

LATVIJAS UNIVERSITĀTE



Andris Bojarevičs

**ELEKTROMAGNĒTISKI IETEKMĒTU  
HIDRODINAMISKO PROCESU  
EKSPERIMENTĀLI PĒTĪJUMI ŠĶIDRU  
METĀLU NOSLĒGTOS TILPUMOS**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda iegūšanai fizikas nozarē  
Apakšnozare: šķidrumu un gāzu mehānika

Rīga, 2013

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas institūtā laika posmā no 1988. gada līdz 2013. gadam.



LATVIJAS  
UNIVERSITĀTE

## IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts doktora studijām Latvijas Universitātē – 2» Nr.2009/0I38/IDP/1.1.2.1.2./ 09fiPIA/ VIAA/004.

Darbs sastāv no ievada, piecām nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta un 18 zinātnisku publikāciju kopas pielikumā.

Darba forma: publikāciju kopa fizikas nozarē, šķidrumu un gāzu mehānikas apakšnozarē.

Darba zinātniskais vadītājs: profesors, habilitētais doktors **Jurijs Geļfgats**

Darba recenzenti:

- 1) LU asoc. profesors Dr. **Andris Jakovičs**
- 2) LZA akadēmiķis profesors Dr. **Elmārs Blūms**
- 3) Ilmenau Tehniskās universitātes profesors. Dr. **Andre Thess**

Promocijas darba aizstāvēšana notiks Latvijas Universitātes Fizikas nozares promocijas padomes atklātā sēdē 2014. gada 13. janvārī plkst. 15:00 Fizikas un matemātikas fakultātē, 233. auditorijā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Raiņa bulvārī Rīgā, Raiņa bulv. 19.

LU fizikas nozares promocijas padomes priekšsēdētājs Dr. **Andrejs Cēbers**

\_\_\_\_\_

LU fizikas nozares promocijas padomes sekretāre **Laureta Buševica**

\_\_\_\_\_

© Andris Bojarevičs, 2013  
© Latvijas Universitāte, 2013

ISBN 978-9984-45-792-5

## ANOTĀCIJA

Promocijas darbs veidots kā paplašināts kopsavilkums par 18 zinātnisku publikāciju kopu, kas veltīta šķidru metālu kustības dinamikai noslēgtos tilpumos apstākļos, kad to ietekmē ārēji uzlikts magnētiskais lauks, kā pastāvīgs, tā arī laikā mainīgs. Praktiski visi darbi ir autora plānotu un realizētu fizikālu eksperimentālu modeļu izpētes izklāsts, kas iekļaujas magnētiskās hidrodinamikas jomā. Darbā atspoguļoti eksperimentālie rezultāti par dažādu ārēji rosinātu faktoru veidotu šķidra metāla kustību, katrā atsevišķā modelī izdalot vienu dominējošo. Aprakstītas kausējumu plūsmas, ko rada virkne dažādu iedarbību uz elektriski vadošo šķidrums noslēgtos tilpumos: 1) augstfrekvences lauka inducēta elektromagnētiska spēka izraisīta plūsma; 2) diferenciālas cieto robežu rotācijas veidotā plūsma pastāvīgā magnētiskā laukā; 3) siltuma plūsmas rosināta naturālā konvekcija pastāvīgā magnētiskā laukā; 4) termokapilārā jeb Marangoni konvekcija un 5) termoelektrisko strāvu mijiedarbības ar magnētisko lauku veidotas plūsmas. Tiek dots arī eksperimentālo modeļu veidošanas īpatnību un mērījumu metodikas izklāsts apstākļos, kad pētījumu vide ir šķidrs metāls – necaurspīdīgs, ļoti labi siltumu vadošs un parasti arī ar ļoti augstu blīvumu. Sevišķa uzmanība pievērsta šķidruma kustības stabilitātei un turbulencei elektromagnētisko spēku ietekmē. Kaut arī kopsavilkumā iztīrītās publikācijas aptver vismaz divdesmit gadu periodu, tās publicēšanas laikā, nenoliedzami, sniedza jaunas atziņas un pārsvarā ir aktuālas arī šodien. Apskatīto fizikālo modeļu eksperimentālā izpētē gūtie rezultāti svarīgi praksei: pusvadītāju audzēšanai no šķidrās fāzes, metālu sakausējumu kristalizācijai, šķidru metālu izmantošanai kodolenerģētikas iekārtu dzesēšanai utt. Gūtie eksperimentālie dati sevišķi svarīgi fizikālo procesu skaitliskās modelēšanas testēšanai.

**Atslēgvārdi:** magnētiskā hidrodinamika, šķidri metāli, augstfrekvences magnētiskais lauks, termoelektrība, termokapilārā konvekcija

# SATURS

Anotācija .....	3
IEVADS .....	6
1. MAGNĒTISKA LAUKA IESPAIDOTAS ŠĶIDRU METĀLU HIDRODINAMIKAS UN KONVEKTĪVĀS SILTUMA PĀRNESES PĒTĪJUMU ĪPATNĪBAS EKSPERIMENTĀLOS MODEĻOS UN PIELIETOTIE LOKĀLĀ ŠĶIDRUMA ĀTRUMA UN TEMPERATŪRAS SENSORI .....	9
1.1. Adevātu eksperimentālu modeļu izveide, ņemot vērā šķidruma dinamikas, siltuma pārnese un robežnosacījumu līdzības prasības .....	9
1.2. Ātruma sensoru ierobežotā pielietojamība šķidru metālu plūsmās magnētiskā laukā .....	11
1.2.1. Šķidruma kustības magnētiskā laukā inducētā elektriskā potenciāla diferenču mērījumi .....	11
1.2.2. Potenciāla diferenču ātruma sensors šķidriem metāliem ar iebūvētu miniatūru pastāvīgo magnētu .....	12
1.2.3. Termoanemometrs ātruma mērījumiem šķidros metālos .....	13
1.2.4. Optiski mehāniskais ātruma sensors .....	13
1.2.5. Sensors absolūtā termo-EDS noteikšanai. ....	14
2. AUGSTAS FREKVENCES MAGNĒTISKĀ LAUKA IEROSINĀTAS ŠĶIDRA METĀLA KUSTĪBAS PĒTĪJUMI .....	15
2.1. Laikā vidējtās šķidruma kustības struktūras un turbulences intensitātes mērījumi cilindriskā tīģelī .....	15
2.2. Pastāvīgā lauka izmantošana vienlaikus ar augstfrekvences magnētisko lauku šķidruma plūsmas un brīvās virsmas stabilizācijai .....	18
2.3. “Skrejoša” magnētiskā lauka izmantošana šķidra metāla kustības organizācijai augstfrekvences strāvu gadījumā .....	21
3. DIFERENCIĀLAS ROTĀCIJAS IEROSINĀTA ŠĶIDRA METĀLA KUSTĪBAS PĒTĪJUMI AKSIĀLĀ PASTĀVĪGĀ MAGNĒTISKĀ LAUKĀ .....	23
3.1. Ātruma struktūras eksperimentāla izpēte .....	24

3.2. Pastāvīgā magnētiskā lauka ietekmē izveidota aksiāli simetriska brīvā ātruma nobīdes slāņa stabilitātes izpēte .....	26
4. NATURĀLĀS KONVEKCIJAS ŠĶIDROS METĀLOS PASTĀVĪGA MAGNĒTISKA LAUKA IETEKMĒ PĒTĪJUMI DAŽĀDAS KONFIGURĀCIJAS TRAUKOS .....	29
4.1. Pāreja no lamināras konvekcijas uz oscilējošu trīsdimensionālu kustību .....	29
4.2. Dažādas orientācijas magnētiska lauka iespaids uz šķidra metāla naturālo konvekciju taisnstūrīnā tilpumā ar horizontālu temperatūras kritumu .....	32
4.3. Aksiāla viendabīga magnētiskā lauka iespaids uz naturālo konvekciju “Čohralska” kristalizācijas procesa modelī .....	34
5. ŠĶIDRA METĀLA TERMOKAPILĀRĀS UN TERMOELEKTROMAGNĒTISKĀS KONVEKCIJAS EKSPERIMENTĀLA DEMONSTRĀCIJA .....	36
5.1. Šķidra metāla termokapilārās konvekcijas pētījumi aksiāli simetriskā traukā .....	36
5.2. Šķidra metāla termoelektromagnētiskās konvekcijas demonstrācija aksiāli simetriskā traukā .....	41
NOBEIGUMS .....	46
Secinājumi .....	51
Autora ieguldījums .....	52
Galveno publikāciju saraksts .....	53
Literatūras saraksts .....	59
Pielikumā pievienoto 18 publikāciju kopas saraksts .....	61

## IEVADS

Šajā īsajā kopsavilkumā dots pārskats par galvenajiem autora eksperimentālajiem pētījumiem šķidra metāla plūsmās, kad tās vai nu ierosina, vai arī būtiski ietekmē elektromagnētiskais lauks. Šo pētījumu aktualitāte izriet no tendencēm, kas pēdējā laikā raksturo divas jomas, kurās šķidru metālu plūsmām ir izšķirīga nozīme. (Par šķidru metālu šeit un turpmāk tiek saukti arī pusvadītāju materiālu kausējumi, jo šķidrā fāzē tiem parasti piemīt šķidru metālu īpašības.) Noteicošās, protams, ir industriālās ražošanas vajadzības pēc precīzi vadāmiem un atkārtojamiem procesiem ļoti augstas kvalitātes metālu sakausējumu izstrādājumu iegūšanai un monokristālu audzēšanai no šķidrās fāzes. Bez jau minētajām prasībām pēc kvalitātes mūsdienu ražošanai raksturīga arī tendence palielināt procesu garuma mērogu un kristalizācijas ātrumu. Fizikālas parādības, kas mazākās un lēnākās ražošanas iekārtās bija vērā neņemamas, tagad bieži vien iegūst izšķirīgu nozīmi tehnoloģiju veiksmīgai funkcionēšanai ražošanā. Otra joma, kur šie eksperimentālie pētījumi būtiski, ir šādu tehnoloģisko procesu skaitliskā modelēšana. Ražošanas procesu ļoti augstās izmaksas, tāpat arī parasti ārkārtīgi ekstremālie apstākļi liedz gūt pietiekami pilnvērtīgu informāciju par visu fizikālo parādību kopumu. Tādēļ eksperimentāli pētījumi fizikālos industriālo procesu modeļos sniedz tik nepieciešamo informāciju adekvātu matemātisku modeļu izveidošanai un to korektai skaitliskai risināšanai. Un bieži vien eksperimenta veikšana ar vienu mērķi – pārbaudīt skaitliskā modeļa pareizību – ir pati par sevi pietiekami svarīga.

Meklējot vienojošo šajos no pirmā acu skata tik dažādajos eksperimentālajos modeļos, var apgalvot it kā triviālo – šķidrās metāls atrodas traukā bez caurteces. Bet, kā tiks mēģināts aizstāvēt šī darba iztirzājumā, izkausētu metālu intensīvai kustībai šādos apstākļos piemīt kopīga īpatnība – šķidruma dinamiku nevar aprakstīt tikai ar kādu no klasiskajiem turbulences modeļiem, jo dominējoša plūsmas ātruma pulsāciju enerģijas daļa koncentrēta ļoti zemu frekvenču diapazonā. Drīzāk šīs plūsmas var raksturot kā nestabilas, ar neiztrūkstošiem, laikā mainīgiem trauka garuma mēroga virpuļiem, kas korelē ar trauka formas doto simetriju.

Tehnoloģisko ražošanas procesu vajadzības liek meklēt papildu iespējas kustības organizēšanai šķidrājos kausējumos, kuros norit kristāliskā gala produkta viendabībai izšķirīgi siltuma un masas pārneses procesi. Tāpat nepieciešama šo procesu enerģētiska optimizācija, piemēram, organizējot šķidrā metāla kustību tā, lai minimizētu nevajadzīgus siltuma zudumus, vai arī tieši pretēji – organizējot kustību maksimāli efektīvai siltuma aizvadišanai. Elektromagnētiskas levitācijas un semilevitācijas gadījumā nepieciešams arī optimizēt šķidrā metāla apgabalā formu, panākot maksimāli izdevīgus indukcijas sildīšanas apstākļus.

Šķidru metālu plūsmas noslēgtos tilpumos var izraisīt būtiski atšķirīgi spēki, tādēļ katru no šīm plūsmām jāpēta īpaši. Taču nepieciešams vismaz mēģināt izdalīt kopīgas fizikālas likumsakarības šajās tik atšķirīgajās parādībās. Lai iespaidotu vajadzīgā veidā šķidrā metāla plūsmu, nepieciešama, pirmkārt, laba izpratne par to, kā iespējams variēt spēkus, kas pamatā izraisa šo kustību. Otrkārt, ir jātiecas izprast būtisko, kā papildu elektromagnētiskas iedarbības var palīdzēt sasniegt nepieciešamo iedarbību optimālu enerģētisku un pārneses apstākļu radīšanai, vai nu tos intensificējot, vai arī apspiežot.

Šajā kopsavilkumā atspoguļoti eksperimentālu pētījumu rezultāti, kas gūti vairāk nekā desmit atšķirīgos modeļos. Katrā no šiem modeļiem parasti dominē viena fizikāla parādība vai spēks, kas izraisa šķidrā metāla kustību:

- 1) peldētspējas spēks, ko izraisa šķidrā metāla termiskā izplešanās;
- 2) virsmas spraiguma variācija gar neviendabīgi uzsildītu brīvu virsmu;
- 3) diferenciālas cietu ķermeņu rotācijas ierosināta šķidra metāla plūsma;
- 4) magnētiskā lauka mijiedarbība ar termoelektrisku strāvu, kura cirkulē caur neizotermisku trauka sienu un šķidro metālu;
- 5) augstas frekvences elektromagnētiska lauka ierosināta kustība šķidrā metālā;
- 6) skrejoša augstas frekvences elektromagnētiska lauka ierosināta kustība šķidrā metālā.

Ikvienā no pētījumiem ir arī mēģināts noskaidrot, kā pastāvīgs magnētisks lauks iespaido katru šo spēku ierosināto šķidrums plūsmu. Šāda pieeja, pēc autora domām, ir ļāvusi labāk izprast katru no šīm šķidrums plūsmām un to mijiedarbības ar pastāvīgo magnētisko lauku īpatnības. Protams, reālos industriālos procesos parasti vairāki no šiem spēkiem darbojas vienlaicīgi, taču augstāk minēto eksperimentālo pētījumu rezultāti ļauj kaut cik prognozēt reālo situāciju.

Šajā kopsavilkumā atspoguļoto darbu kopuma novitāti apliecina tas, ka šāds komplekss pētījums ir veikts pirmo reizi un neviens cits līdz darbu publikācijas laikam tādu nav veicis. Šo pētījumu kopuma praktisko nozīmi apliecina virkne atrasto, agrāk neapzināto parādību un likumsakarību, kas novērojamas šķidru metālu noslēgtos tilpumos apstākļos, kas līdzīgi notiekošajiem tehnoloģiskajos procesos.

Eksperimentālu pētījumu rezultātu izklāsts šajā kopsavilkumā strukturēts šādi:

- 1) modeļu uzbūves un mērījumu metodika;
- 2) augstas frekvences magnētiskā lauka ierosinātas plūsmas;
- 3) diferenciālas rotācijas ierosināta kausējuma plūsma magnētiskā laukā;
- 4) naturālās konvekcijas stabilitāte un magnētiskā lauka ietekme uz to;
- 5) termokapilārā konvekcija šķidrā metālā un termoelektrisko efektu izraisīta kausējuma plūsma magnētiskā laukā.

### ***Darba pamattēzes***

1. Fizikālu eksperimentālu modeļu kopuma izveidošana un izpēte ļauj uzrādīt fizikālās īpatnības hidrodinamisku sistēmu uzvedībai elektromagnētiskā lauka ietekmē un, kas praksei īpaši nozīmīgi, apzināt industriālu metalurģisku procesu un kausējuma hidrodinamiku, izmantojot esošās vai pilnveidotās un jaunās mērījumu metodes.
2. Ja procesā kausējuma hidrodinamika nav optimāla vēlamajam siltuma un masas pārneses raksturam, tad, izmantojot papildu elektromagnētiskas iedarbības procesa vadībai, to iespējams ietekmēt apzinātā virzienā.
3. Procesu matemātisku modeļu skaitliska simulācija dod detalizētu ieskatu tikai par apzinātajām hidrodinamikas norisēm, bet tikai fizikālo modeļu eksperimentāla izpēte spēj dot iespēju apzināties negaidītas un jaunas fizikālas parādības matemātisko modeļu pilnveidošanai.

Doktora grāda pretendents visos veiktajos eksperimentālajos pētījumos ir bijis galvenais autors, gan kā izpildītājs, gan kā eksperimentālo modeļu izveidotājs, gan arī mērījumu metodoloģijas plānotājs, datu ieguvējs, apstrādātājs un interpretators (izņemot kopsavilkuma tekstā uzrādītos pāris darbu). Lai arī darbs aptver ilgstošu laika periodu, novitāte jāskata pēc darbu pirmpublicācijas laika, kad gandrīz visi eksperimentu rezultāti bija pirmreizēji un atspoguļoja tai laikā neapzinātas fizikālas parādības.



# 1. MAGNĒTISKA LAUKA IESPAIDOTAS ŠĶIDRU METĀLU HIDRODINAMIKAS UN KONVEKTĪVĀS SILTUMA PĀRNESES PĒTĪJUMU ĪPATNĪBAS EKSPERIMENTĀLOS MODEĻOS UN PIELIETOTIE LOKĀLĀ ŠĶIDRUMA ĀTRUMA UN TEMPERATŪRAS SENSORI

## 1.1. Adekvātu eksperimentālu modeļu izveide, ņemot vērā šķidruma dinamikas, siltuma pārneses un robežnosacījumu līdzības prasības

Visu šajā kopsavilkumā apskatīto eksperimentālo pētījumu sākotnē var atrast kādu ļoti konkrētu un praktisku jautājumu, kas būtisks reālo tehnoloģisko procesu attīstīšanai vai fizikālu parādību izskaidrošanai. Pētījumu metode lielākajā daļā darbu ir bijusi eksperimentāla, veicot novērojumus un mērījumus fizikālos modeļos, kas līdz zināmai pakāpei atspoguļo reālo tehnoloģisko procesu vai dabas parādību. Eksperimentāli pētot šķidru metālu hidrodinamiku, jāstopas ar ievērojamām grūtībām tādēļ, ka citos šķidrumsos izmantojamās mērījumu metodes šeit nav piemērojamas, bet jāizmanto īpašas, kas piemērotas šiem necaurspīdīgajiem, elektriski un termiski labi vadošajiem šķidrumiem. Tādēļ īsi jāraksturo galvenie principi šādu īpašu fizikālo modeļu izveidošanai. To var mēģināt apskatīt, raksturojot virkni fizikālu modeļu, kas tika izveidoti vienas tehnoloģisko procesu kopas pētījumiem.

Tā, piemēram, autora darbos [6, 7, 9, 18] ir aprakstīti tādi eksperimentāli modeļi, kuri radās, mēģinot risināt problēmas, ar kurām sastopas, audzējot pusvadītāju monokristālus no šo materiālu šķidrās fāzes. Vairums kristālu audzētāju sākotnēji uzskatīja, ka, apspiežot turbulenci kausējuma plūsmā tiģeli un, vēl jo labāk, pilnībā nomācot konvektīvu siltuma un piemaisījumu pārnesi, varēs iegūt visaugstākās kvalitātes viendabīgus monokristālus (*Fiegl* 1983). Kā zināms, pusvadītāju kausējumi pēc savām fizikālajām īpašībām ir šķidri metāli, kam piemīt augsta elektriskā vadāmība. Tādēļ priekšlikums iedarboties uz pusvadītāju kausējumu ar pastāvīgu magnētisko lauku guva atzinību (*Gelfgat* 1988). Taču diezgan plaši mēģinājumi izstrādāt tehnoloģiju augstākās kvalitātes monokristālu audzēšanai no kausējuma pastāvīgā magnētiskā laukā nedeva cerētos panākumus, un to rezultāti bija grūti izprotami. Pirmais solis fizikālo modeļu veidošanā bija izanalizēt matemātisko modeli, izdalot galvenos kausējuma hidrodinamiku un siltuma un masas pārnesi noteicošos parametrus, tika atrasti visi svarīgākie procesus aprakstošie līdzības kritēriji. Tas ļāva saprast, ka praktiski nav iespējams izpētīt modeli ar pilnu līdzību daudz maz plašā visu procesu noteicošo parametru iespējamā diapazonā (*Hjelming* 1986). Tādēļ par saprātīgu kompromisu tika

pieņemts risinājums, ka modelis tiek vienkāršots, atstājot tikai vienu kausējuma kustību dzenošo iemeslu. Izveidojot un pētot eksperimentālo modeli, tika izvirzīts uzdevums noteikt, kā pastāvīgs magnētiskais lauks visā bezdimensionālā Hartmaņa skaitļa diapazonā mijiedarbojas ar šķidrā metāla kustību, ko dzen pārsvarā tikai viens spēks, kas aprakstāms ar viena bezdimensionāla kritērija diapazonu. To starpā naturālo konvekciju raksturojošais Grashofa skaitlis, termokapilāro konvekciju – Marangoni skaitlis, uzspiesto konvekciju – Reinoldsa skaitlis un Rosbija skaitlis, termoelektromagnētisko konvekciju – “Šerklifā” skaitlis utt.

Veidojot fizikālus modeļus, kuru mērķis ir pētīt šķidra metāla kustību magnētiskā laukā, jāsaprotas ar īpašām problēmām, realizējot līdzības nosacījumus attiecībā uz robežnosacījumiem. Starp tiem kā problemātiskākie jāmin:

- 1) nosacījumi uz brīvās virsmas;
- 2) kinemātiskie nosacījumi uz šķidrums – cieta viela saskarsmes virsmas;
- 3) elektriskie nosacījumi uz šķidrums – cieta viela saskarsmes virsmas;
- 4) un siltuma nosacījumi uz šķidrums – cieta viela saskarsmes virsmas.

Fizikālajos modeļos, kas aprakstīti apskatā minētajos darbos, par darba šķidrumu izmantoti kausējumi ar zemu kušanas temperatūru – tīrs Gallijs, eutektika In-Ga-Sn, dzīvsudrabs un nātrijs. Parasti, ja nav pieliktas īpašas pūles, šķidrā metāla virsma ir oksidējusies un uz tās izveidojusies nepārtraukta oksīda plēve, kas pieļauj zināmas virsmai normālas deformācijas, taču izslēdz tangenciālo šķidruma ātrumu uz šīs robežas. Kad šķidrā metāla plūsma ir pietiekami intensīva, šī oksīda plēve tiek nepārtraukti salauzīta. Pie tam oksīda daļiņas var tikt ienestas šķidruma tilpumā, no kurienes vēlāk nosēsties uz trauka cietajām sienām. Tā, piemēram, darbā [9] aprakstīts eksperimentāls uzspiestās konvekcijas pētījums, kura gaitā tika iegūti savādi rezultāti par diferenciālas diska un tīģeļa rotācijas ierosinātas uzspiestās konvekcijas ātruma struktūru. Izrādījās, ka pie rotējošā diska bija pielīpis nekustīgs slānis no pastas, kuru izveidoja šķidrā metāls un mazas cieta oksīda daļiņas. Masīvu šķidrā metāla oksidēšanos var novērst, pārklājot metāla virsmu ar cita šķidra šķidruma slāni, piemēram, pārklājot galliju vai In-Ga-Sn ar vāju sālskābes ūdens vai etilspirta šķīdumu. Taču katrā gadījumā ir sevišķi uzmanīgi jāseko, kas notiek uz robežām un kā tas var ietekmēt rezultējošo konvekcijas ātruma struktūru. Tā, piemēram, darbā [6], pētot uzspiesto konvekciju aksiāla magnētiska lauka ietekmē, ko kvarca tīģeļi ierosina rotējošs disks, tika novērota pilnīgi absurda kustība. Kamēr magnētiskā lauka nebija, nekas savāds netika pamanīts. Taču, iedarbojoties pietiekami stipram pastāvīgajam magnētiskajam laukam, viss šķidrā metāls sāka rotēt kā ciets ķermenis kopā ar disku. Izrādījās, ka sālskābes šķīdums bija pilnībā saslapinājis kvarca tīģeļa sienu, izveidojot šķidru slāni starp šķidro metālu un kvarca sienu. Vislabākais risinājums ir, ja šķidrā metāls labi noslapina cietās robežas. Taču to var panākt tikai, ja siena ir metāliska. Dielektrisku sienu var pārklāt ar nerūsoša tērauda ļoti plānu foliju, kuru arī var samērā viegli noslapināt ar šķidru galliju vai In-Ga-Sn. Ja elektriskie robežnosacījumi pieprasa labi vadošu sienu, tad bieži vien problēmas sagādā nepārtraukta laba elektriskā kontakta nodrošināšana.

Šeit bez sākotnējās slāpinašanas nodrošināšanas vēl arī jāņem vērā, ka laikā notiek šķidrā metāla atomu difūzija cietajā sienā, kur var veidoties intermetāliski savienojumi, kurus šķidrās metāls vairs neslapina.

Kad nepieciešams realizēt definētus robežnosacījumus, pētot konvektīvo siltuma pārnēsi, jāpievērš uzmanība ne tikai relatīvajai siltumvadāmībai, bet noteikti arī siltumietilpībai (Gill 1974) gadījumos, ja konvekcija ir nestabila un tajā novērojami liela mēroga laikā mainīgi virpuļi (Hurle 1974). Tā darbā [18], kas aprakstīts arī kopsavilkuma 4.1. paragrāfā, pētot oscilējošu naturālās konvekcijas režīmu, pie cietās trauka sienas, kuras materiāla siltumvadāmība ir daudz mazāka par šķidro metālu, tika novērota ļoti būtiska momentālā temperatūras gradienta normālā komponente.

Augstāk minētais tikai pievērš uzmanību tam, ka katrā fizikālā modelī ar šķidru metālu kā darba šķidrumu nekad nevar neko iepriekš pieņemt attiecībā uz robežnosacījumiem. Katrā gadījumā tie ir ārkārtīgi rūpīgi jāapzina un jākontrolē.

## 1.2. Ātruma sensoru ierobežotā pielietojamība šķidru metālu plūsmās magnētiskā laukā

Lokālā ātruma mērījumi šķidru metālu plūsmās noslēgtos tilpumos ir ļoti grūts uzdevums jebkurā situācijā. Diemžēl caurspīdīgos šķidrumos tik izcili labās optiskās metodes nav pielietojamas šķidru metālu plūsmu pētījumiem, jo tie gadījumos, ja slāņi ir biežāki par dažiem milimetriem, ir necaurspīdīgi pat rentgena starojumam. Pēdējos gados plašu ievēribu guvusi ātruma mērīšanas metode, izmantojot ultraskaņu. Taču arī tā, kaut arī bieži tiek saukta par tādu, kas neperturbē šķidruma plūsmu, it nebūt nav ideāla. Pirmām kārtām, ultraskaņas ātruma mērījumiem nepieciešams, lai šķidrās metāls būtu piesārņots ar cietām daļiņām, no kurām ultraskaņai atstaroties. Otrkārt, ja šķidrā metāla apgabals, kurā jāmēra ātrums, ir lielāks par dažiem centimetriem, tad ultraskaņas kūļa izkliede jau nosaka ievērojamu nenoteiktību ātruma sadalījumā (Takeda 1997, Takeda 2002, Cramer A. 2005).

Šajā nodaļā netiek dots šķidru metālu lokālā ātruma mērīšanas metodikas apraksts, bet gan drīzāk ir parādīti katras metodes ierobežojumi un trūkumi. Var droši apgalvot tikai vienu – nav universālas metodes, katrā individuālā gadījumā jāizvērtē metodes pielietojamība šķidra metāla ātruma mērījumiem noslēgtā tilpumā. Sensora izraisītā perturbācija var būt vērā neņemama kanāla plūsmā, kur tā “aizpeld pa straumi”, taču absolūti nepieņemama noslēgtā tilpumā.

### 1.2.1. Šķidruma kustības magnētiskā laukā inducētā elektriskā potenciāla diferenciāli mērījumi

Šķidruma plūsmas ātruma noteikšana, mērot elektrisko lauku, ko inducē šķidruma kustības ātruma komponente, kas perpendikulāra pastāvīga magnētiskā lauka virzienam, ir visplašāk lietotā un piemērotākā šķidru metālu

plūsmu pētījumiem visos gadījumos, kad tā ir izmantojama (Tsinober 1987). Tā ir lietota arī darbos [6, 9, 10, 11], kas ietverti šajā pārskatā. Tā kā šiem mērījumiem nepieciešami tikai elektrodi, kas šķidrās metālos var būt vienkārši izolēti elektrodi, kuri elektriski kontaktē ar šķidrums tikai to galos, tad sensora ģeometriskie izmēri var būt pietiekami mazi, un to radītā perturbācija šķidruma plūsmā arī pietiekami maza. Taču šai metode ir vesela virkne ierobežojumu.

Pirmkārt, ja pastāvīgais magnētiskais lauks ir vājš – MHD-mijiedarbības parametrs nav pietiekami liels, tad jāmēra elektriskā potenciāla otrais atvasinājums divos virzienos, kuri ir perpendikulāri pastāvīgā magnētiskā lauka virzienam, gūstot informāciju tikai par vienu ātruma rotora komponenti. Tam nepieciešama vismaz 5 elektrodu zonde, kuras summārā kļūda parasti ir liela. Otrkārt, ja šķidrās metāls nav izotermisks, tad ātruma mērījumiem nepieciešams nomērīt arī temperatūras gradientu. Treškārt, ja arī šķidrās metāls ir praktiski izotermisks, taču tā temperatūra ir ievērojami augstāka par laboratorijas temperatūru, tad elektrodu stieples materiāla termoelektrisko īpašību nenoteiktība var izraisīt ievērojamu kļūdu.

Diemžēl pat stiprā viendabīgā pastāvīgā magnētiskā laukā šī metode nesniedz informāciju par šķidruma plūsmas ātruma komponenti, kas paralēla lauka virzienam.

Aksiāli simetriskas šķidrās metāla apgabala konfigurācijas gadījumā, kad uzlikts aksiāls pastāvīgais magnētiskais lauks, kā darbā [9], nav iespējams nomērīt arī radiālo ātruma komponenti, jo aksiālas simetrijas gadījumā elektriskā potenciāla gradienta azimutālās komponentes nav.

### ***1.2.2. Potenciāla diferencu ātruma sensors šķidriem metāliem ar iebūvētu miniatūru pastāvīgo magnētu***

Šis ātruma sensors var tikt izmantots gadījumos, kad nav pastāvīga magnētiskā lauka (Ricou 1982 un von Weissenfluh 1985). Taču šādas zondes radītā perturbācija katrā gadījumā obligāti ļoti kritiski jāizvērtē. Visspilgtāk to var ilustrēt ar rezultātu, ko deva mēģinājums izmantot potenciāla diferencu ātruma sensoru ar retzemju pastāvīgo magnētu, kura diametrs bija tikai 1 mm, darbā [15] raksturīgā naturālās konvekcijas ātruma nomērīšanai. Tuvinot šādu ātruma sensoru šķidrās metāla virsmai, taču pat nepieskaroties tai, tika izjaukts naturālās konvekcijas harmoniski oscilējošais trīsdimensionālais režīms. Pat palielinot Grashofa skaitli 2,5 reizes, oscilējoša konvekcija netika vairs novērota tik ilgi, kamēr netika aizvākts sensors ar pastāvīgo mazā izmēra magnētu.

Darbā [38] detalizēti aprakstīta šī tipa zonde, kuras perturbācija samazināta līdz minimumam, ko pieļauj kompromiss ar mērījumu kļūdu. Zonde var tikt veiksmīgi izmantota, ja tās lokalizētais magnētiskais lauks būtiski neietekmē kausējuma plūsmu tās apkārtnē – MHD-mijiedarbības parametram, kurā raksturīgais izmērs ir zondes diametrs, ir jābūt pietiekami mazam. Kausējumu fizikālās īpašības nosaka to, ka identiskā situācijā dzīvsudraba plūsmā zondes perturbācija būs 110 reizes mazāka nekā šķidrās nātrijā.

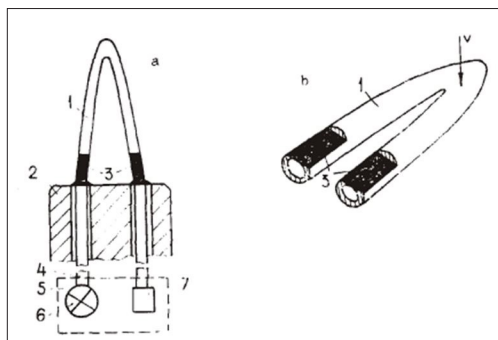
Cita rakstura būtisks ierobežojums šī ātruma sensora lietojumam ir stipru maiņstrāvas un maiņstrāvas magnētiskā lauka vienlaicīga klātbūtne mērījumu vietā. Maiņstrāva, mijiedarbojoties ar zondes magnētiņa pastāvīgo magnētisko lauku, rada zīmes mainīgu kustību, kura savukārt, mijiedarbojoties ar maiņstrāvas magnētisko lauku, rada dubultfrekvences elektrisko lauku. Šī dubultfrekvences elektriskā lauka vidējā vērtība var nebūt nulle, tā atkarīga no fāzu nobīdes starp maiņstrāvas magnētisko lauku un zīmes mainīgo inducēto ātrumu. Šāda situācija tika novērota darbā [53], kad tika mēģināts izmantot zondi ļoti stipra 14 Hz magnētiska lauka ierosinātas dzīvsudraba plūsmas pētījumiem.

### 1.2.3. Termoanemometrs ātruma mērījumiem šķidrās metālos

Termoanemometrs ar karstu stiepli, kurš izmantots naturālās konvekcijas pētījumam [10], mērījumiem šķidrā metālā ir īpaši jāsagatavo (Platnieks 1994). Tā kā sensora jutība pamatojas siltuma apmaiņā ar šķidrums plūsmu, tad karstā diega slāpinašanai jābūt perfekta, uz tā nedrīkst salipt sārņi. 10 mikronu tieva metāla stieplīte tiek rūpīgi elektriski izolēta un pēc tam pārklāta ar zeltu. Termoanemometru mērījumiem šķidrā metālā var izmantot tikai vienu reizi un neilgu laiku, līdz zelts izšķīst šķidrā metāla plūsmā. Taču tas nav galvenais trūkums. Lai šis sensors būtu ātruma jutīgs, tam jāuzsilda pietiekami liels šķidrums apgabals tā apkārtnē, lai lokālais Peklē skaitlis būtu daudz lielāks par vienu. Rezultātā, ņemot vērā šķidra metāla augstu temperatūras difūzijas koeficientu, ja šai šķidrums apgabalā nav ievērojama šķidrā metāla plūsmas ātrums, tad no karstā diega karsēšanas vien sāk veidoties itin jūtama naturālā konvekcija. Tādēļ termoanemometrs šķidrās metālos var tikt izmantots lielu ātrumu mērīšanai un, vēlams, kanāla tipa plūsmā, kur izdalītais siltums tiek aizvests prom.

### 1.2.4. Optiski mehāniskais ātruma sensors

Darbā [8] īsi aprakstīti autora mēģinājumi izmantot optiski mehānisku sensoru šķidra metāla plūsmas mērījumiem (skatīt 1. att.). Sensora pamatideja



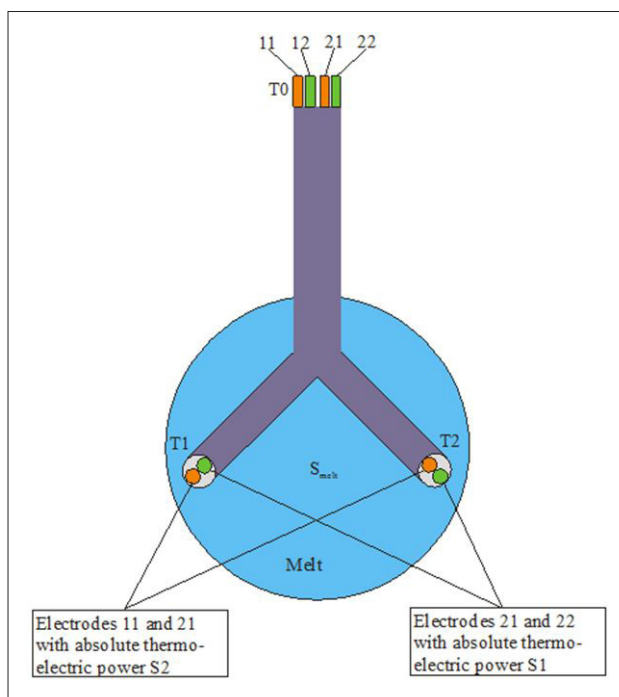
1. attēls. Optiski-mehāniskā ātruma sensora shēma

bāzēta uz šķidrums kustības ierosinātu optiska gaismas vada cilpas deformāciju normālo un tangenciālo spriegumu ietekmē (Zhilin 1987).

Diemžēl jāatzīst, ka sensors praksē nav izmantojams tādēļ, ka pat niecīgas temperatūras svārstības izraisa ļoti būtisku sensora jutības un signāla “nulles” vērtības izmaiņu.

### 1.2.5. Sensors absolūtā termo-EDS noteikšanai

Autora darbs pie sensora šķidru metālu absolūta termo-EDS noteikšanas rosināja jaunu ideju – bināru sakausējumu segregācijas konstatēšanai izmantot sensoru, kura principiālā shēma parādīta 2. attēlā. Sensors izmanto termopāri, kura elektrodi vadi elektriski noslēdzas caur šķidro metālu (von Weissenfluh 1985, Ubbelohde 1966). Darbos [34, 31, 12] aprakstīti šķidrās LiPb eutektikas un PbSn sakausējumu absolūtā termo-EDS mērījumi. Ja bināra sakausējuma absolūtais termo-EDS ir jau noteikts būtiskajā koncentrācijas un temperatūras apgabalā, tad, ja sākas eutektikas segregācija, sensora signāls var to uzrādīt. Tāda iespēja var būt nozīmīga atomenerģētikas un pētniecības iekārtu dzesēšanas blanketos, kuros izmanto šķidru bināru sakausējumu eutektikas, jo segregācija var izraisīt nopietnu drošības apdraudējumu.



2. attēls. Termo-EDS noteikšanas zondes shēma

## 2. AUGSTAS FREKVENCES MAGNĒTISKĀ LAUKA IEROSINĀTAS ŠĶIDRA METĀLA KUSTĪBAS PĒTĪJUMI

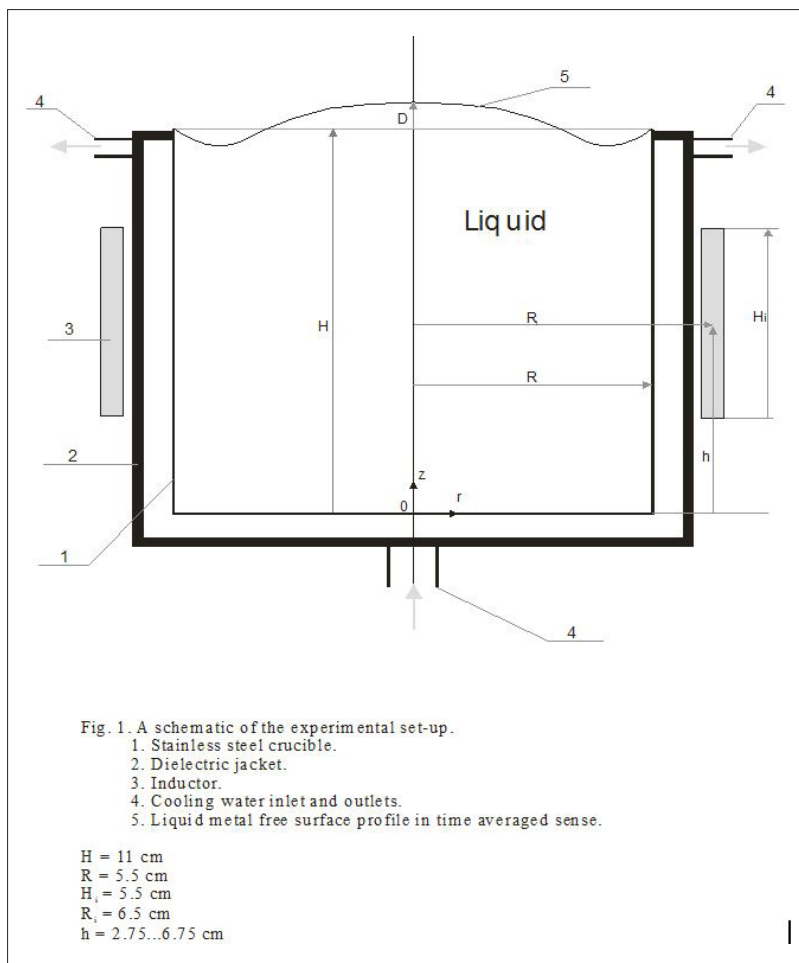
Šajā nodaļā apskatītajos darbos [5, 11, 12, 17, 25, 33, 35, 38] aprakstīti eksperimentāli pētījumi par tādām šķidra metāla plūsmām noslēgtos tilpumos, kuras izraisījis “augstfrekvences” magnētiskā lauka inducēts elektromagnētiskais spēks. Šeit frekvence par augstu tiek saukta tad, kad šķidrā metālā eksistē skinslānis, kurš ir daudz plānāks par šķidruma apgabala raksturīgo izmēru, taču tomēr nav tik plāns, lai, analizējot uzdevumus, tilpuma elektromagnētisko spēku varētu aizstāt ar ekvivalentu virsmas spēku. Šādas plūsmas šķidros metālos realizējas daudzos industriālos procesos, piemēram, metālu un to sakausējumu indukcijas kausēšana nolūkā tos sagatavot sekojošam kristalizācijas procesam (*Taberlet* 1985 un *El-Kaddah* 1983). Kā likums, vienmēr šādas šķidra metāla plūsmas ir nestabilas un turbulentas. Šķidru metālu hidrodinamikas pētījumi laboratorijas modeļos ir ļāvuši gūt nepieciešamo informāciju, lai, pirmkārt, industriālos procesus varētu adekvāti modelēt skaitliski, un, otrkārt, šajos pētījumos ir bijusi iespēja izmēģināt jaunus iedarbības līdzekļus, lai mērķtiecīgi iespaidotu šķidrā metāla plūsmu. Visu šajā nodaļā apskatīto darbu novitāti apstiprina tas, ka iegūtie eksperimentālie rezultāti ir unikāli un iegūti pirmo reizi, būtiski papildinot datus, kas iegūti līdzīgos agrāk veiktos pētījumos.

### 2.1. Laikā vidējotās šķidrums kustības struktūras un turbulences intensitātes mērījumi cilindriskā tīgelī

Darbā [5] aprakstītais eksperimentālais pētījums tapa ar nolūku eksperimentāli pārbaudīt skaitlisko modeli, lai noskaidrotu piemērotāko turbulences modeli (*Baake* 1995) šāda tipa plūsmu skaitliskajam aprakstam. Eksperimentālais modelis netika veidots tā, lai būtu tieši līdzīgs kādam industriālam procesam. Vistuvāk modelis atbilst procesam, kurā cilindriskā tīgelī induktīvi tiek pārkausēti metāli. Augstfrekvences strāvas induktora spoles, kas koaksiāli aptvēra cilindrisku tīgelī ar šķidru metālu, augstums bija divas reizes mazāks par šķidrā metāla apgabala augstumu (skatīt 3. att.). Induktors tika novietots vertikālā pozīcijā tā, lai radītu šķidrā metālā pa vertikāli stipri variējošu inducēto elektromagnētisko spēku. Nerūsoša tērauda tīgelī piepildīja ar šķidru eutektisku sakausējumu In-Ga-Sn. 2400 Hz strāva spolē inducēja tādas pašas frekvences maiņstrāvu un divkārtas frekvences pulsējošu (pirmajā tuvinājumā) spēku skinslāni.

Šķidrums metāls tika uzturēts praktiski izotermisks, realizējot tīgelā ārējo dzesēšanu ar ļoti intensīvu ūdens plūsmu. Tīgelā augstums bija  $H = 11$  cm,

rādiuss  $R = 5.5$  cm, nerūsoša tērauda sienu biezums 0.5 mm. Šķidra metāla plūsmas raksturs šādā situācijā ir būtiski atkarīgs no parametra bezdimensionālā frekvence –  $R_\omega = \mu\sigma R^2$  lieluma ( $\mu$  – absolūtā magnētiskā caurlaidība,  $\sigma$  – metāla elektrovadāmība un  $\omega$  – maiņstrāvas cikliskā frekvence), kas šajā eksperimentālajā modeli vienmēr bija 190. Plūsmas intensitāti raksturojošais bezdimensionālais Reinoldsa skaitlis  $Re = u_a R / \nu$  šajā gadījumā tiek izteikts ar Alfvena ātrumu –  $u_a = B / (\mu \cdot \rho)^{1/2}$ , kur  $B$  ir maiņstrāvas magnētiskā lauka indukcija un  $\rho$  ir šķidrā metāla blīvums. Lielākā Reinoldsa skaitļa vērtība eksperimentā sasniedza 120 000.



3. attēls. Eksperimentālā modeļa shēma augstfrekvences magnētiska lauka inducētās kustības izpētei



Šķidrā metāla plūsmas lokālais ātrums tika mērīts ar potenciāla diferencu ātruma sensoru ar iebūvētu miniatūru pastāvīgo magnētu (*Ricou* 1982 un *von Weissenfluh* 1985). Šis sensors ļāva gūt informāciju vienlaicīgi par vertikālo un radiālo momentālajām ātruma komponentēm šķidrā metāla plūsmas kodola apgabalā. Taču ar to nebija iespējami mērījumi skinslānī, kur tas mijiedarbojās ar maiņstrāvu un tās magnētisko lauku.

Eksperimenta gaitā tika nomērītas divas ātruma komponentes 120 radiālā šķēluma punktos, katrā punktā turbulentā ātruma signālu reģistrējot 5 minūtes. Tas ļāva iegūt informāciju par laikā vidējoto ātruma lauku un arī deva pietiekošu informāciju, lai raksturotu turbulenci katrā punktā ar tādiem parametriem kā laikā mainīgās ātruma daļas standarta deviācija vai integrālā enerģija. Šādi mērījumi tika veikti pie vairākām induktora strāvas vērtībām. Papildus vēl tika variēts arī cits parametrs – induktora spoles pozīcija tika nobīdīta vertikāli, tuvāk brīvajai virsmai. Iegūtie dati ļāva katram plūsmas režīmam uzzīmēt pietiekami adekvātu laikā vidējotā meridionālā ātruma vektoriālo lauku un arī atspoguļot turbulences intensitāti ar standarta deviācijas sadalījuma karti meridionālajā šķēlumā.

Nomērītais laikā vidējotā ātruma lauks vienā radiālā šķēlumā liecina, ka kvazistacionārā kustība bija aksiāli simetriska mērījumu kļūdas robežās tad, kad induktora spole atradās vertikālajā pozīcijā, kas sakrīta ar  $H/2$ . Ja spole tika jūtami pavirzīta uz augšu vai leju, ātruma lauks zaudēja aksiālo simetriju. Tādēļ detalizēti pētījumi tika veikti tikai ass simetriskiem plūsmas režīmiem, jo eksperimentāli izpētīt trīsdimensionālu ātruma lauku, kas prasītu nesamērīgi lielu mērījumu skaitu, nebija praktiski iespējams.

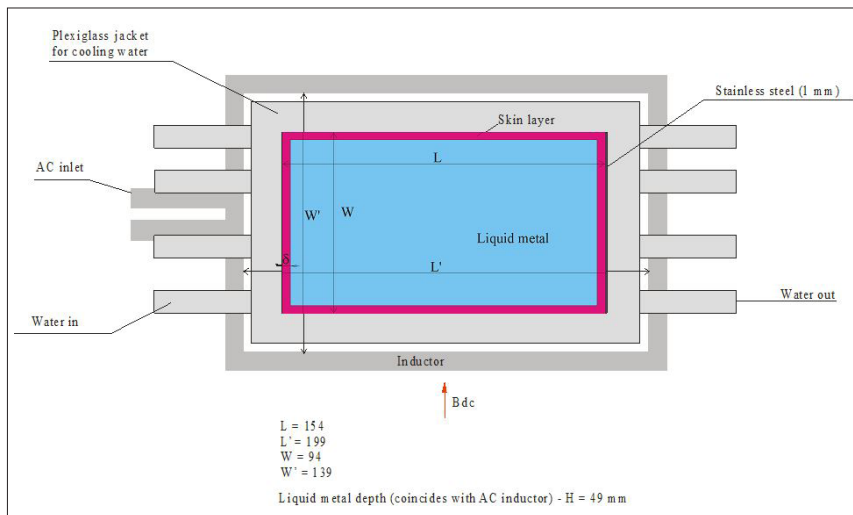
Tika atrasts, ka maksimālais laikā vidējotais ātrums novērojams tīģeļa sienas tuvumā, aptuveni induktora spoles pusaugstumā, kur tika novērota radiāla, uz iekšu vērsta strūkļa. Pieņemot vērtību šai pozīcijā par raksturīgo plūsmas ātrumu, tika atrasts, ka tas pieaug proporcionāli induktora strāvai jeb Reinoldsa skaitlim un ir aptuveni 0.44 no Alfvēna ātruma mēroga.

Pārsteidzoši, ka ātruma pulsāciju intensitāti raksturojošā standarta deviācija, ja to attiecina pret dotā plūsmas režīma raksturīgo ātrumu, pat nedaudz samazinājās, pieaugot Reinoldsa skaitlim. To varētu skaidrot ar tendenci lielākajiem laikā mainīgajiem virpuļiem sabrukt, pieaugot plūsmas intensitātei. Interesantākā šīs tipa plūsmas īpatnība ir tā, ka pat pie vismazākajiem eksperimentā realizētajiem Reinoldsa skaitļiem plūsma bija ārkārtīgi nestabila.

Šajā eksperimentālajā pētījumā iegūtie rezultāti tika izmantoti skaitliskā modeļa pilnveidošanai, pirmām kārtām turbulences modeļa pārbaudei. Tas deva iespēju ar lielāku ticamības pakāpi izmantot skaitlisko modelēšanu, lai prognozētu notiekošo reālā industriālā procesā, konkrēti – šķidra TiAl sakausējuma homogenizācijai un pārkarsēšanai semilevitācijas indukcijas krāsnī.

## 2.2. Pastāvīgā lauka izmantošana vienlaikus ar augstfrekvences magnētisko lauku šķidrums plūsmas un brīvās virsmas stabilizācijai

Kā aprakstīts kopsavilkuma 2.1. sadaļā, augstfrekvences indukcijas krāsnī novērojamā šķidrā metāla plūsma ir ārkārtīgi nestabila. Šķidrā metāla nestabilitāte šajos gadījumos ļoti krasi izpaužas uz brīvās virsmas, kur novērojamas ļoti spēcīgas, laikā mainīgas brīvās virsmas deformācijas. Kad šāda veida industriālā procesā brīvās virsmas deformācijas ir traucējošas, iespējams pielietot papildu elektromagnētisku iedarbību, lai stabilizētu šķidrums kustību un brīvo virsmu (Kimura 1996 un Raming 2001). Darbos [11, 17, 28, 35, 37, 40, 41] aprakstīti eksperimenti, kuros uzskatāmi tika nodemonstrēti, kā, papildus iedarbojoties uz šādu plūsmu ar pastāvīgu magnētisko lauku, tika panākta šķidrā metāla plūsmas stabilizācija un brīvās virsmas nomierināšana. Šie rezultāti ir ļoti būtiski arī semilevītācijas indukcijas kausēšanas procesam, jo šeit plūsmas stabilizācija var sniegt nepieciešamo turbulētās siltuma pārneses apspiešanu, samazinot siltuma zudumus un padarot šo procesu enerģētiski daudz izdevīgāku (Bojarevics V. 2004). Veiktie detalizētie eksperimentālie pētījumi ļāva noteikt nepieciešamos pastāvīgā magnētiskā lauka parametrus, kas nepieciešami, lai sasniegtu brīvās virsmas stabilizāciju un turbulences apspiešanu plūsmas tilpumā.



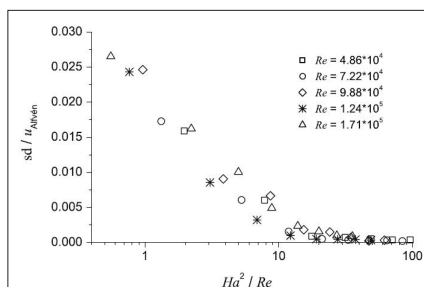
4. attēls. Eksperimentālā modeļa shēma šķidrā metāla kustības izpētei mainīgā un pastāvīgā magnētiskā laukā

Eksperimentālā modeļa, kas shematiski parādīts 4. att., ģeometriju noteica konkrētais tehnoloģiskais process, kurā bija nepieciešams panākt šķidrā metāla

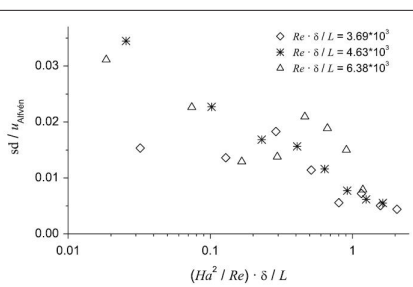
plūsmas stabilizāciju. Pārējos aspektos modelis ir uzbūvēts līdzīgi tam, kā aprakstīts 2.1. sadaļā. Modelis kopumā tika ievietots līdzstrāvas elektromagnētā tā, ka bija iespējams iedarboties uz šķidrā metāla plūsmu ar viendabīgu pastāvīgu magnētisko lauku. Pie tam varēja realizēt divas pastāvīgā lauka orientācijas attiecībā pret brīvās virsmas plakni – normālu, tas ir vertikālu, un horizontālu (paralēlu brīvajai virsmai), normālu tīģeļa garākajai sienai.

Šādas šķidra metāla plūsmas raksturošanai bez Reinoldsa skaitļa, kurā kā raksturīgais ātrums izmantots Alfvēna ātruma mērogs, nepieciešams arī Hartmaņa skaitlis  $Ha = B \cdot L \cdot (\sigma / (\rho \cdot \nu))^{1/2}$ , kur  $L$  ir tīģeļa raksturīgais izmērs. Eksperimenta daļa, kura tika veikta, iedarbojoties ar vertikālu pastāvīgo magnētisko lauku, tika veikta pie bezdimensionālās frekvences  $R_\omega = 1476$ , kas atbilst maiņstrāvas lauka frekvencei 2400 Hz, un pie  $R_\omega = 4920$  ( $f = 8000$  Hz), iedarbojoties ar pastāvīgo magnētisko lauku, kas paralēls brīvajai virsmai. Induktora spoles augstums šajā modeli sakrita ar šķidrā metāla augstumu.

Plūsmas ātruma mērīšanai tika izmantoti vairāki potenciāla diferenciālu ātruma sensori, kuru darbība aprakstīta kopsavilkuma pirmajā nodaļā. Vertikālā pastāvīgā magnētiskajā laukā netika veikti detalizēti laikā vidējotā plūsmas ātruma lauka mērījumi, bet tika veikti mērījumi, kas deva iespēju parādīt plūsmas stabilizāciju. Horizontālā pastāvīgajā magnētiskajā laukā tika mēģināts iegūt arī informāciju par laikā vidējotā plūsmas ātruma lauku, mērot divas ātruma komponentes – vertikālo un longitudinālo (garākās tīģeļa sienas virzienā).



**Fig. 5** Statistical deviation of the velocity fluctuations at the same position as in Fig. 4 for different Reynolds numbers. The statistical deviation is based on the absolute velocities calculated from both the horizontal components and normalised with respect to Alfvén's velocity



**Fig. 6** Statistical deviation of the velocity fluctuations in the skin layer at  $x = 0.033 \cdot L$ ,  $y = 0.055 \cdot W$ ,  $z = 0.5 \cdot H$ . The interaction parameter as well as the Reynolds numbers are calculated with the skin depth as the characteristic length. Below  $Re = 10^5$  (cf. legend in Fig. 5), the location of the maximum velocity changes. For the three datasets plotted here, the symbols agree with respect to the parameters  $B_{AC}$  and  $B$  to the corresponding ones in Fig. 5

### 5. un 6. attēls. Turbulento ātruma pulsāciju apspiešana plūsmas kodolā un skislāņa apgalā

Iedarbojoties uz augstfrekvences magnētiskā lauka ierosināto plūsmu ar vertikālu pastāvīgo magnētisko lauku, tika panākta krasa turbulences apspiešana šķidrā metāla tilpumā. Ātruma pulsāciju standarta deviācija plūsmas kodolā, kad pastāvīgais magnētiskais lauks sasniedza 0.3 T, samazinājās gandrīz simtkārtīgi

līdz limenim, kas bija salīdzināms ar ātruma mērījumu trokšņa limeni. Tikai skinslāņa apgabalā pie vertikālajām tīģeļa sienām saglabājās ievērojama turbulences intensitāte, kaut arī šeit tā samazinājās vairākkārtīgi. Iegūto rezultātu analīze parādīja, ka plūsmas kodola apgabalā, kur nav aktīvo augstfrekvences elektromagnētisko spēku, kas izraisa šo plūsmu, turbulences apspiežama, ja parametrs  $Ha^2/Re \gg 1$ . Turpretī skinslāņa apgabalā vēl saglabājās ievērojamas plūsmas ātruma pulsācijas. Izvērtējot ātruma mērījumu rezultātus skinslāņa apgabalā, var izteikt minējumu, ka turbulences šeit arī var tikt apspiesta, ja parametrs  $(Ha^2/Re) \cdot \delta/L \gg 1$ . Šeit  $\delta = (2/(\mu\sigma\omega))^{1/2}$  ir skinslāņa biezums. Var iedomāties, ka stiprā vertikālā magnētiskā laukā plūsma neizkļūst no apgabala, kur darbojas aktīvie, plūsmu dzenošie spēki. Šos ātruma pulsāciju mērījumus ļoti uzskatāmi apstiprināja vizuālie novērojumi. Iedarbojoties vertikālam pastāvīgam laukam pie  $Ha^2/Re \gg 1$ , šķidrā metāla brīvā virsma kļuva absolūti gluda un pilnīgi nekustīga visur, izņemot šauru joslu pie tīģeļa sienām, kur vēl saglabājās viegla virsmas virmošana.

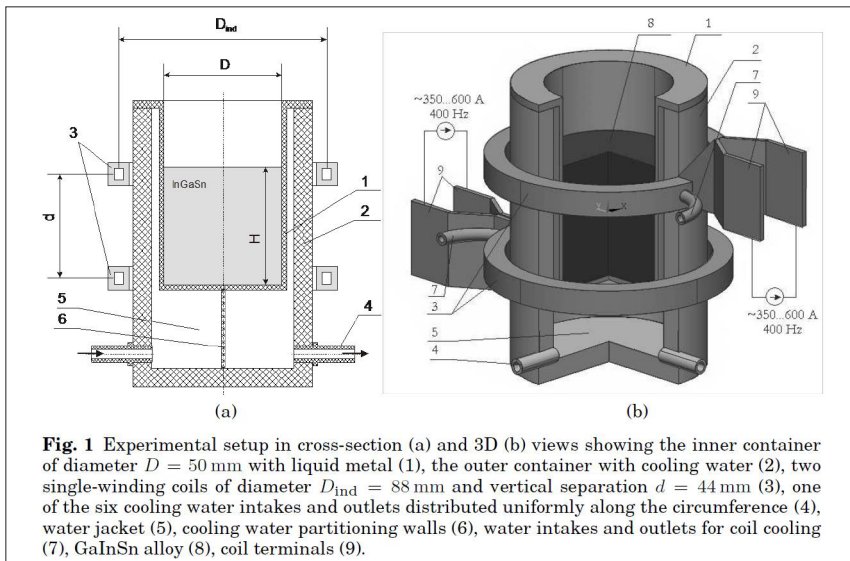
Glūži atšķirīga bija horizontālā pastāvīgā magnētiskā lauka iedarbība uz augstfrekvences magnētiskā lauka ierosināto šķidrā metāla plūsmu. Pirmkārt, jau vizuālie novērojumi parādīja, ka brīvās virsmas deformācijas saglabā ievērojamu amplitūdu uz visas brīvās virsmas pat pie  $Ha^2/Re \gg 1$ . Taču deformācijas radikāli izmainīja savu raksturu. No haotiskām, gadījuma rakstura tās ieguva sakārtotu viļņu izskatu. Pie tam šo virsmas viļņu kores bija paralēlas horizontālā pastāvīgā magnētiskā lauka virzienam. Ātruma mērījumi šķidrā metāla tilpumā uzrādīja šiem novērojumiem saskanīgus rezultātus. Laikā vidējotais ātruma lauks kļuva it kā divdimensionāls. Ātruma variācija pastāvīgā lauka virzienā kļuva ļoti maza, atgādinot Hartmaņa ātruma profilu plūsmai kanālā. Raksturīgais laikā vidējotais ātrums neuzrādīja ne mazāko tendenci samazināties. Ātruma pulsāciju standarta deviācija, pieaugot pastāvīgā lauka indukcijai, ievērojami, pat līdz divām reizēm, palielinājās. Var tikai izteikt pieņēmumu, ka ātruma pulsāciju un raksturīgā ātruma samazināšanos varētu sagaidīt, kad disipācija Hartmaņa robežslānī  $\delta_{Ha}$  uz vertikālajām pastāvīgajam laukam perpendikulārajām sienām kļūst pietiekami augsta –  $Ha/Re \sim 1$ , lai apspiestu maiņstrāvas lauka ierosināto plūsmu. Formāli šis beidzamais bezdimensjonālais parametrs ir  $(Ha^2/Re) \cdot \delta_{Ha}/L = Ha/Re$ , kur  $\delta_{Ha} = L/Ha$ . Praksē, lai iegūtu  $Ha/Re \sim 1$ , nepieciešams tik stiprs pastāvīgais magnētiskais lauks, ka to var iegūt tikai ar supravadošu elektromagnētu. Šajā gadījumā pie  $Ha/Re \ll 1$  var izteikt minējumu, ka apstākļos, kad skinslāņa biezums bija ievērojami biežāks par Hartmaņa slāni, horizontālais pastāvīgais lauks sev paralēlo ātruma virpuļainības komponenti pārnesa no skinslāņa apgabala uz visu plūsmas apgabalu.

Šis eksperiments parādīja, ka pastāvīgais magnētiskais lauks var efektīvi tikt izmantots turbulences un brīvās virsmas deformāciju apspiešanai plūsmās, ko ierosinājis augstfrekvences magnētiskais lauks. Taču ļoti uzmanīgi jāizvērtē, kāda pastāvīgā lauka orientācija var dot vēlamo rezultātu.

### 2.3. “Skrejoša” magnētiskā lauka izmantošana šķidra metāla kustības organizācijai augstfrekvences strāvu gadījumā

Augstfrekvences indukcijas krāsnīs izkausējot un homogenizējot šķidro sakausējumu, inducētais plūsmas ātruma lauks var nebūt optimāls vēlamajai masas un siltuma pārnesei. Lai varētu intensificēt maisīšanu un kontrolēt laikā vidējotā ātruma lauka struktūru, tika piedāvāts iedarboties ar skrejošu magnētisko lauku, kas labi pazīstams no standarta 50 Hz maiņstrāvas risinājumiem. Šajā gadījumā pie daudz augstākām frekvencēm atšķirīgais ir ļoti izteikta skinefeka izpausme. Otrs moments, kas ir jauns šajā uzdevumā, ir tīri elektrotehniska rakstura problēma, kā iegūt starp divām vai vairākām maiņstrāvas spoļu grupām vajadzīgo strāvas fāzes nobīdi, izmantojot vienu vienfāzes barošanas avotu. Teorētiski šo problēmu ir piedāvāts risināt citos darbos (Priede 2007 un Ernst 2005). Tradicionālie risinājumi, kas zināmi priekš 50 Hz strāvas, nav pieņemami augstfrekvences strāvas gadījumā.

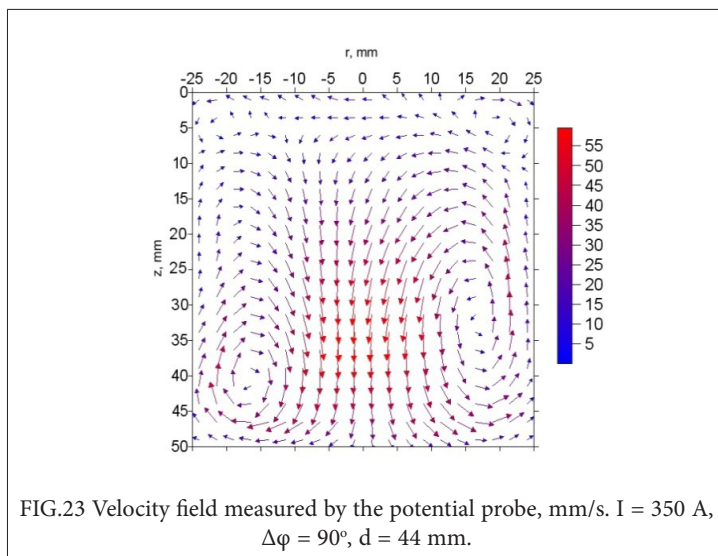
Aktīvo rezistoru izmantošana spoļu impedanču sabalansēšanai, lai nodrošinātu strāvu amplitūdu vienādību katrā no spolēm, nevar tikt izmantota, jo kompensējamā impedances ir pārāk liela augstfrekvences gadījumā. Zudumi šādos papildu aktīvajos rezistoros būtu milzīgi. Darbos [12, 33, 35] īsi sniegts ieskats par eksperimentālu demonstrāciju (skat. 7. att.), kurā tika parādīts skrejoša lauka iespaids uz šķidra metāla ātruma struktūru. Darba veikšanas laikā autoriem nebija zināmi citi tāda veida eksperimentāli risinājumi.



**Fig. 1** Experimental setup in cross-section (a) and 3D (b) views showing the inner container of diameter  $D = 50$  mm with liquid metal (1), the outer container with cooling water (2), two single-winding coils of diameter  $D_{ind} = 88$  mm and vertical separation  $d = 44$  mm (3), one of the six cooling water intakes and outlets distributed uniformly along the circumference (4), water jacket (5), cooling water partitioning walls (6), water intakes and outlets for coil cooling (7), GaInSn alloy (8), coil terminals (9).

7. attēls. Eksperimentālā modeļa shēma skrejoša divfāzu lauka ierosinātās šķidra metāla plūsmas izpētei

Iegūtie dati par šķidrā metāla plūsmu (skat. 8. att.) apstiprina to, ka plūsmai nav aksiālas simetrijas un dominējoši ir liela mēroga turbulenti virpuļi. Taču “skrejoša” lauka izmantošana ļauj radikāli izmainīt dominanto siltuma un piemaisījumu pārneses virzienu un palielināt raksturīgo ātrumu līdz pat trīs reizēm. 8. attēlā uzrādīta nomērītā laikā vidējotā plūsma gadījumā, kad skrejošais lauks plūsmu skinslāņa apgabalā dzen uz augšu. Ja 90 grādu fāzes nobīde starp strāvu abās spolēs nomaina zīmi, kustība reversē virzienu, skinslāni šķidrajam metālam plūstot uz leju. Aksiālas simetrijas iztrūkums laikā vidējotajā plūsmā skaidrojams ar vijumu strāvas ievadu konfigurācijas galīgo un būtiski lielo perturbāciju aksiālā magnētiskā laukā.



8. attēls. Nomērītais laikā vidējotais ātruma sadalījums

### 3. DIFERENCIĀLAS ROTĀCIJAS IEROSINĀTA ŠĶIDRA METĀLA KUSTĪBAS PĒTĪJUMI AKSIĀLĀ PASTĀVĪGĀ MAGNĒTISKĀ LAUKĀ

Šajā kopsavilkuma nodaļā īsi aprakstīti darbi [6, 7, 9, 18, 47, 49], kuros eksperimentāli tika pētīta šķidra metāla plūsma ass simetriskā traukā, ko ierosina trauka un šķidruma virsmai koaksiāli pieguļoša diska diferenciālā rotācija pastāvīgā magnētiskā laukā. Bez magnētiskā lauka šāda tipa šķidruma plūsmā tiek novērota ļoti intensīva sekundārā meridionālā šķidruma kustība, pie tam tā ir nestabila, ar izteiktām ātruma pulsācijām pat pie relatīvi zemiem Reinoldsa skaitļiem. Rotējoša diska ierosināta plūsma pats par sevi ir klasisks hidrodinamikas uzdevums, kura izpēte magnētiskā lauka klātbūtnē var būt interesanta. No prakses viedokļa šī problēma bija ļoti aktuāla eksperimentālā pētījuma veikšanas laikā pusvadītāju materiālu monokristālu iegūšanas tehnoloģijas attīstībai, izmantojot magnētisko lauku kā līdzekli materiāla šķidrās fāzes plūsmu ietekmēšanai, nolūkā panākt kristalizācijas procesam vēlamu iespaidu uz siltuma un masas pārnesei. Līdz pat šim laikam lielākā daļa monokristālisko pusvadītāju materiālu tiek iegūta ar Čohralska metodi no šķidra kausējuma, kas atrodas ass simetriskā tīgelī. Materiāls tiek kristalizēts cilindriskā formā no kausējuma virsmas. Pie tam tīgelis un kristāls koaksiāli rotē, lai novērstu kristāla asimetriju un nodrošinātu nepieciešamo siltuma un piemaisījumu pārnesei kausējumā kristalizācijas frontes tuvumā. Strauji pieaugot prasībām pēc pusvadītāju materiāliem gan kvantitatīvi, gan kvalitatīvi, bija nepieciešams vienlaicīgi risināt problēmas, kas saistītas ar kristāla un sakausējuma tilpuma izmēra pieaugumu un arī kristāla viendabību. Tika pilnībā apzināts, ka hidrodinamika šķidrā fāzē ir izšķiroša siltuma un masas pārnese. Taču tai laikā dominēja vienkāršots viedoklis, ka kvalitatīvu monokristālu iegūšana iespējama tikai tad, ja konvektīvā pārnese ir apspiesta un realizējas tīri difūzi siltuma un masas pārnese procesi pie kristalizācijas frontes. Izejot no vispārēja priekšstata, ka pastāvīgs magnētiskais lauks var stabilizēt un apspiest visu veidu konvektīvās plūsmas šķidrā elektriski vadošā sakausējumā, tika veikti mēģinājumi šādi ietekmēt kausējuma plūsmu Čohralska iekārtās. Tā kā diferenciālā rotācija ir spēcīgākais konvekcijas ierosinātājs, tad šīs kustības īpatnības aksiālā viendabīgā magnētiskā laukā bija sevišķi interesantas. Citu pētnieku mēģinājumi iedarboties uz kausējuma plūsmu ar pastāvīgu magnētisko lauku, kas orientēts perpendikulāri simetrijas asij, mums šķita acīmredzami mazāk perspektīvi, jo tādai plūsmai noteikti jāzaudē aksiālā simetrija un kristalizācijas apstākļiem, ņemot vērā rotāciju, neizbēgami jāklūst laikā mainīgiem.

### 3.1. Ātruma struktūras eksperimentāla izpēte

Lai izpētītu plūsmas struktūru, ko ierosina diferenciāla rotācija aksiālā pastāvīgā magnētiskā laukā, tika izveidots eksperimentāls modelis. Tas nodrošināja pietiekamu līdzību ar Čohralska iekārtu attiecībā uz šādu uzspiesto konvekciju. Kā kausējums tika izmantota In-Ga-Sn eutektika, kura ir šķidra istabas temperatūrā un kuras elektrovadāmība un kinemātiskā viskozitāte ir pēc lieluma tuva šķidra silīcija īpašībām. Tika izmantots gan īsts Čohralska iekārtas kvarca tiģelis, gan cilindrisks trauks, kas izgatavots no nemagnētiska nerūsoša tērauda. Metāla trauka sienīgas tika pārklātas ar laku, lai šķidrā metāls būtu elektriski izolēts no sienām. Koaksiāli tiģelim kausējuma virsmu skāra disks. Tika izmantoti diski no materiāliem ar dažādu elektrovadāmību, lai varētu izpētīt šī parametra ietekmi uz šķidrums plūsmu.

Kvarca tiģelis netika izmantots visu laiku, jo tika novērota īpatnēja parādība. Lai novērstu intensīvu šķidrā metāla oksidēšanos, tā virsmu aizsargāja vājš sālskābes šķīdums koncentrētā etilalkoholā. Kad aksiālais magnētiskais lauks bija pietiekami stiprs, šķidrā metāls kā ciets ķermenis sāka rotēt kopā ar disku. Virsmu aizsargājošais šķīdums bija noslapinājis visu kvarca sienīgu, izveidojot plānu starpslāni, kas ļāva šķidrajam metālam slidēt attiecībā pret trauka sienu. Tādējādi nebija iespējams realizēt Čohralska procesam līdzīgu plūsmu, ja virsma tika aizsargāta no oksidēšanās. Šī it kā nebūtiskā atkāpe šeit iekļauta, lai uzsvērtu, cik nozīmīgas eksperimentā var būt negaidītas detaļas. Nepieciešama ļoti rūpīga visu apstākļu pārbaude.

Šķidrums plūsmā, ko izraisa diska un trauka diferenciāla rotācija bez magnētiskā lauka, bija samērā labi izpētīta citu autoru darbos. Tādēļ mēs veicām ātruma mērījumus tikai aksiālā magnētiskā laukā pie lielām MHD-mijiedarbības parametru vērtībām. Ātruma azimutālā komponente tika mērīta ar elektriskā potenciāla diferencu sensoru. To bija iespējams izveidot pietiekami mazu, lai tā izraisītā perturbācija plūsmā būtu vērā neņemama. Potenciālu diferencu sensors nevarēja dot informāciju par ass simetrisku meridionālo plūsmu aksiālā magnētiskā laukā, jo tā nerada elektriskā potenciāla gradientu vadošā šķīdumā. Tika nomērīti azimutālās ātruma komponentes radiālie sadalījumi dažādos šķidra metāla slāņā augstumos. Šādi mērījumi tika veikti, gan variējot kausējuma dziļumu  $H$ , gan arī variējot diska relatīvo elektrovadāmību attiecībā pret šķidro metālu.

Pirmkārt, aksiālā magnētiskā laukā pie lieliem MHD-mijiedarbības parametriem tika apspiestas jebkādas šķidrums ātrums pulsācijas, ja tiģeļa un diska rotācijas ātrums nepārsniedza zināmu lielumu, kurš tiks raksturots kopsavilkuma nākamajā sadaļā. Otrkārt, izveidojās izteikti šķidrums apgabali ar spilgti atšķirīgām kustībām. Apgabals pie radiālajām pozīcijām, kas lielākas par diska rādiusu, rotēja kā ciets ķermenis ar leņķisko ātrumu, kurš bija vienāds ar tiģeļa rotācijas ātrumu. Zem diska izveidojās ass simetrisks apgabals, kas arī rotēja kā ciets ķermenis. Taču šī apgabala leņķiskais ātrums bija atkarīgs no diska relatīvās



elektrovadāmības. Ja disks bija daudz labāk vadošs par kausējumu, tad zemdiska kodols rotēja ar diska leņķisko ātrumu. Ja disks bija elektriski nevadošs, tad šis kodols rotēja ar leņķisko ātrumu, kas vienāds ar aritmētiski vidējo no tīģeļa un diska leņķiskajiem ātrumiem. Starp šiem diviem apgabaliem atradās brīvais leņķiskā ātruma nobīdes slānis, kurā ātrums radiāli strauji mainās no viena leņķiskā ātruma uz otru. Nobīdes slāņa biezums paraboliski pieaug līdz ar vertikālo attālumu no diska malas un ir apgriezti proporcionāls kvadrātsaknei no Hartmaņa skaitļa. Var izsecināt, ka uz trauka dibena veidojas konstanta biezuma Hartmaņa robežslānis, bet uz diska arī ir Hartmaņa robežslānis, ja disks nav ļoti labi vadošs attiecībā pret šķidro metālu.

Aprakstītā ātruma struktūra ir analoga tādai, kura pazīstama no ātri rotējošu sistēmu hidrodinamikas pie maziem Rosbija skaitļiem un vēl mazākiem Ekmaņa skaitļiem (*Rabaud* 1983). Ņemot vērā šo analogiju, tika realizēta šādas plūsmas vizualizācija, lai novērotu meridionālo kustību caurspīdīgā šķidrumā. Kad trauks un disks ātri rotēja ar mazu leņķisko ātrumu starpību, pa diska asi tika ievadīts mazs, ar luminiscējošu krāsu iezīmēts piliens. Tas ļoti lēni izplatījās pa Ekmaņa robežslāni radiālā virzienā, pēc tam lēni virzījās uz leju pa Ekmaņa ātruma brīvās nobīdes slāni, tad pa Ekmaņa slāni uz trauka dibenu, no kurienes tas vienmērīgi sāka iekrāsot zemdiska kodolu. Pilna iekrāsotā šķidruma cirkulācija pie mazas Ekmaņa skaitļa vērtības notika pat tik ilgā laikā kā pusstunda. Bet vissvarīgākais novērojums bija tas, ka iekrāsotais šķidrums ļoti ilgu laiku it nemaz neiekrāsoja ārējo kodola apgabalu, kurš rotēja kā ciets ķermenis kopā ar trauku. Šis papildu eksperimentālais novērojums nebūtu pieminēšanas vērts, ja nebūtu pievērsis uzmanību kādai ļoti interesantai parādībai. Iekrāsotais šķidrums zemdiska apgabalā neizplatījās ar vienmērīgu blīvumu, veidojot pa augstumu regulāras radiālas joslas. Radiālo joslu vertikālais solis bija atkarīgs no Rosbija skaitļa jeb dimensionāli – no diska un trauka leņķisko ātrumu starpības. Var tikai izteikt minējumu, ka šādu nevienmērīgu pārnese izraisa diferenciālās rotācijas mazas atkāpes no aksiālas simetrijas.

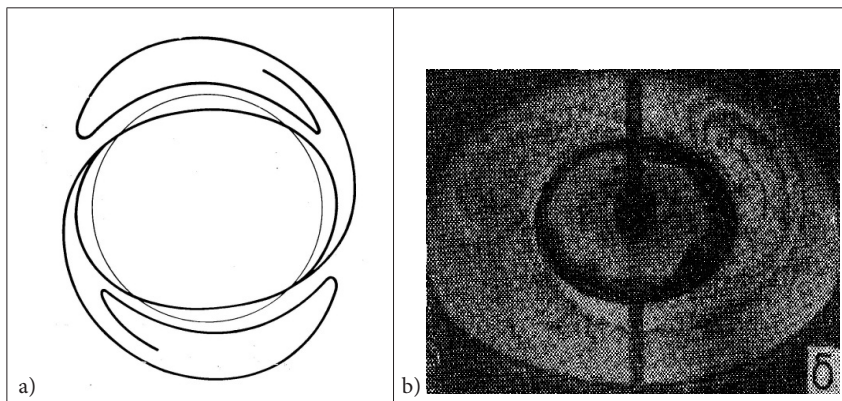
Kā parādīja diferenciālas rotācijas skaitliska modelēšana un kā uzskatāmi nodemonstrēja aprakstītās analogās plūsmas vizualizācija, meridionālā plūsma stiprā magnētiskā laukā pie lielām Hartmaņa un MHD-mijiedarbības skaitļu vērtībām kļūst ārkārtīgi vāja. Konvektīvā masas pārnese no zemdiska kodola uz ārējo apgabalu praktiski ir niecīga. Kristālu audzēšanai ar Čohrajska metodi šāda situācija var būt kritiska. Konvektīvās siltuma pārnese samazināšana izraisa stipru kristalizācijas frontes atkāpi no vēlamās planārās formas. Konvektīvās masas pārnese samazināšana izraisa, piemēram, silīcija kausējuma piesātināšanu ar skābekli, kurš nokļūst kausējumā, lēni erodējot kvarca tīģelim. Varētu sagaidīt arī, ka, audzējot kristālus, analogajā šķidruma plūsmā novērotā joslainā masas pārnese magnētiskā lauka ietekmētajā plūsmā varētu izraisīt joslainu aksiālo kristāla piemaisījumu koncentrāciju.

Ekspierimentālā pētījuma veikšanas laikā iegūtie rezultāti bija pirmie šai jomā. Tie palīdzēja daudz labāk izprast, ka stipra viendabīga magnētiskā lauka pielietošana nav lietderīga kristālu audzēšanai ar Čohraļska metodi, un tas apgāž agrākos uzskatus. Šis secinājums deva stimulu meklēt citus risinājumus, piemēram, pielietot aksiāli simetriskas nevienmērīgas magnētiskā lauka konfigurācijas. Ekspieriments arī pilnībā apstiprināja šādas šķidruma plūsmas (*Hjelmīng* 1986) analītisku aprakstu, kurš tika publicēts šī ekspierimentālā pētījuma veikšanas laikā.

### **3.2. Pastāvīgā magnētiskā lauka ietekmē izveidota aksiāli simetriska brīvā ātruma nobīdes slāņa stabilitātes izpēte**

Veicot ekspierimentālo pētījumu, kas aprakstīts iepriekšējā sadaļā, tika atrasts, ka pat stiprā aksiālā magnētiskajā laukā pie lielām Hartmaņa skaitļa vērtībām zināmos apstākļos ir novērojamas regulāras zemas frekvences ātruma pulsācijas. Tika novērots, ka, fiksējot magnētiskā lauka indukciju, ātruma pulsācijas parādās, kad diferenciālās rotācijas leņķisko ātrumu starpība pārsniedz kādu kritisku lielumu. Turpinot palielināt leņķisko ātrumu starpību, notika lēcienveidīga ātruma pulsāciju samazināšanās, tai pat laikā pieaugot to frekvencei. Pie tam pulsācijas nebija novērojamas visā šķidrā metāla apgabalā, bet tikai zināmā radiālo koordināšu diapazonā ap diska rādiusu visā šķidruma dziļumā. Šķidruma plūsmas vizualizācija uz brīvās virsmas uzrādīja, ka plūsmā izveidojusies regulāru, pa azimutu vienmērīgi izvietotu virpuļu sistēma, kas rotē ar fiksētu leņķisko ātrumu. Kļuva acīmredzams, ka realizējas azimutālā ātruma brīvā nobīdes slāņa nestabilitāte. Stiprā magnētiskā laukā veidojās “divdimensionālu” virpuļu sistēma. Šo virpuļu ass bija paralēla aksiālā magnētiskā lauka virzienam. Lielākais uz brīvās virsmas novēroto virpuļu skaits bija 6. Palielinot diferenciālās rotācijas ātrumu, lēcienveidīgi pie fiksētas magnētiskā lauka indukcijas redzamo virpuļu skaits samazinājās par vienu utt. Nepāra virpuļu skaits šajā azimutāli absolūti periodiskajā ainā šķita dīvains. Ātruma mērījumi uzrādīja, ka radiālajās pozīcijās tieši zem diska malas ātruma pulsācijām ir dubulta frekvence, bet zem diska – atkal pamatfrekvence. Tas liecināja, ka arī zem diska ir virpuļu sistēma, kas saistīta ar virpuļiem pie lielākajām radiālajām pozīcijām. Tika veikta vizualizācija, kad plāns disks uz tievas ass tika iegremdēts zem šķidrā metāla virsmas. Bija novērojama aina tikai ar pāra virpuļu skaitu, un tajā virpuļi ar radiālajām koordinātēm, kas mazākas par diska rādiusu, bija absolūti viennozīmīgi saistīti ar virpuļiem ar radiālajām koordinātēm, kas bija lielākas par diska rādiusu. Tā bija divu sajūgtu virpuļu gredzenu sistēma. Kļuva skaidrs, ka novērojamā brīvā nobīdes slāņa nestabilitāte ir magnetohidrodinamikā pazīstamā parādība, ko pirmais atklāja Lēnerts (*Lehnert* 1955) un detalizēti pētīja Kļukins (*Klyukin* 1980). Taču Lēnerta ekspierimentā tika atrasta azimutālas strūklas, ar diviem ātruma pārliekuma punktiem, nestabilitāte. Turpretī diferenciālā rotācija

brīvais ātruma nobīdes slānis ir ar vienu pārlietuma punktu. Turpinot nestabilās plūsmas pētījumus, tika konstatēts, ka aksiāli simetriska plūsma kļūst nestabila pie diviem nosacījumiem. Pirmkārt, magnētiskais lauks ir pietiekami stiprs, lai izveidotos brīvais nobīdes slānis. Otrkārt, lokālajam Reynolds skaitlim, kurā radiālais ātruma lēcienis ir ātruma mērogs un brīvā nobīdes slāņa maksimālais biezums ir garuma mērogs, jāpārsniedz aptuveni konstanta kritiskā vērtība.



9. attēls. Eksperimentā vizualizētā plūsmas nestabilitāte, veidojoties diviem virpuļiem

Šāda parādība zināma arī analogiskajā ātri rotējošā plūsmā bez magnētiskā lauka (Hide 1967, Rabaud 1983 un Chomaz 1988), kas aprakstīta iepriekšējā sadaļā. Veicot vizualizāciju, caurspīdīgā šķidrumā tika novērota ļoti līdzīga aina kā magnētiskajā laukā. Tomēr tika novērota viena būtiska atšķirība. Magnētiskajā laukā nav nozīmes, kas rotē ātrāk – trauks vai disks. Ātri rotējošā sistēmā, kad trauks rotē ātrāk par disku, tiek novērota pilnīgi cita parādība. Tas izskaidrojams ar Koriolisa spēka iespaidu. Iepriekšējā sadaļā aprakstītā vizualizācija ar luminescentu krāsu parādīja, ka, veidojoties analogajai nestabilitātei, magnētiskajai plūsmai masas pārnese ir daudzkārt intensīvāka nekā ass simetriskas plūsmas gadījumā. Pēc plūsmas stabilitātes zūšanas īsā laikā viss šķidrums vienmērīgi iekrāsojās.

Magnētiskā laukā brīvā nobīdes slāņa nestabilitāte tika konstatēta arī neizotermiskā eksperimentā [18], kurā tika realizēta siltuma plūsma no trauka sienām uz disku. Parādoties nestabilitātei, siltuma pārnese lēcienveidīgi krasi pieauga. Zem diska tika novērotas lielas amplitūdas un zemas frekvences temperatūras pulsācijas. Pulsāciju frekvence korelēja ar virpuļu sistēmas rotācijas leņķisko ātrumu.

Šis eksperimentālais pētījums ļāva izskaidrot rezultātus, kas tika iegūti, audzējot pusvadītāju monokristālus stiprā aksiālā magnētiskajā laukā. Analizējot

kristālu struktūru, tika konstatēts, ka magnētiskā lauka ietekmē kristālā parādījies aksiāla joslainība ar pārsteidzoši lielu aksiālo soli. Šī joslainība korelēja ar frekvenci, ar kādu azimutāli simetriskā virpuļu aina rotē attiecībā pret rotējošo kristālu. Vizualizējot ģermānija kausējuma brīvo virsmu, brīvā nobīdes slāņa nestabilitāte tika parādīta tieši kristāla audzēšanas laikā. Kļuva skaidrs, ka kristālu audzēšanai nav pieņemama tāda magnētiskā lauka iedarbība, kas izraisa brīvā nobīdes slāņa veidošanos un, vēl jo vairāk, tā nestabilitāti.

Šis eksperimentālais pētījums pirmo reizi nodemonstrēja magnētiskā lauka izraisītu nestabilitāti diferenciāli rotējošā sistēmā. Tika uzrādīti bezdimensionālie nosacījumi un to skaitliskās vērtības, pie kurām realizējas brīvā nobīdes slāņa nestabilitāte.

## 4. NATURĀLĀS KONVEKCIJAS ŠĶIDROS METĀLOS PASTĀVĪGA MAGNĒTISKA LAUKA IETEKMĒ PĒTĪJUMI DAŽĀDAS KONFIGURĀCIJAS TRAUKOS

Daudzveidīgās šķidrums plūsmas variācijas, kādas rodas noslēgtos tilpumos, caur kuriem noris siltuma plūsma, ir klasiska hidrodinamikas problēma, kas ir bijusi un paliek intriģējoša pētījumu nozare (*Gershuni 1972, Carruthers 1978*). Šajā kopsavilkumā apskatītajos darbos [10, 18, 19, 47, 49, 50, 51] eksperimentāli pētīta šķidra metāla naturālā konvekcija, kam piemīt augsta siltuma difūzijas spēja jeb bezdimensionāli – mazs Prandtla skaitlis  $Pr \ll 1$  (*Hurle 1974, Gill 1974*). Pie pietiekami intensīvām siltuma plūsmām naturālā konvekcija kļūst nestabila, ar raksturīgām relatīvi lielām amplitūdām lokālām un arī integrālām siltuma plūsmas svārstībām laikā. Šķidro metālu zemais Prandtla skaitlis nosaka ievērojamas naturālās konvekcijas un tās stabilitātes īpatnību atšķirību no citiem šķidrumiem, kuru temperatūras difūzijas koeficients, kā likums, ir augstāks par impulsa difūzijas koeficientu. Labā šķidro metālu elektrovadāmība ļauj ļoti efektīvi izmantot magnētisko lauku naturālās konvekcijas mērķtiecīgai ietekmēšanai, lai sasniegtu vēlamu konvektīvās siltuma pārneses režīmu. Darbos [10, 18, 48, 50, 52] eksperimentāli pētīta pastāvīga magnētiskā lauka ietekme uz naturālo konvekciju, atrodot kritērijus, pie kuriem iespējams apspiest lokālās un integrālās siltuma plūsmu svārstības. Naturālā konvekcija ir ārkārtīgi nozīmīga fizikāla siltuma un masas pārneses parādība gandrīz jebkurā kristalizācijas procesā no šķidrās fāzes, lielā mērā nosakot cietās fāzes makroskopisko un mikroskopisko viendabību. Tādēļ tās izziņa ir ļoti svarīga dažādu monokristālu iegūšanas paņēmieni attīstībai, kā arī, piemēram, polikristālisku metālu iegūšanai ar vēlamu struktūru. Kaut arī ir daudz citu pētījumu šai jomā, tomēr visos kopsavilkuma šajā nodaļā iekļautajos darbos ir gūti pētījuma veikšanas laikā jauni, pirmo reizi uzrādīti secinājumi.

### 4.1. Pāreja no lamināras konvekcijas uz oscilējošu trīsdimensionālu kustību

Darbos [19, 50] aprakstītais eksperimentālais pētījums tika veikts, atsaucoties uz starptautiskas darba grupas izsludinātu mērķi (*GAMM-Committee on Numerical Methods in Fluid Mechanics. Benchmark for the GAMM-Workshop "Numerical Simulation of Oscillatory Convection in Low Prandtl Fluids". Marseille, 12-14 October, 1988*) pārbaudīt skaitliskās modelēšanas iespējas gūt praksei atbilstošus rezultātus par oscilējošas naturālās konvekcijas norisi šķidrums ar zemu Prandtla skaitli. Šāda tipa skaitliskie modeļi bija ļoti aktuāli vairāku tehnoloģisku procesu izstrādāšanai pusvadītāju monokristālu ražošanas jomā.

Par pārbaudes uzdevumu vairāku pētnieku grupu skaitliskajiem modeļiem tika izraudzīta šķidra metāla naturālā konvekcija taisnstūrīnā tilpumā, kurā šķidruma slāņa horizontālā izmēra  $L$  virzienā starp gala sienām uzdots temperatūras kritums, attiecība pret biezumu  $H$  bija  $A_1 = L/H = 4$ . No agrākiem eksperimentāliem pētījumiem bija zināms, ka pie fiksēta Prandtla skaitļa, pieaugot temperatūras kritumam, pie kādas bezdimensionālās naturālās konvekcijas intensitātes  $Gr_{osc}$  konvekcija pārtop oscilējoša – ar izteiktām temperatūras periodiskām svārstībām šķidrā metālā (Hurlle 1974, Gill 1974). Tādēļ, ka tai laikā trīsdimensionālu konvekcijas uzdevumu pirmie skaitliskie modeļi vēl bija tikai tapšanas stadijā, šķidruma slāņa trešā izmēra – horizontālais platums  $W$  – loma vēl nebija pilnībā apzināta. Valdija pieņēmums, ka tam jābūt jūtami lielākam par slāņa augstumu, jeb  $A_2 = W/H \gg 1$ , lai uzdevumu varētu uzskatīt par divdimensionālu. Šeit aprakstītais eksperiments parādīja, ka prasība pēc liela  $A_2$  bija ļoti svarīga, taču pilnīgi atšķirīgu iemeslu dēļ.

Eksperimentālais modelis tika uzbūvēts tā, lai gala sienas būtu, cik vien labi iespējams, izotermiskas katra pie savas temperatūras  $T_1$  un  $T_2$ . Sānu sienas un trauka dibens tika veidoti tā, lai tuvinātos adiabatiskiem nosacījumiem. Šķidruma tilpumam nebija cieta vāka, bet virsmu klāja nepārtraukta šķidrā metāla oksīda plēve, kas nodrošināja šķidruma tangenciālā ātruma nulles nosacījumu arī uz šīs virsmas. Arī siltuma apmaiņa no augšējās robežas tika reducēta līdz minimumam. Trauka platums visos gadījumos bija  $W = 6,0$  cm, bet abus pārējos izmērus varēja variēt, mainot bezdimensionālos ģeometriskos parametrus  $A_1$  un  $A_2$ . Darba šķidrums modelī bija eutektika In-Ga-Sn, kuru raksturojošais Prandtla skaitlis  $Pr = 0,019$ .

Eksperimenta gaitā bez lokālās temperatūras šķidrā metālā tika pielietota metode [16, 48] momentālo temperatūras sadalījumu iegūšanai vairākos šķēļumos, neizmantojot daudzus sensorus, kas neizbēgami iespaidotu plūsmas režīmu. Tā kā konvekcija pie  $Gr > Gr_{osc}$  bija harmoniski oscilējoša, tad mērījumi, kas veikti ar daudziem sensoriem vienlaicīgi visās pozīcijās, tika aizstāti ar mērījumiem identiskos oscilāciju fāzes momentos tikai ar diviem sensoriem. Viens sensors kalpoja oscilāciju fāzes atskaitei, otrs sniedza informāciju par momentālo temperatūru dotajā tilpuma punktā. Bez kvantitatīviem temperatūras mērījumiem, tika veikti arī kvalitatīvi novērojumi, vizualizējot šķidrā metāla kustību uz augšējās tilpuma robežas. Tas neizbēgami mainīja nosacījumus uz šīs robežas, taču, veicot šajā situācijā temperatūras mērījumus, tika atrasts, ka konvekcijas režīms, principā, ir tāds pats. Konvekcija tika vizualizēta uz nosacīti brīvas virsmas, kad tangenciālā ātruma komponente vairs nebija nulle, ar mazām grafitā daļiņām. Otra vizualizācijas metode ļāva ieraudzīt plūsmas ātruma izraisīto spriegumu izpausmi ļoti plānā eļļas slānītī, kurš noklāja visu augšējo robežu. Oscilējošā konvekcijas režīmā eļļas slāniša biezums lokāli mainījās saskaņā ar tangenciālo spriegumu šai punktā. Gaismas difrakcija plānā slānītī ļāva novērot tangenciālo spriegumu izmaiņu laikā uz virsmas laukuma.

Ekspērimētālajā pētījumā, pirmkārt, tika atrasts, ka konvekcija nepāriet uz oscilējošu režīmu pie  $Gr = Gr_{osc}$ , ja perturbācija ir gadījuma rakstura, patvaļīgi maza, bet gan būtiska. Oscilējošais režīms, palielinot raksturīgo temperatūras kritumu starp gala sienām  $DT$ , reizēm uzsākās tikai, kad  $Gr$  pat divas reizes pārsniedza kritisko vērtību  $Gr_{osc}$ . Pakāpeniski samazinot  $Gr$ , oscilācijas vienmēr sāka rīst pie  $Gr_{osc}$ . Ja pie  $Gr_{osc}$ , līdz vēl nebija uzsākušās oscilācijas, tika ārēji izraisīta mehāniska perturbācija, varēja panākt oscilējošā režīma attīstīšanos ar mazu inkrementu.

Oscilējošais konvekcijas režīms pie fiksētas ģeometrijas  $A_1$  un  $A_2$  eksistē plašā  $Gr$  diapazonā. Temperatūras oscilācijas šajā režīmā ir absolūti periodiskas ar pamatfrekvenci  $f$  un dubultfrekvenci  $2f$ . Šo divu harmoniku relatīvā amplitūda un savstarpējā fāze variē šķidrums tilpumā, kā garumvirzienā paralēli  $L$ , tā arī šķērsvirzienā. Izpētītajos  $A_1$  un  $A_2$  diapazonos oscilējošai konvekcijai vienmēr eksistēja spoguļā simetrijas plakne pie  $W/2$ . Var izteikt minējumu, ka ļoti lielu  $A_2$  gadījumā varētu novērot šķērsvirzienā periodisku ainu, kad šai virzienā izkārtotos vairāki konvekcijas trīsdimensionālu ruļļu viļņu garumi. Vislabāk šo ruļļu raksturu var iztēloties, apskatot vizualizācijas shematisku attēlojumu kustības ainai uz augšējās virsmas (10. att.).

Jāņem vērā, ka tā ir it kā trīsdimensionālas kustības projekcija uz augšējās virsmas. Vispārsteidzošākā īpatnība ir tā, ka vienā kustības fāzē uz "brīvās" virsmas pie  $W/2$  realizējas kustība no "aukstā" gala uz "karsto". Momentālie temperatūras sadalījumi identiskās fāzēs apstiprina šādu kustības raksturu.

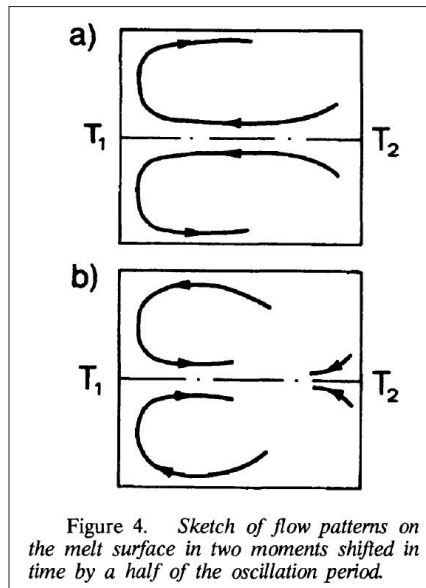


Figure 4. Sketch of flow patterns on the melt surface in two moments shifted in time by a half of the oscillation period.

10. attēls. Harmoniski oscilējošas konvekcijas shēma

Kad  $Gr$  skaitli pie fiksētas ģeometrijas palielināja būtiski virs  $2Gr_{osc}$ , tad iestājās cits daudz sarežģītāks konvekcijas režīms.

Ši eksperimentālā pētījuma laikā netika stādīts par uzdevumu noskaidrot pastāvīga magnētiskā lauka iespaidu uz oscilējošo konvekcijas režīmu. Taču tika novērots, ka pat lokalizēts, ļoti vājš magnētiskais lauks pilnībā novērš oscilējošo konvekcijas režīmu. Mēģinot nomērīt plūsmas raksturīgo ātrumu, tika izmantots potenciālu diferences sensors ar iebūvētu pastāvīgo magnētiņu. Magnēta izmērs magnetizācijas virzienā bija 3 mm, bet diametrs tikai 1 mm. Tuvinot šo sensoru šķidrā metāla augšējai virsmai, bet mehāniski neskarot, tika novērota oscilāciju strauja rimšana līdz pilnīgai izzušanai. Šī ļoti lokalizētā, nevienmabīgā un vājā magnētiskā lauka klātbūtnē oscilējošu konvekciju nebija iespējams realizēt. Ļoti stipri palielinot temperatūras kritumu  $\Delta T$ , uzsākās cits nestabils konvekcijas režīms, kurā vairs nebija vienkāršu harmonisku svārstību.

Eksperimenta gaitā variējot tilpuma relatīvo garumu, tika atrasts, ka pie  $A_1 < 3$  šāda tipa oscilējoša konvekcija neeksistē. Bezdimensionālā oscilāciju frekvence un  $Gr_{osc}$  strauji pieaug, samazinoties  $A_1$  un tam tuvojoties vērtībai 3.

Šajā eksperimentālajā pētījumā tika uzskatāmi nodemonstrēts oscilējošā konvekcijas režīma trīsdimensionālais raksturs, kurš realizējas tikai noteiktā ģeometrisko parametru diapazonā, no kuriem atkarīgi gan  $Gr_{osc}$ , gan bezdimensionālā oscilāciju frekvence. Tika parādīts, ka pāreja uz oscilējošu režīmu notiek tikai pie ārējas galīga lieluma perturbācijas. Pirmo reizi tika iegūta eksperimentāla informācija par momentālajiem temperatūras sadalījumiem šādā oscilējošā konvekcijā.

Šis eksperiments stimulēja meklēt jaunas pieejas šāda tipa uzdevumu skaitliskajai modelēšanai, jo rezultātu iegūšanas laikā neviens no eksistējošajiem skaitliskajiem modeļiem nespēja adekvāti atspoguļot eksperimentā uzrādīto.

## **4.2. Dažādas orientācijas magnētiska lauka iespaids uz šķidra metāla naturālo konvekciju taisnstūrā un horizontālu temperatūras kritumu**

Autora publikācijā [10] aprakstīts eksperimentāls pētījums, kas savulaik tika iecerēts, lai gūtu informāciju par pastāvīga magnētiskā lauka ietekmi uz šķidra metāla naturālās konvekcijas stabilitāti. Pētījuma veikšanas laikā bija zināms, ka magnētiskais lauks ļoti efektīvi ļauj novērst temperatūras pulsācijas šķidra metāla noslēgtā tilpumā, kurā norit naturālā konvekcija pie lielām Grashofa skaitļa vērtībām (*Papailious* 1974, *Fumizava* 1980). Taču, tā kā nebija datu par konvektīvās šķidrums plūsmas raksturu metāla kausējumos ar zemu Prandtla skaitli, nebija izpratnes par optimālo magnētiskā lauka indukcijas lielumu un lauka konfigurāciju, kas ļautu novērst temperatūras pulsācijas intensīvās plūsmās pie lieliem Grashofa skaitļiem. Tika izvēlēts naturālās konvekcijas gadījums, kad integrālā siltuma plūsma ir horizontāla – starp trauka vertikālo karsto un auksto



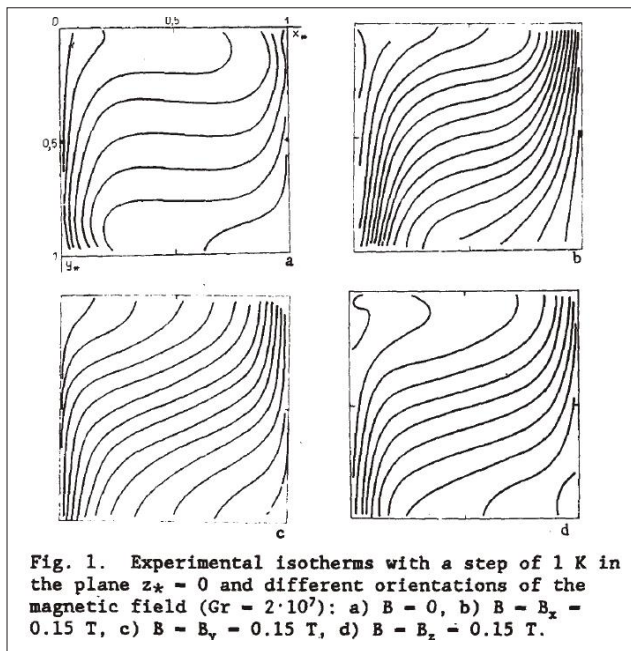
gala sienu taisnstūrainā konfigurācijā. Šāda uzdevuma nostādne bija aktuāla praksei, pirmkārt, pusvadītāju monokristālu audzēšanas tehnoloģiju attīstībai nolūkā kontrolēt nestacionāros siltuma un masas pārnese procesus pie kristalizācijas frontes. Šis eksperimentālais pētījums pirmo reizi sniedza detalizētus datus par laikā vidējoto temperatūras lauku šķidrā metālā dažādas orientācijas viendabīga pastāvīga magnētiskā lauka ietekmē. Pirmo reizi tika iegūti arī dati par naturālās konvekcijas ātruma struktūru noslēgtā tilpumā šķidrumā ar mazu Prandtla skaitli. Ļoti būtiska bija gūtā atziņa, ka naturālās konvekcijas stabilizācijai, vismaz šai ģeometriskā konfigurācijā, nav būtiska magnētiskā lauka orientācija, lai panāktu temperatūras pulsāciju novēršanu.

Eksperimentālā modeļa sānu un dibena sienas tika izgatavotas no organiskā stikla, kurš vada siltumu daudz vājāk nekā šķidrās metāls, – eutektisks In-Ga-Sn sakausējums. Gala sienas – no vara, kura siltumvadāmība ir daudz augstāka nekā šķidrājam metālam. Vienā vara gala sienā tika ievadīta laikā nemainīga siltuma plūsma, otra vara gala siena tika dzesēta ar termostatētu ūdeni. Viss modelis tika ļoti rūpīgi siltumizolēts, novēršot kaut cik nozīmīgu siltuma apmaiņu ar apkārtni. Siltuma pārnese šķidrumā notika horizontālā virzienā: garuma attiecība pret augstumu bija 1, bet platuma attiecība pret augstumu – 0.29.

Šķidrā metāla tilpumā laikā vidējotā temperatūra tika mērīta ar termopāri, kuru varēja pārvietot pa visu tilpumu. Temperatūras pulsāciju reģistrēšanai tika izmantots mikrostrieples termoanemometrs, kas bija piemērots darbam šķidrā metālā. Termoanemometra izmantošana ātruma mērījumiem noslēgtā šķidrā metāla tilpumā bija bezjēdzīga, jo tā izraisīta perturbācija plūsmā bija pārmērīgi liela, ievadot šķidrā metālā nepieņemami lielu siltuma plūsmu. Šķidrums plūsmas ātrums tika mērīts ar elektriskā potenciāla diferences sensoru tikai pie vienas magnētiskā lauka orientācijas – normāli pamata konvektīvās cirkulācijas plaknei. Sensora signāla termoelektriskā komponente tika izdalīta no kopējā, veicot atkārtotus mērījumus, mainot magnētiskā lauka virzienu par 180 grādiem.

Eksperimentā tika iegūta detalizēta informācija par laikā vidējoto temperatūras sadalījumu šķidrā metāla tilpumā pie Grashofa skaitļa vērtības, kas 1.33 reizes pārsniedz kritisko, pie kuras šķidrumā attīstās intensīvas temperatūras pulsācijas. Temperatūras lauki tika nomērīti kā bez magnētiskā lauka, tā arī magnētiskajā laukā ar trīs savstarpēji ortogonālām orientācijām. Šie dati, kas parādīti 11. attēlā, uzrāda kvalitatīvo ainu par to, cik atšķirīgi iedarbojas viendabīgs magnētiskais lauks uz naturālo konvekciju atkarībā no lauka orientācijas.

It sevišķi jāuzsver eksperimentā iegūtā informācija, ka neatkarīgi no magnētiskā lauka orientācijas jebkuras temperatūras pulsācijas pētījuma Grashofa skaitļa diapazonā tika pilnībā apspiestas jau pie relatīvi zemām Hartmaņa skaitļa vērtībām. Kā uzskatāmi parādīja kopsavilkuma 4.1. sadaļā aprakstītais darbs, naturālās konvekcijas plūsmas oscilējošam režīmam, tūlīt pēc tā uzsākšanās pārsniedzot kritisko intensitāti pie  $Gr_{osc}$ , piemīt pilnībā trīsdimensionāls raksturs. Tādēļ jebkuras orientācijas magnētiskais lauks, apspiežot virpuļainības komponentes, kas tam normālas, stabilizē konvektīvo plūsmu.



11. attēls. Temperatūras lauka izoterms šķidrā metālā

Šim eksperimentālajam pētījumam tā veikšanas laikā noteikti bija būtiska nozīme, parādot, cik efektīvi magnētiskais lauks neatkarīgi no lauka orientācijas aizkavē naturālās konvekcijas plūsmas šķidrā metālā stabilitātes zudumu. Naturālās konvekcijas ātruma struktūras eksperimentāli mērījumi noslēgtā tilpumā vēl līdz šim laikam paliek vienīgi autoram zināmie.

#### 4.3. Aksiāla viendabīga magnētiskā lauka iespaids uz naturālo konvekciju “Čohraļska” kristalizācijas procesa modeli

Atšķirībā no šīs nodaļas iepriekšējās sadaļās aprakstītajiem darbiem, šeit tiek apskatīta naturālā konvekcija aksiāli simetriskā konfigurācijā gadījumā, kad tās intensitāte ir daudz lielāka – Grashofa skaitlis ir būtiski lielāks par lielumu, pie kura šķidrā metālā parādās lokālas temperatūras pulsācijas. Ģeometriskā konfigurācija, kurā eksperimentāli tiek pētīta vertikāla, viendabīga magnētiskā lauka ietekme uz šķidra metāla naturālo konvekciju, ir līdzīga situācijai, kāda īstenojas, audzējot pusvadītāju monokristālus ar Čohraļska metodi (Fiegl 1983, Hjelmīng 1986, Hicks (1989). Integrālajai siltuma plūsmai noslēgtā šķidra metāla tilpumā ir gan horizontāla, gan vertikāla komponente – normāla un antiparalēla gravitācijas vektora virzienam. Eksperimentālā pētījuma rezultāti aprakstīti

publikācijās [7, 18, 47, 49, 51]. Tā praktiskā nozīme bija atrast nepieciešamos kritērijus, lai tehnoloģiskajā procesā varētu ietekmēt šķidrās fāzes kustību tā, lai novērstu nestabilai naturālajai konvekcijai raksturīgās lielās amplitūdas un zemas frekvences temperatūras svārstības kristalizācijas frontes tuvumā.

Eksperimentālajā modelī cilindriska trauka sānu sienas tika sildītas, bet koaksiāli novietotais cilindrs, kura gals pieskārs šķidrās eutektikas In-Ga-Sn augšējai virsmai, tika dzesēts. Realizētā siltuma plūsma kvazistacionārā siltuma pārnesei procesā bija tik intensīva, ka naturālā konvekcija šķidrā metālā bez magnētiskā lauka bija turbulenta, visā šķidrums tilpumā tika novērotas intensīvas temperatūras pulsācijas ar nepārtrauktu spektru. Ar termopāriem tika mērīts uzdotajai integrālajai siltuma plūsmai raksturīgais temperatūras kritums starp karsto sānu sienu un auksto cilindra gala virsmas punktu uz simetrijas ass. Šķidrā metāla tilpumā tika mērītas temperatūras pulsācijas.

Eksperimentā tika atrasts, ka temperatūras pulsācijas bezdimensionālā amplitūda ir būtiski atkarīga no MHD-mijiedarbības parametra. Šajā gadījumā mijiedarbības parametrs definēts, izmantojot pieņēmumu, ka tikai Arhimēda spēka izraisītā konvekcijā pie lielām intensitātēm Reinoldsa skaitlis ir izsakāms ar kvadrātsakni no Grashofa skaitļa –  $N = Ha^2/Re = Ha^2/Gr^{1/2}$ . Galvenais rezultāts ir ļoti būtisks – pie  $N > 1$  temperatūras pulsācijas strauji dilst, drīz vien sasniedzot nenozīmīgu līmeni. Atsaucoties uz iepriekšējās šīs nodaļas abu sadaļu izklāstu, var izteikt pieņēmumu – naturālās konvekcijas kustības nestabilitāte ir trīsdimensionāla, tai raksturīga trīsdimensionāla ātruma lauka virpuļainība. Kā zināms, pastāvīgs magnētiskais lauks efektīvi apspiež virpuļus, kuru asis ir perpendikulāras magnētiskā lauka virzienam, taču “vāji” mijiedarbojas ar paralēliem virpuļiem. Tādējādi Čohraļska procesam līdzīgās konfigurācijās naturālās konvekcijas izraisītā šķidra metāla plūsmā temperatūras pulsācijas izzūd, tiklīdz magnētiskais lauks sāk apspiest trīsdimensionālo, nestacionāro kustību. Protams, aksiāls magnētiskais lauks mijiedarbojas arī ar laikā vidējoto kausējuma kustību, kura šajā konfigurācijā ir tīri meridionāla plūsma. Arī šīs kustības raksturīgais ātrums dilst atkarībā no mijiedarbības parametra, ja tas nav mazs. Tieši aksiālā magnētiskā lauka iedarbība pie nelielām mijiedarbības parametra vērtībām ir zināmā mērā pārsteidzoša. Eksperimentā tika fiksēta sildīšanas jauda un mērīts raksturīgais temperatūras kritums starp karsto sienu un cilindra gala centrālo punktu. Relatīvi vājā magnētiskā laukā pie  $N < 1$ , tika fiksēta siltuma pārnese intensifikācija, kas samazināja šo raksturīgo temperatūras kritumu. Pie tam netika vēl novērota būtiska magnētiskā lauka ietekme uz temperatūras pulsācijām. Atkal var tikai minēt, ka “vājā” magnētiskajā laukā turbulenta kustība pārkārtojas, arvien lielākai kinētiskās enerģijas daļai nonākot virpuļos, kas ir paralēli magnētiskā lauka virzienam. Turklāt izrādās, ka tāda kustība ir efektīvāka siltuma pārnesei.

## 5. ŠĶIDRA METĀLA TERMOKAPILĀRĀS UN TERMOELEKTROMAGNĒTISKĀS KONVEKCIJAS EKSPERIMENTĀLA DEMONSTRĀCIJA

Šajā nodaļā aprakstīts eksperimentāls darbs, kurā tika veikts viens no pirmajiem mēģinājumiem pētīt termokapilāro konvekciju noslēgtā šķidra metāla tilpumā. Interesi par šāda veida plūsmām izraisīja kristālu audzēšanas eksperimenti bezsvara apstākļos orbitālajās kosmosa stacijās, kur termokapilaritāte izrādījās dominējošais faktors šķidrās fāzes hidrodinamikā (*Ostrach* 1982, *Riley* 1998, *Favier* 1990). Termokapilārā virsmas spēka izraisītā konvekcija liedza iegūt cerēto siltuma un masas pārneses tīri difūzu mehānismu, padarot bezjēdzīgu bezsvara apstākļu izveidošanu. Mūsu darba gala mērķis bija noskaidrot kritērijus, pie kuriem pastāvēs magnētiskais lauks apspiestu termokapilāro konvekciju. Taču izrādījās, ka gaidītās šķidrā metāla kustības apspiešanas vietā tā intensificējās magnētiskā lauka ietekmē. Mēģinājums iedarboties uz termokapilāro konvekciju noslēgtā tilpumā ar pastāvīgu magnētisko lauku mūsu eksperimentā uzrādīja vēl kādu fizikālu efektu, kas var būt par kausējuma konvekciju izraisīto iemeslu kristalizācijas procesa laikā arī bezsvara apstākļos – termoelektromagnētisko konvekciju. Tādēļ šis nodaļas pirmajā sadaļā tiek izklāstītas termokapilārās konvekcijas īpatnības mūsu izveidotajā eksperimentālajā modeli, bet pēc tam otrajā sadaļā uzrādīti termoelektromagnētiskās konvekcijas rašanās priekšnosacījumi un tās raksturojums.

### 5.1. Šķidra metāla termokapilārās konvekcijas pētījumi aksiāli simetriskā traukā

Termokapilārā jeb Marangoni konvekcija eksperimentāli ir relatīvi plaši pētīta šķidrumsos ar lielu Prandtla skaitli, taču līdz pat šim laikam ir publicēti tikai daži darbi par eksperimentiem, kas veikti ar šķidru metālu termokapilārām plūsmām, kuras raksturo  $Pr \ll 1$ . Ilgstoši atomāri tīras šķidra metāla brīvas virsmas iegūšana pati par sevi ir ļoti grūts uzdevums. Lai sasniegtu kvazistacionāru siltuma plūsmas izraisītu konvekciju šķidra metāla tilpumā, ko daļēji ietver cieta ķermeņa robežas, nepieciešams relatīvi liels laiks. Visa šī perioda ilgumā ir jābūt nodrošinātai šķidrā metāla virsmas atomārai tīrībai. Tādēļ šķidru metālu virsmas spraiguma mērījumiem nav augsta precizitāte, un dažādos pētījumos iegūtie dati stipri atšķiras.

Vēl jo sliktāk ir izpētīta virsmas spraiguma atkarība no temperatūras šķidrās metālos kušanas temperatūras tuvumā. Publicētie dati ar kaut cik pieņemamu precizitāti raksturo virsmas spraiguma temperatūras koeficientu tikai temperatūras intervāliem dažī simti grādu. Praksē termokapilārajai konvekcijai šķidrās

metālos ir būtiska nozīme kausēšanas un kristalizācijas tehnoloģiskos procesos, kur temperatūras variācija uz kausējuma brīvās virsmas pārsniedz kušanas temperatūru, parasti – tikai par desmitiem grādu. Tādēļ, prognozējot termokapilāro konvekciju, kuru nosaka virsmas spraiguma temperatūras koeficients, jāapzinās pieļauto pieņēmumu aptuvenība.

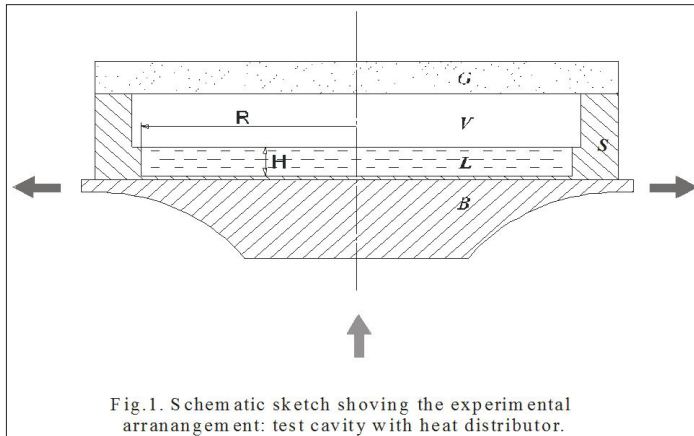
Šķidru metālu virsmas spraiguma temperatūras koeficientu ļoti stipri ietekmē virsmas aktīvi piemaisījumi, pat pie koncentrācijām, sākot ar kārtas lielumu 10 ppm. Pieejamā informācija par divu vai vairāku komponentu sakausējumu virsmas spraiguma temperatūras atkarību ir ļoti skopa. Tā, piemēram, tehnoloģiskajos procesos, kuros termokapilārā konvekcija ir būtiska siltuma un masas pārnesei kausējumā – metāla kausēšana ar elektronu kūli un metināšana – pat šķidrā metāla kustības virzienam uz brīvās virsmas nepiemīt stingra atkarīguma. Pusvadītāju materiālu monokristālu audzēšanas procesos no izkausēta ļoti augstas tīrības materiāla un ļoti precīzi kontrolētos apstākļos termokapilārajai konvekcijai vajadzētu būt prognozējamai, ja ir zināms monokristāla leģēšanai izmantoto piemaisījumu iespajds uz virsmas spraiguma atkarību no temperatūras.

Publikācijās [13, 16, 35, 43, 44, 46, 48] aprakstītā termokapilārās konvekcijas eksperimentālā demonstrācija augstāk aprakstīto faktoru dēļ bija ļoti darbietilpīga un tādēļ neļāva pietiekami brīvi variēt eksperimenta apstākļus, lai uzrādītu to ietekmi uz šķidrā metāla plūsmu. Kaut arī tikai daļēji veiksmīga, tā uzrādīja negaidītus termokapilārās konvekcijas režīmus un ļāva izvirzīt jaunu fizikālu modeli to izskaidrošanai mūsu publikācijā [13].

Termokapilārās konvekcijas realizēšanai šķidrā gallijā tika izstrādāta oriģināla metode brīvas virsmas iegūšanai, kas ļāva eksperimentālajā modelī iegūt ilgstošā laika periodā atkarīgamus apstākļus uz brīvās virsmas. Šī metode aprakstīta mūsu publikācijā [16, 46]. Tā ļāva mums iegūt noslēgtā dziļa vakuuma kapsulā šķidra gallija slāni ar atomāri tīru virsmu. Ass simetriska kapsula, kuras dibenu veidoja 0.5 mm biezs nerūsošais tērauds, tika novietota uz misiņa siltuma sadalītāja (12. att.). Siltuma kontaktu starp misiņu un kapsulas dibenu nodrošināja šķidrā metāls, ar kuru rūpīgi bija noslapinātas abas saskares virsmas. Siltums tika ievadīts misiņā aksiāli no apakšas un aizvadīts, dzesējot perimetrā. Tas nodrošināja tādu temperatūras sadalījumu, ka uz šķidrā metāla 2 mm bieža slāņa brīvās virsmas temperatūras gradienta absolūtā vērtība bija proporcionāla radiālajai pozīcijai. Protams, pie ļoti intensīvām siltuma plūsmām konvekcija šķidrājā metālā radīja novirzi no šāda temperatūras sadalījuma, taču līdz šķidrā metāla kustības raksturīgajam ātrumam ap 1 cm/s realizējās praktiski lineārs temperatūras gradienta radiālais sadalījums uz gallija brīvās virsmas. Mazais šķidrā metāla slāņa augstums padarīja mazu Arhimēda spēka lomu rezultējošā kustībā.

Vairāki mikrotermopāri uz kapsulas dibena deva iespēju reģistrēt raksturīgo radiālo temperatūras kritumu, temperatūras lauka aksiālo simetriju un arī temperatūras pulsācijas, kad konvekcija gallija slānī kļuva nestabila. Izvietot

jebkādu sensorus šķidrā gāļijā nebija iespējams. Tādēļ vienīgā iespēja konstatēt gāļija kustību bija vizualizācija uz brīvās virsmas. Tika novērota brīvās virsmas profila deformācija, izmantojot lāzeru, taču lielākā daļa informācijas tika gūta, reģistrējot videoierakstā mazu cietu daļiņu kustību uz gāļija virsmas.



12. attēls. Vakuuma kapsula šķidra gāļija brīvās virsmas realizācijai

Kopumā tika izgatavotas vairāk par desmit šādas vakuuma kapsulas ar šķidru gāļiju. Visnegaidītākais rezultāts bija tas, ka absolūti visās kapsulās gāļija kustība, kamēr tā saglabāja aksiālo simetriju, uz brīvās virsmas bija vērsta temperatūras gradienta virzienā – radiāli simetrijas ass virzienā. Tas bija pretrunā ar datiem par virsmas spraiguma atkarību no temperatūras, kas literatūrā gandrīz visur uzrādīta kā lineāri dilstoša, pieaugot temperatūrai. Analizējot videoierakstus (13. attēls), tika atrasts, ka radiālā ātruma sadalījums ir nelineārs un tas neatbilst kustībai, ko izraisītu konstanta virsmas spraiguma atvasinājuma pēc temperatūras vērtība.

Tika atvērtas divas vakuuma kapsulas, lai veiktu gāļija sastāva analīzi. Sākotnējā gāļija tīrība bija ne sliktāka par 1 ppm piemaisījumu. Gāļija analīzes pēc tā izņemšanas no vakuuma kapsulas uzrādīja, ka tā tilpumā piemaisījumu nav vairāk, kā sākotnējā materiālā. Taču 50 mikronu bieza virsmas slāņa analīzes uzrādīja 5000 ppm svina koncentrāciju, kas ir vidējā vērtība šai slānī. Novērtējot svina daļu visā gāļija daudzumā, vidējā svina koncentrācija bija 120 ppm, kas varēja rasties tikai gāļija piesārņojuma rezultātā. Vakuuma kapsulas noslēgšanai ar stikla vāku bija izmantota svina vakuuma blīve. Apsverot iespējamo piesārņojuma norisi vakuuma kapsulas sagatavošanas laikā, par visiespējamāko varētu minēt svina virsmas difūziju pa vakuuma kapsulas nerūsoša tērauda sienām 72 stundu ilgajā kapsulas degazācijas laikā pie temperatūras 570 K.

Kad degazētājā kapsulā iepildīja šķidro galliju, tas nonāca uz varbūtēji ar svinu piesārņota kapsulas dibena.

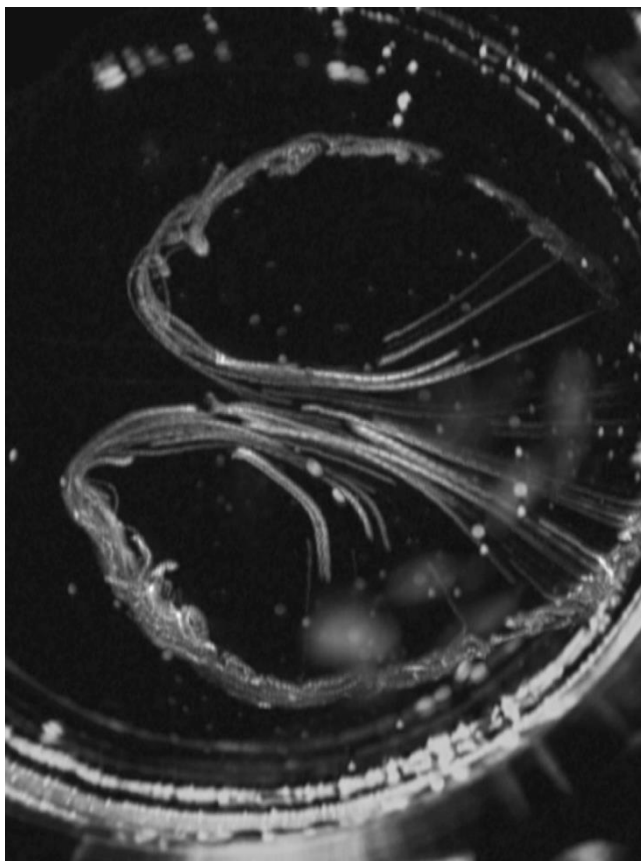
Ņemot vērā eksperimentāli konstatēto gallija piesārņojumu ar svinu, tika izvirzīta hipotēze par fizikālu modeli, kas izskaidro anomālo termokapilārās konvekcijas kustības virzienu un arī nomērīto radiālās kustības ātruma radiālo sadalījumu uz virsmas aksiāli simetriskā plūsmas režīmā. Ir zināms, ka svins šķidrā gallijā ir ļoti virsmas aktīvs, samazinot virsmas brīvo enerģiju jeb virsmas spraigumu. Plānā virsmas slānī, kura biezums salīdzināms ar atomārā izmēra kārtas lielumu, svina koncentrācija ir daudz lielāka nekā tilpumā. Šādas bināras sistēmas virsmas spraigums ir atkarīgs no piemaisījuma koncentrācijas virsmas slānī. Bet svina koncentrācija virsmas slānī ir atkarīga no temperatūras, tā samazinās pie augstākas temperatūras, kad svina līdzsvara koncentrācija tilpumā palielinās. Tādējādi virsmas spraigums Ga-Pb binārajā sistēmā ir mazāks pie augstākas temperatūras. Taču tam jābūt spēkā tikai līdz kādai kritiskai temperatūrai, pie kuras svina koncentrācija virsmas slānī ir tik maza, ka virs tās virsmas spraiguma atvasinājums maina zīmi no pozitīvas uz negatīvu. Realizējoties termokapilārajai konvekcijai pie temperatūras zem kritiskās vērtības, notiek nepārtraukta svina difūza apmaiņa starp šķidrā metāla tilpumu un virsmas slāni virzienā pa normāli brīvajai virsmai.

Termokapilārās konvekcijas novērojumi, pie ļoti lielām siltuma plūsmām modelī, apstiprināja virsmas spraiguma atvasinājuma zīmes maiņu pie temperatūras ap 520 K. Kad šāda temperatūra uz šķidrā metāla virsmas bija pie radiālās pozīcijas 0.8 R, visas cietās daļiņas uz virsmas izkārtojās uz brīvās virsmas gredzena ar šo rādiusu.



13. attēls. Cietu traseru daļiņu kustības vizualizācija uz gallija brīvās virsmas

Eksperimenta gaitā aksiāli simetriska termokapilārā konvekcija zaudēja stabilitāti, palielinot raksturīgo temperatūras kritumu virs 30 K. Gan cieto daļiņu uzvedība uz brīvās virsmas, gan virsmas deformāciju novērojumi izvēsta lāzera kūļa gaismā uzrādīja nestabilu kustību. Laikā vidētajai plūsmas struktūrai bija bipolārs raksturs ar vertikālu spoguļa simetrijas plakni. Šāda attīstīta kustība pie raksturīgā temperatūras krituma 140 K parādīta 14. attēlā. Maksimālais cieto daļiņu kustības ātrums pie temperatūras krituma 190 K sasniedza 5.5 cm/s. Pie temperatūras krituma 220 K šķidrā metāla plūsma uz virsmas atguva aksiālu simetriju laikā vidējotā nozīmē. Visas cietās daļiņas izvietojās uz gredzena ar rādiusu 0.73 R. Turpmāk palielinot radiālo temperatūras kritumu, šī gredzena rādiuss palielinājās. Kā izklāstīts iepriekš, binārā Ga-Pb sistēmā virsmas spraugumam ir maksimums pie kādas kritiskas temperatūras vērtības. Novērotā



14. attēls. Bipolāras termokapilārās konvekcijas režīma vizualizācija



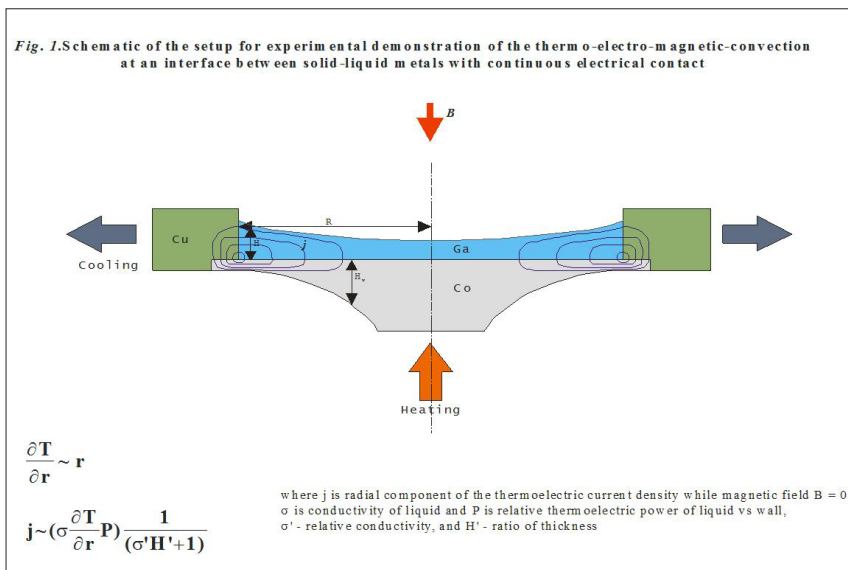
gredzena, uz kura izkārtojas cietās daļiņas, rādiusam uz brīvās virsmas, pēc mūsu hipotēzes, piemīt šī kritiskā temperatūra.

Veicot šo eksperimentālo demonstrāciju, tika izstrādāta jauna, oriģināla metodika šķidra metāla brīvās virsmas realizācijai ilgstošos laika periodos. Neplānoti notikusi gallija piesārņošana ar svinu ļāva izveidot jaunu fizikālu modeli bināru sistēmu no šķidrā metāla virsmas slāņa koncentrācijas atkarīgas termokapilāras konvekcijas izskaidrošanai. Tāpat pirmo reizi šķidrā metāla plānā slānī tika parādīta uz brīvās virsmas radiāli konverģējošas plūsmas pāreja uz kustību ar spoguļa simetrijas plakni. Šajā šķidra metāla plūsmā noslēgtā tilpumā ar brīvu virsmu pie lielām intensitātēm tika konstatētas lielas amplitūdas ātruma un temperatūras pulsācijas. Nenoliedzami, ka konstatētās termokapilāras konvekcijas īpatnības ar virsmas aktīvu piemaisījumu leģētā sakausējumā ir jāņem vērā, risinot prakses uzdevumus, piemēram, leģētu pusvadītāju monokristālu audzēšanas tehnoloģiskajos procesos.

Kaut arī eksperimenta rezultāti pārsvarā ir kvalitatīvi novērojumi, tie ļāva izvīrīt hipotēzi par jaunu fizikālu modeli, kas izskaidro sarežģīto un reizē arī negaidīto brīvās virsmas parādību noteiktā šķidra metāla plūsmā. Līdz šai eksperimentālajai demonstrācijai bija grūti iedomāties tik sarežģītu trīsdimensionālu kustību, kāda realizējās šķidrajā metālā.

## 5.2. Šķidra metāla termoelektromagnētiskās konvekcijas demonstrācija aksiāli simetriskā traukā

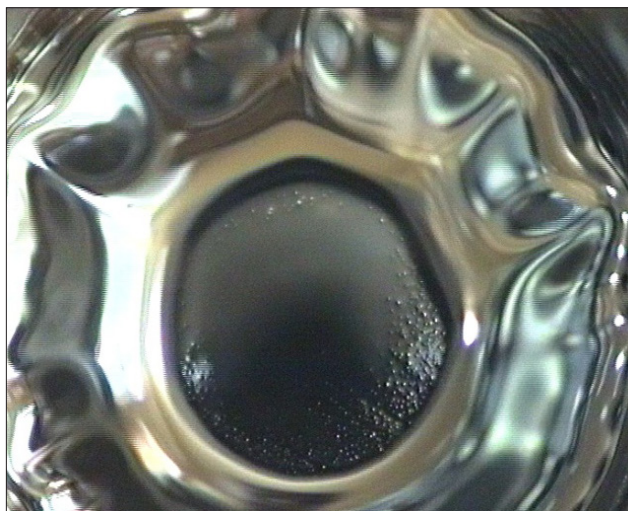
Veicot eksperimentālo pētījumu, kas aprakstīts kopsavilkuma iepriekšējā sadaļā, šķidrā metāla termokapilāro konvekciju tika mēģināts ietekmēt ar pastāvīgu magnētisko lauku, cerot samazināt konvektīvās pārnese intensitāti. Aksiāls viendabīgs magnētiskais lauks izraisīja intensīvu azimutālu kustību šķidrajā metālā. Kļuva acīmredzams, ka eksperimentālajā modelī, kurā ir neizotermiska saskares virsma starp elektriski vadošo trauka dibenu un šķidro metālu, cirkulē ievērojama termoelektriskā strāva. Magnētiskajam laukam mijiedarbojoties ar termoelektrisko strāvu šķidrajā metālā, izpaudās termoelektromagnētiskā konvekcija. Kā jau minēts nodaļas ievadā, audzējot pusvadītāju monokristālus no šķidrās fāzes bezsvara apstākļos orbitālajās kosmosa stacijās, tika cerēts novērst jebkuru kaut cik ievērojamu konvektīvo siltuma un masas pārnese šķidrajā fāzē. Taču pat monokristāla augšanas fronte var būt neizotermiska, radot apstākļus termoelektrisko strāvu cirkulācijai (*Gorbunov 1987, Khine 1998*). Tādā situācijā magnētiskais lauks gaidītās konvekcijas apspiešanas vietā var izraisīt tās intensifikāciju. Termoelektromagnētiskā konvekcija var izpausties arī gluži atšķirīgā situācijā – šķidra metāla plūsmā kodolsintēzes reaktora dzesēšanas blanketā (*Shercliff 1979*). Eksperimentālie demonstrējumi ļāva labāk izprast apstākļus, pie kādiem termoelektromagnētiskā konvekcija var kļūt par nozīmīgu faktoru šajās praktiski svarīgajās šķidra metāla plūsmās.



15. attēls. Termoelektromagnētiskās konvekcijas realizācijas shēma aksiālā magnētiskā laukā

Ekspierimentālais modelis [35], kurā tika veiktas termoelektromagnētiskās konvekcijas demonstrācijas, shematiski parādīts 15. attēlā. Obligāts nosacījums termoelektrisko strāvu cirkulācijai ir tangenciālā temperatūras gradienta esamība uz saskares virsmas trauka siena – viendabīgs šķidrās vadītājs. Ass simetriska trauka dibens tika izveidots tādā formā, lai uz tā saskares virsmas ar šķidru galliju realizētos temperatūras gradienta tangenciālās komponentes radiāli lineārs sadalījums. Kobalts tika izvēlēts par trauka dibena materiālu tā unikāli augstās termoelektriskās lietderības  $Z = s \cdot S / \lambda = -3,9$  A/W dēļ. Kobalta  $Z$  ir ļoti liels, jo tam piemīt augsta elektrovadāmība  $\sigma$  un pēc absolūtās vērtības ļoti liels  $S$  – absolūtais termoelektriskais EDS koeficients.  $Z$  uzrāda, cik liela ir materiāla spēja radīt strāvu, ja caur to norit siltuma plūsma un elektriskā ķēde ir noslēgta ar ideālu vadītāju. Šajā gadījumā šķidrās gallijs ir gandrīz neitrāls, kā termo-EDS radītājs, jo kā vairumam šķidro metālu tā  $S$  ir ļoti mazs. Siltuma plūsma tika ievadīta kobaltā no apakšas ar koncentrētu, ass simetrisku gaismas kūli un aizvadīta, dzesējot vara sānu sienu ar ūdens plūsmu.

Izveidotais eksperimentālais modelis ļāva realizēt ārkārtīgi intensīvu termoelektromagnētisko konvekciju šķidrā gallijā. Iedarbojoties ar viendabīgu aksiālu magnētisko lauku 0.1 T pie radiālā temperatūras krituma 200 K, šķidrā metāla azimutālais ātrums bija tik liels, ka brīvā virsma deformējās līdz centrālajā trauka daļā atvērās kobalta dibens. Lai pārbaudītu termoelektromagnētiskās



16. attēls. Ekstremāli stipras termoelektromagnētiskas konvekcijas izraisīta šķidra gallija slāņa deformācija.

konvekcijas lielumu kārtas novērtējumu pareizību, šķidrā metāla kustības azimutālais ātrums tika mērīts apstākļos, kad virsmas deformācija ir maza. Mērījumi parādīja, ka azimutālā ātruma sadalījums plūsmas kodolā ir tuvs cieta ķermeņa rotācijai.

Veicot ļoti vienkāršotus termoelektromagnētiskās konvekcijas lielumu kārtas novērtējumus, tika atrasts, ka aksiālā magnētiskā laukā raksturīgais kustības ātrums, pieaugot magnētiskā lauka indukcijai, sasniedz maksimumu, kad MHD-mijiedarbības parametrs  $N = 1$ . Pie lielām MHD-mijiedarbības parametra vērtībām šķidruma azimutālās griešanās ātrums tiecas uz lielumu, kuru nosaka Oma likums  $U_B = P\Theta/B$ , kur  $P$  ir sienas un šķidrā metāla absolūto termo-EDS koeficientu starpība,  $\Theta$  – temperatūras gradients, un  $B$  – magnētiskā lauka indukcija. Termoelektromagnētiskās konvekcijas raksturīgā ātruma maksimums tiek sasniegts pie relatīvi zemām magnētiskā lauka indukcijas vērtībām, kas samērojamas ar tām, kas tiek izmantotas praksē citu konvekcijas veidu apspiešanai. Taču būtisku šīs konvekcijas apspiešanu līdz limenim, kad tā vairs neiespaidotu siltuma vai masas pānesi, var sasniegt tikai pie magnētiskā lauka indukcijas vērtībām, kādas var iegūt, izmantojot supravadošus elektromagnētus.

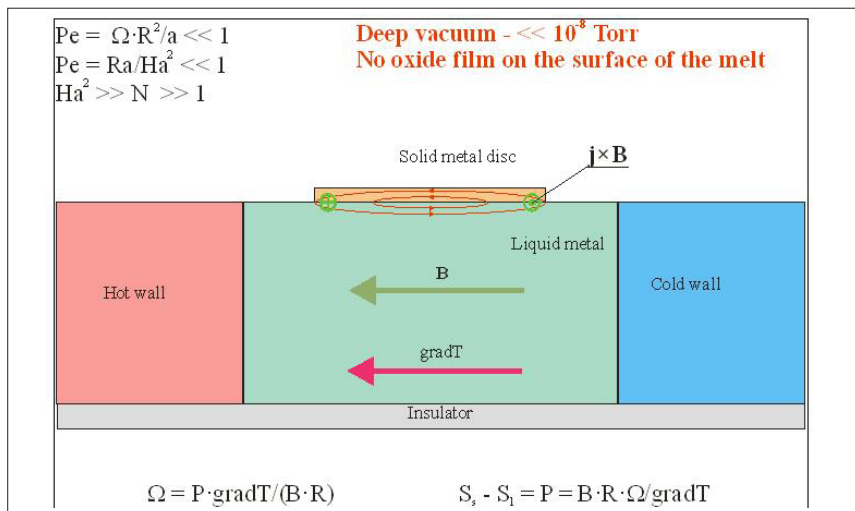
Eksperimentā novērota neviendabīga aksiāli simetriska magnētiska lauka mijiedarbība ar termoelektriskajām strāvām šai modeli. Tika fiksēta negaidīta situācija, kad realizējās radiāli diferenciāla rotācija. Neviendabīgā magnētiskā laukā un asimetriskās trauka sienu vai siltuma plūsmu konfigurācijās nav iespējams dot vispārīgus secinājumus par termoelektromagnētiskās konvekcijas

intensitāti. Var izrādīties, ka tā ir lokāli intensīva arī ļoti stipros magnētiskos laukos.

Termoelektromagnētiskā konvekcija tika novērota arī modificētā eksperimentālajā modelī, kad tikai mazs kobalta dibena aplis uz simetrijas ass bija elektriskā kontaktā ar šķidro metālu. Šajā gadījumā viendabīgā aksiālā magnētiskā laukā tika novērota intensīva azimutālā kustība šķidrā metālā, kuras azimutālais ātrums samazinājās apgriezti proporcionāli radiālajai pozīcijai.

Šāda novērotā termoelektromagnētiskās konvekcijas daudzveidība vienā konkrētā modelī, pieļaujot tikai aksiāli simetriskas parametru variācijas, norāda uz nepieciešamību katrā praktiskā situācijā uzmanīgi izanalizēt vai skaitliski modelēt rezultējošo termoelektromagnētiskās konvekciju, ja tā var būt svarīga siltuma un masas pārnesei. Kristalizācijas praktiskajos uzdevumos termoelektromagnētiskā konvekcija var būtiski iespaidot siltuma un leģējošo piemaisījumu pārnesei, tas dažiem gadījumiem uzrādīts rakstos [15, 3, 4]. Kodolsintēzes reaktora dzesēšanas blanketē magnētiskā laukā ar indukciju 7 T tā var izraisīt būtiskus lokalizētus efektus mazos garuma mērogos, atstājot iespaidu uz kanāla sienu koroziju.

Mūsu publikācijās [34, 14,] aprakstīts vēl arī cits termoelektrisko efektu izmantošanas gadījums. Tika izveidota jauna tipa sensors, kas ļauj veikt divas funkcijas. Pirmkārt, tas ļauj nepārtraukti mērit šķidra bināra metāliska sakausējuma absolūto termo-EDS koeficientu nestacionāros, neizotermiskos apstākļos un arī turbulenta plūsmā. Otrkārt, ja ir precīzi zināms šķidrā sakausējuma absolūtais termo-EDS, kā funkcija gan no temperatūras, gan no komponentu koncentrācijas, tad šī zonde ļauj nepārtraukti sekot šķidrā sakausējuma sastāvam.



17. attēls. Cietas daļiņas termoelektromagnētiski ierosināta rotācija

Otrā funkcija varētu būt ļoti nozīmīga, piemēram, Li-Pb eutektikas sastāva stabilitātes monitoringam kodolsintēzes reaktora blanketā.

Gluži negaidītā un neizprotamā veidā termoelektrisko strāvu mijiedarbība ar ārēju magnētisko lauku tika novērota uz šķidra metāla virsmas. Darbā [54] dots skaidrojums, kādēļ maza cieta metāla daļiņa intensīvi rotē uz šķidra metāla virsmas, ja siltuma plūsmas un magnētiskā lauka virzieni ir paralēli un vērsti pa pieskari šķidrums virsmai.

Šajā nodaļā apskatītajos darbos uzrādītas būtiskas jaunas atziņas praktiskajai magnētiskajai hidrodinamikai. Termokapilārā konvekcija, kas dominē siltuma un masas pārnēsē kristalizācijas laikā bezsvara apstākļos kosmosā un arī prakses uzdevumos, tādos kā metālu izvaicēšana ar elektronu kūli vai metināšana, var būt ļoti negaidīta veida un grūti prognozējama. Pat ļoti mazu virsmas aktīvu piemaisījumu koncentrāciju klātbūtne var izraisīt radikālu termokapilārās konvekcijas plūsmas izmaiņu. Mūsu eksperimentālā demonstrācija ļāva izveidot jaunu fizikālu modeli šādu situāciju aprakstam. Eksperiments uzrādīja arī to, ka intensīva termokapilārā konvekcija noslēgtā aksiāli simetriskā tilpumā zaudē stabilitāti, zaudējot aksiālo simetriju arī laikā vidējotā nozīmē un veidojot ļoti sarežģītas trīsdimensionālas šķidra metāla plūsmas ar izteiktām ātruma pulsācijām.

Magnētiskais lauks mūsu eksperimentā izraisīja nevis konvekcijas apspiešanu, bet gan tās būtisku intensifikāciju, ko nosaka termoelektromagnētiskā konvekcija. Termoelektromagnētiskā konvekcija daudzās praktiskās problēmās var būt būtiska. Kristalizācijas procesos no šķidrās fāzes tā iespaido gan siltuma, gan masas pārnēsi. Kanāla plūsmās, kā, piemēram, šķidra metāla blanketos, tā var radīt lokalizētas, intensīvas, trīsdimensionālas un nestacionāras plūsmas mazā garuma mērogā, iespaidojot kanāla sienu koroziju.

## NOBEIGUMS

Šajā kopsavilkumā dots īss pārskats par galvenajiem autora eksperimentālajiem pētījumiem šķidra metāla plūsmās noslēgtos tilpumos. Apskatītajos darbos ir pētīta virkne magnētiskās hidrodinamikas procesu šķidros metālos, ko izraisa atšķirīgi tilpuma un arī virsmas spēki. Eksperimentālajos pētījumos sevišķa uzmanība veltīta magnētiskā lauka ietekmei uz kausējumu plūsmu stabilitāti un arī turbulences integrālajiem parametriem, kas ir būtiski siltuma un masas konvektīvajai pārnesi. Praktiskajos pielietojumos, kur šis magnētiskās hidrodinamikas parādības ir būtiskas, šķidrā metāla plūsmu parasti izraisa dažādu spēku kopums. Mūsu veiktajos pētījumos parasti tika mēģināts veidot fizikālus modeļus, kuros dominē viena fizikāla parādība vai spēks, kas izraisa šķidrā metāla kustību. Tāda pieeja, mūsaprāt, ļāva gūt rezultātus, kas sniedz vispārīgākus secinājumus, nekā kompleksa fizikāla modeļa izpēte, kas raksturīga tikai vienai īpašai praktiskai problēmai. Tika mēģināts atrast pēc iespējas vispārinātus kritērijus, kas dotu priekšstatu par nepieciešamo iedarbības veidu ar magnētisko lauku uz šķidra metāla plūsmu, lai sasniegtu mērķtiecīgi izvēlētu plūsmas raksturu.

Šo eksperimentu rezultāti ir nozīmīgi pirmām kārtām tehnoloģiju attīstīšanai metālu un pusvadītāju materiālu mērķtiecīgai kristalizācijai ar nolūku iegūt cietvielas produktu ar stingri noteiktām īpašībām. Minot tikai kā piemēru dažus pielietojumus, kur mūsu pētījumu rezultāti ir devuši būtisku ieguldījumu, var minēt pusvadītāju monokristālu audzēšanas metodes no šķidrās, metāliskās fāzes un šķidru metālu sakausējumu sagatavošanu kristalizācijai ar magnētiskās semilevitācijas metodi. Šajos un citos prakses uzdevumos magnētiskais lauks radikāli iespaido konvektīvo siltuma un masas pārnesi šķidrājā fāzē. Semilevitācijas kausēšanas gadījumā magnētiskais lauks ne tikai ietekmē kustību šķidrājā metālā, bet arī nosaka kausējuma apgabala formu. Mūsu veiktie eksperimentālie pētījumi hidrodinamisku parādību modeļos nesuši būtisku un agrāk neapzinātu informāciju industriālo procesu adekvātu matemātisku modeļu izveidošanai un to korektai skaitliskai risināšanai.

Veidojot fizikālus modeļus, kuru mērķis ir pētīt šķidra metāla kustību magnētiskā laukā, jāsaprotas ar īpašām problēmām, realizējot līdzības nosacījumus attiecībā uz robežnosacījumiem, un veicot ātruma un temperatūras mērījumus necaurspīdīgā vidē. Mūsu publikācijās ir apzināti reālie apstākļi, kas bieži nav ņemti vērā, definējot eksperimenta robežnosacījumus, un ir piedāvāti jauni šo metodisko uzdevumu risināšanas paņēmieni. Veicot lokālos ātruma un siltuma pārneses mērījumus šķidru metālu nestacionārās plūsmās noslēgtos tilpumos, līdz šim neeksistē universālas metodes un sensori. Mūsu publikācijās ir piedāvāti jauni risinājumi šādu mērījumu veikšanai, to starpā arī jaunas mūsu izstrādātas metodes un sensori.

Otrajā nodaļā apskatītajos darbos aprakstīti eksperimentāli pētījumi par šķidra metāla plūsmām noslēgtos tilpumos, kuras izraisījis “augstfrekvences” magnētiskā lauka inducēts elektromagnētiskais spēks. Šeit frekvence par augstu tiek saukta tad, kad šķidrā metālā eksistē skinslānis, kurš ir daudz plānāks par šķidrums apgabala raksturīgo izmēru, taču tomēr nav tik plāns, lai, analizējot uzdevumus, tilpuma elektromagnētisko spēku varētu aizstāt ar ekvivalentu virsmas spēku. Tāda veida plūsmas šķidrās metālos realizējas daudzos industriālos procesos, piemēram, tāda ir metālu un to sakausējumu indukcijas kausēšana, lai tos sagatavotu sekojošam kristalizācijas procesam. Kā likums, vienmēr šādas šķidra metāla plūsmas ir nestabilas un turbulentas. Šķidru metālu hidrodinamikas pētījumi laboratorijas modeļos ir ļāvuši gūt nepieciešamo informāciju, lai, pirmkārt, industriālos procesus varētu adekvāti modelēt skaitliski, un, otrkārt, šajos pētījumos ir bijusi iespēja izmēģināt jaunus iedarbības līdzekļus, lai mērķtiecīgi iespaidotu šķidrā metāla plūsmu. Visu šajā nodaļā apskatīto darbu novitāti apstiprina tas, ka iegūtie eksperimentālie rezultāti ir iegūti pirmo reizi un praktiski paliek vienīgie līdz šim laikam, būtiski papildinot datus, kas iegūti līdzīgos agrāk veiktos pētījumos. Šie eksperimentālo pētījumu rezultāti svarīgi gan no prakses viedokļa, dodot idejas tehnoloģisko procesu pilnveidošanai, gan arī uzrāda būtiskus fizikālus aspektus, kas nav bijuši acimredzami līdz šo fizikālo nianšu atpazīšanai un izcelšanai eksperimentālajos pētījumos.

Iegūtie rezultāti tika izmantoti skaitliskā modeļa pilnveidošanai, pirmkārt, turbulences modeļa pārbaudei. Tas deva iespēju ar lielāku ticamības pakāpi izmantot skaitlisko modelēšanu, lai prognozētu notiekošo reālā industriālā procesā, konkrēti – šķidra TiAl sakausējuma homogenizācijai un pārkarsēšanai semilevitācijas indukcijas krāsnī.

Eksperimenti parādīja, ka pastāvīgais magnētiskais lauks var efektīvi tikt izmantots turbulences un brīvās virsmas deformāciju apspiešanai plūsmās, ko ierosinājis augstfrekvences magnētiskais lauks. Taču ļoti uzmanīgi jāizvērtē, kāda pastāvīgā lauka orientācija var dot vēlamu rezultātu.

Nodemonstrētā iespēja radikāli mainīt augstfrekvences magnētiskā lauka inducēto kustību elektriski vadošā šķidrumā tika veikta pirmo reizi. Tā pierādīja, ka arī augstu frekvenču gadījumā var tikt izmantota iespēja organizēt šķidrums kustību, mērķtiecīgi ietekmējot inducētā siltuma un neviendabīga šķidrums gadījumā arī masas pārnesei. Konstatētā šķidrums plūsmas asimetrija nevar tikt uzskatīta par tehnisku nepilnību, bet tā jāņem vērā kā fizikāla realitāte. Rūpīga augstfrekvences strāvas spoles ģeometrijas konfigurācija var tikai zināmā mērā samazināt šo efektu, taču nevar novērst faktu, ka strāva jāpievada no ārēja avota.

Pirmo reizi ir pētīta šķidra metāla plūsma semilevitācijas apstākļos. Iegūtie dati parāda, ka šāda veida magnētiskās hidrodinamikas uzdevumos trīskāršā savstarpējā saikne starp augstfrekvences magnētiskā lauka sadalījumu, šķidrums apgabala formu un plūsmu tilpumā ir ļoti nozīmīga, šķidrā metāla hidrodinamikā izraisot būtiskas atšķirības no plūsmas traukā, kur šādas saiknes nav.

Mazas perturbācijas lauka sadalījumā vai virsmas īpašībās var izraisīt ļoti stipru iespaidu uz šķidrā metāla plūsmu tilpumā. Veicot šāda tipa uzdevumu skaitlisko modelēšanu, noteikti jāiekļauj visi trīsdimensionālie faktori – induktora spoles asimetrija, brīvās virsmas asimetrija gan laikā vidējotā, gan mainīgā nozīmē un, protams, arī pilnībā trīsdimensionāls šķidrā metāla plūsmas raksturs.

Kopā otrajā nodaļā aprakstītie darbi ir devuši samērā plašu eksperimentālo rezultātu klāstu, kas ļauj dziļāk izprast šķidru metālu reālo hidrodinamiku, ko izraisījis augstfrekvences magnētiskais lauks. Pirmo reizi eksperimentāli ir izpētīta ātruma lauka detalizēta struktūra šķidra metāla tilpumā gan ar cietām trauka sienām, gan semilevitācijas gadījumā. Tāpat pirmo reizi ir izpētītas eksperimentāli pastāvīga magnētiskā lauka iedarbības īpatnības uz augstfrekvences lauka ierosinātu šķidra metāla plūsmu noslēgtos tilpumos. Arī “skrejoša” lauka izmantošanas iespēja augstfrekvences magnētiskā lauka gadījumā ir nodemonstrēta pirmo reizi. Visām pētītajām plūsmām raksturīga ļoti izteikta trīsdimensionāla nestabilitāte. Tikai apzināti konfigurēts pietiekami stiprs pastāvīgs magnētiskais lauks spēj panākt plūsmas stabilizāciju šķidrums tilpumā, taču ne skinslāņa apgabalā, kur darbojas aktīvais, augstfrekvences inducētais elektromagnētiskais spēks.

Trešajā kopsavilkuma nodaļā īsi aprakstīti darbi, kuros eksperimentāli tika pētīta šķidra metāla plūsma ass simetriskā traukā, ko ierosina trauka un šķidrums virsmai koaksiāli pieguļoša diska diferenciāla rotācija pastāvīgā magnētiskā laukā. Šī plūsma pēc būtības ir Čohraļska monokristālu iegūšanas metodē norītošās uzspīestās konvekcijas modelis. Eksperimentālā pētījuma veikšanas laikā iegūtie rezultāti bija pirmie šai jomā. Tie palīdzēja daudz labāk izprast, ka stipra viendabīga magnētiskā lauka pielietošana nav lietderīga kristālu audzēšanai ar Čohraļska metodi, un tas apgāž agrākos uzskatus. Konvektīvās siltuma pārneses samazināšana stiprā aksiālā magnētiskajā laukā izraisa stipru kristalizācijas frontes atkāpi no vēlamās planārās formas, un konvektīvās masas pārneses samazināšana izraisa, piemēram, silīcija kausējuma piesātināšanu ar skābekli, kurš nokļūst kausējumā, lēni erodējot kvarca tiģelim. Šis secinājums deva stimulu meklēt citus risinājumus, piemēram, pielietot aksiāli simetriskas neviendabīgas magnētiskā lauka konfigurācijas.

Mūsu eksperimentālais pētījums pirmo reizi nodemonstrēja magnētiskā lauka izraisītu nestabilitāti diferenciāli rotējošā sistēmā. Audzējot monokristālus ar Čohraļska metodi, šāda nestabilitāte ir absolūti nepieņemama, jo magnētiskā lauka ietekmē kristālā parādās aksiāla neviendabības joslainība ar pārsteidzoši lielu aksiālo soli. Tika atrasti bezdimensionālie nosacījumi un to skaitliskās vērtības, pie kurām realizējas brīvā nobīdes slāņa nestabilitāte.

Ceturrtā nodaļa. Daudzveidīgās šķidrums plūsmas variācijas, kādas rodas noslēgtos tilpumos, caur kuriem noris siltuma plūsma, ir klasiska hidrodinamikas problēma, kas ir bijusi un paliek intriģējoša pētījumu nozare. Šajā kopsavilkumā apskatītajos darbos eksperimentāli pētīta šķidra metāla naturālā konvekcija, kam



piemīt augsta siltuma difūzijas spēja, jeb bezdimensionāli – mazs Prandtla skaitlis  $Pr \ll 1$ . Pie pietiekami intensīvām siltuma plūsmām naturālā konvekcija kļūst nestabila, ar raksturīgām relatīvi lielas amplitūdas lokālām un arī integrālām siltuma plūsmas svārstībām laikā. Šķidro metālu zemais Prandtla skaitlis nosaka ievērojamas naturālās konvekcijas un tās stabilitātes īpatnību atšķirību no citiem šķidrumiem, kuru temperatūras difūzijas koeficients, kā likums, ir augstāks par impulsa difūzijas koeficientu. Labā šķidro metālu elektrovadāmība ļauj ļoti efektīvi izmantot magnētisko lauku naturālās konvekcijas mērķtiecīgai ietekmēšanai, lai sasniegtu vēlamu konvektīvās siltuma pārneses režīmu. Eksperimentālie pētījumi par pastāvīga magnētiskā lauka ietekmi uz naturālo konvekciju ļāva atrast kritērijus, pie kuriem iespējams apspiest lokālās un integrālās siltuma plūsmu svārstības. Naturālā konvekcija ir ārkārtīgi nozīmīga fizikāla siltuma un masas pārneses parādība gandrīz jebkurā kristalizācijas procesā no šķidrās fāzes, lielā mērā nosakot cietās fāzes makroskopisko un mikroskopisko viendabību. Tādēļ tās izziņa ir ļoti svarīga dažādu monokristālu iegūšanas paņēmieni attīstībai, kā arī, piemēram, polikristālisku metālu iegūšanai ar vēlamu struktūru. Kaut arī ir daudz citu pētījumu šai jomā, tomēr visos kopsavilkuma šajā nodaļā iekļautajos darbos pētījuma veikšanas laikā ir gūti jauni, pirmo reizi uzrādīti secinājumi.

Aprakstītais eksperimentālais pētījums tika veikts, atsaucoties uz starptautiskas darba grupas izsludinātu mērķi pārbaudīt skaitliskās modelēšanas iespējas gūt praksei atbilstošus rezultātus par oscilējošas naturālās konvekcijas norisi šķidrumos ar zemu Prandtla skaitli. Šajā eksperimentālajā pētījumā tika uzskatāmi nodemonstrēti oscilējošā konvekcijas režīma trīsdimensionālais raksturs, kurš realizējas tikai noteiktā ģeometriskā parametru diapazonā, no kuriem atkarīgi gan  $Gr_{osc}$ , gan bezdimensionālā oscilāciju frekvence. Tika parādīts, ka pāreja uz oscilējošu režīmu notiek tikai pie ārējās galīga lieluma perturbācijas. Pirmo reizi tika iegūta eksperimentāla informācija par momentālajiem temperatūras sadalījumiem šādā oscilējošā konvekcijā. Šis eksperiments stimulēja meklēt jaunas pieejas šāda tipa uzdevumu skaitliskai modelēšanai, jo rezultātu iegūšanas laikā neviens no eksistējošajiem skaitliskajiem modeļiem nespēja adekvāti atspoguļot eksperimentā uzrādīto.

Mūsu publikācijās aprakstīts eksperimentālais pētījums, kas savulaik tika iecerēts, lai gūtu informāciju par pastāvīga magnētiskā lauka ietekmi uz šķidra metāla naturālās konvekcijas stabilitāti taisnstūrīnā traukā, kurš tiek sildīts no sāniem. It sevišķi jāuzsver eksperimentā iegūtā informācija, ka neatkarīgi no magnētiskā lauka orientācijas jebkuras temperatūras pulsācijas pētījuma Grashofa skaitļa diapazonā tika pilnībā apspiestas jau pie relatīvi zemām Hartmaņa skaitļa vērtībām. Kā uzskatāmi parādīja kopsavilkuma 4.1. sadaļā aprakstītais darbs, naturālās konvekcijas plūsmas oscilējošam režīmam, tūlīt pēc tā uzsākšanās pārsniedzot kritisko intensitāti pie  $Gr_{osc}$ , piemīt pilnībā trīsdimensionāls raksturs. Tādēļ jebkuras orientācijas magnētiskais lauks, apspiežot virpļainības komponentes, kas tam ir normālas, stabilizē konvektīvo plūsmu. Šim

eksperimentālajam pētījumam tā veikšanas laikā noteikti bija būtiska nozīme, parādot, cik efektīvi magnētiskais lauks aizkavē naturālās konvekcijas plūsmas šķidrā metālā stabilitātes zudumu neatkarīgi no lauka orientācijas. Naturālās konvekcijas ātruma struktūras eksperimentāli mērījumi noslēgtā tilpumā vēl līdz šim laikam paliek vienīgie autoram zināmie.

Eksperimentāli izpētītā magnētiskā lauka ietekme uz naturālās konvekcijas stabilitāti Čohraļska monokristālu audzēšanas metodei fizikāli līdzīgā modeli ļāva uzrādīt pietiekamos kritērijus bezdimensionālā formā konvektīvās plūsmas ātruma un temperatūras pulsāciju apspiešanai. Šie rezultāti ir praktiski nozīmīgi un bija pirmie, kas tika publicēti par šo problēmu, uzrādot nepieciešamo magnētiskā lauka lielumu, lai nepieļautu audzējamo monokristālu aksiālo mikroneviendabību

Termokapilārā konvekcija, kas dominē siltuma un masas pārnēsē kristalizācijas laikā bezsvara apstākļos kosmosā un arī prakses uzdevumos, tādos kā metālu iztvaicēšana ar elektronu kūli vai metināšana, var būt ļoti negaidīta veida un grūti prognozējama. Pat ļoti mazu virsmas aktīvu piemaisījumu koncentrāciju klātbūtne var izraisīt radikālu termokapilārās konvekcijas plūsmas izmaiņu. Mūsu eksperimentālā demonstrācija ļāva izveidot jaunu fizikālu modeli šādu situāciju aprakstam. Eksperiments uzrādīja arī to, ka intensīva termokapilārā konvekcija noslēgtā aksiāli simetriskā tilpumā zaudē stabilitāti, zaudējot aksiālo simetriju arī laikā vidējotā nozīmē un veidojot ļoti sarežģītas trīsdimensionālas šķidra metāla plūsmas ar izteiktām ātruma pulsācijām. Magnētiskais lauks mūsu eksperimentā izraisīja nevis konvekcijas apspiešanu, bet gan tās būtisku intensifikāciju, ko nosaka termoelektromagnētiskā konvekcija. Termoelektromagnētiskā konvekcija daudzās praktiskās problēmās var būt būtiska. Kristalizācijas procesos no šķidrās fāzes tā iespaido gan siltuma, gan masas pārnēsi. Kanāla plūsmās, kā, piemēram, šķidra metāla blanketos, tā var radīt lokalizētas, intensīvas, trīsdimensionālas un nestacionāras plūsmas mazā garuma mērogā, iespaidojot kanāla sienu eroziju.

## SECINĀJUMI

1. Atbilstoši fizikālās līdzības kritērijiem un robežnosacījumu prasībām ir uzbūvētas un eksperimentālos pētījumos izmantotas vairāk nekā desmit modeļu iekārtas elektriski vadošu šķidrums plūsmu noslēgtos tilpumos izpētei elektromagnētisku lauku ietekmē. Gūtā pieredze ļauj adekvāti plānot sarežģītus fizikālas izpētes modeļus.
2. Šķidra metāla laikā vidējoto un arī turbulento plūsmu ātruma un temperatūras mērījumu veikšanai grāda pretendents pats piemērojis, uzbūvējis, aprobējis un izmantojis vairāku tipu lokālo ātrumu un temperatūras sensorus, apzinoties katras metodes pielietojamības robežas. Izmantoti: 1) termoanemometrs; 2) elektriskā potenciāla diferenču ātruma sensors; 3) elektriskā potenciāla diferenču ātruma sensors ar iebūvētu miniatūru pastāvīgo magnētu; 4) optiski mehāniskais ātruma sensors un 5) ultraskaņas Doplera anemometrs.
3. Eksperimentāli izpētīt šķidra metāla plūsmas, ko izraisa augstfrekvences elektromagnētiskais lauks, atrasts, ka: 1) plūsma ir nestabila, ar dominējoši liela mēroga virpuļiem pat pie ļoti mazām intensitātēm; 2) plūsmai nepiemīt gaidāmā ģeometriskā trauka simetrija, bet tā neizbēgami ir trīsdimensionāla, ja augstfrekvences lauka avots ir induktora spole ar galīgu impedanci; 3) augstfrekvences un pastāvīga magnētiskā lauka superpozīcija ļauj apspiest šķidrā metāla plūsmas turbulenci un stabilizēt brīvo virsmu, ja pastāvīgajam magnētiskajam laukam ir komponente, kas ir normāla brīvajai virsmai un 4) eksperimentāli var realizēt skrejošu augstfrekvences magnētisku lauku no viena barošanas avota, un rezultējošā plūsma dod jaunas iespējas siltuma un masas pārneses iespaidošanai.
4. Eksperimentāli pētīt šķidra metāla kustību cilindriskā traukā, ko rada diferenciāla rotācija, tika apstiprināta hipotēze par plūsmas raksturu pie augstiem Hartmaņa un elektromagnētiskās mijiedarbības parametriem. Tika atrasts, ka magnētiskais lauks ne tikai apspiež turbulenci, bet arī pats rada apstākļus divdimensionālai brīvā ātruma nobīdes slāņa nestabilitātei.
5. Šķidra metāla ar mazu Prandtla skaitli naturālā konvekcija tika eksperimentāli pētīta, ieskaitot lokālā ātruma mērījumus vairākās konfigurācijās, uzrādot pāreju no lamināras kvazi-divdimensionālas plūsmas uz trīsdimensionālu harmoniski oscilējošu plūsmu pie atrastajiem kritiskajiem parametriem. Pastāvīga magnētiska lauka ietekmē turbulentu naturālo konvekciju var stabilizēt, ja lauka orientācija izvēlēta perpendikulāri Arhimēda spēka rotoram un elektromagnētiskās mijiedarbības parametrs  $N \gg 1$ .
6. Eksperimentāli mēģinot realizēt dominējoši termokapilāritātes izraisītu kustību, pie šķidra gallija brīvās virsmas tika novērota kustība ar virzienu, kas bija pretējs gaidāmajam. Tā rezultātā grāda pretendenta līdzautors

izstrādāja teorētisku modeli, kas izskaidro parādību ar niecīga daudzuma virsmas aktīvu piemaisījumu iespaidu uz virsmas spraigumu atkarībā no temperatūras. Pastāvīgā magnētiskā laukā termokapilārās kustības apspiešanas vietā tika konstatēta ļoti spēcīga kustība, ko izraisa termoelektrības mijiedarbība ar magnētisko lauku. Uzrādīti šādai plūsmai nepieciešamie apstākļi un raksturīgais ātruma mērogs.

## **Autora ieguldījums**

Doktora grāda pretendents visos veiktajos eksperimentālajos pētījumos ir bijis galvenais autors, gan kā izpildītājs, gan kā eksperimentālo modeļu izveidotājs, gan arī mērījumu metodoloģijas plānotājs, datu ieguvējs, apstrādātājs un interpretators (izņemot kopsavilkuma tekstā uzrādītos pāris darbu). Lai arī darbs aptver ilgstošu laika periodu, novitāte jāskata pēc darbu pirmpublicācijas laika, kad gandrīz visi eksperimentu rezultāti bija pirmreizēji un atspoguļoja tai laikā neapzinātas fizikālas parādības.

## GALVENO PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

**Magnetohydrodynamics**, ISSN (printed edition): 0024-998X:

1. A. Bojarevičs, T. Beinerts. Experiments on Liquid Metal Flow Induced by Rotating Magnetic Dipole Moment. *Magnetohydrodynamics*, Vol. 46 (2010), No. 4, pp. 333-338.
2. Ya. Kompan, I. Protokovilov, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. Magnetically controlled electroslag melting of titanium alloys. *Magnetohydrodynamics*, Vol. 46 (2010), No. 3, p. 317-324.
3. I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, A. Bojarevics, L. Buligins, Investigation of liquid phase motion generated by the thermoelectric current and magnetic field interaction. *Magnetohydrodynamics*, Vol. 46 (2010), No. 4, pp. 371-380.
4. I. Kaldre, A. Bojarevics, Y. Fautrelle, J. Etay, L. Buligins. Current and magnetic field interaction influence on liquid phase convection. *Magnetohydrodynamics*, Vol. 48, No. 2, 2012, pp. 399-405.
5. A. Bojarevics, V. Bojarevics, Yu. M. Gelfgat and K. Pericleous. Liquid metal turbulent flow dynamics in a cylindrical container with free surface: experiment and numerical analysis, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 35, No. 3, 205-222, 1999.
6. A. V. Boyarevich, Yu. M. Gelfgat and L. A. Gorbunov, Effect of a vertical magnetic field on the stability of motion of an isothermal melt in a model of the Czochralski process, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 27, No. 2, 170-176, 1991.
7. A. V. Boyarevich, Yu. M. Gelfgat and L. A. Gorbunov, Effect of a constant magnetic field on the hydrodynamic characteristics of a melt during the process of semiconductor monocrystal growth, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 26, No. 3, 321-324, 1990.
8. A. V. Boyarevich, V. M. Vinogradov, Yu. M. Gelfgat, L. A. Gorbunov and S. V. Turuntaev, Measurement of local averaged velocities in a magnetohydrodynamic experiment, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 26, No. 2, 246-249, 1990.
9. A. V. Boyarevich, L. A. Gorbunov and E. D. Lyumkis, Physical and numerical modeling of the influence exerted by a vertical magnetic field on the forced convection in the processes of using the Czochralski method to grow single crystals, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 25, No. 2, 213-219, 1989.
10. A. V. Boyarevich and L. A. Gorbunov, Effect of magnetic fields of different orientation on thermogravitational convection in an electrically conducting fluid with a horizontal heat flow, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 24, No. 2, 148-154, 1988.

**Experiments in Fluids**, ISSN: 1432-4864 (print version):

11. A. Bojarevičs, A. Cramer, Yu. Gelfgat, G. Gerbeth. Experiments on the magnetic damping of an inductively stirred liquid metal flow. *Experiments in Fluids* Vol. 40 (2006): 257–266.
12. A. Pedchenko, A. Bojarevics, J. Priede, G. Gerbeth, R. Hermann. Velocity measurements in the liquid metal flow driven by a two-phase inductor. Volume 54, Issue 6, June 2013, 7 p, <http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-013-1558-7>.

**Physics of Fluids**, ISSN (printed): 1070-6631:

13. J. Priede, A. Cramer, A. Bojarevics et al. Experimental and numerical study of anomalous thermocapillary convection in liquid gallium. *Physics of Fluids*, Vol. 11, No. 11, pp. 3331-3339, 1999.

**Modern Physics Letters B**, Print ISSN: 0217-9849:

14. I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, A. Bojarevics, L. Buligins. Absolute thermoelectric power of Pb-Sn alloys. *Modern Physics Letters B*, Vol. 25, No. 10 (2011), pp. 731-738.

**Journal of Alloys and Compounds**, ISSN: 0925-8388

15. I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, A. Bojarevics, L. Buligins. *Thermoelectric current and magnetic field interaction influence on the structure of directionally solidified Sn-10 wt.%Pb alloy*. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 571, 2013, pp. 50-55

**Vacuum**, ISSN: 0042-207X:

16. A. Simanovskis, J. Maniks, A. Bojarevics and Yu. Gelfgat. A vacuum cell for obtaining clean surfaces on liquid low melting point metals. *Vacuum*, Vol. 48, No. 6, pages 551 to 552, 1997.

**Metallurgical and materials transactions B**, ISSN: 1073-5615 (print version

17. Cramer A., Galindo V., Gerbeth G., Priede J., Bojarevičs A., Gelfgat Y., Andersen O., (...), Stephani G. Tailored magnetic fields in the melt extraction of metallic filaments, *Metallurgical and materials transactions B*, Process metallurgy and materials processing science, Vol. 40 (2009), No. 3, pp. 337-344.

**Recent Advances in Heat Transfer**, ISSN: 1790-5095:

18. Bojarevics A., Gelfgat Yu. M., Gorbunov L. A. Numerical and physical simulations of heat and mass transfer at single crystal growth from melt under

the effect of electromagnetic field. in Recent Advances in Heat Transfer (eds. B. Sunden and A. Zukauskas ) Elsevier, The Netherlands, 1992, pp. 935-949.

**Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity**, ISSN: 1070-6631 (print)

19. A. Bojarevics, Yu. M. Gelfgat, L. A. Gorbunov. Three-dimensional oscillatory convection of the low Prandtl number fluid in a rectangular cavity with differential heating from the side (experiment). In *Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity*, 1992, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 69-74.

**Journal of Iron and Steel Research International**

20. Beinerts T., Bojarevics A. Linear Permanent-Magnet Pump and Stirrer for Molten Aluminium (*Journal of Iron and Steel Research International*).
21. Kaldre I., Bojarevics A.. Influence of the slowly rotating transverse magnetic field on the solidification of metallic alloys *Journal of Iron and Steel Research International*, issue 10, 2012.
22. Li Xi, Ren Zhongming, Gagnoud Annie, Budenkova Olga, Bojarevics Andris, Fautrelle Yves. *Thermo-electric motions and structures generated by static magnetic fields during the solidification of metallic alloys*. *Journal of Iron and Steel Research International*, issue 10, 2012.
23. Wang Jiang, Fautrelle Yves, Ren Zhong-ming, Li Xi, Nguyen-Thi Henri, Mangelinck-Noel Nathalie, Salloum Abou Jaoude Georges, Zhong Yun-bo, Kaldre Imants, Bojarevics Andris, Buligins Leonids. *In-situ analyzing the Influence of Thermoelectromagnetic Convection on the Nucleation ahead of the Advancing Interface during Directional Solidification*. *Journal of Iron and Steel Research International*, issue 10, 2012.

**Journal of Material Sciences**

24. Jiang Wang, Zhongming Ren, Yves Fautrelle, Xi Li, Henri Nguyen-Thi, Nathalie Mangelinck-Noel, Georges Salloum Abou Jaoude, Yunbo Zhong, Imants Kaldre, Andris Bojarevics. Modification of liquid/solid interface shape in directionally solidifying Al-Cu alloys by a transverse magnetic field. *Journal of Materials Science*, January 2013, Volume 48, Issue 1, pp. 213-219.

**Patenti**

25. G. Gerbeth, J. Priede, I. Bucenieks, A. Bojarevičs, Ju. Gelfgats, D. Buchenau. Verfahren und Anordnung zur Messung des Durchflusses elektrisch leitfähiger Medien. Patent of Germany No. DE 10 2007 046 881 84 2012.05.24, 2012

26. Andris Bojarevičs, Jurijs Gelfgats, Toms Beinerts, Imants Bucenieks. Metāla sakausējuma sūkņēšanas un maisīšanas paņēmiens un iekārta tā realizēšanai. Latvijas republikas patents LV 14404 B, 20.10.2011. Patenti un preču zīmes, 10/2011, 1453.-1454. lpp.
27. Sergejs Tiselskis, Imants Bucenieks, Andris Bojarevičs, Jurijs Gelfgats. Kausēšanas krāsns alumīnija sakausējumu ražošanai un rafinēšanai. Latvijas republikas patents LV 14355 B, 07.03.2011. Patenti un preču zīmes, 7/2011, 995 lpp.
28. Yu. Gelfgat, A. Bojarevičs, G. Gerbeth, A. Cramer Verfahren und Vorrichtung zur Metallfaserherstellung nach dem Schmelzextraktions-verfahren. Patent of Germany No. DE10000097.5, 2000

### Konferenču publikācijas

29. I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, **A. Bojarevics**, L. Buligins. Thermoelectric current and magnetic field interaction influence on the motion of liquid metal, Proceedings of 8<sup>th</sup> international PAMIR conference, Borgo, France, sept. 5-9, 2011, 4 pages.
30. Ya. Kompan, I. Protokovilov, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, **A. Bojarevics**. Magnetically controlled electroslag melting of titanium alloys. International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, September 16-17, 2010, pp. 85-90.
31. I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, **A. Bojarevics**, L. Buligins, Investigation of liquid phase motion generated by the thermoelectric current and magnetic field interaction. International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, September 16-17, 2010, pp. 273-278.
32. **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.
33. A. Pedchenko, **A. Bojarevics**, J. Priede, G. Gerbeth, R. Hermann. Model experiments on the melt flow driven by a two-phase inductor. 6<sup>th</sup> international conference on Electromagnetic Processing of Materials, Dresden 2009, 4 pages.
34. **Andris Bojarevičs**, Jurijs Gelfgats. A Sensor for Continuous Measurements of the Absolute Thermoelectric Power of Liquid Metal During Turbulent Non-Isothermal Mixing or Segregation of Multi-Component Melts. International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, June 8-9, 2006, 6 pages.
35. A. Bojarevičs, Yu. Gelfgat. Visualizations of various MHD phenomena caused by interaction of the DC and AC magnetic fields with the liquid



- metal flow. The 10-th Riga and 6-th PAMIR conference on fundamental and applied MHD. 2005. Proceedings, pp. 323-327.
36. A. Bojarevičs. AC field driven liquid metal flow in a cold crucible model. Report on contract between EWH and IPUL. 2003. 27 pages.
  37. Cramer A., **Bojarevičs A.**, Gerbeth G., Gelfgat Yu. Stabilization of the melt extraction process with a magnetic field. In: Fluid Flow Phenomena in Metals Processing, edited by El-Kaddah et al., TMS, 1999, the USA, p. 237-244.
  38. **Bojarevičs A.**, Bojarevičs V., Gelfgat Yu., Pericleous K. Liquid metal turbulent flow dynamics in a cylindrical container with free surface: experiment and numerical analysis. In: Proc. of the International Colloquium "Modelling of Material Processing", Riga, 1999, p. 68-73.
  39. **Bojarevičs A.**, Fautrelle Y., Gelfgat Yu. Limitations of the permanent magnet potential difference local velocity probe during measurements of liquid metal flows under impact of external AC magnetic field. Proc. of the International Workshop on Measuring Techniques for Liquid metal Flow – MTLM, Dresden, 1999.
  40. Cramer A., Gerbeth G., **Bojarevičs A.**, Gelfgat Yu. Stabilizing the direct melt extraction of intermetallic fibres by magnetic fields. – In: Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, 2000, Nagoya, Japan, p. 147-152.
  41. **Bojarevičs A.**, Gelfgat Yu., Gerbeth G., Cramer A. Effect of the superimposed DC magnetic field on a melt flow in an induction furnace experimental model. – Proc. the International Scientific Colloquium "Modelling for Saving Resources", Riga, May 17-18, 2001, p. 118-123.
  42. **A. Bojarevičs**, Yu. Gelfgat, G. Gerbeth, A. Cramer. A novel experimental technique to study the different phenomena at a free liquid metal surface. The 1996 TMS Annual Meeting and Exhibition. Abstracts.
  43. **A. Bojarevičs**, Yu. Gelfgat, G. Gerbeth. An experimental technique to investigate thermocapillary convection and solid-liquid phase transition in a thin metal layer with free surface. Proceedings of the Joint Xth European and Vth Russian Symposium on Physical Sciences in Microgravity. 6 pages.
  44. **A. Bojarevičs**, Yu. Gelfgat, G. Gerbeth. Testing of a new experimental technique to study MHD-associated phenomena with free liquid metal surface. The 14th International Conference on Magnetohydrodynamics. Jurmala, Latvia 24-26 August 1995. Book of Abstracts, p. 94.
  45. **Bojarevičs A.**, Gelfgat Yu., Gerbeth G. The effect of a superimposed steady magnetic field on non-stationary flow driven by a high frequency AC magnetic field in an open cavity. – In: Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Workshop "The Use of Magnetic Fields in Crystal Growth and Metals Casting", Frankfurt/Main, April 1-2, 1998, p. 17-28.

46. **A. Bojarevics**, Yu. Gelfgat, G. Gerbeth, A. Simanovskis, J. Maniks. Procedure and method of MHD phenomena investigation on juvenile surfaces of liquid metal. Abstracts. The Eighth Beer-Sheva International seminar on MHD-flows and Turbulence. February 25-29, 1996. Jerusalem, Israel. p 13.
47. L. A. Gorbunov, **A. Bojarevics**. Features of bulk single crystal growth under electro-magnetic effect on melt. The 14th International Conference on Magneto-hydrodynamics. Jurmala, Latvia 24-26 August 1995. Book of Abstracts, p. 87.
48. **A. Bojarevics**, Yu. Gelfgat, G. Gerbeth. Thermocapillary convection in a liquid metal under influence of magnetic field – experimental techniques and results of the tests. Proceedings of the Second International Conference on Energy Transfer in Magnetohydrodynamic flows. Aussois, France, 1994. Vol. 1, pp 117-126.
49. **Bojarevics A.**, Gelfgat Yu. M., Gorbunov L. A. Melt magnetohydrodynamics of single crystal growth. in Liquid Metal Magnetohydrodynamics (eds. J. Lielpeteris and R. Moreau), Kluwer, The Netherlands, 1989, pp. 127-133.
50. **Bojarevics A.** On transition to three-dimensional oscillatory convection at  $Pr \ll 1$  in a rectangular cavity with lateral temperature drop (experiment) (in Russian). Acta Universitatis Latviensis, v. 554, pp. 111-120.
51. **Bojarevics A. V.**, Gorbunov L. A. Magnetohydrodynamic phenomena in melts at semiconductor single crystal Czochralski growth (in Russian). in *Gidromehanika i teplomassoobmen pri poluchenii materialov* (Hydrodynamics and Heat & Mass Transfer at Material Production), Nauka, Moscow, 1990, pp. 89-102.
52. **Bojarewitsch A. W.**, Gorbunov L. A., Kozyrew F. W., Lebedev A. P. An experimental study of critical regimes of flow in liquid metals layers. 5th EPS Liquid State Conference on Turbulence. Abstracts. Moscow, 1989, pp. 298-301.
53. Saadi B., **Bojarevics A.**, Fautrelle Y, Etay J. Contrôle électromagnétique du transfert de masse aux interfaces liquides-liquides. *Récents Progrès en Génie des Procédés, Numéro 92 – 2005, ISBN 2-910239-66-7.*
54. A. Bojarevics, Yu. Gelfgat, Y. Fautrelle, J. Etay. Experimental Validation of a Dynamic Method to Determine the Thermoelectric Power of Metallic Liquid Alloys. Proceedings of the 7-th International PAMIR Conference. 2008, pp. 821-825.

## LITERATŪRAS SARAKSTS

- Baake E. Muhlbauer A., Jakowitsch A. (1995), Extension of the  $k$ - $E$  model for the numerical simulation of the melt flow in induction crucible furnaces, *Metall. Mater. Trans. B.*, 26B, 529-536.
- Bojarevics V., Pericleous K (2004), Modelling induction skull melting design modifications, *Journal of Materials Science*, VOL 39; NUMBER 24, page(s) 7245-7251 Kluwer.
- Carruthers J. R., (1978), Origins of convective temperature oscillations in crystal growth melts, *J. Cryst. Growth*, 32, 13-26.
- Chomaz J. M., Robaud M., Basdevant C., and Couder Y. (1988), Experimental and numerical investigation of a forced circular shear layer, *J. Fluid Mech.*, 187, 115-140.
- Cramer A., Zhang C., Eckert S. (2005) Local flow structures in liquid metals measured by ultrasonic Doppler velocimetry. *Flow Meas Instrum* 15: 145-153.
- El-Kaddah N., Szekely J. (1983), The turbulent recirculating flow field in a coreless induction furnace, a comparison of theoretical predictions with measurements, *J. Fluid Mech.*, 133, 37-46.
- Ernst R., Perrier D., Brun P., Lacombe J. (2005) Multiphase electromagnetic stirring of low conducting liquids. *COMPEL*, 24: 334-343.
- Favier J. J. (1990), Recent advances in Bridgeman growth modeling and fluid flow, *J. Cryst. Growth*, 99, 18.
- Fiegl G. (1983). Recent advances and future directions in CZ-silicon crystal growth technology. *Solid State Technol.*, vol. 26, no. 8, 121-131.
- Fumizava M. (1980), Natural convection experiment with liquid NaK: transverse magnetic field, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 17, no. 2, 95-105.
- GAMM-Committee on Numerical Methods in Fluid Mechanics. Benchmark for the GAMM-Workshop "Numerical Simulation of Oscillatory Convection in Low Prandtl Fluids". Marseille, 12-14 October, 1988.
- Gelfgat Yu. M., Gorbunov L. A., Sorkin M. Z. (1988). Electromagnetic means to affect hydrodynamics and heat transfer during production of volume single crystals (review). *Rost Kristallov*, vol. XVI, 234-247.
- Gershuni G. Z., Zhukhovitskii E. M. (1972), Convective stability of an incompressible fluid, Moscow, Nauka Press.
- Gill A. E. (1974). A theory of thermal oscillations in liquid metals. *J. Fluid Mech.*, vol. 64, part 3, 577-588.
- Gorbunov L. A. (1987), Effect of thermoelectromagnetic convection on the production of bulk single-crystals consisting of semiconductor melts in a constant magnetic field. *Magneto hydrodynamics*, vol. 23, no. 4, pp. 404-408.
- Hicks T. W., Organ A. E., Riley N. (1989), Oxygen transport in magnetic Czochralski growth of Silicon with a non-uniform magnetic field, *J. Cryst. Growth*, 94, 213-228.
- Hide R., Titman W. (1967), Detached shear layers in a rotating fluid, *J. Fluid Mech.*, 29, Pt. 1, 39-60.

- Hjelming L. N., Walker J. S. (1986). Melt motion in a Czochralski puller with an axial magnetic field. *J. Fluid Mechanics*, vol. 164, 237-273.
- Hurle D. T. J., Jakeman E., Johnson C.P. (1974). Convective temperature oscillations in liquid Gallium. *J. Fluid Mech.*, vol. 64, part 3, 565-576.
- Lehnert B. (1955), An instability of laminar flow of mercury caused by an external magnetic field, *Proc. R. Soc.*, A233, 299-302.
- Khine Y. Y., Walker J. S. (1998), Thermoelectrically Driven Melt Motion During Floating Zone Crystal Growth With an Axial Magnetic Field, *J. Fluids Eng.* 120(4), 839-843.
- Kimura M, Yamagishi H (1996), Application of vertical magnetic field to FZ growth of silicon single crystals. *Magneto hydrodynamics*, 32: 183-188.
- Klyukin A. A., Kolesnikov Yu. B., Levin V. B. (1980), Experimental research into a freely rotating layer in an axial magnetic field, *Magn. Gidrodin.*, No. 1, 140-143.
- Ostrach S. (1982), Low-gravity fluid flows, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 14, 313.
- Papailiouis D. D., Lykoudis P. S. (1974), Magnetomechanics free convection turbulent flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17, 1181-1189.
- Platnieks I. (1994), Use of hot-wire sensor techniques in studying liquid metal flow characteristics, Vol. 30, No. 2, 193-200.
- Priede J., Gerbeth G., Hermann R., Behr G., Schultz L. and Uhlemann H.-J. (2007), German Patent DE10328859B4.
- Rabaud M., Couder Y., (1983), A shear-flow instability in a circular geometry, *J. Fluid Mech.*, 136, 291-319.
- Raming G., Muiznieks A., Muhlbauer A. (2001), Numerical investigation of the influence of EM-fields on fluid motion and resistivity distribution during floating-zone growth of large silicon single crystals. *J Cryst Growth* 230: 108-117.
- Ricou R., Vives C. (1982), Local velocity and mass transfer measurements in molten metals using an incorporated probe. *Int J Heat Mass Transfer* 25: 1579-1588.
- Riley R. J., Neitzel G. P. (1998), Instability of thermocapillar-buoyancy convection in shallow layers, *J. Fluid Mech.*, 359, 143.
- Shercliff J. A. (1979), Thermoelectric magneto hydrodynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 91 p. 231-251.
- Taberlet E., Fautrelle Y. (1985), Turbulent stirring in an experimental induction furnace, *J. Fluid Mech.*, 159, 409-432.
- Takeda Y. (1987), Measurement of velocity profile of mercury flow by ultrasound Doppler shift method. *Nucl. Techn.* 79: 120-124.
- Takeda Y., Kikura H. (2002), Flow mapping of the mercury flow, *Exp. Fluids* 32: 161-169.
- Tsinober A., Kit E. and Teitel M. (1987), On the relevance of potential difference methods for turbulence measurements, *J. Fluid Mech.* 175, 447-461.
- Ubbelohde A. R. (1966), *Proceedings of the Royal Society, Series A*, vol. 293, no. 1434, pp. 291-309.
- von Weissenfluh T. (1985), Probes for local velocity and temperature measurements in liquid metal flow. *Int. J. Heat Mass Transfer* 28: 1563-1574.
- Zhilin V. G. (1987), *Fiber-Optic Velocity and Pressure Measurement Converters [in Russian]*, Energoizdat, Moscow.

## PIELIKUMĀ PIEVIENOTO 18 PUBLIKĀCIJU KOPAS SARAKSTS

1. J. Priede, A. Cramer, A. Bojarevics, G. Gerbeth. Experimental and numerical study of anomalous thermocapillary convection in liquid gallium. *Physics of Fluids*, Vol. 11, No. 11, 1999, pp. 3331-3339.
2. A. Cramer, V. Galindo, G. Gerbeth, J. Priede, A. Bojarevičs, Yuri Gelfgat. Tailored magnetic fields in the melt extraction of metallic filaments. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 40B, June 2009, pp. 337-344.
3. A. Bojarevics, A. Cramer, Yu Gelfgat, G. Gerbeth. *Experiments on magnetic damping of an inductively stirred liquid metal flow. Experiments in Fluids*, Vol. 40, 2006, pp. 257-266.
4. A. Pedchenko, A. Bojarevics, J. Priede, G. Gerbeth, R. Hermann. *Velocity measurements in the liquid metal flow driven by a two-phase inductor*. Volume 54, Issue 6, June 2013, 7 p, <http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-013-1558-7>.
5. I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, A. Bojarevics, L. Buligins. Absolute Thermo-Electric Power of Pb Sn Alloys. *Modern Physics Letters B*, Vol. 25, No. 10 (2011) 731-738.
6. I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, A. Bojarevics, L. Buligins. *Thermoelectric current and magnetic field interaction influence on the structure of directionally solidified Sn-10 wt.%Pb alloy. Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 571, 2013, pp. 50-55.
7. A. Bojarevičs, T. Beinerts. *Experiments on Liquid Metal Flow Induced by Rotating Magnetic Dipole Moment. Magnetohydrodynamics*, Vol. 46 (2010), No. 4, pp. 333-338.
8. I. Kaldre, Y. Fautrelle, J. Etay, A. Bojarevics, L. Buligins. Investigation of Liquid Phase Motion Generated by the Thermoelectric Current and Magnetic Field Interaction. *Magnetohydrodynamics*, Vol. 46, No. 4, 2010, pp. 371-380.
9. I. Kaldre, A. Bojarevics, Y. Fautrelle, J. Etay, L. Buligins. Current and Magnetic Field Interaction Influence on Liquid Phase Convection. *Magnetohydrodynamics*, Vol. 48, No. 2, 2012, pp. 399-405.
10. A. Simanovskis, J. Maniks, A. Bojarevics, Yu. Gelfgat. *A vacuum cell for obtaining clean surfaces on liquid low melting point metals. Vacuum*, 1997, Vol. 48, No. 6, pp. 551-552.
11. A. Bojarevics, V. Bojarevics, Yu Gelfgat, K. Pericleous. *Liquid Metal Turbulent Flow Dynamics in a Cylindrical Container with Free Surface: Experiment and Numerical Analysis. Magnetohydrodynamics*, Vol. 35, No. 3, 1999.
12. A. V. Boyarevich, L. A. Gorbunov. *Effect of Magnetic fields of different orientation on thermogravitational convection in an electrically conducting fluid with a horizontal heat flow. Magnetohydrodynamics*, Vol. 24, No. 2, 148-154, 1988.
13. A. V. Boyarevich, L. A. Gorbunov and E. D. Lyumkis. *Physical and numerical modeling of the influence exerted by a vertical magnetic field on the forced convection in the processes of using the Czochralski method to grow single crystals, Magnetohydrodynamics*, Vol. 25, No. 2, 213-219, 1989.

14. A. V. Boyarevich, Yu. M. Gelfgat and L. A. Gorbunov. *Effect of a constant magnetic field on the hydrodynamic characteristics of a melt during the process of semiconductor monocrystal growth*, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 26, No. 3, 321-324, 1990.
15. A. V. Boyarevich, Yu. M. Gelfgat and L. A. Gorbunov. *Effect of a vertical magnetic field on the stability of motion of an isothermal melt in a model of the Czochralski process*, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 27, No. 2, 170-176, 1991.
16. A. Bojarevics, Yu. M. Gelfgat and L. A. Gorbunov. *Three-dimensional oscillatory convection of the low Prandtl number fluid in a rectangular cavity with differential heating from the side (experiment)*. In *Hydromechanics and Heat/Mass Transfer in Microgravity* (ISSN: 1070-6631), 1992, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 69-74.
17. A. V. Boyarevich, V. M. Vinogradov, Yu. M. Gelfgat, L. A. Gorbunov and S. V. Turuntaev. *Measurement of local averaged velocities in a magnetohydrodynamic experiment*, *Magnetohydrodynamics*, Vol. 26, No. 2, 246-249, 1990.
18. Bojarevics A., Gelfgat Yu. M., Gorbunov L. A. *Numerical and physical simulations of heat and mass transfer at single crystal growth from melt under the effect of electromagnetic field*. in *Recent Advances in Heat Transfer* (eds. B. Sunden and A. Zukauskas) Elsevier, The Netherlands, 1992, pp. 935-949.