



LATVIJAS
UNIVERSITĀTE

Promocijas darba
kopsavilkums

Lāsma Puķina-Slava

**ŠĶIDRUMU ROBEŽVIRSMAS
IZSMĒRĒŠANĀS UN
GRAVITĀCIJAS IETEKME
UZ MAGNĒTISKO
MIKROKONVEKCIJU**

Rīga 2023



LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE

Lāsma Puķina-Slava

ŠĶIDRUMU ROBEŽVIRSMAS IZSMĒRĒŠANĀS UN GRAVITĀCIJAS IETEKME UZ MAGNĒTISKO MIKROKONVEKCIJU

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda iegūšanai fizikas un astronomijas nozarē
Apakšnozare: šķidrumu un gāzu mehānika

Zinātniskā darba vadītāji:
prof. Andrejs Cēbers, Dr. Guntars Kitenbergs

Rīga 2023

Promocijas darbs izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē Fizikas nodaļā Teorētiskās fizikas katedrā laika posmā no 2016. līdz 2023. gadam.

Darba izstrāde finansiāli atbalstīta ar ESF projektu “LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā” Nr. 8.2.2.0/20/I/006.

Darbs sastāv no ievada, 4 nodaļām, nobeiguma, literatūras saraksta un 3 pielikumiem.

Darba forma: disertācija. Zinātnes nozare: fizika un astronomija; virziens: šķidrumu un gāzu mehānika. Doktora studiju programmas nosaukums: Fizika, astronomija un mehānika.

Darba zinātniskie vadītāji: prof. Andrejs Cēbers un Dr. Guntars Kitenbergs.

Darba recenzenti:

1. Dr. Imants Kaldre
2. Dr. Carlo Rigoni
3. Dr. Elie Wandersman

Promocijas darba aizstāvēšana notiks 2023. gada 8. decembrī Latvijas Universitātes Fizikas, astronomijas un mehānikas promocijas padomes atklātā sēdē Latvijas Universitātes Zinātņu mājas _____ auditorijā, Jelgavas ielā 3, Rīgā.

Ar promocijas darbu un tā kopsavilkumu var iepazīties Latvijas Universitātes Bibliotēkā Rīgā, Kalpaka bulvārī 4.

LU Fizikas, astronomijas un mehānikas
specializētās promocijas padomes priekšsēdētājs: _____

specializētās promocijas padomes sekretārs: _____

© Lāsma Puķina-Slava, 2023

© Latvijas Universitāte, 2023

ISBN 978-9934-36-035-0

ISBN 978-9934-36-104-3 (PDF)

Anotācija

Darbā pētīta aktīvā maisīšanās ar magnētisko mikrokonvekciju (pirkstveida nestabilitāte) divu sajaukties spējīgu šķidrumu (ūdens un ūdens bāzes magnētiskā šķidruma) robežvirsmā mikrofluīdikas kanālā.

Darbā apkopota informācija par dažādiem nestabilitāti regulējošiem parametriem. Izpētīta magnētiskā un gravitācijas lauka ietekme, stabilizējot nestabilitātes. Lai gan pētījums ir galvenokārt eksperimentāls, rezultāti tiek salīdzināti ar kolēģu veiktajiem teorētiskajiem aprēķiniem.

Rezultāti liecina, ka šķidrumu sajaukšanos ierobežo sākotnēja robežvirsmas smērēšanās un gravitācija. Mikrofluīdikas kanāla forma un magnētiskā šķidruma īpašības ietekmē rezultātus. Ārējā magnētiskā lauka virziens ietekmē nestabilitātes pirkstu formu un maisīšanās efektivitāti.

Atslēgvārdi: Magnētiskie šķidrumi, Mikrokonvekcija, Nestabilitātes, Gravitācija, Mikrofluīdika

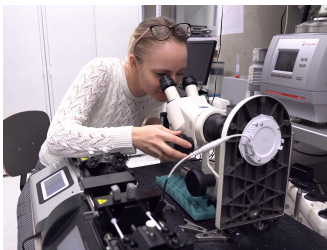
Pateicības

Šis promocijas darbs nebūtu tapis bez manu kolēģu, ģimenes un draugu palīdzības un atbalsta, kuriem vēlos šeit pateikties.

Vēlos pateikties saviem promocijas darba vadītājiem Dr. Guntaram Kitenbergam un prof. Andrejam Cēberam, kuri pieskatīja šā darba izstrādi no tā sākuma līdz beigām. Vēlos izteikt pateicību arī saviem kolēģiem par praktisko un emocionālo atbalstu doktorantūras studiju laikā. Paldies Dr. Delphine Talbot (*PHENIX lab, Sorbonne University in Paris*) un Dr. Oksanai Petričenko par šajā pētījumā izmantoto magnētisko šķidrums sintēzi. Paldies Dr. Andrejam Tatuļčenkovam par teorētiskajiem aprēķiniem, Dr. Ivaram Driķim par mikrofluidikas sūkņu sinhronizācijas risinājumu un Mihailam Majorovam (LUFU) par magnētiskajiem mērījumiem. Paldies arī Dr. Gökhan Ergin par iespēju strādāt ar 3D mikro-PIV sistēmu Dantec Dynamics, Dānijā. Paldies par vispārējo atbalstu un auglīgajām diskusijām kolēģiem: Dr. Viesturs Šints, Dr. Andris Pāvils Stikuts, Dr. Aigars Langins, Dr. Jānis Cīmurs.

Par jautrību, emocionālo atbalstu un noderīgiem padomiem, paldies, manām mīļajām *stemīnistēm* Dr. Tijai Sīlei, Maijai Sjomkānei, Malvīnei Neldai Strakovai, Līgai Jasulaņecai un manai labākajai draudzenei Martai Berķei. Nenomērāmu pateicību parādā esmu savam emocionālajam, tehniskajam un visādi-kā-vien-iespējams atbalstam, manam vīram Eduardam Puķīnam-Slavam.

Un visbeidzot, bet tomēr, vēlos pateikties arī sev, par ticību sev un saņemšanos šo projektu "novest līdz galam" (skatīt attēlu 1).



Att. 1: Fotoattēls ar mani, pētot magnētisko mikro-konvekciju.

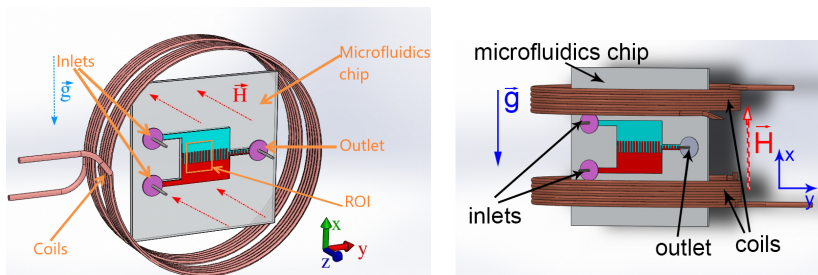
Saturs

1 Ievads	6
1.1 Pētījuma aktualitāte un literatūras apskats	6
1.2 Darba mērķis un uzdevumi	11
1.3 Eksperimentālās metodes	12
1.4 Rezultātu publicēšana	18
1.4.1 Zinātniskās publikācijas par promocijas darba tēmu . .	18
1.4.2 Zinātnisko semināru un konferenču saraksts	19
1.4.3 Pētniecības projekti	19
1.5 Autores ieguldījums darbā	20
1.6 Autores izglītība un zinātniskā darbība	20
2 Galvenie rezultāti	21
2.1 Magnētiskā mikrokonvekcija plūstošos šķidrumos	21
2.2 Magnētiskā mikrokonvekcija neplūstošos šķidrumos	24
2.3 Magnētiskā mikrokonvekcija ar sākotnēji izsmērētu robežvirsmu starp šķidrumiem	27
2.4 Magnētiskā mikrokonvekcija vertikālā magnētiskā laukā . . .	31
2.5 Mērījumi ar stereo-mikro-PIV	33
3 Diskusija	34
3.1 Magnētiskā mikrokonvekcija horizontālā magnētiskā laukā . .	34
3.2 Magnētiskā mikrokonvekcija vertikālā magnētiskajā laukā . .	38
Secinājumi	42
Bibliogrāfija	45

1. Ievads

1.1 Pētījuma aktualitāte un literatūras apskats

Šajā pētījumā eksperimentāli tiek pētītas divu dažādu veidu nestabilitātes uz divu sajaukties spējīgu šķidrumu robežvirsmas. Maisāmie šķidrumi ir ūdens un ūdens bāzes magnētiskais šķidrums. Nestabilitātes pētītas vertikāli novietotā mikrofluidikas čipā divos dažādos ārējā magnētiskā lauka virzienos kā parādīts 1.1 attēlā. Magnētiskais šķidrums pētāmajā sistēmā atrodas zem ūdens. Eksperiments tiek filmēts konkrētā reģionā, attēlos apzīmēts kā *ROI*.



(a) Mikrofluidikas čips horizontālā magnētiskā laukā, kas perpendikulārs čipa virsmai.

(b) Mikrofluidikas čips vertikālā magnētiskā laukā, kas paralēls čipa virsmai.

Att. 1.1: Ilustrācija mikrofluidikas čipu novietojumam starp elektromagnēta spolēm.

Magnētiskais šķidrums ir nesējšķidrumā suspendētu magnētisku nano izmēra daļiņu koloidāls šķidrums [1, 2]. Daļiņu izmērs nodrošina koloidālo stabilitāti pret sedimentāciju. Savukārt, no magnētisko daļiņu agregācijas var izvairīties ar elektrostatisko mijiedarbību, piešķirot katrai magnētiskajai daļiņai virsmas lādiņu ar vienādu polaritāti (joniski magnētiskie šķidrumi) [1, 3, 4]. Atkarībā no magnētiskā šķidruma pielietošanas mērķa var izmantot dažādus nesējšķidrumus, piemēram, bioloģiskiem risinājumiem piemērots ūdens [1]. Šajā darbā pētīti ūdens bāzes joniski magnētiskie šķidrumi, kas sintezēti izmantojot Massarta metodi [4]. Magnētiskie šķidrumi, sintezēti šajā metodē, ir stabili pie normāla pH 7 un ir derīgi biomedicīniskiem pielie-

tojumiem. Izmantotās maghemīta $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ un magnetīta Fe_3O_4 magnētiskās nano-daļiņas arī atbilst bioloģisku pielietojumu prasībām [3].

Magnētiskajiem šķidrumiem piemīt gan magnētiskas, gan hidrodinamiskas īpašības, kuru dēļ tie ir interesants izpētes virziens [1, 5]. Gadu gaitā magnētiskajiem šķidrumiem radīti vairāki praktiski pielietojumi [1, 2, 5—13]. Magnētiskie šķidrumi reaģē ārējā magnētiskā laukā un modificē ārējo lauku. Kritiskā brīdī parasti notiek pēkšņas izmaiņas, kas rada jaunu līdzsvara stāvokli. Šīs izmaiņas bieži noved pie nestabilitātes [14]. Magnētisku un nemagnētisku šķidrumu robežvirsmā var veidoties dažādas nestabilitātes ārēja magnētiskā lauka ietekmē [1, 2, 15—27]. Divas no šīm nestabilitātēm plašāk pētītas šajā darbā uz samaisīties spējīgu šķidrumu robežvirsmas. Tā kā nestabilitātēm raksturīgais izmērs ir mikronu mērogā, šīs nestabilitātes sauc par magnētisko mikrokonvekciju.

Magnētiskā mikrokonvekcija ir pirkstveida formas nestabilitāte. Tā veidojas uz magnētiska un nemagnētiska šķidruma robežvirsmas homogēna magnētiskā lauka ietekmē [14, 28]. Pirmie eksperimentālie novērojumi šai pirkstveida nestabilitātei sajaukties spējīgu šķidrumu robežvirsmā fiksēti jau 1980. gadā (M. Maiorovs un A. Cēbers) [14]. Kaut arī bija pagājis ilgs laiks kopš parādības pirmās novērošanas, pirmo detalizēto eksperimentālo izpēti par pirkstveida nestabilitāti, ko izraisa magnētiskā mikrokonvekcija sajaukties spējīgos šķidrumos C.-Y. Wen un viņa kolēģi veica tikai 2007. gadā [29, 30]. Šajā pētījumā tika apstiprināts, ka nestabilitātes pirkstu veidošanos ietekmē gan magnētiskā lauka intensitāte, gan mikrofluidikas čipa biezums. Vēlāk noskaidrots, ka magnētiskā mikrokonvekcija ir atkarīga arī no sākotnējās koncentrācijas gradienta, kā arī no viskozitātes maisīšanās robežvirsmas tuvumā [31—34]. Pēc pirmā detalizētā eksperimentālā pētījuma ar apaļu robežvirsmas formu [29, 30] magnētiskā mikrokonvekcija uz taisnas robežvirsmas sajauties spējīgiem šķidrumiem tika pētīta 2008. gadā [35]. Šajā pētījumā aplūkota nestabilitātes viļņu garuma un kritisko magnētisko lauku savstarpējā atkarība. Plašu magnētiskās mikrokonvekcijas izpēti horizontāli novietotā Hele-Šou tipa mikrofluidikas čipā homogēnā vertikālā magnētiskajā laukā savā promocijas darbā veica G. Kitenbergs [36] 2015. gadā. Šo pētījumu papildināja vairākas publikācijas [37—39]. Darba gaitā atklāts, ka maisāmo šķidrumu nelielās blīvumu starpības dēļ rodas gravitācijas va-

dīta konvektīva kustība. Šīs kustības laikā nedaudz blīvākais magnētiskais šķidrums paslīd zem ūdens, vizuāli radot papildus robežvirsmas izmērēšanu. Lai gan eksistē vispārējs pieņēmums, ka mikrofluidikas ierīcēs gravitācijas efektus var neņemt vērā [40] Kitenberga pētījumā tika pierādīts, ka nevar ignorēt gravitācijas efektus, ja maisāmajiem šķidrumiem ir nedaudz atšķirīgs blīvums. Arī šī promocijas darba laikā tika mērīta šī konvektīvā kustība horizontāli novietotā mikrofluidikas čipā ar stereo- μ PIV aparatūru, un rezultāti ir apkopoti šā promocijas darba pilnajā tekstā. No šīs gravitācijas izraisītās parazītiskās, konvektīvās kustības var izvairīties, izmantojot plānākus mikrofluidikas čipus [41] vai arī novietojot mikrofluidikas čipu vertikālā pozīcijā, tā ka magnētiskais šķidrums atrodas zem mazāk blīvā ūdens, kā tas arī ir izdarīts šā promocijas darba pētījuma ietvaros. Šajā darbā pētīta gravitācijas ietekme, izmantojot dažāda blīvuma magnētiskos šķidrumus. Kā arī plaši izpētīta robežvirsmas izmērēšanās un citu eksperimentālo parametru ietekme uz magnētisko mikrokonvekciju. Vēl šajā darbā tiek apskatīta nestabilitāte, kas rodas, ja ārējais magnētiskais lauks ir paralēls, nevis perpendikulārs mikrofluidikas čipa virsmai [17, 42–44].

Teorētiskais modelis, kas tiek izmantots šā darba eksperimentāli pētīto parādību aprakstam, ir aprakstīts ar vienādojumiem, kas ietver Brinkmana vienādojumu, nepārtrauktības un konvekcijas-difūzijas vienādojumus [23, 33, 45]. Vienādojumi un ar tiem saistītie izvedumi apskatīti šā promocijas darba pilnajā tekstā.

Šīs disertācijas ietvaros magnētiskais šķidrums tiek uzskatīts par nesaspiežamu Ņūtona šķidrumu, un viskoelastīgie efekti netiek ņemti vērā. Ūdens molekulas ar magnētiskajām daļiņām maina savu pozīciju un virzienu, termiskās kustības dēļ, tādējādi izraisot, tā saukto, rotācijas un translācijas difūziju [46]. Darbā tiek aplūkota translācijas difūzija, jo tā ierobežo magnētisko mikrokonvekciju [36]. Difūzijas koeficients raksturo daļiņas spēju pārvietoties noteiktā laika periodā, un to ietekmē daļiņu izmērs un nesējšķidruma īpašības. Difūzijas koeficientu var izteikt, izmantojot Stoksa-Einšteina vienādojumu [47]:

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\eta d_H} \quad (1.1)$$

kur k_B ir Bolcmaņa konstante, T ir temperatūra, η ir nesējšķidruma viskozitāte un d_H ir daļiņas hidrodinamiskais diametrs [48]. Magnētisko daļiņas

raksturojošo difūzijas koeficientu var ietekmēt ārējais magnētiskais lauks [49], bet šī darba ietvaros, tas netiek aplūkots. Koncentrācijas gradienta gadījumā daļiņu difūzijas procesu var aprakstīt ar otro Fika likumu [50]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\Delta c \quad (1.2)$$

kur Δ ir Laplasa operators, c ir koncentrācija un D ir difūzijas koeficients, un t ir laiks.

Eksperimentāli šajā darbā magnētiskais šķidrums un ūdens tiek iepildīti plānā mikrofluīdikas čipā, ko var aprakstīt ar Hele-Šou šūnu. Šķidrumiem satiekoties, robežvirsmā tiek uzskatīta kā asa. Ja šķidrumiem atļauj maisīties bez ārējā magnētiskā lauka klātbūtnes, sagaidāms ka magnētisko daļiņu difūziju varēs novērot līdz brīdim, kamēr magnētisko daļiņu koncentrācija būs tilpumā vienmērīga. Šo situāciju var aprakstīt ar viendimensionālu gadījumu pakānpien-veida sākotnējās koncentrācijas sadalījumam [50]. Šis ir apskatīts plašāk šīs disertācijas pilnajā tekstā.

Šis darbs ir pārsvarā eksperimentāls. Eksperimentos iegūtie rezultāti ir salīdzināti ar teorētiskajiem aprēķiniem un skaitliskajiem modeļiem, ko veidojuši kolēģi. Rezultātu salīdzinājums veikts gan kvalitatīvi, izmantojot vizuālos materiālus, gan kvantitatīvi. Kvantitatīvam salīdzinājumam ieviesti bezdimensionālie Releja skaitļi: magnētiskais Ra_m un gravitācijas Ra_g . Ra_m atbilst attiecībai starp difūzijai raksturīgo laiku $\tau_D = h^2/D$ un raksturīgo laiku kustībai, kuru virza šķidruma nehomogēnais pašmagnētiskais lauks $\tau_M = 12\eta/M_0^2$:

$$Ra_m = M_0^2 h^2 / 12\eta D, \quad (1.3)$$

kur M_0 ir magnētiskā šķidruma magnetizācija, h ir mikrofluīdikas čipa biezums, η šķidrumu viskozitāte, D difūzijas koeficients. Ra_g atbilst attiecībai starp difūzijai raksturīgo laiku τ_D un raksturīgo laiku kustībai, kuru rada gravitācijas lauks $\tau_G = 12\eta/\Delta\rho gh$:

$$Ra_g = \Delta\rho gh^3 / 12\eta D, \quad (1.4)$$

kur $\Delta\rho = \rho_{MF} - \rho_{H_2O}$ ir blīvumu starpība starp magnētisko šķidrumu un ūdeni, un g ir brīvās krišanas paātrinājums. Tādējādi tiek veikts kvantitatīvs rezultātu salīdzinājums, kā magnētiskais lauks regulē un gravitācija stabilizē

magnētisko mikrokonvekciju.

Tā kā pētāmās sistēmas telpiskie parametri ir mikronu mērogā, šī darba nosaukumā ir termins mikrofluīdika. Kā redzams— šajā pētījumā tiek apvienotas dažādas fizikas jomas.

Mikrofluīdika ir zinātne, kas nodarbojas mazu tilpumu šķidrumu kontroli, kur viena vai visas telpiskās pētāmās sistēmas dimensijas ir mikronu mērogā [40]. Mikrofluīdiskajām ierīcēm ir daudz praktisku priekšrocību, tāpēc tās plaši izmantotas dažādās zinātnes jomās, kā, biotehnoloģija, ķīmija, inženierzinātnas un fizika [51—54]. Pateicoties plašajam daudznozaru mikrofluīdikas pielietojumu klāstam, tā ir bijusi jau kādu laiku un joprojām ir aktīva pētniecības tēma [55—57]. Tā kā plūsmu ģeometriskie raksturlielumi samazināti līdz mikroniem, viskozie spēki dominē pār inerces spēkiem. Šo divu spēku īpatsvaru raksturo Reinoldsa skaitlis Re [40, 58]. Reinoldsa skaitlis ir bezdimensionāls lielums, kas definēts kā attiecība starp inerciālajiem un viskozaļiem spēkiem. Pie maziem Reinoldsa skaitļiem, kas raksturīgi mikrofluīdikas ierīcēm, plūsmas parasti ir lamināras. Tādejādi dominējošais transportēšanas mehānisms ir difūzija, kas ir lēna. Šķidrumu sajaukšanās paātrināšanai mikrofluīdikas ierīcēs var izmantot pasīvos un aktīvos maisītājus [58—60]. Izmantojot magnētiskus materiālus un ārēju magnētisko lauku, kā tas darīts šā promocijas darba ietvaros, šķidrumu sajaukšanos mikrofluīdikas ierīcē var ērti uzlabot bezkontakta veidā. Aktīvos maisītājus, kuru darbības pamatā ir magnētiskie materiāli un lauki, pēta mikromagnetofluīdika [59, 61]. Viens no veidiem, kā paātrināt sajaukšanos mikrofluidikā, izmantojot ārēju magnētisko lauku, ir radot nestabilitāti – magnētisko mikrokonvekciju [37, 38]. Magnētiskā mikrokonvekcija vēl bez pielietojumiem šķidrumu aktīvajos maisītajos, ir izraisījusi interesi kā fundamentāls pētniecības virziens gan eksperimentāliem [17, 27] gan teorētiskiem pētījumiem [17, 62, 63]. Šo darbu motivēja galvenokārt šī akadēmiskā zinātkāre, lai labāk izprastu magnētiskās mikrokonvekcijas dinamiku un to ietekmējošo faktoru ietekmi. Magnētiskās mikrokonvekcijas nestabilitātes attīstību un rašanos nosaka dažādu parametru kombinācija. Gadu gaitā ir veikti vairāki pētījumi, lai kvantitatīvi noteiktu šo parametru ietekmi, tomēr pētījuma teorētiskā daļa ir bijusi aktīvāka. Līdz ar to šā promocijas darba detalizētā izpēte lieliski papildinās šā fenomena eksperimentālās izpētes jomu, jo eksperimentāli

pētījumi nepieciešami teorētisko modeļu apstiprināšanai.

1.2 Darba mērķis un uzdevumi

Šim pētījumam ir formulēts šāds mērķis un uzdevumi:

Mērķis

Izpētīt, kā magnētiskās mikrokonvekcijas dinamiku un izmēru uz sajaukties spējīgu šķidrumu robežvirsmas ietekmē dažādi faktori - gravitācija, ārējā magnētiskā lauka virziens un intensitāte, jau iepriekš sajaukta robežslāņa platums starp diviem šķidrumiem, mikrofluidikas kanāla biezums un magnētiskā šķidruma īpašības.

Hipotēzes

Darba gaitā tika izvirzītas šādas hipotēzes:

- Mikrokonvektīvā maisīšana horizontālā magnētiskajā laukā būs efektīvāka nekā vertikālā magnētiskajā laukā, jo šīs nestabilitātes pirkstiem ir aktīvāks raksturs horizontālā magnētiskajā laukā.
- Kopējo maisīšanās platumu, kas sastāv no mikrokonvektīvās maisīšanās un difūzās sajaukšanās, var sasniegt ar konkrētu ārējā magnētiskā lauka vērtību, kas nav atkarīga no jau iepriekš sajauktā robežslāņa platuma.
- Kritiskā magnētiskā lauka vērtība noteiktam sākotnējam sajauktā robežslāņa platumam ir tāda pati magnētiskā lauka vērtība, kas nepieciešama, lai kopējais maisīšanas garums būtu vienāds ar šo konkrēto sākotnējo robežslāņa platumu.

Uzdevumi

Promocijas darba mērķa sasniegšanai tika izvirzīti šādi uzdevumi:

1. Raksturot esošo eksperimentālo sistēmu eksperimentiem horizontālā, ārējā magnētiskajā laukā perpendikulāri mikrofluidikas čipam. Veikt eksperimentus, izmantojot šo eksperimentālo sistēmu, lai novērotu magnētisko mikrokonvekciju plūstošos šķidrumos.
2. Pilnveidot un modificēt eksperimentālo sistēmu magnētiskās mikrokonvekcijas novērošanai sākotnēji nekustīgiem šķidrumiem diviem dažādiem ārējā magnētiskā lauka virzieniem. Raksturot šo jauno eksperimentālo sistēmu.

3. Veikt magnētiskās mikrokonvekcijas eksperimentus sākotnēji nekustīgiem šķidrumiem gan horizontālā, gan vertikālā ārējā magnētiskajā laukā.
4. Apkopot datus par dažādiem faktoriem, kas nosaka un raksturo magnētisko mikrokonvekciju eksperimentu laikā, un uzrakstīt programma-tūras kodu šo datu apstrādei.
5. Analizēt magnētisko mikrokonvekciju uz sajaukties spējīgu šķidrumu robežvirsmas. Kvantificēt gravitācijas, iepriekš sajauktā robežslāņa platuma, magnētiskā lauka virziena un citu eksperimentālo parametru ietekmi uz magnētisko mikrokonvekciju.
6. Salīdzināt ša darba eksperimentālos rezultātus ar teoriju un kolēģu veiktajiem skaitliskajiem modeļiem.

Visi šie uzdevumi tika izpildīti. Rezultāti ir izklāstīti šā promocijas darba pilnajā tekstā 4 nodaļās ar papildinformāciju pielikumos. Darba rezultāti apstiprināja izvirzītās hipotēzes.

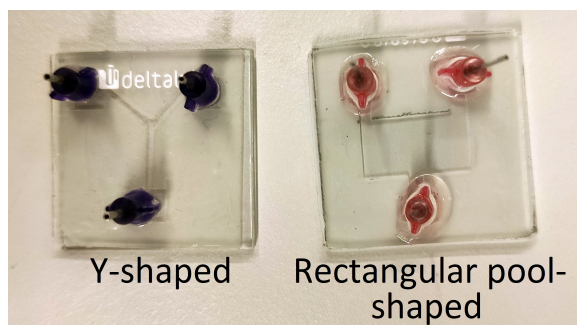
1.3 Eksperimentālās metodes

Promocijas darba eksperimentālais darbs veikts Latvijas Universitātes Magnētiski mīkstu materiālu laboratorijā (MMML) Rīgā, izņemot īsu eksperimentālu šķidrums plūsmu izpēti horizontālā mikrofluīdikas čipā ar stereo mikro-PIV sistēmu, kas tika veikta *Dantec Dynamics* Dānijā.

Šajā darbā pētīta magnētiskā mikrokonvekcija ar četriem dažādiem magnētiskiem šķidrumiem: D107, KTF11-1, KTF09-9 and FF21-5. Magnētiskais šķidrums D107 sintezēts PHENIX laboratorijā Parīzē, bet pārējie MMML laboratorijā Rīgā. Pilns magnētisko īpašību saraksts un to raksturošanas metodes ir apskatītas promocijas darba pilnajā tekstā. Dažiem magnētiskajiem šķidrumiem sākotnējais magnētiskais šķidrums tika atšķaidīts ar destilētu ūdeni dažādās attiecībās, lai mainītu blīvumu un daļiņu koncentrāciju. Darbā tas atzīmēts kā "atšķaidīšanas attiecība" un procentuāli kā oriģinālā magnētiskā šķidrums daļa pierakstīts aiz konkrētā magnētiskā šķidrums nosaukuma.

Darbā izmantotie mikrofluidikas čipi pārsvarā pagatavoti no diviem mikroskopa segstikliem, kas sakausēti izmantojot Parafilm M[®] starpliku. Šādi čipi tika izveidoti trīs dažādos biezumos: $h_1 = 0.135 \pm 0.005$ mm (viens Parafilm M[®] slānis), $h_2 = 0.257 \pm 0.025$ mm (divi Parafilm M[®] slāņi) un

$h_3 = 0.399 \pm 0.015$ mm (trīs Parafilm M[®] slāņi). Darba gaitā izveidoti mikrofluidikas čipi ar dažādām kanālu formām. Eksperimentos ar plūstošiem šķidrumiem §2.1 izmantoti čipi ar Y-formas kanālu. Pārējiem eksperimentiem izmantoti taisnstūrveida kanāli (§2.2, §2.3 un §2.4). Abas kanāla formas aplūkojamas 1.2 attēlā. Mikrofluidikas čipu veidošana, un izvēlēto kanāla formu pamatojums aplūkojams disertācijas pilnajā tekstā.

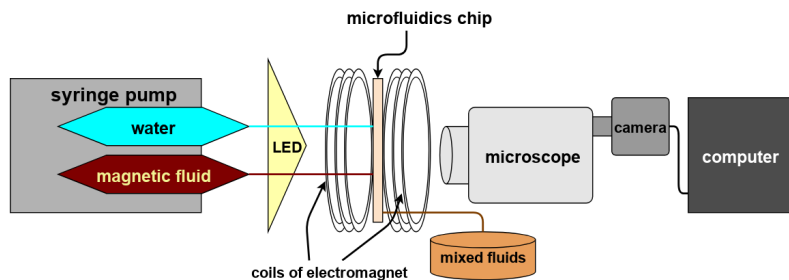


Att. 1.2: Mikrofluidikas čipi ar divām dažādām kanāla formām.

Eksperimentos mikrofluidikas čips ir novietots vertikāli. Magnētisko mikrokonvekciju rada ārējs magnētiskais lauks, kas ir vai nu horizontāls un perpendikulārs čipa virsmai, vai vertikāls un paralēls čipa virsmai. Darbā izmantotās eksperimentālās iekārtas koncepts jau eksistēja iepriekš [36], bet darba vajadzībām veikti uzlabojumi. Lai izvairītos no gravitācijas radītās parazītiskās konvektīvās kustības, mikrofluidikas čips novietots vertikāli, un blīvākais magnetiskais šķidrums iepildīts kanāla apakšā zem ūdens. Konceptuāli viena un tā pati eksperimentālā iekārta, ar trīs nelielām variācijām, kas vairāk apskatītas šīs disertācijas pilnajā tekstā, ir izmantota šajā darbā. Shematiski eksperimentālā sistēma redzama 1.3 attēlā. Vispārīgi eksperimentālā sistēma sastāv no:

- Mikrofluidikas čips un savienojuma caurulītēs;
- Elektromagnēts un tā turētājs;
- LED gaismas panelis: *Visional[®]*, 4 W, 400 lm, 3000 K;
- Mikroskops: *Zeis Stemi 2000-C*;

- Kamera: *Lumenera Lu165c*, 15 Hz;
- Dators ar nepieciešamo programmatūru;
- Viens vai divi šļirču pumpji: *Harvard Aparatus PHD Ultra* un *KD Scientific Legato 210P*.



Att. 1.3: Eksperimentālās iekārtas shematisks attēlojums

Tā kā magnētiskais šķidrums ir blīvāks par ūdeni, tad tā caurulītes ir savienotas ar mikrofluīdikas čipa apakšējo ieeju. Ūdenim paredzēta augšējā ieeja. Mikrofluīdikas čips ir vertikāli nofiksēts 3D printētā statīvā starp elektromagnēta spolēm. Atkarībā no ārējā magnētiskā lauka, darbā izmantotie spoļu un čipa turētāji redzami 1.4a attēlā.

Kolīdiz eksperiments sākas, maisīšanās dinamika tiek filmēta, izmantojot mikroskopa kameru, kas ir savienota ar datoru. Dati tiek apkopoti LabView[®] bāzētā programmā. Ierakstītos attēlus analizē manuāli izvēlētam reģionam (ROI) ar x un y asīm, kā parādīts 1.5 attēlā. Samaisīšanās platums (2δ) raksturo nestabilitātes pirkstu garumu. Viens δ atbilst difūzijas platumam: $\delta = 2\sqrt{Dt}$.

Pēc datu apkopošanas tie tiek apstrādāti izmantojot MATLAB[®] programmatūru. Detalizēts apstrādes apraksts lasāms disertācijas pilnajā tekstā. Saīsinot: ierakstītie attēli no pikseļu sopžuma intensitātes masīviem tiek pārveidoti par normalizētas koncentrācijas masīviem ar Bēra-Lamberta likumu [64, 65]. Tad katrai bildei koncentrācija ir vidējota y-ass virzienā. Šis vidējatās koncentrācijas profils $\bar{c}(x)$ tiek aprakstīts ar difūzijas likni, imantojot Fika likuma atrisinājumu, kā parādīts 1.6 attēlā. Šādi tiek iegūts samaisīšanās

platums 2δ visiem eksperimentiem visos laika brīžos.

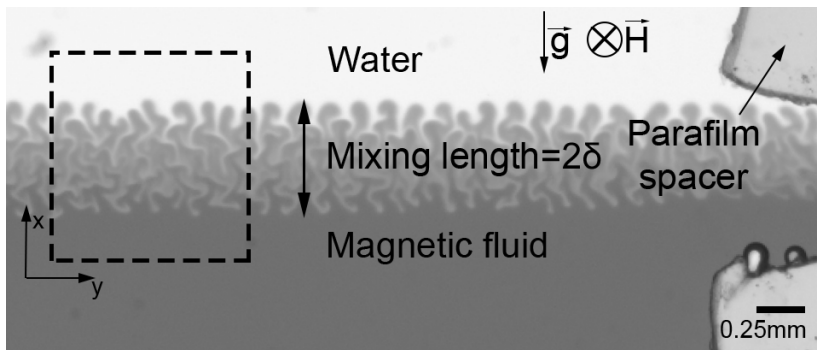


(a) Spoles ar turētāju eksperimentiem ar horizontālā magnētiskā laukā, kas ir perpendikulārs mikrofluidikas čipam.

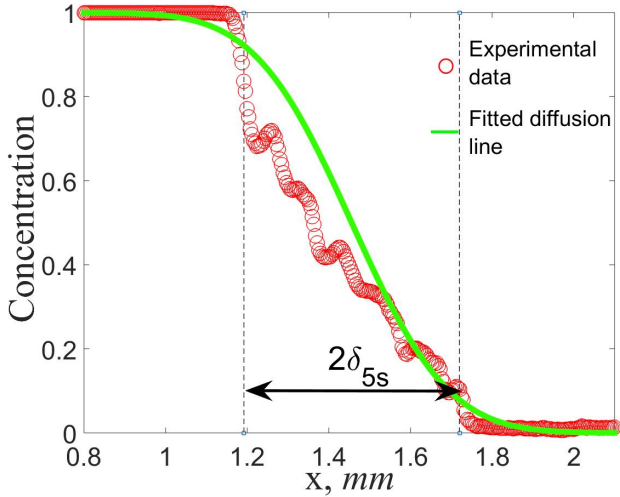


(b) Spoles ar turētāju eksperimentiem ar vertikālā magnētiskā laukā, kas ir paralēls mikrofluidikas čipam.

Att. 1.4: Darbā izmantotie elektromagnēta spoļu un mikrofluidikas čipa turētāji.



Att. 1.5: Magnētiskā mikrokonvekcija $t = 5$ s kopš eksperimenta sākuma. Magnētiskais šķidrums: D107_{100%}; horizontāls magnētiskais lauks $H = 89$ Oe. Apstrādes apgabals atzīmēts ar raustītu līniju.

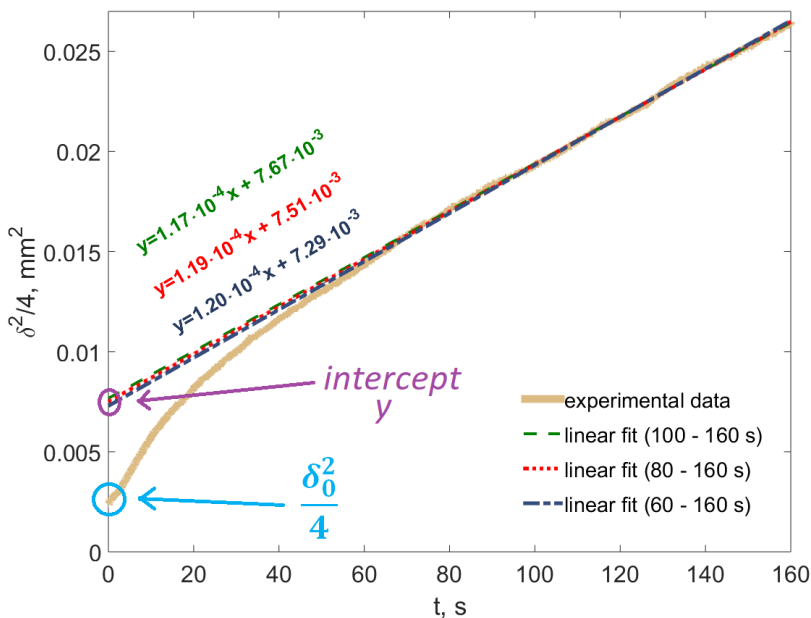


Att. 1.6: Vidējatās koncentrācijas profils (sarkani aplīši) laikā $t = 5$ s. Eksperiments ar sākotnēji nekustīgiem šķidrumiem, horizontālā magnētiskā laukā $H = 89$ Oe. Magnetiskais šķidrums: D107_{100%}; mikrofluīdikas čipa biezums $h_1 = 0.135$ mm. Difūzijas līkne, izmantojot Fika likuma atrisinājumu (zaļā līnija). Samaisīšanās garums 2δ attēlots ar bultu.

Difūzijas vienādojumu var pārrakstīt formā: $\delta^2/4 = Dt$. Tad redzams, ka lielums $\frac{\delta^2}{4}$ ir tieši proporcionāls laikam t un proporcionalitātes koeficients ir daļiņu difūzijas koeficients D . Lai identificētu difūzijas procesu var attēlot maisīšanās dinamiku asīs $\frac{\delta^2}{4}(t)$. Eksperimentiem ārējā magnētiskā laukā, kuros ir klātesoša magnētiskā mikro-konvekcija līkne, kas reprezentē sakarību $\frac{\delta^2}{4}(t)$ ir ar stāvu pieaugumu eksperimenta sākumā, bet vēlāk iegūst lineāru formu (att. 1.7). Lineāro daļu starp lielumu $\frac{\delta^2}{4}$ un laiku raksturo difūzijas procesu, kamēr sākotnējo pacēlumu līknē izraisa mikrokonvektīvā samaisīšanās, kas ir aktīva eksperimenta sākumā. Šī darba ietvaros mikrokonvektīvo samaisīšanos raksturo parametrs δ_{MC} . Šo parametru iegūst, uzskatot kopējo samaisīšanos kā divu funkciju (difuzīvā maisīšanās un konvektīvā maisīšanās) summu. Koordinātēs, kur $\delta^2/4$ izteikts atkarībā no laika, sākotnējā robežslāņa starp šķidrumiem izmērēšanās δ_0 raksturojas ar sākotnējo līknes pacēlumu $\delta_0^2/4$, kā redzams 1.7 attēlā. Šajā attēlā arī attēlotas vairākas lineārās aproksimācijas, kas krusto vertikālo asi ($t = 0$) punktā y . No šīm

vērtībām mikrokonvektīvā samaisīšanās ir izteikta kā: $\delta_{MC} = \sqrt{4y} - \sqrt{4 \cdot \frac{\delta_0^2}{4}}$.
 Piemēram, šeit: $\delta_{MC} \approx 0.07$ mm.

Dažreiz eksperimentos spēcīgos magnētiskos laukos, elektromagnēta spoļu uzkaršanas dēļ, netika ierakstīts pietiekami garš videomateriāls. Un apstrādājot rezultātus nav novērojama difūzā procesa līknes lineārā daļa minētajās koordinātēs $\frac{\delta^2}{4}(t)$. Šādu eksperimentu apstrāde detalizāti izklāstīta disertācijas pilnajā tekstā, bet šeit turpmāk šādi rezultāti tiks atšifrēti kā iegūti ar "pielīdzinājuma metodi".



Att. 1.7: Maisīšanās dinamika, maisot ūdeni un magnētisko šķīdumu D107_{100%} horizontālā magnētiskā laukā $H = 56.2$ Oe. Eksperimentus attēlo bēsa līkne. Pārējās līknes ir difūzijas procesa lineārā aproksimācija, dažādos laika intervālos. Izmantotā mikrofluidikas kanāla biezums: $h_1 = 0.135$ mm.

Nākamais solis datu apstrādē ir δ_{MC} izmaiņu apkopošana atkarībā no dažādiem eksperimentālajiem parametriem, piemēram, sākotnēji izmērētā robežslāņa platuma δ_0 , ārēja magnētiskā lauka H intensitātes un virziena,

mikrofluīdikas kanāla biezuma h un citiem. Apkopota informācija arī par kritisko magnētisko lauku H_c pie dažādām δ_0 vērtībām un citiem eksperimentālajiem parametriem. H_c ir magnētiskā lauka vērtība pie kuras pirmo reiz parādās nestabilitāti raksturojošie pirkstis. Vēl viens magnētisko mikrokonvekciju raksturojošs lielums ir viļņa garums λ , kas raksturo nestabilitātes periodiskumu. Šā darba ietvaros λ mērīts kolīdz parādās nestabilitāte pie pirkstu pamatnes. Lai salīdzinātu eksperimentu rezultātus ar teorētiskajiem, eksperimentālie rezultāti tiek bezdimensionalizēti, kā tas vairāk paskaidrots disertācijas pilnajā tekstā.

1.4 Rezultātu publicēšana

Šajā darbā iekļautie rezultāti prezentēti vairākās starptautiskās konferencēs un vienā publikācijā [23]. Kā arī vēl viena publikācija par §2.2 nodaļā apkopotajiem rezultātiem ir sagatavota. Darba izstrādes laikā arī apmeklēja vasaras skola *Summer School of Complex Fluid-Flows in Microfluidics* par mikrofluīdikas metodēm, kas norisinājās *Faculty of Engineering* Porto Univesitātē Portugālē 2018. gada jūlijā.

1.4.1 Zinātniskās publikācijas par promocijas darba tēmu

Daļa šajā darbā ietverto rezultātu ir publicēti [23]:

G. Kitenbergs, A. Tatuļčenkovs, L. Puķina, A. Cēbers, "Gravity effects on mixing with magnetic micro-convection in microfluidics", *The European Physical Journal E.*, **2018**, Vol. 41, pages 138.

Šie rezultāti iekļauti promocijas darbā ar *The European Physical Journal* atļauju.

Publicēšanai sagatavotas arī 2 publikācijas par mikrokonvektīvo maisīšanu sākotnēji neplūstošiem šķidrumiem [66]:

L. Puķina-Slava, A. Tatuļčenkovs, A. Cēbers, G. Kitenbergs, "How gravity stabilises instability: the case of magnetic micro-convection", *arXiv:2310.15323*, **2023**.

un publikācija par mikrokonvekciju šķidrumos ar sākotnēji izsmērētu robežvirsmu:

L. Puķina-Slava, A. Tatuļčenkovs, A. Cēbers, G. Kitenbergs, "The effects of initially smeared interface on the magnetic micro-convection".

1.4.2 Zinātnisko semināru un konferenču saraksts

- L. Puķina, E. Blūms, D. Zablotsky. *Nanoparticle transfer in ferro-colloids in nonuniform magnetic field*. Konference "EuroNanoForum" 2017. gada 21.-23. jūnijs. Valleta, Malta.
- L. Puķina-Slava, A. Tatuļčenkovs, G. Kitenbergs. *Experimental investigation of how gravity stabilizes instability of magnetic microconvection*. 77. starptautiskā Latvijas Universitātes konference. 20198. gada 1. februāris. Rīga, Latvija.
- L. Puķina-Slava, A. Tatuļčenkovs, G. Kitenbergs. *Gravity limited mixing with magnetic micro-convection*. Starptautiskā magnētisko šķidrumu konference *ICMf*. 2019. gada 8.-12. jūlijs. Parīze, Francija.
- G. Kitenbergs, L. Puķina-Slava, A. Cēbers. *Rivalry of diffusion, external field and gravity in micro-convection of magnetic colloids*. Starptautiskā magnētisko šķidrumu konference *ICMf*. 2019. gada 8.-12. jūlijs. Parīze, Francija.
- L. Puķina-Slava, G. Kitenbergs. *Gravity limited mixing with magnetic micro-convection*. Internacionāls seminārs magnētismā un Mikrodinamikā. 2019. gada 15. maijs .Rīga, Latvija.
- L. Puķina-Slava, A. Tatuļčenkovs, G. Kitenbergs. *Mixing with magnetic micro-convection bounded by gravity and its effects on pre-mixed fluids*. Konference "11th Liquid matter conference". 2021. gada 19.23. jūlijs. Norisinājās virtuālajā vidē.
- L. Puķina-Slava, A. Tatuļčenkovs, G. Kitenbergs. *Initial interface smearing restricts two fluid mixing with the magnetic micro-convection*. 14. Eiropas šķidrumu mehānikas konference *EFMC*. 2022. gada 13.-16. septembris. Atēnas, Grieķija.
- L. Puķina-Slava, A. Tatuļčenkovs, G. Kitenbergs. *Pre-mixing effects on magnetic micro-convection*. 80. 80th starptautiskā Latvijas Universitātes konference. 2022. gada 16. februāris. Rīga, Latvija.

1.4.3 Pētniecības projekti

Darba izstrādi finansiāli atbalstīta ar ESF projektu "LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā" No.8.2.2.0/20/I/006.

1.5 Autores ieguldījums darbā

Visus eksperimentālos rezultātus, kas apkopoti §2, ir ieguvusi un apstrādājuss šī darba autore. Mikrofluīdikas sistēmas manipulācijas, mikrofluīdikas čipu izgatavošana un plūsmas modelēšana mikrofluidikas čipā, kā aprakstīts šā promocijas darba pilnajā tekstā 2. nodaļā arī ir autores darbs. Teorētiskās prognozes un skaitliskos modeļus, kas apkopoti §3, ir veikuši kolēģi MMML un atrodami literatūrā, bet salīdzinājumu ar eksperimentālajiem datiem veic šī darba autore.

1.6 Autores izglītība un zinātniskā darbība

Izglītība

- MSc, Maģistra grāds fizikā, Latvijas Universitāte, 2015.
- BSc Bakalaura grāds fizikā, Latvijas Universitāte, 2013.

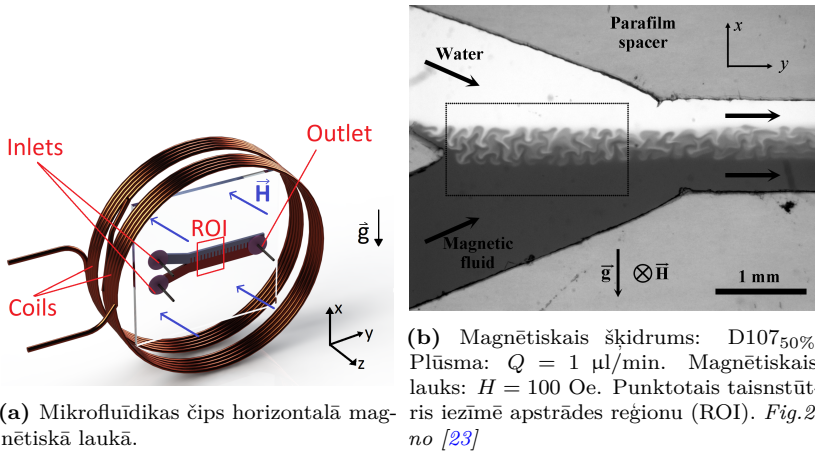
Zinātniskā darbība

- Zinātniskā asistente, Magnetiski mīkstu materiālu laboratorija, Latvijas Universitāte, *Eksperimentāls darbs ar magnētiskās mikrokonvekcijas pētījumiem.*
- Pētniece, Siltuma un masas pārnese laboratorija, Fizikas institūts, Latvijas Universitāte, *Magnētisko nestabilitāšu pētījumi siltuma gradienta ietekmē.*
- Zinātniskā asistente, Cietvielu radiācijas laboratorija, Cietvielu fizikas institūts, Latvijas Universitāte, *Hidroksilapatītu spektrālie pētījumi.*

2. Galvenie rezultāti

2.1 Magnētiskā mikrokonvekcija plūstošos šķidrumos

Šajā darba daļā izmantoti Y-formas mikrofluīdikas kanāli ar biezumu $h_1 = 0.135 \pm 0.005$ mm. Šļircu pumpis ievada šķidrumus kanālā, un kanāla izvads ir brīvi atvērts. Mikrofluīdikas čips vertikāli nostiprināts centrā starp elektromagnēta spolēm tā, ka lauks ir horizontāls un perpendikulārs čipa virsmai, kā redzams 2.1 attēlā. Daļa šeit apkopoto rezultātu ir ietverti publikācijā [23].



Att. 2.1: Y-formas mikrofluīdikas kanāls. Magnētiskā mikrokonvekcija kamēr abi šķidrumi plūst.

Šajā darba daļā magnētiskā šķidruma D107 blīvums mainīts atšķaidot magnētisko šķidrumu ar destilētu ūdeni dažādās attiecībās (100%, 66%, 50% and 33%), šādā veidā nodrošinot gravitācijas efektu izpēti. Eksperimenti veikti pie dažādiem šķidrumu plūsmas ātrumiem, kas regulēts ar šļircu pumpi.

Izvēlēta šķidrumu plūsma (Q , $\mu\text{l}/\text{min}$) netiek mainīta eksperimenta laikā. Šķidrumi tiek pumpēti jau kādu brīdi pirms eksperimenta, lai robežvirsmas starp šķidrumiem būtu stabila. Eksperiments sākas un tiek ierakstīts līdz ar

magnētiskā lauka ieslēgšanu. Eksperimenti veikti pie dažādām ārējā magnētiskā lauka vērtībām, kas eksperimenta gaitā netiek mainītas. Ja magnētiskais lauks ir lielāks par kritisko H_c , īsu brīdi pēc ta ieslēgšanas parādās nestabilitāti raksturojošie pirksti visā šķidrumu robežvirsmas garumā. Pirksti aug līdz tie sasniedz savu maksimālo garumu. Visos laika momentos pirksti ir vienādā garumā visā robežvirsmā. Stiprākos magnētiskos laukos nestabilitātes pirksti parādās agrāk un aug ātrāk. Kad pirksti ir sasnieguši savu maksimālo garumu, jauni pirksti joprojām veidojas Y-kontaktpunktā kur satiekas kanālā jaunieplūdušie šķidrums. Parādība aplūkojama 2.1b attēlā.

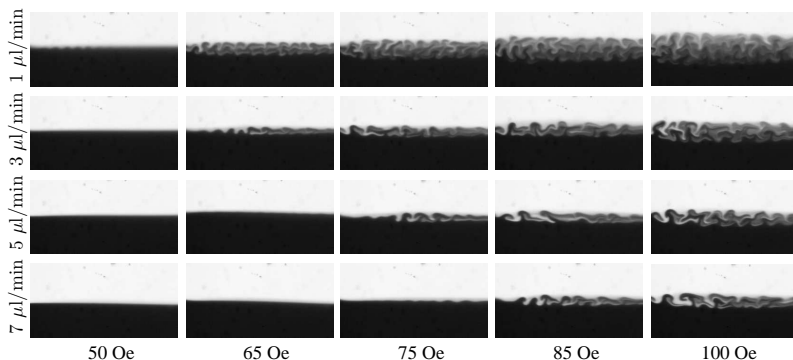
Izpētot magnētisko šķidrumu atšķaidīšanas ietekmi uz nestabilitāti, rezultāti liecina, ka nestabilitāte parādās vēlāk, ja izmantots atšķaidīts magnētiskais šķidrums. Kā arī nepieciešams spēcīgāks magnētiskais lauks, lai ierosinātu nestabilitāti ja magnētiskais šķidrums ir vairāk atšķaidīts. Tāpat maksimālais pirkstu garums, kas sasniedzams vienādā magnētiskajā laukā, ir īsāks atšķaidītākiem magnētiskajiem šķidrumiem.

Maisīšanās dinamika, sasniedzot maksimālo pirkstu garumu, dažādām šķidruma plūsmām dažādos magnētiskajos laukos redzama 2.2 attēlā. Kā redzams, lielākiem plūsmas ātrumiem nepieciešams spēcīgāks magnētiskais lauks, lai ierosinātu magnētisko mikrokonvekciju.

Viens no šī pētījuma mērķiem bija atrast H_c vērtības neplūstošiem šķidrumiem, ja šļirču pumpis eksperimenta sākumā ir izslēgts. Šo eksperimentu laikā atklājās, ka Y-formas mikrofluidikas kanālos to nav iespējams kvalitatīvi paveikt, jo ieslēdzot ārējo magnētisko lauku, parādās gareniska, nevēlama plūsma, kas izskalo magnētisko šķidrumu ārā no kanāla. Šis tika atrisināts, izmantojot taisnstūra formas mikrofluidikas kanālus, un aizverot kanāla izplūdi ar vēlvienu šļirču pumpi. Vairāk šis aprakstīts disertācijas pilnajā tekstā, bet rezultātu apkopojums nekustīgiem šķidrumiem iekļauts nākamajā šī darba sadaļā.

Kaut arī šajā darba posmā nebija iespējams veikt eksperimentus ar neplūstošiem šķidrumiem, H_c vērtības nekustīgu šķidrumu gadījumā tika aptuveni novērtētas. H_c vērtības dažādiem plūsmas ātrumiem apkopotas 2.3 attēlā. Kā redzams, plūsmas ātrums ierobežo H_c , un rezultātus var aprakstīt ar lineāru sakarību, kā tas izdarīts šeit. Tādejādi vertikālās ass krustojums ar šo lineāro sakarību raksturo H_c , ja $Q = 0 \mu\text{l}/\text{min}$. Šādi novērtētās H_c apkopotas

2.1 tabulā.



Att. 2.2: Magnētiskā mikrokonvekcija dažādās plūsmās dažādu magnētisko lauku ietekmē. Magnētiskais šķidrums: D107_{66%}. Katrs mazais attēls atbilst 1.0×2.0 mm. *Fig. 6. no [23].*

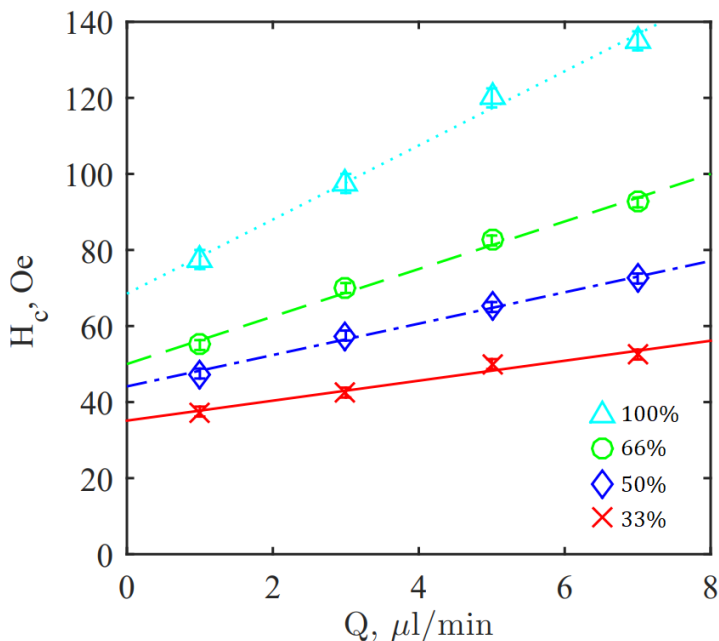
Magnētiskais šķidrums	$H_c \pm \Delta H_c$, Oe
D107 _{100%}	35 ± 2
D107 _{66%}	44 ± 1
D107 _{50%}	50 ± 2
D107 _{33%}	69 ± 2

Tabula 2.1: Kritiskā magnētiskā lauka novērtējums, ja šķidrums būtu nepļūstoši

Vēl šajā darba daļā atrasti raksturīgie nestabilitātes viļņu garumiλ:

- $\bar{\lambda}_{D107_{100\%}} \pm \Delta\lambda = 0.15 \pm 0.05$ mm;
- $\bar{\lambda}_{D107_{66\%}} \pm \Delta\lambda = 0.19 \pm 0.03$ mm;
- $\bar{\lambda}_{D107_{50\%}} \pm \Delta\lambda = 0.22 \pm 0.04$ mm;
- $\bar{\lambda}_{D107_{33\%}} \pm \Delta\lambda = 0.23 \pm 0.04$ mm.

Rezultāti liecina, ka λ nav atkarīgs no šķidrums plūsmas ātruma. Datu izkliesdes dēļ nevar secināt vai λ ietekmē magnētiskā šķidrums atšķaidīšana.

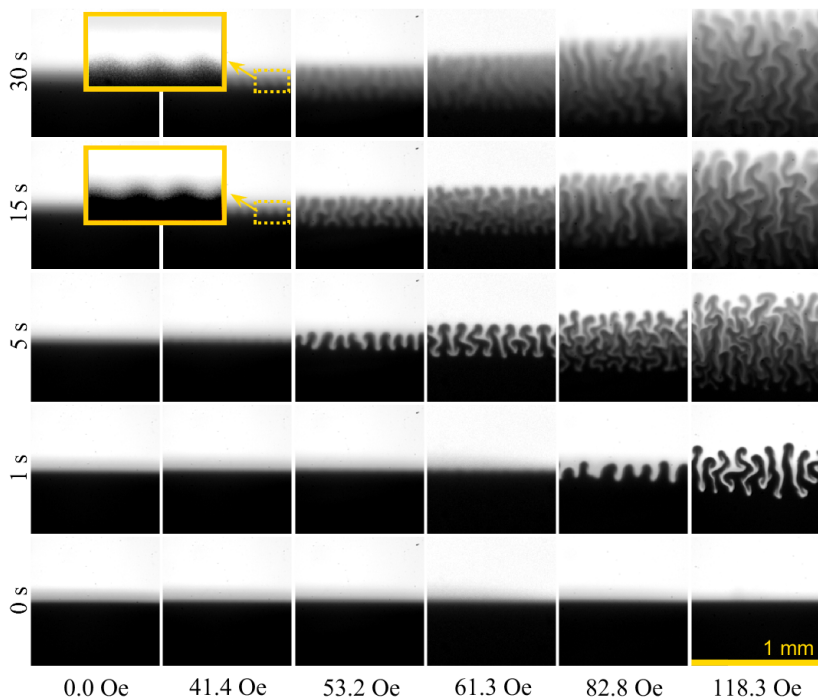


Att. 2.3: Kritiskais magnētiskais lauks dažādiem šķidruma plūsmu ātrumiem. Magnētiskais šķidrums D107 dažādās koncentrācijās. Lineārās līknes piekārtotas H_c noteikšanai, ja $Q = 0 \mu\text{l}/\text{min}$.

2.2 Magnētiskā mikrokonvekcija neplūstošos šķidrumos

Šeit apkopoti eksperimentu rezultāti, kuros eksperimenta sākumā abi šķidrumi ieņēmuši stacionāru stāvokli un nav klātesošas plūsmas. Izmantots vertikāli novietots mikroflūidikas kanāls ar biezumu $h_1 = 0.135 \text{ mm}$ un taisnstūrveida formu. Nestabilitāte pētīta ar magnetisko šķidrumu D107 dažādās atšķaidījuma attiecībās (100%, 66%, 50% and 33%). Tāpat kā iepriekš ārējais magnētiskais lauks vērsts horizontāli un perpendikulāri mikroflūidikas čipa virsmai. Šīs darba daļas galvenais mērķis bija atrast magnētiskās mikrokonvekcijas samaisīšanās platumā δ_{MC} atkarību no dažādiem eksperimentālajiem parametriem. Kā arī raksturot kritiskos magnētiskos laukus H_c un

nestabilitātes periodiskumu λ . Izmantojot bezdimensionilos Releja skaitļus kvantificēta gravitācijas ietekmi uz nestabilitāti. Atšķirībā no rezultātiem, kas apkopoti §2.1 nodaļā, šeit eksperimenta sākumā šļirču pumpji ir izslēgti un šķidrums neplūst. Daļa šeit apkopoto rezultātu ir ietverti publikācijā [66].

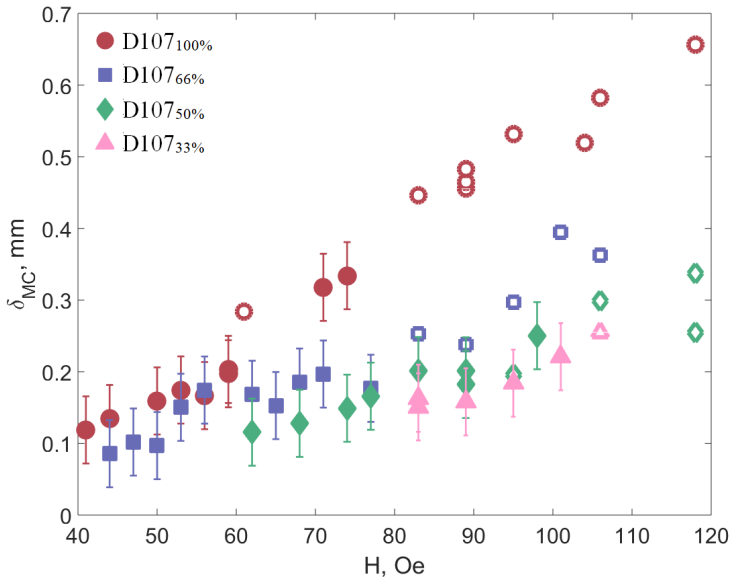


Att. 2.4: Magnētiskās mikrokonvekcijas dinamika atkarībā no horizontāla ārējā magnētiskā lauka, magnētiskais šķidrums D107_{100%}. Katrs mazais attēls atbilst 1×1 mm.

Eksperiments tiek ierakstīts no brīža, kad tiek ieslēgts magnētiskais lauks. Pirms katra eksperimenta ar šļirču pumpjiem mikrofluīdikas kanālā tiek iepumpēti svaigi šķidrums. Magnētiskā laukā, kas lielāks par H_c veidojas nestabilitātes pirksti visas šķidrumu robežvirsmas garumā. Nestabilitātes pirksti aug, līdz tie sasniedz kādu maksimālo garumu. Kolīdz nestabilitāte parādās, visi pirksti aug vienādā ātrumā, tādejādi katrā laika momentā visu

pirkstu garums ir vienots. Magnētiskās mikrokonvekcijas piemērs aplūkojams 2.4 attēlā. Vispirms nestabilitāte parādās mazu vilnīšu veidā, kas pēcāk izaug par taisniem, nelieliem pirkstiem. Ja magnētiskais lauks ir pietiekami spēcīgs pirksti viļņojas, vai spēcīgākos laukos pat zarojas. Sasniedzot maksimālo pirkstu garumu, spēcīgos magnētiskos laukos, pirksti joprojām kustās un zarojas, bet to robežas palēnām izplūst difūzijas ietekmē. Disertācijas pilnajā tekstā apkopota detalizēta pirkstu formu un garumu analīze atkarībā no ārējā magnētiskā lauka un magnētiskā šķidrums atšķaidīšanas attiecības. Atšķaidot magnētiskos šķidrumus, nepieciešami spēcīgāki magnētiskie lauki, lai radītu viļņainus vai sazarus nestabilitātes pirkstus. Nestabilitātes pirksti parādās agrāk un aug garāki stiprākos magnētiskos laukos, un ja magnētiskais šķidrums ir mazāk atšķaidīts.

Magnētiskās mikrokonvekcijas samaisīšanās platumā δ_{MC} atkarība no magnētiskā lauka H redzama 2.5 attēlā.



Att. 2.5: δ_{MC} atkarībā no magnētiskā lauka H . Datu punkti attēloti ar cauro vidu iegūti ar "pielīdzinājuma metodi".

Vidējots raksturīgais viļņu garums eksperimentiem šajā darba posmā bija $\bar{\lambda} = 0.12 \pm 0.02$ mm. Apkopotās kritiskās magnētiskā lauka H_c vērtības:

- D107_{100%}: $H_c = 41.4 \pm 2.5$ Oe;
- D107_{66%}: $H_c = 44.4 \pm 2.5$ Oe;
- D107_{50%}: $H_c = 59.1 \pm 2.5$ Oe;
- D107_{33%}: $H_c = 79.4 \pm 2.5$ Oe.

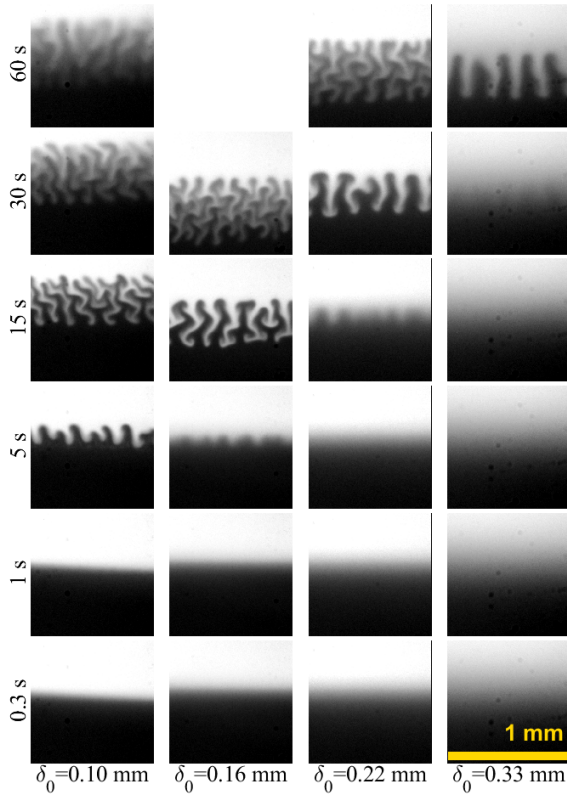
Kā sagaidāms H_c vērtības ir lielākas ja magnētiskais šķidrums ir mazāk atšķaidīts. Šeit apkopotās vērtības ir mazliet lielākas par iepriekšējā nodaļā novērtētajām (2.1 tabula). To var izskaidrot ar faktu, ka izslēdzot šļirču pumpi, robežvirsmā starp abiem šķidrumiem parasti nedaudz nosvārstās, radot nelielu sākotnēju robežvirsmas izmērējumu. Kā tas būs redzams nākamajā sadaļā, H_c vērtības ietekmē sākotnējais robežvirsmas izmērētības platums.

2.3 Magnētiskā mikrokonvekcija ar sākotnēji izsmērētu robežvirsmu starp šķidrumiem

Šajā darba daļā apkopoti rezultāti, kur magnētiskā mikrokonvekcija ierosināta eksperimentos, ja sākotnējā robežvirsmā starp šķidrumiem nav asa, bet izsmērēta. Šīs darba daļas mērķis bija noskaidrot kā magnētiskās mikrokonvekcijas platumu δ_{MC} ietekmē šī sākotnējā izsmērētība. Literatūrā [32] apskatīts kā teorētiski izsmērēta robežvirsmā ietekmē magnētisko mikrokonvekciju. Sākotnējais robežvirsmas izmērējuma platums δ_0 regulēts, ļaujot abiem šķidrumiem maisīties difūzijas ietekmē pirms eksperimenta dažādu laika sprīžus. Šļirču pumpis šeit izmantots, lai iepildītu mikrofluīdikas kanālā svaigus šķidrumus pirms katra eksperimenta. Eksperiments tiek ierakstīts no momenta, kad ieslēgts ārējais magnētiskais lauks.

Šajā darba daļā izmantoti trīs dažādi magnētiskie šķidrumi dažādās atšķaidījuma attiecībās ar destilētu ūdeni. Magnētisko šķidrumu atšķaidot ar ūdeni tā difūzijas koeficients D nemainās, savukārt mainās daļiņu koncentrācija ϕ un blīvums ρ , kuri atšķaidot samazinās. Zinot šo, var aprēķināt bezdimensionālos Releja skaitļus Ra_g un Ra_m .

Eksperimentālie parametri tika dažādoti arī izmantojot dažāda biezuma mikrofluīdikas kanālus. Mainot mikrofluīdikas kanāla biezumu, lielumi Ra_g un Ra_m arī mainās: $Ra_g \sim h^3$ un $Ra_m \sim h^2$.



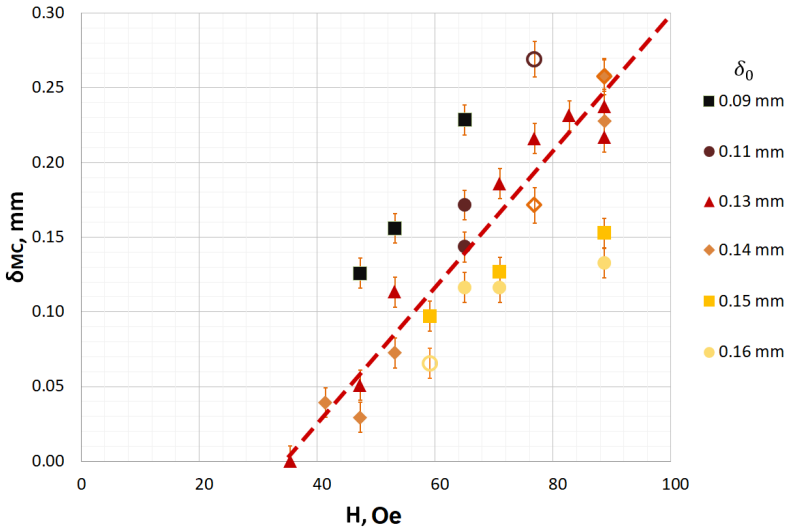
Att. 2.6: Magnētiskā mikrokonvekcija dažādiem sākotnēji izmērēta robežslāņa platumiem δ_0 horizontālā magnētiskajā laukā $H = 82.8$ Oe. Mikrofluīdiskas kanāla biezums: $h_1 = 0.135$ mm. Magnētiskais šķidrums: KTF11-1_{100%}. Katrs attēls atbilst 1.0×1.0 mm.

Sākotnējā robežslāņa izmērējuma platumā δ_0 ietekme uz nestabilitāti aplūkojama 2.6 attēlā. Vertikālā ass atbilst laikam, kopš magnētiskā lauka ieslēgšanas. Viena attēlu kolona raksturo viena eksperimenta attīstību laikā. Līdzīgi kā iepriekšējos eksperimentos vispirms parādās taisni pirksti, kas stiprākos laukos viļņojas vai pat zarojas. Pēc maksimālā garuma sasniegšanas pirksti pārstāj augt, bet šķidrumu maisīnās turpinās difūzijas ietekmē. Nestabilitātes pirksti parādās vēlāk un aug lēnāk, pie lielākām δ_0 vērtībām. Arī

maksimālais pirkstu garums ir mazāks, ja δ_0 ir lielāks.

Nav skaidrs, vai sākotnējā robežslāņa izsmērētība ietekmē nestabilitātes viļņu garumu λ . Literatūrā [33] minēts, ka λ jāpieaug, ja δ_0 tiek palielināts. Eksperimentos šis novērots tikai ar magnētisko šķidrumu KTF11-1, kamēr rezultātiem ar pārējiem magnētiskajiem šķidrumiem datu iekļiede ir pārk liela secinājumiem. Palielinot mikroflūidikas kanāla biezumu, novērota λ palielināšanās, kas atbilst informācijai literatūrā [35].

Ārējais magnētiskais lauks ietekmē pirkstu formu. Bet šajos eksperimentos netika novērots, ka tas ietekmētu viļņu garumu λ , sākoties nestabilitātei. Disertācijas pilnajā tekstā apkopota pirkstu formu analīze, un magnētiskā lauka vērtības pie kurām pirksti paliek viļņaini vai sāk zaroties. Novērts, ka pirkstu formu ietekmē ne vien magnētiskais lauks, bet arī sākotnēji izsmērētās robežvirsmas platums δ_0 . Ir nepieciešami spēcīgāki lauki, lai ierosinātu pirkstu viļņošanos vai zarošanos lielākām δ_0 vērtībām.



Att. 2.7: δ_{MC} atkarībā no horizontāla magnētiskā lauka H pie dažādām δ_0 vērtībām. Mikroflūidikas kanāla biezums: $h_1 = 0.135$ mm, magnētiskais šķidrums: FF09-9_{100%}. Datu punkti attēloti ar cauro vidu iegūti ar "pielīdzinājuma metodi".

Piemērs kvantitatīvai δ_0 ietekmei uz magnētiskās mikrokonvekcijas samaisīšanās platumu δ_{MC} aplūkots 2.7 attēlā. Disertācijas pilnajā tekstā aplūkojama pilna δ_0 ietekmes analīze uz δ_{MC} , mainot dažādus eksperimentālos parametrus. Šeit rezultāti ir grupēti pēc δ_0 vērtībām, izmantojot vienādas krāsas datu punktus, kas paliek gaišāki, ja robežvirsmas izsmērētība palielinās. Redzams, ka maisīšanas ar magnētisko mikrokonvekciju ir efektīvāka, ja sākotnējā robežvirsmā starp šķidrumiem ir plānāka. δ_0 neietekmē ātrumu ar kādu δ_{MC} pieaug, palielinot ārējo magnētisko lauku. Ekstrapolējot konkrēta δ_0 datu punktus līdz tie krusto horizontālo asi, var noteikt H_c vērtību eksperimentiem ar šādu konkrēto δ_0 . Šis tika izdarīts visiem eksperimentiem, un rezultātu analīze aplūkojama pilnajā disertācijas tekstā. Kā sagaidāms H_c vērtības ir lielākas, ja δ_0 ir lielāks. Papildus H_c vērtības, ja tiktu maisīti šķidrumi ar sākotnēji perfekti asu robežvirsmu ($\delta_0 = 0$) starp šķidrumiem var tikt novērtētas no šiem rezultātiem. Šīs H_c vērtības atbilst iepriekšējās nodaļās (§2.1 un §2.2) noteiktajām.

Šīs nodaļas rezultāti, sakrītot ar iepriekšējiem, apliecina, ka magnētiskā šķidruma atšķaidīšana ar ūdeni samazina magnētisko mikrokonvekciju. Bet robežvirsmas sākotnējā izsmērētība gan neietekmē ātrumu ar kādu δ_{MC} mainās, atšķaidot magnētiskos šķidrumus.

Vēl viens parametrs, kura ietekme uz magnētisko mikrokonvekciju tika izpētīta šajā darba daļā ir mikrofluīdikas kanāla biezums h . Lielākas δ_{MC} vērtības vienā un tajā pašā magnētiskajā laukā tika iegūtas visbiežākajā izmantotajā mikrofluīdikas kanālā ($h_3 = 0.399$ mm). Savukārt starp diviem plānākajiem mikrofluīdikas kanāliem ($h_1 = 0.135$ mm un $h_2 = 0.257$ mm) šīs atšķirības izrādījās statistiski nenozīmīgas.

Apskatot bezdimensionalizētos rezultātus, bezdimensionālais laika parametrs t_0 kas raksturo δ_0 mainās dažāda biezuma mikrofluīdikas kanālos: $t_0 = \frac{\delta_0^2}{4h^2}$. Magnētiskā mikrokonvekcija atkarībā no Ra_m bija efektīvāka plānākajā mikrofluīdikas kanālā, citiem vārdiem, pie mazākās Ra_g vērtības. Tas pats novērojams arī salīdzinot rezultātus ar dažādi atšķaidītiem magnētiskajiem šķidrumiem, tādējādi kvantitatīvi parādot, kā gravitācija ierobežo magnētisko mikrokonvekciju.

Šajā darba posmā arī tika apstiprināta otrā un trešā hipozēte, kas tika izvirzītas šā darba sākumā. Detalizēta metodika šī secinājuma iegūšanai aplū-

kota disertācijas pilnajā tekstā. Bet īsumā, rezultāti apstiprināja, ka kopējais šķidrums samaisīšanās platums $\Delta = \delta_{MC} + \delta_0$, kas sastāv no mikrokonvekcijas un difūzās maisīšanās nav atkarīgas no sākotnēji izsmērētās robežvirsmas slāņa platuma. Kā arī kritiskais magnētiskais lauks H_c , lai ierosinātu nestabilitāti pie konkrēta δ_0 kļūdu robežās sakrīt ar magnētisko lauku H , kāds nepieciešams lai radītu magnētiskās mikrokonvekcijas platumu δ_{MC} tādā pašā izmēra, ja sākotnējais $\delta_0 = 0$.

2.4 Magnētiskā mikrokonvekcija vertikālā magnētiskā laukā

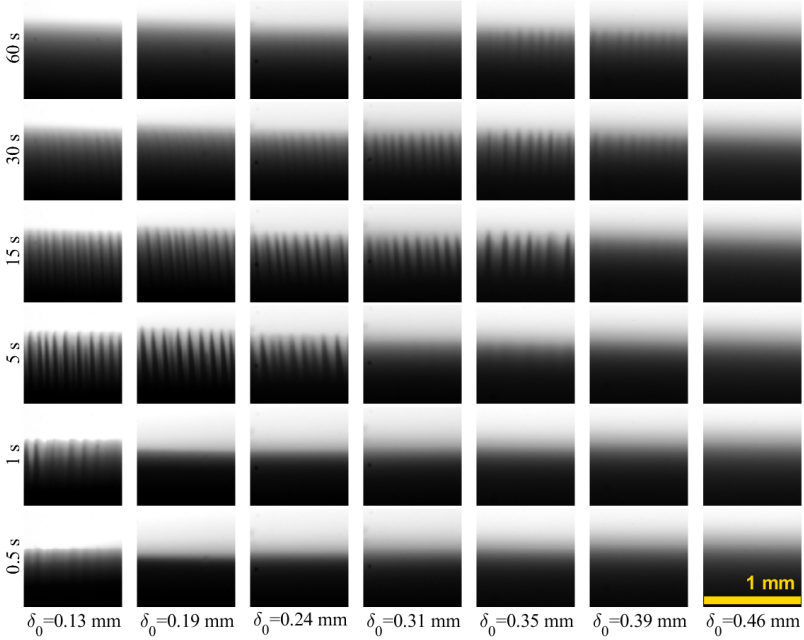
Šajā darba daļā apkopoti rezultāti, kas iegūti eksperimentos, kad ārējais magnētiskais lauks vērst vertikāli un ir paralēls mikrofluīdikas čipam. Šajā darba daļā tika izmantoti četri dažādi magnētiskie šķidrums. Kā arī eksperimenti veikti mikrofluīdikas kanālos ar dažādu biezumu ($h_1 = 0.135$ mm un $h_2 = 0.257$ mm).

Sākonēji izsmērēta robežslāņa platuma δ_0 ietekme uz nestabilitāti konstantā vertikālā laukā aplūkota 2.8 attēlā. Vertikālā ass atbilst laikam, kopš magnētiskā lauka ieslēgšanas. Viena attēlu kolona attēlo vienu eksperimentu. Šīs nestabilitātes periodiskā aina atšķiras no nestabilitātes horizontālā laukā, šeit pirksti ir asi un taisni. Bet tāpat kā horizontālajā laukā, nestabilitāte parādās tikai, ja magnētiskais lauks ir lielāks par kādu kritisko vērtību H_c , kas ir lielāka, ja sākotnējā robežslāņa izsmērētība ir lielāka. Nestabilitātes pirksti aug salīdzinoši ātri, sasniedzot maksimālo garumu tie pārstāj augt, bet difūzijas ietekmē šķidrums maisīšanās turpinās. Pie mazākām δ_0 vērtībām nestabilitātes pirksti parādās agrāk, kā arī pirksti izaug garāki.

Arī šajā darba daļā noteiktas H_c vērtības dažādiem δ_0 . Lielākas H_c vērtības nepieciešamas lai ierosinātu nestabilitāti pie lielākām δ_0 vērtībām. Tāpat mazākas δ_{MC} vērtības tiek sasniegtas, ja sākotnējā robežvirsmas izsmērētība ir lielāka. Preststatus nestabilitātei horizontālajā magnētiskajā laukā, šeit nestabilitātes pirksti parādās vienlīdz agri, neatkarīgi no ārējā magnētiskā lauka vērtības.

Šajā darba daļā izpētīta arī mikrofluīdikas kanāla biezuma ietekme uz magnētisko mikrokonvekciju- tā ir lielāka, ja izmantots biežākais kanāls ($h_2 = 0.257$ mm). Tāpat kā iepriekšējos rezultātos arī šeit lielākas δ_{MC} vērtības

iegūstamas, ja magnētiskais šķidrums nav atšķaidīts. Un δ_{MC} atšķirības starp dažādām magnētiskā šķidruma atšķaidījuma attiecībām ir lielākas spēcīgākā magnētiskajā laukā.



Att. 2.8: Magnētiskā mikrokonvecija vertikālā magnētiskajā laukā $H = 41.4$ Oe. Mikrofluīdikas kanāla biezums: $h_1 = 0.135$ mm, magnētiskais šķidrums: FF21-5_{100%}. Katrs attēls atbilst 1.0×1.0 mm.

λ noteikšana nestabilitātei vertikālā magnētiskajā laukā ir sarežģīta. Eksperimentu vizuālie novērojumi liek secināt, ka nestabilitātes pirksti veidojas vairākās paralēlās rindās. Šī secinājuma pamatojuma analīze detalizēti izklāstīta disertācijas pilnajā tekstā. Bet īsumā, pēc nestabilitātes parādīšanās, vizuāli izskatās, ka pirksti sadalās vairākās daļās, kas varētu būt skaidrojams ar to, ka pirksti vairākās rindās slīd viens gar otru. Rezultāti liecina, ka δ_0 neietekmē λ . Pirkstu vizuālā sadalīšanās fiksēta arī literatūrā [17].

Rezultātu bezdimensionālā analīze atklāj, ka vienāds Ra_m pieaugumus izraisa lielāku δ_{MC} vērtību pieaugumu plānākajā mikrofluīdikas kanālā, kuru

raksturo mazāks Ra_g . Tādejādi apstiprinot, ka tā pat kā horizontāla magnētiskā lauka gadījumā, magnētisko mikrokonvekciju ierobežo gravitācija.

Līdzīgi kā horizontālajā magnētiskajā laukā, arī šeit, ārējais magnētiskais lauks kāds nepieciešams, lai veidotos konkrēts kopējais samaisīšanās platums Δ nav atkarīgs no sākotnēji izsmērētās robežvirsmas platuma δ_0 .

2.5 Mērījumi ar stereo-mikro-PIV

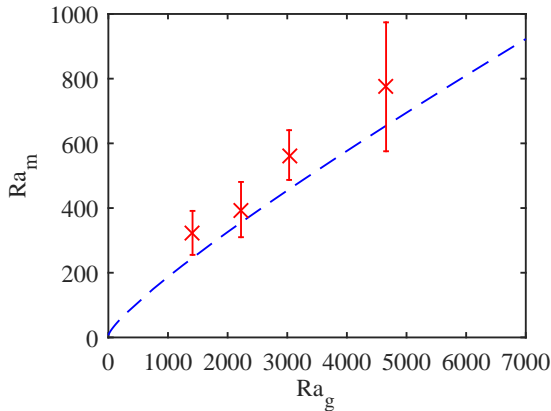
Šī darba ietvaros tika izpētīta šķidrumu plūsma horizontāli novietotā Y-formas mikrofluīdikas kanālā ar stereo-mikro *Particle Image Velocimetry (PIV)* iekārtu uzņēmumā *Dantec Dynamics* Dānijā. Ātrumu vektoru lauks tika nomērīts dažādos horizontālajos slāņos, nogaidot dažādus laikus kopš eksperimenta sākuma. Detalizēts rezultātu apraksts apkopots disertācijas pilnajā tekstā. Rezultāti daļēji apstiprina intuitīvi sagaidāmo ainu gadījumam, kad blīvākais magnētiskais šķidrums paslīd zem ūdens, kā aprakstīts [36].

3. Diskusija

Šeit savstarpēji salīdzināti šā darba rezultāti, kā arī tie salīdzināti ar skaitliskajiem modeļiem un teorētiskajiem aprēķiniem, kurus veikuši kolēģi.

3.1 Magnētiskā mikrokonvekcija horizontālā magnētiskā laukā

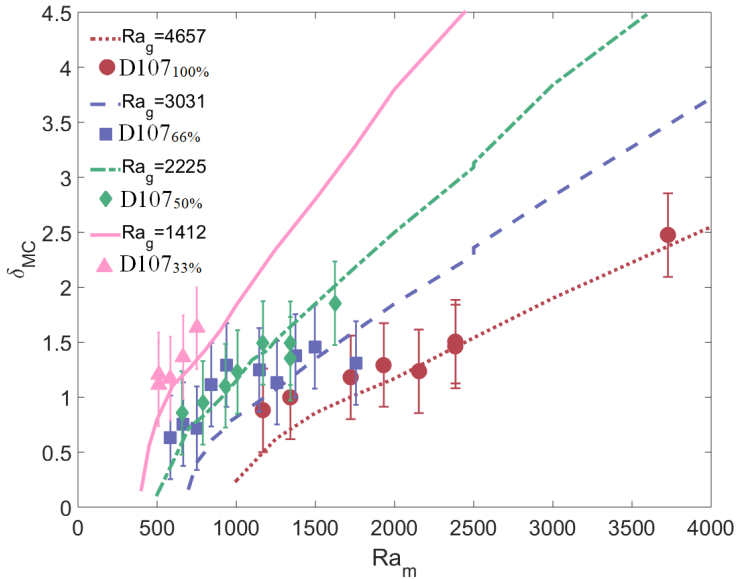
Teorētiskajos aprēķinos izmantots pieņēmums, ka samaisīties spējīgi šķidrumi eksperimenta sākumā Hele-Šou šūnā ir miera stāvoklī un neplūst. Aprakstam izmantoti Brinkmana, nepārtrauktības un konvekcijas-difūzijas vienādojumi, kas analizēti disertācijas pilnajā tekstā. Lineārās stabilitātes analīze veikta pakāpienveida koncentrācijas sadalījumam uz robežas starp abiem šķidrumiem, kā aprakstīts [23]. Teorētiskais modelis, kas izmantots publikācijā, apstiprina, ka gravitācija stabilizē magnētisko mikrokonvekciju, kas sakrīt ar eksperimentāli iegūtajiem rezultātiem šajā darbā.



Att. 3.1: Kritisko releja skaitļu Ra_g un Ra_m salīdzinājums eksperimentālajiem (sarkanie krustiņi) un lineārās analīzes rezultātiem (zilā līnija) horizontālā magnētiskā lauka klātbūtnē. *Fig.18. no [23].*

Eksperimentāli no plūstošiem šķidrumiem noteiktās kritiskās magnētiskā lauka H_c vērtības ir salīdzinātas ar vērtībām, kas iegūtas izmantojot lineārās

stabilitātes analīzi 3.1 attēlā. Eksperimentālie rezultāti sakrīt ar teorētiskajiem, kļūdu robežās. Kā arī, šis grafiks apstiprina gravitācijas ietekmi, jo lielākām Ra_g vērtībām atbilst lielākas Ra_m vērtības, lai ierosinātu magnētisko mikrokonvekciju. Pilnajā disertācijas tekstā aplūkotas visas eksperimentāli iegūtās H_c vērtības, un salīdzinot ar skaitliskajiem modeļiem, iegūta laba rezultātu sakrītība. Tālāk aplūkots eksperimentālo rezultātu no §2.2 salīdzinājums ar lineārās analīzes un skaitlisko modeļu rezultātiem. Kolēģu veidotais teorētiskais modelis šajā darba posmā uzlabots, aprakstot daļiņu koncentrāciju ar trīs slāņu sistēmu— ūdens, sākotnēji samaisītās robežvirsmas slānis un tīrs magnētiskais šķidrums. Šis modelis atbilst vairāk eksperimentālajai realitātei, kā iepriekš apskatītais no [23]. Mikrokonvekcijas attīstības aprēķiniem izmantots Brinkmana modelis.



Att. 3.2: Eksperimentālo rezultātu (datu punkti) un A. Tatuļčenkova veidotā skaitliskā modeļa (līnijas) salīdzinājums. Bezdimensionālais δ_{MC} atkarībā no Ra_m horizontālā magnētiskā laukā, ja sākotnējā robežvirsmā starp šķidrumiem ir asa.

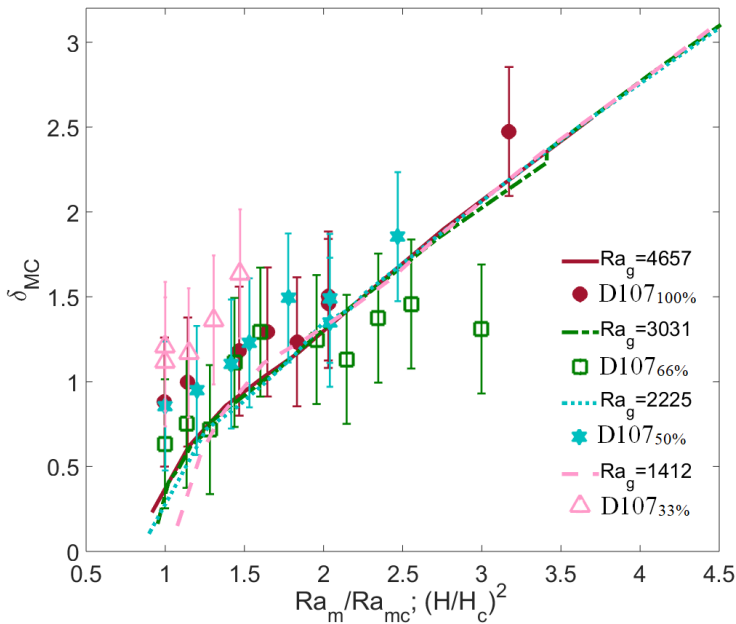
Rezultātos vērojama laba sakritība gan kvantitatīvi, gan kvalitatīvi. Tāpat kā eksperimentos, arī skaitliskajos modeļos magnētiskās mikrokonvekcijas pirksti parādās, ja ārējais magnētiskais lauks ir lielāks par kādu kritisko vērtību H_c un pirksti aug, kamēr sansiedz kādu maksimālo garumu. Stiprākos magnētiskajos laukos pirksti viļņojas vai pat sazarojas.

Samaisīšanās piegums magnētiskās mikrokonvekcijas dēļ eksperimentu un skaitliskā modeļa rezultātiem apkopots 3.2 attēlā. Eksperimentālie dati ir bezdimensionalizēti. Lai salīdzinātu eksperimentālos un skaitliskā modeļa rezultātus, izmantota viena krāsa. Piemēram, sarkanie aplīši apraksta eksperimentālos rezultātus ar magnētisko šķidrumu D107_{100%}, bet tam atbilstošo $Ra_g = 4657$ apraksta skaitliskā modeļa rezultāti ar sarkanu punktotu līkni. Tā kā $Ra_m \sim \chi^2$ eksperimentāli Ra_m vērtības ir ierobežotas ar ūdeni atšķaidītiem magnētiskajiem šķidrumiem, jo tādejādi samazinās magnētiskā uzņēmība. Jo vairāk atšķaidīts magnētiskais šķidrums, jo mazākas Ra_m vērtības pie vienām un tām pašām magnētiskā lauka H vērtībām. Gravitācijas loma ir redzama, jo blīvākiem magnētiskajiem šķidrumiem atbilst lielākas Ra_g vērtības, pie kurām savukārt iegūstamās δ_{MC} vērtības ir mazākas.

Papildus, kā vairāk aprakstīts promocijas darba pilnajā tekstā, rezultātu salīdzinājums liecina, ka gan skaitliskā modeļa, gan eksperimentālie rezultāti sakrīt, ka sākotnēji izsmērēta robežvirsmā starp šķidrumiem ierobežo magnētisko mikrokonvekciju.

Tika veikts arī nestabilitātei raksturīgo pirkstu izmēru λ eksperimentālo un teorētisko rezultātu salīdzinājums, kas ir detalizētāk apskatīts disertācijas pilnajā tekstā. Eksperimentāli noteikts, ka sākotnēji nekustīgiem šķidrumiem vidējais $\overline{\lambda_{stagn}} = 0.12 \pm 0.02$ mm, plūstošiem šķidrumiem: $\overline{\lambda_{flow}} = 0.15 \pm 0.05$ mm, un ar sākotnējo izsmērētu robežvirsmu: $\lambda_{smearred} = 0.16 \pm 0.04$ mm (magnētiskais šķidrums D107, mikrofluīdikas kanāls: $h_1 = 0.135$ mm). Arī literatūrā [36] eksperimentāli noteikts līdzīgs $\lambda_{hor} = 0.15$ mm šim pašam magnētiskajam šķidrumam tā paša biezuma mikrofluīdikas kanālā, kas novietots horizontāli, nevis vertikāli. Izsakot eksperimentāli noteiktos λ kā bezdimensionālu viļņa skaitli k , iegūta arī laba sakritība ar teorētiskajiem aprēķiniem: $\overline{k_{exp}} = 7.3 \pm 1.0$. Visi teorētiskā modeļa rezultāti ir iegūti, pieņemot perfekti asu sākotnējo robežvirsmu starp šķidrumiem pirms magnētiskā lauka ieslēgšanas. Tomēr eksperimentāli nav iespējams iegūt perfekti asu sākotnē-

jo robežvirsmu. Pētījums līdzīgā magnētiskās mikrokonvekcijas sistēmā [33] analītiski parāda, ka nestabilitāti raksturojošais viļņu skaitlis k pieaug, palielinot sākotnējo izmērēšanos starp šķidrumiem. Eksperimenti, kas veikti ar magnētisko šķidrumu KTF11-1, apstiprināja, ka λ palielinās, ja palielinās δ_0 . Citiem magnētiskajiem šķidrumiem datu izkliede bija pārāk liela šādam secinājumam.



Att. 3.3: Bezdimensionālā δ_{MC} attīstība. Līknes attēlo A. Tatuļčenkova veidotā skaitliskā modeļa rezultātus, izmantojot Ra_m/Ra_{mc} . Datu punkti attēlo eksperimentālos rezultātus, izmantojot $(H/H_c)^2$.

Interesantu mikrokonvektīvās sajaukšanās δ_{MC} attīstību var novērot, ja magnētisko Releja skaitli Ra_m izdala ar tā kritisko vērtību $Ra_{m,c}$ skaitliskajam modelim, savukārt magnētisko lauku H izdala ar H_c eksperimentiem kā parādīts 3.3 attēlā. Šī funkcija sakrīt visām apskatītajām Ra_g vērtībām. Tā kā $Ra_{m,c}$ ir proporcionāls H_c^2 , eksperimentālo rezultātu attiecība H/H_c ir

kāpināta kvadrātā. Eksperimentālie rezultāti sakārtojas ap skaitliskā modeļa rezultātiem. Grafikā izmantota vienota krāsa, lai aprakstītu rezultātus ar to pašu magnētisko šķidrumu. Grafika vertikālā ass atbilst bezdimensionālajam δ_{MC} , bet horizontālā ass apraksta attiecības Ra_m/Ra_{mc} skaitliskajam modelim un $(H/H_c)^2$ eksperimentālajiem rezultātiem, un abas šīs ass savstarpēji sakrīt. Var spriest, ka magnētiskā lauka un Ra_m kritiskās vērtības ietver būtisku informāciju par gravitācijas ietekmi uz mikrokonvekcijas attīstību. Tāpēc izdalot rezultātus ar šīm vērtībām gravitācijas ietekme uz δ_{MC} grafiski pazūd.

3.2 Magnētiskā mikrokonvekcija vertikālā magnētiskajā laukā

Šī promocijas darba eksperimentālie rezultāti, kas apskatīti §2.4 salīdzināti ar literatūru [17, 37].

Pētījumā, kas aprakstīts [37] magnētiskā mikrokonvekcija pētīta horizontālā li novietotā mikrofluidikas čipā, kur ārējais magnētiskais lauks ir vertikāls un perpendikulārs mikrofluidikas čipam. Eksperimentāli tika novērota gaudaina struktūra, ko izraisīja normālā lauka nestabilitāte, jo blīvākais magnētiskais šķidrums slīdēja zem ūdens. Rakstā izpētīts teorētiskais modelis normāla lauka nestabilitātes gadījumam starp sajaukties spējīgiem šķidrumiem bezgalīga vertikālā virziena gadījumam. Viļņu skaitļa raksturīgais izmērs izteikts, izmantojot $(\Delta\rho/(D\eta))^{1/3}$, kur D is a diffusion coefficient, ir difūzijas koeficients, $\Delta\rho$ ir blīvumu starpība šķidrumiem, η ir šķidrumu viskozitāte un g ir brīvās krišanas paātrinājums. Raksturīgais bezdimensionālais viļņa skaitlis novērtēts kā $k = (3/32)^{1/3}$. Izmantojot šīs sakarības, viļņa garuma vērtības λ^* atbilstoši [37] aprakstītajai teorijai tiek salīdzinātas ar eksperimentālajām vērtībām λ , kas iegūtas šī darba ietvaros 3.1 tabulā. Jāpiebilst, ka [37] teorija tika veikta bezgalīgam slānim, savukārt šajā darbā eksperimentālā sistēma ir ierobežota. Eksperimentālās λ vērtības ir aptuveni divas reizes lielākas nekā teorētiski aprēķinātās. Tomēr eksperimentāli šeit tika saskaitīti primārie spilgtie pirksti, kā paskaidrots promocijas darba pilnajā tekstā. Ja sekundārie šaurie pirksti tiktu iekļauti izteiksmē, λ eksperimentālās vērtības būtu vēl tuvākas teorētiski aprēķinātajai λ^* .

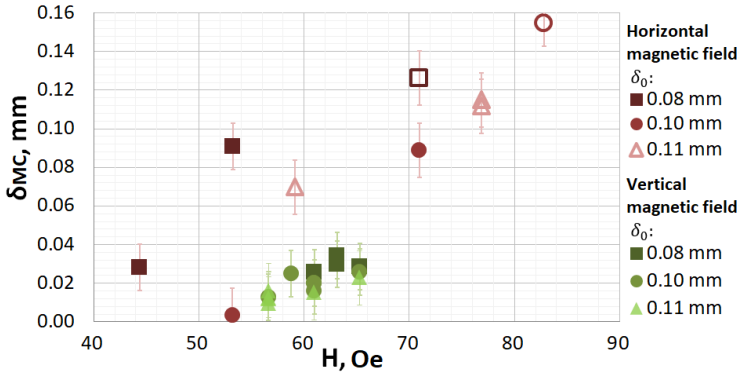
	$h_1 = 0.135$ mm		$h_1 = 0.257$ mm				
	D107 _{100%}	FF21-5	D107 _{100%}	KTF11-1 _{100%}	FF09-9 _{100%}	FF09-9 _{66%}	FF09-9 _{50%}
λ , mm	0.09	0.10	0.08	0.11	0.10	0.14	0.12
λ^* , mm	0.05	0.02	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06

Tabula 3.1: Viļņu garuma salīdzinājums nestabilitātei vertikālā magnētiskā laukā. λ eksperimentāli šajā darbā, λ^* aprēķināts izmantojot teoriju no [37].

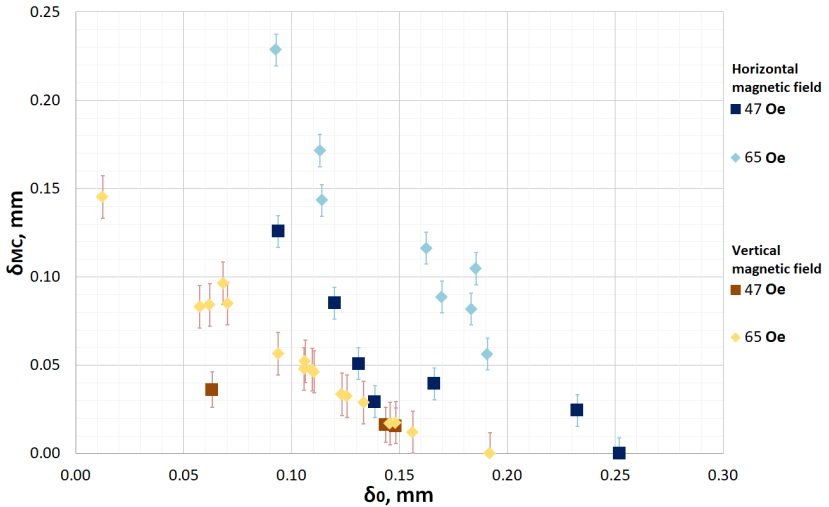
Pētījums [17] pēta magnētisko nestabilitāti vertikālā magnētiskā laukā, kur līdzīgi kā šī promocijas darba izpētē tika atklāts, ka pēc primāro pirkstu izveidošanās starp tiem parādās mazāki sekundārie pirksti. Pirkstu vizuāla šķelšanās var parādīties, ja pirksti veidojas vairākās rindās, kā tas ir izskaidrots šā promocijas darba pilnajā tekstā. Pirkstu veidošanās vairākās rindās nav aplūkota kā iespējama ieskaidrojums pētījumā [17]. Tomēr šāda iespēja šķiet ticama raksturīgā $\lambda \approx 0.1$ mm lieluma dēļ, jo izmantoti mikrofluidikas kanāli ar biezumiem $h_1 = 0.135$ mm un $h_2 = 0,257$ mm. [17] pētījums parādīja, ka nestabilitātes viļņa garums samazinās, palielinoties magnētiskajam laukam un magnētiskajam Releja skaitlim Ra_m . Kaut arī viļņa garuma noteikšana šajā promocijas darbā bija apgrūtināta, kvalitatīvi šāda sakarība šeit netika novērota.

Pētījumā [17] aplūkots skaitliskais modelis atklāja, ka, palielinoties sākotnēji samaisītas robežvirsmas platumam, nestabilitātes viļņa garums palielinās gandrīz lineāri. Līdz ar to pētījumā tika secināts, ka pētāmā nestabilitāte atšķiras no Rozensveiga normālā lauka nestabilitātes, jo tad nestabilitātes viļņa garumam vajadzētu samazināties. Tomēr šī promocijas darba pētījuma rezultāti liecina, ka nestabilitāti raksturojošo λ neietekmē δ_0 vērtības variēšana.

Salīdzinot šī promocijas darba eksperimentālos rezultātus, apstiprinājās pirmā ievadā izvirzītā hipotēze. Lielāku sajaukšanos magnētiskās mikrokonvekcijas dēļ var panākt horizontālā magnētiskajā laukā nekā vertikālajā, kā redzams attēlos 3.4 un 3.5. Viens no faktoriem, kas varētu veicināt lielāku sajaukšanos horizontālā magnētiskajā laukā, ir tas, ka pirkstiem horizontālā magnētiskajā laukā ir aktīvāks raksturs.



Att. 3.4: Magnētiskās mikrokonvekcijas δ_{MC} salīdzinājums horizontālā un vertikālā magnētiskā laukā H dažādiem δ_0 . Mikrofluīdikas kanāla biezums: $h_1 = 0,135$ mm, magnētiskais šķidrums: KTF11-1_{100%}. Tukšie simboli atbilst datiem ar "pielīdzinājuma metodi".



Att. 3.5: δ_{MC} atkarībā no δ_0 dažādos magnētiskajos laukos. Mikrofluīdikas kanāla biezums: $h_1 = 0.135$ mm, magnētiskais šķidrums: FF09-9_{100%}.

Attēlā 3.4 ir izpētīta mikrokonvektīvā sajaukšana δ_{MC} atkarībā no magnētiskā lauka H vērtības. To pašu δ_0 attēlo vienādas formas simbols. Simbolu

krāsa kļūst gaišāka, palielinoties δ_0 vērtībai. Eksperimenti, kas veikti horizontālā magnētiskajā laukā, ir attēloti ar sarkaniem simboliem, savukārt zaļie simboli attēlo eksperimentus, kas tiek veikti vertikālā magnētiskajā laukā. Ātrums, ar kādu δ_{MC} palielinās, palielinoties magnētiskā lauka vērtībai, ir vienāds abos magnētiskā lauka virzienos. Mazākas δ_{MC} atšķirības starp diviem pētītajiem magnētiskā lauka virzieniem tika novērotas biežākā mikrokanālā ($h_2 = 0.257$ mm).

3.5 attēlā izpētīta δ_{MC} atkarība no δ_0 abos magnētiskā lauka virzienos. Rezultāti ir sagrupēti pēc ārējā magnētiskā lauka vērtības. To pašu magnētiskā lauka vērtību attēlo tas pats simbols. Simbolu krāsa kļūst gaišāka, palielinoties H vērtībai. Eksperimenti horizontālā magnētiskajā laukā ir attēloti ar ziliem simboliem, savukārt oranžie simboli raksturo eksperimentus vertikālā magnētiskajā laukā.

Secinājumi

Šeit secinājumi, kas iegūti no šī promocijas darba eksperimentālajiem rezultātiem kopā ar atbilstošajiem teorētiskajiem apreķiniem un skaitliskajiem modeļiem ir sakārtoti četrās grupās atbilstoši četrām galvenajām eksperimentālajām darba sadaļām: §2.1, §2.2, §2.3 un §2.4. Visas trīs šī darba sākumā izvirzītās hipotēzes ir kvalitatīvi apstiprinātas. Iegūtie rezultāti apstiprina šādu **tēzi**:

- Ar magnētisko mikrokonvekciju iespējams efektīvi samaisīt šķidrumus mikrofluīdīkā īsā laikā, bet šīs maisīšanās zonu ierobežo dažādu eksperimentālu parametru mijiedarbība.

Plūstoši šķidrumi Y-formas mikrofluīdikas kanālā.

- Gravitācijas efekti var būt svarīgi pat mikroskopiskām sistēmām ar nelielām blīvuma atšķirībām.
- Gravitācija un šķidruma plūsma stabilizē magnētiskās mikrokonvekcijas pirkstveida nestabilitāti vertikālā mikrofluīdikas čipā: pirkstu maksimālais augstums samazinās, palielinoties šķidrumu plūsmas ātrumam; lielākas kritiskā magnētiskā Releja skaitļa Ra_m vērtības ir nepieciešamas, lai izraisītu nestabilitāti pie lielākām gravitācijas Releja skaitļa Ra_g vērtībām.
- Kritiskā magnētiskā lauka un raksturīgā nestabilitātes lieluma eksperimentālie rezultāti labi sakrīt ar magnētiskās mikrokonvekcijas teorētisko modeli, kas balstīts uz Brinkmana vienādojumu.

Sākotnēji neplūstoši šķidrumi

- Nevēlamu konvektīvo kustību, kas rodas horizontālā magnētiskā laukā Y-formas mikrofluīdikas kanālos, var mazināt, mainot mikrofluīdikas kanāla ģeometrisko formu.
- Gravitācija ierobežo mikrokonvekciju, ierobežojot sajaukšanās platumu mikrokonvekcijas dēļ δ_{MC} : eksperimentu, skaitlisko modeļu un lineārās stabilitātes rezultāti sakrīt.

- Kritiskā magnētiskā lauka H_c un kritiskā magnētiskā Releja skaitļa $Ra_{m,c}$ vērtības ietver informāciju par gravitācijas ietekmi uz magnētisko mikrokonvekciju.

Sākotnēji izsmērēta robežvirsmas starp šķidrumiem

- Magnētisko mikrokonvektīvo maisīšanos ierobežo sākotnēji izsmērēta robežvirsmas: eksperimentālie un skaitlisko modeļu rezultāti sakrīt.
- Sākotnēji izsmērēta robežvirsmas ierobežo dažādu mikrokonvektīvo pirkstu formu attīstību.
- Sākotnēji izsmērēta robežvirsmas ietekmē nestabilitātes raksturīgos izmērus.
- Nestabilitātes raksturīgo viļņa garumu ietekmē mikrofluidikas kanāla biezums: biezākos mikrokanālos viļņa garums palielinās.
- Kopējo maisīšanās platumu, kas sastāv no mikrokonvektīvās un difūzās maisīšanās, var sasniegt ar specifisku ārējā magnētiskā lauka vērtību, kura nav atkarīga no sākotnēji izsmērētas robežvirsmas platumas starp šķidrumiem horizontālā magnētiskā laukā.
- Pastāv atbilstība starp magnētiskā lauka vērtību, lai izveidotu noteiktu mikrokonvektīvās maisīšanās platumu un kritisko magnētisko lauku, kurš atbilst konkrētam sākotnēji izsmērētas robežvirsmas platumam—vienādam ar vēlamo mikrokonvektīvās maisīšanās platumu ar sākotnēji asu robežvirsmu.
- Ar vairākām eksperimentālām metodēm iegūtās kritiskās magnētiskā lauka vērtības sakrīt gan savā starpā, gan ar skaitliskā modeļa rezultātiem.

Nestabilitāte vertikālā magnētiskajā laukā

- Nestabilitāte parādās vienlaikus, neatkarīgi no ārējā magnētiskā lauka stipruma, kas ir lielāks par kritisko magnētisko lauku.
- Nestabilitāti ierobežo gravitācija: vienāds Ra_m pieaugums rada lielāku mikrokonvektīvās maisīšanās pieaugumu plānākā mikrofluidikas kanālā, kuru raksturo mazāks Ra_g .

- Lielāku maisīšanos magnētiskās mikrokonvekcijas dēļ ar tādu pašu magnētiskā lauka intensitāti var panākt horizontālā magnētiskajā laukā nekā vertikālā magnētiskā laukā.
- Šeit izmantotajā eksperimentālajā sistēmā nestabilitātes raksturīgo viļņa garumu neietekmē sākotnēji izsmērēta robežvirsmas starp šķidrumiem.
- Nestabilitātes pirksti eksperimenta laikā vizuāli sadalās un bīdās veidā, ka tas liek domāt, ka pirksti veidojas vairākās rindās.

Bibliogrāfija

- [1] R. E. Rosensweig, *Ferrohydrodynamics*, Dover Publications, **2018**.
- [2] E. Blums, A. Cēbers, M. M. Maiorov, *Magnetic Fluids*, De Gruyter, **1997**.
- [3] O. Petrichenko, dokt. grāda disert., University of Latvia, **2014**.
- [4] R. Massart, *IEEE Transactions on Magnetics* **1981**, *17*, 1247—1248.
- [5] J.-C. Bacri, R. Perzynski, D. Salin, *Endeavour* **1988**, *12*, 76—83.
- [6] W. Yang, Y. Zhang, X. Yang, C. Sun, Y. Chen, *Journal of Nanoparticle Research* **2022**, *24*.
- [7] R. Bailey, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **1983**, *39*, 178—182.
- [8] J. Philip, *Advances in Colloid and Interface Science* **2023**, *311*.
- [9] M. Akimoto, Y. Morimoto, *Journal of Pharmacobio-Dynamics* **1982**, *5*, S—15.
- [10] R. S. Newbower, *IEEE Transactions on Magnetics* **1973**, *9*, 447—450.
- [11] V. F. M. B. M. Berkovsky, M. S. Krakov, **1993**, *337*, 243.
- [12] Q. A. Pankhurst, J. Connolly, S. K. Jones, J. Dobson, *Journal of Physics D: Applied Physics* **2003**, *36*, R167.
- [13] J. P. Bullivant, S. Zhao, B. J. Willenberg, B. Kozissnik, C. D. Batich, J. Dobson, *International Journal of Molecular Sciences* **2013**, *14*, 17501—17510.
- [14] M. Maiorov, A. Cēbers, *Magnetohydrodynamics* **1980**, *16*, 21—27.
- [15] C. Flament, G. Pacitto, J.-C. Bacri, I. Drikis, A. Cēbers, *Physics of Fluids* **1998**, *10*, 2464—2472.

- [16] I. M. Coutinho, J. A. Miranda, *Physics of Fluids* **2020**, 32.
- [17] M. S. Krakov, A. R. Zakinyan, A. A. Zakinyan, *Journal of Fluid Mechanics* **2021**, 913.
- [18] T. T. Al-Housseiny, P. A. Tsai, H. A. Stone, *Nature Physics* **2012**, 8, 747—750.
- [19] E. O. Dias, J. A. Miranda, *Physical Review E - Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics* **2013**, 87.
- [20] I. Bischofberger, R. Ramachandran, S. R. Nagel, *Soft Matter* **2015**, 11, 7428—7432.
- [21] L. Dos Reis, J. A. Miranda, *Physical Review E - Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics* **2011**, 84.
- [22] S. Jackson, H. Power, D. Giddings, D. Stevens, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **2017**, 320, 606—632.
- [23] G. Kitenbergs, A. Tatuļčenkova, L. Puķina, A. Cēbers, *The European Physical Journal E* **2018**, 41, 138.
- [24] I. Bischofberger, R. Ramachandran, S. R. Nagel, *Nature Communications* **2014**, 5.
- [25] B. An, D. Solorzano, Q. Yuan, *Energies* **2022**, 15.
- [26] J. S. Hong, M. C. Kim, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **2023**, 201.
- [27] T. E. Videbæk, S. R. Nagel, *Physical Review Fluids* **2019**, 4, 033902.
- [28] M. Maiorov, A. Cēbers, *Magnetohydrodynamics* **1983**, 19, 376—380.
- [29] C.-Y. Wen, C.-Y. Chen, D.-C. Kuan, S.-Y. Wu, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **2007**, 310, Proceedings of the 17th International Conference on Magnetism, e1017—e1019.
- [30] C.-Y. Wen, C.-Y. Chen, D.-C. Kuan, *Physics of Fluids - PHYS FLUIDS* **2007**, 19.

- [31] C.-Y. Chen, *Physics of Fluids* **2003**, *15*, 1086—1089.
- [32] M. Igonin, A. Cebers, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **2002**, *252*, 293—295.
- [33] M. Igonin, A. Cebers, *Physics of Fluids* **2003**, *15*, 1734—1744.
- [34] M. Igonin, dokt. grāda disert., Universite Paris 7 - Denis Diderot, **2004**.
- [35] C. Derec, P. Boltenhagen, S. Neveu, J.-C. Bacri, *Magnetohydrodynamics* **2008**, 135—142.
- [36] G. Kitenbergs, dokt. grāda disert., University of Pierre un Marie Curie, University of Latvia, **2015**.
- [37] K. Erglis, A. Tatulcenkov, G. Kitenbergs, O. Petrichenko, F. Ergin, B. Watz, A. Cebers, *Journal of Fluid Mechanics* **2013**, *714*, 612—633.
- [38] G. Kitenbergs, A. Tatulcenkovs, K. Erglis, O. Petrichenko, R. Perzynski, A. Cebers, *Journal of Fluid Mechanics* **2015**, *774*, 170—191.
- [39] G. Kitenbergs, K. Ērglis, R. Perzynski, A. Cēbers, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **2015**, *380*, 227—230.
- [40] G.-R. F. José, *Complex fluid-flows in microfluidics*, Springer, **2018**.
- [41] G. Kitenbergs, A. Cēbers, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **2020**, *498*, 166247.
- [42] C. Flament, S. Lacis, J.-C. Bacri, A. Cebers, S. Neveu, R. Perzynski, *Physical Review E - Statistical Physics Plasmas Fluids and Related Interdisciplinary Topics* **1996**, *53*, 4801—4806.
- [43] A. Engel, H. Langer, V. Chetverikov, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **1999**, *195*, 212—219.
- [44] S. A. Lira, J. A. Miranda, *Physical Review E - Statistical Nonlinear and Soft Matter Physics* **2011**, *84*.

- [45] A. Cebers, *Magneto hydrodynamics* **1997**, *33*, 48—55.
- [46] E. L. Cussler, *Cambridge Series in Chemical Engineering: Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems*, 3. izdev., Cambridge University Press, **2009**.
- [47] A. Einstein, *Investigations on the theory of the Brownian movement*, Dover Publications, Mineola, NY, **1956**.
- [48] P. A. Hassan, S. Rana, G. Verma, *Langmuir* **2015**, *31*, 3—12.
- [49] J.-C. Bacri, R. Perzynski, D. Salin, V. Cabuil, R. Massart, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **1986**, *62*, 36—46.
- [50] B. S. Bokstein, M. I. Mendeleev, D. J. Srolovitz, *Thermodynamics and kinetics in materials science*, Oxford University Press, **2005**.
- [51] S. Grebenyuk, A. R. Abdel Fattah, M. Kumar, B. Toprakhisar, G. Rustandi, A. Vananroye, I. Salmon, C. Verfaillie, M. Grillo, A. Ranga, *Nature Communications* **2023**, *14*.
- [52] C. Hou, Y. Gu, W. Yuan, W. Zhang, X. Xiu, J. Lin, Y. Gao, P. Liu, X. Chen, L. Song, *Materials Today Bio* **2023**, *19*.
- [53] P. Lakhera, V. Chaudhary, B. Bhardwaj, P. Kumar, S. Kumar, *Biosensors and Bioelectronics: X* **2022**, *11*.
- [54] C. D. Chin, V. Linder, S. K. Sia, *Lab on a Chip* **2007**, *7*, 41—57.
- [55] X. Zhang, Y. Zhang, W. Guo, S. Jiao, X. Liu, *Chemosensors* **2023**, *11*.
- [56] D. S. Dkhar, R. Kumari, S. J. Malode, N. P. Shetti, P. Chandra, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* **2023**, *223*.
- [57] G. M. Whitesides, *Nature* **2006**, *442*, 368—373.
- [58] T. M. Squires, S. R. Quake, *Reviews of Modern Physics* **2005**, *77*, 977—1026.
- [59] N.-T. Nguyen, Z. Wu, *Journal of Micromechanics and Microengineering* **01.2005.**, *15*, 1.

- [60] W. Raza, S. Hossain, K.-Y. Kim, *Micromachines* **2020**, *11*.
- [61] X. Chen, L. Zhang, *Microchim Acta* **2017**, *184*, 3639—3649.
- [62] I. M. Coutinho, J. A. Miranda, *Physical Review Fluids* **2020**, *5*.
- [63] Y. Z. Sinzato, F. R. Cunha, *Applied Mathematical Modelling* **2019**, *75*, 572—588.
- [64] T. G. Mayerhöfer, S. Pahlow, J. Popp, *Chemphyschem : a European journal of chemical physics and physical chemistry* **2020**, *21*, 2029—2046.
- [65] B. C. Smith, *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy, second edition*, 2. izdev., CRC Press, **2009**.
- [66] L. Puķina-Slava, A. Tatuļčenkovs, A. Cēbers, G. . Kitenbergs, *arXiv:2310.15323* **2023**.