magnēti rotējot rada mainīgu magnētisko lauku ne tikai darba vidē, bet gan visā telpā visapkārt, īpaši minētajos feromagnētiskajos materiālos. Īpaši svarīga šeit ir magnētu savstarpējā silšana, jo magnētus nedrīkst pārkarstēt vairāk par 120 °C. Eksperimentālās iekārtas realizācijā gan šim aspektam nebija būtiska nozīme;

Darba izstrādes laikā tika atrasta metode ar sekojošiem 5 soļiem, kā leņķi, kad integrālais griezes moments tiecas uz nulli gadījumā ar 3 dipoliem, iestatīt „eksperimentāli”, bez precīziem leņķa mērījumiem:

1. Nostiprina vidējo magnētu ar magnetizāciju vērstu uz augšu, perpendikulāri cilindru asu komplanārajai plaknei;
2. Griež labo cilindru līdz tas sasniedz labilu stāvokli – brīdi, kad maza novirze no leņķa izsauc tālāk kustības palielināšanos līdz tiek sasniegts atkal stabils miera stāvoklis;
3. Nostiprina cilindru šajā stāvoklī;
4. Atkārto 2. un 3. punktu ar atlikušo cilindru;
5. Sajūdz mehāniski visus trīs cilindrus – nodrošina lai to savstarpējā fāzes nobīde vairāk nemainītos.

Ņemot vērā minētos aspektus un metodiku, uzbūvētā eksperimentālā iekārta redzama



4.36. att. **Izgatavotā eksperimentālā iekārta ar 3 rotējošiem cilindriskiem magnētiem:** a) Iekārtas rasējumu kopskats; b) Izgatavotā iekārta ar piedziņas sistēmu; c) saliktie magnētiem ar nepieciešamo fāzu nobīdi

Eksperimentālā sistēma tika izveidota un integrēta vienotā kompaktā alumīnija rāmī, magnētu piedziņu nodrošinot ar zobsiksnu un palīgskriemeļu palīdzību. Fāzes nobīdes leņķi bija iespējams iestādīt pietiekami precīzi, lai, griežot sistēmu ar roku, netiktu novērota būtiskas slodzes izmaiņas apgrieziena laikā.

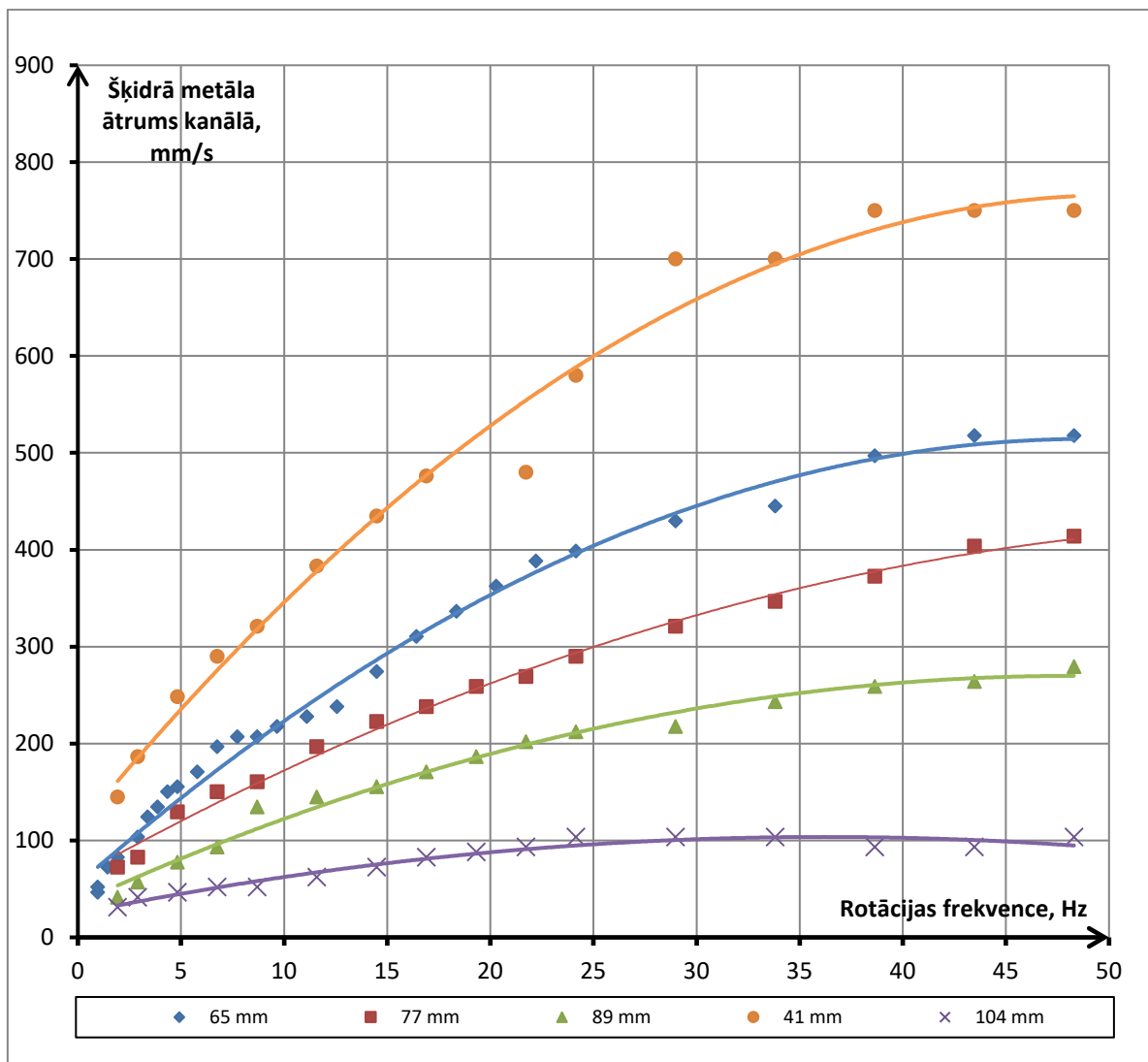
Eksperimentālie rezultāti

Šķidrā metāla ātruma mērīšanai izmantotas divas dažādas metodes (tādējādi apstiprinot rezultātu patiesumu). Pirmajā metodē izmantota potenciālu starpības lokālo ātrumu zonde ar iebūvētu maza izmēra pastāvīgo magnētu, otrajā metodē izmantoja ultraskaņas Doplera anemometru.

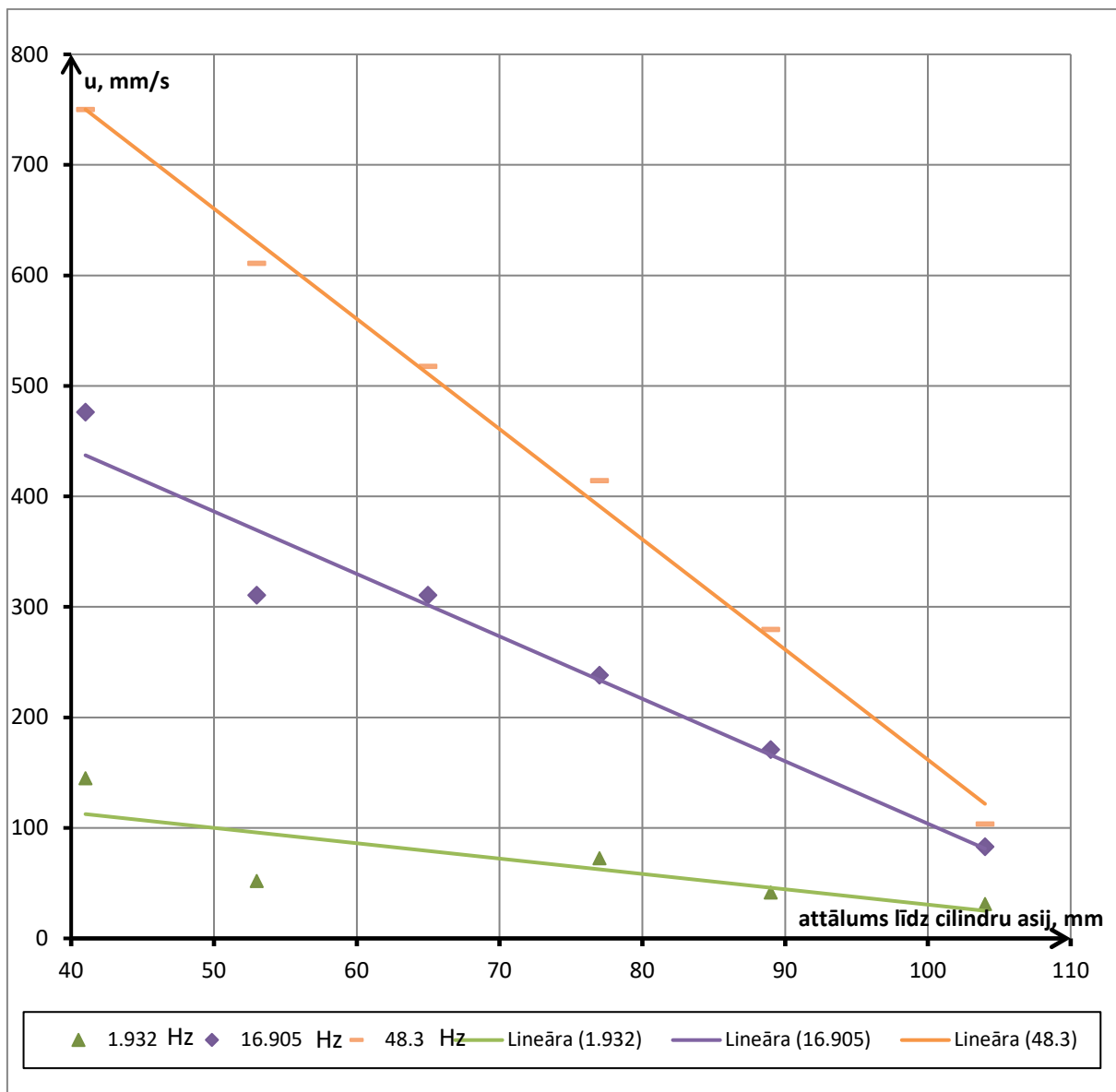
Eksperimentālā izpēte tika veikta arī divos posmos. Pirmajā posmā tika mērīts tikai plūsmas raksturīgais ātrums, izmantojot ultraskaņas Doplera anemometru, un pētīta tā atkarība no sistēmas rotācijas frekvences, nemagnētiskā attāluma un fāžu nobīdes.

4.37. attēlā redzama 3 rotoru ar fāžu nobīdi inducētā šķidrā metāla kustība kanālā pie dažādiem attālumiem. 4.38. attēlā aplūkojama redzama šīs pašas sistēmas inducētās kustības

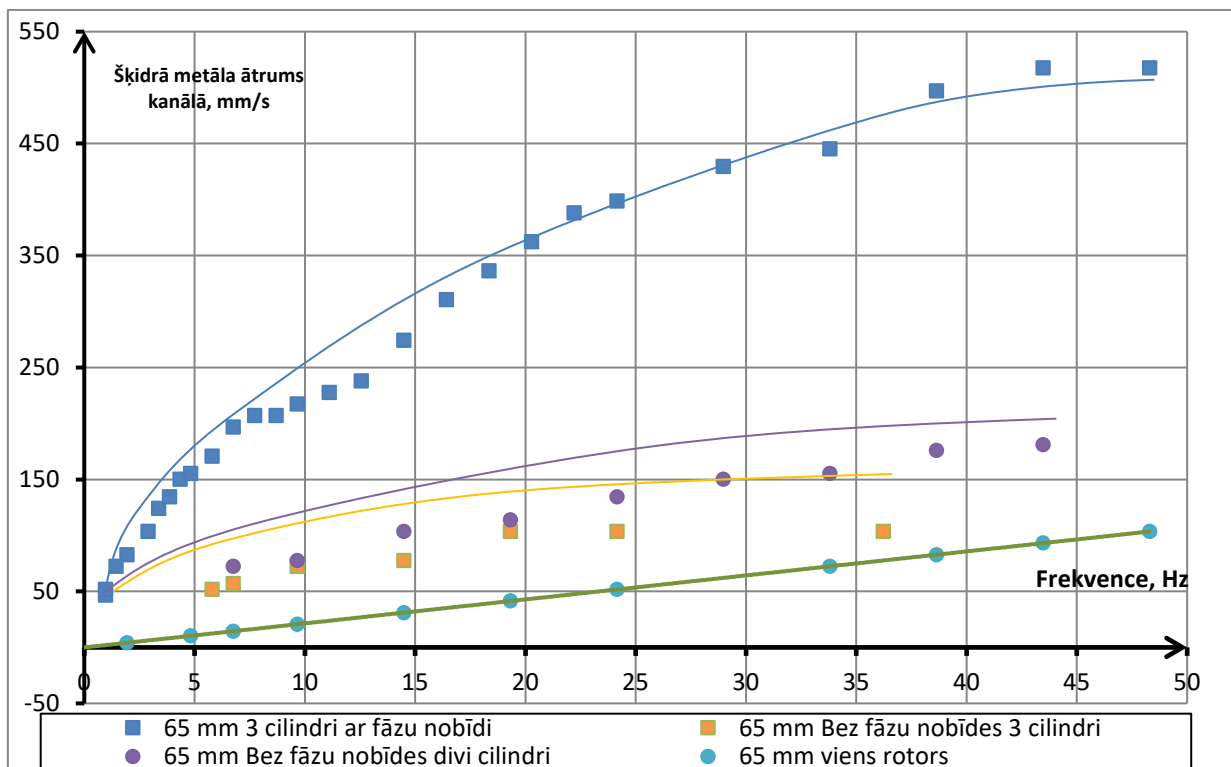
ātruma atkarība no attāluma starp magnētu un šķidro metālu. Šī grafika iegūšanai ir izmantoti tie paši dati, kas 4.37. attēlam, tikai veikta datu pārgrupēšana, lai labāk būtu iespējams novērot tieši atkarību no attāluma. 4.38. attēlā redzams divu sistēmu salīdzinājums. Tiek salīdzināti trīs rotējoši cilindriski magnēti ar un bez fāžu nobīdi. Šeit labi novērojama fāzes nobīdes izšķirošā nozīme. Sistēmas ir salīdzinātas pie diviem dažādiem attālumiem starp šķidro metālu un magnētiem, lai gūtu lielāku pārlicību. Jāatzīmē, ka nebija iespējams iegūt datus plašākā frekvenču diapazonā sistēmai bez fāžu nobīdes dēļ sistēmas radīto pārāk lielo mehāniskajām slodzēm. Četru dažādu magnētisko sistēmu inducētā šķidrā metāla kustības atkarība no frekvences aplūkota 4.39. attēlā, kurā sistēmas salīdzinātas gadījumā, kad attālums starp šķidro metālu un cilindru asīm ir 65 mm. Bet trīs rotējošu magnētu ar fāžu nobīdes pie diviem dažādiem attālumiem (bez fāžu nobīdes) eksperimentālo un analītisko rezultātu salīdzinājums ietverts 4.40. attēlā.



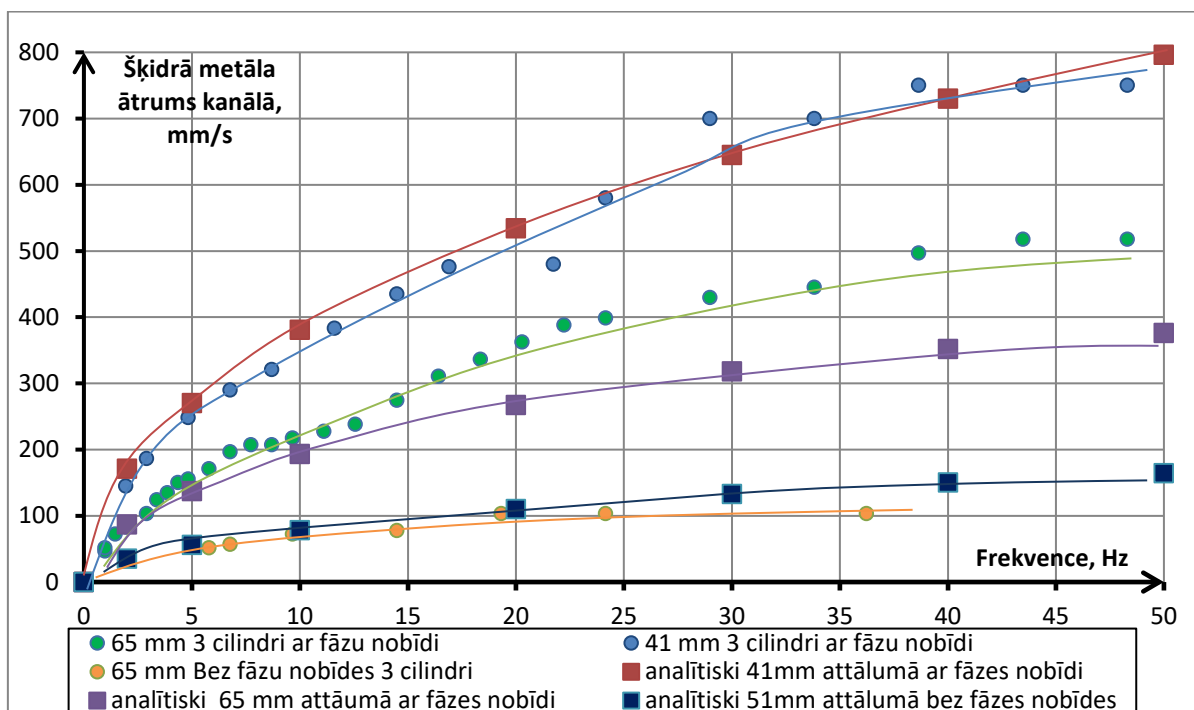
4.37. att. 3 rotoru ar fāžu nobīdi inducētā šķidrā metāla kustība kanālā pie dažādiem attālumiem



4.38. att. Šķidrā metāla ātruma kanālā atkarība no attāluma līdz cilindra ass pie dažādām magnētu rotācijas frekvencēm: Dati aproksimēti ar lineārām taisnēm



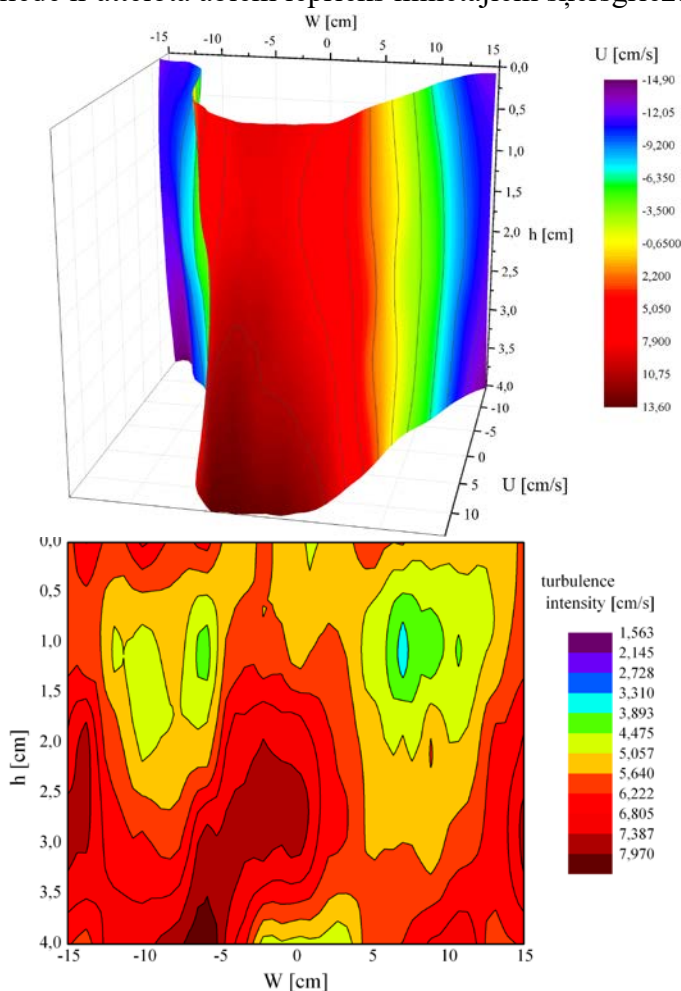
4.39. att. 4 Dažādu magnētisko sistēmu inducētā šķidrā metāla kustības atkarība no frekvences: attālums starp šķidrā metālu un cilindru asīm ir 65 mm



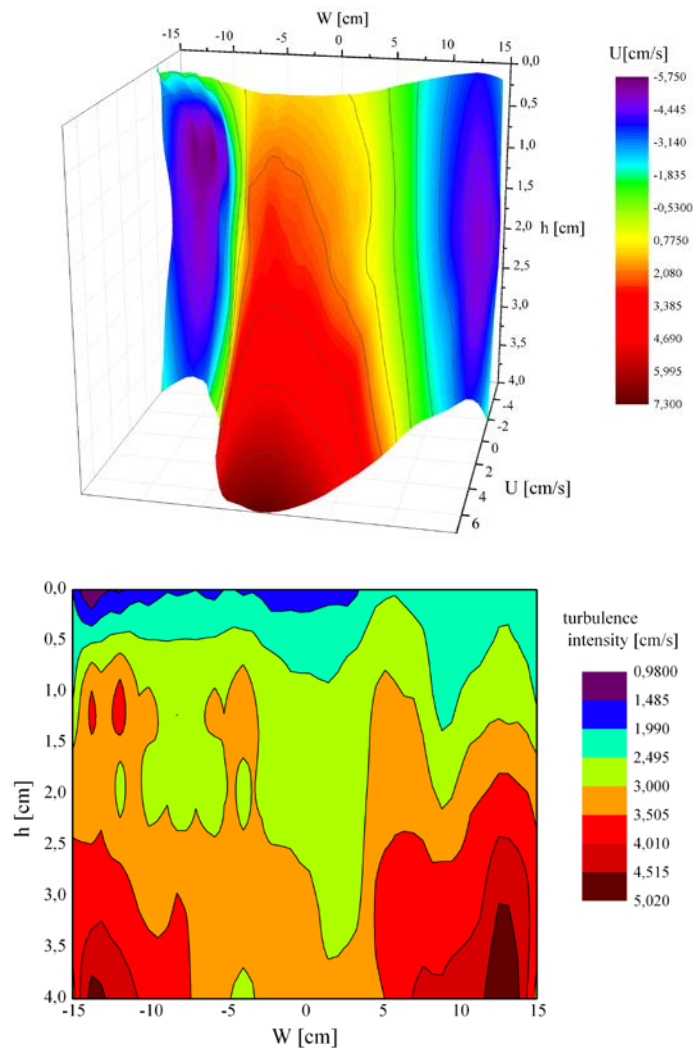
4.40. att. Trīs rotējošu magnētu ar fāzu nobīdes pie diviem dažādiem attālumiem (fāzu nobīdes) eksperimentālo un analītisko rezultātu salīdzinājums

Eksperimentālās izpētes nākamajā posmā tika mērīts plūsmas lokālais ātrums divos vertikālos šķērsgriezumos perpendikulāri skrejošā magnētiskā lauka virzienam. Attālums starp pastāvīgo magnētu cilindriem un šķidrā metāla slāni bija $H/\tau = 0.6$ (2,5 magnētiskā cilindra diametri) un skrejošā magnētiskā lauka indukcijas amplitūda nepārsniedza 10 mT. Ātrums tieši virs maisītāja pārsniedza 10 cm/s, cilindriem rotējot 50 apgriezienus sekundē. Maisītāja galvenais mērķis ir sasniegt augstu integrālo caurteci. 4.41. un 4.42. attēlā redzama virsmas grafiska vizualizācija – vertikālā šķērsgriezumā virs maisītāja viduspunkta (garenvirzienā) caurplūde bija 0,47 l/s, bet šķērsgriezumā lejup pa straumi 0,2 L attālumā no gala sienas tā bija 0,14 l/s. 7,5 reizes lielākam alumīnija baseinam ekvivalents būtu 26 l/s vai arī masas maisīšanās tempu varētu izteikt kā 220 tonnas stundā, cilindriskajiem pastāvīgajiem magnētiem rotējot 0,3 apgriezienus sekundē.

Otrs galvenais eksperimentālā modeļa uzdevums bija nodemonstrēt vai maisīšana ir efektīva baseinā viscaur. 4.41. un 4.42. attēlos sniedz arī informāciju par turbulences intensitāti, standartnovirzes izkliede ir attēlota abiem iepriekš minētajiem šķērsgriezumiem.

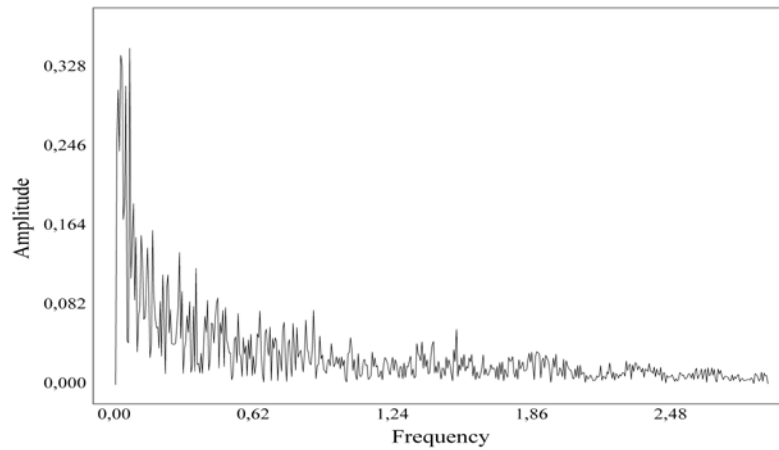
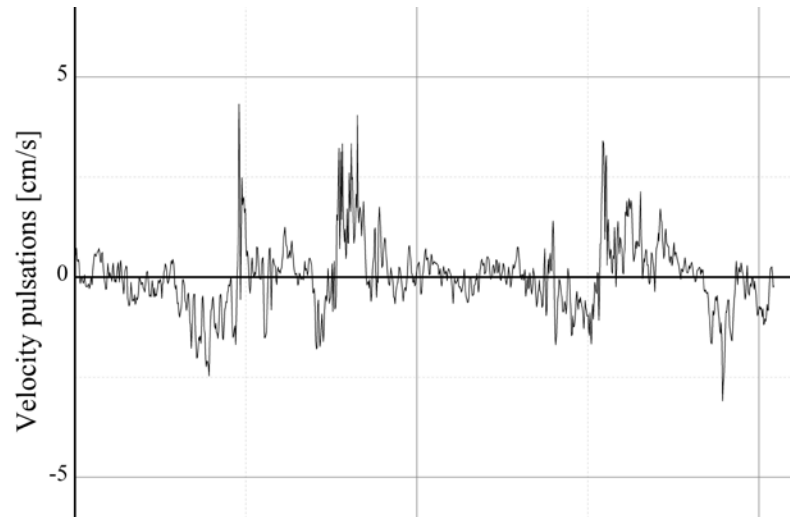


4.41. att. Ātrumu lauks virs vidējā magnēta (augšējais) un turbulentās ātruma pulsācijas (apakšējais). Mērījumi veikti ar Ultraskaņas Doplera anemometru

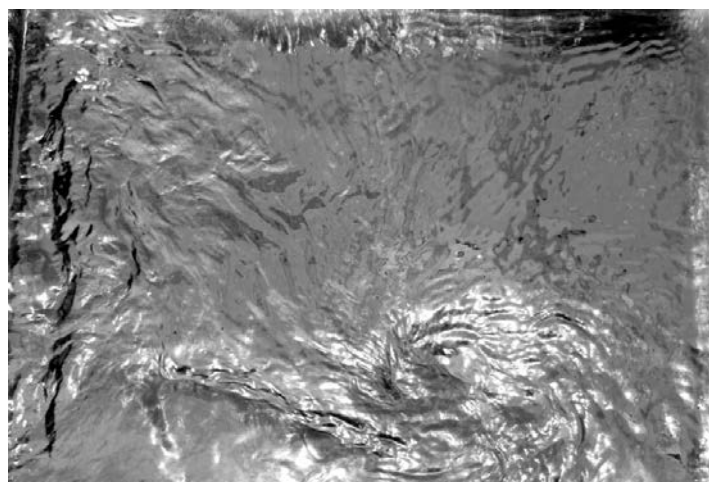


4.42. att. Ātrumu lauks starp pēdējo magnētu un sienu (augšējais) un turbulentās ātruma pulsācijas (apakšējais)

Vēl tika izpētīts baseina stūris – visšaubīgākais apgabals attiecībā uz maisīšanu. Vispārpieņemts, ka laikā vidējam ātrumam stūra apgabalā vajadzētu būt nelielam (tiekties uz nulli). 4.43 attēlā redzams apstiprinājums ļoti efektīvai maisīšanai pat baseina stūros. Inducētās plūsmas ļoti nestabilā rakstura dēļ turbulences intensitāte ir augsta viscaur baseinā. No maksimuma līdz minimumam ātruma svārstības stūra apgabalā ir gandrīz tādas pašas kā laikā vidējam ātrumam strūklai tieši virs maisītāja centra baseina apakšā. Turbulences spektrs, kas redzams 4.43. attēla labajā pusē norāda, ka šajā plūsmā dominē lielizmēra virpuļi, pie ļoti zemām frekvencēm. Ekstrēma plūsmas nestabilitāte aplūkojama sakausējuma momentānās brīvās virsmas deformācijas fotoattēlā, kas redzama 4.44. attēlā.



4.43. att. No laika atkarīgais ātruma signāls (augšā) un baseina stūra Furjē spektrs (1 cm attālumā no abām sienām zem šķidrā metāla virsmas) (apakšā); Vidējais ātrums ir 0,9 cm/s. No minimuma līdz maksimumam 7,41 cm/s



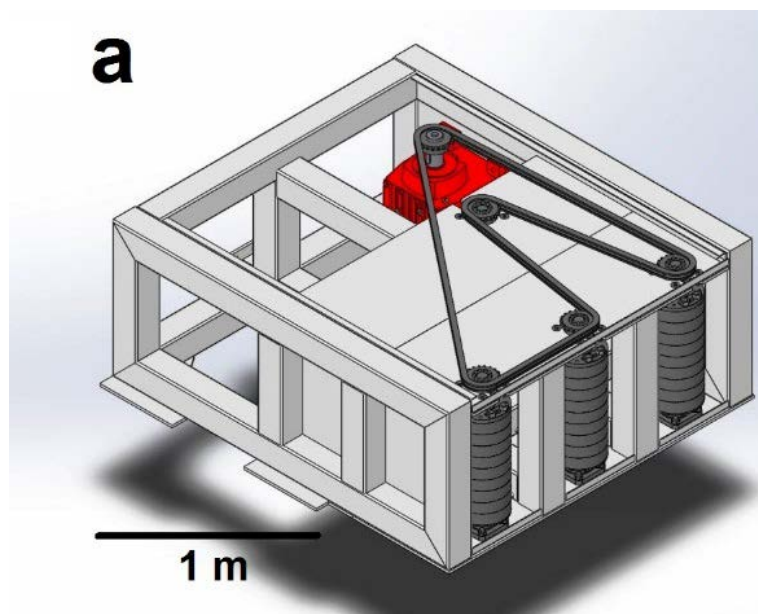
4.44. att. Virpuļa fotoattēls In-Ga-Sn eitektikā maisot ar 3 cilindriskiem magnētiem

Ekstrēma plūsmas nestabilitāte aplūkojama sakausējuma momentānās brīvās virsmas

deformācijas fotoattēlā, kas redzama 4.44. attēlā.

4.3.3. Industriāla mēroga trīs magnētisku dipolu sistēmas izpēte

Šajā nodaļā aplūkota un izgatavota eksperimentālā iekārta elektromagnētiskas mijiedarbības realizēšanai šķidrā alumīnijā industriālā mērogā cauri 20 līdz 30 cm biežai krāsns sienai. Iekārta atbilstoši eksperimentālajam modelim sastāv no trīs magnētiskiem cilindriem, kas magnetizēti perpendikulāri rotācijas asij. Magnētu diametrs šeit: 15 cm, augstums: 70 cm. Šī iekārta izveidota, lai pārbaudītu tās darbību un pārlicinātos par galvenajiem šķēršļiem šāda tipa iekārtas pielietošanai īstām alumīnija krāsnīm, kā arī demonstrācijas nolūkos. Rotāciju nodrošina elektromotors ar jaudu 18kW, kas ar ķēdes palīdzību ir savienots ar magnētiskajiem cilindriem kā tas redzams 4.45. attēlā.



4.45. att. Industriāla izmēra pastāvīgo magnētu maisītāja un tās piedziņas sistēmas shematisks attēlojums

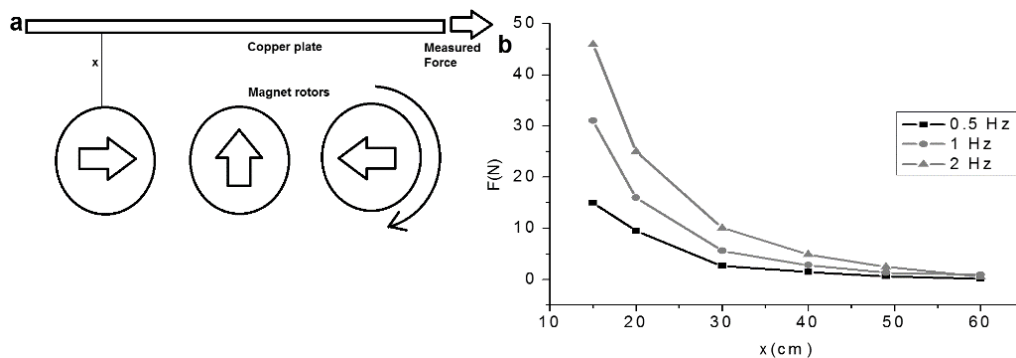
Katrs magnētiskais rotors sastāv no deviņiem pastāvīgajiem magnētiem tērauda ietvaros. Pilns šāda magnētiskā rotora garums ir 36 cm, bet diametrs 15 cm. Cilindri ir novietoti tā, ka starp katru divu cilindru vertikālajām asīm ir 50 cm attālums. Iekārtas rāmis ir veidots no stiklplasta, kas ir pietiekami temperatūras izturīgs materiāls. Vēl šis materiāls nav elektrovadošs, kas šajā gadījumā ir īpaši svarīga īpašība, pretējā gadījumā rotējošie magnēti inducētu metāla rāmī virpuļstrāvas un ievērojami siltu. Izmantotie NdFeB magnēti izmantojami līdz 140 °C. Plānots, ka maisītāju novietos dažādu centimetru attālumā no krāsns sienas un dzesēs ar gaisa plūsmu. Šādā gadījumā minimālais attālums starp magnēta virsmu un alumīniju ir ne mazāks par 20 cm. Izgatavotā industriāla mēroga eksperimentālā iekārta redzama 4.46. attēlā.



4.46. att. Izgatavotā industriāla mēroga eksperimentālā iekārta ar 3 rotējošiem magnētiskajiem dipoliem 20 t alumīnija krāsnij ar sienas biezumu 20 cm

Izmantojot aprēķinu metodiku atbilstoši 3.1. nodaļā aprakstītajai, iespējams aprēķināt šeit aprakstītā maisītāja radīto spiedienu lielā alumīnija tvertnē. Attālums starp magnēta virsmu un alumīniju ir 20 cm. Izmantotie magnētiskie rotorī šajā attālumā nodrošina $B = 0.06$ T lielu magnētisko lauku (kas tika arī eksperimentāli nomērīts). Pārējie parametri šajā gadījumā ir šādi: $l_{ch} = 1$ m, $f = 3$ Hz, $V_B = 1.4$ m/s, $\sigma = 3.3 \cdot 10^6$ S/m, $\tau = 0.5$ m, $a = 0.18$ m, $\Delta = 0.2$ m, $b = 0.2$ m (attālums, kurā magnētiskā lauka indukcija samazinās e reizes). No šiem aprēķiniem var iegūt, ka alumīnijam $Rm = 0.9$, $k = 0.17$ un spiediens $P_{A1} = 1.4$ kPa.

Lai apstiprinātu šos aprēķinus, eksperiments tika veikts, šķidrā alumīnija vietā izmantojot cietu vara plāksni. Rezultāti nomērītajam integrālajam spēkam uz 2 mm biezas plāksnes ar laukumu 1x1 m aplūkojami 4.47. attēlā. Analītiski aprēķinot, izmantojot varu pie 2 Hz frekvences un 20 cm platas nemagnētiskās spraugas ($f=2$ Hz; $\Delta=20$ cm), iegūst šādas vērtības: $Rm = 0.1$, $k=0.13$, $P = 10.5$ kPa jeb 21 N spēku uz 1x1x0.002 m lielu plāksni. Aprēķinot šā spēka vērtību pie 30 cm platas nemagnētiskās spraugas iegūst 9 N. Šie rezultāti labi sakrīt ar spēka mērījumiem, kas uzrādīti 4.47. b) attēlā.



4.47. att. a) “Sausa” eksperimenta ar vara plāksni shematisks attēlojums; b) nomērītais spēks uz vara plāksnes atkarībā no attāluma starp plāksni un magnētiskajiem rotoriem

Lielai alumīnija tvertnei iegūst: $P_{Al} l_{ch} \cdot 2a \cdot b = 100 \text{ N}$. Šķidrā metāla ātrumu alumīnija tvertnē var aptuveni aprēķināt salīdzinot inerciālo nosacījumu Navjē-Stoksa vienādojumā ar elektromagnētisko spēku. Mēs pieņemam, ka viskozitāte ir niecīga un inerciālais spēks darbojas vienmērīgi visā šķidrā metāla tilpumā. Iegūstam:

$$V \frac{\rho u^2}{R} \approx F \quad (4.45.)$$

Šeit $V=4 \text{ m}^3$ ir alumīnija tvertnes tilpums; $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ir blīvums; $R = 2 \text{ m}$ ir tvertnes raksturīgais izmērs un F ir integrālais elektromagnētiskais spēks. No (4.45.) vienādojuma iegūstam, ka $u = 0.14 \text{ m/s}$, kas nozīmē, ka tvertnes samaisšanās laiks ir 15 s, kas ir pietiekami, lai ļoti uzlabotu temperatūras un maisījuma homogenitāti. Attiecību starp konvektīvo un difūzo siltumapmaiņu raksturo Peklē (*Pecklet*) skaitlis:

$$Pe = \frac{Lu\rho c_p}{k} \quad (4.46.)$$

Šeit $c_p = 900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, bet $k = 200 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (siltuma vadītspēja). Pie šīm vērtībām iegūstam $Pe = 2900$, kas nozīmē, ka šajā gadījumā dominē konvektīvā siltumpārnese.

Pilnībā sistēmu būtu jānotestē arī darbā ar šķidru metālu, vismaz atbilstoši tam, kā tas tika darīts 4.1. nodaļā viena dipola gadījumā. Šādi testi plānoti tuvākajā laikā.

4.3.4. Secinājumi par trīs magnētisku dipolu sistēmu

Veiktie analītiskie novērtējumi un eksperimentālā izpēte laboratorijas un industriālā mērogā ļauj izdarīt sekojošus secinājumus:

1. Izdarīti analītiskie elektromagnētisko lauku, elektromagnētisko spēku aprēķini sistēmās ar vairākiem rotējošiem magnētiskajiem dipoliem un pierādīta skrejoša magnētiskā lauka realizācijas iespējamība. Atbilstoši magnētiskā lauka superpozīcijas principam aprēķinot vairāku rotējošu dipolu kopīgi radīto magnētisko lauku (formulas 4.34. un 4.35.) var redzēt (skat. 4.28.attēlu), ka joprojām tiek iegūts skrejošs magnētiskais lauks, kas ir nepieciešams, lai radītu elektrovadošā vidē organizētu kustību;
2. Konstatēts, ka sistēmās ar vairākiem rotējošiem dipoliem kritisku lomu spēlē fāzu nobīde starp blakus esošiem dipoliem, kas nosaka elektromagnētiskā spēka lielumu šķidrā metālā. – 4.30. attēlā redzams, ka neievērojot fāžu nobīdi tiek iegūts par vismaz

- kārtu mazāks radītais elektromagnētiskais spēks;
3. Izdarīti šķidra metāla plūsmu ātrumu aprēķini sistēmās ar rotējošiem dipoliem pie dažādiem parametriem. 4.38. attēlā redzams, ka neievērojot optimālu fāzes nobīdi starp dipoliem, radītās plūsmas ātrums var atšķirties pat 5 reizes;
 4. Salīdzinot 4.28. un 4.31. a). attēlus var izteikt hipotēzi, ka rotējošu dipolu sistēmas radīto skrejošo pilno viļņu daudzums ir vienāds ar kopējo magnētu skaitu izdalītu ar magnētu skaitu, kas nepieciešami, lai izveidotu pilnu vilni jeb $\frac{360^\circ}{\varphi}$, kur φ fāzes nobīde starp blakus esošajiem magnētiem;
 5. Noskaidrots, ka sistēmai, kas sastāv no vairākiem elementiem ir būtiski to savstarpējās mijiedarbības spēki. 4.34. attēlā redzams, ka ir salīdzinoši šaurs fāzes nobīdes diapazons, kur integrālais sistēmas griezes moments tiecas uz 0. Tomēr pat sistēmas integrālajam griezes momentam esot minimālam, joprojām nepieciešams pārvarēt elementu savstarpējās mijiedarbības spēkus. Praktiskai realizācijai nepieciešams izstrādāt speciālu elementu salikšanas metodiku un piedziņas sistēmu, piemēram, atbilstoši 4.36. vai 4.45. attēlos redzamajai. To ievērojot, iespējams arī praktiski realizēt industriāla mēroga iekārtas, kas arī ir izdarīts (skat. 4.46.attēlu);
 6. Izstrādāta un izgatavota eksperimentāla iekārta un iegūti dati par ātrumu sadalījumu taisnstūrveida rezervuārā un parādīts, ka, nomērot ātruma lauku rezervuāra šķērsgriezumos (skat. 4.41. un 4.42. attēlus), redzams, ka plūsma šādā rezervuārā pamatā noslēdzas rezervuāra sāniem, nevis rezervuāra augstumu;
 7. Eksperimentālais modelis nerasniedza pilnīgu atbilstību industriāla mēroga maisītājam lielā alumīnija pārkausēšanas krāsnī, jo nepieciešamie fizikālie kritēriji nebija sasniedzami vienlaicīgi (Ω_d un N). Tomēr tā kā abas salīdzinātās parādības ietvēra elektromagnētiskās mijiedarbības parametru $N \ll 1$, rezultāti varētu tikt uzskatīti par pietiekamiem, lai pierādītu, ka iespējams izmantot ierosināto lineāro pastāvīgo magnētu induktoru alumīnija baseinu maisīšanai krāsnīs ar apakšējās sienas biezumu līdz 50 cm un ietilpību līdz pat 50 tonnām;
 8. Salīdzinot 4.40. attēlā eksperimentāli iegūtos rezultātus ar tiem, kas iegūti ar 4.3.1. nodaļā aprakstītajiem analītiska aprēķina modeli, redzams, ka rezultāti labi sakrīt un arī šādu tuvinātu aprēķinu modeli iespējams izmantot sistēmas pirmajai novērtēšanai;
 9. Nomērītais turbulences spektrs, kas redzams 4.43. attēla labajā pusē norāda, ka šajā plūsmā dominē lielizmēra virpuļi arī pie zemām frekvencēm;
 10. 4.43 attēlā redzams, ka baseina stūrī no maksimuma līdz minimuma ātruma svārstības stūra apgabalā ir gandrīz tādas pašas kā laikā vidējotā ātruma maksimums strūklai tieši virs maisītāja centra baseina apakšā, ļaujot secināt, ka 3 dipolu sistēma var efektīvi maisīt metālu arī rezervuāra stūros;
 11. Industriāla mēroga eksperimentālās iekārtas testos ar stacionāru, cietu plāksni demonstrēts (4.47.attēls), ka atbilstošā industriālā 20 t alumīnija krāsnī tiktu sasniegts pietiekams šķidrā metāla ātrums ($u = 0.14$ m/s), kas atbilst tvērtnes samaisīšanās laikam 15 s, kas ir uzskatāms par pietiekamu temperatūras un sastāva homogenitātes nodrošināšanai;

12. Pilnībā sistēmu būtu jānotestē arī darbā ar šķidru metālu industriālā mērogā, atbilstoši tam, kā tas tika darīts 4.2. nodaļā viena dipola gadījumā.

Šajā nodaļā veikto pētījumu rezultāti atspoguļoti sekojošās publikācijās:

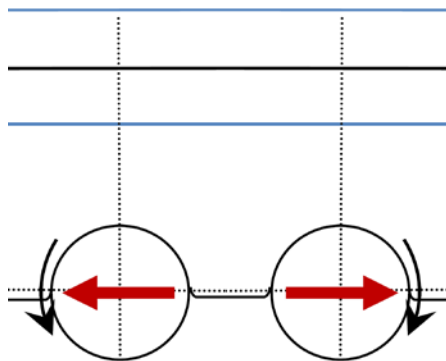
1. Bojarevičs, A., Beinerts, T., Sarma, M., Gelfgats, Y. Model experiment validating the feasibility of a permanent magnet stirrer for large-scale metal melting furnaces. **In:** *9th International Conference on Fundamental and applied MHD, thermo acoustic and space technologies*. Theme 9 (2). Riga: University of Latvia, Department of Psychology, 2014, 251-255
2. Bojarevics, A., Beinerts, T., Sarma, M., Gelfgat, Y. Arrays of Rotating Permanent Magnet Dipoles for Stirring and Pumping of Liquid Metals. *Journal for Manufacturing Science and Production*. 2015, 15(1), 35–39. ISSN 2191-4184. e-ISSN 2191-0375. Available from: doi: 10.1515/jmsp-2014-0039
3. Bojarevičs, A., Beinerts, T., Gelfgat, Yu., Kaldre, I. Use of Permanent Magnets in Electromagnetic Facilities for the Treatment of Aluminum Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016, 47(3), 1626–1633. ISSN 1073-5615. e-ISSN 1543-1916. Available from: doi: 10.1007/s11663-016-0646-5.
4. Bojarevics, A., Beinerts, T., Sarma, M., Gelfgat, Y. Experimental Model Tests of a Permanent Magnet Stirrer for Aluminium Furnaces. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2015, 8, 569-575. Available from: doi: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-569-575.

4.4. Citas dipolu sistēmas kustības inducēšanai kanālā

Iepriekš šajā nodaļā apskatītās magnētisko dipolu sistēmas ar vienu, trīs vai rindā rotējošiem dipoliem, kas realizēti kā perpendikulāri asij magnetizēti cilindri, tika izstrādātas kā turpinājums klasiskām pastāvīgo magnēti sistēmām, cenšoties atrast efektīvāku veidu kā nodrošināt analogisku efektu, tikai ar lielākiem nemagnētiskajiem attālumiem. Iepriekšējās nodaļās veiktajos aprēķinos un eksperimentos demonstrēta analogija starp šīm sistēmām un paradīta analogija arī ar klasiskajiem induktoriem, kur magnētiskā lauka radīšanai izmantoti dažādi strāvu vijumi. Jau sistēma ar trīs rindā novietotiem rotējošiem dipoliem parādīja, ka magnētisko dipolu izmantošana paver plašas variācijas iespējas. Šajā nodaļā turpināts meklēt kādas vēl sistēmas iespējams izveidot ar šādiem magnētiskajiem dipoliem, kādas plūsmas tiek radītas un vai tām varētu būt arī kāds praktisks, industriāls pielietojums, apskatot jau jaunas konfigurācijas analogiskas citām, iepriekš darbā neapskatītām esošajām MHD sistēmām, vai pat bez tieša esoša klasiska analoga. Jāatzīmē, ka sistēmām kļūstot arvien sarežģītāk, arvien būtiskāk kļūst arī magnētu sistēmā esošo magnētu savstarpējās mijiedarbības spēki [48].

4.4.1. Divi blakus novietoti magnēti zem šķidrā metāla rezervuāra

Pirmais vienkāršākais variants, ko var apskatīt, ir divi magnētiski dipoli, kas nav mehāniski sajūgti, un atrodas zem šķidrā metāla rezervuāra vai tam blakus (skat. 4.48. attēlu).



4.48. att. Sistēmas ar diviem blakus novietotiem dipoliem zem šķidrā metāla rezervuāra shematisks attēlojums

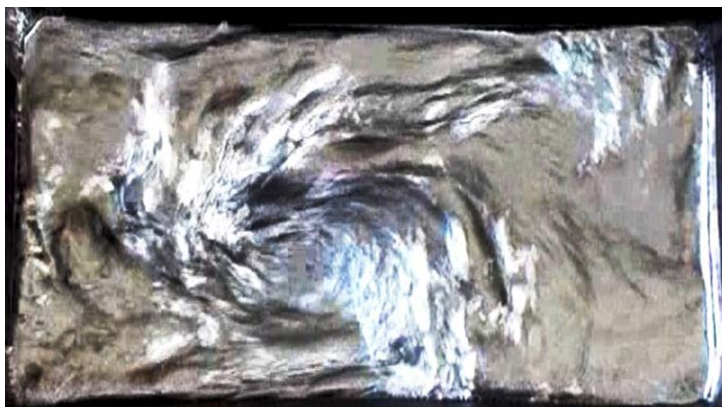
Praktiski sistēmu var realizēt analogiski iepriekš 4.3. nodaļā apskatītajai, tikai izmantojot divus cilindriskus magnētus un tos mehāniski nesajūdzot. Piedziņu nepieciešams nodrošināt tikai vienam no cilindriem, bet otram atļaujot griezties brīvi, tikai jāņem vērā, ka šādā gadījumā magnēti griezīsies pretējos virzienos.

Intuitīvi redzams, ka šāda sistēma nebūs pielietojama metāla sūkņēšanai, bet drīzāk tā samaisīšanai, jo magnētiskais lauks no katra dipola mainās savstarpēji pretējos virzienos – to atvasinājumi būs ar pretējām zīmēm, līdz ar to arī inducētās strāvas un attiecīgi arī spēki būs pretēji vērsti, līdz ar to, kad attālums no kanāla līdz magnētiem ir pietiekami liels, tad tangenciālie spēki tiek dzēsti, bet normālie pastiprināti.

Maisot šķidrā metālu tika novērotas sarežģītas plūsmas struktūras, līdz ar to maisīšanas

kvalitāte sākotnēji novērtēta vizuāli šķidruma plūsmas nofilmējot un veicot foto uzņēmumus (skat. 4.49. attēlu).

a)



b)



c)



4.49. att. 1. Rezervuārā Inducētās šķidrā metāla kustības fotoattēli: a) Viens rotors, 25 Hz, 3. cm līdz magnēta asij; b) Divi rotori 13 Hz. Labais rotors griežas pulksteņa rādītāja virzienā. Otrs – pretēji. 3. cm līdz magnēta asij; c) Divi rotori 13 Hz. Kreisais rotors griežas pulksteņa rādītāja virzienā. Otrs – pretēji. 3. cm līdz magnēta asij

Tika uzņemti video 3 dažādās magnētiskās sistēmas konfigurācijās:

1. Viens rotors zem rezervuāra – 4 dažādi augstumi, $v \in [1, 25]$ Hz (skat.4.49. attēlu a));
2. Divi rotoru zem rezervuāra, no kuriem viens magnēts brīvi griežas magnētiskajā laukā. Magnēti tiek griezti tā, ka, ja skatās magnētu projekciju kā 4.48. attēlā, tad tas magnēts, kas atrodas pa labi griežas pretēji pulksteņa rādītāja virzienam, bet otrs attiecīgi pretēji. 3. dažādi augstumi $v \in [1, 13]$ Hz (skat.4.49.attēlu b));
3. Tāda pati konfigurācijā kā 2. gadījumā, tikai ar pretējiem magnētu griešanās virzieniem. $v \in [1, 13]$ Hz.

2. un 3. gadījumā nebija nepieciešams uzņemt ar vairākiem dažādiem attālumiem starp cilindriem un rezervuāru, jo kustības rakstura maiņa atkarībā no augstuma tika ļoti noskaidrota jau 1. gadījumā (skat. 4.2. nodaļu). 2. un 3. konfigurācijā nebija iespējams palielināt frekvenci vairāk par 13 Hz pie $H+R = 3$ cm, jo virsmas deformācijas kļuva pārāk lielas. Pie ļoti intensīvām kustībām šķidrā metāls arī spēcīgi oksidējas.

Eksperimentos novērots, ka inducēto normālo spēku dēļ un rezervuāra galīgo izmēru dēļ, inducētās kustības izveido visai haotisku un nevienmērīgu kustību pat jau gadījumā ar vienu rotoru. 4.49.a) attēlā redzamais virpulis mēdza nemainīgu ārējo parametru apstākļos mainīt savu atrašanās vietu.

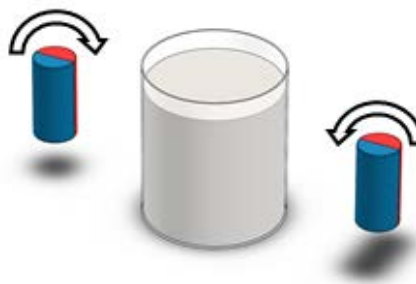
2. un 3. konfigurācijā (skat. 4.49.attēlus b) un c)) inducētā kustība pie nelieliem attālumiem līdz cilindru asīm ir ļoti intensīva un notiek ļoti intensīva šķidrā metāla maisīšanās. Redzams, ka 15 mm dziļā rezervuārā tā vidusdaļā veidojas pat līdz 2 cm lielas virsmas deformācijas ar haotisku plūsmu struktūru. Pie lielākām frekvencēm šķidrā metālā tika jau ierauti gaisa burbuļi.

Divu rotoru gadījumā, inducētās plūsmas intensitāte, palielinot attālumu starp kanālu un rotoriem, samazinās straujāk kā viena magnēta gadījumā. Šeit svarīga ir attiecība starp attālumu starp magnētiem un attālumu starp kanālu un magnētiem, līdz ar to pie lielākiem attālumiem no magnētiem ir izdevīgāk tos pat attālināt vienu no otra.

4.4.2. Divu cilindru sistēmas radīta plūsma starp tiem novietotā rezervuārā.

Kā minēts 4.4.1. nodaļā, apskatītā sistēma paliek arvien mazāk efektīva palielinot nemagnētisko attālumu starp magnētisko sistēmu un darba vidi, jo magnēti darbojas it kā viens otram pretī. Šo var daļēji novērst, ja darba vidi novieto tieši starp magnētiem. Šāda sistēma apskatīta tālāk nodaļā.

Vienkāršākā sistēma ietver divus rotējošus pastāvīgo magnētu cilindrus, kas magnetizēti diametrāli (šķērsām cilindra asij) un novietoti metāla tvertnes pretējās pusēs (skat. 4.50. attēlu).



4.50. att. Divu cilindru sistēmas ar starp tiem novietotu rezervuāru shematiskais attēlojums

Relatīvi lielais attālums starp magnētiem nodrošina, ka to savstarpējā mijiedarbība ir minimāla, tādējādi nodrošinot, ka sistēma darbojas energoefektīvi un vienmērīgi. Mainot magnētu atrašanās vietu attiecībā pret tvertni, var radīt dažādu tipu plūsmas pat bez aksiālas simetrijas.

Sistēmas izpētei tika izveidots neliela mēroga eksperimentāls modelis. Iekārtas ģeometriskie parametri un magnētu izmēri tika izvēlēti saskaņā līdzības kritērijiem ar industrijā raksturīgi izmantotu alumīnija tīģeli, ko izmanto metāla pārvietošanai vai mazu lējumu sagatavošanai. Eksperimentālās iekārtas modeli tika izveidots 4.5 reizes mazāks (skat. 4.51.a) attēlu). Šī sistēma sākotnēji analītiski tika novērtēta analogiski 4.2. nodaļā veiktajai bezdimensionālajai analīzei. Arī šai sistēmai iespējamā maksimālā pastāvīgā magnēta paliekošā magnetizācija bija ierobežota. Šī iemesla dēļ eksperimentā par prioritāti tika izvirzīts saglabāt bezdimensionālas frekvences kārtu. 4.2. tabulā apkopoti galvenie eksperimentālās un potenciālās industriāla izmēra sistēmas parametri. Industriālai iekārtai izmantoti šķidra alumīnija raksturlielumi, bet eksperimentālajai sistēmai Ga-In-Sn raksturlielumi istabas temperatūrā.

4.2. tabula

Galvenie eksperimentālās un potenciālās lielizmēra sistēmas parametri

	ρ , kg/m ³	η , Pa·s	σ , S/m	f, rev/s	δ , m	Re	Pe	Pe _D	Ha
Ga-In-Sn	6.4E+03	2.4E-03	3.5E+06	12	7.8E-02	1.3E+04	2.9E+02	1.0E+06	1.0E+02
Al (šķidr)	2.7E+03	1.3E-03	3.5E+07	2	6.0E-02	3.7E+04	1.8E+02	4.5E+06	2.0E+03

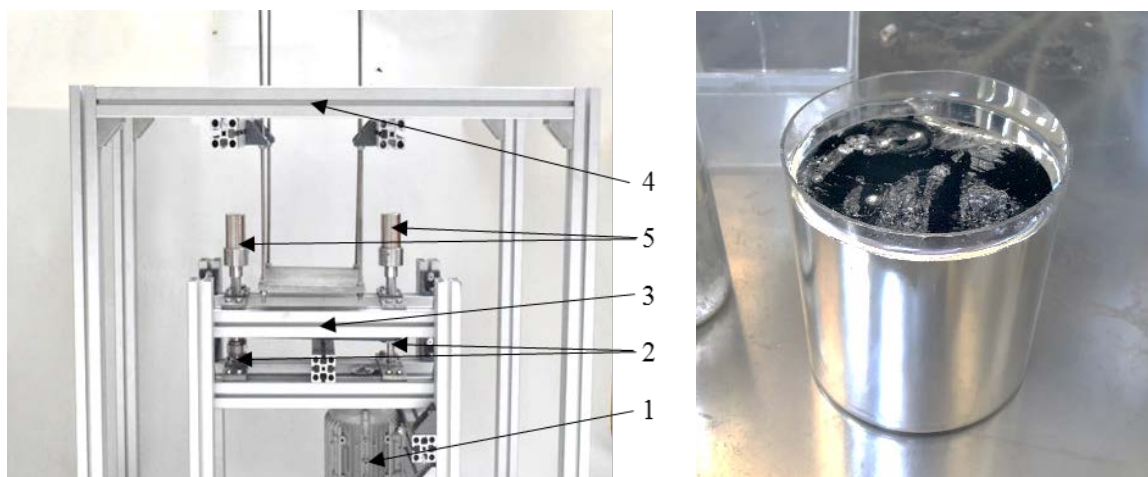
Izveidotā eksperimentālā iekārta sastāvēja no divām galvenajām daļām:

1. Pirmajā atrodas motors (*Siemens* trīsfāzu motors: 0.55 kW, 1440 apgriezieni minūtē)
 (1), divi cilindriski magnēti (40x70 mm), kas savienoti ar zobsiksnu (2), nodrošinot sinhronu

rotāciju. Visas detaļas ir savienotas ar alumīnija rāmi (3);

2. Otrā sistēmas daļa izgatavota šķidrā metāla tvertnes nostiprināšanai.

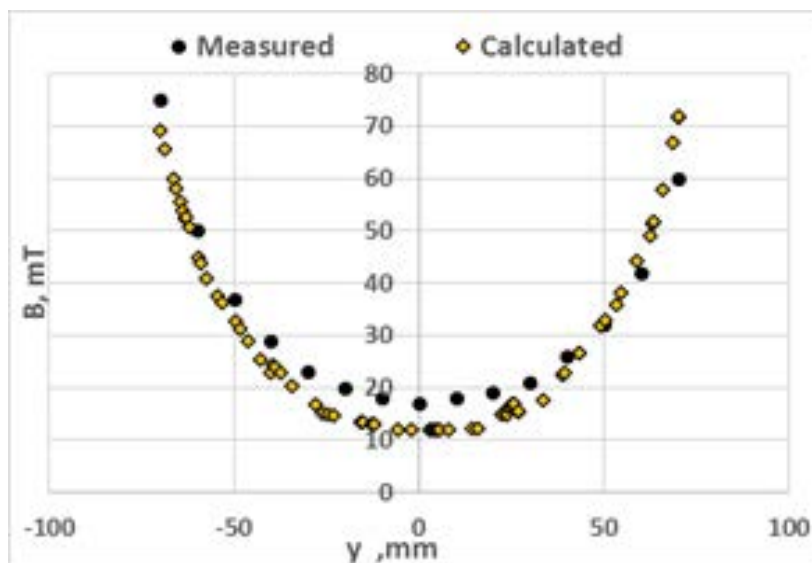
Sistēma veidota tā, lai magnētu (5) pozīcijas būtu maināmas visu trīs ašu (x,y,z) virzienā un varētu mainīt leņķi θ starp magnētiem un tvertni (leņķis starp cilindra galveno asi un z asi). Šādi var radīt dažāda tipa plūsmas pat bez aksiālas simetrijas, kas īpašās situācijās var būt noderīgi.



4.51. att. Maisītāja konstrukcija (pa kreisi); Ga-In-Sn tvertne (pa labi)

Šķidrā metāls aizņem cilindra tilpumu, kura augstums $h = 130$ mm un diametrs $d = 134$ mm (kopējais tilpums $V = 1,7$ l) (skat. 4.51.b attēlu). Industriālos pielietojumos maisītāja magnēti būtu pakļauti siltumam un lielas frekvences mainīgam magnētiskajam laukam, kas var sabojāt un atmagnetizēt magnētus, Šādos gadījumos ap magnētiem var ievietot vara aizsargsienu, kuru var papildināt arī ar ūdens dzesēšanas sistēmu.

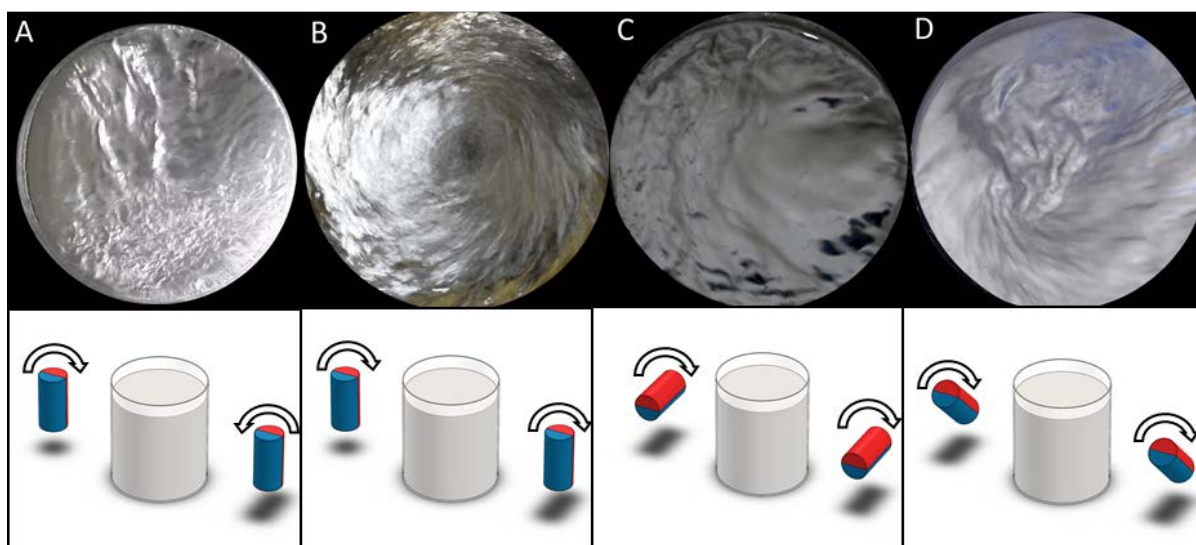
Eksperimentāli tika mērīti plūsmu ātrumi, mainot magnētu rotācijas frekvenci no 0.5 Hz līdz 19.2 Hz. Kā mazākā frekvence šajā diapazonā tika izvēlēta vērtība, pie kuras varēja sākt novērot kustību un izmērīt ātrumu, savukārt pie lielākās frekvences šajā diapazonā ātrumi bija salīdzinoši lieli un papildus frekvences palielināšana bija neefektīva skinefeka dēļ. Mērījumi tika veikti trīs dažādos leņķos: $\theta = 0^\circ$ (vertikāli); $\theta = 45^\circ$; $\theta = 90^\circ$ (horizontāli). Visi uzstādījumi tika pārbaudīti, magnētiem rotējot abos virzienos, lai iegūtu dažāda veida plūsmas un tās salīdzinātu. Eksperimenta laikā magnēti bija savstarpēji nostiprināti, un to novietojums bija maināms. Visas šīs konfigurācijas varēja pārbaudīt pie 90° un 180° lielām fāžu nobīdēm (φ). Visi ātruma mērījumi veikti vienā un tajā pašā punktā: 20 mm attālumā no tvertnes sienas un 30 mm dziļumā, lai izvairītos no jebkādiem robežslāņiem. Galvenais mērķis bija noteikt un nomērīt dažāda tipa plūsmu raksturīgo ātrumu. Ātrums tika mērīts z -ass virzienā un arī tangenciālais ātrums atkarībā no plūsmas tipa. Magnētiskā lauka indukcija starp magnētiem miera stāvoklī un vēršiem vienā virzienā variēja no 18 mT tvertnes centrā līdz 75 mT pie tvertnes malām. Šīs vērtības sakrīt vai arī nedaudz pārsniedza teorētiski aprēķinātās atkarībā no koordinātas (4.52. attēls).



4.52. att. Aprēķinātā un eksperimentāli nomērītā magnētiskā lauka grafisks attēlojums

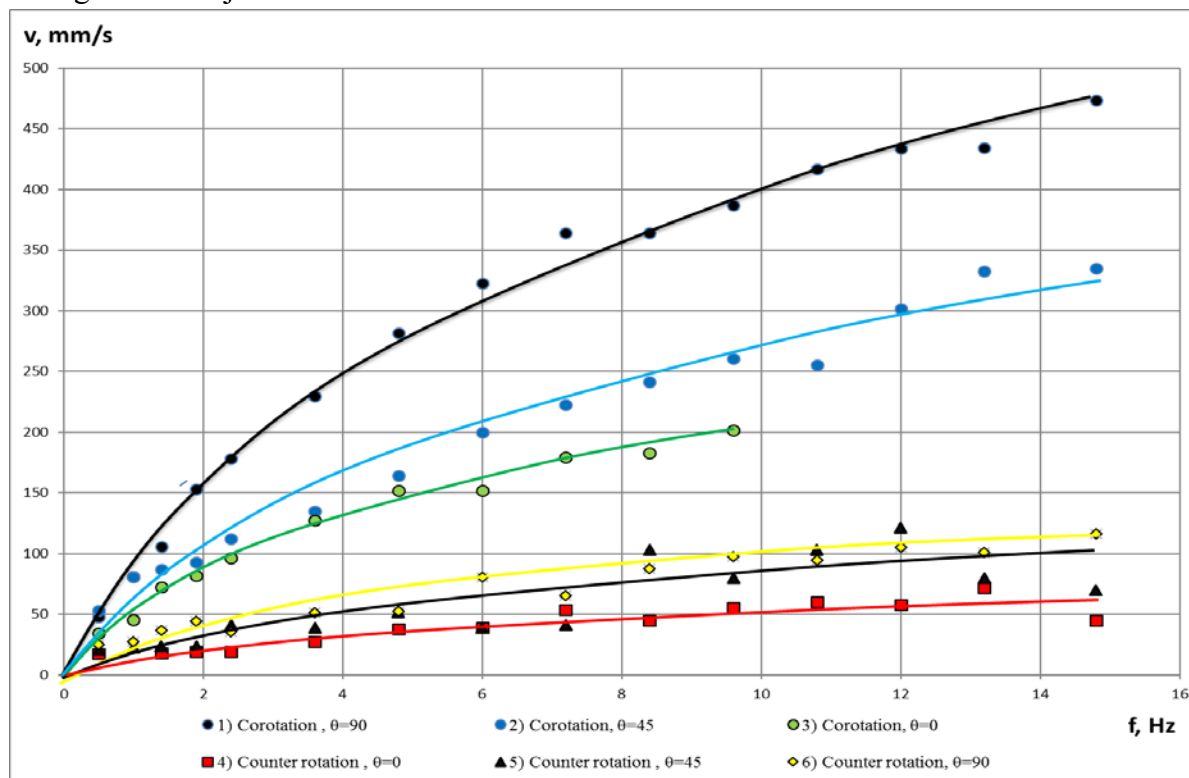
Gadījumā, kad magnēti rotēja pretēji viens otram (skat. 4.53.a) attēlu), tika novērota sarežģīta plūsma ar mainīgu ātrumu un dažreiz arī virziena maiņu. Šeit sasniegtie ātrumi bija salīdzinoši nelieli, jo lielākos spēkus magnēti inducē pretējos virzienos katrā pusē.

Aplūkojot otru konfigurāciju, magnēti rotē vienā virzienā 0° slīpumā (θ) (skat. 4.53.b) attēlu), redzams, ka magnēti inducē spēku vienā un tajā pašā rotācijas virzienā, tādēļ radītajā plūsmā veidojas relatīvi ātri rotējošs virpulis. Ja tiek izvēlēts vertikāls slīpums ($\theta = 90^\circ$), tiek novērota tāda pati cirkulāra kustība, bet cirkulācijas plakne ir vertikāla (y z) (skat. 4.53.c) attēlu). Izvēloties 45° slīpumu, veidojas abu iepriekšminēto plūsmu kombinācija (skat. 4.53.d) attēlu). Šāds novietojums vērtējams kā optimāls, jo nodrošina lielu plūsmas ātrumu un kustību visas trijās dimensijās.



4.53. att. Skats no augšpuses uz šķidrā metāla virsmu pie dažādiem magnētu novietojumiem: a) vertikāli pretrotācija; b) vertikāli korotācija; c) horizontāli korotācija; d) sagāzti 45° leņķi korotācija

Papildus tika izpētīta fāžu nobīdes nozīme. Magnētiem rotējot vienā virzienā vislielākos plūsmas ātrumi tika sasniegti pie 0° fāžu nobīdes: iegūta par 5 līdz 10 % lielāki ātrumi kā pie 90° un 180° fāžu nobīdēm. Magnētiem rotējot pretējos virzienos, fāžu nobīdes maiņa neradīja novērojamu efektu. Fāžu nobīdes radītais efekts šādā gadījumā ir ļoti neliels, jo attālums starp magnētiem ir relatīvi liels. 4.54. attēlā redzami 6 dažādu konfigurāciju plūsmu ātrumi atkarībā no magnētu rotācijas frekvences.



4.54. att. Ātruma atkarība no magnētu rotācijas frekvences dažādos magnētu slīpumos θ ar dažādām fāžu nobīdēm φ

Pirmā, otrā un trešā līkne ataino rezultātus režīmā ar vienā virzienā rotējošiem magnētiem (trijos dažādos magnētu slīpumos, kas radīja stabila liela ātruma plūsmas). Pie 10 magnēta rotācijām vienā sekundē iegūti ātrumi no 200 līdz 400 mm/s, kas uzskatāms par pilnībā pietiekamu ātrumu ātrai maisīšanai.

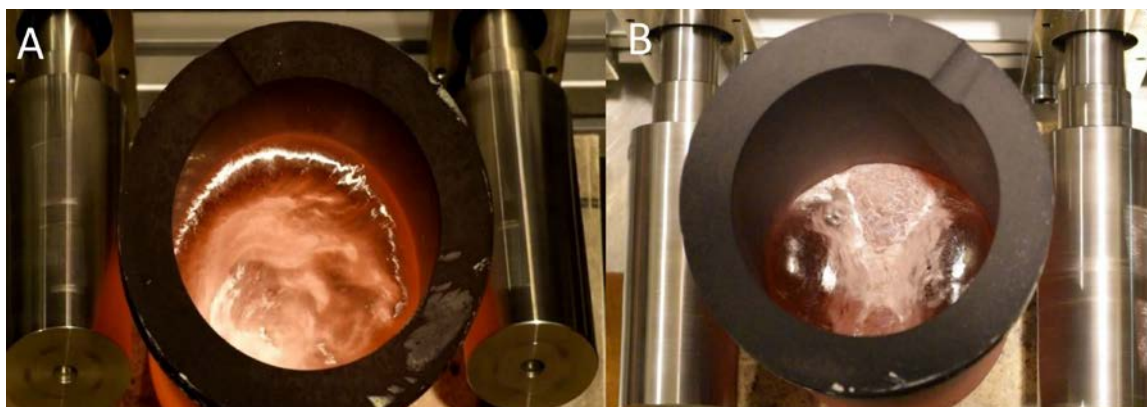
Atlikušās līknes ataino rezultātus, magnētiem rotējot savstarpēji pretējā virzienā. Šis režīms radīja nestabila plūsmas ar nelieliem, mainīgiem ātrumiem. Pie 10 magnēta rotācijām vienā sekundē iegūtie plūsmas ātrumi svārstījās no 50 līdz 100 mm/s.

Tika izmēģināta maisīšana ar rotējošajiem pastāvīgajiem magnētiem arī alumīnijā. Lai gan kvantitatīvus ātruma mērījumus nebija iespējamas veikt, bija iespējams novērot plūsmu vizuāli, kā arī novērtēt plūsmas ātrumu, izmantojot bezdimensionālos līdzības koeficientus. Tā kā alumīnijam ir augstāka elektrovadītspēja, ar konkrēto magnētisko sistēmu bija iespējams iegūt lielākus plūsmas ātrumus. Novērtējums paredz 50 - 70 cm/s lielus ātrumus. Vizuāli arī novērojamas salīdzinoši lielākas virsmas deformācijas (skat. 4.55. attēlu).

Nemot vērā trauka izmērus, ($d = 90$ mm), tik lieli ātrumi un virsmas deformācijas

uzskatāmas par pārlietu lielām, tomēr ir labs piemērs šeit rotējošu magnētu sistēmai spējai ierosināt plūsmu.

Tātad redzams, ka divu cilindru maisītājs var radīt rezervuārā starp to ievērojama ātruma plūsmas, turklāt viena sistēma ļauj radīt dažādas plūsmas. Kā minēts, industrijā tiek izmantoti arī samērā neliela izmēra cilindriski šķidrā metāla rezervuāri, tomēr plūsmas samaisīšana tajos nav pats aktuālākais uzdevums, lielā mērā tāpēc, ka tie jau ir starptilpumi, kur metāls atrodas īslaicīgi. Tāpēc tika nolemts izstrādās sistēmas industriālā pielietojuma izvērtēšanai noskaidrot kādas vēl funkcijas bez vienkāršas metāla samaisīšanas konkrētā sistēma un tās radītās plūsmas var realizēt.



4.55. att. Alumīnija maisīšana ar divu cilindru sistēmu A) Magnētu slīpums $\theta = 45^\circ$, B) magnētu slīpums $\theta = 90^\circ$

Pirmā šādas papildus funkcija, ko iespējams apskatītā sistēma iespējams varētu izpildīt ir daļiņu vai papildus cieta metāla elementu iemaisīšana kausējumā. Lai to pārbaudītu vienkāršā veidā, tika izmantota tā pati eksperimentālā sistēma, kas redzama 4.51. attēlā, šķidrā metāla plūsmas radīšanai. Kā metāliski piemaisījumi tika izmantoti šinī gadījumā sasaldēti InGaSn eitektiskā sakausējuma gabaliņi, kas tuvināti atbilstu metāliskiem lūžņiem alumīnija pārkausēšanas industrijā. Uzberot dažādas frakcijas “lūžņus” uz metāla virsmas, iespējams salīdzināt laiku, kurā tie ‘pazūd’ no šķidrā metāla virsmas, vai nu izkūstot vai tiem nokļūstot zem oksīda slāņa. 4.56. attēlā. redzams, ka jau pēc 1 sekundes praktiski visas ievadītās daļiņas ir jau nokļuvušas zem oksīda slāņa, ja tiek radīta plūsma atbilstoši 4.53. attēlam. c).



4.56. att. Šķidra InGaSn rezervuārā virsmas attēls pēc 1s ilga laika pēc vienāda daudzuma sacietējoša sakausējuma, kur daļiņu lielums ir 1 – 10 mm ievadīšanas uz metāla virsmas: a) ar metāla maisīšanu ar 45° leņķī attiecībā pret cilindriskā rezervuāra asi diviem pastāvīgo magnētu cilindriem; b) bez maisīšanas

Savukārt, ja iemaisāmo daļiņu izmēru samazina līdz 0.1 – 1 mm lielumam, vairs nav novērojama tik laba un ātra iemaisīšanās (skat. 4.57. attēlu). Pat pēc 10 s ilga laika arī pie intensīvas plūsmas kustības joprojām uz virsmas redzamas daļiņas. Jāpiebilst, ka joprojām tās “izkusa” ātrāk, nekā gadījumā bez plūsmas un kustības.

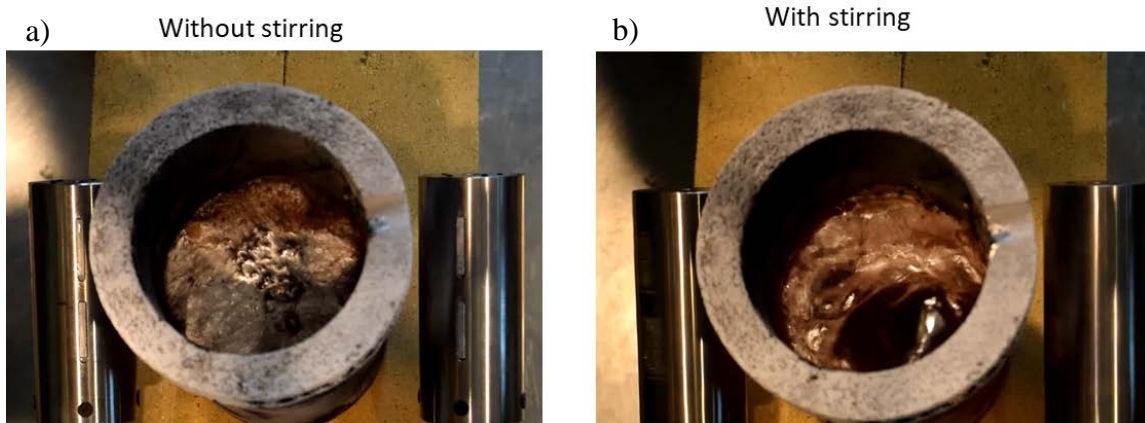


4.57. att. Šķidra InGaSn rezervuārā virsmas attēls pēc 10 s ilga laika pēc vienāda daudzuma sacietējoša sakausējuma, kur daļiņu lielums ir 0.1 - 1 mm ievadīšanas uz metāla virsmas a) ar metāla maisīšanu ar 45° leņķī attiecībā pret cilindriskā rezervuāra asi diviem pastāvīgo magnētu cilindriem; b) bez maisīšanas

Tuvināti var izdarīt hipotēzi, ka, ja daļiņu izmērs ir salīdzināms vai ievērojami mazāks par metāla virsmas deformācijām, iemaisīšana ir ievērojami neefektīvāka.

Lai arī tieši smalkas frakciju piemaisījumu un lūžņu – skaidas, silīcija pulveris utml. – iemaisīšana šķidrā alumīnijā ir fundamentāla industrijas problēma, kurai joprojām nav pārāk efektīva risinājuma, pamatā tomēr tiek pārkausēti samērā liela izmēra lūžņi, līdz ar to uzskatāms, ka arī šīs sistēmas piedāvātais uzlabojums varētu būt potenciāli interesants industrijai. Attiecīgi nākamais solis sistēmas izpētē un attīstībā bija pārbaudīt daļiņu

iemaisīšanās efektivitāti alumīnijā, kas arī tika veikts izmantojot šo pašu eksperimentālo iekārtu, šķidrā alumīnijā ievadot cietus alumīnija gabaliņus, jeb lūžņus.

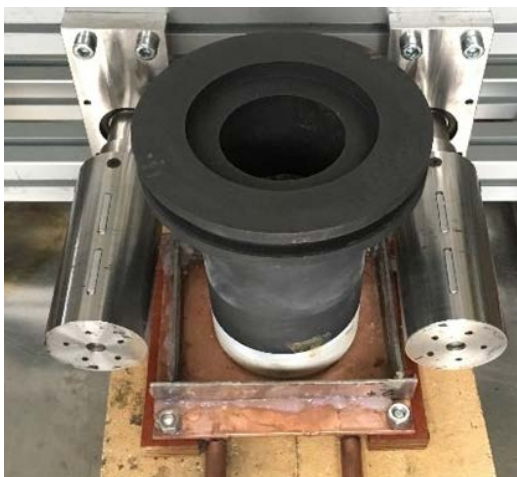


4.57. att. Šķidra alumīnija rezervuārā virsmas attēls pēc 10 s ilga laika pēc vienāda daudzuma sacietējoša sakausējuma, kur daļiņu lielums ir 0.1 - 1 mm ievadīšanas uz metāla virsmas: a) ar metāla maisīšanu ar 45° leņķī attiecībā pret cilindriskā rezervuāra asi diviem pastāvīgo magnētu cilindriem b) bez maisīšanas

Sistēmā ar alumīniju arī novērojama ievērojama iemaisīšanās laika samazināšanās (skat. 4.57. attēlu), ja tiek rezervuārs maisīts, kas arī bija sagaidāms. Šeit jāpiebilst, ka joprojām novērojama stipra atkarība no iemaisāmo daļiņu izdalīšanās, un, otrkārt novērojama mazas frakcijas strauja oksidācija un degšana, kā novēšana arī ir galvenā motivācija maksimāli straujas daļiņu iemaisīšanas šķidrā metālā.

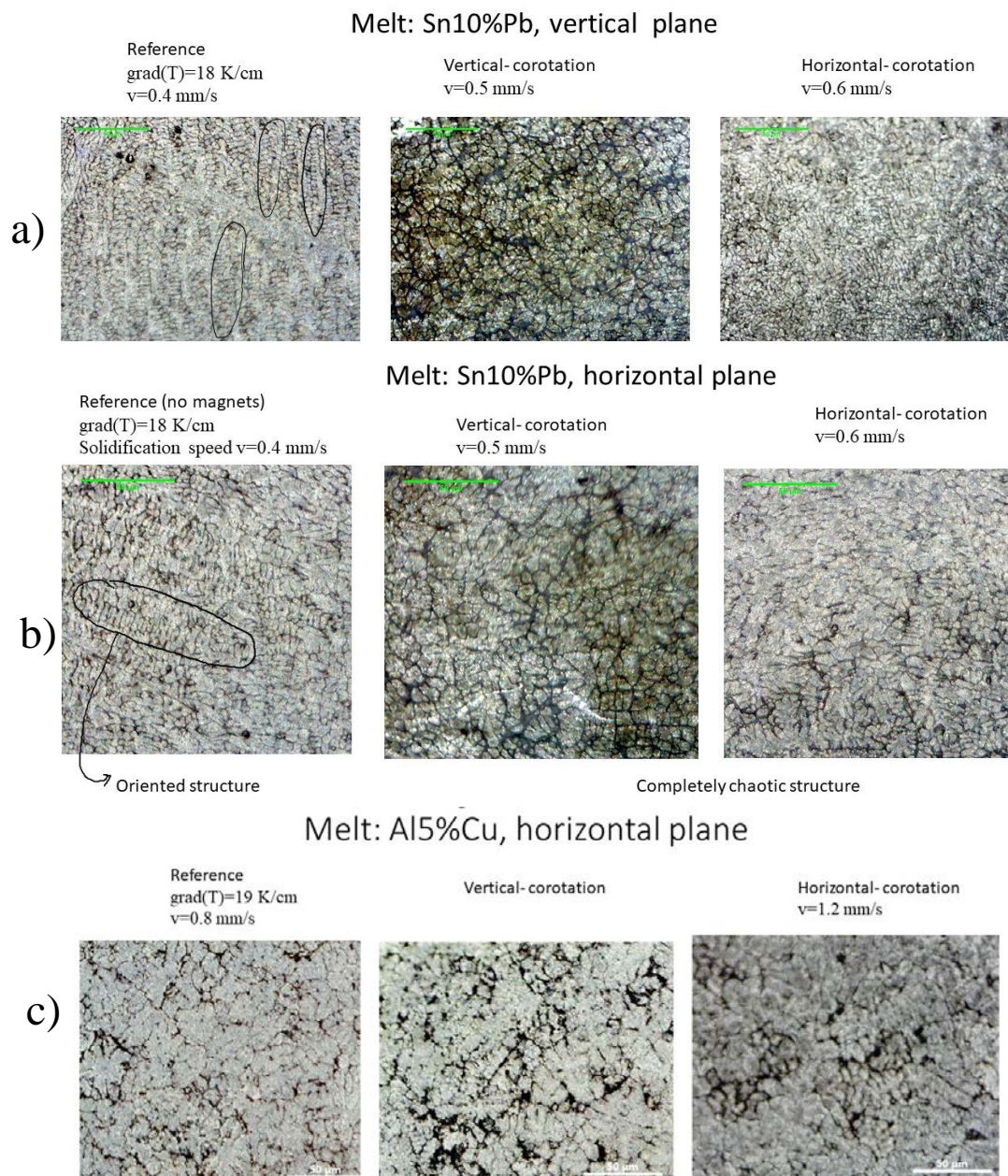
Samērā jauns metalurģijas un tās pētniecības virziens ir maza izmēra nemetālisku piemaisījumu iemaisīšana šķidrā metālā un vienlaicīga tā kristalizācija, sagaidot, ka šādi tiks uzlabota tā struktūra, īpaši uzsvāru liekot uz nodaļiņu iemaisīšanu, kur elektromagnētisku laiku izmantošana varētu būt viena no potenciāli veiksmīgākajām metodēm [66, 67]. Tā kā joprojām aktuāli ir meklēt dažādas EM iedarbības uz metāla struktūru, ir vērts apskatīt arī šīs divu cilindru sistēmas ietekmi uz kristalizācijas struktūru, kas būtu īpaši veiksmīgs risinājums kombinācijā ar minēto daļiņas iemaisīšanas pielietojumu.

Lai šo pārbaudītu, esošā eksperimentālā iekārta šķidra alumīnija maisīšanai tika modificēta, pievienojot tīģelim ūdens dzesējumu vara pamatni, lai iegūtu sakausējumā ievērojamu temperatūras gradientu, kas nodrošinātu orientētu kristalizācijas procesu (skat. 4.58. attēlu).



4.58.att. Eksperimentālā iekārta kristalizācijas struktūras ietekmes izmaiņas izpētei ar divu cilindru maisītāju. Tīģeļa diametrs $d = 60$ mm, augstums $h = 120$ mm. Magnētu diametrs: 5 cm

Attēlā 4.59. ir redzams salīdzinājums strauji kristalizētam Sn10%Pb paraugam bez maisīšanas un ar maisīšanu. Redzams, ka šeit maisīšana ir padarījusi struktūru nedaudz vairāk izotropu jeb paraugos, kur kristalizācija notika ar EM iedarbību, novērojams mazāk daudzumu orientētu struktūru. Turklāt šis efekts nav novērojams visos sakausējumos – gadījumā ar Al5%Cu (skat. 4.59.attēlā c)) sakausējumu izmaiņas kristalizācijas struktūrā nav novērotas. Savukārt paša grauda izmēra izmaiņas arī nav novērotas.



4.59. att. Sakausējumu kristalizācijas struktūra, ar bez maisīšanas ar diviem cilindriskiem magnētiem kristalizācijas laikā: a) Sn10%Pb sakausējumam vertikālajā plaknē; b) Sn10%Pb sakausējumam horizontālā plaknē; c) Al5%Cu sakausējumam horizontālā plaknē

Kopumā tika uzskatīts, ka sistēma ir eksperimentāli pārbaudīta un parādīja perspektīvus rezultātus arī pielietojumam industrijā. Kā nākamais attīstības solis plānos turpināt sistēmas eksperimentāla pārbaude ar alumīniju, turpinot pētīt gan dažādu piemaisījumu iemaisīšanu kausējumā, gan kristalizācijas uzlabošanu ar konkrēto EM iedarbību t.sk. to kombinējot ar citiem. Šādu eksperimentu realizācijai izveidota eksperimentālā iekārta ar magnētiem, kuru diametrs $d = 50$ cm, augstums $H = 10$ cm (skat. 4.60. attēlu), lai veiktu kopīgus eksperimentus ar Francijas metalurģijas uzņēmumu “Constellium”.



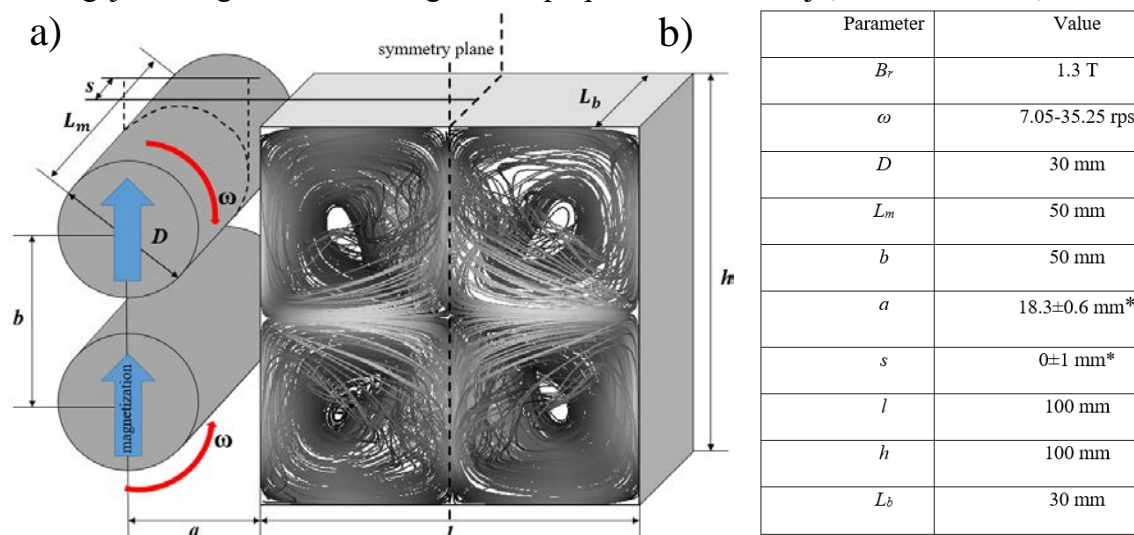
4.60. att. Eksperimentālā divu cilindru iekārta eksperimentiem ar alumīniju Constellium rūpnīcā Francijā

Pēc šiem testiem, plānots turpināt sistēmas mērogošanu un to pārbaudīt uz reālas industriālas krāsns, kur tiktu nomērīti industrijai tādi tieši svarīgi parametri kā piemaisījumu izšķīšanas laika atkarība no magnētu sistēmas parametriem, kausēšanas laiks, temperatūras izlīdzināšanās utt.

Jāatzīmē, ka šajā nodaļā apskatītā sistēma attīstāma tālāk arī palielinot magnētisko rotoru skaitu ap rezervuāru novietojot nevis divus magnētus, bet trīs, četrus un, teorētiski, n magnētus. Izmantojot fāzes nobīdi, analogiski Halbaha izkārtojumam, iespējams panākt, ka visi šie magnēti darbojas vienotā sistēmā. Tomēr darba ietvaros detalizēta šāda izpēte netika veikta t.sk. tāpēc, ka daudz rotoru sistēmas kļūst praktiski grūti realizējamas industriāliem pielietojumiem, kur praktiski vienmēr ir stipri ierobežota pieejamība darba vielai no rezervuāra visām pusēm.

4.4.3. Divpusēja četru dipolu radītās plūsmas un iemaisījumu kustības izpēte

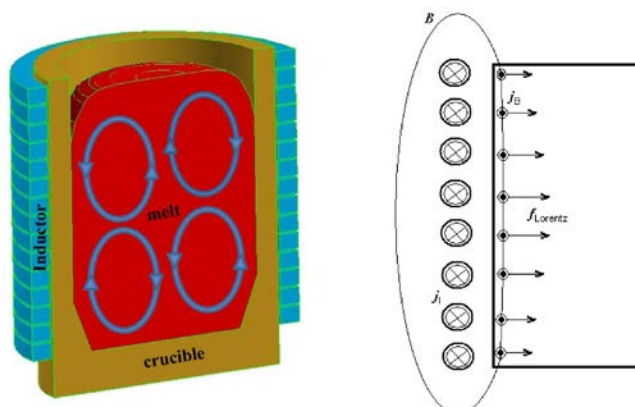
No magnētisko dipolu sistēmu sarežģītības viedokļa nākamais solis ir turpināt palielināt magnētisko dipolu skaitu. Kā nākamā apskatāmā sistēma šeit ir divpusēja magnētisko dipolu sistēma, kas izveidota no četriem dipoliem, ko praktiski realizē joprojām ar cilindriskiem pastāvīgajiem magnētiem, kas magnetizēti perpendikulāri to asij (skat.4.61. attēlu).



4.61. att. Divpusēja četru magnētisko dipolu sistēma ar taisnstūrveida rezervuāru: a) Magnētiskās sistēmas shematiskais attēlojums un tās radītā šķidra metāla plūsma; b) izgatavotās eksperimentālās iekārtas galvenie parametri

Šādai sistēmai šobrīd nav identificēta tieša atbilstība kādam konkrētam industriālam pielietojumam, tomēr sistēma pati par sevi ir interesanta t.sk. dēļ tās dažādajām radītajām hidrodinamiskajām plūsmām, kuras tad savukārt atbilst ļoti būtiskam industriālam pielietojumam.

Viens šāds pielietojums ir indukcijas krāsnis un šinī gadījumā īpaši tiks apskatīta nemetālisko piemaisījumu kustību šķidrā metālā indukcijas kausēšanas laikā. Indukcijas krāsnī sastopamās plūsmas un elektromagnētisko spēku shematiskais attēlojums redzams 4.62. attēlā.



4.62. att. Indukcijas krāsnī sastopamo plūsmu un elektromagnētisko spēku shematiskais attēlojums

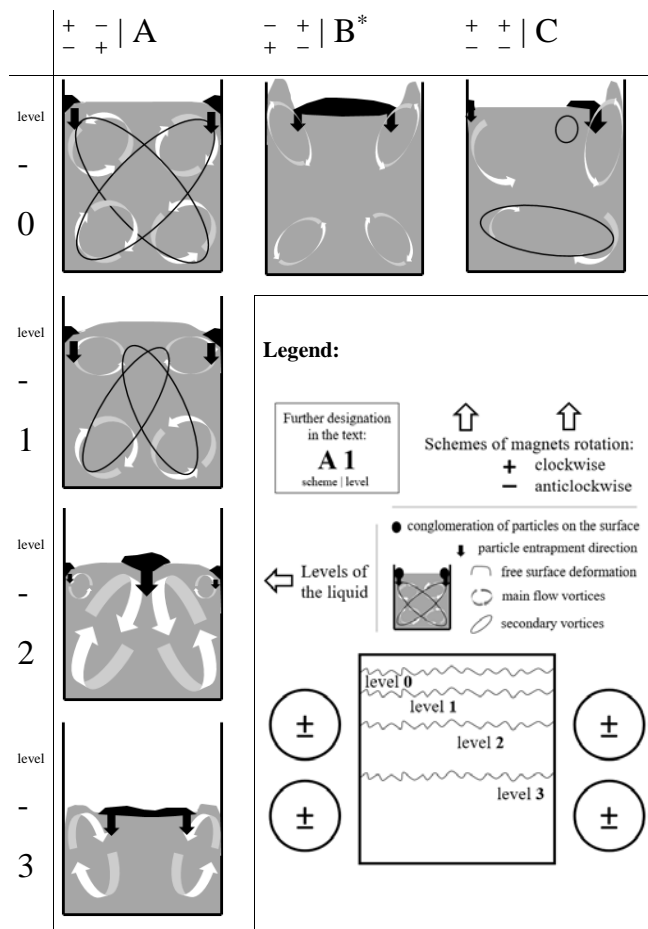
Ir limitēts metožu daudzums kā 'ieskatīties' šķidrā metālā un tieši novērot daļiņu

kustību, tāpēc plaši tiek izmantoti dažādi skaitliskie modeļi. Savukārt arī priekš tiem trūkst references eksperimentālo datu attiecībā pret ko būtu iespējams šos modeļus verificēt. Īpaši problemātiski ir tieši novērot daļiņu kustību šķidrā metālā. Ir mēģinājumi, piemēram, modeļplūsmā iegūt mazu tilpumu daļiņu un skaitīt tajā esošās daļiņas ar mikroskopu ārpus tilpuma, tomēr šādas metodes dod tikai aptuvenu priekšstatu par to izkārtojumu tilpumā, nedod laikā mainīgo ainu, kā arī ir pārāk neprecīzas [70,71].

Lai būtu iespējams iemaisītās daļiņas plūsmā novērot tieši, tika piedāvāts izmantot neitronogrāfijas metodes. Tās paredzētu laist neitronu staru uz šķidrā metāla rezervuāru, kurā ierosināta atbilstošā plūsma un iemaisītas nemagnētiskas nevadošas daļiņas, kuras ievērojami labāk absorbē neitronus, nekā elektrovadošais šķidrums, kurā daļiņas ir iemaisītas. Diemžēl arī ūdens salīdzinoši ļoti labi absorbē neitronu staru, attiecīgi nav iespējams tieši izmantot induktīvās kausēšanas sistēmu, jo tām ir tipiski nepieciešami ūdens dzesējami strāvas vijumi (skat. arī 4.62.attēlu), kas aizsegtu apskatāmo šķidrā metāla tilpumu. Turklāt induktīvi kausējot tipiskās plūsmas tiek iegūtas pie salīdzinoši lielām jaudām, kas nozīmētu, ka darba metāls modeļeksperimentos būtu ar augstu temperatūru vai būtu nepieciešams nodrošināt ļoti intensīvu dzesēšanu, ko praktiski būtu ļoti grūti realizēt.

Minēto iemeslu dēļ tika meklētas alternatīvas iespējas modelēt induktīvās kausēšanas krāsnis, lai būtu iespējams tieši novērot nemetālisko piemaisījumu kustību, izmantojot neitronogrāfijas metodes. Salīdzinot 4.61. un 4.62. attēlus redzams, ka kopējā plūsmas struktūra ir vismaz līdzīga, attiecīgi konkrēto sistēmu ar četriem magnētiskiem dipoliem iespējams izmantot indukcijas kausēšanas modeļeksperimentu realizācijai t.sk. ar industriālo pielietojumu saistīto skaitlisko modeļu eksperimentālai verifikācijai, jo šāda magnētiskā sistēma atstāj neitrona staram brīvu pieeju šķidrā metāla rezervuāram [68, 69].

Turklāt konkrētā magnētiskā sistēma ļauj radīt ne tikai indukcijas krāsnīm apbilstošo plūsmas struktūru, bet arī citas, ko interesanti apskatīt skaitlisko modeļu verifikācijai un hidrodinamisko plūsmu izpētes viedokļa (skat.4.63.attēlu).



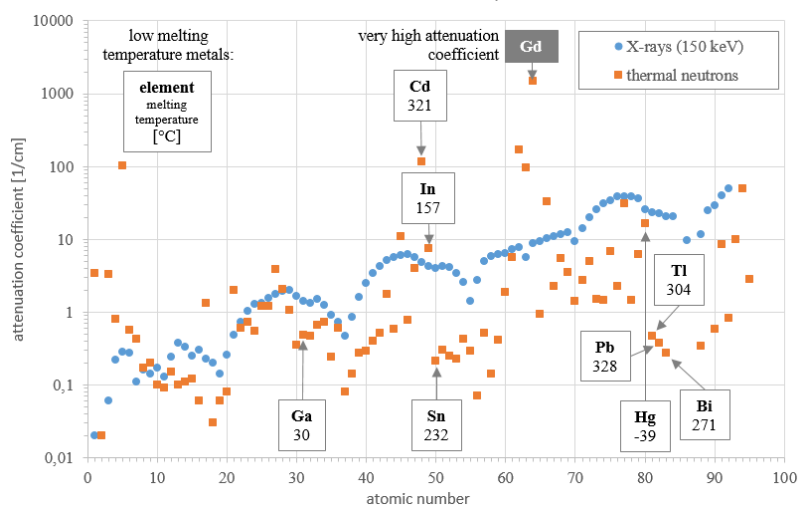
4.63. att. Četru magnētisko dipolu dažādo radīto plūsmu shematisks attēlojums atkarībā no magnētu rotācijas virzieniem un šķidra metāla līmeņa. Indukcijas krāsnī sastopamo plūsmu un elektromagnētisko spēku shematisks attēlojums

Atbilstoši 4.62. attēlam, tika izveidota eksperimentālā iekārta – skat. 4.64. attēlu – kas ļauj iegūt visus 4.63. attēlā redzamos potenciāli apskatāmos magnētu rotācijas virzienus un konfigurācijas.



4.64. att. Izgatavotā četru magnētisku dipolu eksperimentālā iekārta

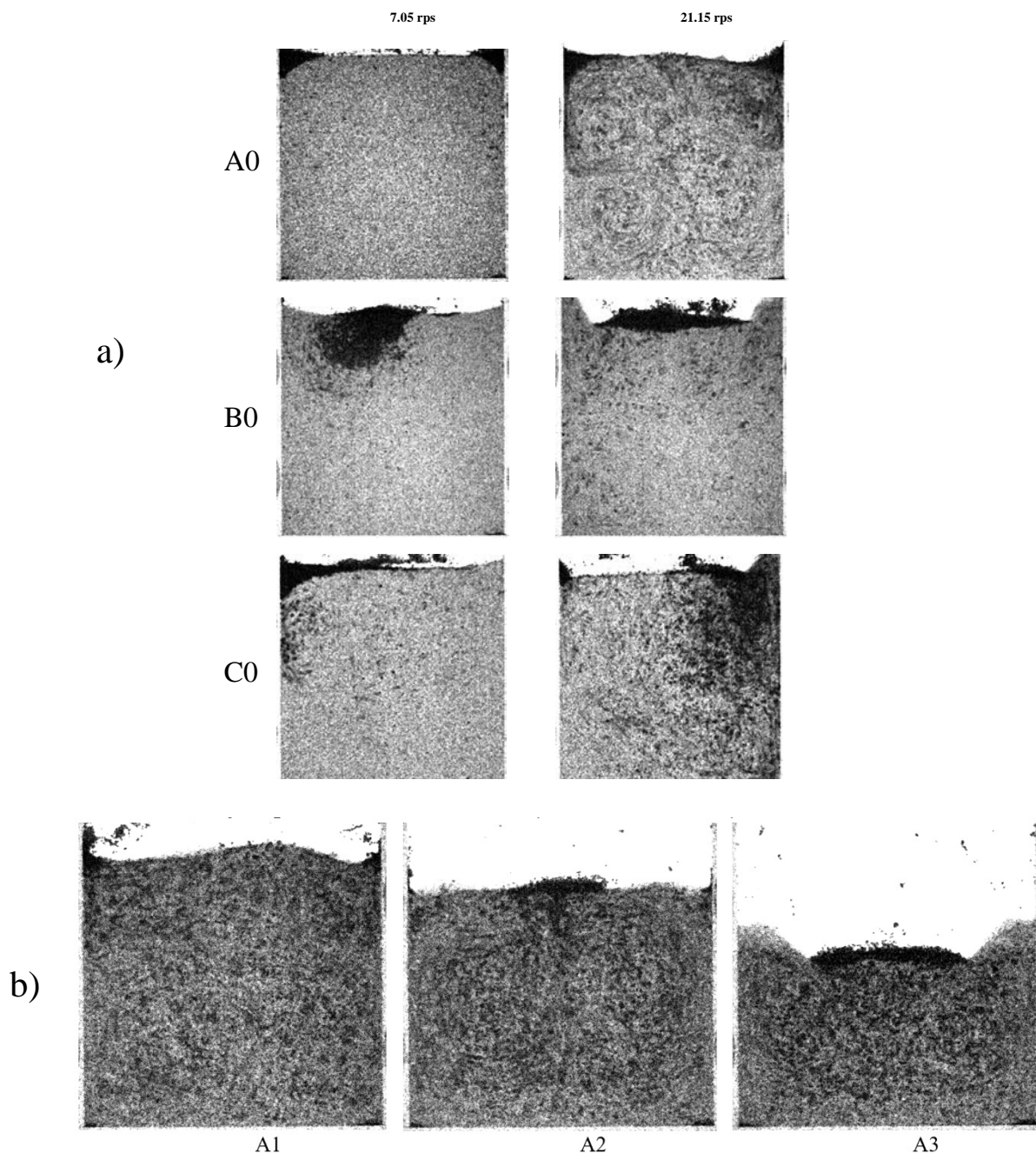
No eksperimentālās iekārtas realizācijas viedokļa nepieciešams izvēlēties arī piemērotu darba vielu, šķidro metālu, un iemaisāmās daļiņas. Neutroni tiek absorbēti atomu kodolos, attiecīgi to absorbcija ir atkarīga no atoma kārtas skaitļa – skat.4.65. attēlu.



4.65. att. Neutronu absorbcijas koeficienti dažādiem atomiem

Turklāt nepieciešams izvēlēties tādu darba vielu, ko būtu iespējams droši un ērti izmantot eksperimentālās iekārtas instalācijā pie neutronu avota un detektora. Šo un 4.64. attēlu ņemot vērā tika izvēlēts strādāt ar galliju un izmantot Gadolīnija daļiņas. Šim materiālu pārim absorbcijas koeficienti atšķiras vairāk kā 1000 reizes, līdz ar to iespējams iegūt augstu kontrastu. Turklāt arī blīvumi ir salīdzināmi (Ga - 6 g/cm³, Gd - 7.9 g/cm³), kas ļauj daļiņām neuzpeldēt vai nenogrimt tilpumā. Jāatzīmē, ka Gd pamatā pieejams pulvera formā, līdz ar to daļiņas tika veidotas sākotnēji ar Gd pulveri aplīmējot svina daļiņas. Vēlākos eksperimentos tika sagādātas tīra Gd daļiņas.

Eksperiments tika realizēts iemaisot šķidrā metāla rezervuārā (3 cm x 20 cm x 20 cm) Gd daļiņas un to novietojot starp neitronu staru un neitrona stara detektoru. Rotējot pastāvīgo magnētu cilindrus tiek iegūtas dažādas plūsmas atbilstoši 4.63.attēlam. Gd daļiņas absorbē vairāk neitronu staru, attiecīgi to atrašanās vietās tiek detektēta daļiņu “ēna”. Šādi iegūtu attēlus pie dažādām magnētu rotācijas konfigurācijām var redzēt 4.66.a) attēlā.

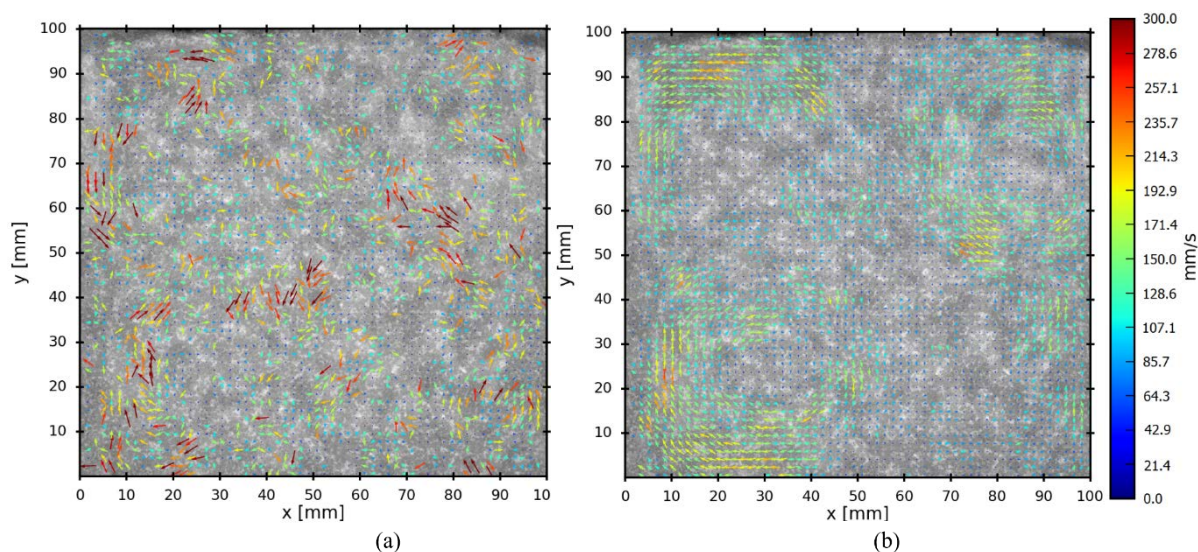


4.66. att. a) Šķidrā metālā iemaisītu daļiņu izkārtojuma attēlojums, izmantojot neitronu radiogrāfijas metodi dažādās MHD plūsmās, kas radītas, izmantojot magnētiskus dipolus. Magnētu rotācijas frekvences atbilstoši 7.05 Hz un 21.14.; b) Šķidrā metālā iemaisītu daļiņu izkārtojuma attēlojums, izmantojot neitronu radiogrāfijas metodi pie dažādiem šķidrā metāla līmeņiem. Magnētu rotācijas frekvence: 21.14 Hz

Kā redzams, šādi iegūtajos attēlos tiešām iespējams izšķirt daļiņas, tomēr saprast daļiņu

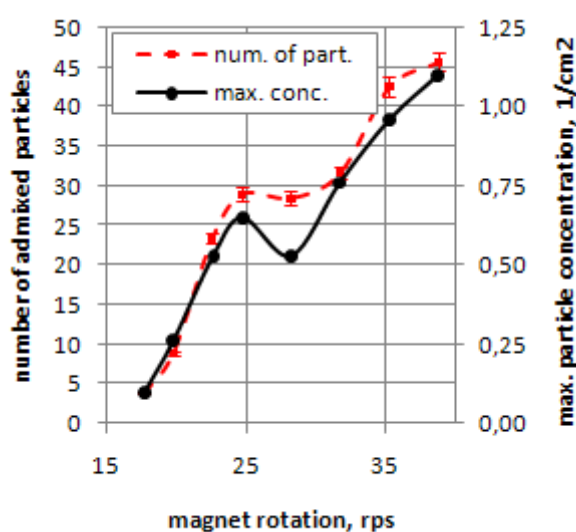
veidotās plūsmu struktūru nav triviāli. Tāpēc arī nepieciešams vizuāli novērot pēc iespējas vairāk dažādas plūsmas, lai pārliecinātos, ka tiek novērotas sagaidāmās likumsakarības. Viena no uzskatāmākajām plūsmas struktūras izmaiņām ir samazinot šķidrā metāla līmeni – skat. 4.66. b) attēlu.

Veicot pietiekami ātru šādu attēlu uzņemšanu, iespējams iegūt jau video attēlu, un, ja video uzņemšanas kadru skaits sekundē ir pietiekami augsts, lai atsevišķa daļiņa atbilstošajā laika sprīdī nepārvietotos pārāk daudz, iespējams pat izsekot atsevišķām daļiņām un pat iegūt daļiņu ātrumu lauka attēlus, izmantojot PIV metodi [71,72]. Ar šo metodi apstrādājot iegūtos video bija iespējams iegūt tikai daļējus daļiņu ātrumu laika attēlus – skat. 4.67. attēlu.

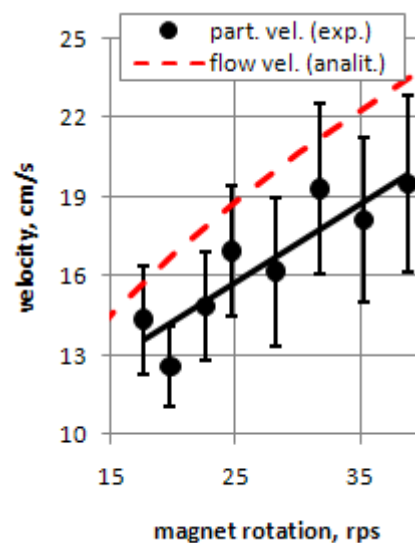


4.67. att. PIV datu apstrādes ceļā iegūto daļiņu ātruma lauka attēli pie magnētu rotācijas frekvences 28.2 Hz un A0 tipa plūsmas struktūras

Kā minēts šāda tipa eksperimenti tika veikti pirmo reizi, tomēr, apstrādājot datus, jau bija iespējams novērot zināmas sakarības. 4.68. a) attēlā redzama iemaisīto daļiņu skaita un to maksimālā laikā vidējota koncentrācijas atkarībā no magnētu rotācijas frekvences. 4.68.b) attēlā vidējais daļiņu ātrums (eksperimentāli nomērītais) un vidējais plūsmas ātrums (analītisks novērtējums) atkarībā no magnētu rotācijas frekvences.



(a)



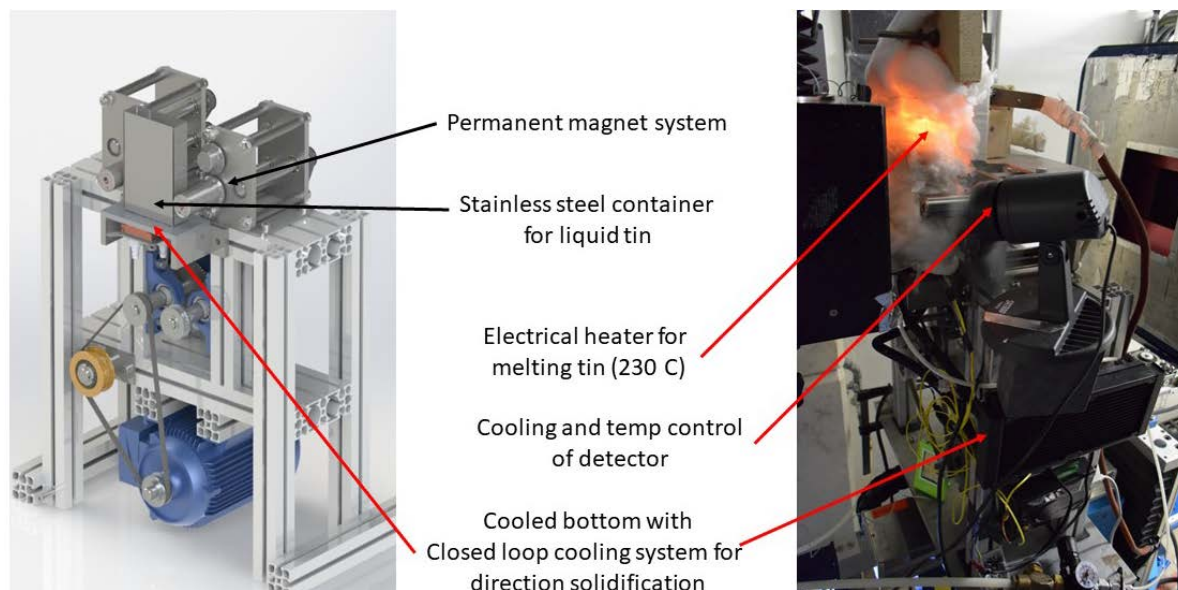
(b)

4.68. att. a) Iemaisīto daļiņu skaits un to maksimālā laikā vidējota koncentrācija atkarībā no magnētu rotācijas frekvences; b) Vidējais daļiņu ātrums (eksperimentāli nomērītais) un vidējais plūsmas ātrums (analītisks novērtējums) atkarībā no magnētu rotācijas frekvences

Kā minēts, tiešām novērojams, ka iemaisīto daļiņu ātrums atšķiras no šķidrā metāla ātruma. Tāpat novērots, ka ne vienmēr iemaisīto daļiņu skaits nozīmē lielāku maksimālo daļiņu koncentrāciju šķidrumā, jo dažādas plūsmas, piemēram lokālas, vai ar mazāku ātrumu, var novest pie daļiņu nevienmērīga sadalījuma pa tilpumu.

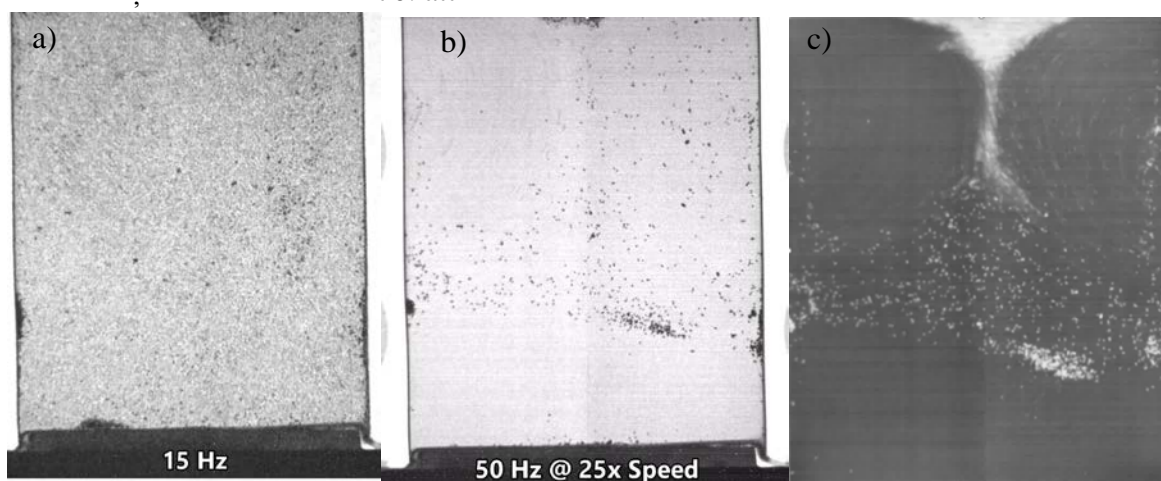
Kā minēts 4.4.2. nodaļā, metālu kristalizācijā aktuāla ir elektromagnētiskas iedarbības izmantošana. Magnētiski dipolu ir viena no iespējām to realizēt, vai vismaz būt daļa no šādas iedarbības. Šim virzienam arvien aktuālāka ir tieši arī nemagnētisku piemaisījumu izkliedēšana kristalizācijas laikā. Ir veikti vairāki pētījumi šai virzienā, bet pat bez elektromagnētiskas iedarbības nav daudz pētījumu, kur būtu tieši novērota piemaisījumu kustība kristalizācijas laikā – pētījumi veikti pamatā vai nu skaitliski vai analizējot jau sacietējošus paraugus, vai izmantojot rentgenstarus. Pēdējais ir ļoti piemērots, tomēr tie ļauj apskatīt tikai ļoti plānus paraugus – līdz 4 mm biezumam. Tik plānos paraugos nav iespējams sasniegt industriālos apstākļos raksturīgās makroskopiskās plūsmas, īpaši, ja tās ir elektromagnētiski ierosinātas, jo bieži tieši šajā virzienā nepieciešams noslēgties elektromagnētiskajām strāvām. Šo ņemot vērā, tika identificēts, ka šādus kristalizācijas procesus ar elektromagnētisko iedarbību būtu vērtīgi pētīt izmantojot šeit aprakstītās neitronogrāfijas metodes.

Lai to pārbaudītu, eksperimentālā iekārta tika papildināta ar šķidrā metāla rezervuāra dzesētāju un sildītāju, lai būtu iespējams sacietējošu metālu izkausēt, un pēc tam orientēti kristalizēt (skat. 4.69. attēlu).



4.69. att. Kristalizācijas eksperimentos izmantotā eksperimentālā iekārta

Tā kā šoreiz bija nepieciešams darba metālu izkausēt un pēc tam kristalizēt salīdzinoši mazā laikā, par darba metālu tika izvēlēta Alva. Ar šo metālu un ūdens dzesējamu rezervuāra pamatni, paraugus izdevās kristalizēt 5-10 minūšu laikā. Kā kontrasta daļiņas joprojām tika izmantotas Gd daļiņas ar izmēru 300 mikrometri. Kristalizācijas laikā iegūtie momentuzņēmumi redzami 4.70. attēlā.



4.70. att. Kristalizācijas ar iemaisītām daļiņām laikā iegūtie momentuzņēmumi: a) momentāni redzamā aina; b) summējot pa ~1 s ilgu laika posmu iegūtie kristalizācijas procesa momentuzņēmumi; c) apstrādāts attēls, uzlabojot kontrastu starp darba vielu un iemaisītajām daļiņām

Eksperimenti tika veikti pie dažādiem magnētu rotācijas ātrumiem, nenovērojot būtiskas atšķirības kristalizācijas ainā, tomēr kustība jau pie maziem magnētu rotācijas ātrumiem bija ļoti intensīva. Novērota arī daļiņu ie-kristalizācijas efektivitātes būtiskas izmaiņas atkarībā no kristalizācijas frontes pārvietošanās ātruma, kurš savukārt eksperimentu laikā būtiski mainījās.

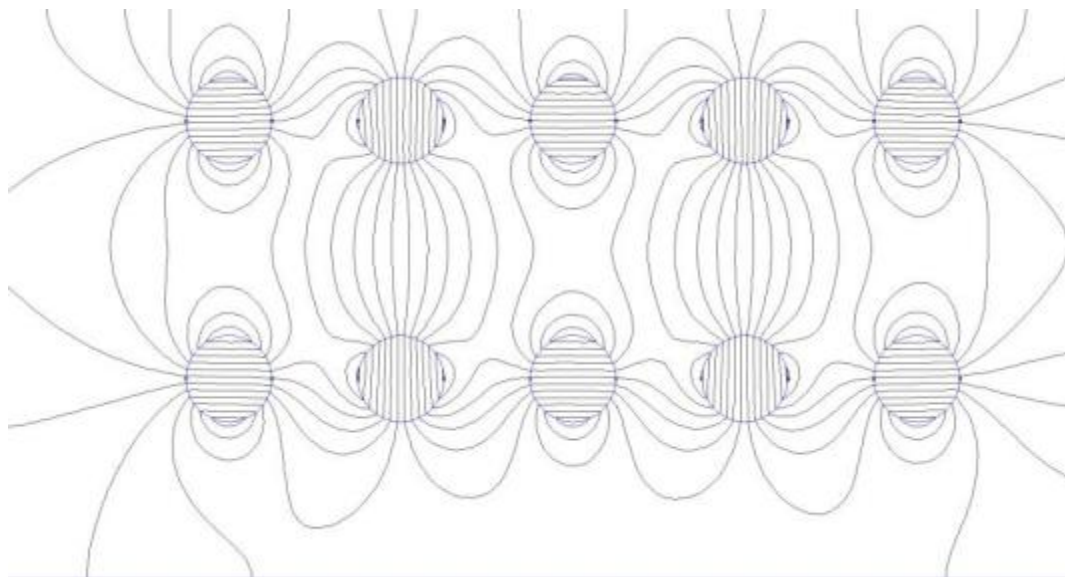
4.4.4. Magnētisko dipolu izmantošana šķidra metāla sūkņī

4.4.4.1. Divpusēja Divu dipolu sistēma šķidra metāla sūknēšanai

Kā minēts 2. nodaļā klasisks MHD sistēmu, t.sk. PM pielietojums vispirms ir šķidrā metāla sūkņu radīšana. Šī darba pamatā faktiski ir arī esošo sūkņu sistēmu attīstīšana maisīšanai caur biezu sienu, līdz esam nonākuši līdz magnētiskajiem dipoliem un to sistēmām, kura savukārt ir principiāli jauna veida sistēmas, kas iepriekš nekur nav apskatītas. Attiecīgi loģisks darba noslēgums ir izpētīt vai esošās sistēmas būtu pielietojamas arī šķidrā metāla sūknēšanas uzdevumam, kas attiecīgi tiks apskatīta šajā nodaļā.

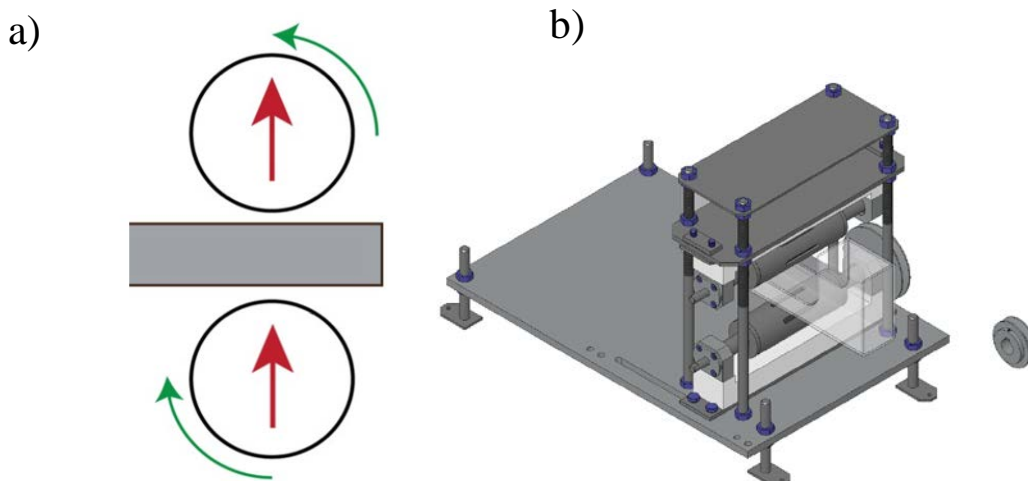
Pats vienkāršākais variants šķidrā metāla sūkņa izveidošanai būtu novietot magnētisko dipolu vienkārši pie kanāla. Tomēr, kā tālāk paskaidrots, šāda sistēma ir ļoti neefektīva, tāpēc par vienkāršāko sistēmu uzskatīsim tādu, kur divi rotorī novietoti simetriski pret šķidrā metāla virsmu – tād kanāls paliek starp magnētiem (skat. 4.72. attēlu). Gadījumā ar diviem rotorī līdzīgi kā gadījumā, kas apskatīts 4.4.1. nodaļā, piedziņa ir nepieciešama tikai vienam rotoram. Šādā konfigurācijā, kad otrs rotors brīvi griežas pirmā rotora magnētiskajā laukā.

Aprēķinot magnētisko lauku šādai divpusējai sistēmai, bet uzskatāmības nolūkos jau 10 dipolu gadījumā (skat. 4.71.attēlu), var redzēt, ka, ja kanāls ir novietots precīzi pa vidu starp magnētiem, tad, magnētiem griežoties, magnētiskā lauka līnijas paliek praktiski visu laiku ortogonālas kanālam, kas nozīmē, ka kanālā ir praktiski tikai B_z magnētiskā lauka komponente, kas savukārt nozīmē, ka tiek inducēts tikai šķidrajai virsmai tangenciāls spēks, kas atkal savukārt nozīmē, ka šķidrais metāls salīdzinoši efektīvi tiek sūknēts pa kanālu, nevis intensīvi maisīts.



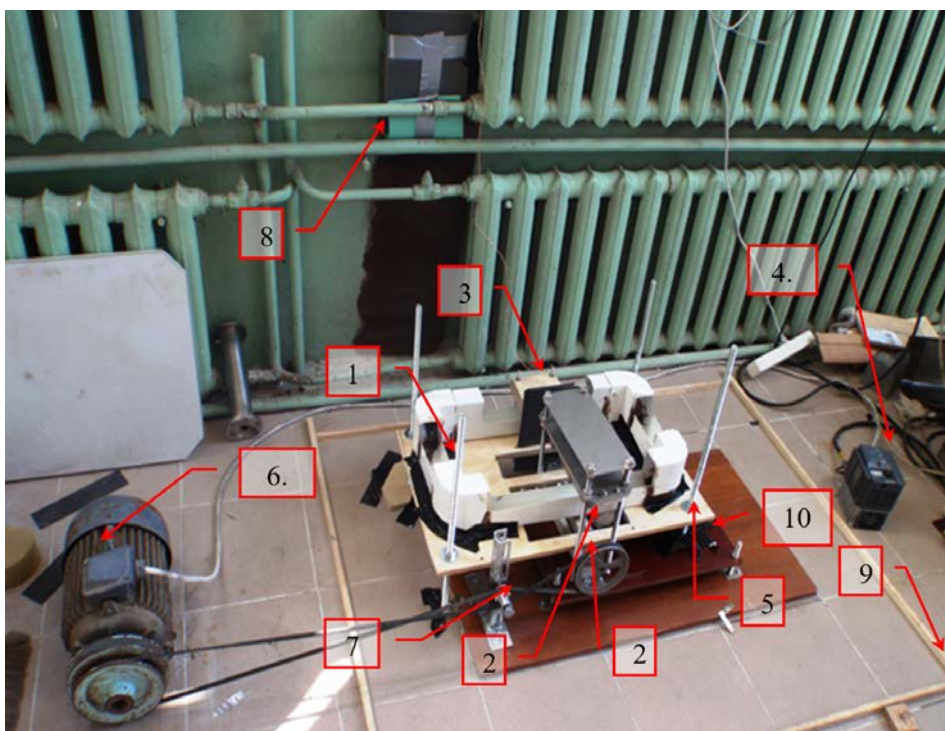
4.71. att. Divpusējs rotējošu cilindrisku magnētu, kuru magnetizācija ir vērsta perpendikulāri to asij sistēma: (augšpusē) izvietojuma shēma gadījumam ar iestādītu fāzes nobīdi. (apakšpusē) skaitliski aprēķināts spēka līniju sadalījums izmantojot programmu FEMM

Turpat 4.71.attēlā var redzēt, ka joprojām, dipoliem rotējot, tiek radīts skrejošs magnētiskais lauks. Ja dipolu pārus uztver kā secīgus kadrus, var ievērot, ka magnētiskā lauka līniju “sabiezējumi” it kā pārvietojas atbilstošajā virzienā.



4.72. att. Shematisks sistēmas attēlojums a); eksperimentālās iekārtas 3D modelis b) gadījumam, kad kanāls tiek novietots starp cilindriem un augšējais magnēts griežas otra magnēta magnētiskā lauka dēļ, nevis mehāniskās sakābes dēļ

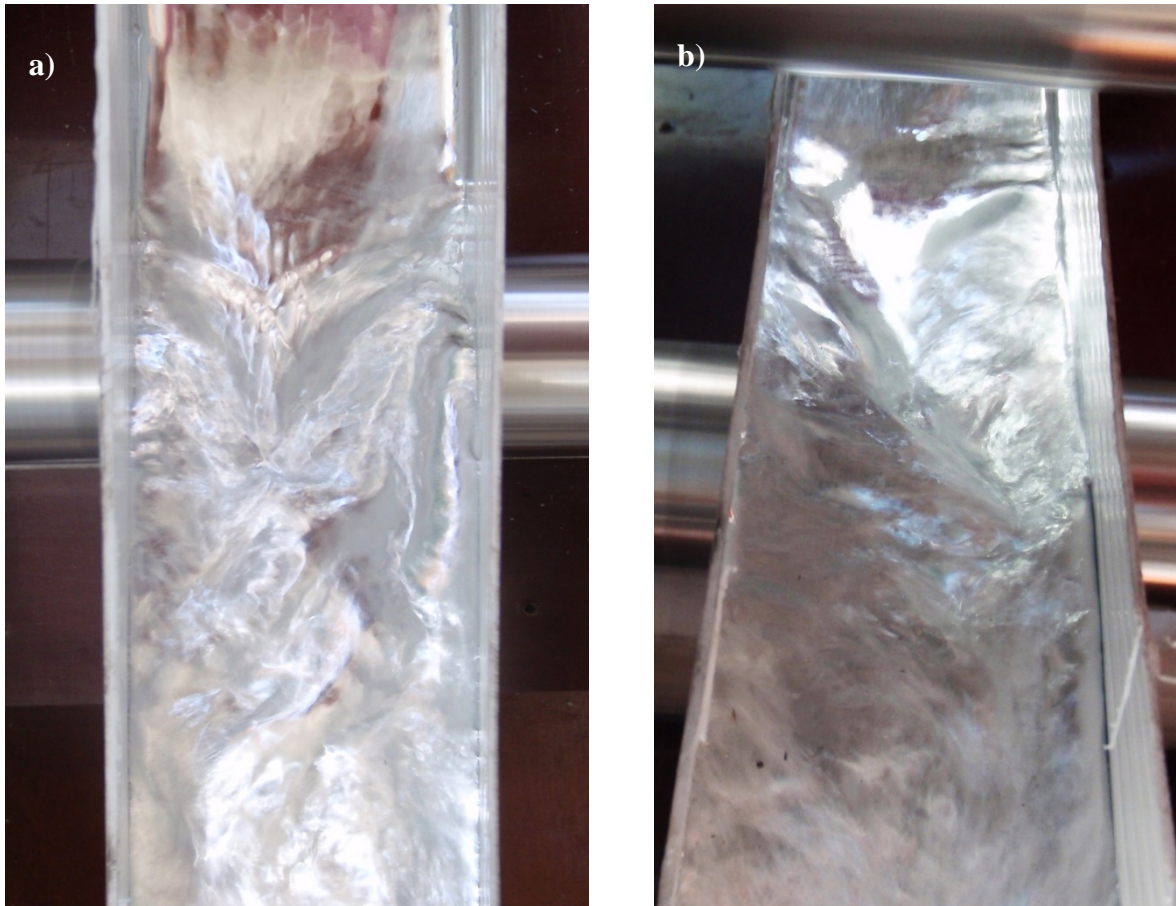
Atbilstoši 4.72. attēlā redzamajai shēmai, tika izveidota vienkārša eksperimentālā iekārta un sistēmas iespējas sūknēt šķidro metālu kanālā pārbaudītas eksperimentāli (skat.4.73. attēls).



4.73.att. Izveidotā eksperimentālā iekārtas ar valēju kanālu ar integrētām mērierīcēm, piedziņu, tās kontroli un kanālu, un tā statīvu: 1. Kanāls; 2. Stacionārais, apakšējais magnēts un noņemamais, augšējais magnēts; 3. Divi magnēti, kas simetriski piestiprināti pie kanāla. Magnētiskais lauks, ko rada šādi magnēti $\sim 0,4$ T; 4. Trīs fāzu frekvenču pārveidotājs; 5. kanāla un rezervuāra pamatne ar regulējamu augstumu; 6. Elektromotors (4 kW); 7. Sūkņa pievada sistēma ar improvizētu spriegotāju; 8. Mērkarte, kas mēra spriegumu uz kanāla sienām, kas rodas šķidrajam metālam plūstot caur 3.; 9. Līste, kas hermētiski pielīmēta pie grīdas, lai nodrošinātu to, ka šķidrā metāla

avārijas gadījumā neizplūst; 10. pamata plāksne pie kuras ir piestiprināta visa magnētiskā sistēma un daļēji arī kanāls vai rezervuārs

Vispirms jau kvalitatīvi bija iespējams novērot atšķirību sūkņēšanas efektivitātē vienam vai diviem cilindriem divpusēji. 4.74. attēlā var redzēt, ka viena cilindra gadījumā novērojama ievērojami lielāka virpuļainība, kas priekš sūkņēšanas uzskatāma par neefektivitāti.

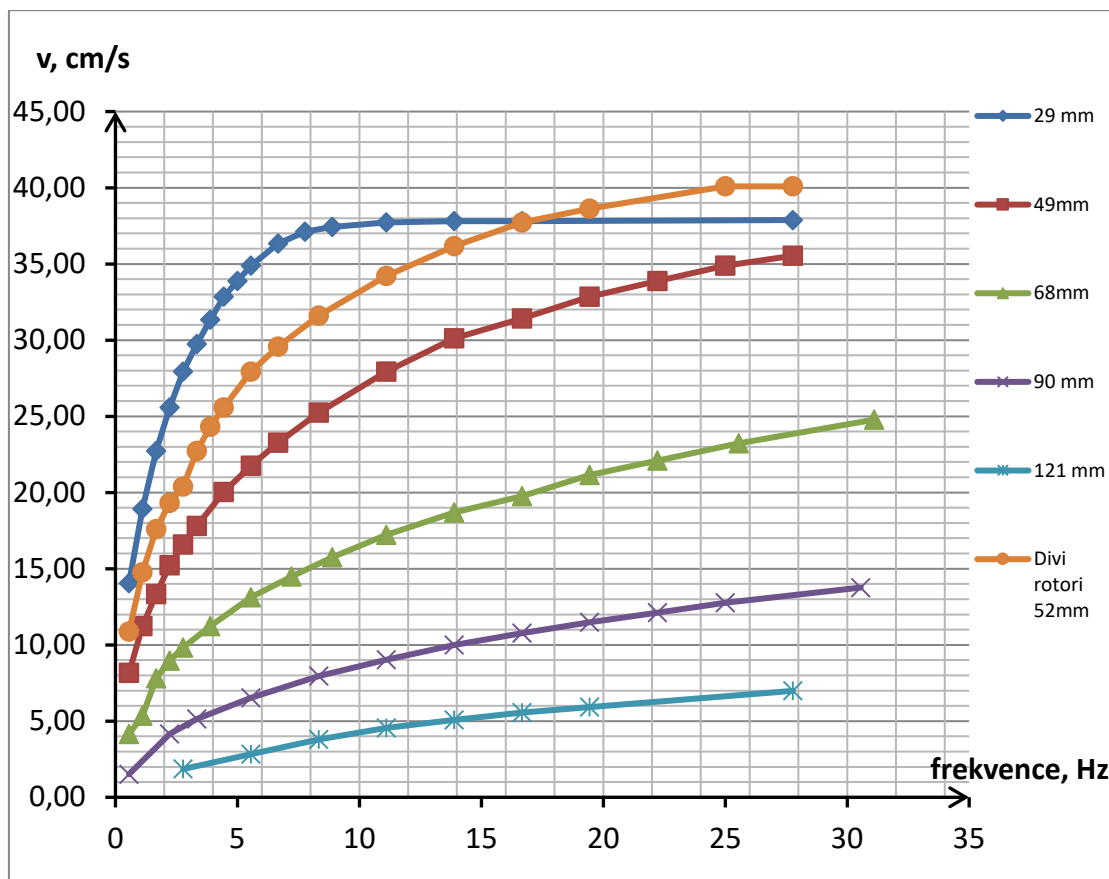


4.74. att. a) Inducētā kustība kanālā gadījumā ar vienu rotoru pie frekvences 25 ; b) Inducētā kustība kanālā gadījumā ar diviem rotoriem novietotiem virs un zem kanāla bez sakābes pie frekvences 25 Hz un attāluma no cilindra ass līdz metāla vidum 50 mm

Lai izmērītu šķidrums plūsmas ātrumu, tika izmantota M. Faradeja piedāvātā metode [48]. Šo metodi savos darbos ir aprakstījis A.J. Šerklifs [54], kas precizēja M. Faradeja piedāvāto metodi un izstrādāja kalibrācijas līknes ar dažādām sistēmām. Šeit izmantota vienkāršākā šīs metodes versija. Ja magnētiskajā lauka plūst vadītājs, tad atskaites sistēmā, kas saistīta ar pašu šķidrums plūsmu, mainās magnētiskais lauks. Savukārt, ja ir mainīgs magnētiskais lauks, tad, saskaņā ar Faradeja indukcijas likumu [11], tiek inducēts spriegums. Ja magnētiskais lauks ir homogēns un perpendikulārs plūsmai, un posma garums, kurā darbojas magnētiskais lauks ir L un kanāla platums ir W , tad

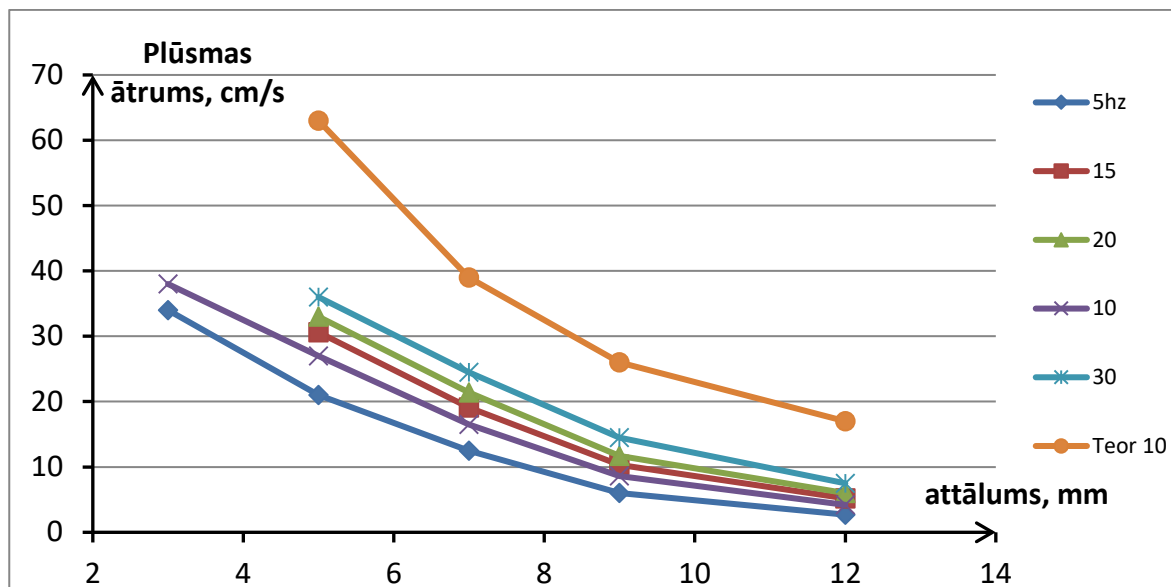
$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B \cdot S)}{dt} = -\frac{d(B \cdot LW)}{dt} = -BW \frac{dL}{dt} = -BWv \Rightarrow v = \frac{U}{WB} \quad (4.48.)$$

Eksperimentālajā iekārtā pie kanāla tika nostiprināti divi savstarpēji pretēji un simetriski pret kanālu magnēti. Pie kanāla malām tika pielīmēti divi elektrodi un mērīts ar mērkarti spriegums U un, zinot kanāla platumu W un magnētiskā lauks indukciju B , ar formulu (4.48.) tika aprēķināts plūsmas ātrums v . Pierakstot arī no frekvenču pārveidotāja rotācijas frekvenci un atliekot šos datus grafiski tiek iegūts 4.75. attēls.



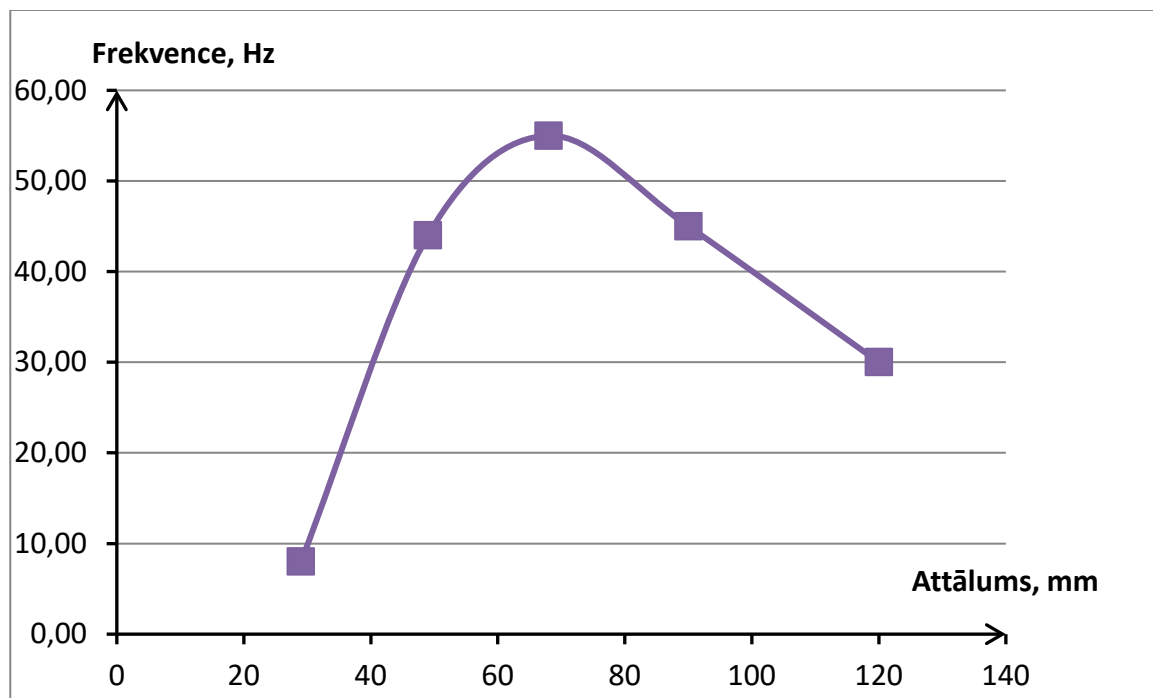
4.75. att. Plūsma ātruma kanālā atkarība no magnētu rotācijas frekvences un attālums starp kanālu un magnētu rotācijas ar ekstrapolācijas līknēm

Ja atlasa frekvences, kas ir mērītas pie visiem attālumiem, var grafiski attēlot plūsmas ātruma atkarību no attāluma pie dažādām frekvencēm (skat. 4.76. attēlu).



4.76. att. Plūsmas ātruma atkarība no attāluma no kanāla līdz magnētu asij pie 3 dažādām magnētu rotācijas frekvencēm. Oranžā krāsā līkne iegūta no teorētiskajiem aprēķiniem

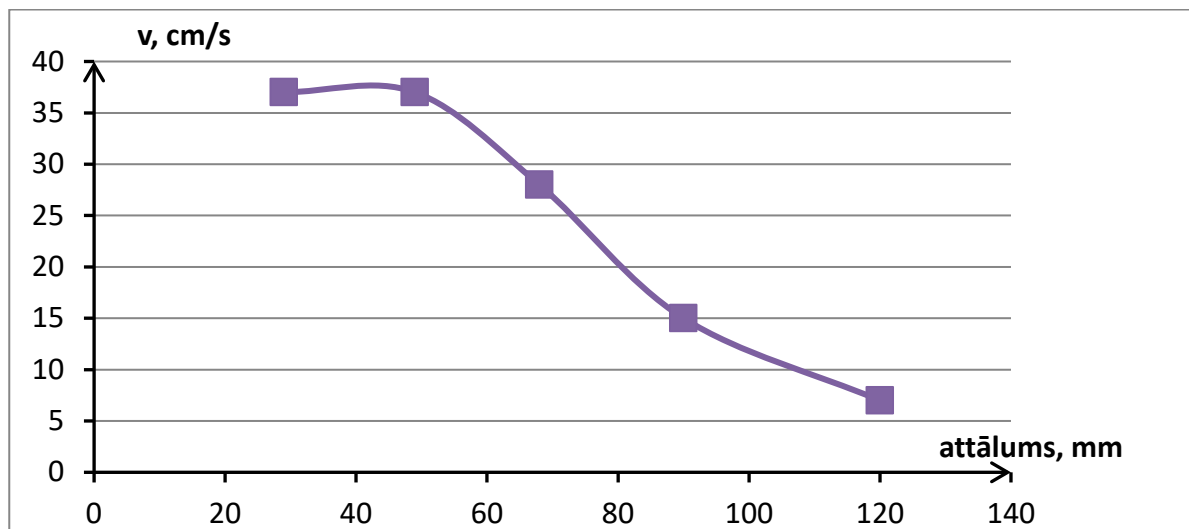
Arī šai sistēmai veicot mērījumus tika ievērots, ka palielinot rotācijas frekvenci, pēc noteiktas robežas, vairs inducētās šķidruma plūsmas ātrums nemainās. Tātad tiek sasniegta piesātinājuma frekvence. Bija novērojams gan kvalitatīvi gan kvantitatīvi, ka, jo spēcīgākam magnētiskajam laukam šķidrā metāls tiek pakļauts (tuvāk magnētiem vai arī lietoti vairāki magnēti), jo ātrāk iestājas piesātinājuma frekvence (skat 4.77.attēlu).



4.77. att. Piesātinājuma frekvences atkarība no attāluma starp kanālu un magnētiem

Tika arī izmērīti maksimālie ātrumi, kurus bija iespējams sasniegt pie noteiktiem

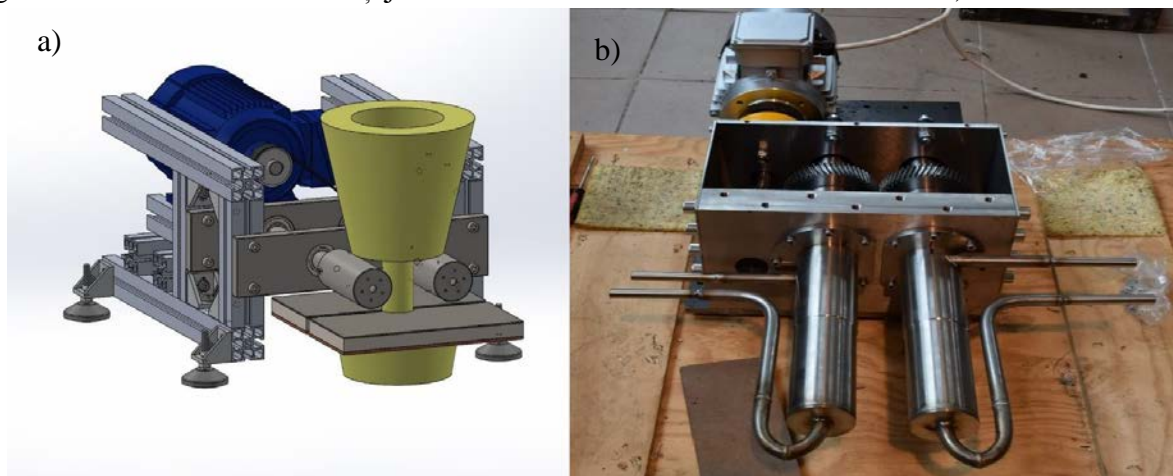
attālumiem ar konkrēto sistēmu (skat. 4.78. attēlu).



4.78. att. Maksimālā ātruma atkarība no attāluma līdz kanālam

Arī tieši divpusēja sistēma ar diviem dipoliem tās vienkāršības dēļ ir viena no tām, ko potenciāli visātrāk būtu iespējams mērogot un pielietot industriāli. Tuvākais potenciālais pielietojums, kur sistēmu būtu iespējams izmantot praktiski esošajā mērogā ir t.s. elektromagnētiskās bremzes realizācijā.

Elektromagnētiskā bremze (*electromagnetic throttle*) ir iekārta šķidrā metāla caurteces kontrolēšanai. Tas tiek īstenots šķidrā metāla kanālam, apkārt novietojot skrejoša magnētiska lauka avotu. Taču ir iespējams šī skrejošā lauka radīšanai izmantot pastāvīgos magnētus, kas arī tika īstenots. Vienā no industriāliem pasūtījumiem, kur alumīnija pārstrādes uzņēmumam, pēc pasūtījuma tik izveidota elektromagnētiskā bremze caurteces kontrolei alumīnija kanālam. Iekārtas koncepts ir attēlots 4.79. attēlā. Tīģelī augšā atrodas izkausēts alumīnijs, kas tek lejā caur kanālu (šajā gadījumā cauruli). Apkārt, kanālam horizontāli ir novietoti divi rotējoši pastāvīgie magnēti. Tie griežas pretējos, virzienos radot skrejošu magnētisku lauku. Radītais spiediens, kas bremzē plūsmu, tiek kontrolēts mainot magnētu griešanās ātrumu. Iekārta daļēji saliktā veidā ir attēlota attēlā 4.79. attēlā b).



4.79. att. Elektromagnētiskā bremze: a) rasējums; b) Iekārta daļēji saliktā veidā

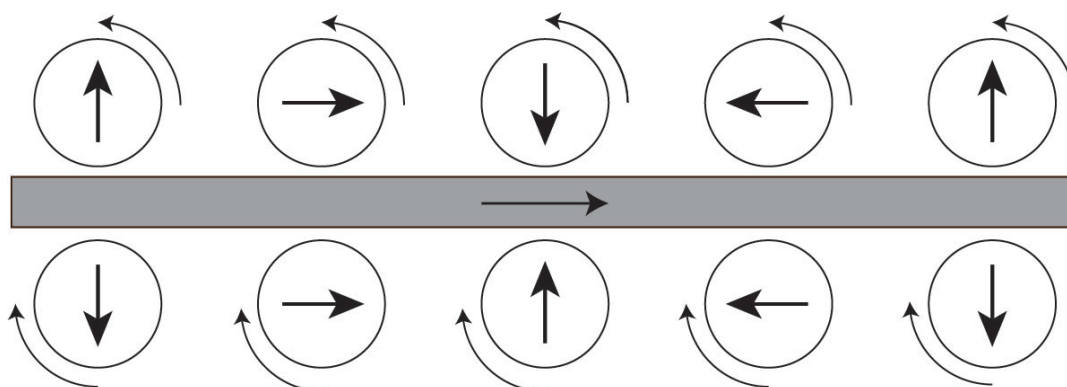
Jāpiemin, ka šai iekārtai, magnētu pasargāšanai no pārkaršanas, magnētus saturošās tērauda čaulas tika dzesētas ar noslēgta cikla dzesētāju izmantojot silikona bāzētu dzesēšanas šķidrums. Šāds risinājums deva iespēju magnētiem strādāt ļoti tuvu šķidra alumīnija kanālam, nepārsniedzot 80 ° C.

Izstrādāto iekārta darba izstrādes laikā vēl tika pārbaudīta uz reālas industriālas krāsns KBM Affilips rūpnīcā Nīderlandē.

4.4.4.2. Divpusējas 10 dipolu sistēmas magnētiskās mijiedarbības izpēte

Nākamais magnētisko dipolu attīstības solis ir analogisks kā starp 4.2. un 4.3. nodaļās apskatītajām sistēmām – veidot dipolu rindas, tikai šajā gadījumā attiecībā pret kanālu divpusējas. Šeit tālāk apskatīsim sistēmu, ka sastāv no divām sinhroni rotējošu cilindrisku pastāvīgo magnētu rindām, kas novietotas viena otrai pretī (4.80. attēls).

Lai iegūtu pēc iespējas stiprāku magnētisko lauku un samazinātu kopējo griezes momentu un oscilējošos spēkus starp magnētiem, tie izkārtoti tā, lai starp to magnetizācijām veidotos fāzes nobīde. Magnētiskais lauks, rezultējošie spēki un griezes momenti skaitliski modelēti, izmantojot Comsol 3D skaitliskā aprēķina programmu kā arī novērtēts analītiski analogiski 4.3. nodaļā apskatītajai sistēmai.



4.80. att. Divpusēja desmit magnētisko dipolu sistēma lineāru šķidrā metāla sūkņa iegūšanai shematisks attēlojums

Magnētu rotācijai nepieciešamais griezes moments ir ļoti augsts, ja visi magnēti magnetizēti vienā un tajā pašā virzienā, kā arī momenta zīme mainās pēc ceturdaļrotācijas. Šāda sistēma būtu nepraktiska lielā spiediena dēļ kustīgajā mehānismā. Tā kā šādus sūkņus izmanto metalurģijā tā stabilitāte ir svarīga. Zināms, ka izmantojot pastāvīgo magnētu Halbaha sakārtojumu, magnētiskais lauks palielinās vienā pusē un samazinās otrā [57]. Šis efekts izmantots kā pamatprincips maksimāla magnētiskā lauka sasniegšanai starp abām rindām šajā pētījumā.

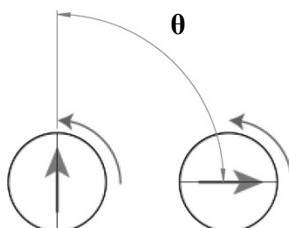
Matemātiski pastāvīgos magnētus var aplūkot kā cilpveida elektrisko strāvu summu. Katrai cilpai piemīt magnētiskais moments:

$$\mu = \frac{1}{2} r \times j, \quad (4.51.)$$

, kur μ ir magnētiskais moments, r ir rādiusa vektors un j ir elektriskās strāvas blīvums. Uz magnētu darbošos griezes momentu aprēķina no identitātes:

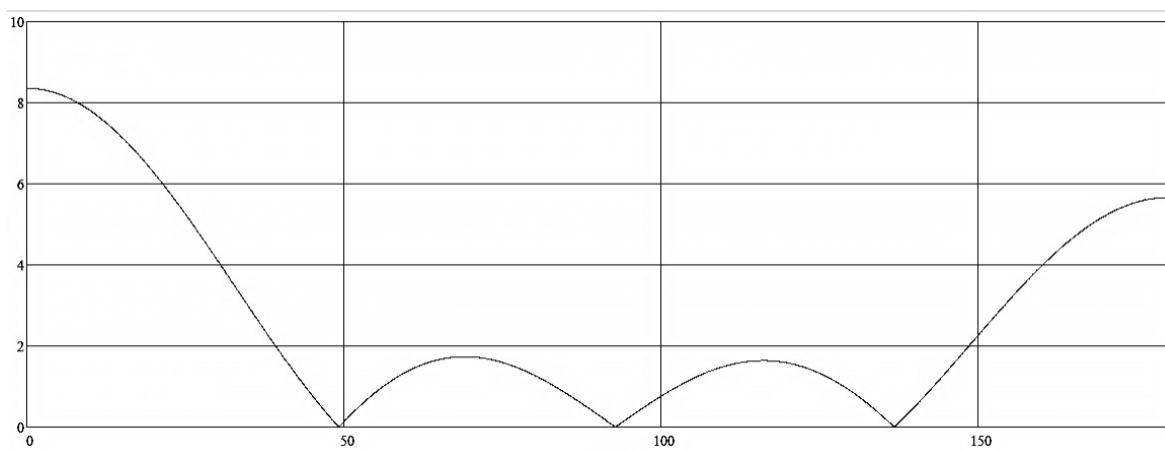
$$\tau = \mu \times B, \quad (4.52.)$$

, kur τ ir uz magnētu darbošais griezes moments un B – ārējais magnētiskais lauks. Leņķi θ starp divu blakusesošu magnētu magnetizācijas virzienu nosaka kā parādīts 4.81. attēlā.



4.81. att. Leņķis θ

Ārējo magnētisko lauku var aprēķināt nointegrējot visas elektrisko strāvu cilpas. Savukārt, griezes momentu aprēķina, vienu no magnētiem (kurš neatrodas ārējā magnētiskā laukā) pakļaujot ārējam magnētiskajam laukam. Šo pašu atkārto vienai pilnai magnēta rotācijai, tādējādi uzzinot kopējo vērtību. Gala rezultātā, atkārtojot šo katram no magnētiem, iegūst kopējo griezes momentu, kas atkarībā no fāzes nobīdes starp magnētiem grafiski attēlots 4.82. attēlā. Visi šie aprēķini veikti izmantojot Mathcad 15.0.

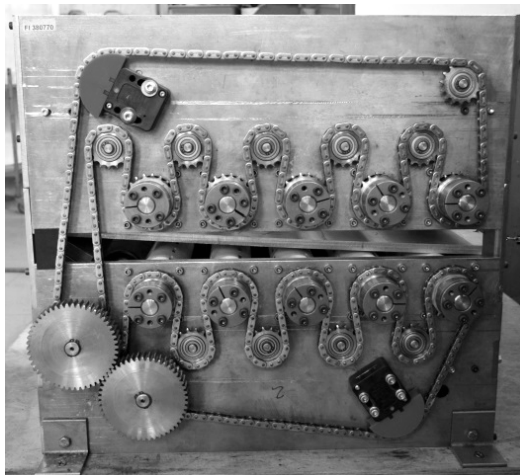


4.82. att. Kopējais griezes moments atkarībā no fāzes leņķa θ vienai rindai

Kopējā griezes momenta minimumi iegūti pie fāžu nobīdēm : $\theta = 49,1; 92,8; 136,8$. Abu rindu kopējo griezes momentu aprēķinot, ieguva konstantu $T = 2,2 \times 10^{-15}$ visā fāzes nobīžu diapazonā.

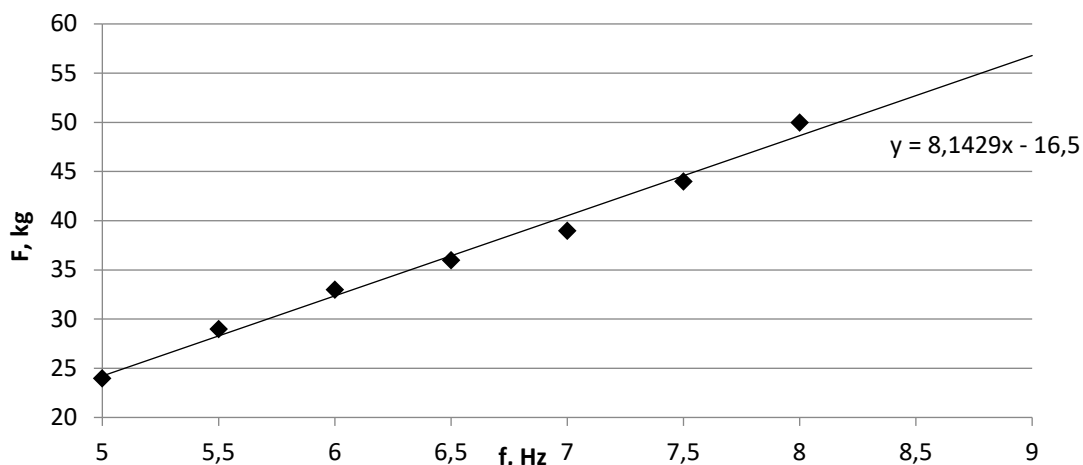
Eksperimentālā iekārta (4.83. attēls) veidota no 10 cilindriskiem NdFeB magnētiem (D 50 mm x 200 mm) pa pieciem katrā rindā. Magnēti iestiprināti nerūsējošā tērauda rāmī un kopā sastiprināti ar zobratu ķēdes sistēmu. Magnētu paliekošā magnetizācija ir 1,42 T. Attālums starp magnētu asīm vienā rindā ir 88 mm, bet attālums starp abām rindām ir 79 mm. Kustību

nodrošināja 11 kW trīsfāzu motors.



4.83. att. Eksperimentālās iekārtas priekšpuse

Eksperimentu veica tajā pašā vietā, kurā pārbaudīja sūkņa spiediena jaudu. Starp abām magnētu rindām novietoja alumīnija sakausējuma (5754) loksni (12x180x600 mm). Loksne radīto spēku nomērīja atkarībā no magnētu rotācijas frekvences izmantojot svarus (4.84.attēls).



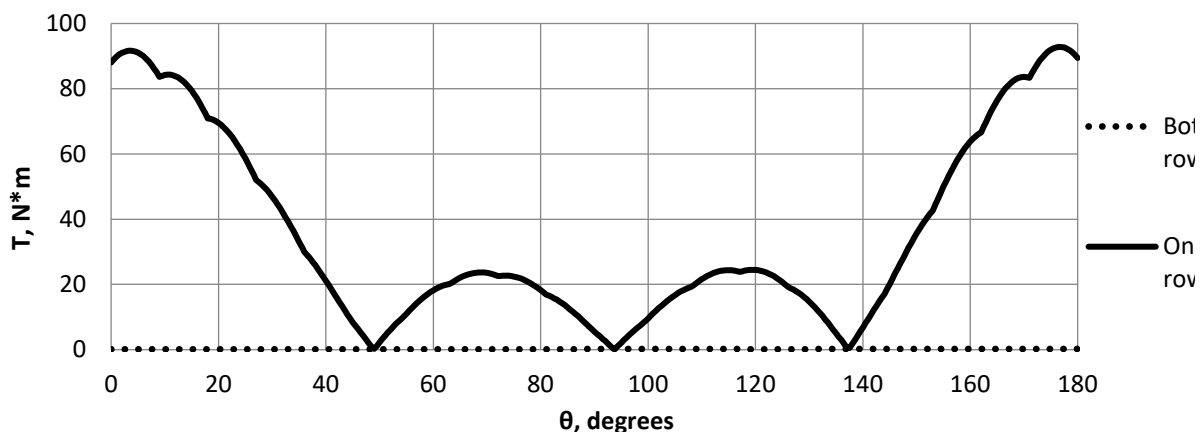
4.84. att. Alumīnija loksne radītais spēks atkarībā no rotācijas frekvences

Eksperimenta laikā tika novērots, ka alumīnija loksne uzkarst, tajā pašā laikā samazinoties mērāmajam spēkam. Iegūto spēku pārrēķinot uz laukuma vienību, var tuvināti iegūt šķidrā alumīnijā spiediens: $p = \sim 2,27$ Bar pie 8Hz. No tā var iegūt diferenciālspiedienu metros alumīnijā:

$$h = \frac{P}{\rho \cdot g} = \frac{F}{S \cdot \rho \cdot g} = 9,75 \quad (4.53.)$$

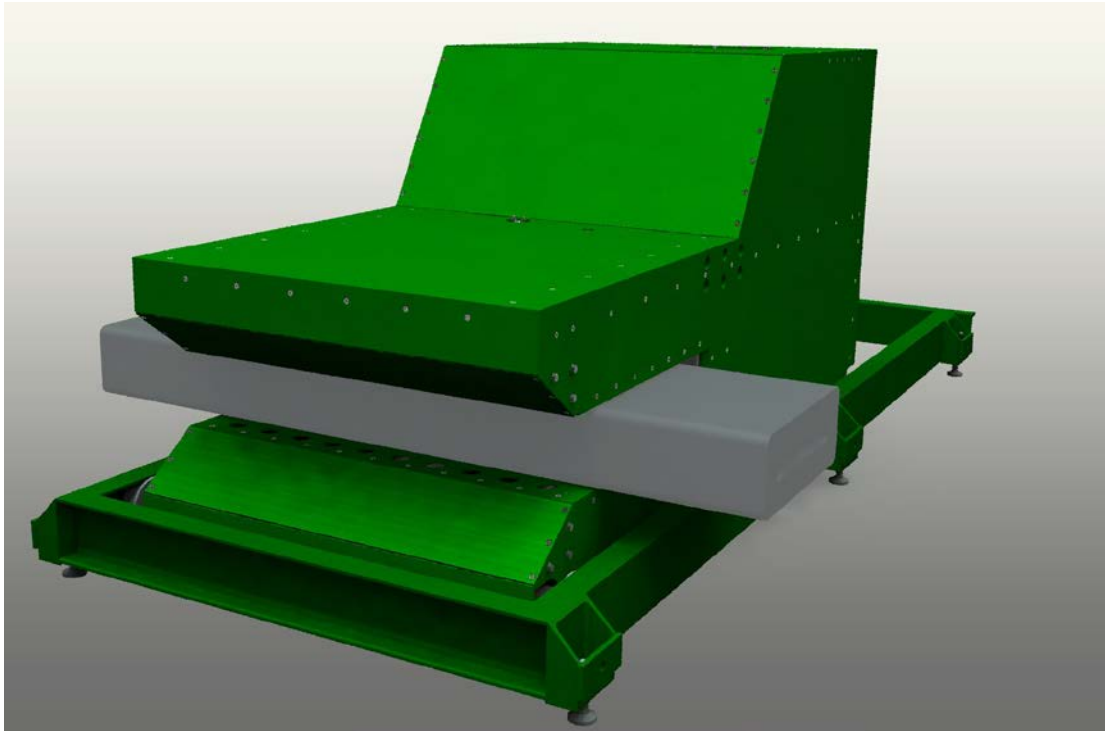
Magnētiskā lauka un spēku stacionārs 3D aprēķins veikts in COMSOL Multiphysics 5.0 programmatūrā, izmantojot leņķisko nobīdi θ un laiku t kā parametrus uzdotā diapazonā. θ izmantotas vērtības no 0 līdz 180° ar soli 0,5 grādi un t vērtības izmantotas no 0 līdz 4,5 ar soli 0,5 s. Tā kā sistēma pētīta stacionārā gadījumā, t izmantots tikai lai noteiktu, kad sistēma ir

nobīdījusies tā it kā tā grieztos. θ definēts kā magnetizāciju fāzes nobīdes leņķis starp diviem blakusesošiem magnētiem. Modelī izmantoja 0.1 Hz rotācijas frekvenci, ar kuru iegūtas vērtības pirmajam pusapgriezienam. Lai mazinātu gala efektus ap magnētiem modelēts 8x8x8 m liels gaisa reģions. Kopējais aprēķinātais griezes moments uzdotajā θ diapazonā (vidējots laikā) redzams 4.85. attēlā. Grafikā doti punkti tikai θ starp 0 un 180°, jo sistēmas ģeometrija ir simetriska.



4.85. att. Skaitliski aprēķinātais kopējais griezes moments atkarībā no fāzes leņķa θ

Pie θ vērtībām, 49; 93,5 un 138 iegūti kopējā griezes momenta minimumi. Šajos punktos kopējā griezes momenta vērtība ir aptuveni $T \approx 0,3 N \cdot m$. Rēķinot kopējo griezes momentu abām rindām, neiegūst minimumus un absolūtās vērtības ir nelielas (aptuveni $0,15 N \cdot m$). Kā nākamais solis sistēmas tālākai izpētei tiek, pirmkārt, gatavot šķidrā metāla kontūrs, ko savietot ar izveidoto eksperimentālo 10 cilindru iekārtu un izpētīt detalizēti sistēmas radītās hidrodinamiskās plūsmas parametrus, un, otrkārt, tiek būvēta industriāla mēroga iekārta darbam ar šķidru alumīniju. Šobrīd uzprojektētā sistēma ar četriem 12 cm diametrā lieliem rotoriem redzama 4.86. attēlā.



4.86. att. Sistēmas ar četriem 12cm diametrā lieliem rotoriem redzama dartoģrafikas modelis

4.4.5. Secinājumi

Veiktie analītiskie novērtējumi un eksperimentālā izpēte laboratorijas un industriālā mērogā ļauj izdarīt sekojošus secinājumus:

1. Teorētiski un eksperimentāli izpētīts, ka magnētiskos dipolus iespējams kombinēt vēl daudz dažādās kombinācijās, iegūstot analogas sistēmas citām klasiskām MHD sistēmām, vai pat jaunām, iepriekš neapskatītām, turklāt daudzas no tām ir ar industriāla pielietojuma potenciālu t.sk. kur nepieciešams realizēt lielu nemagnētisko attālumu;
2. Eksistē virkne magnētisko dipolu sistēmu, kur iespējams efektīvi izmantot magnētiskos spēkus dipolu rotācijas piedziņai. Piemēram šāda sistēma apskatīta 4.4.1. nodaļā, kur zem rezervuāra novietotiem diviem dipoliem tikai vienam no tiem nepieciešams nodrošināt mehānisku piedziņu, bet otrs tiek griezts ar magnētisko spēku palīdzību. Šāda sistēma joprojām spēj radīt ļoti ievērojamu plūsmu;
3. Divu zem rezervuāra novietotu dipolu sistēma rada visai intensīvu, bet haotisku un nevienmērīgu kustību kā redzams 4.74. attēlā. Radītie plūsmas virpuļi nemainīgu ārējo parametru apstākļos var haotiski mainīt savu atrašanās vietu;
4. Divu pretēji rotējošu rotoru gadījumā (4.4.1. nodaļa), inducētās plūsmas intensitāte palielinot attālumu starp kanālu un rotoriem samazinās straujāk kā viena vai vairāku sinhroni rotējošu dipolu gadījumā, līdz ar to sagaidāms, ka šādas sistēmas industriāliem pielietojumiem, kur būtisks ir nemagnētiskais attālums var būt mazāk perspektīvas;
5. 4.4.2. nodaļā redzams, ka citas magnētisko dipolu sistēmas ērti novērtēt izmantojot bezdimensionālos kritērijus (skat. 4.2. tabulu), vienlaicīgi ļaujot izvērtēt industriāliem pielietojumiem atbilstošo eksperimentālo iekārtu parametrus;

6. Atbilstoši 4.53. attēlam redzams, ka ar vienu magnētisko sistēmu - diviem magnētiskajiem dipoliem – iespējams iegūt radikāli atšķirīgus plūsmu tipus, konkrētajā gadījumā, starp dipoliem novietotā rezervuārā. Atšķirīgi plūsmas tipi varētu atbilst dažādiem sakausējuma ražošanas posmiem, attiecīgi dotā sistēma varētu laikā pielāgoties un nodrošināt konkrētajā ražošanas brīdī tieši tādu plūsmu, kas konkrētajam procesam ir optimāla;
7. Demonstrēts, ka divu cilindru maisītājs spēj nodrošināt arī efektīvāku atbilstošā metāla daļiņu (piem. lūžņu) iemaisīšanu gan gallijā gan alumīnijā, it sevišķi, ja daļiņu izmērs pārsniedz 1 mm (skat. 4.56. attēlu);
8. 4.59. attēlā redzams, ka maisot kausējumu cilindriskā rezervuārā tā kristalizācijas laikā ar diviem magnētiskajiem dipoliem, iespējams nedaudz uzlabot tā kristalizācijas struktūru.
9. 4.63. un 4.66. attēlos redzams, ka arī ar četriem rotējošiem dipoliem, starp kuriem novietots šķidrā metāla rezervuārs, iespējams iegūt principiāli atšķirīgas šķidrā metāla plūsmas mainot tikai magnētu orientācijas un rotācijas virzienus.
10. Salīdzinot A1 - A3 gadījumus 4.66.b) attēlā redzams, ka magnētisko sistēmu radītā plūsmas struktūra ir ievērojami atkarīga arī no rezervuāra ģeometriskajiem izmēriem t.sk. metāla līmeņa;
11. Salīdzinot 4.68. attēlu ar neitronogrāfijas metodi iegūto un analītiski aprēķināto iemaisīto daļiņu skaitu un to maksimālā laikā vidējoto koncentrāciju atkarībā no magnētu rotācijas frekvences, var novērot pietiekami labu sakarību, lai secinātu, ka metode ir izmantojama daļiņu kustības novērošanai;
12. 4.70. attēlā novērojami trīs dažādi daļiņu iekristalizēšanās režīmi, metālu sacietējot ar papildus iedarbību no magnētiskajiem dipoliem, kas ļauj secināt, ka, pirmkārt, neitronogrāfijas metode ir izmantojama arī kristalizācijas procesu izpētē un, otrkārt, magnētisko dipolu sistēma ir izmantojama kristalizācijas procesu uzlabošanā arī daļiņu iekristalizēšanās struktūras uzlabošanas kontekstā;
13. Var novērot atšķirību sūknēšanas efektivitātē vienam dipolam un diviem dipoliem divpusēji (skat. 4.74.attēlu). Redzams, ka vienpusējas sistēmas gadījumā novērojama ievērojami lielāka virpuļainība, kas priekš sūknēšanas uzskatāma par ne-efektivitāti. Šo apstiprina arī analītiskajos aprēķinos iegūtā magnētiskā lauka sadalījuma attēli, kur redzams, ka divpusēju sistēmu gadījumā pa kanāla augstumu iegūts ievērojami vienmērīgāks lauka sadalījums (skat. 4.71.att.), kas atbilst mazākai plūsmas virpuļainībai;
13. Divpusēja magnētisku dipolu rindas koncepcija ļauj vienkārši palielināt koncepcijas izejas parametrus vienkārši palielinot dipolu skaitu katrā rindā, tomēr katrai sistēmai svarīgi noteikt optimālo fāzes nobīdi attiecībā gan pret efektivitāti, gan integrālo griezes momentu no magnētu mijiedarbības spēkiem (skat. 4.82.attēlu);
14. Vienkāršoti sistēmas aprēķina modeļi un attiecīgi arī metāla sūknēšanas efektivitāti var eksperimentāli novērtēt, izmantojot cietu metāla (alumīnija) loksni, un mērot spēku, ar kādu to sistēmas cenšas pārvietot (skat. 4.84.attēlu);
15. Pilnībā arī divpusējā dipolu sistēma būtu jānotestē arī darbā ar šķidru metālu, vismaz atbilstoši tam, kā tas tika darīts 4.2. nodaļā viena dipola gadījumā. Šādus testus plānots veikt tuvākajā laikā.

Šajā nodaļā veikto pētījumu rezultāti atspoguļoti sekojošās publikācijās:

1. Numerical and neutron radiography investigation of liquid meytal flow / Valters Dzelme, Mihails Ščepanskis, Andris Jakovičs, Mārtiņš Sarma, P.Vontobel, K.Thomsen, P.Trtik, Toms Beinerts. 2017. Publicēta.
2. Bojarevičs, A., Baranovskis, R., Kaldre, I., Milgravis, M., Beinerts, T. Two cylinder permanent magnet stirrer for liquid metal. **In:** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 228 (1). Germany: IOP Publishing Ltd, 2017, Available from: doi: 10.1088/1757-899X/228/1/
3. Ščepanskis, M., Sarma, M., Vontobel, P., Trtik, P., Thomsen, K., Jakovičs, A., Beinerts, T. Assessment of Electromagnetic Stirrer Agitated Liquid Metal Flows by Dynamic Neutron Radiography. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017, 48(2), 1045–1054. ISSN 1073-5615. e-ISSN 1543-1916. Available from: doi: 10.1007/s11663-016-0902-8.
4. Scepaniskis, M., Jakovics, A., Beinerts, T., Nikoluskins, R., Thomsen, K., Vontobel, P. A new neutron radiography experimental technique for dynamic control of inclusions in electromagnetic induction melting and stirring equipment. *9th International Conference and Exhibition on Clean Steel*. .Budapest, Hungary: 2015. Available from: doi: [https://www.researchgate.net/publication/282006937_A_New_Neutron_Radiography_Experi mental_Technique_for_Dynamic_Control_of_Inclusions_in_Electromagnetic_Infuction_Melt ing_and_Stirring_Equipment](https://www.researchgate.net/publication/282006937_A_New_Neutron_Radiography_Experimental_Technique_for_Dynamic_Control_of_Inclusions_in_Electromagnetic_Infuction_Melt ing_and_Stirring_Equipment).
5. Dynamic neutron radiography for liquid metals applications / M. Scepaniskis, A. Jakovics, K. Thomsen, T. Beinerts, M. Sarma, P. Vontobel, R. Nikoluskins, A. Bojarevics 2015. Publicēta.
6. Ščepanskis, M., Jakovičs, A., Beinerts, T., Bojarevičs, A., Sarma, M., Nikoluškins, R., Platacis, E., Thomsen, K., Vontobel, P. A report on the first neutron radiography experiment for dynamic visualization of solid particles in an intense liquid metal flow. *Magnetohydrodynamics*. 2015, 51(2), 257-265. ISSN 0024-998X.
7. Ščepanskis, M., Jakovičs, A., Beinerts, T., Bojarevičs, A., Sarma, M., Nikoluškins, R., Platacis, E., Thomsen, K., Vontobel, P. Neutron radiography visualization of solid particles in stirring liquid metal. *Physics Procedia*. 2015, 69, 457-463. ISSN 1875-3892. Available from: doi: 10.1016/j.phpro.2015.07.064.
8. Ščepanskis, M., Jakovičs, A., Beinerts, T., Bojarevičs, A., Sarma, M., Nikoluškins, R., Platacis, E., Thomsen, K., Vontobel, P. Experimental neutron radiography visualization of dynamics of solid inclusions in liquid metal. **In:** *International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing*, Hannover, 2014, Available from: doi: 10.13140/2.1.4088.9602.
9. Ščepanskis, M., Nikoluškins, R., Bojarevičs, A., Beinerts, T., Geža, V., Jakovičs, A., Thomsen, K. Liquid metal flow induced by counter-rotating permanent magnets in a rectangular crucible. **In:** *9th International pamir Conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies*, Riga, 2014, Available from:
10. [https://www.researchgate.net/publication/263356883_Liquid_metal_flow_indu ced_by_counter-rotating_permanent_magnets_in_rectangular_crucible](https://www.researchgate.net/publication/263356883_Liquid_metal_flow_induced_by_counter-rotating_permanent_magnets_in_rectangular_crucible).
11. Bojarevics, A., Geļfgats, J., Beinerts, T., Kalvāns M., Baranovskis, R.

Elektrovadošu metālisku un pusvadītāju kausējumu maisīšanas ierīce. A. Bojarēvičs, J. Geļfgats, T. Beinerts, R. Baranovskis, M. Kalvāns (izgudrotāji). Int.Cl.: H02K44/06; C22B9/00; F27D27/00. Iesniegšanas datējums 2016-05-05. Patenti un peču zīmes LV15144 B 2016-09-20.

5. Kopējie rezultāti, secinājumi un rekomendācijas pielietojumam.

Secinājumi par katru darba daļu, īpaši attiecīgās sistēmas izpētes fizikālie secinājumi, ir pēc attiecīgās sadaļas. Šajā sadaļā apskatīti tikai darba galvenie rezultāti, secinājumi un rekomendācijas apskatīto sistēmu pielietojumam kopumā.

5.1. Kopējie fizikālie secinājumi

1. Noskaidrots, ka apskatīto cilindrisko magnētisko dipolu, kas atrodas netālu viens no otra savstarpējo iedarbību var samazināt līdz minimumam ar atbilstošu to magnētiskās indukcijas vektoru fāžu nobīdi un izstrādāta metodika fāzes nobīdes aprēķinam magnētisko dipolu sistēmām, optimizējot gan pret maksimālajiem sasniedzamajiem nepieciešamajiem hidrodinamiskajiem parametriem, gan ņemot vērā magnētiskās mijiedarbības spēkus un rezultējošos griezes momentus.

2. Novērots, ka visās apskatītajās pastāvīgo magnētu sistēmās eksistē piesātinājuma sliexnsis, kuru sasniedzot, palielinot sistēmas rotācijas apgriezību skaitu sekundē, šķidrā metālā ātrums vairs nepieaug. Šo faktu bija nepieciešams ņemt vērā izstrādājot analītiskos aprēķinu modeļus, un vienlaicīgi parādīja to kritisku nepieciešamību sistēmu projektēšanā – katru sistēmu izveidojot, nepieciešams novērtēt, kur ir šis maksimums un atbilstoši tam arī tās realizēt.

3. Analītiski un eksperimentāli parādīts (skat. 3.1. un 3.2. nodaļas), ka arī klasiskajās PM sistēmās – diskveida un cilindruveida - taisnstūrveida magnētiskos polus aizstājot ar sektorveida magnētiskajiem poliem, iespējams ievērojami palielināt rotora radīto magnētiskā lauka indukciju, palielinot potenciālo iekārtas efektivitāti un pielietojumu robežas. Iepriekš literatūrā plaši apskatīti tikai taisnstūrveida magnētiskie poli. Šajā darbā parādīts, ka sektorveida magnētiskie poli var dot ievērojami lielāku magnētisko lauku, un arī klasiskajās sistēmās atrodami vēl ievērojami uzlabojumi to realizācijā efektivitātes palielināšanā.

4. Eksperimentālā diskveida sistēmas izpēte parādīja, ka, ja izejas kanāla šķērsriezums nav pārāk liels, šādā eksperimentālajā modelī pat var tikt sasniegta 4 m/s liels ātrums. Turklāt eksperimentālajā modelī tika izmantots InGaSn, kuram ir ievērojami augstāks blīvums un sliktāka elektrovadāmība (skat. arī 3.1. nodaļu), attiecīgi pilnībā validējot iespēju šādu strūklu vienādos apstākļos sasniegt arī alumīnijā un demonstrējot sistēmas pielietojamību industrijā, vismaz konkrētā uzdevuma risināšanai.

5. Viena polu pāra magnētiskie rotorī jeb magnētiskie dipoli dod ievērojami lielāku magnētisko lauku attālumā, kas, salīdzinot ar dipola izmēru, nav mazs. Attiecīgi var secināt, ka industriāliem pielietojumiem ar lielu nemagnētisko attālumu šādas sistēmas ir perspektīvākas.

6. Noskaidrots, ka sistēmās ar vairākiem rotējošiem magnētiskajiem dipoliem kritiska loma ir dipolu savstarpējai fāzes nobīde. Piemēram, 4.30. att. redzams, ka neievērojot fāžu nobīdi tiek iegūts par vismaz kārtu mazāks radītais elektromagnētiskais spēks. Eksperimentāli pārbaudot 4.40. att. redzams, ka neievērojot optimālu fāzes nobīdi starp dipoliem, radītās

plūsmas ātrums var atšķirties pat 5 reizes.

7. 4.4.3. nodaļā demonstrēts, ka, metālu sacietējot ar papildus iedarbību no magnētiskajiem dipoliem, magnētisko dipolu sistēma ir izmantojama kristalizācijas procesu uzlabošanā arī daļiņu iekristalizēšanās struktūras uzlabošanās kontekstā. Turklāt vienlaicīgi parādīta jauna – neitronogrāfijas – metode, kas ir efektīvi ir izmantojama arī kristalizācijas procesu izpētē.

5.2. Tehniskie aspekti

8. Izstrādāta tehnika un metodika liela izmēra magnētisko sistēmu salikšanai visām apskatītajām PM sistēmām salikšanai no maza izmēra magnētiem. Kā salikt šāda mēroga sistēmas ir unikāla zinātība jeb *know-how*, kas ir unikāla pasaules mērogā un pat patentējama (šobrīd tiek gatavots patenta pieteikums).

9. Sistēmai, kas sastāv no vairākiem elementiem būtiska to savstarpējās mijiedarbības spēki, kas jāņem vērā projektējot šādas sistēmas it sevišķi jau industriālā mērogā, kur svarīga ir ne tikai iekārtas efektivitāte, bet arī ilgmūžība un minimāla nepieciešamība pēc tehniskām apkopēm. Piemēram 4.34. att. redzams, ka ir salīdzinoši šaurs fāzes nobīdes diapazons, kur integrālais sistēmas griezes moments tiecas uz 0, kas attiecīgi prasa šāda veida sistēmas izgatavot salīdzinoši ļoti precīzi.

5.3. Pielietojums un perspektīva

10. Darbā, meklējot alternatīvu tradicionālām elektromagnētiskajām sistēmām industriālos pielietojumos, veikta secīga vairāku pastāvīgo magnētu sistēmu izpēte, apskatot trīs dažādas pastāvīgo magnētu sistēmas, kur magnētisko dipolu sistēmai apskatīti vēl 6 varianti. Katra sistēma ir izvērtēta analītiski un daļēji arī skaitliski, novērtējot vismaz sasniedzamo parametru kārtas lielumus, bet kā galvenais rezultāts uzskatāms plašais fizikālās modelēšanas darbs, kura ietvaros realizētas 16 eksperimentālās iekārtas, no kurām 4 jau atbilst industriālam mērogam, un vairākas, vismaz 3, ir jau plānošanas vai realizācijas stadijā.

11. Visām apskatītajām sistēmām novērota arī samērā laba sakritība analītiskajos un skaitliskajos modeļos iegūtajiem datiem ar atbilstošajiem eksperimentālajiem, kas dod zināmu pamatu izmantot izstrādāto faktiski kopējo šāda veida sistēmu novērtēšanas modeli arī turpmākos pētījumos, sistēmu mērogošanas aprēķinos un pat citiem uzdevumiem.

12. Eksperimentāli validēta iespēja vairāku izstrādāto pastāvīgo magnētu sistēmu - centrbēdzes, viena dipola un trīs dipolu - sistēmu pielietot metalurģijā, un praktiski parādīta tā darbība ar šķidru alumīniju. Eksperimentos ar alumīniju novēroti papildus vērā ņemamas parādības, kas saistītas ar alumīnija oksidāciju un rezervuāra apšuvuma silšanu, ko nepieciešams ņemt vērā izstrādājot šādas un citas sistēmas citiem industriālajiem pielietojumiem.

13. Magnētiskos dipolus iespējams kombinēt vēl daudz dažādās kombinācijās, iegūstot analogas sistēmas citām klasiskām MHD sistēmām, vai pat jaunām, iepriekš neapskatītām, turklāt daudzas no tām ir ar industriāla pielietojuma potenciālu, kas īpaši uzskatāmi redzams

4.4. nodaļā.

14. Tika konstatēts, ka salīdzinājumā ar tradicionālajiem risinājumiem šādas sistēmas ļauj ievērojami palielināt magnētiskā lauka iekļūšanas šķidruma metālu dziļumu, nodrošinot iespēju palielināt sienu biezumu metalurģijas augos. Šis apstāklis ļauj ne tikai palielināt MHD iedarbības efektivitāti, bet arī nodrošināt nepieciešamos drošības nosacījumus.

15. Darbā parādīts, ka šeit apskatīto pastāvīgo magnētu sistēmu elektrodinamikas un hidrodinamikas pētījumi ir ne tikai interesanti no zinātniskā viedokļa, bet arī orientēti uz praktisku izmantošanu metalurģijā. Attiecīgi nepieciešams tās turpināt attīt un testēt industriālos mērogos darbā ar šķidru metālu.

16. Veikto pētījumu rezultāti ir atspoguļoti 18 publikācijās un 2 patentos, kā arī rezultāti prezentēti 10 dažādās starptautiskās un vietējās konferencēs un simpozijos.

Ņemot vērā fizikālos, tehniskos un pielietojuma secinājumus, var apstiprināt darba **hipotēzi**, ka rotējošu magnētisko dipolu sistēmas, kas realizējamas ar cilindriskiem magnētiem, kuru magnetizācija ir perpendikulāra to asij var efektīvi radīt dažāda veida šķidrā metāla plūsmas pie salīdzinoši lieliem nemagnētiskajiem attālumiem līdz darba vielai, un demonstrēts, ka attiecīgi ar šādu sistēmu iespējams risināt vairākus aktuālus vairākos vieglās metalurģijas uzdevumus.

6. Pateicības

Vēlos izteikt pateicību Prof. Dr. hab. phys. Jurijs Gelfgats par vērtīgām un kritiskām piezīmēm, kā arī par morālo atbalstu darba tapšanas procesā. Esmu pateicīgs visam Latvijas Universitātes Fizikas institūta, īpaši MHD Tehnoloģiju laboratorijas kolektīvam par visiem kopā pavadītajiem gadiem, līdzī jušanu un atbalstu. Īpašu pateicību vēlos izteikt pateicību Latvijas Universitātes Fizikas institūta MHD Tehnoloģiju laboratorijas vadītājam Dr. Andrim Bojarevičam, kurš ir faktiski pirmais piedāvāja ideju par magnētisko dipolu izpēti un to potenciālo pielietošanu industrijā, kā arī ir bijis tieši iesaistīts visos šajā darbā aprakstītajos eksperimentos un būtiski palīdzējis arī teorētiskās daļas realizācijā.

Īpaši saku paldies savai sievai par mīlestību, gādību un atbalstu grūtajos brīžos.

7. Izmantotā literatūra un avoti

- [1] Hannes, A. On the cosmogony of the solar system III, *Stock. Obs. Ann.*, vol. 14, p. 9.1-9.29, 1942.
- [2] Lielpeteris, J., Moreau, R. *Liquid Metal Magnetohydrodynamics*, 1989(10).
- [3] Polzin, K. A. Liquid Metal Pump Technologies for Nuclear Surface Power. *Proc. Sp. Nucl. Conf.* 2007. no. March, pp. 363–369.
- [4] Gelfgats, J., Gorbunovs, L., Vitkovskis, I. *Magnetohidrodinamiska droselēšana un šķidra metāla plūsmu vadīšana*. Rīga: Zinātne, 1989.
- [5] Molokov, S., Moreau, R., Moffatt, K. *Magnetohydrodynamics*. 2007.80. Dordrecht: Springer Netherlands.
- [6] Illy, J. *The Practical Einstein: Experiments. Patents. Inventions*. 2012.
- [7] Калнинь, Т. К., Явнополюсные БГД – насосы. Рига: Зинатне, 1969.
- [8] Trout, S. *Basics of designing with permanent magnets* [online]. Power Electronic Tips Newsletter [viewed 21 February 2016]. Available from: <https://www.powerelectronicstips.com/basics-of-designing-with-permanent-magnets/>
- [9] *Amazing magnets. Material: Sintered Neodymium Iron Boron*. [online]. [viewed 22 March 2018]. Available from: <http://www.amazingmagnets.com/magnetgrades.aspx>.
- [10] Bucenieks, I. Perspectives of increasing efficiency and productivity of electromagnetic induction pumps for mercury basing on permanent magnets, **In: 14th International Conference in Nuclear Engineering, Miami, 2006**.
- [11] Bucenieks, I. *MHD indukcijas sūkņa ar pastāvīgiem magnētiem spiediena un caurteces raksturlīkņu mērīšana*. Laboratorijas darba apraksts, 2006.
- [12] Bucenieks, I., Kravalis, K. Efficiency of EM induction pumps with permanent magnets. *Magnetohydrodynamics*. 2011, 47(1), 89–96.
- [13] Bucenieks I. Perspectives of using rotating permanent magnets for electromagnetic induction pump design. *Magnetohydrodynamics*. 2000, 36 (2). 181–189.
- [14] Bojarevics, A., Gelfgat, Yu. *Flow at the liquid metal surface subject to a rotating magnetic field*. Proc. the PAMIR Conference (Giens, France, September 8–12, 2008), pp. 273–275.
- [15] Sherkliff, J. A. *A Textboot of Magnetohydrodynamics*. Pergamon Press, 1965.
- [16] Кирко, И. М. *Жидкий металл в электромагнитном поле*. М.-Л., Энергия. 1964.
- [17] Сфттон, Д., Шерман, А. *Основы технической магнитной гидродинамики*. Мир, 1968.
- [18] Повх, И. Л. *Техническая гидродинамика*. М.-Л., Машиностроение, 1964.
- [19] Ferraro, V. C. A., Plumpton, C. *Magnetohydrodynamics*. Oxford U.P., 1961.
- [20] Kendall, P. C., Plumpton, C. *Magnetohydrodynamics*. Pergamon Press, 1964.
- [21] Brill, E. E. Development of special pumps for liquid metals. *Mech. Eng.*, 1953.5, 269pp.
- [22] Вольдек, А. И. Электромагнитные насосы для жидких металлов. *Электричество*, 1960. 5, 22pp.
- [23] Вольдек, А. И. *Индукционные МГД машины с жидкометаллическим рабочим телом*. Л., Энергия, 1970.
- [24] Лиелпетер, Я. Я. *Жидкометаллические индукционные МГД машины*. Рига: Зинатне, 1969.
- [25] Бирзвалк, Ю. А. *Основы теории и расчета кондукционных МГД насосов постоянного тока*. Рига: Зинатне, 1968.

- [26] Баринберг, А. Д. *Магнетогидродинамические аппараты защиты, контроля и управления*. М., Энергия, 1978.
- [27] Глухих, В.А., Тананаев, А. В., Кириллов, И. Р. *Магнитная гидродинамика в ядерной энергетике*. 1987.
- [28] Бушман А. К., Калнинь, Т. К. Применение постоянных магнитов в индукционных насосах. **In:** *Вопросы магнитной гидродинамики*, Рига, 1963, pp. 128–136.
- [29] Иванов, В. В., Карасев, Б. Г., Семиков, Г. Т. Индукционные насосы с вращающимися полюсами. **In:** *Электрофизическая аппаратура*, М., Атомиздат, 1966, pp. 116–126.
- [30] Lucas, J., Lucas, P., Mercier, T. L., Rollat, A., et al. *Rare Earths: Science, Technology, Production and Use*. Elsevier, 2014. 407 p. ISBN 978-0-444-62735-3. Available from: doi: <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.109>.
- [31] Buceniaks, I. High pressure and high flow rate induction pumps with permanent magnets. *Magnetohydrodynamics*. 2003. 39, pp. 411–417.
- [32] Baranov, G. A., Glukhikh, V. A., Kirillov, I. R. Calculation and Design of Induction MHD machine with a Liquid Metal Working Body. Moscow: Atomizdat, 1978.
- [33] Верте, Л. А. *Магнитная гидродинамика в металлургии*. Металлургии. 1975. 300 с.
- [34] Kagan, V. G. Magnetic induction pump, US 8267669 B2, 2008. V. G. Kagan, “Magnetic induction pump,” US 8267669 B2, 2008.
- [35] Buceniaks, I., Sukhovich, E., Shcherbinin, E. Centrifugal pump basing on rotating permanent magnets. *Magnetohydrodynamics*. 2000, 36, 189 – 196.
- [36] Inventors Peter J. Flisakowski, P. J., Griffith, D. C. A *Lid and containment vessel for refining molten metal*. Patents US 5718416 Publication date: Feb 17, 1998
- [37] Buceniaks, I. Perspectives of using rotating permanent magnets for electromagnetic induction pump design. *Magnetohydrodynamics*. 2000, 36, 151–156.
- [38] Волдек, А.И. *Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом*. Энергия, Ленинград, 1970.
- [39] Идельчик, И. Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям*. Москва: Машиностроение, 1975. ISBN 978-5-458-39006-4.
- [40] Pitot, H. Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux. 1732.
- [41] Ricou, R., Vives, C. Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated probe. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1982, 25, 1579–1588.
- [42] Muiznieks, A., Platonov, V., Platonova, A., Krylov, Y. Method of approximate calculation of the characteristics of a centrifugal conduction pump in a nonzero discharge regime. *Magnetohydrodynamics*. 1986, 22, 102 – 105.
- [43] Goldsteins, L., Buceniaks, I., Buligins, L. A simplified model of the centrifugal electromagnetic induction pump (CEMIP) with rotating permanent magnets. *Magnetohydrodynamics*. 2014, 50(2), 165–178.
- [44] Misakian, M. Equations for the Magnetic Field Produced by One or More Rectangular Loops of Wire in the Same Plane. *J Res Natl Inst Stand Technol.* 2000, 105(4), 557–564. Available from: doi: 10.6028/jres.105.045 PMID: PMC4877158
- [45] Bojarevics, A., Buceniaks, I., Gelfgat, Y. Flow at the Liquid Metal Surface Subject to Rotating Magnetic Field. **In:** *7th PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD*, 2008.
- [46] Bojarevičs, A., Beinerts, T. Experiments on Liquid Metal Flow Induced by Rotating Magnetic Dipole Moment. *Magnetohydrodynamics*. 2010, 46, 4–6.
- [47] Griffiths, D. J. *Introduction to Electrodynamics*. 3rd. Pearson Education 2007. 276.pp.

ISBN 81-7758-293-3.

- [48] Platacis, J. *Elektrība*. Rīga: Zvaigzne, 1974. 50 lpp.
- [49] Bojarevičs, A., Beinerts, T., Sarma, M., Gelfgats, Y. Model experiment validating the feasibility of a permanent magnet stirrer for large-scale metal melting furnaces 2017???
- [50] DOP2000 model 2125/2032 user's manual." Signal Processing S.A., Switzerland.
- [51] EPM RĪGA SIA. Metāla sakausējuma sūkņēšanas un maisīšanas paņēmieni un iekārta tā realizēšanai. A. Bojarēvičs, J. Gelfgats, T. Beinerts, I. Bucenieks (izgudrotāji). Int.Cl.: H02K44/00; F27B17/00. Iesniegšanas datējums 2011-05-30. Patenti un peču zīmes LV14404 B 2011-08-20.
- [52] Timofeev, V. N., Khristinich, R. M., Boyakov, S. A., Temerov, A. A. Linear Induction Machine,. Patent of Russian Federation No. 2069443. Publication: (20.11.1996).
- [53] Nordling, C., Osterman, J. *Physics Handbook for Science and Engineering*. Edition 8th. Sweden: Studentlitteratur AB, 2006. 503 pp. ISBN 9789144044538.
- [54] Shercliff, J. A. *The theory of electromagnetic flow-measurement*. New York: Cambridge University press, 1962. 146 pp. ISBN 052133554X.
- [55] Bojarevics, A., Beinerts, T., Sarma, M., Gelfgat, Y. Arrays of Rotating Permanent Magnet Dipoles for Stirring and Pumping of Liquid Metals. *Journal for Manufacturing Science and Production*. 2015, 15(1), 35–39. ISSN 2191-4184. e-ISSN 2191-0375. Available from: doi: 10.1515/jmsp-2014-0039.
- [56] Bojarevics, A., Beinerts, T., Sarma, M., Gelfgat, Y. Experimental Model Tests of a Permanent Magnet Stirrer for Aluminium Furnaces. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2015, 8, 569-575. Available from: doi: 10.17516/1999-494X-2015-8-5-569-575.
- [57] Halbach, K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. *Nucl. Instruments Methods*, vol. 169, no. 1, pp. 1–10, 1980.
- [58] Elektronisks resurss [skatīts 2014.g. 21.febr.]. Pieejams: <http://www.abb.lv>.
- [59] Altek LCC. *Electromagnetic Furnace Stirring (EMS.) Fact Sheet*. Available from: <https://www.alket-al.com/pdfs/electromagnetic-furnace-stirrer-fact-sheet.pdf>.
- [60] Elektronisks resurss [skatīts 2014.g. 21.febr.]. Pieejams: <http://www.hertwich.com>.
- [61] Takahashi, Kenzo Chiba-ken (JP), Non-ferrous metal melt pump and non-ferrous metal melting furnace using the same, EUROPEAN PATENT APPLICATION, EP 2 206 998 A2, Date of filing: 23.12.2009, Applicant: ZMAG, Ltd. Matsudo-shi, Chiba-ken (JP)
- [62] Franke, S., Lieske, H., Fischer, A., Buttner, L., et al. Two-dimensional ultrasound Doppler velocimeter for flow mapping of unsteady liquid metal flows. *Ultrasonics*. 2013, 53(3), 691-700. ISSN 0041-624X. Available from: doi: 10.1016/j.ultras.2012.10.009.
- [63] Gelfgats, J., Lielausis, O., Ščerbiņins, E. Šķidrāis metāls elektromagnētisko spēku iedarbībā. Rīga, Zinātne, 1976, 248 lpp. (krievu val.).
- [64] Povkij I.L., Kapusta A.B., Chekin B.V., *Magneto hydrodynamics in Metallurgy*. Moscow, Metallurgia, 1974, p. 240 (krievu val.).
- [65] Ivanova patents Patent of Latvia LV14264B ?
- [66] Bojarevics, A., Beinerts, T., Grants, I., Kaldre, I. et.al. Effect of superimposed DC magnetic field on an AC induction semi-levitated molten copper droplet, *Magneto hydrodynamics*, 2015. 51(3), 437-444, Available from: <http://www.mhd.sal.lv/contents/2015/3/MG.51.3.4.R.html>.
- [67] Kaldre, I., Bojarevičs, A., Grants, I., Beinerts, T., et.al. Nanoparticle dispersion in liquid metals by electromagnetically induced acoustic cavitation, *Acta Materialia*, 2016. 118, pp. 253-259, Available from:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645416305535>

- [68] Ščepanskis, M., Jakovičs, A., Beinerts, T., Bojarevičs, A., Sarma, M., Nikoluškis, R., Platacis, E., Thomsen, K., Vontobel, P. Neutron radiography visualization of solid particles in stirring liquid metal. *Physics Procedia*. 2015, 69, 457-463. ISSN 1875-3892. Available from: doi: 10.1016/j.phpro.2015.07.064
- [69] Ščepanskis, M., Sarma, M., Vontobel, P., Trtik, P., Thomsen, K., Jakovičs, A., Beinerts, T. Assessment of Electromagnetic Stirrer Agitated Liquid Metal Flows by Dynamic Neutron Radiography. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017, 48(2), 1045–1054. ISSN 1073-5615. e-ISSN 1543-1916. Available from: doi: 10.1007/s11663-016-0902-8.
- [70] Ščepanskis, M., Jakovičs, A., Baake, E., Nacke, B. A model for homogenization of solid alloying admixtures in an induction crucible furnace. *Steel Research Int.*, 2014. 86(2),169-174 Available from: doi: 10.1002/srin.201400118
- [71] Ščepanskis, M., Jakovičs, A., Baake, E., Nacke, B. Solid inclusions in an electromagnetically induced recirculated turbulent flow: Simulation and experiment, *Int. J. Multiphase Flow*. 2014. 64, pp. 19-27. Available from: doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.04.004>.
- [72] Raffel, M., Willert, C.; Wereley, S. Kompenhans, J. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer-Verlag. 2007. ISBN 3-540-72307-2.

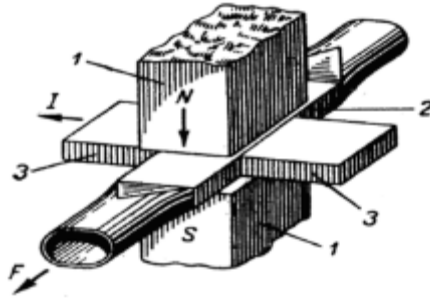
8. Apzīmējumu saraksts

MHD	Magnetohidrodinamika
FI	Latvijas Universitātes Fizikas institūts
PM	Patstāvīgie magnēti
$E[\text{V/m}]$	Elektriskā lauka intensitāte
$B[\text{T}]$	Magnētiskā lauka indukcija
$B_r[\text{T}]$	Magnēta remanance
$\omega[\text{rad/s}]$	Cikliskā frekvence
$T[\text{s}]$	Rotācijas periods
$f[\text{Hz}]$	Rotācijas frekvence
$t[\text{s}]$	Laiks
$j[\text{A/m}^2]$	Strāvas blīvums
$\sigma[\text{S/m}]$	Īpatnējā elektrovadītspēja
$F[\text{N}]$	Spēks
$f[\text{N/m}^3]$	Spēka blīvums
$I[\text{A}]$	Strāva
$h[\text{m}]$	Šķidrā metāla slāņa biezums
$H[\text{m}]$	Attālums no šķidrā metāla slāņa vidus līdz cilindriskā magnēta virsmai
$\rho[\text{m}]$	Attālums no cilindra ass līdz novērošanas punktam cilindriskajā koordinātu sistēmā.
$p[\text{pa}]$	Spiediens
$b[\text{kg/m}^3]$	Blīvums
$v[\text{m/s}]$	Plūsmas ātrums
$L[\text{m}]$	Magnēta garums
$R[\text{m}]$	Magnēta rādiuss
$W[\text{m}]$	Kanāla platums
$\Phi[\text{Wb}]$	Magnētiskā lauka plūsma
$U[\text{V}]$	Spriegums
$g[\text{m/s}^2]$	Brīvās krišanas paātrinājums
$S[\text{m}^2]$	Kanāla šķērsriezuma laukums
$I[\text{A}]$	Strāvas stiprums
V_B	skrejošā magnētiskā lauka ātrums kanālā
s	slīdes koeficients, kas raksturo attiecību starp magnētiskā lauka un šķidrā metāla ātrumiem
ε, Rm	Magnētiskais Reynoldska skaitlis
Ro	Rozbija skaitlis,
Ha	Harmaņa skaitlis,
Ek	Ekmaņa skaitlis,
Ω_d	Bezdimensionālais leņķiskais plūsmas ātrums

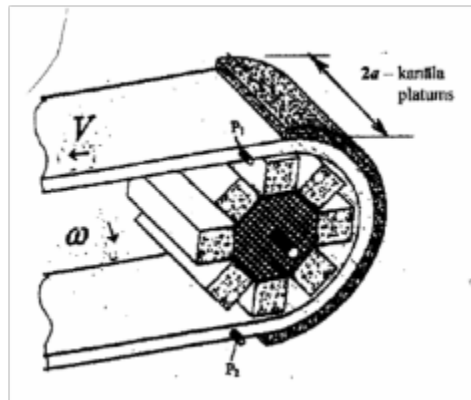
9. Pielikumi

9.1. pielikums. MHD sūkņi un maisītāji

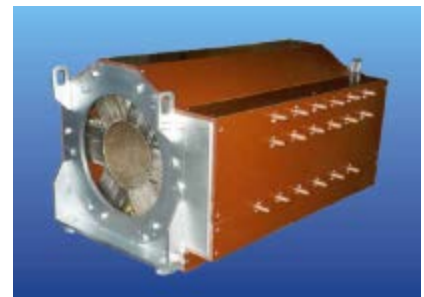
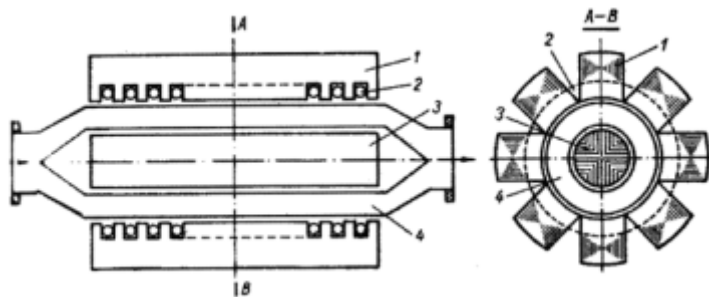
Kondukcijas MHD sūknis



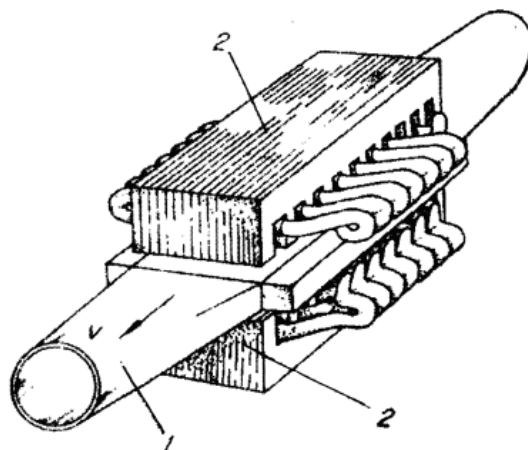
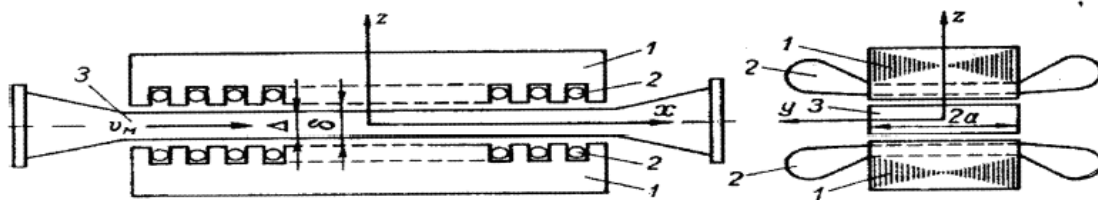
Cilindriskis indukcijas sūknis ar patstāvīgiem magnētiem



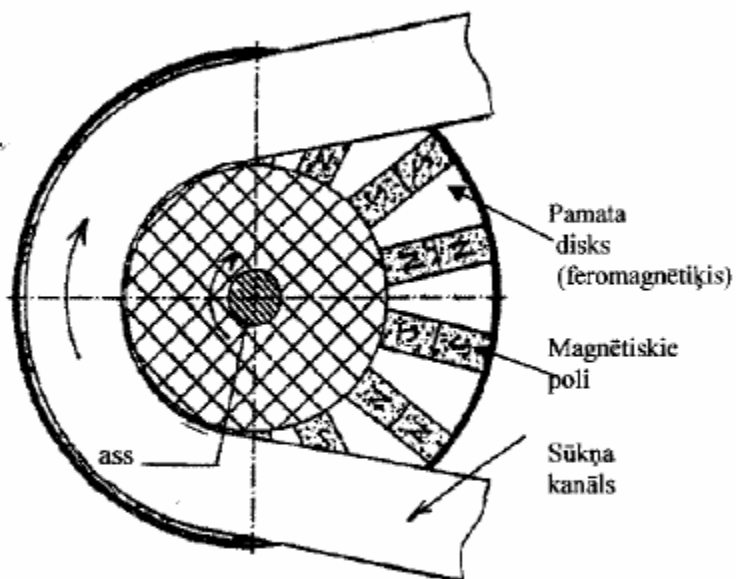
Cilindriskis 3-fāzu indukcijas sūknis



Plakans 3-fāzu indukcijas sūknis

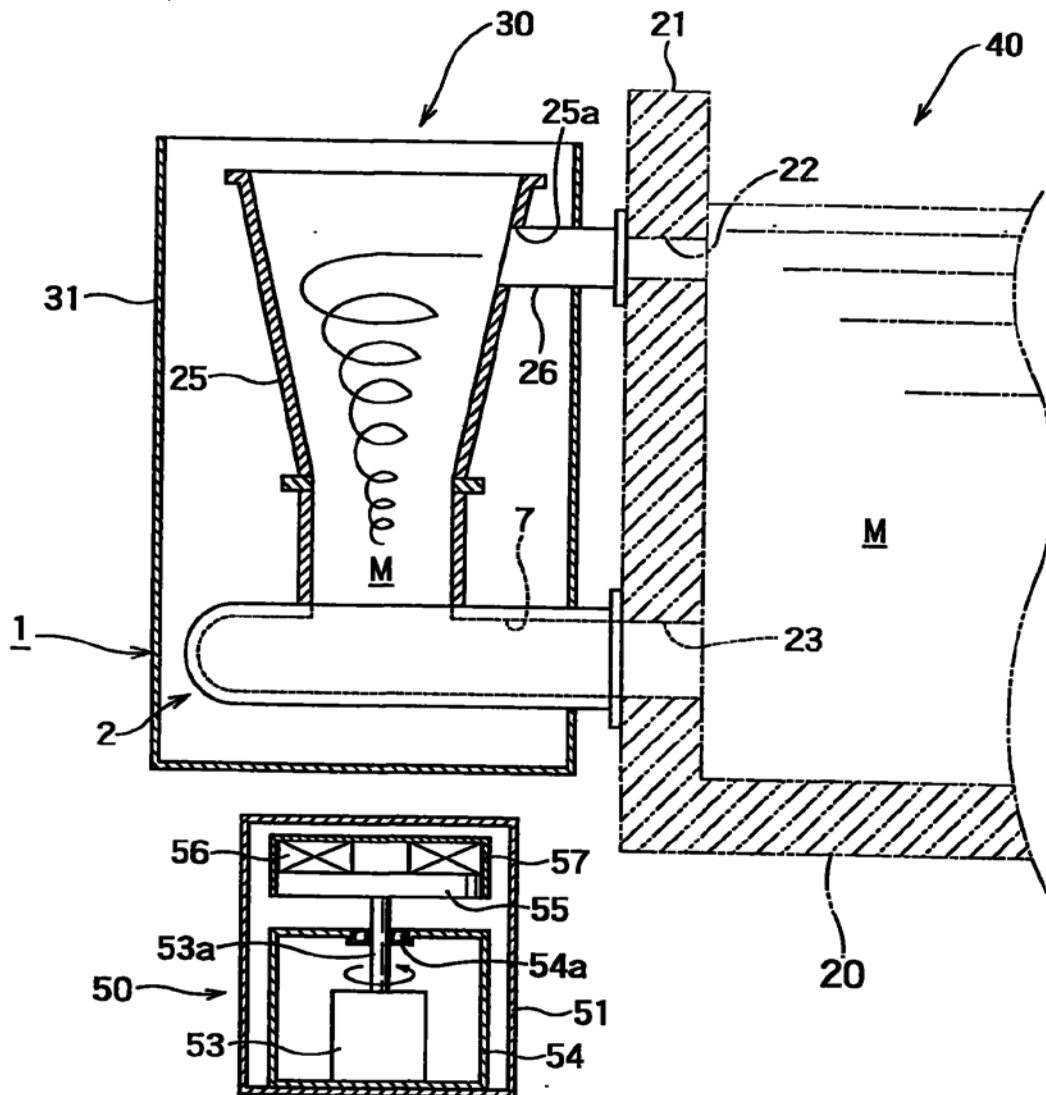


Diskveida indukcijas sūknis ar pastāvīgiem magnētiem

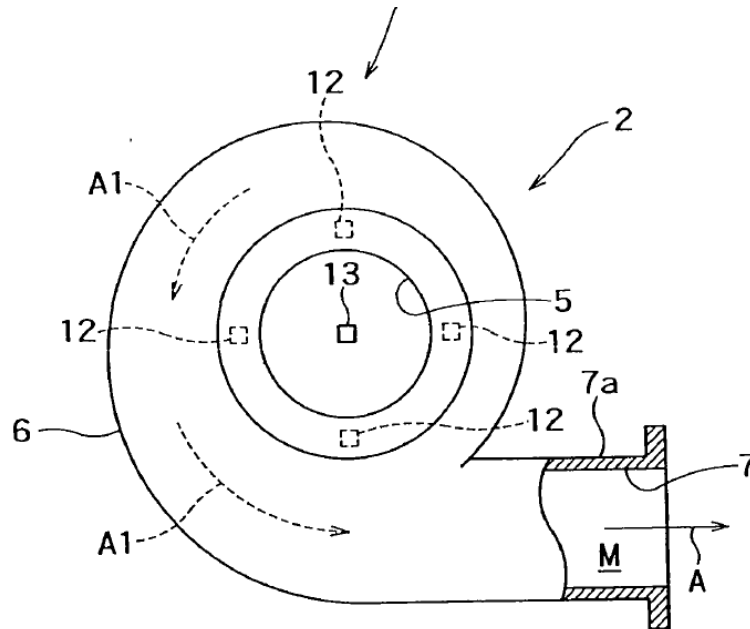
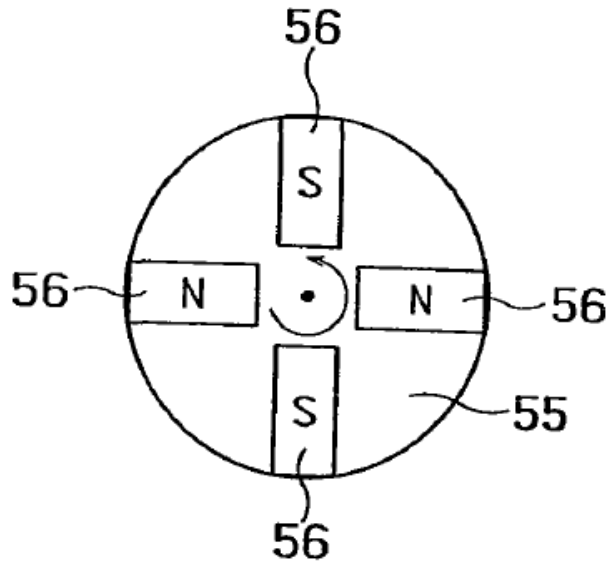


9.2. Pielikums. Vairāku esošu uzņēmumu piedāvātās MHD tehnoloģijas

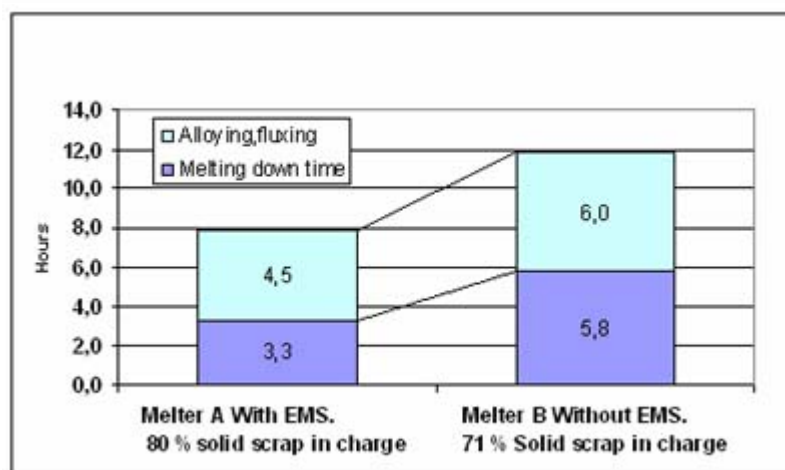
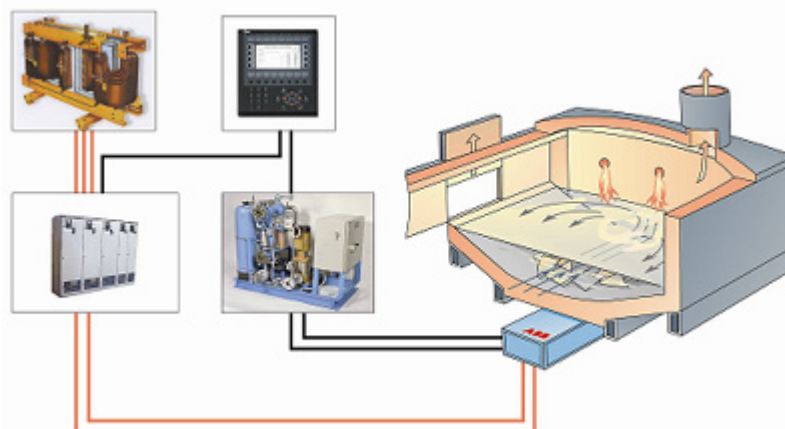
Japānas uzņēmuma izstrādātais Pastāvīgo magnētu maisītājs alumīnija krāsnīm.

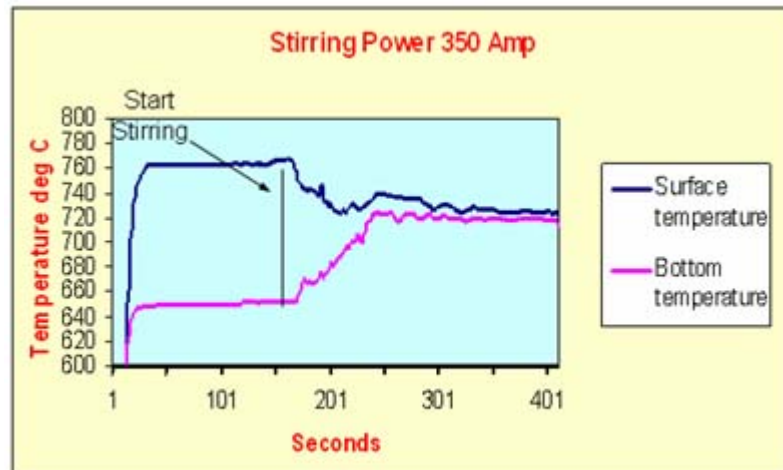


Principālās shēmas attēls no Z-MAg patenta



Zviedrijas uzņēmuma „ABB” piedāvātais MHD maisītājs [58]





Altek piedāvātās tehnoloģijas

Altek saviem klientiem sola visuniversālāko un izmaksu ziņā efektīvāko MHD indukcijas maisīšanas sistēmu, kāda pieejama alumīnija industrijā. Eksistējošo krāšņu atjaunošana ir vienkārša un efektīva izmaksu ziņā, palielinot produktivitāti, samazinot degvielas patēriņu un izdedžu veidošanos.

ALTEK induktors tiek 100% dzesēts ar gaisu, tādējādi neprasot dārgu, sarežģītu un potenciāli bīstamu ūdens dzesēšanas sistēmu krāsns tuvumā. ALTEK inženieri dizainē, veido un uzstāda katru iekārtu pēc vienošanās, atbilstoši klienta prasībām, nodrošinot ātru un vieglu tehnoloģijas pārvietošanu.

ALTEK EM maisītājs veidots pēc lineārā indukcijas motora principa. Zemas frekvences, gaisa dzesēts induktors atrodas krāsns apakšā vai sānā. Magnētiskais lauks, kas rada spēcīgas kustības kūstošajā metālā, tiek ģenerēts, pievadot spolei elektrisko jaudu. Tā kā magnētiskais lauks iet cauri jebkāda veida karstumizturīgiem materiāliem un biežumiem, ALTEK var uzstādīt gandrīz jebkurai krāsnij. Ar kausējumu netiek veidots fizisks kontakts, un iekārtā nav kustīgu daļu.

Speciālas, patentētas kontroles sistēmas un induktora dizaina kombinācija ļauj mainīt EM spēku un virzienu vairākas reizes krāsns cikla laikā. Tas nozīmē, ka maisīšanas efekts var tikt optimizēts dažādos darbības laika posmos. Tādēļ elektriskās enerģijas patēriņš ir pēc iespējas neliels, turpretī kausējuma daudzums palielinās

Altek sola uzlabot produktivitāti ar palielinātu degšanas enerģijas pārneši uz cieto metālu, kas uzlabotu kausēšanu un samazinātu izdedžu veidošanos. Papildus ar Altek iespējama enerģijas ietaupīšana. Gaisa dzesēšana parasti izmanto 140kWh vienam krāsns ciklam, bet tā samazina gāzes patēriņu līdz 15%. Altek nodrošina temperatūras un ķīmisko homogenitāti. Tiklīdz maisīšanas cikls ir sācies, termiskais gradients starp tvertnes augšpusi un apakšpusi sasniegs $\pm 5^{\circ}\text{C}$ starpību piecu minūšu laikā.

ALTEK™
TOTAL DROSS
MANAGEMENT
SOLUTIONS

ALTEK-Europe Ltd
Millhouse Business Centre
Station Road
Castle Donington
Derbyshire, DE74 2NJ
United Kingdom

Tel: +44 (0) 1332 813 943
Fax: +44 (0) 1332 813 915
Email: sales@altek-al.com
Web: www.altek-al.com

ALTEK LLC
Whiteland Business Center
748 Springdale Drive
Suite 100
Exton, PA 19341
USA

Tel: +1 484-713-0070
Fax: +1 484-713-0048
Email: sales@altek-al.com
Web: www.altek-al.com



FACT-SHEET

SIBER FORCE® Magento Hydrodynamic Induction Stirring System



ALTEK, under an exclusive agreement with Magnetic HydroDynamics (MHD) of Krasnoyarsk, Russia, presents SIBER FORCE®, the most versatile and cost effective magneto-hydrodynamic induction stirring system available to the aluminium industry. Retrofits to existing furnaces are simple and cost effective means of increasing productivity, reducing fuel consumption and dross generation.

SIBER FORCE® systems will ensure rapid temperature and chemical homogeneity throughout the melt maximizing quality and aluminium yield. Return on investment can be less than one year depending on the application.

Unlike other electromagnetic stirring systems, the SIBER FORCE® inductor is 100% air cooled and thus does not require an expensive water circulating and cooling system.

SIBER FORCE® Advantages

- Increases furnace productivity up to 25%*
- Reduces energy consumption up to 15%
- Reduces melt loss up to 25%*
- Rapid chemical and temperature homogeneity
- No moving parts
- Air cooled inductor

*depending upon furnace and operation type.

The SIBER FORCE Concept

SIBER FORCE® is based on the principle of a linear induction motor. A low frequency air cooled inductor is placed on the bottom or side of a furnace. When electrical power is applied to the coil, a magnetic field is generated causing a strong movement of the molten metal in front of the inductor. The combination of the specially patented control system and patented special inductor design provides for low energy (and therefore reduced CO₂) operation of the inductor. No physical contact is made with the melt and the system comprises of no moving parts.

Temperature & Chemical Homogeneity

SIBER FORCE® will significantly improve the temperature homogeneity throughout the melt. Once the stirring cycle is initiated, SIBER FORCE® will reduce the thermal gradient between the top and bottom of the bath to less than 12°C (54°F) within 5 minutes. The use of SIBER FORCE® will also significantly improve the dissolution rate of alloys.

Energy Savings

The combined effects of stirring when using SIBER FORCE® have reduced gas consumption by as much as 15% on some installations.

Reduction in Dross Formation

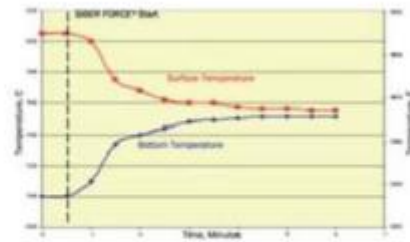
The oxidation rate of molten aluminium increases exponentially at temperatures above 775°C (1427°F). Due to the reduction of the thermal gradient between the top and bottom of the bath, SIBER FORCE® can reduce dross formation by up to 50%.

Increased Productivity

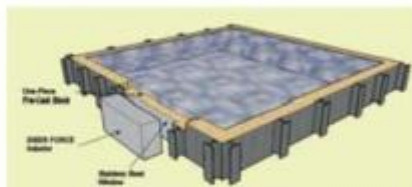
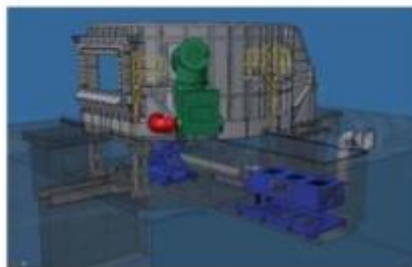
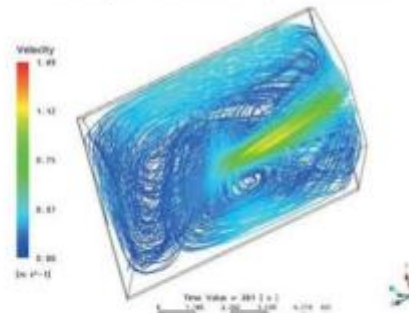
A SIBER FORCE® installation can increase furnace productivity by up to 25%. The increased thermal transfer, improved alloy dissolution rates and reduced dross formation provide significant cost savings and productivity improvements.

Proven & Reliable Design

With more than 40 installations operating in some of the world largest cast houses, SIBER FORCE® has gained the reputation as the most reliable stirring system in the industry. SIBER FORCE® can be installed on round and rectangular furnaces, both melting and holding, and can also be fitted on both sides or bottom mounted. For further information on how SIBER FORCE® can be fitted to your new or existing furnace, please contact ALTEK for further information.



Bath temperature when using SIBER FORCE®



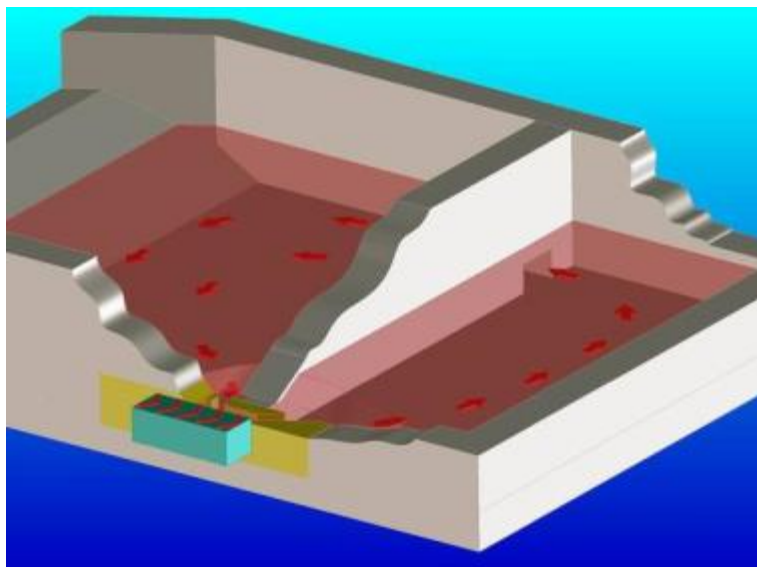
Mehāniskais krāsns maisītājs un kušņu noņēmējs.



„Hertwich engineering” piedāvātās sistēmas

Plakanā induktora izmantošana divkameru krāsnī. [60]

Šeit induktors tiek izmantots gan metāla līmeņa regulēšanai, gan maisīšanai. Zemāk redzama divkameru krāsns shēma.



Piedāvātais variants plakano induktoru izmantošanai metāla izsūkņēšanai no krāsns un dozēšanai liešanas sistēmā.

