



**LATVIJAS  
UNIVERSITĀTE**

**Promocijas darba  
kopsavilkums**

---

**Mihails Birjukovs**

**BURBUĻU UN DAĻIŅU  
PLŪSMAS ŠĶIDRĀ METĀLĀ  
UN SAKAUSĒJUMU  
SACIETĒŠANAS IZPĒTE,  
IZMANTOJOT JAUNAS ATTĒLU UN  
DATU ANALĪZES METODES**

Rīga 2023



# LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE  
FIZIKAS NODAĻA

**Mihails Birjukovs**

## **BURBUĻU UN DAĻIŅU PLŪSMAS ŠĶIDRĀ METĀLĀ UN ŠAKAUSĒJUMU SACIETĒŠANAS IZPĒTE, IZMANTOJOT JAUNAS ATTĒLU UN DATU ANALĪZES METODES**

PROMOCIJAS DARBA KOPSAVILKUMS

Doktora grāda fizikā iegūšanai  
Specializācija: šķidrums un gāzu mehānika

Rīga 2023

Šis promocijas darbs tika izstrādāts no 2019. līdz 2023. gadam Latvijas Universitātes (LU) fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātes fizikas nodaļas Skaitliskās Modelēšanas Institutā (SMI), ar Paul Scherrer Institut (PSI, Šveice) un Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR, Vācija) atbalstu.

Promocijas darbs tika finansēts no ERAF projekta "Skaitliskās modelēšanas pieeju izstrāde kompleksu multifizikālu mijiedarbības procesu izpētei elektromagnētiskajās šķidrā metāla tehnoloģijās" (No. 1.1.1.1/18/A/108), DAAD īstermiņa granta (2021, 57552336) un ANR-DFG projekta FLOTINC (ANR-15-CE08-0040, EC 217/3), kā arī no PSI, HZDR un LU līdzekļiem. Pēdējā darba izstrādes gadā papildus finansējums tika nodrošināts no projekta "LU doktorantūras kapacitātes stiprināšana jaunā doktorantūras modeļa ietvarā" (Nr. 8.2.2.0/20/I/006).

Šajā promocijas darba kopsavilkumā ir ievads, 7 nodaļas, secinājumi un literatūras saraksts. Darba formāts: rakstu krājums, kas publicēts fizikas jomā, specializējoties šķidrums un gāzu mehānikā.

Darba vadītājs: *Dr. phys.*, vadošais pētnieks **Andris Jakovičs**

Recenzenti:

1. *Dr. phys.* Tianshu Liu
2. *Dr. phys.* Robert Zboray
3. *Dr. phys.* Guntars Kitenbergs

Promocijas darbs tiks aizstāvēts Latvijas Universitātes fizikas, astronomijas un mehānikas promocijas padomes atklātā sēdē, plkst. 15:00, 29. septembrī, 2023., Jelgavas ielā 3, Rīgā. Ar promocijas darbu var iepazīties Latvijas Universitātes bibliotēkā, Raiņa bulvārī 19.

Promocijas padomes priekšsēdētājs

---

Promocijas padomes sekretārs

---

© Latvijas Universitāte, 2023

© Mihails Birjukovs, 2023

ISBN 978-9934-36-069-5

ISBN 978-9934-36-070-1 (PDF)

## Contents

I. Ievads	7
A. Promocijas darba aktualitāte	7
B. Problēmas un izaicinājumi	8
1. Burbuļu plūsmas šķidrā metālā	8
2. Šķidrā metāla plūsmas ar daļiņām	11
3. Skaitlisko simulāciju analīze	13
4. Metāla sakausējumu sacietēšana	15
C. Mērķi un uzdevumi	18
D. Prezentētā pētījuma novitāte	19
E. Tēzes	21
F. Metodoloģija	22
G. Autora ieguldījums	23
H. Rezultātu prezentēšana	24
1. Publikācijas saistītas ar promocijas darbu	24
2. Konferences, kurās piedalījās darba autors	25
II. Promocijas darba izklāsts	26
A. Burbuļu ķēdes plūsmas neitronu radiogrāfija šķidrā metālā	26
1. Pirmā eksperimentu kārta	26
2. Otrā eksperimentu kārta	34
3. Kopsavilkums	52
B. Burbuļu ķēdes plūsmas rentgenstaru radiogrāfija šķidrā metālā	54
1. Attēlu iegūšana & īpašības	54
2. Attēlu apstrāde	55
3. Burbuļu formas analīze	57
4. Kopsavilkums	61
C. Burbuļu trajektoriju rekonstrukcija	62
1. MHT-X jēdziens	62
2. Algoritms	62
3. Galvenie rezultāti	68
4. Kopsavilkums	78
D. Neitronu radiogrāfija daļiņu plūsmai šķidrā metālā	79
1. Neitronu radiogrāfija	79
2. Attēlu apstrāde	80
E. Daļiņu trajektoriju rekonstrukcija	85
1. MHT-X modifikācijas	85
2. Provizorisks rezultāti	86
3. Papildus paplašinājumi MHT-X	91

4. Turpmākie rezultāti	96
5. Kopsavilkums	109
F. Burbuļu ķēdes plūsmas sadalīšana dinamiskās modās	110
1. Modelēta fizikālā sistēma	110
2. Jaunais SDM algoritms	111
3. Galvenie rezultāti	117
4. Kopsavilkums	151
G. Metāla sakausējuma virzītas sacietēšanas rentgenstaru radiogrāfija	153
1. Attēlu raksturojums	153
2. Metodoloģija	155
3. Galvenie rezultāti	169
4. Kopsavilkums	183
III. Secinājumi & perspektīvas	184
References	188

## Terminoloģija un saīsinājumi

ML - magnētiskais lauks  
UDV - ultraskaņas Doplera velocimetrija  
MHD - magnetohidrodinamika  
Ga - galijs  
GaInSn - galinstāns  
BIPT (CIFT) - bezkontakta induktīvā plūsmas tomogrāfija  
UTLM - ultraskaņas transmisijas laika metode  
RR - rentgenstaru radiogrāfija  
RDT (XCT) - rentgenstaru datortomogrāfija  
NR - neitronu radiogrāfija  
STA - signāla-troksņa attiecība  
KS - kadri sekundē  
KTA - kontrasta-troksņa attiecība  
PEDI - pozitronu emisijas daļiņu izsekošana  
ADV - attēlos balstīta daļiņu velocimetrija  
VHI (MHT) - vairāku hipotēžu izsekošana  
DFT - diskrētā Furjē transformācija  
SOK - sadalīšana ortogonālās komponentēs  
PKA - principālo komponentu analīze  
SDM - sadalījums dinamiskajās modās  
SCTMM - soft color tone map masking  
MRIF - multiscale recursive interrogation filter  
SVPL - uz spilgtumu balstīta viltus pozitīvu likvidēšana  
NVM - nelokālās vidējošanas maskēšana  
SSV (SVD) - sadalīšana singularārās vērtības  
MPI - message passing interface  
Ar - argons  
HML - horizontālais magnētiskais lauks  
FOV - redzes lauks  
SGS - subgrid scale model, zemrežģa mēroga modelis  
LES - large eddy simulation, lielo virpuļu simulācijas  
SST - shear stress transport, bīdes sprieguma transports  
VOF - volume of fluid method, šķidrums tilpuma metode  
SSCF - self-snakes liekuma plūsma  
SNIP - statistics-sensitive non-linear iterative peak-clipping, statistikas jutīga nelineāra iteratīva maksimumu apgriešana  
CFD - computational fluid dynamics, skaitliskā hidrodinamika  
TF - šķērseniskais lauks  
LF - gareniskais lauks  
*Re* - Reinoldsa skaitlis

*Eo* - Eotvosa skaidlis  
*Fr* - Frūda skaitlis  
*N* - Stjuarta skaitlis  
VML - vertikālais magnētiskais lauks  
TSK - tumšās strāvas korekcija  
PLK - plakanā lauka korekcija  
CTM - color tone mapping  
AL - aptaujas logs  
PM - Perona-Malik  
TV - total variation  
NV - nelokālā vidējošana  
LA - lokāli adaptīvs(-a)  
RDP - Ramer-Douglas-Peucker  
BVL - burbuļa viduslīnija  
IS - ietekmes sfēra  
DIV - daļiņu izsekošanas velocimetrija  
*Stk* - Stoksa skaitlis  
*Sr* - Strouhala skaitlis  
VBF - varbūtības blīvuma funkcijas  
BDI - bezdiverģences interpolācija  
RBF - radiālās bāzes funkcijas  
RN - robežnosacījums  
LIC - līnijas integrāļu konvolūcija  
RMS - vidējais kvadrātiskais  
SF - solidifikācijas fronte  
SZ - šķidrums zona  
CZ - cietā zona  
BM3D - block-matching 3D  
VIS - vidējais inversais spilgtums  
DSG - dendritu sadalīšana graudos

## I. Ievads

### A. Promocijas darba aktualitāte

Daudzfāzu plūsmai ārējā magnētiskā lauka (ML) klātbūtnē ir liela fundamentāla un praktiska nozīme. Burbuļu plūsmā šķidrā metālā ir sastopama rūpnieciskos procesos, piemēram, šķidrā metāla maisīšanā, nepārtrauktā liešanā, ķīmiskajos reaktoros utt., kur tā tiek vai principā var tikt kontrolēta ar ML [1–4]. Tomēr ir nepieciešama dziļa izpratne par daudzfāzu plūsmām metālu kausējumos, lai varētu kontrolēt un optimizēt šos procesus un izvairīties no nevēlamam plūsmas nestabilitātēm. Šķidrā metāla daudzfāzu plūsmā ir plaši pētīta, izmantojot ultraskaņas Doplera velocimetrijas metodi (UDV) [5–8], ultraskaņas tranzīta laika metodi (UTLM, angl. UTTT) [9, 10], rentgenstaru radiogrāfiju [10] un skaitliskās simulācijas [11–22], un daudzas tās īpašības un mehānismi pašlaik ir pietiekami skaidri [23–28]. Problēma ir tāda, ka daudzi efekti, kas saistīti ar burbuļu kolektīvo dinamiku, vēl nav adekvāti izprasti vai vispār nav pētīti [29–32]. Tas ir svarīgi, jo efektīvu burbuļu plūsmas modeļu (Eulera-Eulera un Lagranža) un iepriekš minēto rūpniecisko procesu uzlabošana nav iespējama bez skaidrības par to, kā burbuļi mijiedarbojas magnetohidrodinamiskajā (MHD) plūsmā (vai pat bez ML) [33–36].

Burbuļu mijiedarbība ar daļiņām ir svarīga metāla attīrīšanā [37–41] un putu flotācijā [42–44], jo šajos procesos tiek ievadīti gāzes burbuļi, lai no kausējuma noņemtu piemaisījumus, kas rodas cietu daļiņu veidā. Attīrīšana galvenokārt tiek veikta, izmantojot divus mehānismus: pirmkārt, burbuļi, ceļoties augšup, rada turbulentu plūsmu, kas izraisa daļiņu aglomerāciju, palielinot efektīvo daļiņu izmēru un uzlabojot atdalīšanos blīvuma atšķirību dēļ; otrkārt, var notikt tiešas burbuļu-daļiņu sadursmes, pēdējās notverot burbuļu gāzes un šķidruma robežā, kas paceļas uz brīvo virsmu. Šādu burbuļu un daļiņu mijiedarbības izpēte ir ārkārtīgi svarīga. Burbuļu astes plūsmā (t.i., plūsmā, kas veidojas aiz burbuļa) ir tas, kas galvenokārt nosaka augšupejošo burbuļu trajektorijas, ja to savstarpējā mijiedarbība ir neievērojama [9, 23, 25, 27]. Ir arī pierādīts, ka brīvi kustīgas daļiņas ir iesprostotas astes plūsmas reģionā, palielinot to lokālo koncentrāciju, un sadursmes un aglomerācijas varbūtību [19–22].

Sacietēšana ir daudzu rūpniecisku lietojumu centrālais aspekts, jo īpaši metalurģijā, piem. niķeļa supersakausējumu, vieglo alumīnija un magnija sakausējumu ražošanā utt. [45–47]. Labi zināma un izplatīta problēma ir defektu veidošanās risks šo procesu laikā. Izšķīdušo vielu segregācija rodas mikromērogā, bet izplatās un parādās makro mērogā (makrosegregācija), izraisot nevienmērīgu starpmetālu fāžu sadalījumu rūpnieciskajos sakausējumos [48]. Turklāt sakausējumu sacietēšanas laikā to komponentu



sadalīšana noved pie izšķīdušās vielas robežslāņa veidošanās šķidrums un cietās robežas tuvumā. Gadījumos, kad izšķīdušās vielas blīvums var būt vieglāks nekā pamata šķidrums blīvums, peldspējas spēki robežslānī, kas vērsti atpakaļ uz šķidrums zonu, izraisa izšķīdušās vielas strūklu veidošanos, kas izplūst no cietā un šķidrums robežas reģiona. Noteiktos apstākļos izplūstošā viela var veidot stabilus kanālus, ko sauc par *skursteņiem* (angl. *chimneys*).

Pēc pilnīgas sacietēšanas tie paliek kā defekti lējumos, kas pazīstami kā *freckles* (angl.), kas būtībā ir anizotropu sakausējumu sastāva nevienādīgums kanālu veidā, kuru diametrs ir proporcionāls dažiem primāro dendrītu atstatumiem un garums var būt no milimetriem līdz centimetriem [46, 49–54].

Tāpēc ir vēlams kontrolēt sacietēšanu tā, lai nerastos defekti. Tomēr kontrolei ir nepieciešams saprast pamatā esošo fizika, un sacietēšanas procesi šķīdros metālu sakausējumos ir ļoti sarežģīti, ar daudziem iespējamiem dendrītu konfigurāciju veidošanās režīmiem atkarībā no sistēmas parametriem (piemēram, temperatūras gradienta, dzesēšanas ātruma, sakausējuma komponentu masas daļām) [45, 47, 55–57]. Pastāv daudzu fizisku mehānismu mijiedarbība dažādos garuma mērogos: dendrītu augšana, šķidrums un cietās vielas robežas nestabilitāte, dabiskā un forsēta (vispārīgā gadījumā, abi) šķidrums masas plūsma, vielu koncentrācijas pārnese, šķidrums plūsma caur sacietējušām dendrītu struktūrām un to pārkausēšana, globālā un lokālā temperatūras dinamika, utt. [47, 55, 58–62]. Viens no veidiem, kā kontrolēt šādas sarežģītas sistēmas, ir pielikt ML reģionā, kurā notiek sacietēšana, taču tad ir jāņem vērā papildu fizika, piemēram, šķidrums plūsmas slāpēšana vai paātrināšana Lorenca spēka dēļ, ņemot vērā tā termoelektrisko komponenti. Šis un citi faktori, ko ievieš ML, būtiski maina sacietējušās mikrostruktūras [46, 63–65].

## B. Problēmas un izaicinājumi

### 1. Burbuļu plūsma šķidrā metālā

Neskatoties uz interesi, šķīdro metālu sistēmas ir ļoti grūti neinvazīvi pētīt to necaurredzamības, augstās temperatūras un papildu sarežģītumu saistībā ar spēcīgu ML dēļ [5]. Līdz ar to, vizuālo datu par to, kā ML maina burbuļa formu un burbuļu kolektīvo dinamiku, ir maz, un eksperimenti ar daļiņu vizualizāciju šķīdros metālos ir vēl retāki. Problēmu ar augstām temperatūrām un lielu rūpnieciskās aparatūras apjomu var novērst, izmantojot mazāku daudzumu zemas kušanas temperatūras modeļa šķīdrums, piemēram, gallija (Ga), galinstāna (GaInSn) vai gallija alvas

(GaSn) sakausējumu ar nosacījumu, ka faktiskie sistēmas bezdimensionālie parametri ir pietiekami tuvu modeļa sistēmai [5]. Tomēr, lai no eksperimentiem iegūtu fizikālu informāciju, atbilstošām eksperimentālajām un datu apstrādes metodēm ir jāļauj izsekot burbuļiem un daļiņām, izšķirt to sadursmes, saplūšanu un/vai sadalīšanos. Burbuļu gadījumā ir nepieciešama arī to robežu un to dinamikas izšķiršana.

Attiecībā uz burbuļplūsmu pastāv vairākas ātruma mērījumu metodes ar dažādu uzticamību šķidro metālu sistēmām, piemēram, bezkontakta induktīvā plūsmas tomogrāfija (BIPT, angl. CIFT) [66, 67] un UDV [5, 6, 68], bet tās rāda tikai šķidra metāla ātruma lauku un vienkārši atklāj plūsmas traucējumus, no kuriem var konstatēt burbuļu klātbūtni. Ņemot vērā, ka optiskās metodes izmantot nevar šķidro metālu necaurredzamības dēļ redzamā gaismā, UTLM, rentgenstaru radiogrāfija (RR), rentgenstaru dattomogrāfija (RDT, angl. XCT/UXCT), un neitronu radiogrāfija (NR) ir galvenās no pieejamajām metodēm. UTLM ir ļoti ierobežota, jo tā nosaka tikai vispārējo burbuļa atrašanās vietu un raksturīgo izmēru metālā, un nesniedz informāciju par tā formu, kas nozīmē, ka virsmas traucējumi, ja tie nav izšķirti, var radīt kļūdas pozīcijas un ātruma novērtējumos [6–8, 10]. RR un RDT metodes ļauj tieši novērot burbuļu formas. Tomēr uz rentgenstaru balstītas metodes kopumā ļoti ierobežo relatīvi mazs šķidrā metāla biežums stara virzienā, jo šķidrie metāli izraisa intensīvu rentgenstaru vājināšanos [29, 30, 69–71]. Tajā pašā laikā, ja pētītā modeļa sistēma ir pārāk plāna, sienas efekti kļūst ļoti nozīmīgi un novērotā burbuļu plūsma daudz mazāk atspoguļo rūpnieciski nozīmīgos plūsmas apstākļus. RDT, lai gan piedāvā ļoti augstu laika izšķirtspēju un pietiekamu fāzes robežu noteikšanas precizitāti, ietver arī eksperimentālās sistēmas, kas ir diezgan jutīgas pret pielikto ML, padarot tās, dotajā brīdī, praktiski nepiemērojamas MHD burbuļu plūsmas pētījumiem [72–74].

No otras puses, NR, lai gan principā ir līdzīga RR, dažiem metāliem ļauj pētīt daudz biežākus paraugus, un tādējādi tā ir ļoti daudzsoļša eksperimentāla metode, kas ļautu plašāk aptvert dažādu šķidro metālu sistēmu parametru telpas [1, 75, 76]. Lai gan ir panākts ievērojams progress ārpus šķidrā metāla konteksta un bez ML [77–79], tikai daži panākumi, ar dažiem ievērojamiem izņēmumiem, ir sasniegti šķidro metālu sistēmām, izmantojot NR, un tā vēl netika izmantota, lai sistemātiski pētītu ML ietekmi uz burbuļu plūsmu [1, 75, 76, 80–83]. Tomēr jāatzīmē arī tas, ka galu galā spēja attēlot biežākas šķidro metālu sistēmas ir atkarīga no rentgenstaru un neitronu plūsmām, ko spēj radīt, tāpēc rūpnieciskas kvalitātes rentgenstaru lampas varētu izmantot tikpat labi, lai gan piemēri tam vēl nav atrodami literatūrā par šķidrajiem metāliem.

Pateicoties pavisam nesen veiktajiem centieniem un dinamisko RR un NR parādīšanos divfāzu šķidro metālu plūsmai [82–88], beidzot tiek nopietni

sākta fundamentāla burbuļu ķēdes sistēmu izpēte, kas atdarina rūpnieciski nozīmīgus plūsmas apstākļus [1, 11, 29, 30, 69–71, 84]. Burbuļu ķēdes plūsmā burbuļi tiek izlaisti šķidrā metāla sistēmā pa vienam ar vienādu laika aizkavi starp katru, ar noteiktu gāzes plūsmas ātrumu, un paceļas uz šķidrā metāla brīvo virsmu.

Šādas sistēmas parasti ir taisnstūrveida trauki, kas piepildīti ar galiju [1] vai eitektisko gallija-indija-alvas sakausējumu [29, 30, 69, 70, 84], kur burbuļi tiek ievadīti caur horizontālām vai vertikālām [1, 29, 30, 69, 70] sprauslām trauka apakšā vai augšpusē iegremdētām vertikālām [84] sprauslām. Burbuļu ķēžu plūsmas sistēmas ir nākamais loģiskais solis no viena burbuļa plūsmas pētījumiem, jo viena burbuļa plūsma, lai gan ļoti informatīva par burbuļa astes plūsmas dinamiku un raksturīgajām trajektorijām bez un ar ML, neatspoguļo faktiskos plūsmas apstākļus, kas raksturīgi iepriekš minētajiem rūpnieciskiem procesiem, kuros notiek burbuļu kolonnu un strūklu plūsmas ar lielu deformējamo burbuļu blīvumu [37, 41, 89, 90]. Burbuļu ķēdes joprojām ir pietiekami vienkāršas, lai varētu eksperimentēt ar kompaktām sistēmām [1, 69, 71] un ietver šķidrā metāla tilpumā pietiekami mazu burbuļu daudzumu, lai skaitliskās simulācijas būtu praktiski iespējamās [11, 71]. Tikmēr tie jau demonstrē kolektīvu dinamiku starp vadošajiem un atpaliekošajiem burbuļiem [11, 70, 71] un, atkarībā no sistēmas ģeometrijas un plūsmas ātruma, var rasties burbuļu aglomerācija, saplūšana un sadalīšanās breakup can occur [29, 30, 84].

Tāpēc šīs sistēmas ir būtisks etaps pārejā no viena burbuļa plūsmas izpētes uz daudz burbuļu sistēmu izmeklēšanu, kas ir ļoti tuvu to faktiskajiem rūpnieciskajiem līdziniekiem. Tomēr, neskatoties uz *relatīvo vienkāršību*, burbuļu ķēdes plūsmas dinamika šķidrā metālā bez vai ar ML joprojām ir ļoti sarežģīta. Atkarībā no gāzes plūsmas ātruma, burbuļi rada nestabilus un izstieptus astes plūsmas reģionus, kur periodiski notiek virpuļu atdalīšanās, un rodas turbulentas pulsācijas — atrautie virpuļi un vadošo burbuļu turbulentas astes plūsmas spēcīgi ietekmē aizmugurējos burbuļus, izraisot burbuļu pāru mijiedarbību/saistību gar to augšupejošo ķēdi [11, 71, 91–94]. Pastāv vairāku fizikālu mehānismu atgriezeniskā saites, kas ietver kombinētas burbuļu formas un burbuļu ķēdes traucējumus, apkārtējo šķidrā metāla plūsmu un metāla trauku augšdaļas brīvās virsmas ietekmi, kopā ar nestabilitāti un svārstībām burbuļu ķēdes formā [11, 71, 94].

Īsāk sakot, neskatoties uz nozīmīgumu, un neitronu un rentgenstaru radiogrāfijas laboratoriju un atbilstošas aparatūras pieejamību, burbuļu plūsma metālos vēl nav sistemātiski pētīta, izmantojot eksperimentus, t.i., burbuļu ķēdes sistēmām vēl nav izpētīta bezdimensionālo parametru telpa (tāda pastāv viena burbuļa plūsmai [11, 95]). Tas ir tāpēc, ka bez eksperimentālām grūtībām ir arī citi iemesli, kas kavē turpmāku izpēti.

Ir kļuvis pilnīgi skaidrs, ka ir nepieciešamas specializētas un diezgan

sarežģītas attēlu apstrādes metodes un rīki, lai iegūtu fizikāli nozīmīgus datus no datu kopām, kas iegūtas, izmantojot dinamisku neitronu un/vai rentgenstaru radiogrāfiju [1, 29, 30, 84]. Tas galvenokārt ir saistīts ar zemo signāla-trokšņa attiecību (STA), kas saistīta ar biezu ( $> 20\text{--}30\text{ mm}$ ) šķidrā metāla slāņa caurspīdēšanu ar kadru ātrumu  $\gtrsim 100$  kadri sekundē (KS), un nepieciešamību izšķirt daudzus bieži vien tuvus mijiedarbīgus objektus. Liels kadru izņemšanas ātrums ir prasība, lai varētu novērot ātrus burbuļus, plienus un daļiņas, kas plūst šķidrā metālā, un lai izvairītos no to formu izplūšanas kustības dēļ, t.i. novērst kustības artefaktus [1]. Pat ar plānākiem šķidrā metāla slāņiem rodas problēmas ar datu interpretāciju — ja burbuļu aglomerācija, sadalīšanās un saplūšana ir bieža, pareiza burbuļu mijiedarbības noteikšana un izšķiršana ir sarežģīta, jo tos atdala plānas šķidrā metāla plēves, kuras attēlos sabojā multiplikatīvais trokšnis, pie kam plēvēm ir arī gana zema kontrasta-trokšņa attiecība (KTA) [29, 30]. Tikmēr neitronu plūsmu, ko var izmantot eksperimentos, ierobežo gan izmantotais neitronu avots, gan modeļa šķidro metālu, piemēram, gallija, ātra aktivēšana. Turklāt, lai pētītu burbuļu kolektīvo dinamiku, ir nepieciešama ne tikai to izšķiršana, bet arī precīza izsekošana, kas ņem vērā burbuļu saplūšanu un sadalīšanu — pašlaik ļoti trūkst robustu metožu, kas to nodrošinātu. Tāpēc līdz šim pētnieki, kas pēta burbuļu plūsmu šķidrā metālā, ir bijuši spiesti galvenokārt paļauties uz skaitliskām simulācijām, kuras vairumā gadījumu nav pārbaudītas tiešā veidā.

## 2. Šķidrā metāla plūsma ar daļiņām

Kas attiecas uz daļiņu plūsmu šķidrā metālā, neskatoties uz ar to fiziku saistīto interesi, līdzīgi kā burbuļplūsmas gadījumā, ir ļoti maz eksperimentālu darbu (atšķirībā no daudzām pieejamajām simulācijām [11–18]) kur daļiņas burbuļa astes plūsmā vai tiešā burbuļu/daļiņu mijiedarbībā ir vizualizēts šķidrā metālā [96]. Atkal, viens no galvenajiem iemesliem ir piemērotu mērīšanas metožu trūkums, lai veiktu šādus mērījumus necaurspīdīgos šķidrumsos (šajā gadījumā metālos), kur nevar izmantot optiskās metodes. UDV ir izmantots burbuļa astes plūsmas raksturošanai [5, 97], bet, neskatoties uz pietiekamu laika izšķirtspēju, pašlaik telpiskā izšķirtspēja nav atbilstoša, lai ticami identificētu atsevišķas daļiņas. Plūsmas analīzei ir apsvērta arī daļiņu izsekošana šķidrā metālā, izmantojot pozitronu emisijas daļiņu izsekošanu (PEDI) [98–102], taču šī metode nodrošina ļoti zemu laika izšķirtspēju, padarot to neiespējamu turbulentai plūsmai (piemēram, burbuļu astes plūsma ir turbulenta).

Pirms kāda laika arī tika izteikta ideja, ka NR varētu izmantot, lai tieši novērotu ķermeņu un daļiņu plūsmu optiski necaurspīdīgās sistēmās [103].

Pirmo šādu etalonpētījumu šķidrā metāla plūsmas kontekstā ar plūsmā izkliedētām daļiņām nesēn veica Lappan et al. – gadolinija oksīda daļiņu plūsma ap cilindrisku šķērsli plānā šķidrā metāla kanālā tika dinamiski attēlota ar neitronu radiogrāfiju, ar pietiekamu laika izšķirtspēju, izmantojot intensīvu auksto neitronu plūsmu [96, 104]. Attēlotā turbulentā daļiņu plūsma tika pētīta, izmantojot attēlos bastīto daļiņu velocimetriju (ADV), un tika izmērīts un vizualizēts šķēršļa astes plūsmas ātruma lauks.

Lai gan daļiņu izsekošana šķidrās metālos ir svarīga problēma, ko var atrisināt, izmantojot dinamisko NR, tikai ļoti ierobežots skaits rakstu attiecas uz attēlu apstrādi, kas nepieciešama, lai veiksmīgi iegūtu fizikāli nozīmīgu informāciju no iegūtā attēla. Piemēram, Heitkam et al. veica daļiņu noteikšanu un izsekošanu putās, izmantojot neitronu radiogrāfiju, pielietojot daļiņu maskas korelācijas pieeju [105]. Oriģinālu pieeju daļiņu noteikšanai un daļiņu plūsmas izsekošanai burbuļu klātbūtnē demonstrēja Sommer et al., lai gan ne šķidrā metāla kontekstā [44]. Vēl vienu pieeju, kas ir ļoti daudzsološa daļiņu noteikšanai plūsmā ar augstu daļiņu skaita blīvumu, izstrādāja Anders et al. optiskajiem mērījumiem, bet tā potenciāli var tikt vispārināta [106, 107]. Tomēr pēdējie divi paņēmieni, šķiet, nav viegli piemērojami zemas STA attēliem, kas parasti saistīti ar neitronu radiogrāfiju ar augstu kadru ātrumu, un pirmo būtu grūti vispārināt, jo tas ir atkarīgs no iepriekš iestatītām daļiņu maskām. Ļoti plašs pārskats par daļiņu noteikšanas un izsekošanas metodēm ar objektīvu salīdzinājumu ir sniegts [108], taču atkal demonstrētās daļiņu izšķiršanas metodoloģijas tiek pārbaudītas STA, kas, salīdzinot ar šajā darbā apskatītajiem gaījumiem, ir ļoti augsta. Atšķirībā no burbulplūsmas radiogrāfijas, daļiņu gadījumā nākas saskarties arī ar korelētu troksni, kas rada "fantoma" daļiņas, kas vēl vairāk sarežģī detektēšanu.

Turklāt ir izdevīgi apvienot pret trokšņiem izturīgāku attēlu apstrādes pieeju ar vispārīgāku metodi daļiņu izsekošanai. Lai gan [106, 107] tiek parādītas uzlabotas daļiņu detektēšanas metodes, tiek izmantota vienkārša tuvākā kaimiņa izsekošanas metode, kas parasti nedarbojas tik labi. Izsekošanas metodes, kas tiek izmantotas [105] un [44], izmanto ierobežojumu kopumu, kas padara to problemātisku izmantošanai plūsmām ar lielu daļiņu tilpuma blīvumu (t.i., attālumi starp daļiņām un daļiņu izmēri ir līdzīgi), ja detektēšana tiek veikta nelabvēlīgos attēlveidošanas apstākļos. Kad daļiņas ir noteiktas, izsekošana programma [105] būtībā balstās uz kombinētām tuvākā kaimiņa metodi un ātruma prognozēm. Izsekošana [44] tiek veikta, izmantojot *shake-the-box* algoritma [109] versiju, kurā daļiņu trajektorijas tiek pareģotas, pamatojoties uz iepriekšējiem laika soļiem, un nenoteiktības starp prognozētām un faktiskām pozīcijām tiek koriģētas, optimizējot paredzēto pozīciju telpā, līdz tā sakrīt ar faktisko pozīciju. Tikko ienākošās daļiņas tiek triangulētas kā parādīts [110].

Lai gan šī pieeja noteikti ir pārbaudīta un adekvāta, tai ir daudz raksturīgu ierobežojumu, kas atkal bieži kļūst par problēmu, ja daļiņu tilpuma blīvums ir augsts, daļiņu kustība ir ļoti neregulāra, un viltus pozitīvo detektēšanu un attēlos redzamo daļiņu projekciju pārklāšanās frekvences nav niecīgas, kā tas ir šajā darbā apskatītajos gadījumos. Tas attiecas arī uz metodēm, kas aprakstītas [108]. Pat gadījumos, kad tiek izmantota vispārīgākā un robustākā metode, vairāku hipotēžu izsekošana (VHI, angl. MHT), piemērotie kustības ierobežojumi ir diezgan stingri. Konkrēti, tiek pieņemta gandrīz nemainīga pozīcija un/vai ātrums, t.i., netiek izmantoti uz fiziku vai Kalmana filtriem balstīti kustības modeļi. Tāpēc šīs pieejas nav piemērojamas gadījumos, kad daļiņas var pārvietoties ar ievērojamu paātrinājumu un pozīcijas izmaiņām starp secīgiem kadriem, mijiedarbības ar burbuļu astes plūsmām dēļ, vai jebkuram etaloneksperimentam, kurā tiek pētīta daļiņu kustība šķēršļa/ķermeņa astes plūsmā, kā [96].

Citiem vārdiem sakot, neskatoties uz to, ka metodes daļiņu detektēšanai metālu un daļiņu plūsmas analizē nav tik trūcīgas kā burbuļu gadījumā, joprojām trūkst stabilas pieejas, kas kavē turpmākus sistemātiskus pētījumus. Šādiem pētījumiem būtu nepieciešama ļoti precīza daļiņu segmentēšana un izsekošana, kas varētu radīt pietiekami garus plūsmas ierakstus, kuri ietvertu pamatā esošās sistēmas fiziku, piemēram, plūsmas turbulences raksturu. Līdz ar to tādi pētījumi kā [96] plūsmas analīzei ir aprobežoti ar ADV, kas neļauj veikt padziļinātu turbulences raksturlielumu analīzi. Tas ievērojami ierobežo pētniecībai pieejamos līdzekļus un liek lielā mērā paļauties uz skaitliskām simulācijām, kuru pareizība bieži vien netiek apstiprināta pietiekamā mērā.

### 3. Skaitlisko simulāciju analīze

Diemžēl problēmas nebeidzas ar burbuļu un daļiņu radiogrāfiju, detektēšanu un izsekošanu šķidro metālu sistēmās. Neraugoties uz eksperimentālajiem izaicinājumiem, ir arī jāanalizē simulācijas rezultāti minētajām burbuļu ķēdes modeļu sistēmām. Ņemot vērā to sarežģīto fiziku, kas aprakstīta iepriekš, un faktu, ka šādai burbuļu plūsmai ir ļoti dažādi laika un telpiskie mērogi [11, 70, 71, 91–94], simulācijas rezultātu interpretācija kļūst ļoti sarežģīta, it īpaši, ja ir nepieciešams novērtēt atšķirības, kas rodas pakāpenisku gāzes plūsmas ātruma un ML stipruma/orientācijas izmaiņu dēļ. Tāpēc ir lietderīgi meklēt ērtākus ātruma lauka dinamikas attēlojumus, vēlams ar samazinātu *dimensionalitāti* (angl. dimensionality, t.i. datu reprezentācijas sarežģītības mērs). Lai gan virpuļainība, Q-faktors [111] un citi attēlojumi, kuru pamatā ir ātruma gradienti [112], ir ļoti noderīgi, lai novērtētu turbulentas struktūras burbuļu astes plūsmas reģionu un

virpuļu noteikšanā, tie atklātā veitā nedod priekšstatu par plūsmas laika un telpiskajiem mērogiem un ar to saistītu dinamiku.

Viena no visizplatītākajām laikrindu analīzes metodēm ir diskrētā Furjē transformācija (DFT). Ja datiem ir periodiska struktūra, DFT var izmantot, lai attēlotu sistēmu frekvenču telpā, kas ir dabiskāks sistēmas attēlojums. Tomēr, ja ar sistēmu saistītā datu kopa telpā ir ļoti liela, var būt ļoti grūti un neērti analizēt tās struktūru, jo DFT nekādā veidā nevienkāršo sistēmu. Vēl viens veids, kā sadalīt laikā sakārtotus (laikrindu) datus, ir sadalīšana ortogonālās komponentēs (SOK), kas ir līdzvērtīga principiālo komponentu analīzei (PKA). SOK izsaka laikrindu datus jaunā ortogonālā bāzē. Pamatkomponentes (modas) ir izvēlētas tā, lai tās optimāli aptvertu datus enerģijas satura ziņā (piem. sistēmas kinētiskā enerģija) ar katru secīgo modu. Pēc tam evolūcija laikā tiek analizēta jaunajā reducētajā koordinātu sistēmā. Lai gan jaunā koordinātu bāze ir vienkāršāka nekā sākotnējā, tā nav garantēti fizikāli nozīmīga [113].

Sadalīšana dinamiskās modās (SDM) ir dimensiju redukcijas algoritms periodisku vai kvaziperiodisku datu spektrālai analīzei. SDM faktiski ir PKA un DFT kombinācija, jo tā sadala sistēmas stāvokļu sēriju vairākās dominējošās telpiskās struktūrās, kas saistītas ar unikālām frekvencēm [114]. Tajā pašā laikā tas ir saistīts arī ar perturbācijas teoriju parciāldiferenciālvienādojumiem [115]. Ņemot vērā datu laikrindu, kurā katrs elements ir kādas dinamiskas sistēmas stāvoklis, tā vietā, lai ģenerētu ortogonālus bāzes vektorus, SDM algoritms konstruē modas ar unikālām frekvencēm un amplitūdas augšanas/dilšanas ātrumiem, un modas ne vienmēr ir ortogonālas. Katras modas dinamika nav atkarīga no citām modām. Atšķirībā no DFT, SDM ģenerē *retinātu* (angl. sparse) frekvenču kopu (spektru), kura piekārtota atbilstošām telpiskajām modām, kas ņem vērā dominējošās sistēmas dinamikas komponentes. Tas nodrošina vienkāršotu, bet fizikāli nozīmīgāku sistēmas attēlojumu [113–115]. SDM sākotnēji tika izstrādāts, lai analizētu hidrodinamiskās sistēmas [114]. Kopš tā pirmsākumiem, SDM ir izmantots, lai analizētu plūsmas nestabilitāti un virpuļu izdalīšanos šķidrumos [115–118]. SDM ir izmantots arī dažādu nelineāru sistēmu pētīšanai meteoroloģijā [119], video apstrādei [120, 121], elektrokortikogrāfijas analīzei [122, 123], saules plankumu datu analīzei [124], utt. SDM ir mūsdienīga un aktīvi augoša pētniecības joma, kuras lietojumi aptver vairākas disciplīnas.

Tāpēc MHD burbuļu ķēdes plūsmas kontekstā SDM ir perspektīva metode, kurai vajadzētu nodrošināt jēgpilnāku un padziļinātu datu interpretāciju. Lai gan ir vairāki gadījumi, kad SDM ir piemērots MHD plūsmām [125–127] un SDM ir izmantots, lai pētītu divfāžu plūsmas, un plūsmas, kas satur burbuļus [128–132], literatūrā nav gadījumu (autoriem zināmas šīs publikācijas laikā), ka SDM būtu piemērots divfāžu plūsmai ar

skaidri izdalītiem burbuļiem (robežas modelētas atklātā veidā), tostarp, jo īpaši, burbuļu ķēdēm, kas paceļas peldspējas spēka dēļ, bez vai ar ML.

MHD burbuļu plūsmas kontekstā pašlaik nav SDM pielietojuma gadījumu UDV mērījumiem vai burbuļu plūsmas ātruma lauka simulācijām, bez un ar šķidrā metālā esošā ML. Nav arī gadījumu, kad ar SDM būtu veikta burbuļu formu analīze no simulācijām vai datiem, iegūtajiem izmantojot dinamisko RR vai NR — visi šie gadījumi ir svarīgi soļi, kas jāveic, lai izprastu burbuļu plūsmas magnētisko vadību šķidrā metālā. Izmantojot SDM analīzi, varētu atdalīt vidējo plūsmu no liela un maza mēroga kvaziperiodiskām perturbācijām, kas rodas burbuļu astes plūsmas virpuļu atslāņošanās dēļ, brīvās virsmas svārstību inducēto atpakaļplūsmu, turbulentās pulsācijas dažādos telpiskos/laika mērogos, kā arī nodrošināt kvantitatīvus mērus burbuļu kustības saskaņotībai ķēdē, un izmērīt burbuļu-burbuļu attālumus. Tad būtu iespēja salīdzināt raksturīgus plūsmas režīmus/mehānismus, to frekvences un atbilstošo modu amplitūdas dinamiku laika gaitā dažādām ML orientācijām/stiprumiem un gāzes padeves ātrumiem. Tas būtu ļoti svarīgi, lai identificētu un kvantitatīvi izskaidrotu burbuļu ķēdes nestabilitātes, lai gūtu ieskatu to novēršanā/kontrolē un, iespējams, noderīgu empīrisko attiecību atvasināšanā starp plūsmas raksturlielumiem un bezdimensionālajām grupām/skaitļiem, kas parametrizē metāla un burbuļu plūsmu.

#### 4. Metāla sakausējumu sacietēšana

Ļoti perspektīva un plaši izmantota metode sacietēšanas dinamikas pētīšanai, bez vai ar ML, ir izmantot miniaturizētas modeļu sistēmas - Hele-Šova šūnas, kurās var novērot bināro sakausējumu sacietēšanu mezo-mērogā (t.i., dendritu klasteru jeb *graudu* mērogā ar telpiski izdalītiem atsevišķiem dendritiem), izmantojot *in situ* dinamisko rentgenstaru radiogrāfiju. Pat ja tiek iegūtas tikai sacietējušo mikrostruktūru projekcijas, tas ir izrādījies ļoti efektīvs līdzeklis zondēšanai sistēmām ar sacietēšanas procesiem, lai iegūtu fizikālu ieskatu tajās [46, 53, 54, 59, 60, 64, 133–142]. Papildus problēmām, kas saistītas ar eksperimentiem, ir arī jautājums par vērtīgas informācijas ieguvu no iegūtajiem attēliem. Ideālā gadījumā, lai iegūtu pilnu priekšstatu par sistēmas dinamiku, ir jāatdala šķidrums no cietās vielas, jāidentificē sacietēšanas fronte un visus izolētus šķidruma apgabalus sacietētajā mikrostruktūrā, un jāiegūst mikrostruktūras skeleti. Pēc tam varētu veikt skeletu orientācijas analīzi, iegūt primāro dendritu atstatuma statistiku, noteikt lokālo ātrumu, ar kādu virzās sacietēšanas fronte, kā arī izmērīt izšķīdušās vielas koncentrāciju frontes tuvumā, tai kustoties, jo koncentrācija lielā mērā nosaka frontes evolūciju. Šajā sakarā



interesē arī konvektīvo plūsmu noteikšana, un tā saucāmo "*spalvu*" veida plūsmas paveidienu formu analīze, kā arī ātruma mērīšana šķidrums plūsmas reģionos. Turklāt varētu būt interesanti izšķirt un atdalīt dažādus dendritu graudus (ja tādi ir) attēlos redzamajā mikrostruktūrā. Protams, problēma ir visu iepriekš minēto darbību veikšanā automātiski un uzticami, kas ir būtiski, ņemot vērā rentgena radiogrāfijas eksperimentos parasti iegūto attēlu daudzumu, un katrā attēlā uzņemtās informācijas daudzumu.

Tomēr, lai gan dažām no iepriekšminētajām problēmām ir risinājumi, izskatās, ka lielākā daļa aprobežojas ar dendritu struktūru segmentēšanu un/vai noteikšanu [143–148]. Rakstos [143–145] fokuss ir dendrīta serdeņu detektēšanu no plakņu attēliem, kas ir normāli sacietēšanas virzienam – tas, kā arī fakts, ka [143, 144] piedāvātais algoritms kā vienu no posmiem izmanto masku (paredzēto dendrīta serdeņu formu) saskaņošanu ar attēlu elementiem, padara to gandrīz nepiemērojamu rentgena attēlu pētīšanai ar virzieniski sacietošiem dendrīta "mežiem". (piemēram, kā [46, 53, 54, 59, 142]) kur attēlotas augšanas virzienam paralēlas plaknes. Turklāt, vismaz ievērojot demonstrētos pielietojuma piemērus, šķiet, ka šīm metodēm vajadzētu būt droši pielietojamām gadījumos, kad attēli ir pilnībā piepildīti ar dendritiem, t.i., gadījumos, kad ir gan šķidrums, gan ciets apgabals, vispirms ir jāatdala viens no otra, izmantojot dažādas metodes. Dendrīta galu izsekošana tiek veikta [146], segmentējot sacietējušo struktūru augšējo daļu, kas pārvietojas uz augšu. Segmentēšanas procedūras galvenais aspekts ir izmantot atšķirību starp diviem secīgiem kadriem, lai izceltu jaunizveidoto cieto vielu, segmentētu attiecīgo reģionu, un pēc tam iegūtu dendrītu galu koordinātas. Izmantotā pieeja ļauj arī izsekot sacietēšanas fronti. Tomēr gadījumos, kad atšķirības starp kadriem ir mazākas un ir ievērojams troksnis, ir sagaidāms, ka algoritmam radīsies veiktspējas problēmas, un ir vēlama vispārīgāka pieeja. Rakstā [147] ir piedāvāta pietiekami universāla pieeja, lai automatizētu ekvialānā dendrīta noteikšanas atklāšanu, izmantojot neironu tīklus [147]. Tika parādīts vēl viens svarīgs automatizētas dendrītu segmentācijas piemērs, izmantojot neironu tīklus [148] kur, atšķirībā no [147], tika prognozēta cietās struktūras bināra maska, nevis atsevišķi dendrīti. Tomēr ir vērts norādīt, ka [147, 148] parādītajos piemēros attēlos/gadījumos nav ievērojama troksņa, kas bieži vien pastāv pat pēc attēlu vidējošanas laikā dinamiskās rentgenstaru radiogrāfijas eksperimentos, kuros ekspozīcijas laiki ir salīdzinoši zemi – līdz ar to nav skaidrs, cik labi šīs metodes darbosies šādos apstākļos.

Sistemātiskas pieejas trūkums attēlu apstrādei ārpus segmentācijas metodēm rada problēmu, jo ir skaidri pierādīts, ka mikrostruktūras evolūcija ir jāanalizē kopā ar citiem procesiem sacietēšanas sistēmās. Pašlaik visizplatītākais rīks, ko izmanto attēlu analīzei šajā jomā, ir *ImageJ* ar tā daudzajiem pielāgotajiem paplašinājumiem, ko izstrādājuši lietotāji

[149, 150]. Lai gan *ImageJ* ir atvērtā koda programma ar iespaidīgu metožu arsenālu, daudzas no tām nav automatizētas, izturīgas pret troksni vai publiski pieejamas. Turpretim būtu ļoti ērti, ja rentgenstaru attēlu analīzei būtu atvērtā koda risinājums, kurā uzreiz būtu visa nepieciešamā funkcionalitāte. Jāatzīmē arī, ka šādu kodu varētu izmantot arī skaitlisko simulāciju rezultātu analīzei – atšķirība ir tāda, ka pēdējos nav attēlu trokšņa, kas saistīts ar eksperimentāliem mērījumiem. Tādējādi varētu būt iespējami tiešāki simulāciju un eksperimentu salīdzinājumi, kuru dotajā brīdī lielā mērā trūkst.

### C. Mērķi un uzdevumi

Ņemot vērā iepriekš aprakstīto pētījumu stāvokli jomā un pašreizējās problēmas, kas ievērojami palēnina vai bloķē turpmāku progresu, šī promocijas darba mērķi ir:

- Veikt sistemātisku eksperimentālu burbuļu ķēdes plūsmas izpēti šķidrā metālā ar un bez ML, izmantojot NR un RR, skaitliskas simulācijas un atbilstošas attēlu un datu analīzes metodes
- Izstrādāt šobrīd trūkstošos attēlu un datu apstrādes rīkus, kas nepieciešami eksperimentāli iegūto datu analīzei un skaitlisko simulāciju interpretācijai

Konkrēti, uzdevumi ir šādi:

1. Izstrādāt un izveidot samazinātu eksperimentālo modeļa sistēmu, kas var radīt burbuļu ķēdes plūsmu ar dažādiem gāzes plūsmas ātrumiem. Tai ir jābūt pietiekams biežums, lai samazinātu sienas ietekmi uz burbuļiem, un lai tā ir saderīga ar pieejamajām rentgena un neitronu radiogrāfijas laboratorijām un iekārtām, kā arī pieļauj ML pielikšanu
2. Izstrādāt un izveidot ML sistēmas, kuras var izmantot dažāda stipruma un orientācijas ML pielietošanai modeļa sistēmām
3. Veikt dinamisku neitronu radiogrāfiju dažādiem plūsmas ātrumiem, un ML stiprumiem un orientācijām, lai kartētu modeļa sistēmas parametru telpu, lai novērotu dažādas burbuļu plūsmas nestabilitātes un to, kā tās ietekmē mainīgie sistēmas parametri
4. Veikt dinamisku rentgenstaru radiogrāfiju modeļa sistēmas Hele-Šova versijai dažādiem gāzes plūsmas ātrumiem un ar tādām pašām ML konfigurācijām, lai izpētītu burbuļu kolektīvo dinamiku un to, kā tos ietekmē pieliktais ML
5. Izstrādāt attēlu apstrādes metodes, kas spēj precīzi noteikt pozīcijas un formas kustīgiem burbuļiem no zema STA neitronu attēliem
6. Izstrādāt attēlu apstrādes metodes, kas no rentgena attēliem var izdalīt cieši aglomerētus burbuļus, kas atdalīti ar plānām šķidrā metāla plēvēm
7. Ieviest metodes, kas nodrošina burbuļu izsekošanu, pamatojoties uz to detektēšanu neitronu un rentgena attēlos, un kas ņem vērā burbuļu saplūšanu un sadalīšanos
8. Izstrādāt attēlu apstrādes metodes daļiņu detektēšanai neitronu attēlos ar zemu STA/KTA un fantoma daļiņu artefaktu klātbūtnē
9. Ieviest metodes, kas nodrošina daļiņu izsekošanu ar pietiekamu precizitāti, lai varētu detalizēti analizēt turbulento šķidro metālu plūsmu
10. Veikt eksperimentālu validāciju burbuļu un daļiņu detektēšanai un

izsekošanai izstrādātām metodēm

11. Pielāgot SDM burbuļu ķēdes plūsmas simulācijas datu analīzei
12. Izstrādāt attēlu apstrādes metodes, lai atvieglotu šķidro metālu sakausējumu virzītas sacietēšanas procesu rentgena attēlu analīzi
13. Padarīt visu iegūto kodu un metodes publiski pieejamus, izveidojot publikācijas un atvērtā koda *GitHub* repozitorijus

#### D. Prezentētā pētījuma novitāte

Viens no galvenajiem šī promocijas darba rezultātiem ir parametru telpu aptverošas neitronu un rentgenstaru attēlu datu kopas burbuļu ķēdes plūsmai, izmantojot dažādas intensitātes un konfigurācijas ML, plašam gāzes plūsmas ātrumu diapazonam. Izmantotās modeļu sistēmas ar taisnstūrveida šķidrā metāla traukiem, kur burbuļu plūsma tiek ievadīta caur horizontālām/vertikālām sprauslām, tika attēlotas ar dažādu šķidrā metāla slāņa biezumu. Datus, kas iegūti biežākai sistēmai, var izmantot, lai izpētītu, kā burbuļu ķēdes nestabilitāte rodas no vadošo/aizmugurējo burbuļu mijiedarbības un kā to ietekmē sistēmas parametri. Savukārt modeļa sistēmas Hele-Šova variants ir paredzēts burbuļu aglomerācijas un tiešās mijiedarbības pētīšanai – to sadursmes, saplūšana un sadalīšanās. Iepriekš šajā jomā nebija pieejamas šādas datu kopas, kas tagad ir pamats turpmākiem uz fiziku vērštiem MHD burbuļu plūsmas pētījumiem. Sākotnējā datu analīze atklāja daudzus plūsmas režīmus, ko var sasniegt, izmantojot dažādas ML intensitātes un orientācijas.

Jo īpaši neitronu radiogrāfijas eksperimenti ir pirmās veiksmīgās šāda veida kampaņas, t.i., viena burbuļa vai burbuļu ķēdes plūsmas vizualizācija, izmantojot rekordlielu šķidrā metāla biezumu 30 mm. Iepriekšējie mēģinājumi cieta no nepietiekama kadru ātruma vai nespējas iegūt jēgpilnu informāciju no iegūtajiem attēliem. Caurspīdētā šķidrā metāla konteinerā lielāka nekā iepriekš biezuma nozīme ir tāda, ka tā gandrīz pilnībā izvairās no sienas efektiem un ļauj tuvoties rūpnieciski nozīmīgiem plūsmas režīmiem. Tajā pašā laikā, sistēma vēl ir pietiekami vienkārša, lai izpētītu galvenos aspektus burbuļu mijiedarbībai ķēdēs un ķēdes mijiedarbībai ar apkārtējo plūsmu.

Iemesls, kāpēc iepriekšējie dinamiskās neitronu radiogrāfijas mēģinājumi nebija veiksmīgi, ir tas, ka lielāka kadru ātruma un mazāka ekspozīcijas laika izmantošana ievērojami samazina attēla STA, kā arī burbuļu KTA, novēršot ticamu detektēšanu ar vienkāršākām metodēm, nerunājot par precīzu pozīcijas vai formas noteikšanu. mērījumi. Šis jautājums beidzot ir atrisināts un, neskatoties uz zemo STA, tagad ir iespējami mērījumi ar pietiekamu kadru ātrumu, izmantojot izstrādātās attēlu apstrādes metodes,

kas ir gan zināmu metožu, gan šim promocijas darbam izstrādāto oriģinālo pieeju kombinācija. Pēdējo starpā ir *soft color tone map masking* (SCTMM), *multiscale recursive interrogation filtering* (MRIF) un jaunā uz spilgtumu balstīta viltus pozitīvu detektēšanu likvidēšanas (SVPL) metode. Svarīgi ir tas, ka šīs metodes ir viegli pielietojamas arī ārpus burbuļu plūsmas neitronu radiogrāfijas — tas arī ir parādīts un tālāk apspriests šajā darbā. Ieviestās metodes ir pieejamas vietnē *GitHub*, un tās ir pārbaudītas gan netieši, salīdzinot ar skaitliskām simulācijām, gan arī tieši, izmantojot eksperimentus.

MRIF, kas sākotnēji tika izstrādāts burbuļu plūsmas neitronu attēliem, bija noderīgs arī burbuļu detektēšanas problēmas risināšanai rentģena radiogrāfijai, kur tas kopā ar citām metodēm ļāva veiksmīgi sadalīt burbuļu aglomerātus/grupas atsevišķos burbuļos, kas, kā redzams literatūrā, iepriekš nebija iespējams, jo plānajām metāla plēvēm starp burbuļiem bija zems KTA un tās arī bojāja multiplikatīvais troksnis.

Pirmo reizi tika veikta arī 30 mm biezās šķidrā metāla modeļu sistēmas rentģenstaru radiogrāfija - lai gan iegūtajos attēlos ir ievērojami mazāks burbuļu KTA, STA ir ievērojami labāks nekā neitronu attēliem, ja salīdzinājums tiek veikts ar identiskām kadru uzņemšanas frekvencēm.

Daļiņu detektēšanas problēma zemu STA/KTA neitronu attēlos ar fantoma daļiņu artefaktiem arī ir pārvarēta, izmantojot lokālu filtrēšanu, kura veikta attēlus nodalot daļēji pārklājošos logos — šeit zināmu metožu kombinācija ar SCTMM un oriģinālu nelokālās vidējošanas maskēšanas (NVM, angl. *non-local means masking*) metodi nodrošināja daļiņu segmentāciju, un SVPL efektīvi likvidēja fantoma daļiņas. Šī ir pirmā robustā metode, kas izstrādāta šādām radiogrāfijas problēmām šķidriem metāliem. Atkal, metodika ir paplašināma ārpus pašreizējās lietojumprogrammas, un tā ir pieejama atvērtā koda *GitHub* repozitorijā.

Tika izstrādāts objektu izsekošanas algoritms *MHT-X* daļiņu un burbuļu trajektoriju rekonstrukcijai. Algoritma kodols ir vispārīgākā no izsekošanas metodēm, vairāku hipotēžu izsekošana (angl. *multiple hypothesis tracking* (MHT)), kas pirmo reizi tika padarīta iespējama daudzu objektu zinātnisku problēmu risināšanai, apvienojot MHT bezsaistes (angl. *offline*) formu ar *Algoritm X* un izmantojot vājus masas un impulsa saglabāšanas ierobežojumus objekta kustībai. MHT-X tika verificēts kā drošs rīks burbuļu izsekošanai, pamatojoties uz vienkāršiem etalona eksperimentiem, un apvienojot to ar izstrādātajiem attēlu apstrādes rīkiem neitronu attēliem. Daļiņu izsekošanas problēma šķidrā metālā tika atrisināta, izmantojot jaunu pieeju, kas apvienoja MHT-X un tā uz fiziku balstītos daļiņu kustības ierobežojumus ar uz ADV balstītu kustības prognozēšanu, kur tika izmantota bezdivergences ADV lauka interpolācija, lai ievērojami uzlabotu izsekošanas veikspēju. MHT-X pašlaik ir unikāls savā klasē un ir veiksmīgi pielietots

kombinācijā ar daļiņu detektēšanas metodēm, izmantojot etaloneksperimentu un salīdzinājumus ar skaitliskām simulācijām, teoriju un citiem literatūrā dokumentētiem eksperimentiem. Šī rezultāta nozīme ir tāda, ka pirmo reizi ir iespējams tieši mērit plūsmas turbulences raksturlielumus šķidrā metālā, pamatojoties uz daļiņu plūsmas neitronu radiogrāfiju. MHT-X ir atvērta koda repozitorijs, kas ir pieejams *GitHub*.

SDM pirmo reizi tika izmantots burbuļu plūsmas simulāciju rezultātu analīzei. Skaitlisko simulāciju tika pielietota pret trokšņiem izturīga un atmiņas efektīva SDM implementācija, kuras pamatā ir augstākas pakāpes SDM apvienojumā ar MOSES pakāpenisku (angl. *streaming*) sadalījumu singulārās vērtībās (SSV, angl. SVD), kas ļāva padziļināti analizēt gan liela mēroga ātruma lauka modas pētītajās modeļu sistēmās, gan burbuļu astes plūsmas modeas burbuļu atskaites sistēmā. SDM radītās modas veiksmīgi izskaidroja novēroto sistēmas dinamiku ar un bez pieliktā ML, un ļāva identificēt sarežģīto saiti starp liela mēroga modēm šķidrā metāla traukā un burbuļa astes plūsmas modām. SDM kods arī ir pieejams vietnē *GitHub*.

Visbeidzot, attēlu apstrādes metožu kopums tika ieviests apvienotā kodā, lai analizētu virziena sacietēšanas procesu rentgena attēlus. Kods ir aprīkots ar oriģinālu un stabilu, uz fiziku balstītu modeli šķidrums/cieta attēla apgabalu atdalīšanai, algoritmiem cieto apgabalu analīzei un sacietēju dendritu segmentēšanai, šķidrā metāla kanālu (tā saucāmo *skursteņu*) un dobumu atdalīšanai, kā arī oriģinālu metodi cietā reģiona sadalīšanai dendritu graudos, izmantojot orientācijas uz krāsu telpas kartēšanas pieeju. Kods arī apvieno zināmos attēlu apstrādes rīkus ar dažām metodēm, kas izstrādātas burbuļiem un daļiņām, piemēram, SCTMM un NVM, kas ievērojami pastiprina esošās modernās metodes. Kods, tāpat kā visos iepriekšminētajos gadījumos, ir atvērta koda un ir pieejams vietnē *GitHub*, un pašlaik tas ir vienīgais atvērta koda rīks šajā jomā, kas aptver visas iepriekš minētās funkcijas.

## E. Tēzes

- Šajā disertācijā prezentētie neitronu radiogrāfijas attīstības rezultāti ir ļāvuši iegūt burbuļu plūsmas attēlus biezos šķidrā metālu sistēmās, ar magnētisko lauku vai bez tā, kā arī izmantot implementētas attēlu un datu analīzes metodes, lai atgūtu fizikālu informāciju par burbuļu plūsmu.
- Rentgenstaru radiogrāfija tika veiksmīgi pielietota Hele-Šova sistēmām (bez magnētiskā lauka vai ar to), un burbuļu sadalīšanās, saplūšanās un aglomerācija tika izšķirti un analizēti, izmantojot specializētas attēlu un datu analīzes metodes.

- Izmantojot neitronu un rentgenstaru radiogrāfiju, tika iegūts plašs un unikāls eksperimentālo datu kopums, kas aptver burbuļu plūsmu dažādos magnētiskā lauka konfigurācijās un ar dažādām gāzes plūsmas ātrumiem.
- Dinamiskā neitronu radiogrāfija, kombinācijā ar attiecīgajiem attēlu un datu analīzes rīkiem, ir piemērota daļiņu plūsmas analīzei šķidro metālu sistēmās un var tikt izmantota, lai atgūtu no attēliem turbulences īpašības.
- Sadalīšana dinamiskajās modās ļauj veiksmīgi reprezentēt skaitliski simulētu burbuļu plūsmas dinamiku daudz vieglāk interpretējamos elementos.
- Izstrādātie attēlu apstrādes metodes un kods ļauj veikt daudz padziļinātāku šķidro metālu sakausēšanas procesu analīzi ar dinamisku rentgenstaru radiogrāfiju, pieklūstot fizikālajai informācijai, kas agrāk nebija pieejama automātiskai kvantitatīvai analīzei.

## F. Metodoloģija

Dinamiskā NR un RR tika izmantota burbuļplūsmas attēlošanai šķidrā metālā — NR tika veikta spallācijas avota neitronu stara līnijās (NEUTRA un ICON, PSI), savukārt RR tika veikta, izmantojot rūpnieciskā tipa rentgenstaru cauruli (HZDR rentgenstaru laboratorija). Eksperimentiem ML sistēmas tika izstrādātas, simulētas un optimizētas, izmantojot *COMSOL Multiphysics*. MHD burbuļu plūsmas skaitliskās simulācijas tika veiktas, izmantojot *OpenFOAM* (hidrodinamika) un *Elmer* (elektromagnētisms), izmantojot *EOF-Library* MPI savienojumam. *Salome* un *ANSYS Mesher* tika izmantoti, lai ģenerētu ģeometrijas režģus, un *ParaView* tika izmantots pēcapstrādei un vizualizācijai. Izstrādātās attēlu apstrādes metodes burbuļu un daļiņu plūsmām šķidrā metālā un sacietēšanas procesa analīzei tika implementētas *Wolfram Mathematica*, nepieciešamības gadījumā savienojot to ar *MATLAB* caur *MATLink*. MHT-X un izmantotā SDM versija tika izveidotas ar *Python*. SDM modu vizualizācija tika veikta *ParaView*. Datu analīze, kā arī grafiku un attēlu atveidošana tika veikta ar *Wolfram Mathematica* un *Python*.

## G. Autora ieguldījums

Tā kā šajā darbā izklāstītie rezultāti ir lielas starptautiskas komandas darbs, ir svarīgi skaidri izcelt autora ieguldījumus. Tie ir šādi:

- Neitronu radiogrāfijas eksperimentu plānošana, organizēšana un veikšana. Tas ietver: modeļa sistēmas dizains un daļu iepirkumi; ML sistēmu, ko izmanto ML pielikšanai modeļa sistēmai, projektēšana, optimizācija un detaļu iepirkums; nepieciešamā daudzuma novērtēšana (lai ņemtu vērā parauga aktivāciju ar neitronu plūsmu) un šķidrā gallija iepirkums; burbuļu plūsmas neitronu radiogrāfija šķidrā metālā NEUTRA un ICON neitronu staru līnijās PSI; eksperimenti pie ICON staru līnijas, kas izmantoti izstrādāto attēlu apstrādes metožu validācijai
- Burbuļu plūsmas rentgenstaru radiogrāfijas plānošana un veikšana HZDR rentgenstaru laboratorijā
- Attēlu apstrādes metožu izstrāde un implementācija burbuļu plūsmas šķidrā metālā neitronu (solo) un rentgenstaru (izstrādāts kopā ar Ansi Ziemeli) radiogrāfijai, tai skaitā formas analīzes algoritms (izstrādāts kopā ar Pēteri Zvejnieku)
- Daļiņu plūsmas šķidrā metāla neitronu attēliem izmantojamo attēlu apstrādes metožu un koda izstrāde un implementācija
- Metālu sakausējumu virzītas sacietēšanas procesu rentgena attēlu analīzei izmantoto attēlu apstrādes metožu un koda izstrāde un implementācija
- Līdzdalība MHT-X objektu izsekošanas koda izstrādē (galvenais izstrādātājs Pēteris Zvejnieks): autors ieviesis matemātiskos modeļus fizikā balstītiem objektu kustības ierobežojumiem, statistiskās funkcijas objektu kustībai un mijiedarbībai, ideju ADV izmantošanai kustības prognozēšanai un ieskatu ar MHT saistītajā matemātikā
- Līdzdalība SDM koda izstrādē (galvenais izstrādātājs Mārtiņš Klevs): autors sniedza ieskatu ar SDM saistītajā matemātikā
- Rezultātu fizikālu interpretācija visos ar šo promocijas darbu saistītajos rakstos
- Galvenais ieguldījums visu ar šo promocijas darbu saistīto publikāciju pirmo draftu izveidē
- Trīs pabeigto bakalaura darbu vadīšana (Pēteris Zvejnieks un Mārtiņš Klevs: attiecīgi MHT-X un SDM koda izstrāde; Ansis Ziemelis, rentgena attēlu apstrādes koda kopizstrāde) un viena Aleksandra Jegorova aktuālā maģistra darba vadīšana saistībā ar šī promocijas darba pētniecības jomām
- Sadarbības izveide un uzturēšana ar HZDR, PSI un Griničas Universitāti (UG)



## H. Rezultātu prezentēšana

### 1. Publikācijas saistītas ar promocijas darbu

1. Mihails Birjukovs, Natalia Shevchenko and Sven Eckert. “An image processing pipeline for in-situ dynamic X-ray imaging of directional solidification of metal alloys in thin cells”, *arXiv*, 2022, <http://arxiv.org/abs/2210.00846>
2. Mihails Birjukovs, Peteris Zvejnieks, Tobias Lappan, Martins Klevs, Sascha Heitkam, Pavel Trtik, David Mannes, Sven Eckert, and Andris Jakovics. “Particle tracking velocimetry and trajectory curvature statistics for particle-laden liquid metal flow in the wake of a cylindrical obstacle”, *arXiv*, 2022, <https://arxiv.org/abs/2206.11033>
3. Mihails Birjukovs, Peteris Zvejnieks, Tobias Lappan, Martins Sarma, Sascha Heitkam, Pavel Trtik, David Mannes, Sven Eckert, and Andris Jakovics. “Particle tracking velocimetry in liquid gallium flow around a cylindrical obstacle”. In: *Experiments in Fluids* **63**, 2022, <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-022-03445-2>
4. Peteris Zvejnieks, Mihails Birjukovs, Martins Klevs, Megumi Akashi, Sven Eckert, and Andris Jakovics. “MHT-X: offline multiple hypothesis tracking with algorithm X”. In: *Experiments in Fluids* **63**, 2022, <http://dx.doi.org/10.1007/s00348-022-03399-5>
5. Mihails Birjukovs, Pavel Trtik, Anders Kaestner, Jan Hovind, Martins Klevs, Dariusz Jakub Gawryluk, Knud Thomsen, and Andris Jakovics. “Resolving Gas Bubbles Ascending in Liquid Metal from Low-STA Neutron Radiography Images”. In: *MDPI Applied Sciences* **11(20)**, 2021, <http://dx.doi.org/10.3390/app11209710>
6. Martins Klevs, Mihails Birjukovs, Peteris Zvejnieks, and Andris Jakovics. “Dynamic mode decomposition of magnetohydrodynamic bubble chain flow in a rectangular vessel”. In: *Physics of Fluids* **33(8)**, 2021, <http://dx.doi.org/10.1063/5.0054831>
7. Mihails Birjukovs, Valters Dzelme, Andris Jakovics, Knud Thomsen, and Pavel Trtik. “Phase boundary dynamics of bubble flow in a thick liquid metal layer under an applied magnetic field”. In: *Physical Review Fluids* **5**, 2020, <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevFluids.5.061601>
8. Mihails Birjukovs, Valters Dzelme, Andris Jakovics, Knud Thomsen, and Pavel Trtik. “Argon bubble flow in liquid gallium in external magnetic field”. In: *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* **63**, 2020, <http://dx.doi.org/10.3233/JAE-209116>

## 2. Konferences, kurās piedalījās darba autors

1. UIE 2021: XIX International UIE Congress on Evolution and New Trends in Electrothermal Processes, Pilsen, Czech Republic, September 1-3, 2021, "Dynamic neutron imaging of argon bubble flow in liquid gallium in horizontal or vertical magnetic field"
2. EPM 2021: Electromagnetic Processing of Materials, Riga, Latvia, June 13-17, 2021, "Image processing methods for neutron and X-ray radiography of liquid and solidified metals"
3. APET-2020: V International Conference Advanced Problems of Electrotechnology, Yekaterinburg, Russia, October 2020, "Image & data processing methods for X-ray and neutron radiography of bubble flow in liquid metal"
4. ENS-2019: The Workshop on Efficient Neutron Sources, Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen, Switzerland, September 2-5, 2019, "Argon bubble flow in liquid gallium in external magnetic field"
5. 11TH PAMIR International Conference on Fundamental and Applied MHD, Reims, France, July 1-5, 2019, "Argon bubble flow in liquid gallium in external magnetic field investigated by means of neutron imaging"
6. HES-19: International Conference on Heating by Electromagnetic Sources: Induction, Dielectric and Microwaves, Conduction & Electromagnetic Processing: Padua, Italy, May 22-24, 2019, "Neutron imaging of argon bubble flow in liquid gallium in external magnetic field"

## II. Promocijas darba izklāsts

### A. Burbuļu ķēdes plūsmas neitronu radiogrāfija šķidrā metālā

#### 1. Pirmā eksperimentu kārtā

Pirmā NR kampaņa bija paredzēta, lai mācītos no iepriekšējiem NR mēģinājumiem, kas dokumentēti literatūrā, un novērtētu sistematiskas burbuļu plūsmas NR iespējamību šķidrā metālā.

##### a Eksperimentu iestatīšana, radiogrāfija un simulācijas

Tika veikti eksperimenti ar termālu neitronu stara līniju *NEUTRA*, PSI [151]. Eksperimenta uzstādījums sastāvēja no plānsienu paralēlskalda formas  $150\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  stikla trauka (Attēls 1a), kas piepildīts ar šķidru galliju (Ga), kurā argona (Ar) burbuļu plūsma tika ievadīta caur iegremdētu horizontālu vara cauruli (gāzes plūsmas ātrumu regulēja, izmantojot digitālo masas plūsmas regulatoru), kas ievadīja burbuļus tā, ka tie pacēlās bez mijiedarbības ar sienām. Lai izpētītu pieliktā horizontālā ML (HML) ietekmi, konteiners tika novietots starp diviem neodīma pastāvīgo magnētu blokiem (Attēls 1b) ar ML plūsmas blīvumu konteinerā no  $\sim 60\text{ mT}$  līdz  $\sim 500\text{ mT}$  un  $\sim 300\text{ mT}$  burbuļplūsmas reģionā, kā parādīts [152]. ML pie ievades bija  $\vec{B} \sim (100; 17; -3.5)\text{ mT}$  [152, 153].

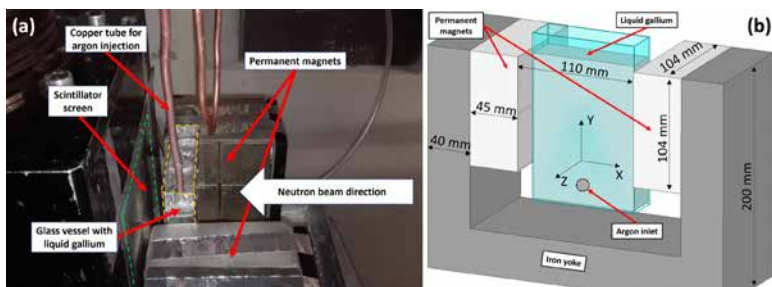


FIG. 1. a) Ga trauks, ko izmanto radiogrāfijai, un b) trauka skice ML sistēmā.

Eksperimentālā iestatīšana tika attēlota tā, lai redzes lauks (ang. FOV) būtu  $112.8 \times 112.8\text{ mm}$  (pietiekami, lai notvertu visu burbuļa trajektoriju, kad tas ir atdalījies no iepļūdes) ar  $55,1\ \mu\text{m}$  pikseļa izmēru. Visi attēli tika iegūti ar uzņemšanas ātrumu 100 kadri sekundē, lai detalizēti tvertu augšupejošo burbuļu kustības un formas svārstības. Tika reģistrētas burbuļu trajektorijas gāzes padeves ātrumiem no 10 līdz  $300\text{ cm}^3/\text{min}$ , ar un bez

pieliktā ML. 30 s ieraksti tika uzņemtu katram gāzes padeves (plūsmas) ātrumam. Ir svarīgi atzīmēt, ka modeļa sistēmas biezums 30 mm pašlaik ir augstākais savā klasē. Tādējādi mērķis bija palielināt iespējamā (NR kontekstā) samazinātas sistēmas biezuma robežas, tuvojoties rūpnieciski nozīmīgiem plūsmas apstākļiem (tas ir, samazinot sienas efektus) [152, 153].

Sākotnējie analīze un simulācijas liecina, ka magnētiskais Reynolds skaits burbuļu tuvumā ir  $Rm \in [0,01; 0,05]$  izvēlētajam plūsmas ātruma diapazonam, tāpēc strāva, ko izraisa metāla plūsma caur ML, varētu būt svarīga lielākam plūsmas ātrumam. Tomēr, lai ievērojami paātrinātu aprēķinus un iegūtu provizoriskus rezultātus, tika nolemts (pagaidām) neiekļaut modelī inducēto strāvu radīto ML. Aprēķini liecina, ka  $Eu \in [2.1; 4.1]$  (6-8 m burbuļa diametrs) un hidrodinamiskais Reynolds skaits pie burbuļiem ir  $Re \in [10^3; 10^4]$  robežās, kas atbilst plūsmas režīmam, kurā burbuļiem ir oscilējoša eliptiska forma. Tajā pašā laikā  $Re \sim 1 - 10$  citur, tāpēc formas dinamikas un trajektoriju modelēšanai ir jāizmanto atbilstošs turbulences modelis.  $k$ -vienādojuma zem-režģa mēroga (angl. *subgrid scale* jeb SGS) lielo virpuļu simulācijas (angl. *large eddy simulation* jeb LES) modelis tika izvēlēts, lai izvairītos no mākslīgas burbuļa trajektorijas stabilizācijas pārvērtētas turbulentās viskozitātes dēļ, ko ievieš standarta  $k-\omega$  bīdes sprieguma pārneses (angl. *shear stress transport* jeb SST) modelis. Frūda (angl. *Froude*) skaits ir  $Fr \in [0.2; 0.3]$ , kas nozīmē, ka peldspēja ir galvenais dzinējspēks, kā paredzēts. Stjuarta skaits ir  $N \in [0.8; 3.5]$  pie burbuļiem, kas norāda, ka Lorenca spēkam vajadzētu ievērojami ietekmēt metāla plūsmu. Ir zināms, ka šim Stjuarta skaitļa vērtībām ML, horizontālam vai vertikālam (vai abiem komponentiem, ja lauks nav viendabīgs), radikāli maina burbuļu astes plūsmas trajektorijas [152, 153].

Eksperiments tika modelēts skaitliski, lai pārbaudītu, vai novērotie efekti nav artefakti iestatīšanas un attēla apstrādes nepilnību dēļ. *OpenFOAM* (galīgo tilpumu medote) tika izmantots burbuļu plūsmas modelēšanai, izmantojot šķidruma tilpuma (angl. *volume of fluid* jeb VOF) metodi ar MULES shēmu, atrisinot Navjē-Stoksa vienādojumu nesaspiežamai plūsmai (ieskaitot gravitāciju, Lorenca spēku, virsmas spraigumu), nepārtrauktības vienādojumu un pārneses vienādojumu Ga tilpuma daļai ar lineārām sajaukšanas funkcijām materiāla īpašībām. Robežnosacījumi: nulles ātrums pie tvertnes sienām; nulles relatīvais spiediens tvertnes augšējā atverē, lai nodrošinātu gāzes plūsmu virs brīvās virsmas; nemainīgs masas plūsmas ātrums caurules iepilūdē. ML Ga konteinerā tika aprēķināts, izmantojot *Elmer* (galīgie elementi), atrisinot magnētiskās indukcijas vienādojumu ML vektora potenciālam, un strāvas blīvuma nepārtrauktības vienādojumu (ieskaitot ML pastāvīgo magnētu un kausējuma plūsmas inducēto strāvu dēļ) skalārā elektriskā lauka potenciālam. *OpenFOAM* un *Elmer* tika savienoti,

izmantojot *Elmer-OpenFOAM* (EOF) bibliotēku [154]. Simulācijas tika veiktas LU/SMI skaitļošanas klasterī [152, 153].

## b Attēlu apstrāde

Pirmā (aizstāta ar pašreizējo) attēlu apstrādes koda versija tika izstrādāta pēc pirmās eksperimentu kārtas. Attēlā 2 ir parādīta blokshēma: neitronu attēli tika atbrīvoti no ārkārtu spilgtiem un tumšiem pikseliem (aizstāti ar lokālu mediānu), tumšā strāva un neitronu stara lauks ir koriģēti; trokšņi tika novērsti, izmantojot *self-snakes* liekuma plūsmas (angl. SSCF) filtru [155, 156], un pēc tam burbuļu formas tika iegūtas, izmantojot divkāršo Otsu morfoloģisko binarizāciju [157] un Shen-Castan robežu detektēšanu ar morfoloģiskās atjaunošanas procedūrām burbuļu iekšpusei un malām; kļūdainās detekcijas tika novērstas ar loģiskajiem filtriem. Piedāvātās procedūras rezultātu piemēru var redzēt attēlā 3. Burbuļa formas parametri tika iegūti no burbuļiem piedzītām optimālām elipsēm [152, 153].

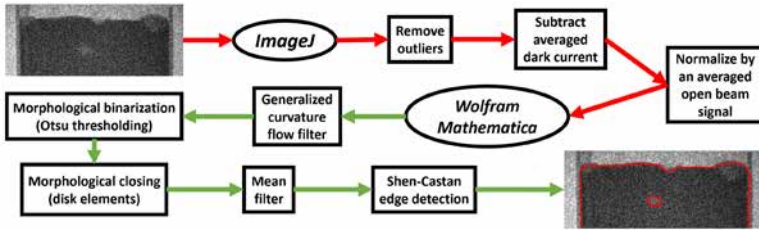


FIG. 2. Attēlu apstrādes algoritms: no neapstrādātiem attēliem līdz noteiktām fāzes robežu formām.

## c Galvenie rezultāti

Attēlā 4 skaidri redzams ML pielikšanas efekts – burbuļa trajektoriju izkliede telpā ir ievērojami samazināta. Stabilizāciju nodrošina elektriskā strāva, ko rada gallija plūsma caur HML, kur plūsmu izraisa šķidrums pārvietošana ar augšupejošiem burbuļiem. Pēc tam inducētā strāva mijdarbojas ar ML, kā rezultātā rodas Lorenca spēks, kas samazina ātruma komponentu perpendikulāri laukam. Tas savukārt noved pie burbuļa astes plūsmas laminarizācijas, novēršot astes virpuļu atrašanos, stabilizējot burbuļa trajektoriju. Var redzēt, ka simulācijas un eksperimenti ļoti labi kvalitatīvi saskan. Atsevišķu burbuļu horizontālā pārvietošanās arī ir ievērojami samazināta, kā redzams gan Attēlā 4, gan Attēlā 5a. Kamēr

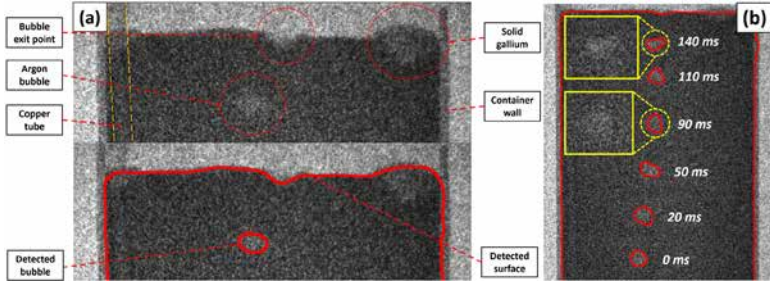


FIG. 3. (a) priekšapstrādāta attēla paraugs ar izceltiem raksturīgiem elementiem un attēls ar iezīmētām gaisa/Ga un Ar/Ga robežām, un (b) vairāku secīgu koriģēto neitronu attēlu kompozīcija, kurā parādītas konteina sienas, gaisa/Ga un Ar/Ga fāzes robežas. Attēlā (b) burbuļu un fona trokšņa tuvplāni ir izcelti ar dzelteniem rāmjiem.

horizontālā ātruma komponente tiek samazināta (Attēls 5a), vertikālā, gluži pretēji, tiek palielināta (Attēls 5b).

Šie novērojumi kvalitatīvi saskan ar zināmiem eksperimentālajiem un skaitliskiem rezultātiem, kas iegūti citās pētnieku grupās ar līdzīgiem sistēmas bezdimensionāliem parametriem. Tas liecina, ka eksperimentā, simulācijās vai attēlu apstrādes algoritmā nav būtisku problēmu. Kā gaidīts no sākotnējās analīzes, burbuļu formas nedaudz svārstās, un šīs formas perturbācijas tiek slāpētas, kad tiek pielietots HML, taču tam ir nepieciešama turpmāka kvantitatīvā analīze. Iepriekš veiktie eksperimenti liecina, ka pie šeit aplūkotajām  $EO$  vērtībām ir sagaidāms neliels vertikālais pātrinājums – tas arī tiek novērots.

Tomēr papildus burbuļa pozīcijai un ātrumam interesē arī formas dinamika. Saistībā ar to galvenie rezultāti ir parādīti Attēlā 6, kur burbuļa slīpuma (pagriešanas) leņķa dinamika ir vidējota 30 s burbuļu plūsmas ierakstiem ar  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  plūsmas ātrumu ir parādīta ar un bez HML, kā arī attiecīgie simulācijas rezultāti, kuri vidējoti 1 s plūsmas laikā. 30 sekunžu neitronu attēlu ierakstīšanai atbilst  $\sim 2000\text{-}2500$  burbuļu detektēšanas notikumi visā izmantojamajā FOV (8-10 cm augstums atkarībā no attēlu STA). Slīpuma leņķis  $\phi$  ir definēts kā leņķis starp burbulim vispiemērotākās elipses galveno pusasi un X asi (attēlu horizontālo dimensiju) — tas ir parādīts Attēlā 6a.

Attēlā 6a var ievērot, ka  $\phi$  gadījumā bez HML ir aptuveni  $40^\circ$  absolūtais maksimums gan eksperimentālajām, gan simulētajām līknēm. Pretstatā sākotnējais maksimums ir  $20^\circ$  ar ML, kur arī tiek novērots gandrīz nulles  $\phi$  CFD datiem un ievērojami samazināta amplitūda, bet ar lielāku troksni (zemāku STA) eksperimentālajiem datiem augstākos burbuļu pacelšanas

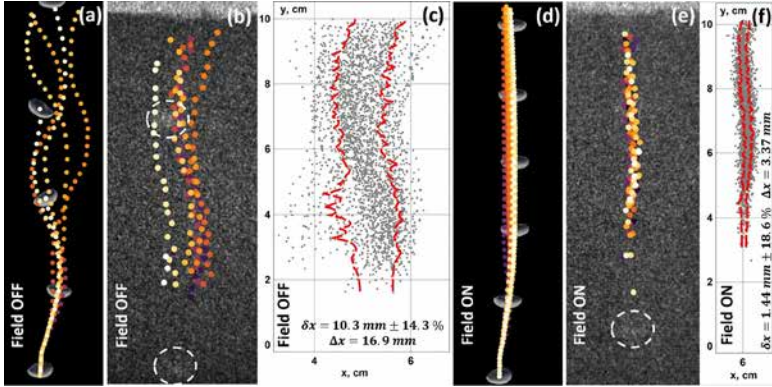


FIG. 4. Vairākas sākotnējās burbuļu trajektorijas  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  plūsmas ātrumam, kas iegūtas no simulācijām (a, d) un eksperimentiem (b, e). Gadījumos (a,b) nav ML, un (d,e) tiek pielikts HML ( $\sim 0.3 T$ ). Simulācijas rezultātu kadru nomaiņas ātrums atbilst eksperimenta kadru ātrumam. Burbuļu centroīdu punkti ir krāsu kodēti pēc secības, no tumši violetas līdz baltai. Ieplūdes un brīvā virsma atrodas attiecīgi tieši zem un virs attēlu vertikālajām robežām. Eksperimentālajos attēlos (b, e) burbuļi ir izcelti ar svītrotiem baltiem apļiem. (c, f) tiek parādītas visas detektēto burbuļu kopas visos kadrus bez (c) un ar (f) HML. Punktētas sarkanas līnijas norāda burbuļu kopas robežas, kas iegūtas, izmantojot statistikas jutīgo nelineāro iteratīvo maksimumu apgriešanas (angl. SNIP) algoritmu.  $\delta x$  un  $\Delta x$  (c,f) apzīmē attiecīgi vidējo burbuļu kopas ierobežojošā apgabala biezumu un maksimālo horizontālo burbuļu izkliedi. Attāluma mērogi (c, f) ir identiski.

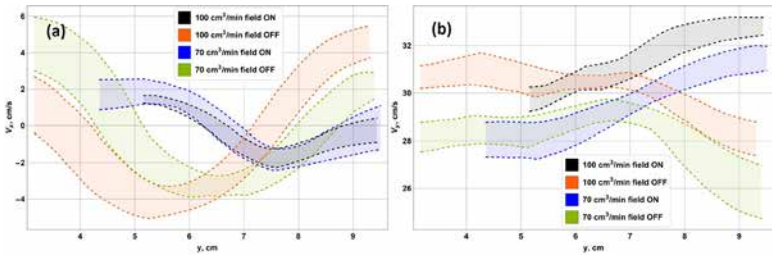


FIG. 5. Eksperimentāli noteiktas vidējotās (a) horizontālās un (b) vertikālās augšupejošo burbuļu ātruma komponentes dažādos augstumos virs iepļūdes, dažādiem gāzes plūsmas ātrumiem, bez un ar  $\sim 0.3 T$  HML. Krāsainās joslas attēlo videsjas līknes un lokālās kļūdu robežas.

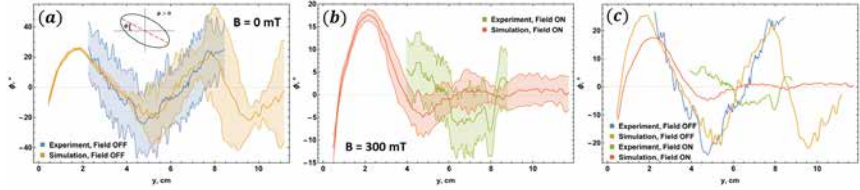


FIG. 6. Eksperimentāli novērotas un simulētas slīpuma leņķa un burbuļa pacēluma augstuma korelācijas (a) bez un (b) ar HML ar krāsu joslām, kas atspoguļo lokālās kļūdas vidējām līknēm; (c) parāda tiešu vidējo slīpuma līkņu salīdzinājumu ar un bez HML. Gāzes plūsmas ātrums ir  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Pozitīvo slīpuma leņķi nosaka, kā parādīts (a).

augstumos, kā redzams Attēlā 6b — atšķirība ir acīmredzama Attēlā 6c.

Lai interpretētu šos rezultātus, jāņem vērā, ka bez ML un zema  $Re$  gadījumā atsevišķa augšupejošā burbuļa astes plūsma ir asimetriska un stabila [5, 9]. Palielinoties  $Re$ , simetrija tiek izjaukta un pēc tam matadata formas astes virpuļiem katrā burbuļa pusē (attiecībā pret lielāko pusass plakni) palielinās izmērs, jo robežslānis pakāpeniski atdalās no burbuļa virsmas, un tā sākas virpuļu atrašanās [5, 9, 12, 13, 23]. Tas notiek pat stabilām burbuļu formām, bet to vēl vairāk pastiprina un savukārt ietekmē virsmas perturbācijas un asferiskums [12, 13, 23]. Virpuļu atrašanās rezultātā zem burbuļa tiek ģenerēts nenulles rezultējošais pacelšanas spēks, liekot tam ievērojami novirzīties, un pēc burbulis pāriet uz periodisku sānu kustību mainīgos virzienos, jo tiek atrauti vairāk virpuļu un augstāka/zemāka spiediena apgabali rodas zem burbuļa pārmaiņus dažādās astes plūsmas pusēs.

Burbuļi ar šeit aplūkotajiem  $Re$  un  $Eo$  diapazoniem uzrāda ļoti nestabilas un sarežģītas turbulentas astes plūsmas struktūras, ko pastiprina ievērojamas formas deformācijas [24, 95], kas ir labi ilustrēti [13][30]. Attēls]. Paredzams, ka burbuļu trajektorijas būs zigzagveida ar haotiskām novirzēm ārpus plaknes to formas nestabilitātes un turbulentu pulsāciju dēļ, kā arī periodiska burbuļa pagriešanās [9, 13, 23].

Tas ļoti labi korelē ar rezultātiem, kas iegūti neizmantojot ML, kā redzams Attēlā 6, kur turklāt skaitliskās prognozes ļoti labi sakrīt ar eksperimentālajiem novērojumiem radiogrāfijas FOV ietvaros, kurā attēlu apstrādes kods droši izšķir fāžu robežas. Attēlā 6a jāņem vērā, ka sākotnēji simulētās līknes kļūdu josla ir daudz šaurāka. Burbuļa veidošanās laikā pie horizontāli virzītas (un līdz ar to asimetriskas) ieplūdes caurules [152] burbulis tiek izstiepts vertikāli peldspējas spēku ietekmē un sāniski hidrodinamiskā gāzes spiediena dēļ caurules atvērumā. Pēc tam, kad burbulis



atdalās, virsma tiek izstiepta vertikāli, virsmas spraiguma spēki ievēl atpaliušo burbuļa daļu pretī tās masas centram, kā rezultātā rodas pašpiedziņa un straujš sākotnējais paātrinājums, kas ir atbildīgs par sākuma negatīvajam  $\phi$  vērtībām. Tas ir parādīts Attēlā 7.

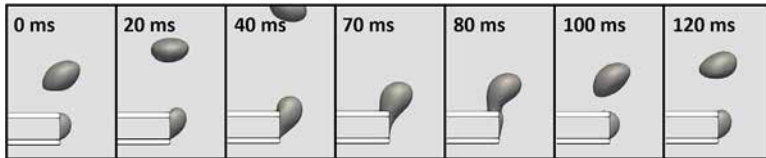


FIG. 7. Skaitliski modelēta burbuļa (tumši pelēka) atdalīšanās pie ieejas (balta).

Pēc tam notiek strauja virpuļa atrauššanās, kā rezultātā ātri mainās  $\phi$  zīme, pēc kā burbulis turpina pacelties. Iemesls sākotnēji zemajai  $\phi$  vērtību izkliedei ir tāds, ka šajā sākotnējā intervālā pašpiedziņas un pirmā virpuļa atdalīšanās ietekme dominē pār burbuļu/burbuļu mijiedarbību. Augšupejošai burbuļu ķēdei (šeit raksturīgais burbuļa/burbuļa attālums ir  $\sim 3-4$  burbuļu diametri), pieaugot pacēlumam, nepartraukta virpuļu atdalīšanās un aizmugurējo burbuļu mijiedarbība ar astes plūsmu no vadošajiem izraisa haotisku burbuļu novirzi un slīpuma lenķa izmaiņas, izskaidrojot palielināto kļūdu joslas platumu, kas pēc tam sakrīt ar eksperimentāli novēroto platumu. Tomēr šis sākotnēji šaurais trajektorijas koridors ir zem datu trokšņa sliekšņa.

Pieliekot HML, atkarībā no  $N$  vērtības, tiek novērota taisna ceļa [6, 10] atgūšana, kas Attēlā 6b parādīto datu gadījumā nozīmē sākuma intervālu ar ievērojamu novirzi un  $\phi$ , kam seko augšupeja ar ievērojami samazinātu  $\phi$ . Sākotnēji augstākais  $\phi$  ir saistīts ar tiem pašiem mehānismiem, kas ir spēkā bez lauka. Tomēr jāņem vērā, ka Attēlā 6b maksimālais  $\phi$  sākotnējā reģionā ir nedaudz mazāks, ja pielikts HML. Šis un vēlākais zemā  $\phi$  režīms tiek novērots, jo šķidrā metālā ar augstu elektrisko vadītspēju kā Ga plūsma ap augšupejošo burbuli inducē elektriskās strāvas burbuļa tuvumā un tā iekšpusē. Šīs strāvas mijiedarbojas ar ML, kā rezultātā rodas Lorenca spēks, kas darbojas pret un slāpē šķidruma plūsmu virzienā, kas ir atkarīgs no ML orientācijas (citas ātruma komponentes tiek izmainītas netieši dēļ nesaspiežamā šķidruma plūsmas nepartrauktības ierobežojuma), kā parādīts Attēlā 8 [5]. Šajā gadījumā magnētiskā slāpēšana galvenokārt ir saistīta ar šķērseniskā lauka (SL) izlīdzināšanu ortogonāli burbuļa centroīda ātrumam (Attēls 8a), taču jāņem vērā arī daļējā gareniskā lauka (GL) ietekme (Attēls 8b), kas notiek burbuļa veidošanās laikā un tūlīt pēc tā atdalīšanās pie iekšplūdes caurules (Attēls 7).

SL slāpēšana tieši ietekmē ātruma komponentes, kuras ir perpendikulāras

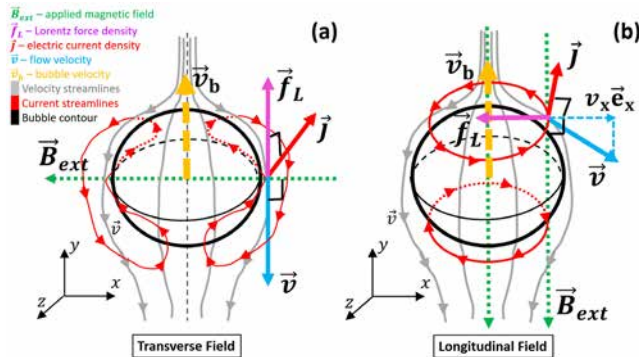


FIG. 8. Idealizēti plūsmas magnētiskās slāpēšanas ietekmes attēlojumi pie burbuļa kustības izlīdzināšanai ML (a) šķērsvirzienā un (b) garenvirzienā. Jāņem vērā, ka (b) apakšējā puslodē  $v_x$  zīme ir apgriezta, tāpat arī Lorenca spēka blīvuma vektora virziens.

ML, kas šeit ir vertikālā komponente. Pārējās komponentes savukārt tiek mainītas plūsmas ātruma lauka nepārtrauktības dēļ. Kā redzams [13] [30. Attēlā], SL rada vairākus efektus. Pie mērena ML plūsmas blīvuma, smalkākās astes plūsmas struktūras pazūd, un virpuļi tiek izstiepti vertikāli. To var attiecināt uz plūsmas ātruma samazināšanos, kas izraisa astes plūsmas laminarizāciju. Jāņem vērā arī samazināto burbuļa astes plūsmas reģiona platumu, kas izriet no virpuļa lieluma, ko samazina SL slāpēšana. Tomēr plūsma aiz burbuļa joprojām ir asimetriska. Pie lielāka SL plūsmas blīvuma slāpēšana ir pietiekami intensīva, lai samazinātu efektīvā burbuļa  $Re$  vērtību zem virpuļu atrašanās sliekšņa, un tā rezultātā tiek stabilizēti zem burbuļiem esošie pretēji rotējošu virpuļu pāri, un ievērojami samazināts astes plūsmas reģiona garums, kā arī samazināts burbuļa/buruļa mijiedarbības attālums. Šajā brīdī burbuļiem ir izteikta taisnvirziena trajektorija, jo pacelšanas spēka asimetrija vairs nav pietiekama, lai manāmi novirzītu burbuli. No otras puses, GL slāpēšana tieši ietekmē horizontālo ātruma komponenti, un citas komponentes tiek mainītas plūsmas nepārtrauktības dēļ. Ir pierādīts, ka GL rada efektus, kas nedaudz atšķiras no SL gadījuma, bet arī stabilizē burbuļa trajektoriju [7, 12].

Skaidrs, ka faktiskā fizika novirzīsies no šī idealizētā modeļa, taču šis vienkāršots priekšstats var ļaut interpretēt rezultātus. Kvalitatīvi ir skaidrs, ka burbuļu veidošanās un pacelšanās laikā no ieplūdes, tās asimetrijas dēļ tiek iedarbināti gan SL, gan GL mehānismi, samazinot sānu novirzi un slīpuma leņķa svārstību amplitūdu. Tā kā plūsma ap burbuli tiek slāpēta

un laminarizēta, trajektorija stabilizējas un kļūst gandrīz taisna (jāņem vērā arī tas, ka ML plūsmas blīvums palielinās līdz ar pacēlumu, kā parādīts Attēlā 1), SL slāpēšanai saglabājot stabilu, simetrizētu pacelšanos (burbuļa slīpuma leņķis ir ļoti mazs) līdz burbulis sasniedz virsmu. Neskatoties uz nelielām atšķirībām starp eksperimentālajiem un skaitliskiem rezultātiem, pieliekot ML (Attēli 6b un 6c) ir skaidrs, ka abos gadījumos  $\phi$  lielums ir dramatiski samazināts, un gan eksperiments, gan skaitliskais modelis uzrāda  $\phi$  vērtības, kas diezgan labi sakrīt, īpaši ņemot vērā zemo attēlu STA.

## 2. Otrā eksperimentu kārtā

Pirmā eksperimentu kārtā sniedza ļoti svarīgu ieskatu par to, kādu attēla kvalitāti var sagaidīt un kādi ir attēlu apstrādes un burbuļu detektēšanas izaicinājumi. Lai gan bija problēmas, kļuva pilnīgi skaidrs, ka dinamiskā NR ir iespējama burbuļu plūsmas radiogrāfijai caur šķidru metālu. Tāpēc tika kartēta modificētas modeļu sistēmas (*Re*, *Eo*, *N*) parametru telpa, un izstrādāta un eksperimentāli apstiprināta uzlabota attēlu apstrādes metodika.

### a Eksperimentu iestatīšana un veikšana

Jaunajiem eksperimentiem tika izstrādāta modificēta modeļa Ga/Ar sistēmas versija, kas aprakstīta [152, 153]. Tāpat kā iepriekš, tika attēlots taisnstūrveida  $150\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  stikla trauks (bez bora piejaukumiem), kas piepildīts ar šķidru Ga līdz  $130\text{--}140\text{ mm}$  atzīmei. Sildīšanas iekārta ar nemainīgu  $4,13\text{ W}$  jaudu trauka apakšā visu eksperimentu laikā uzturēja Ga virs kušanas temperatūras. Vertikāla vara gāzes ieplūdes caurule ( $1\text{ mm}$  diametrs) tika ievietota traukā par  $20\text{ mm}$  caur apakšējo stikla plāksni. Tāpat kā iepriekš, gāzes plūsmas ātrums tika regulēts, izmantojot digitālo masas plūsmas regulatoru [158]. Burbuļu plūsmas neitronu radiogrāfija tika veikta pie termālo neitronu staru līnijas NEUTRA [151] (SINQ, PSI,  $20\text{ mm}$  apertūra,  $10^7\text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mA}^{-1}$  plūsma) gāzes plūsmas ātrumam diapazonā no  $0\text{--}1200\text{ sccm}$  (standarta kubikcentimetri minūtē) bez ML, kā arī ar  $\{75, 125, 200, 265\}\text{ mT}$  HML un  $\{75, 125\}\text{ mT}$  vertikālā ML (VML) burbulplūsmas reģionā. Neitronu plūsma bija paralēla kuģa izmēram  $30\text{ mm}$ . Attālums starp šķidrā metāla slāni un scintilatoru un bija  $[4; 32]\text{ mm}$  atkarībā no iestatījuma (un izmantotās ML sistēmas). Kvadrātveida FOV ( $123, 125\text{ mm}$  malas) virs ieejas tika attēlots ar  $100$  kadriem sekundē [158]. Statiskais ML tika ģenerēts, izmantojot pielāgotas pastāvīgo magnētu/dzelzs serdes sistēmas, kas samontētas Fizikas Institutā

(FI) Salaspilī. ML sistēmas tika izstrādātas un optimizētas programmā *COMSOL Multiphysics* tā, ka, lai gan ML lielums mazliet mainās starp sistēmām, kā norādīts iepriekš, ML sadalījums ir ļoti līdzīgs (Attēls 1). VML lauka sadalījumi tika izstrādāti tā, lai tie būtu tuvu HML ekvivalentiem.

Turklāt tika veikti etalona eksperimenti ar auksto neitronu staru kūļa līniju ICON [159] (SINQ, PSI, 20 mm apertūra,  $\sim 1, 3 \times$  NEUTRA plūsma), lai verificētu uzlaboto izstrādāto attēlu apstrādes metodiku. Tika veikta radiogrāfija misīņa etalona ķermenim (stacionārs un kustīgs) ar sfērisku dobumu (5 mm rādiuss), lai reproducētu tādas attēlveidošanas apstākļus kādi spēkā argona burbuļiem šķidrā gallija [158]. Visbeidzot, tika veikta neitronu radiogrāfija ar apertūrām 40- un 80 mm (attiecīgi  $4 \times$  un  $\sim 11 \times 20$ -mm plūsma), lai iegūtu etalona attēlus un redzētu, kā darbojas attēla apstrādes kods dažādiem STA. Arī lielāka neitronu plūsma tika izmantota ar kadru ieraksta frekvenci līdz 600 sekunde, kam nākotnē vajadzētu palīdzēt padziļināti analizēt burbuļu formas izmaiņas, izmantojot uz attēlu balstītus virsmas deformācijas ātruma mērījumus.

## b Attēlu apstrāde

Iegūtie attēli ir 16 bitu 1 kanāla TIFF faili ar  $1024 \times 1024$  pikseļu izšķirtspēju ar pikseļu izmēru 0.11-0.12 mm (0.12 mm etalona eksperimentiem). Īsi ekspozīcijas laiki (10 ms) rada spēcīgu Puasona (multiplikatīvu) troksni, ko rada neitroni un pārveidotie fotoni, un dažāda blīvuma *salt & pepper* troksnis rodas pārmērīgas ekspozīcijas (gamma staru troksnis) vai "mirušo" kameras pikseļu dēļ. Neitronu staru plūsma virs FOV ir nevienmērīga, ar kritumu iegūto attēlu malās.

Attēls 9a ir iegūta neapstrādāta attēla piemērs. Šeit gāzes plūsmas ātrums bija 120 *scm* (standarta kubikcentimetri minūtē), un statistiskais HML 125 *mT* tika pielikts burbuļu ķēdes reģionam. Jāpievērš uzmanība burbuļu apgabaliem, kas izcelti attēlos 9a un b – tie ir interesējošie objekti, kas ir jāizšķir, un to īpašības (centroīdas, projekcijas apgabali, slīpuma leņķi, utt.) jāizmēra. Jāņem vērā, ka visos turpmākajos šīs sadaļas attēlos tiek izmantota tā pati krāsu shēma un normalizētā spilgtuma skala kā Attēlā 9b, ja vien nav norādīts citādi. Attēlu apstrādes izaicinājumi ar attēla troksni un neitronu plūsmas pārraides signāla piemēriem burbuļiem ir sīkāk ilustrēti ar piemēriem [158].

Tāpat kā iepriekšējā neitronu radiogrāfijas kampaņā, aprēķini liecina, ka Eötvosa skaitlis ir  $Eu \in [2.1; 4.1]$  un Reinoldsa skaitlis pie burbuļiem ir  $Re \in [10^3; 10^4]$  robežās. Tas atbilst plūsmas režīmam, kurā burbuļiem ir oscilējošas eliptiskas formas [24, 95, 152, 153]. Burbuļiem ir ekvivalents diametrs  $d_b \in [6; 8]$  mm, un tie pārvietojas ar dažādu ātrumu, parasti [20; 40] *cm/s* diapazonā [152]. Šādi ātrumi un dinamiskās fāzes robežas

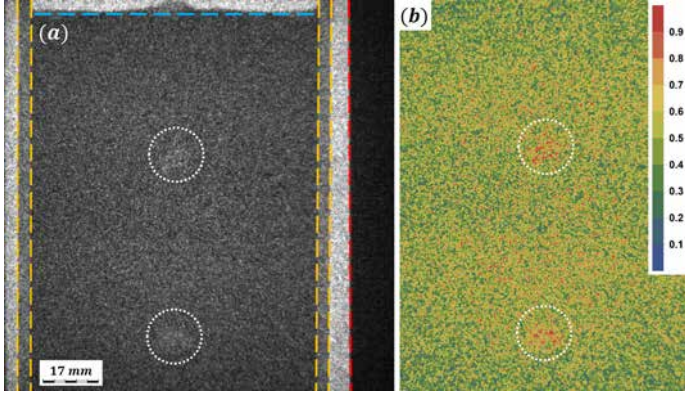


FIG. 9. (a) Oriģinālais uztvertais FOV pēc artefaktu noņemšanas un spilgtuma normalizēšanas ar iezīmētām konteineru sienām (oranžām punktētām līnijām), vidējo gallija brīvās virsmas līmeni (gaiši zilā krāsā), neitronu plūsmas aizsargu (sarkans, polietilēns ar bora piejaukumiem) un burbuļu atrašanās vietām FOV (balts). Mērogs parādīts apakšējā kreisajā stūrī. (b) FOV krāsā (krāsu josla labajā pusē) pēc apģriešanas līdz konteineru sienām un metāla virsmai, tumšās strāvas un neitronu stara, un normalizācijas.

nosaka lielu kadru uzņemšanas ātrumu, kas nepieciešams fizikālai analīzei. 100 kadri sekundē tika uzskatīti par optimumu šeit aplūkotojām eksperimentiem, jo tiek novērsta ievērojami kustības izraisītā burbuļu attēla izplūšana, vienlaikus saglabājot adekvātu attēlu STA. Burbuļu sadursmes, saplūšana vai sadalīšanās nenotiek attēlu sekvencēm, kas šeit aplūkotās metodoloģijas demonstrēšanai, bet gan ķēdes ar cieši saspiestiem burbuļiem parādās lielākiem plūsmas ātrumiem. Nākotnē šeit izstrādātā metodoloģija tiks piemērota arī vēl lielāka plūsmas ātruma gadījumam, kad notiek burbuļu sadursmes. Šeit galvenā uzmanība tiek pievērsta burbuļu formas variāciju un pozīciju noteikšanai.

Rezultāti, kas iegūti, izmantojot iepriekšējo attēlu apstrādes koda [152, 153] versiju un parādīti Sadaļā II A 1 c, kā arī iepriekš minētie apsvērumi noteica mērķus, kas ir jāsasniedz šeit: uzlabota burbuļu malu noteikšanas stabilitāte — uzticamāka noteikšana, mazāk artefaktu un viltus pozitīvu detekciju; lielāka burbuļu formas noteikšanas precizitāte; drošāka burbuļu detektēšana FOV apakšā. Spēkā ir šādi pieņēmumi par burbuļiem: tiem ir perturbēta eliptiska/apala forma; burbuļu fāzes robežām lokālie liekuma rādiusi nav mazāki par iepriekš noteiktu to vidējā liekuma daļu, t.i., gludums tiek pieņemts zem noteikta garuma skalas virsmas spraiguma dēļ; nav sagaidāma burbuļu saplūšana vai sadalīšanās pie plūsmas ātrumiem <

500 *sccm*, kas aplūkoti šeit. Ņemot vērā attēla īpašības/kvalitāti, netiek mēģināts veikt filtrēšanu & segmentāciju, lai varētu atgūt Ar/Ga lokālās tilpuma daļas (stara virzienā), jo zems STA rādis būtiskas kļūdas. Tā kā 100 kadri sekundē ir tuvu zemākai robežai ievērojamas kustības izplūšanas novēršanai attēlos, telpiskā un laika trokšņu filtrēšana netiek izmantota – tikai telpiskā trokšņa samazināšana. Turklāt, ņemot vērā iepriekš minēto un lai metodes būtu vispārīgākas, attēlu secību kadri tiek apstrādāti *atsevišķi* visos attēlu apstrādes posmos. Tādējādi ir iespējams īstenot paralēlizāciju katra līmenī, vienlaikus iespējot *multi-threading*, lai paātrinātu apstrādi.

Lai sasniegtu augstāk minētos mērķus, tika nolemts sadalīt burbuļu segmentāciju divos posmos: *globālā* un *lokālā* filtrēšana/segmentācija. Tas nozīmē, ka vispirms tiek iegūti pirmie burbuļu segmentu novērtējumi attēlos, un pēc tam tiek izmantota atsevišķs algoritms lokālai filtrēšanai un segmentēšanai, lai uzlabotu segmentu formas noteikšanas precizitāti vietējā mērogā (t.i., ieviest korekcijas ar zemāku viļņa garumu) un izslēgtu viltus pozitīvus rezultātus.

Globālās filtrēšanas/segmentēšanas algoritms, kas būtībā ir pilnībā pārveidota iepriekšējās attēlu apstrādes pieejas [152, 153] versija, tika izstrādāta un pielāgota, lai palielinātu burbuļu noteikšanas varbūtību, samazinot formas noteikšanas precizitāti un palielinot viltus pozitīvo detekciju varbūtību. Turklāt, lai uzlabotu burbuļu formas noteikšanas stabilitāti, tika izvēlēta *netiešā* malu noteikšana. Globālā trokšņa filtrēšana tiek veikta vairākos posmos, katrs mērķējot uz noteiktu trokšņa veidu un/vai viļņa garuma diapazonu. Kas attiecas uz lokālo filtrēšanas/segmentēšanas algoritmu, tika ieviests tā saucamais *multiscale recursive interrogation filter* (MRIF), kas labi darbojas pat attēliem ar īpaši zemu STA un atgūst burbuļu formas gadījumos, kad pirmā segmentu novērtēšana pilnībā nespēj uztvert sākotnējās burbuļu formas pieņemamās kļūdas robežās. Piedāvātā attēlu apstrādes risinājuma vispārējā struktūra ir izklāstīta Algoritmā 1.

---

### Algorithm 1: Jaunā attēlu apstrādes pieejas kopējā struktūra

---

**Ievade:** Neapstrādāta attēlu sekvenca

- 1 Veic priekšapstrādi [158]
- 2 Veic *globālu* filtrēšanu visiem attēliem (Algoritms 2)
- 3 Apstrādājiet attēlus ar *multiscale recursive interrogation filter* (MRIF, Algoritms 3)
- 4 Pielietot uz spigtumu balstīta viltus pozitīvu detektēšanu likvidēšanas (SVPL) filtru MRIF izvadei (Algoritms 5)
- 5 Pielietot loģiskos filtrus

**Izvade:** Centroidas un formas parametri burbuļiem, kas detektēti katrā attēlā

---

Attēla priekšapstrāde, kas ietver tumšās strāvas korekciju (TSK) un neitronu stara jeb plakanā lauka korekciju (PLK), tiek veikta *ImageJ*, kā aprakstīts [158]. Attēli tiek apgriezti, kā norādīts Attēlos 9a un b. Attēlu PLK rada STA telpisko atkarību, jo aiz parauga tiek detektēts mazāks daudzums neitronu, salīdzinot ar neitronu staru bez šķēršļa. Pēc priekšapstrādes attēli tiek nodoti *Wolfram Mathematica* tālākai apstrādei [158].

Pirmie segmentu novērtējumi tiek iegūti, izmantojot algoritmu, kas tiek dēvēts par *globālo filtru*, kas ir aprakstīts Algoritmā 2. Segmentu novērtējums tiek veikts trīs posmos — trokšņu filtrēšana & fona noņemšana, netiešā malu noteikšana un segmentu aizpildīšana & tīrīšana – šie soļi detalizēti aprakstīti [158]. Ievērojama ir *soft color tone map* (CTM) *masking* (SCTMM) pieeja – nelineārs filtrs, kas paredzēts attēla fona attīrīšanai, ņemot liela mēroga artefaktus, kas palikuši pāri pēc trokšņa samazināšanas, un vēl vairāk atdalīt fonu no burbuļiem, vienlaikus izvairoties no pārmērīgas attēla erozijas burbuļu reģionos. Liela mēroga struktūras fonā faktiski bija viens no malu noteikšanas nestabilitātes avotiem iepriekšējā pieejā, īpaši attēliem ar zemu KTA ( $KTA = |S_b - S_0|/\sigma_n$ ;  $S_0$  – fona signāla intensitāte) ar lielāku burbuļu skaita blīvumu, kur burbuļu detektēšana bieži bija pilnīgi neiespējama izveidoto malu artefaktu dēļ, kurus nevarēja droši noņemt.

Sākot ar normalizētu attēlu  $x$ , SCTMM fona korekcija generē jaunu attēlu  $y$ :

$$y = x * \underbrace{\left( x - \underbrace{(1 - \text{CTM}(x, c))}_{\text{Nestingrs sliexnsis}} \right)}_{\text{Nestingra fona maska}} \quad (1)$$

kur  $\text{CTM}(x, c)$  ir CTM operācija un  $c$  ir spilgtuma kompresijas koeficients. CTM darbība kartē attēla krāsas (šajā gadījumā pelēkās skalas jeb viena kanāla vērtības), izmantojot gamma kompresiju ar globālo saspiešanas koeficientu  $c$  [167]. SCTMM (1) ideja ir šāda. Tīram  $x * x$  reizinājumam būtu nevienmērīga attāluma palielināšanās starp tuvākajām spilgtuma vērtībām ( $x$  ir normalizēts), un spilgtuma maksimuma un minimuma vērtības būtu daudz tālākas no vidēja diapazona spilgtuma vērtībām, kuras tiek ietekmētas visvairāk. Ja vienā no attēliem  $x'$  tiek maskētas vai samazinātas noteiktu pikseļu vērtības,  $x * x'$  darbotos kā "*nestingra*", t.i., nosvērta maska (pretstatā "*stingram*" binārajam attēlam), kas pārvietotu pikselus ar samazinātām vērtībām  $x'$  tālāk uz spilgtuma diapazona apakšējo galu, ideālā gadījumā padarot tos par fonu. Šeit priekšroka tiek dota

---

**Algorithm 2:** Globāla segmentu pirmo novērtējumu noteikšana pirmsapstrādātiem FOV attēliem.

---

**Ievade:** Normalizēti priekšapstrādāti attēli

*Trokšņa filtrēšana & fona noņemšana*

- 1 Regularizēts Perona-Malik (PM) filtrs [160–162]
  - 2 *Total variation* (TV) filtrs, Puasona modelis [163, 164]
  - 3 *Self-snakes* liekuma plūsmas (angl. SSCF) filtrs; *iegaumēt izvadi* [155, 156]
  - 4 *Soft color tone map masking* (SCTMM) (1); *iegaumēt izvadi*
- Netiešā malu noteikšana*
- 5 Noteikt malu spilgtumu, izmantojot gradienta filtru (Gausa regularizācija & Besela atvasinājumu kodols)
  - 6 2-sliekšņu histerēzes (morfoloģiskā) binarizācija [157]
  - 7 (Pēc izvēles) Morfoloģiskā erozija [165]
  - 8 Retināšanas (angl. *thinning*) transformācija [157]
- Segmentu aizpildīšana & attīrīšana*
- 9 Aizpildīšanas transformācija [157]
  - 10 Vidējošanas filtrs (maza rādiusa)
  - 11 Otsu binarizācija [166]
  - 12 Robežu komponentu noņemšana

**Izvide:**

- Attēla maska ar segmentu pirmiem novērtējumiem
  - Atmiņā: SSCF-filtrēts attēls tālākai izmantošanai Algoritmā 3
  - Atmiņā: SCTMM-filtrēts attēls tālākai izmantošanai Algoritmā 5
- 

nestingrai maskēšanai, jo maskēšana, izmantojot binarizāciju un pēc tam noņemtā fona aizstāšana, izmantojot spilgtuma interpolāciju vai citas metodes, parasti radīs mākslīgas un potenciāli ļoti izteiktas malas un/vai samazinās faktisko malu kontrastu.

Šeit ir nepieciešams, lai  $x'$  būtu tāds, lai tiktu noņemti fona un pēcfiltrēšanas artefakti, kā arī tiktu uzlabots burbuļu kontrasts, kamēr burbuļu segmenti erodēti bojāti pēc iespējas mazāk. Tika nolemts izvēlēties aditīvu maskēšanu formā  $x'(x) = x - mask$ . Apgriezts CTM( $x, c$ ) tika izvēlēts kā *maska*, jo, ja ir iestatīta pareizā  $c$  vērtība,  $1 - CTM(x, c)$  būs augsta fona un trokšņa slāpēšanas artefaktu spilgtums, jo CTM( $x, c$ ) samazina to spilgtuma vērtību atšķirību. Tādā veidā  $x' = x - (1 - CTM(x, c))$ , gluži pretēji, ievērojami samazina artefaktu un fona spilgtumu. Iegūtajam reizinājumam (1) pēc tam ir vēlamās īpašības un tas izceļ burbuļus, vienlaikus samazinot attēla artefaktu ietekmi.

Algoritmā 2 izmantotās filtrēšanas metodes ir diezgan agresīvas. Testēšana atklāja, ka, lai gan burbuļu noteikšanas rādītāji patiešām ir ievērojami augstāki nekā iepriekš un burbuļi tiek atklāti visur FOV (galvenokārt



labākas trokšņu modelēšanas, SCTMM un netiešās malu noteikšanas dēļ), tas notiek uz samazinātas formas izšķirtspējas precizitātes un biežāku viltus pozitīvu detekciju rēķina. Pirmais ir ļoti svarīgs, lai padziļināti analizētu mainīga plūsmas ātruma un ML ietekmi uz burbuļu ķēžu uzvedību. Tika nolemts precīzāk noregulēt globālo filtru, lai palielinātu burbuļu noteikšanas ātrumu un iegūtu labus pirmos burbuļu formu/izmēru novērtējumus, kā arī papildināt to ar algoritmu, kas izmantotu pirmos aprēķinus, lai radītu precīzākas burbuļu formas un efektīvāk atfiltrēt viltus pozitīvus rezultātus. Šim nolūkam ir izstrādāta oriģināla pieeja — *multiscale recursive interrogation filter* (MRIF), kas izklāstīts Algoritmā 3 un shematiski ilustrēts [158].

---

**Algorithm 3:** Multiscale recursive interrogation filter (MRIF)

---

**Ievade:**

- Attēla maska ar pirmiem segmentu novērtējumiem (Algoritms 2, Solis 12)
  - Globālā SSCF filtra izvade (Algoritms 2, Solis 3)
- 1 Definē kvadrātveida (malas garums  $L'$ ) aptaujas logus (AL) segmentiem, pamatojoties uz to laukumiem un centriodām
  - 2 Definē FOV attēlu kā AL ar mērogu (izmēru)  $L$ , pamatojoties uz FOV izmēriem
  - 3 *Katram sākotnējam segmentam un atjauninātajiem segmentiem:*  
**while**  $L'/L < \varepsilon$ ,  $\varepsilon > 1$  (*lietotāja uzdots*) **do**  
     Kartē globālā SSCF filtra izvadi uz segmenta AL  
     Veic lokālo filtrēšanu (Algoritms 4)  
     **if** *tika atrasti atjaunināti segmenti* **then**  
         Definē jaunu AL (malas garums  $L'$ ) atjauninātajiem segmentiem,  
         pamatojoties uz to laukumiem un centriodām  
         Pārdefinē iepriekšējos AL izmērus kā  $L' \rightarrow L$   
     **else**  
         | **Break**  
     **end**  
**end**
  - 4 *Iegūto atmiņā nokonverģētus AL visiem segmentiem*
  - 5 Kartē iegūto segmentu centriodu koordinātas no konverģētajiem AL uz sākotnējo attēlu
  - 6 Kartē atjauninātās segmentu maskas oriģinālajā attēlā un izveido atjauninātu globālo masku

**Izvade:**

- Atjauninātās burbuļu formas maskas priekš FOV
  - Nokonverģēti AL vēlākai lietošanai Algoritmā 5
- 

Galvenā ideja ir definēt *aptaujas logus* (AL) sākotnēji atklātajiem burbuļiem, lai no analīzes izslēgtu neatbilstošās attēla daļas un to ieg-

uldījumu intensitātes histogrammā. Tas arī palīdz samazināt globālās filtrēšanas rezultātā palikušo artefaktu ietekmi. Īpaši attēliem ar zemāku STA un tuvu izvietotiem burbuļiem var gadīties, ka sākotnējā segmentācija ir slikta, t.i., divi vai vairāki burbuļi ir segmentēti kā viens apkārtējo artefaktu dēļ, vai arī burbuļis ir savienots ar liela mēroga artefaktu struktūrām, veidojot lielu segmentu, kas aizsedz patieso objektu. Tas nozīmē, ka AL ir jāizstrādā atbilstošs lokālais filtrēšanas algoritms. Tomēr dažādu iemeslu dēļ var nepietikt ar vienu lokālo filtrēšanas iterāciju, piemēram, tas, kas vizuāli varētu šķist vāji segmentēts burbuļis pašreizējā AL mērogā, pēc lokālās filtrēšanas faktiski var izrādīties vairāki burbuļi – katram no tiem būtu nepieciešama vēl viena iterācija mazākā mērogā. Tas nozīmē, ka kopumā varētu notikt vairākas secīgas iterācijas katram sākotnējam segmentam. Tādējādi MRIF veic objektu filtrēšanu dažādos mērogos, efektīvi pārbaudot, vai segmenti ir pareizi izšķirti ar globālo filtru un/vai iepriekšējās vietējās filtrēšanas iterācijās. Apturēšanas kritērijs, kas balstīts uz AL izmēra līdzību starp iterācijām, nodrošina, ka MRIF atzīst, ka ir jēga atkārtoti filtrēt attēla ielāpu tikai tad, ja objekts ir ievērojami mazāks par iepriekšējo AL, jo šajā gadījumā smalkākās formas pazīmes var būt nepietiekami izšķirtas.

MRIF ietver vairākas sastāvdaļas: AL generators, kas centrē AL segmenta vietā un pielāgo tā izmēru atbilstoši segmenta izmēram; lokālais filtrs, kas atbild par filtrēšanu AL ietvaros; rekursīvs algoritms, kas veic "mēroga nolaišanos" un konverģē uz "patieso" segmenta mērogu, sākot no pirmajiem novērtējumiem; procedūra, kas apkopo rezultātus, atjaunina segmentus un kartē tos sākotnējā burbuļa segmenta maskā, aizstājot pirmos novērtējumus.  $\epsilon$  kritērijs ir apturēšanas faktors, kas kontrolē rekursijas dziļumu, t.i., zemāko AL mēroga sliekšni. AL ģenerēšana ir detalizēti izskaidrota [158].

Vietējam filtram, ko izmanto rekursīvai filtrēšanai MRIF (Algoritms 3, Solis 3), ir elementi, kas ir līdzīgi globālajam filtram, taču ar būtiskām atšķirībām. Tas tika izstrādāts tā, lai tas būtu mazāk agresīvs, jo MRIF nodrošina, ka AL tiek saglabāts tikai svarīgākais fona konteksts no attēla, līdz ar ko, piemēram, destruktīvāks SCTMM filtrs nav nepieciešams. Lokālais filtrs darbojas ar AL, kā aprakstīts Algoritmā 4, un tā iekšējās darbības ir izskaidrotas [158].

Kad MRIF process ir pabeigts, atklāto burbuļu centroīdas tiek kartētas no konverģētajiem AL uz oriģinālajiem attēliem. Kartēšanas procedūra ņem vērā, ka AL, iespējams, ir ārpus attēla robežām – procedūra ir aprakstīta [158]. MRIF papildus tai raksturīgajai viltus pozitīvās filtrēšanas spējai, kas izriet no rekursīvās daudz mērogu analīzes, ir papildināta ar īpašu uz spilgtumu balstītu viltus pozitīvo likvidēšanu (SVPL), kas apstrādā MRIF izvadītos segmentus. Procedūra ir aprakstīta Algoritmā 5.

Algoritms 5 izmanto novērojumu, ka SCTMM, kas lokāli tiek lietots

---

**Algorithm 4:** Vietējā segmentu precizēšana AL

---

**Ievade:** Globālā SSCF filtra izvade (Algoritms 2) projicēta uz AL

- 1 Vidējošanas filtrs  
*Netiešā malu detektēšana*
- 2 Nosaka malu apgabalus, izmantojot gradienta filtru (Gausa regularizācija + Besseļa atvasinājumu kodols)
- 3 Chan-Vese binarizācija [168]
- 4 (Pēc izvēles) Morfoloģiskā erozija
- 5 Retināšanas transformācija  
*Segmentu aizpildīšana & attīrīšana*
- 6 Aizpildīšanas transformācija
- 7 Vidējošanas filtrs (maza rādiusa)
- 8 Otsu binarizācija
- 9 Robežu komponentu noņemšana

**Izvade:** Atjaunināts burbuļa formas novērtējums

---

---

**Algorithm 5:** Uz spilgtumu balstīta viltus pozitīvo likvidēšana MRIF izvadei

---

**Ievade:**

- Atjauninātas burbuļu formu maskas priekš FOV(Algoritms 3)
  - Globālā SCTMM filtra izvade (Algoritms 2, Solis 4)
  - Nokonverģēts AL (Algoritms 3)
- 1 Kartē globālā SCTMM filtra izvadi uz nokonverģēto AL
  - 2 Pielieto SCTMM korekciju (1)
  - 3 Reizina ar segmentu bināro masku
  - 4 Normalizē attēlu
  - 5 Aprēķina  $\langle I \rangle \cdot \max(I)$  visiem segmentu reģioniem
  - 6 *Sliekšņa noteikšana segmentiem:*  
**if**  $\langle I \rangle \cdot \max(I) < \eta$ ;  $\eta \in [0; 1]$  (*lietotāja uzdots*) **then**  
| Apzīmē segmentu kā viltus pozitīvu  
**else**  
| Nothing  
**end**
  - 7 Izņem identificētos viltus pozitīvus segmentus no kopējās maskas
- Izvade:** burbuļu formu maskas bez detektētajiem viltus pozitīviem rezultātiem
- 

globālajai SSCF filtra izvadei, kas kartēta uz konverģēto AL, rada ļoti spēcīgus intensitātes maksimumus un kopumā augstāku intensitāti segmenta reģionā, ja burbulis ir īsts, savukārt pretējam vajadzētu būt spēkā viltus pozitīvo rezultātu gadījumā. Vidējās un maksimālās intensitātes reizinājums tiek izmantots, lai neviens no abiem kritērijiem vien nav pietiekams, lai

izietu filtram cauri, jo var gadīties, ka apgabals ar citādi fona līmeņa intensitāti var uzrādīt stingri lokalizētu intensitātes maksimumu; tāpat nepietiek tikai ar vidējās intensitātes filtrēšanu, jo burbulim ir jābūt spēcīgam intensitātes maksimumam ap tā centru, kas pats par sevi nav tik cieši saistīts ar vidējo intensitāti. Vēl viens veids, kā to interpretēt – ja maksimumālajam un vidējam sliekšnim ir noteikta varbūtība pieņemt kļūdaini pozitīvu rezultātu, tad maksimumālā/vidējā reizinājuma sliekšnim ir kļūdaini pozitīva pieņemšanas varbūtība, kas ir vismaz zemāka par lielāko no abām sastāvdaļām.

Pēc MRIF izvades filtrēšanas, izmantojot Algoritmu 5, tiek izmērītas visas interesējošās īpašības visiem atlikušajiem burbuļa segmentiem, un turpmākai viltus pozitīvo rezultātu novēršanai var izmantot loģiskos filtrus. Šajā gadījumā loģiskie filtri pārbauda, vai burbuļu koordinātas, izmēri, utt. nav ticami, un no izmērīto burbuļu formu datu kopas noņem nepatiesas detekcijas. Visbeidzot, iegūtos datus var pēcprāt pārbaudīt un interpretēt.

### c Galvenie rezultāti

Attēlā 10 parādīta turpmāko darbību ietekme, ko globālais filtrs (Algoritms 2) veic priekšprātīgajam attēlam. Atšķirība starp Attēliem 10a un 10b ir tāda, ka troksnis ar zemu viļņu garumu (asi lokalizēti spilgtuma maksimumi un minimumi, kas palikuši no pirmprātīgās) ir likvidēti. Tālāk *total variation* (TV) filtrs (Attēls 10c) konsolidē augstās spilgtuma vērtības burbuļu apgabalos (balti punktēti apli), palielinot burbuļu STA. Arī troksnis ir ievērojami slāpēts un tā viļņu garums ir vēl vairāk palielināts. Tomēr TV filtrs nenoņem retos lielāka mēroga spilgtuma maksimumus, kas joprojām ir redzami Attēlā 10c fonā starp burbuļiem tik efektīvi, cik tas ir vēlams, nepazeminot burbuļu KTA. Šo funkciju veic SSCF (Attēls 10c), kas īpaši izkļiedē atlikušās intensitātes maksimumus, vēl vairāk palielinot burbuļa STA (un KTA samazinātā trokšņa dēļ fonā). Detalizētāka analīze par to, kā trokšņu filtrēšanas posmi ietekmē attēlu, ir sniegta [158]. Tā kā STA ir palielināts pēc PM, TV un SSCF filtriem, SCTMM tagad tiek izmantots, lai palielinātu KTA, ievērojami izlīdzinot fonu, vienlaikus saglabājot burbuļa signāla intensitāti. Tas ļauj gradienta filtram radīt burbuļu malu oreolus ar vēl lielāku KTA, nodrošinot tīru segmentāciju, kā redzams Attēlā 10g.

Ar pirmiem segmentu novērtējumiem varētu pietikt burbuļu formas iegūšanai, ja tas ir atbilstoši noregulēts, ja ne tas, ka Attēlā 10 aplūkotais ir viens no labākajiem piemēriem trokšņa, kontrasta un klātesošo artefaktu ziņā, t.i., ievērojama daļa eksperimentu laikā uzņemto attēlu ir daudz sliktākas kvalitātes. Iegūtās formas ne tikai bieži vien ir neprecīzas vai deformētas, tās dažkārt var būt nepārprotami nefiziskas — viens no šādiem piemēriem ir parādīts Attēlā 11, kur (a) punktā ir parādīts segments, kas

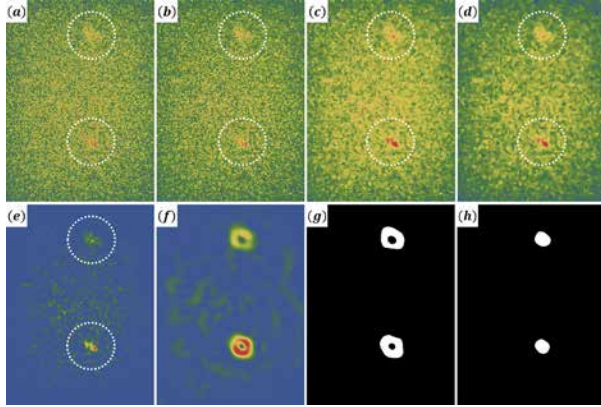


FIG. 10. Pirmās segmentu novērtēšanas posmi (Algoritms 2): (a) oriģināls priekšapstrādāts attēls; b) PM filtrēts attēls; c) Puasona TV filtrēts attēls; d) SSCF filtrēts attēls; e) SCTMM izvade; f) gradienta filtra izvade (malu oreoli); g) histerēzes segmentēti malu oreoli (pirms erozijas); h) burbuļmaskas, kas iegūtas pēc erozijas, retināšanas, pildīšanas, maza rādiusa vidējās filtrēšanas, Otsu binarizācijas un malas komponentu noņemšanas. Krāsu shēma ir tāda, kā Attēlā 9.

izskatās kā divi burbuļi, kas atrodas saplūšanas procesā. Šādi notikumi nav gaidāmi ar plūsmas ātrumu, kuram šis attēls tika iegūts, tāpēc Attēlā 11a ir redzams acīmredzams artefakts. (b) apakšējā labajā stūrī ir cieši izvietoti augstas spilgtuma plankumi, kas, iespējams, tika apvienoti savā starpā un ar burbuļa apgabalu augšējā kreisajā stūrī. Tomēr, tiklīdz MRIF ir nomērķēts uz segmentu un lokālais filtrs tiek pielietots SSCF izvadei, kas projicēta uz segmenta AL (c), pa posmiem (d–h), artefakts vairs nepastāv un ir pareizi noteikts viens burbuļis.

Papildus šādiem artefaktiem, tā kā globālais filtrs tika noregulēts, lai palielinātu iespēju atklāt burbuļus FOV, ir gadījumi, kad atklātie segmenti ir kļūdaini pozitīvi. Attēlā 12 ir parādīti divi šādu segmentu gadījumi, kurus analizē MRIF. (a) var redzēt, ka vietējais filtrs ir atklājis, ka AL patiešām nav neviena segmenta. Tomēr viltus pozitīvo rezultātu nopratināšana AL dažkārt var atkal radīt segmentus, kā tas ir (b), kur gradienta filtra stadija (b4) ģenerēja struktūru, kas atgādina burbuļa malas oreolu. Pēc tam tas tika segmentēts un, veicot malu tīrīšanu, pārveidots par segmentu, kas šķiet piemērots, taču, vienkārši pārklājot to virs sākotnējā attēla, kas projicēts uz AL, var redzēt, ka tas tā nav. Tomēr MRIF efektīvi veic divu faktoru viltus pozitīvu pārbaudi, un šādos gadījumos uz spilgtuma karti balstīts filtrs (Algoritms 5) kalpo kā rezerves filtrs. Kad globālā SCTMM izvade

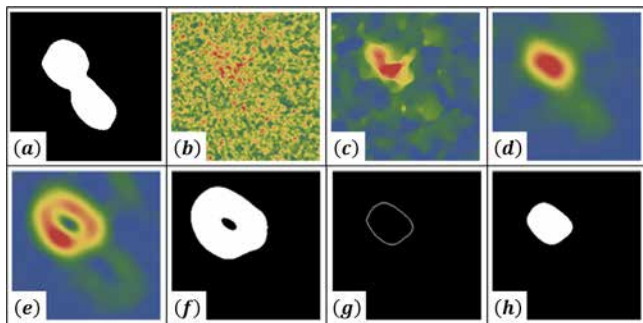


FIG. 11. Pirmā segmenta novērtējuma precizēšana, izmantojot lokālo filtru (Algoritms 4): (a) pirmais novērtējums AL; (b) oriģināls priekšapstrādāts attēls, kas projicēts uz AL; (c) SSMF izvades projekcija uz AL (Algoritms 2); (d) SSMF izvade pēc vidējošanas filtra; (e) gradienta filtra izvade; (f) Chan-Vese segmentācijas izvade; (g) malas, kas iegūtas ar eroziju un retināšanu; (h) atjaunināts vietējais segments AL. Segmentu aizpildīšana un tīrīšana ir līdzīga tai, kas tiek veikta Algoritmā 2.

ir projicēta uz AL un SCTMM tiek lietota iegūtajam attēlam (b9), var redzēt, ka segmenta apgabals satur tikai fonu, un tādejādi SVPL novērsīs šo viltus pozitīvo rezultātu, jo tam ir  $\langle I \rangle \cdot \max(I) < \eta$  ( $I$  ir lokālais attēla spilgtums).

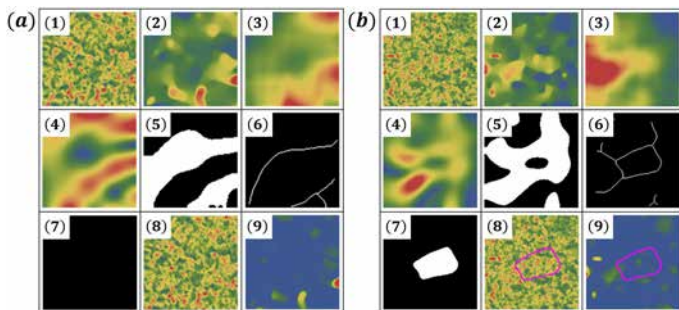


FIG. 12. MRIF atklāti viltus pozitīvu rezultātu gadījumi, kuros (a) nav atrasti lokāli segmenti un (b) artefakts (violets kontūrs), kas vēlāk tiks novērsts, izmantojot Algoritmu 5, pamatojoties uz segmenta spilgtuma sadalījumu. Apakšattēli (1-9) (a) un (b) ir: (1) ir oriģinālais attēls, kas projicēts uz AL; (2-7) ir attiecīgie lokālās filtrēšanas posmi (Attēls 11c-h); (8) ir (1) ar iezīmētām segmentu malām; (9) ir SCTMM piemērots (2).

Attēlā 13 ir parādīts piemērs, kurā ir ietverti vairāki klūdaini pozitīvi gadījumi, nepietiekami izšķirtas formas un burbuļu apgabali, kas apvienoti ar troksni segmentācijas procesā. Jaņem vērā, ka attēla kvalitāte pat vizuāli ir daudz sliktāka nekā Attēlā 10. Attēla augšējā daļā esošie artefakti izriet no zema KTA (b), savukārt viens no apakšējiem artefaktiem rodas no trokšņa struktūras fonā, kas atgādina burbuli. Tomēr, kā redzams (d) un (e), MRIF veiksmīgi noņem visus viltus pozitīvos rezultātus un artefaktus, vienlaikus uzlabojot formas novērtējumus.

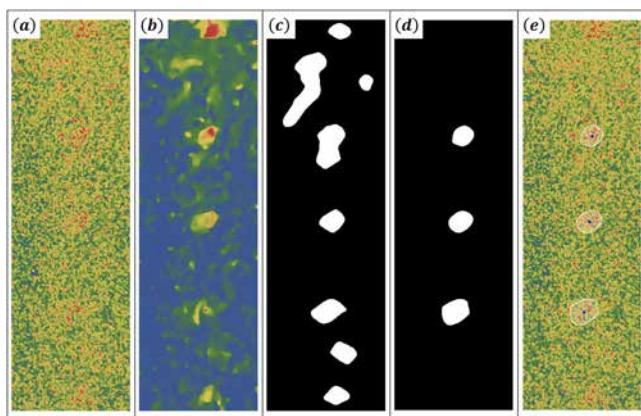


FIG. 13. Segmentācijas uzlabošanas piemērs, izmantojot MRIF: (a) horizontāli apgriezts priekšapstrādāts attēls — jāatzīmē ļoti zemo KTA attēla augšējā pusē; (b) globālās SCTMM filtrēšanas rezultāts; (c) pirmais segmentu novērtējums; (d) atjauninātu segmentu maska, ko atgriezis MRIF; (e) rezultējošo segmentu pārklājums virs (a). Jāņem vērā, ka augšējie un apakšējie segmenti no (c) nav ietverti (d) un (e) — tā ir pareiza rīcība, jo (a) un (b) var vizuāli redzēt, ka atbilstošie burbuļi ir daļēji ārpus FOV, un tāpēc tie nav derīgi analīzei.

Tas kā MRIF iteratīvi atrisina tādus gadījumus, kā iepriekš, ir parādīts Attēlā 14, kur MRIF iterācijām tiek parādīti segmentu novērtējumu atjauninājumi. (e3) var redzēt, ka STA un KTA ir vēl sliktāki nekā gadījumā, kas parādīts Attēlā 13. Lielākais segments, kas redzams (e1) un (a1), vispirms tiek sadalīts divos burbuļos (b1), un pēc tam katrs burbulis tiek apstrādāts vēlreiz, iegūstot precīzākas formas. Zemākajam segmentam (e1) ir nepieciešams visvairāk MRIF iterāciju — pirmie divi (b3) un (c3) noņem artefakta daļas, kas bija aizklājušas burbuli, un pēdējā iterācija (d) atjaunina izšķirto formu. Pēc tam iegūtās burbuļu formas tiek kartētas uz FOV, kā norādīts (b-e). Šeit ir svarīgi atkārtot, ka MRIF veikspēja ir ļoti atkarīga no lietotāja definētā AL mērogošanas faktora un kritiskās AL

garuma attiecības  $\varepsilon$  jaunākajām un (potenciālajām) nākamajām rekursijas iterācijām. Optimālo parametru noteikšanas stratēģija ir apskatīta [158].

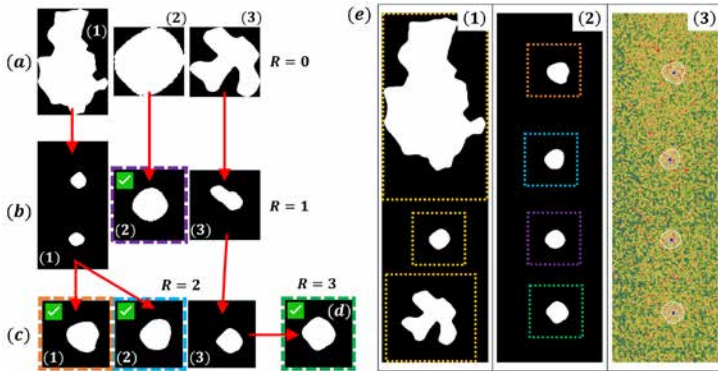


FIG. 14. Iteratīvās nopratināšanas procesa ilustrācija attēlam ar vienu no sliktākajām kopējām STA vērtībām, kur  $R$  ir MRIF rekursijas dziļums. (a-d) parāda  $R$ , kas mainās no 0 līdz 3 segmentiem, kas konstatēti katrā dziļumā. Apakšattēlā (e) ir parādīti (1) sākotnējie segmenti, (2) MRIF izvide un (3) izvades pārklājumi virs oriģinālā attēla. Konverģētie segmenti ir marķēti ar zaļām atzīmēm. Krāsainie rāmji (e2) atbilst (b2), (c1-2) un (d), izmantojot attiecīgās krāsas. Oranžie rāmji (e1) norāda AL pie  $R = 0$ : jāņem vērā augstākās AL augsto malu attiecību — tā virtuālais līdzinieks ([158]) ir ievērojami ārpus robežām un tāpēc tiek piekārtota ievērojama AL apgriešanas korekcija, lai pareizi kartētu (c1-2) uz FOV.

Papildus parādītajiem veiktspējas piemēriem interesanti ir arī tas, kā izstrādātā pieeja darbojas veselām attēlu sekvencēm, ņemot vērā burbuļu noteikšanas blīvumu FOV un iegūto rezultātu fiziskumu, t.i., burbuļa trajektorijas un formas īpašības. Attēli 15-17 parāda veiktspējas atšķirības iepriekšējā attēlu apstrādes kodam [152, 153] un šeit parādītajai metodoloģijai [158].

Attēlā 15 var skaidri redzēt, ka jaunā attēla apstrādes koda versija pārspēj iepriekšējo versiju, pilnībā izvairoties no aklām zonām FOV apakšējā daļā abām attēlu secībām. Jāņem vērā arī tas, ka burbuļu pēdas, kas redzamas punktā (b), ir daudz saskaņotākas nekā (a). Attēlā 16 savukārt parādīts, ka ar jaunajām metodēm tagad var skaidri izšķirt klasisko "S" formas vidējo trajektoriju kopu, ko veido zigzaga trajektorijas, kā redzams (c) un (d), pretstatā (a) un (b), kuros trūkst nozīmīgas daļas no burbuļu detekcijām. Izlieces novirzi virzienā  $x > 0$  (c) un (d) nosaka horizontālā ieplūde, kas ielaiž gāzi šajā virzienā.

Vēl viens interesants aspekts ir burbuļu slīpuma leņķa dinamika, kas



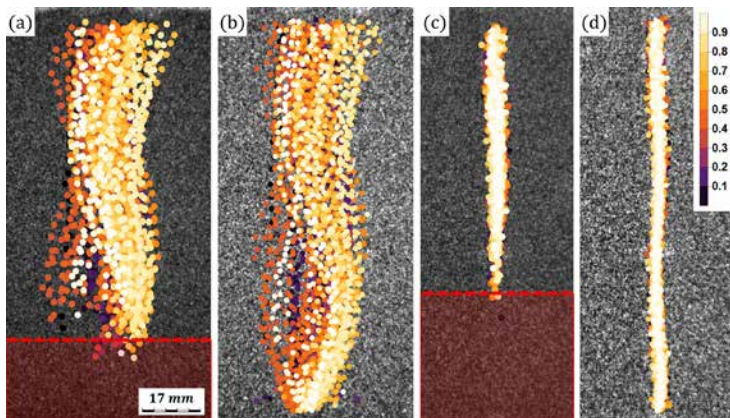


FIG. 15. Burbuļu atrašanās vietas, kas FOV konstatētas 3000 attēlu secībai (30 sekundes) ar plūsmas ātrumu 100 *sccm* modeļa sistēmai no [152, 153]: nav ML, (a) iepriekšējais un (b) aktuālais attēlu apstrādes kods; pielikts  $\sim 265$  *mT* HML, (c) iepriekšējais un (d) pašreizējais attēla apstrādes kods. Burbuļu atrašanās vietas ir atzīmētas ar punktiem, kuri ir kodēti hronoloģiskā to parādīšanas secībā. Krāsu apzīmējums (d): radiogrāfijas ieraksts sākas ar 0 un beidzas ar 1. Sarkanās krāsas apgabali norāda iepriekš izmantotā attēla apstrādes koda aklās zonas. Visi apakšattēli ir vienā mērogā.

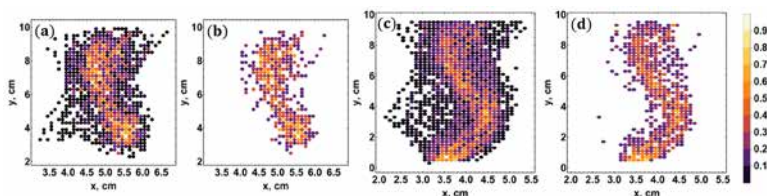


FIG. 16. Normalizētas burbuļu detektēšanas blīvuma histogrammas ar  $(dx, dy) = (2, 4)$  *mm* izšķirtspēju, kas krāsu kodētas pēc detektēšanas skaitļiem: (a-b) gadījums Attēlā 15a, parādītas (a) visas histogrammas vērtības un (b) vietas ar 3+ detekcijām; (c-d) gadījums Attēlā 15b, parādītas (c) visas histogrammas vērtības un (d) vietas ar 4+ detekcijām. Krāsu atšifrējums ir pa labi no (d).

izšķirta [153] salīdzinājumā ar pašreizējiem rezultātiem — tas ir parādīts Attēlā 17. Pirmkārt, aklās zonas likvidēšanas rezultātā jaunās līknes pilnībā stiepjas cauri FOV. Otrkārt, abu pieeju radītās vidējās tendences norāda, ka iepriekš izmantotais kods patiešām atrisināja dinamiku bez nepieņemamas neprecizitātes. Visbeidzot, kļūdu joslas ir ievērojami šaurākas attiecībā uz

pašreizējo rezultātu vidējām līknēm. Pēdējais īpaši attiecas uz gadījumu ar ML, kas parādīts (b), kur STA bija daudz zemāks nekā attēlu secībā, kas atbilst (a). Tas norāda, ka jauna pieeja patiešām nodrošina ievērojamus uzlabojumus ne tikai burbuļu noteikšanā, bet arī formas robežu izšķirtspējā. Eksperimentāli iegūtie rezultāti [153] diezgan labi saskanēja ar veiktajām simulācijām, kas nozīmē, ka līdz ar to ir netieša, taču būtiska piedāvātās pieejas validācija.

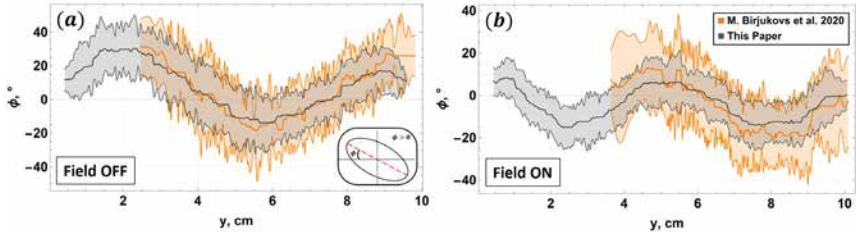


FIG. 17. Burbuļa slīpuma leņķis pret pacēlumu (vidējās līknes un kļūdu joslas) virs FOV apakšējās daļas (a) gadījumam bez ML (Attēli 15a un b) un (b) ar pieliktu  $\sim 265$  mT HML (Attēli 15c un d), abos gadījumos ar plūsmas ātrumu 100 *scm*. Oranžā krāsā ir norādīti iepriekšējie rezultāti [153], un pašreizējie rezultāti ir parādīti pelēkā krāsā. Slīpuma leņķa definīcija ir parādīta (a) apakšējā labajā stūrī.

Izstrādātā pieeja tika piemērota arī jauniegūtajiem datiem, lai nodrošinātu koda izvades konsekveni dažādiem eksperimentāliem datiem — viens jauno rezultātu gadījums ir parādīts Attēlā 18. Atkal, burbuļi tiek izskirti visā FOV visos trīs parādītajos gadījumos. Burbuļu dinamikas padziļināta fiziskā analīze neietilpst šī darba ietvaros un ir paredzēta turpmākiem rakstiem.

Lai gan nevar pārbaudīt, cik burbuļu attēla apstrādes kods faktiski nav atklājis (bez manuālas pārbaudes), var novērtēt detekcijas notikumu skaitu, kas tiek izslēgti kā kļūdaini pozitīvi dažādos attēlu secības koda izpildes posmos. Rezultāti piecām iepriekš apskatītajām attēlu secībām (Attēli 15 un 18) ir parādīti tabulā ???. Jāņem vērā, ka visgrūtākajā gadījumā no pieciem (Attēls 15d) lielāko daļu darba veic SVPL filtrs un loģiskais (objekta īpašību) filtrs. Tomēr MRIF iekšējā filtrēšanas jauda ir nozīmīga, jo tā filtrē detekcijas notikumus, kas, ļoti iespējams, būtu izturējuši abus nākampos.

Attiecībā uz eksperimentālu pārbaudi, vai iepriekš minētās metodes patiešām darbojas pareizi, izstrādātais attēlu apstrādes algoritms vispirms tiek apstiprināts, piemērojot to stacionāra etalona ķermeņa attēliem. Šeit tiek aplūkoti trīs attēlveidošanas gadījumi: neitronu plūsmas pārraide caur

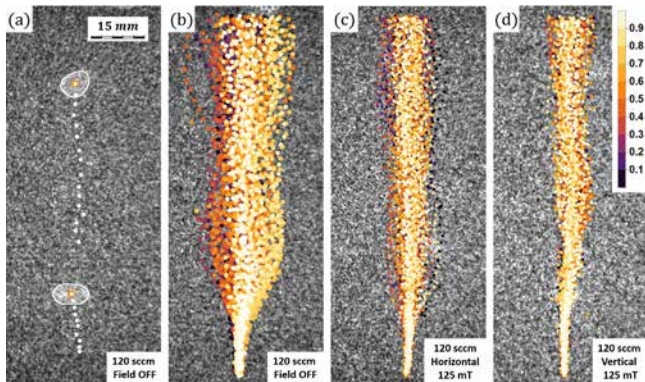


FIG. 18. Burbuļu atrašanās vietas, kas noteiktas FOV 3000 attēlu secībai (30 sekundes) ar plūsmas ātrumu 120 *sccm* jaunajai modeļa sistēmai: (a) detektēto burbuļu piemērs: baltas kontūras ir formas, oranži punkti ir pašreizējās pozīcijas, un baltie punkti ir iepriekšējās pozīcijas; (b-d) visas atklātās burbuļu pozīcijas (b) bez ML, (c) ar  $\sim 125$  *mT* HML un (d)  $\sim 125$  *mT* VML. Burbuļu atrašanās vietas (b-d) ir atzīmētas kā Attēlā 15. Visi apakšskaitļi ir vienā mērogā.

Attēlu sekvence	MRIF	Algoritms 5	Loģiskais filtrs	Kopā	Atlikums
Attēls 15b	1.75	2.63	1.21	5.49	94.5
Attēls 15d	1.51	4.63	6.80	12.5	87.5
Attēls 18b	1.53	2.05	1.25	4.76	95.2
Attēls 18c	0.71	0.51	0.18	1.39	98.6
Attēls 18d	1.62	0.89	0.32	2.81	97.2

TABLE I. Viltus pozitīvo detekciju izslēgšanas rādītāji (%) trīs posmos: MRIF, SVPL (Algoritms 5) un loģiskais filtrs (attiecībā uz ievadi, ko katrs filtrs saņem). Parādīts arī kopējais visu filtru izslēgto burbuļu relatīvais daudzums.

īsāko ķermeņa asi, garāko asi un pēdējā ar papildu attālumumu no ķermeņa līdz scintilatoram. Tādējādi neitronu caurspīdīgā sfēriskā dobuma STA šajos gadījumos pakāpeniski samazinās. Tas ir parādīts Attēlā 19.

Etalona ķermeņa neitronu radiogrāfijas attēls (nedaudz slīps) ir parādīts (a), kur var redzēt taisnstūrveida misiņa objektu (tumšāks) un sfēriskā tukšuma aplveida projekciju (spilgtāks), kā arī apkārtējo fonu gaisa ietekmē. Neitronu pārraide (a) gadījumā notiek gar īsāko no ķermeņa asīm. Visos trīs attēlveidošanas gadījumos attēli tiek apgriezti, kā norādīts (a). Piemēri apgrieztiem attēliem ar ķermeņa sfērisku tukšumu ar ekspozīciju, kas ir ļoti līdzīga ( $\sim 1,3\times$ ) kā burbuļu attēliem (100 kadri sekundē,  $\sim 1,3\times$

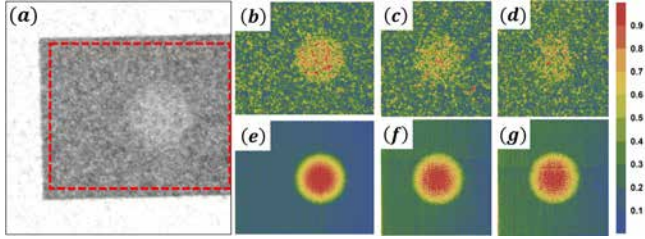


FIG. 19. Statiskais etalona ķermeņis: a) radiogrāfijas piemērs; (b-c) normalizēti attēli (nogriezti, kā norādīts (a)), kuros neitronu plūsma pārraidīta attiecīgi caur isāko asi, garāko asi un pedējo ar papildu attālumu līdz scintilatoram; (e-g) normalizēti vidējā spilgtuma attēli attiecīgajiem gadījumiem. Krāsu josla dota labajā pusē.

neitronu plūsma) ir parādīti (b-d) attiecīgi trim iepriekš uzskaitītajiem gadījumiem. Atbilstošie vidējā spilgtuma attēli, kas parādīti (e-g), tika iegūti, aprēķinot vidējo vērtību visās ierakstītajās attēlu secībās – šie vidējie attēli tiek izmantoti, lai iegūtu etalona formas. Attēlu apstrādes koda atklātās formas tādos attēlos kā (b–d) pēc tam tiek salīdzinātas ar etalonu, lai aprēķinātu formas noteikšanas kļūdu metrikas. Jāņem vērā, ka visi attēli, kas redzami Attēlā 19, ir izmantoti validācijai, ir iegūti no neapstrādātiem attēliem, veicot priekšapstrādi tāpat kā burbulplūsmas attēliem. Attēliem, kas parādīti Attēlā 19, ir attēla sānu garuma un sfēras diametra attiecība, kas ir ļoti līdzīga MRIF AL attēla malu garuma attiecībai.

Etalona formas Attēlā 19e-g tiek iegūtas, kā paskaidrots [158]. Lai nodrošinātu godīgu verifikāciju, etalona ķermeņa attēliem tiek lietoti gan globālie (Algoritms 2), gan lokālie (Algoritms 4) filtri ar parametriem, kas ir identiski tiem, kas izmantoti burbuļu attēliem. Kustīga atskaites ķermeņa radiogrāfijas principi ir tādi paši kā iepriekš, tikai ķermeņis tagad ir piestiprināts pie oscilējoša svārstī, un tādejādi ķermeņis pārvietojas uz priekšu un atpakaļ pa FOV, kā parādīts [158].

Kustība galvenokārt ir horizontāla un sākotnēji tiek stipri slāpēta, līdz svārstī amplitūda sasniedz stāvokli, kurā tās svārstības uzrāda ļoti lēnu nodilšanu. Tās ļauj noteikt kļūdu metriku dinamiku un novērtēt kustības izplūšanas artefaktu ietekmi, ķermeņim un tajā esošajam sfēriskam dobumam palēninoties. Šeit, pirms apgrieztajiem etalona dobuma attēliem var lietot globālos un lokālos filtrus, vispirms ir nepieciešams segmentēt ķermeņi FOV ietvaros, apgriezt maskēto attēlu līdz AL ap maskas centroīdu, pēc vajadzības labojot AL attēlus un pēc tam lietojot filtrus. Šī procedūra ir nedaudz vairāk sarežģīta nekā stacionāram atsauces korpusam, un tā ir izklāstīta un parādīta [158]. Pēc tam iegūtie etalona ķermeņa attēlu reģioni

tiek izmantoti kā globālo un lokālo filtru ievade. Iestatījumi globālajiem un lokālajiem filtriem ir tādi paši kā stacionāro etalona ķermeņu gadījumos.

Sīkāka informācija par eksperimentālo verifikāciju ir ārpus šī kopsavilkuma mērķa un mēroga, taču ir sniegta [158], kur kļūdu metrikas un to statistika, kā arī kustības izplūšanas un sintētisko artefaktu ietekme (sliktākais scenārijs) tiek pētīti. Apkopojot to īsumā šeit, tika konstatēts, ka formas noteikšanas kļūdas bija pieņemamās robežās pat lieliem ķermeņa ātrumiem, un lokālā filtrēšana faktiski nodrošināja ievērojamus uzlabojumus salīdzinājumā ar pirmajiem novērtējumiem. Novērotās kļūdas arī atbilda attēlveidošanas apstākļiem, un neveiksmīgas etalona ķermeņu detektēšanas frekvences bija diezgan niecīgas.

### 3. Kopsavilkums

Ir izstrādāts atbilstošs eksperimentāls uzstādījums un veikta burbuļu plūsmas neitronu radiogrāfija 30 mm biežā modeļa sistēmā, gāzes plūsmas ātrumiem 0-1200 sccm diapazonā bez ML, kā arī ar {75, 125, 200, 265} mT HML un {75, 125} mT VML burbuļplūsmas reģionā. Tas aptver lielu un rūpnieciski nozīmīgu apgabalu (*Re, Eo, N*) pētāmās samazinātās modeļa sistēmas parametru telpā, un veido unikālu un visaptverošu datu kopu. Tika veikti etalona neitronu radiogrāfijas eksperimenti ar  $4 \times$  un  $\sim 11 \times$  neitronu plūsmu. Lielāka neitronu plūsma arī tika izmantota radiogrāfijai ar kadru uzņemšanas ātrumu līdz 600 sekundē, kam nākotnē vajadzētu palīdzēt padziļināti analizēt burbuļu formas izmaiņas, izmantojot uz attēlu balstītus virsmas deformācijas ātruma mērījumus – pēdējo var izmantot skaitlisko modeļu verifikācijai.

Ir izstrādāta arī attēlu apstrādes metodoloģija, lai analizētu iegūtos attēlus ar zemu STA, un sniegti pierādījumi, tostarp eksperimentāla validācija, ka pašreizējai metodoloģijai jābūt droši pielietojamai neitronu radiogrāfijas attēliem, kas iegūti modeļu sistēmām ar burbuļu ķēdes plūsmu – var arī sagaidīt fiziski nozīmīgus rezultātus ar pietiekami mazām kļūdām. Izmantojot iepriekš minēto eksperimentālo datu kopu, nākotnē var iegūt daudz jaunu fizikālu ieskatu. Paredzams, ka izstrādātajam attēlu apstrādes kodam un/vai atsevišķiem tā elementiem jābūt pielietojamiem ārpus pašreizējā pielietojuma un konteksta, kas tiks parādīts arī tālāk šajā darbā. Attēlu apstrādes kods ir pieejams vietnē *GitHub*: Mihails-Birjukovs/Low\_C-STA\_Bubble\_Detection.

Augšminētais kods ļāva novērot un kvantitatīvi noteikt atšķirības starp burbuļu plūsmas režīmiem dažādiem plūsmas ātrumiem un ML konfigurācijām. Tika parādīts, ka atkarībā no ML konfigurācijas rodas radikāli atšķirīgi 1-burbuļa un burbuļu ķēdes plūsmas režīmi. Piemēram, fiksētam plūsmas ātrumam burbuļiem ķēdē var būt gandrīz nemainīgs, divpakāpju vai vienpakāpju nevienmērīgs paātrinājums, katram ar ievērojami atšķirīgām trajektorijām, ātruma un formas dinamiku. Tas ir skaidra demonstrācija tam, ka burbuļu plūsmas kontrole ar ML, rūpnieciski nozīmīgiem bezdimensiju parametriem, ir perspektīvs koncepts.

Tika veikti arī papildus etalona radiogrāfijas eksperimenti ar īpaši lielām kadru frekvencēm (līdz 800 KS), kurus plānots izmantot kā atskaites punktu burbuļu formas dinamikas skaitliskiem modeļiem, kā arī tālākai eksperimentālu datu analīzes rīku izstrādei.

Atsevišķi ir vērts pieminēt, ka tika izstrādātas vairākas attēlu apstrādes metodes, kuras potenciāli var būt ļoti plaši pielietojamas zinātnieku aprindās, proti: *multiscale recursive interrogation filter* (MRIF), *soft color tone map masking* (SCTMM) un uz spilgtumu balstītu viltus pozitīvo likvidēšanu (SVLP), kas var darboties kombinācijā ar SCTMM.

## B. Burbuļu ķēdes plūsmas rentgenstaru radiogrāfija šķidrā metālā

Papildus dinamiskās NR eksperimentiem ar biežākām sistēmām, Hele-Šova sistēmām tiek veikta RR, kā arī izstrādāti nepieciešamie attēlu apstrādes un burbuļu formas analīzes rīki. Lai gan šie rezultāti vēl nav publicēti, tie ir nozīmīgs pavērsiens šī promocijas darba kontekstā.

### 1. Attēlu iegūšana & īpašības

Iepriekš burbuļu saplūšana un sadalīšanās tika pētīta sistēmās ar 12 mm šķidrā metāla biezumu, izmantojot RR [29, 30]. Šeit tiek pētītas daudz ierobežotākas sistēmas, kuru biezums ir 3- un 6 mm, attēlotas attiecīgi ar gāzes plūsmas ātrumu 50-400 un 50-685 *scm*. Attēlveidošana ar norādītajiem plūsmas ātruma diapazoniem tika veikta tām pašām ML konfigurācijām, kas aplūkotas Sadaļā II A 2 a. Liela gāzes tilpuma iepludināšana plakanās metāla tvertnēs veicina spēcīgāku burbuļu saplacināšanos un deformācijas, kā arī padara biežākas un intensīvākas burbuļu sadursmes, aglomerāciju, sadalīšanos un saplūšanu, ko izraisa daļēja tvertnes aizsprostošanās ar augšupejošiem burbuļiem. Tas ir skaidri redzams Attēlā 20. Izmantojot RR iestatījumu, kas ir līdzīgs [30], tiek novērots plašs dažādu burbuļu formu klāsts. To noteikšanai un aprakstīšanai nepieciešama īpaša pieeja. Turklāt aglomerācijas dēļ, starp burbuļiem precīzi jāizdala plānas metāla plēves. To vēl vairāk apgrūtina diezgan spēcīgs multiplikatīvais troksnis, kas novērojams šajās plānās plēvēs.

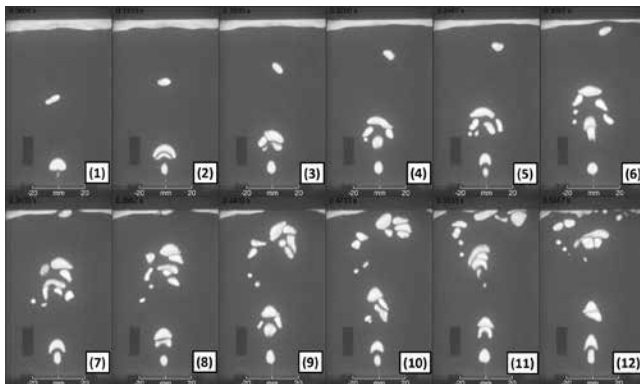


FIG. 20. RR attēli argona burbuļiem 3 mm biežā traukā ar galinstānu. Skaitļi norāda kadru secību.

## 2. Attēlu apstrāde

Iepriekš minētais nozīmē, ka būtu grūti izveidot vienkāršu globālu filtru, kas varētu pareizi segmentēt burbuļus, izšķirot starp tām plānās šķidrā metāla plēves. Tomēr var izmantot metodes, kas iepriekš izstrādātas burbuļu plūsmas NR Sadalā II A 2 b. Konkrētāk, burbuļu detektēšana tāpat ir sadalīta divās fāzēs: lokālā un globālā, un tiek izmantots MRIF (Algoritms 3), bet maksimālais rekursijas dziļums ir ierobežots līdz  $R = 1$ , jo STA novērojams Attēlā 20 ir ievērojami labāks nekā NR gadījumā (Attēls 9). Jāņem vērā, ka arī šeit tiek izmantota priekšapstrādes procedūra, kas ir identiska tai, kas izmantota NR attēliem. Tādējādi PLK operācijas dēļ attēla STA arī ir mainīgs visā FOV.

Visa attēla apstrādes procedūra ir aprakstīta Algoritmā 6. Provizorisks segmentēšanas sliekšnis tiek noteikts visai attēlu secībai kā vidējais lielums visiem atsevišķajiem attēliem, izmantojot Kapura (angl. *Kapur*) histogrammas entropijas metodi [169]. Pēc tam visiem analizētajā secībā esošajiem attēliem tiek piemērota Gausa filtrēšana un tiek veikta segmentācija, izmantojot globālo sliekšni. Turklāt segmenti tiek pakļauti izmēra sliekšnim. Tas noslēdz globālās filtrēšanas posmu. Nākamajā etapā katram noteiktajam segmentam tiek veikta lokālā filtrēšana. Tāpat kā Algoritmā 3, AL tiek ģenerēti segmentiem, pamatojoties uz to centroidām un apgabaliem [158], taču ar nelielām izmaiņām. Šajā gadījumā AL nav kvadrāti, bet gan taisnstūri, kas pielāgojas aprēķināto burbuļa segmentu malu attiecībai.

Kad kadrām ir uzģenerēti AL, katrs tiek apstrādāts ar lokālo filtru, kas darbojas šādi (parādīts Attēlā 21). Pirmkārt, tiek izmantots nelokālās vidējošanas (NV) filtrs ar nelielu kodolu [170–172], lai palielinātu STA burbuļiem un spraugām starp tiem, vienlaikus saglabājot pēdējo formu bez ievērojama KTA samazinājuma (Attēls 21b ir ievade, un (c) ir izvade). Pēc tam filtrētajam AL attēlam tiek veikta lokālā adaptīvā (LA) binarizācija [173] — tā rada labi segmentētas burbuļu iekšpusi, bet gana erodētas robežas. Turklāt tiek ņemtas maskas robežas komponentes, un burbuļu iekšējie segmenti tiek salaboti, izmantojot aizpildīšanas transformāciju, izmēra sliekšni, morfoloģiskās erozijas un atvēršanas darbības (šajā secībā). Tomēr nākamie soļi to risina: pirmkārt, tiek veikta gradienta filtrēšana (Gausa regularizācija ar Besela atvasinājuma kodolu), ievērojami palielinot burbuļu robežu un šķidrā metāla plēvju KTA starp tām (Attēls 21d); otrkārt, attēls tiek normalizēts un tiek lietota LA binarizācija, taču ar daudz mazāku sliekšņa aprēķinu kodolu (1 *px* pēc noklusējuma) — tādējādi tiek iegūtas segmentētas burbuļa robežu kontūras, kā parādīts Attēlā 21e, bet, protams, burbuļu iekšpusi nav segmentētas. Šeit notiek kritiskais solis: tiek apvienotas iekšējās un robežu segmentu maskas, kas iegūtas attiecīgi Soļos 7 un 10.



---

**Algorithm 6:** Burbuļu segmentācija no iepriekš apstrādātiem FOV attēliem

---

**Ievade:** Normalizēti priekšapstrādāti attēli

*Globāla filtrēšana*

- 1 Nosaka attēlu secības sākotnējo segmentācijas sliekšni
- 2 Gausa filtrēšana
- 3 Segmentēšana, izmantojot sākotnējo sliekšni (Solis 1)
- 4 Filtrēšana pēc izmēra

*Lokālā filtrēšana*

*Katram detektētajam segmentam:*

- 5 Izveido aptaujas logus (AL), līdzīgi AL Algoritmā 3
- 6 Nelokālās vidējošanas (NV) filtrēšanas
- 7 Lokāli adaptīva (LA) binarizācija
- 8 Segmentu atjaunošana
- 9 Gradianta filtru (Gausa regularizācija & Beseļa atvasinājumu kodols) pielieto 6. Soļa izvadi
- 10 Attēlu normalizāciju & LA binarizāciju pielieto gradianta filtra izvadi
- 11 Apvieno binārās maskas, kuras tika izveidotas Soļos 7 & 10

*Segmentu atjaunošana & rekombinācija*

- 12 Segmentu atjaunošana
- 13 Burbuļu segmentu kartēšana uz FOV attēlu

**Izvade:** attēla maska ar burbuļu segmentiem priekš FOV

---

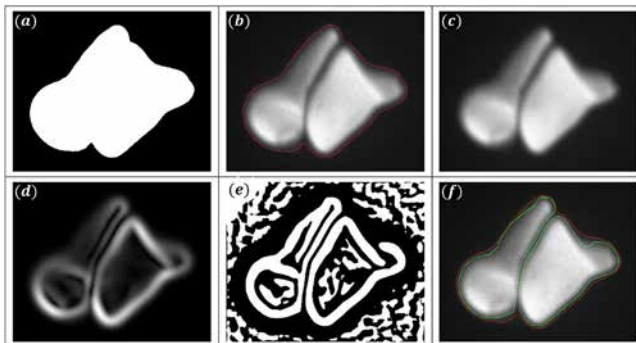


FIG. 21. Lokālā filtrēšana AL: (a) burbuļa segments, ko novērtē globālais filtrs, (b) lokālais AL attēls ar aprēķinātā segmenta kontūrām (sarkans), (c) NV filtra izvade, (d) gradianta-filtrēts attēls, (e) LA binarizācija, kas lietota (d), un (f) attēls (b) ar atjaunināto burbuļu segmentu robežām (zaļā krāsā) pēc Algoritma 6 12. & 13. Soļiem.

Visbeidzot, kombinētās maskas tiek pakļautas citai segmentu atjaunošanas procedūrai, kura ietver sekojošo. Vispirms (e) tiek piemērota aizpildīšanas transformācija, kam seko morfoloģiskā atveršana un robežu komponentu dzēšana — tas novērš smalkās struktūras, kas redzamas ap burbuļu segmentiem (e), un, ja iespējams, aizpilda burbuļu segmentu iekšpusi. Pēc tam izmēra sliekšnis noņem visus atlikušos artefaktus. Otrajā restaurācijas posmā tiek apstrādāti visi atlikušie burbuļa segmenti, kas nav aizpildīti, piemēram jo apvienotajām iekšpusēm un robežām maskām neizdevās pilnībā rekonstruēt kādus burbuļus. Tas sākas ar iepriekšējo darbību rezultātā iegūtās AL maskas sadalīšanu atsevišķās maskās katram jaunizveidotajam segmentam. Pēc tam tiek mēģināts atjaunot robežu nepārtrauktību, lai tās būtu slēgtas un burbuļu segmentus varētu aizpildīt. Atdalītajiem segmentiem tiek piemērotas aizvēršanas un aizpildīšanas transformācijas, un izvade tiek binārizēta ar Otsu metodi, un apvienota vienā AL maskā. Visbeidzot, galīgo rezultātu, kas redzams (f), iegūst, piemērojot (c) Otsu binārizāciju un pēc tam atņemot apgriezto kombinēto masku. Šī pēdējā darbība izgriež plānās kārtiņas starp burbuļiem un apgriež burbuļu robežas, kas ir vērstas prom no plēvēm, kā rezultātā tiek iegūts precīzāks burbuļa segmenta novērtējums. Tika konstatēts, ka šī procedūra droši atdala sākotnēji neizšķirtas burbuļu kopas (a) atsevišķos burbuļos, vienlaikus diezgan labi saglabājot to formas. Tas spēj arī izšķirt starpburuļu attālumu līdz  $\sim 5-10 \text{ px}$  biezumam, kas ir ļoti labi, ņemot vērā, ka pilnais FOV attēla izmērs ir  $\sim 4K \times 2K \text{ px}$ . Jāņem vērā, ka šāda izšķirtspēja tika iestatīta eksperimentiem, lai atvieglotu augšupejošo aglomerēto burbuļu individuālu detektēšanu.

Vairāki piemēri Algoritma 6 darbībai ir parādīti Attēlos 22 un 23.

Papildus 3- un 6-*mm* biezām sistēmām, ir veikta arī 30 *mm* biezu šķidrā metāla slāņu rentgenstaru radiogrāfija, kam pēc citu jomas pētnieku viedokļa nav jābūt praktiski iespējamam. Tas tika panākts, izmantojot rūpnieciskas jaudas rentgenstaru lampas, kas var izvadīt augstākas intensitātes rentgena starus ar lielāku enerģiju, kombinācijā ar dažādiem scintilācijas ekrāniem. Tomēr šie rezultāti vēl nav publicēti vai sistematizēti.

### 3. Burbuļu formas analīze

Kad burbuļi ir segmentēti un noteikti to parametri, piemēram, rentgenstaru transmisijas projekcijas laukums, koordinātas utt., jau var iegūt lielu daļu no FOV notiekošās dinamikas. Tomēr atšķirībā no burbuļu NR gadījuma biežākā šķidrā metāla sistēmās, šeit burbulim ir ļoti nozīmīgas formas variācijas, parasti bez skaidras simetrijas, kā arī ātra stiepšanās un saraušanās, kā arī sadalīšanās un saplūšanās. Tas nozīmē, ka ar vienkāršu

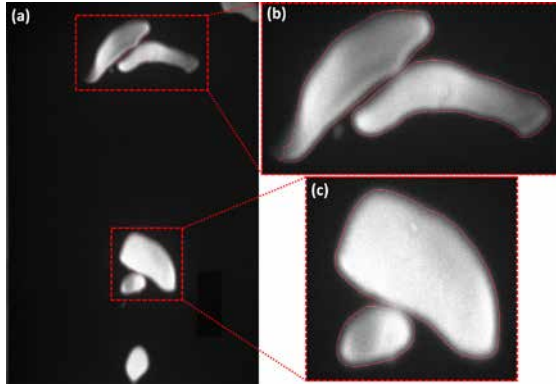


FIG. 22. Algoritma 6 izvide attēlam no vienas no ierakstītajām sekvencēm: (a) viss FOV (priekšapstrādāts) ar detektētajiem burbuļiem, kuri iezīmēti ar sarkanām kontūrām, un (b-c) pietuvināti burbuļu pāru skati ar redzamām starpburbuļu plānām šķidrā metāla plēvēm, kuras algoritms ir izšķīris.

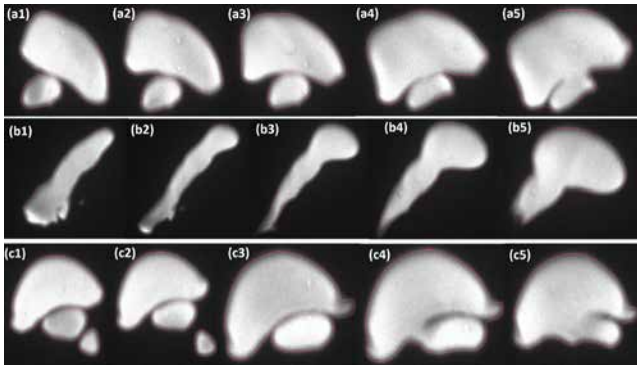


FIG. 23. Izšķirto saplūšanas notikumu un lielo burbuļu deformāciju piemēri. Kadri gadījumos (a-c) ir numurēti hronoloģiski.

formu parametrēšanu nepietiks, un ir jāizstrādā specifiskākas metodes. Ierosinātā formas analīzes procedūra ir izklāstīta Algoritmā 7, un galvenā ideja ir uzskatīt burbuļus kā stipri deformētus un asimetriskus (vispārīgā gadījumā) *airfoils*, t.i., kā aerodinamikā analizētus lidmašīnas spārnu profilus. Tipisks veids, kā aprakstīt aerodinamisko spārnu, ir izveidot tā *camber line* (viduslīnija), kas ir līnija, kas iet cauri aerodinamiskā spārna formai no viena gala līdz otram tā, ka katrā punktā līnija pārgriež spārnu tieši

uz pusēm biežumā. Tātad burbuļa viduslīnijas (BVL) galapunkti ir divi punkti ar vislielāko liekumu gar tā segmenta robežu.

---

**Algorithm 7:** Burbuļu formas analīze

---

**Ievade:** Burbuļu segmentu maskas

*Katrai burbuļa maskai*

- 1 Iegūst segmentu centroidas & robežpunktus
- 2 Izveido robežas režģi
- 3 Robežas līnijas reducēšana, izmantojot liekuma evolūcijas metodi
- 4 Interpolē un palielina izšķirtspēju robežai
- 5 Aprēķina robežas liekuma sadalījumu & atrodiet galējību
- 6 Ramer–Douglas–Peucker (RDP) robežas redukcija
- 7 Uzģenerē Voronoi režģi robežas punktiem & saglabā iekšējos punktus, izmantojot robežas režģi
- 8 Iekšējiem Voronoi punktiem izveido minimālo pārklāšanas grafu (MPG)
- 9 Atrod pārklāšanas grafa sazarojuma punktus
- 10 Uzkonstruē galveno burbuļa viduslīnijas (BVL) daļu
- 11 Pievieno galveno BVL daļu robežai, izmantojot liekuma ekstrēmus kā BVL robežpunktus

**Izvade:** BVL burbuļu segmentiem

---

Tādējādi ir jākonstruē BVL un pareizi jāpiestiprina tā abos galos pie burbuļa robežas. Pēc tam, kad ir atrasti centroidas un robežpunkti segmentiem, kas noteikti ar Algoritmu 6, tiek izveidots robežas režģis, ko izmanto vēlāk. Robežā bieži var būt trokšņi, kas izriet no segmentācijas un kvantēšanas, un abi var traucēt gan BVL konstrukcijai, gan BVL savienojumam ar robežu. Tāpēc, ņemot vērā to, ka arī formas saglabāšana ir svarīga, tika izmantota līknes vienkāršošanas pieeja, kas nozīmē, ka tiek mēģināts samazināt punktu skaitu robežas režģī tā, lai tiktu novērstas trokšņa radīti viltus liekuma ekstrēmi, bet garāka viļņa garuma līknes detaļas saglabājas. Tika konstatēts, ka labus rezultātus var sasniegt, izmantojot liekuma evolūcijas pieeju, īpaši tās variantu, kas piedāvāts [174]. Pēc redukcijas kvantēšanas trokšnis tiek vēl vairāk samazināts, vienmērīgi (pēc līnijas garuma) pārgenerējot robežas punktus ar zempikselu precizitāti, izmantojot slēgtā splaina interpolāciju.

Kad iepriekš minētie sagatavošanās darbi ir paveikti, var izmantot tagad mazāk trokšņainu un augstākas izšķirtspējas robežu, lai aprēķinātu robežas liekuma sadalījumu. Tas tiek darīts pusanalītiski, t.i., izmantojot līnijas liekuma analītisko izteiksmi, bet galīgo diferencu formā. Pēc tam tiek noteikti liekuma ekstrēmi. Pirms BVL konstruēšanas, līknei tiek veikta redukcija, lai izvairītos no pārmerīgas detalizācijas, izmantojot Ramer–Douglas–Peucker (RDP) līknes vienkāršošanas algoritmu [175]. BVL konstruēšana tiek veikta vairākos posmos. Pirmkārt, jāatzīmē, ka

BVL zīmēšana caur slēgtu formu ir līdzvērtīga (vismaz asimptotiski, ja robežas izšķirtspējai ir tendence uz bezgalību) Voronoi režģa aprēķināšanai robežpunktiem, un tikai iekšējo punktu saglabāšanai. Pirmā ir diezgan standarta darbība, savukārt otrā tiek veikta, noņemot Voronoi tīkla punktus, kas neietilpst Algoritma 7 2. Solī iegūtajā robežapgabalā. Šajā brīdī ir BVL, kurā ir vairāki "dendrīti", kas stiepjas uz robežas augstāka liekuma apgabaliem, bet nav ar tām savienotas. Ir jānosaka "patiesais" BVL, izsekojot pareizo ceļu caur ģenerētajiem Voronoi punktiem. Intuitīvi liekuma ekstrēmumi, kur BVL savienojas ar formas robežu, jābūt maksimāli attālinātiem savā starpā, kā tas ir gadījumā ar aerodinamisko spārnu analīzi, kas iedvesmoja šo pieeju. Tomēr kopumā tas tā var nebūt *precīzi*. Šo problēmu var atrisināt, vispirms nosakot Voronoi punktu minimālo pārklāšanas grafu, pēc tam identificējot tā dendrītu galapunktus kā grafa mezglus ar virsotnes pakāpi vienādu ar 1. Pēc tam par BVL tiek izvēlēts garākais no ceļiem starp visiem iespējamajiem galapunktiem. Visbeidzot, BVL tiek pagarināts pret robežu, savienojot abus tā galus ar attiecīgo tuvāko liekuma ekstrēmu. Lai gan pēdējais ir diezgan naivs risinājums, algoritma iepriekšējo darbību rezultātā tas vairumā gadījumu darbojas. Rezultātu piemēri, kas iegūti, izmantojot Algoritmu 7, ir parādīti Attēlos 24 un 25.

Tālāk var aprēķināt burbuļa biezuma sadalījumu gar BVL, BVL liekumu un garumu utt., tādā veidā aprakstot burbuļa formas nelīdzenumus un sniedzot ieskatu par to, kā burbuļi sadalās vai saplūst (piemēram, Attēli 24d un 24e). Var arī izveidot galveno horda līniju (GHL), kas savieno BVL galapunktus — GHL garuma attiecība pret BVL garumu ir burbuļa eliptiskuma mērs; attāluma profili starp GHL un BVL tuvākajiem punktiem un to integrāļi virs GHL loka garuma raksturo burbuļa lieces un nelīdzenuma pakāpi (piemēram, Attēli 24a, 24b, 24c). GHL orientācija nelielām momentānām burbuļu deformācijām informē par rotācijas kustību. Turklāt var iegūt biezuma sadalījumus metāla plēvēm, kas atdala aglomerētos burbuļus, lai pētītu to mijiedarbību. Visbeidzot, iegūstot BVL, to var izmantot precīzētām burbuļa centroīdas novērtējumam. Attēlā 25 parādīts, kā kods apstrādā dažādas burbuļu formas un burbuļu saplūšanu kadru sērijās.

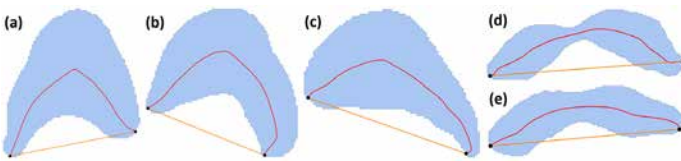


FIG. 24. Burbuļu segmentu režģu piemēri ar BVL (sarkans) un GHL (oranžs).

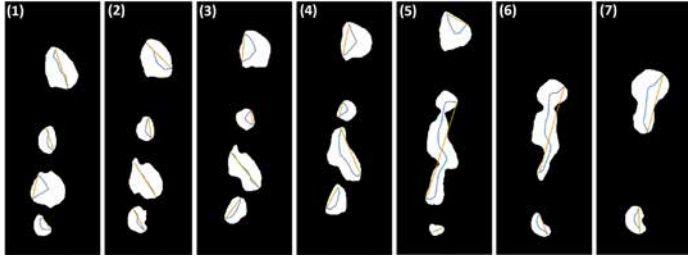


FIG. 25. Demonstrācija formas analīzes algoritma darbībai kadru secībā — kadri tiek numurēti hronoloģiski. Šeit BVL ir zilas līnijas un GHL ir oranžas.

#### 4. Kopsavilkums

Burbuļu plūsmas rentgenstaru radiogrāfija Hele-Šova variantiem sistēmām, kas aplūkotas Sadaļā II A 2 a, ir veikta ar gāzes plūsmas ātrumiem  $50-400$  un  $50-685 \text{ cm}^3/\text{min}$ , attiecīgi  $3-$  un  $6 \text{ mm}$  šķidrā metāla biezumiem. Radiogrāfija ar norādītajiem plūsmas ātruma diapazoniem tika veikta tām pašām ML konfigurācijām kā Sadaļā II A 2 a. Pirmo reizi rentģenu radiogrāfija ir veikta arī  $30 \text{ mm}$  bieziem šķidrā metāla slāņiem, izmantojot rūpnieciskas jaudas rentģena lampas ar intensīvākiem un augstākas enerģijas rentģena stariem un dažādus scintilācijas ekrānus.

Lai analizētu rentģena attēlus ar blīvi aglomerētiem burbuļiem, kas atdalīti ar plānām metāla plēvēm, kuras ietekmē multiplikatīvais troksnis, ir izstrādāts attēlu apstrādes kods, kas spēj šīs plēves droši izšķirt. Tas var segmentēt burbuļu kopas, kā arī apstrādāt burbuļu saplūšanas/sadalīšanas notikumus, un intensīvas un pēkšņas burbuļu deformācijas. Turklāt ir ieviests īpašs burbuļu formas analīzes kods, kam vajadzētu palīdzēt padziļināti analizēt burbuļu mijiedarbību. Attēlu apstrādes kods ir atvērtā koda, un ir pieejams vietnē *GitHub*: [4n515/X-ray-bubble-detection](https://github.com/4n515/X-ray-bubble-detection). Formas analīzes kods arī ir publicēts vietnē *GitHub*: [Mihails-Birjukovs/Bubble\\_shape\\_analysis](https://github.com/Mihails-Birjukovs/Bubble_shape_analysis).

## C. Burbuļu trajektoriju rekonstrukcija

### 1. MHT-X jēdziens

Vairāku hipotēžu izsekošanas (angl. MHT) algoritms tiek klasiski uzskatīts par visuzticamāko algoritmu, ar ko atrast optimālo risinājumu datu asociācijas problēmām [176–180]. Tomēr tas tiek reti izmantots tiešsaistes pielietojumiem, jo tam ir  $\mathcal{O}(n) = 2^n$  skaitliskā sarežģītība, kur  $n$  ir asociāciju skaits. Ir bijuši mēģinājumi risināt izsekošanas problēmu ar citām metodēm, bet tas ir kompromiss ar precizitātes apmaiņu pret ātrākiem aprēķiniem [176, 178]. Ir iespējams reducēt efektīvo  $n$  priekš MHT, bet tas neietekmē sarežģītības mērogošanos, kas ir nelabvēlīga lielizmēra problēmām, kuras bieži sagaidāmas zinātniskajā darbībā. Kopš tā izveides, MHT galvenokārt ir ticis izmantots tiešsaistes izsekošanas problēmām (militārās, novērošanas, transporta un citas saistītās jomās), savukārt pētnieciskiem nolūkiem tas tiešsaistes formā lielākoties nav bijis nepieciešams [176].

Šajā darbā tiek prezentēta jauna un optimizēta MHT pieeja, paturot precizitāti un krasi samazinot aprēķinu laiku lielākajai daļai gadījumu. Optimālo asociāciju kombinācijas meklēšana tiek formulēta kā tiešās nokļāšanas problēma (angl. *exact cover*), kas tiek risināta ar *Algoritmu X* [181] (tāpēc algoritms tiek saukts par MHT-X). Ar šādu metodi ir iespējams noklāt visu iespējamo risinājumu kopu, automatiski izslēdzot neiespējamus. MHT-X tika veidots, lai tas spētu risināt izsekošanu ar ievērojamām formas oscilācijām un parametru variāciju objektiem, kas tipiski sastopami daudzfāzu hidrodinamiskās sistēmās (piemēram, burbuļu un daļiņu plūsmas). Orientēta grafa reprezentācija asociāciju glabāšanai tika izvēlēta tās intuitīvās interpretācijas dēļ, un šī izvēle padara algoritma struktūru konceptuāli vieglāk implementējamu un uzlabojamu priekš nepieciešamajiem pielietojumiem [177].

### 2. Algoritms

Algoritms sākas ar inicializācijas soli, kurā no datiem tiek konstruēts sākotnējais grafs. Tad viss grafs tiek skenēts laikā ( $t$ ) ar pakāpeniski pieaugošu laika loga platumu ( $\Delta t$ ), un ar katru loga platumu vērtību tiek izšķirtas asociācijas dažādos laika mērogos. Atrisinātās asociācijas tiek glabātas kā šķautnes orientētajā grafā, kur virsotnes ir objektu detekcijas notikumi.

Katru reizi, kad tiek izvēlēta jauna  $\Delta t$ , šķautnes ar vismazākajām varbūtībām tiek dzēstas un grafs tiek atkārtoti skenēts laikā. Katrā laika

solī tiek izpildītas sekojošās operācijas:

1. Atrod objektus ar nenoteiktu sākumu vai beigām
2. Veido asociācijas starp šiem objektiem
3. Atrod optimālo asociāciju kopu
4. Risinājums tiek pievienots grafam

Laika loga platums sākumā ir 1 (tiek apskatīti tikai blakus esošie kadri), un tas iteratīvi tiek palielināts līdz vērtībai, kura ir uzticama, ņemot vērā izmantotās ekstrapolācijas metodes. Tas ir, kad izsekošana sniedz rezultātus ar nefizikālām trajektorijām, pēkšņiem pārrāvumiem, lēcieniem un/vai oscilācijām, maksimālais loga platums ir pārāk liels. Raksturotā algoritma diagramma ir redzama Attēlā 26.

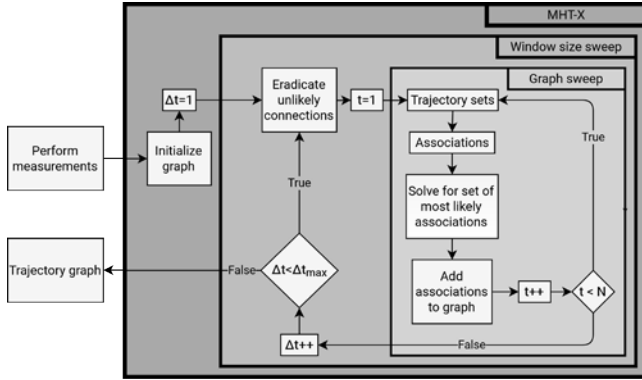


FIG. 26. MHT-X algoritma diagramma.

Tā kā algoritms ir netiešsaistes, tā darbībai ir nepieciešams padot uzreiz visu detektēto objektu mērījumu kopu visā apskatāmajā laikā. Šajā gadījumā šie mērījumi ir objektu koordinātes un projekcijas laukumi, kas rodas optiskās/rentgenstaru/neitronu transmisijas rezultātā, kā arī mērījuma laiks. Tomēr vispārīgi šie mērījumi var ietvert jebcik un jebkādas lielumus – to, kādi tie ir, nosaka problēma, kurai tiek pielietots MHT-X.

Laikā vēsta orientēta grafa struktūra ir dabiska reprezentācija priekš MHT un esošajai problēmai, jo tā vietā lai atsevišķi konstruētu trajektorijas, tās jau dabiski izriet no datu struktūras. Orientētais grafs sastāv no virsotnēm, šķautnēm un šķautņu funkcijas. Virsotņu kopa reprezentē detekcijas un divas *īpašās virsotnes*, kuras ir *Ieeja* un *Izeja* – mākslīgās virsotnes (bez laika vai telpas koordinātēm), kas reprezentē visu trajektoriju sākumus un beigas. Šķautnes ir asociācijas starp virsotnēm, un katrai šķautnei tiek piemērota varbūtība  $p$ , kuru šķautņu funkcija



piekārtu katrai šķautnei. Virsotņu asociācijas tiek orientētas līdz ar laika ritēšanas virzienu. Šķautnēm, kas savieno virsotnes ar īpašajām virsotnēm, piemēro vērtību  $p$ , kas norāda varbūtību, ka esošā virsotne ir trajektorijas sākums/beigas. Vairākas šķautnes kas iziet vai ieiet vienā virsotnē reprezentē šķelšanās/saplūšanas notikumus. Visām virsotnēm šādā konfigurācijā tiek piesaistīta vienāda varbūtība, kas atbilst notikuma varbūtībai. Orientētais grafs, kas rezultējas no šī algoritma, satur visas atrastās trajektorijas, kur tās ir loģiski savienotas ar šķelšanās/saplūšanas notikumiem [182].

Trajektorija ir secīgi savienotu detekciju kopa, kuras elementi tika reģistrēti dažādos laikos – šajā kontekstā tās ir virsotnes, kas ir savienotas ar šķautnēm un atrodas starp īpašajām virsotnēm un/vai šķelšanās/apvienošanās notikumiem. Šķelšanās un apvienošanās gadījumos, sākotnējās trajektorijas tiek pārtrauktas un tiek radītas jaunas. Šādos gadījumos rodas vairākas savstarpēji savienotas trajektorijas, šeit dēvētas par *trajektoriju ģimenēm*. Detekcijas, kas ir savienotas tikai ar īpašajām virsotnēm, ir uzskatāmas par nepatiesām detekcijām (burbuļi un daļiņas nevar parādīties tikai vienā kadrā un uzreiz pazust). Šī īpašība nav specifiski implementēta, bet gan pašizrietoša no algoritma uzbūves. Trajektoriju ekstrapolācija ir izšķiroša daļa no rekonstrukcijas proces, līdz ar to kvantitatīvs modelis ir nepieciešams. Priekš MHD daudzfazu plūsmas, šī versija pielieto naivu, vispārīgu ekstrapolācijas pieeju: saliktaš polinomu funkcijas, parametrizētas pēc laika. Šo polinomu pieskares tad izmanto ekstrapolācijai [182].

Inicializācijas soli no detekcijām tiek definētas grafa virsotnes. Svarīga darbība šajā solī ir robežnosacījumu ģenerēšana. Ir zināms *a priori*, ka visas virsotnes laikos  $t = 1$  un  $t = N$  ir trajektoriju gala punkti. Kā sākuma nosacījums algoritmā visas detekciju virsotnes tiek savienotas ar abām īpašajām virsotnēm un katrai šķautnei šajā solī tiek piemērota varbūtība sekojot robežnosacījumam [182].

*Grafa skenēšana* ir galvenā algoritma komponente, kura iteratīvi veido hipotēzes, tās izvērtē, atrod optimālo hipotēžu kombināciju un to pievieno grafam. Katrs grafa skenēšanas cikls tiek veikts ar fiksētu  $\Delta t$  vērtību, kura nosaka, cik daudzi kadri tiks apskatīti katrā solī ( $\Delta t + 1$ ). Šis laika logs tad tiek translēts uz priekšu laikā, kadru pēc kadra, definējot jaunas šķautnes katrā solī.

Pašreizējā implementācijā tas tiek darīts atkārtoti, veidojot *laika loga platuma skenēšanu*. Pēc tam, kad ir izveidots sākotnējais pilnībā savienots grafs un tiek veikta malu izslēgšana (skaidrots tālāk), tiek iestatīts  $\Delta t = 1$ , kas definē divu kadru logu ar  $t \in [t + \Delta t]$ . Grafa skenēšana ar šo logu atrisina visacīmredzamākās asociācijas, kas veidojas starp secīgiem kadriem. Iegūtais grafs, pēc maz ticamu malu izslēgšanas, tiek izmantots kā sākotnējais nosacījums nākamajai grafa skenēšanai ar trīs kadru logu

( $\Delta t = 2$ ). Šis process tiek atkārtots, palielinot  $\Delta t$ , līdz tas pārsniedz lietotāja noteikto sliekšni. Tas tiek darīts tā, lai secīgu grafa skanu laikā atrisinātu asociācijas lielākā attālumā, ļaujot pārvarēt neveiksmīgas detekcijas. Pēc tam, izmantojot  $p$  sadalījumu visām grafa malām un lietotāja definētu kvantīlas parametru  $q \in [0, 1]$ , tiek aprēķināts  $p$  sliekšnis  $p_c$ . Malas ar  $p \leq p_c$  tiek izslēgtas.

Katrā laika solī grafa skenēšanā dotajiem  $t$  un  $\Delta t$  tiek veidotas divas nesakārtotas trajektoriju kopas: trajektoriju kopa, kurām nav galapunkta robežās  $[t; t + \Delta t)$  un trajektoriju kopa, kurām nav galapunkta robežās  $(t; t + \Delta t]$ . Ir definēti dažādi asociācijas veidi — ieeja, izeja, translācija, sadalīšanās un saplūšana attiecībā uz šīm kopām. Pēdējās tiek izmantotas arī, lai iestatītu un pārbaudītu asociācijas (kartētas uz grafa malām), t.i., lai pārbaudītu, vai tās ir ticamas un atbilst asociācijas ierobežojumiem. Trajektorijas asociācijas problēmā tiek iekļautas tikai ticamas asociācijas. Augšminētais ir detalizēti izskaidrots [182].

Tiek piemēroti sekojoši asociācijas nosacījumi: pašsavienojumi ir aizliegti; tikai asociācijas ar laiku uz priekšu; ierobežots maksimālais objekta pārvietojums vienā kadrā; ierobežots asociācijas tālums. Pēdējā gadījumā ap mezglu [182] tiek definēta primārā ietekmes sfēra (IS), pamatojoties uz mezgla objekta efektīvo rādiusu. Tiek definēts arī sekundāra, mazāka fiksēta izmēra IS, un tajā esošie objekti vienmēr tiek saistīti. Asociācijas ierobežojumi savukārt nosaka, vai asociācija ir ticama. Ieejas un izejas asociācijas vienmēr tiek uzskatītas par ticamām. Paredzams, ka translācijas asociācijām jāievēro *vājas formas masas un impulsa saglabāšanas likumi*, kas tiek izmantoti, lai noteiktu, vai divas trajektorijas ir konsekventas objekta kustības ziņā.

Apzīmē divus trajektorijas segmentus laika logā ar indeksiem 1 un 2, un savienojšo malu ar indeksu  $k$ . Translācijas asociācijas ierobežo maksimālais lineārais paātrinājums  $a_c$ :

$$2 \cdot \frac{\|\vec{v}_k - \vec{v}_1\|}{\Delta t_k + \Delta t_1} < a_c; \quad 2 \cdot \frac{\|\vec{v}_2 - \vec{v}_1\|}{\Delta t_2 + \Delta t_k} < a_c \quad (2)$$

kur  $\vec{v}$  ir ātrums attiecīgajās trajektorijas malās un  $\Delta t$  ir laika starpība starp apskatīto malu mezgliem. Kustības virziena maiņa ir arī ierobežota atkarībā no ātruma:

$$\begin{aligned} \arccos\left(\frac{\vec{v}_k \cdot \vec{v}_1}{\|\vec{v}_k\| \cdot \|\vec{v}_1\|}\right) &< (\pi + \epsilon) \cdot \exp\left(-\frac{\|\vec{v}_1\|}{\lambda}\right) \\ \arccos\left(\frac{\vec{v}_2 \cdot \vec{v}_k}{\|\vec{v}_2\| \cdot \|\vec{v}_k\|}\right) &< (\pi + \epsilon) \cdot \exp\left(-\frac{\|\vec{v}_k\|}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

kur  $\epsilon$  ir patvaļīga maza konstante, un  $\lambda$  kontrolē maksimālo pieļaujamo

virziena novirzi attiecībā pret ātrumu. Augstākas parametru vērtības nozīmē lielākas pieļaujamās novirzes. Virziena novirzes ierobežojumi atdarina impulsa saglabāšanu, paredzot, ka objekti ar lielāku ātrumu būs mazāk novirzāmi.

Vājas masas saglabāšanas ierobežo laukuma (piemēram, projekcijas laukums pārraides kontrasta attēlveidošanas dēļ) diferences starp trajektorijām, kas savienotas ar translācijas asociāciju:

$$\frac{|\langle S_1 \rangle - \langle S_2 \rangle|}{\max(\langle S_1 \rangle, \langle S_2 \rangle)} < \varepsilon_t \cdot \left\langle \frac{\sigma_k}{\langle S_k \rangle} \right\rangle \quad (4)$$

kur indeksi 1, 2 attiecas uz divām dažādām trajektorijām,  $S_{1,2}$  ir laukuma mērījumu kopas,  $\sigma_{1,2}$  ir standarta novirzes  $S_{1,2}$ ,  $k = \{1, 2\}$  un  $\varepsilon_t$  ir laukuma novirzes sliekšnis. Lielāki sliekšņi pieļauj lielākas relatīvās novirzes laukumā.

Sadalīšanas/saplūšanas notikumu gadījumā, vāja impulsa saglabāšana ir neuzticama virsmas spraiguma efektu dēļ, tāpēc tiek izmantota tikai vāja masas saglabāšana. Tas būtībā pārbauda, vai objektu projekcijas apgabali pirms un pēc sadalīšanas/saplūšanas ir konsekventi:

$$\frac{|S_0 - \sum_k \langle S_k \rangle|}{\max(S_0, \sum_k \langle S_k \rangle)} < \varepsilon_s \cdot \left\langle \frac{\sigma_k}{\langle S_k \rangle} \right\rangle \quad (5)$$

kur  $S_k$  un  $\sigma_k$ ,  $k \in \mathbb{N}$  atbilst saplūšanas komponentēm un/vai sadalīšanas produktiem, un  $\varepsilon_s$  ir masas saglabāšanas sliekšnis – jo zemāka vērtība, jo lielākā mērā ir sagaidāta objektu laukumu atbilstība. Šeit tiek pieņemta lineāra sakarība starp burbuļa masu un projekcijas laukumu. Tas ir *a priori* nepareizi, jo tas noved pie acīmredzama masas defekta, lai gan masa fiziski netiek zaudēta. Līdz noteiktam līmenim šī pieeja nodrošina apmierinošus rezultātus.

Lai gan burbuļu izmēri fiziski maina sadalīšanās/saplūšanas biežumu, izsekošanas veiktspēja *nav* atkarīga no burbuļu izmēriem, bet gan no relatīvām laukuma variācijām atsevišķiem burbuļiem un burbuļu izmēru *dažādību* FOV. Tas ir tāpēc, ka sadalīšanas/saplūšanas notikumi tiek modeļēti, izmantojot (5), un translācijas kustība ir atkarīga no burbuļu izmēru mērījumiem, izmantojot (4). Jāņem vērā, ka abos gadījumos notiek normalizēšana attiecībā uz burbuļu izmēriem, kas nozīmē, ka (4) un (5) būtībā ierobežo burbuļa lieluma variācijas trajektorijās un starp trajektorijām, kas tiek apskatītas kā sadalīšanas/saplūšanas notikumi. Jo daudzveidīgāki ir burbuļu izmēri un jo konsekventāki ir atsevišķu burbuļu izmēri laikā, jo labāka ir izsekošanas veiktspēja. Kompromisu starp ierobežojumiem kustībā kontrolē parametri  $\varepsilon_s$  un  $\varepsilon_t$ .

Tiek izmantots Bajesa formulējums MHT [177]. Algoritma netiešsaites rakstura dēļ, formālisms ir ievērojami vienkāršotw. Formulējums problēmai, kā atrast iespējamās (nepretrunīgas) MHT-X trajektoriju kopas, ir norādīts [182].

Triviālais veids, kā atrisināt netiešsaites MHT problēmu, ir rupja meklēšana, pārbaudot visas iespējamās asociācijas, kas ir ārkārtīgi neefektīvi  $\mathcal{O}(n) = 2^n$  sarežģītības dēļ, un tāpēc ir praktiski iespējams tikai ļoti zems asociāciju skaits. Efektīvās  $n$  vērtības samazināšana ir opcija, taču tā neatrisina mērogošanas problēmu, kas kļūst kritiska ļoti lielām mērījumu kopām, t.i., mērījumiem ar lielu objektu blīvumu uz vienu kadru vai ļoti gariem mērīšanas procesiem, kā tas ir daudzos zinātniskos lietojumos. Piedāvātā pieeja ir atpazīt netiešsaites MHT problēmu kā *exact cover* problēmu [181], jo tās risinājumi pēc definīcijas ir asociāciju kopas, kas šajā gadījumā rada nepretrunīgas trajektorijas.

Visoptimālākais šādas problēmas risināšanas veids ir *Algorithms X* (Knuta algoritms) [181], kas ievērojami samazina skaitļošanas sarežģītību līdz stabili subeksponenciālai. Sarežģītību vēl vairāk samazina, apvienojot asociācijas nesavienotās kopās pirms *exact cover* problēmas formulēšanas un atrisināšanas [183].

Statistiskās funkcijas, kas kartē varbūtības vērtības uz grafa malām, ir definētas šādi.  $\mathcal{N}(x, \mu, \sigma)$  ir Gausa sadalījums ar vidējo  $\mu$  un standarta novirzi  $\sigma$ . Translācijas asociācijas varbūtību uzdod:

$$f_1 = \alpha \cdot \frac{\mathcal{N}(\delta r, 0, \sigma_{\delta r})}{\mathcal{N}(0, 0, \sigma_{\delta r})} + (1 - \alpha) \cdot \frac{\mathcal{N}(\delta S, 0, \sigma_{\delta S})}{\mathcal{N}(0, 0, \sigma_{\delta S})} \quad (6)$$

kur  $\delta r$  ir pārvietojuma modulis,  $\delta S$  ir laukuma atšķirība starp mezglu objektiem un  $\alpha$  ir svara regulēšanas parametrs. Gan  $\sigma_{\delta r}$ , gan  $\sigma_{\delta S}$  tiek aprēķinātas abām trajektorijām, kuras tiek apskatītas savienojuma izveidei, izmantojot translācijas malu.

Ieejas/izejas malas varbūtība ir:

$$f_2 = \frac{1}{1 + \exp(a(y - b))} \quad (7)$$

kur  $y$  ir vertikālā koordināte 2 vai 3 dimensiju attēlā, un  $a$ ,  $b$  ir kontroles parametri.  $b$  vērtība nosaka atrašanās vietu uz iepriekš noteiktās ass (šajā gadījumā vertikālās), kur Exit/Entry mezgla pastāvēšanas iespējamība ir 0.5. Ieteicams iestatīt  $b$  tā, lai šī vieta būtu netālu no FOV robežām, kur paredzams, ka burbuļi ieies/izies.  $a$  lielums nosaka, cik ātri Exit/Entry mezglu pastāvēšanas varbūtība mainās FOV (no 0 uz 1 un otrādi). Vērtība ir jāizvēlas tā, lai viltus pozitīviem objektiem (mezgliem) varētu piešķirt

Exit/Entry tipu jebkurā vietā FOV, taču tai jābūt iestatītai pietiekami augstai, lai Exit/Entry nebūtu vienmēr uzskatīti par visticamāko risinājumu.  $a$  zīme nosaka, vai varbūtība palielinās vai samazinās pa asi:  $a > 0$  nozīmē samazinājumu no 1 līdz 0, un otrādi.

Apvienošanas/sadalīšanas notikuma varbūtība arī ir balstīta uz vāju masas saglabāšanu, un to aprēķina šādi:

$$f_3 = \beta \cdot \mathcal{N}(\delta(S_0, S_k), 0, \langle \sigma_{S_k} \rangle) + (1 - \beta) \cdot \frac{M_s}{M} \cdot \mathcal{N}(\langle \vec{r}_k \rangle - \vec{r}_0, 0, \sigma_{\delta r}) \quad (8)$$

kur  $\beta$  ir svara pielāgošanas parametrs,  $S_0$  ir sadalīšanas avota/apvienošanas produkta laukums,  $S_k$  ir saplūšanas/sadalīšanas komponentu apgabali,  $\vec{r}_0$  ir sadalīšanas avota/apvienošanas produkta pozīcija,  $\vec{r}_k$  ir saplūšanas/sadalīšanas komponentu pozīcijas,  $M$  un  $M_s$  ir iesaistīto trajektoriju skaits un trajektoriju skaits ar pieejamo kustības prognozēšanu (t.i., ir pietiekami daudz punktu trajektorijā), attiecīgi. Tāpēc  $\beta$  nosaka, vai sadalīšanas/apvienošanas komponentē vairāk tiek uzsvērtā laukumu vai pozīcijas atbilstība.

Ne vienmēr ir vēlams grafā uzreiz pievienot iespējamās asociācijas (malas), jo var tikt ģenerētas jaunas trajektorijas vai tādas vai nokļūt laika logā nākamajā laika skenēšanas iterācijā, un tās trajektorijas var būt labāki problēmas risinājumi. Tāpēc jebkurai asociācijai, kas tiek uzskatīta par iespējamu (un no tās izrietošajām trajektorijām), ir jāatbilst arī papildu nosacījumiem, kas izklāstīti [182]. Šis ir pēdējais solis laika skenēšanas iterācijai. Pēc tam pieņemto malu kopa tiek pievienota trajektoriju grafam.

### 3. Galvenie rezultāti

Lai novērtētu MHT-X veiktspēju zinātniskiem lietojumiem, tas tika pielietots trīs burbuļu plūsmas gadījumiem šķidrā metālā, kur ir nepieciešama objektu izsekošana, un kur netieša izsekošana ir piemērota:

- 2D simulācijas argona burbuļu plūsmai taisnstūra traukā.
- Dinamiskā rentgenstaru radiogrāfija argona burbuļu plūsmai taisnstūrveida traukā, kas piepildīts ar GaInSn, kurā burbuļi tiek ievadīti caur no augšas iegremdēto cauruli.
- Argona burbuļu ķēdes plūsmas dinamiskā neitronu radiogrāfija taisnstūrveida šķidrā gallija traukā — burbuļi tiek ievadīti tvertnes apakšā caur horizontālu/vertikālu cauruli.

Visos trīs gadījumos pirms izsekošanas tiek veikta segmentācija, un burbuļu plūsmas režīms ir tāds, ka paredzams, ka burbuļi ievērojami deformēsies, paceļoties uz šķidrā metāla brīvo virsmu tvertņu augšdaļā.

Pirmais testa gadījums ir burbuļi, kas paceļas caur šķidru galliju taisnstūra traukā ar horizontāli virzītu ieplūdi apakšā. Skaitliskais modelis ir *volume of fluid* (VOF) simulācija divdimensiju burbuļu plūsmā, un ir aprakstīts [152, 153]. Plūsmas režīms ir pielāgots tā, lai burbuļu trajektorijas būtu ļoti neregulāras un bieži notiek sadursmes/sadalīšanās/saplūšana. Burbuļi ir ideāli segmentēti, jo šajā gadījumā nav viltus pozitīvu rezultātu vai detektēšanas kļūdu. Burbuļi ar laukumiem zem iepriekš noteikta sliekšņa netika ņemti vērā. Tāpēc šis ir idealizēts MHT-X izsekošanas iespēju tests ar dažāda izmēra un mainīgas formas objektiem, kuru telpiskais blīvums ir mērēns, ar to biežu mijiedarbību. Šeit tiek izsekotas objekta koordinātas un laukumi. Izsekošanas izvades piemēri ir parādīti Attēlos 27-30.

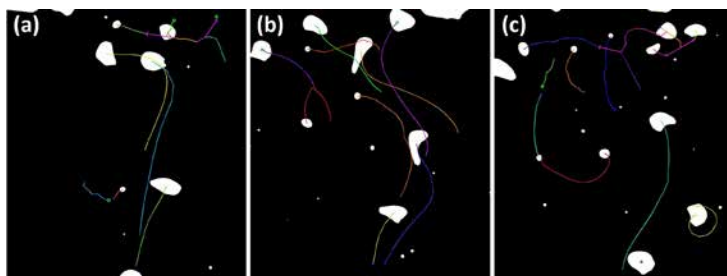


FIG. 27. Raksturīgu trajektoriju formu piemērs un (c) divi sadalīšanas notikumi (violetas bultiņas) ātri pēc kārtas, kas izšķirtas spēcīgu deformāciju un citu potenciāli traucējošu burbuļu klātbūtnē. Trajektorijas ir krāsu kodētas pēc to ID.

Vairāki kadri ar pārklātām rekonstruētām burbuļu trajektorijām ir parādīti Attēlā 27, kur trajektorijas ir krāsu kodētas pēc burbuļu ID. Kods veiksmīgi izseko gan lielus, ievērojami deformējošus burbuļus, gan mazākus, pat ja tie ir tuvu un ir kolineārā kustībā. Tika izšķirti divi burbuļu sadalīšanas notikumi, kuri norādīti attēlā 27c ar violetām bultiņām. Vēl viena svarīga šī gadījuma iezīme ir tā, ka burbuļi pārvietojas dažādos veidos: pacelšanās peldspējas dēļ, lēna kustība ar oscilācijām, ko izraisa iesprostošana maza plūsmas ātruma zonās, lejupvērstā kustība liela virpula dēļ, ar masas plūsmu pretēji pulkstenrādītāja virzienam — tas viss raksturo reālus plūsmas apstākļus divfāžu sistēmās.

Attēlā 28 var redzēt vairākus burbuļus, kas izsekoti secīgos kadrus. Jāņem vērā, ka Attēlos 28(3)-28(6) tiek izšķirti divi ātri pēc kārtas sadalīti notikumi, kur burbuļu formas pirms un pēc sadalīšanas ir radikāli atšķirīgas. Ir arī svarīgi atzīmēt, ka MHT-X nezaudē burbuļu izsekojamību, neskatoties uz ievērojamo pagarināšanos (īpaši 3-5 kadrus) un vēl divu burbuļu tuvumu, kas, sākotnēji paceļoties, novirzās pa kreisi un sāk gandrīz kolineāru kustību

(5.-7. kadri).

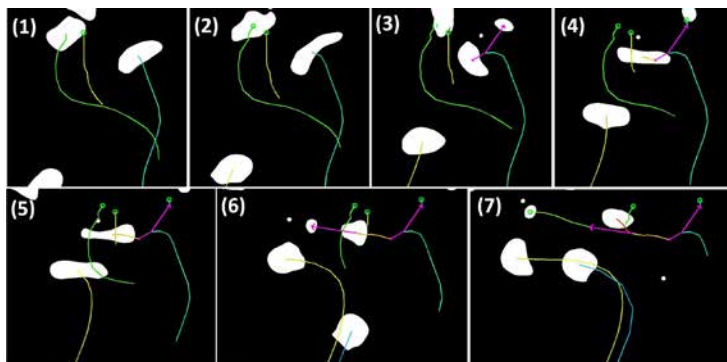


FIG. 28. (1–7) Vairākas tuvumā esošās burbuļu trajektorijas un sadalīšanas notikumi, kas izškirti secīgos kadrus no simulācijas datiem, un (a, b) raksturīgu trajektoriju saimju piemēri.

Attēlā 29 ir parādīti divi loģiski savienotu trajektoriju kopu (ģimeņu) piemēri, kas iegūti no izveidotā trajektoriju grafa. Īpaši interesants ir Attēls 29a, kur ģimenes locekļiem ir diezgan sarežģītas, tuvas un pat pārklājošas trajektorijas. Visa ģimene Attēlā 29a nāk no kopēja ieejas punkta FOV apakšā. Sāds attēlojums ļauj tieši pārbaudīt visu trajektoriju tīklu un kvalitatīvi novērtēt kolektīvās dinamikas intensitāti un to, kur FOV ietvaros notiek mijiedarbība.

Papildus vizuālajai informācijai par burbuļu kustību un mijiedarbību, saimēm un attiecīgajām eksportētajām datu kopām (ar laika vērtību apzīmējumiem) turpmākai apstrādei (ātruma mērījumiem, trajektorijas izliekuma mērījumiem, formas parametru evolūcijas izsekošanas utt.), var būt noderīgi arī vizualizēt pašu izveidoto trajektoriju grafu – šī testa gadījuma risinājuma grafs ir parādīts Attēlā 30.

Tomēr, lai gan šis testa gadījums demonstrē veiksmīgu izsekošanu diezgan sarežģītai plūsmai un burbuļu mijiedarbībām, tas ir gana idealizēts. Burbuļu projekciju laukumu saglabāšana netiek pārākta pārāk būtiski, t.i., burbuļu apjoms fiziski nemainās (FOV atrodas virs burbuļu augšanas apgabala pie ieejas), un segmentētajā datu kopā praktiski nav kļūdu vai trokšņu. Nākamie divi piemēri iekļauj sevī šos apstākļus.

Dati otrajā testa gadījumā izriet no dinamiskas RR burbuļu plūsmas, ar ātrumu 125 kadri sekundē, taisnstūrveida traukā ar no augšas iegremdētās caurules gāzes padevi [84], kurā burbuļi tiek ievadīti FOV. Tas nozīmē, ka burbuļa tilpums, un līdz ar to arī projekcija, ko rada RR, parasti ļoti atšķiras starp burbuļiem, kas veidojas iekšējās galā, un jau atdalītajiem

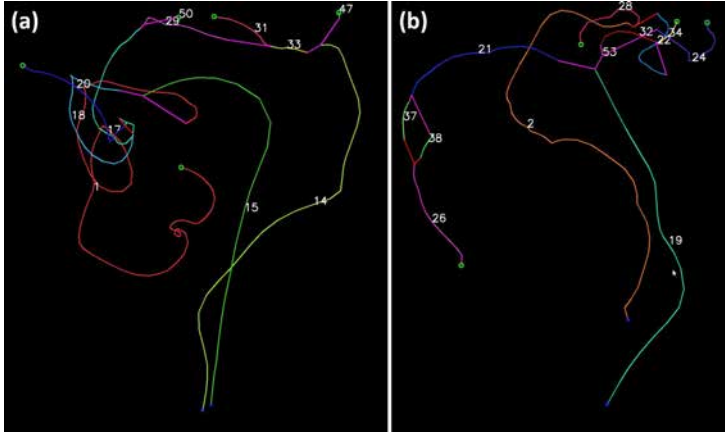


FIG. 29. Divi trajektoriju ģimeņu piemēri, kas atgūti no MHT-X izveidotā trajektoriju grafa. Trajektorijas ir iekrāsotas pēc ID (izcelts). Sarkanās bultas apzīmē saplūšanas notikumus.

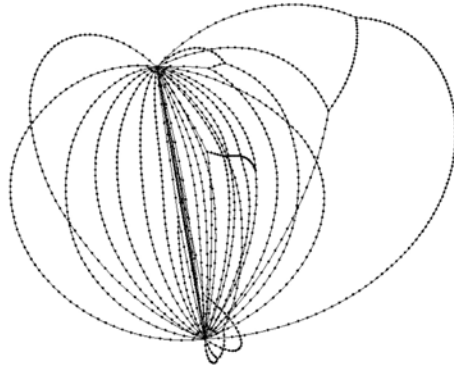


FIG. 30. Risinājuma grafs, ko MHT-X izveidoja burbuļu plūsmas simulācijas piemēram. Šis telpiski retināts trajektoriju grafa attēlojums tika ģenerēts *GePhi*. Visas trajektorijas šeit izriet no ieejas mezgla (apakšā) un satiekas izejas mezglā (augšā). Lai gan koordinātas ir deformētas, relatīvā vertikālā pozicionēšana (virzienā no ieejas uz izeju) joprojām atspoguļo faktisko mērījumu punktus (t.i., sadalīšanas/saplūšanas notikumu relatīvās pozīcijas).

burbuļiem. Turklāt burbuļi uzrāda arī būtiskas deformācijas, tostarp argona/GaInSn robežas kustību ārpus plaknes (attiecībā uz FOV). Turklāt burbuļi ir segmentēti no rentgena attēliem, kuros ir troksnis un potenciāli



artefakti, tāpēc burbuļu formas parasti netiek ideāli/pilnībā atgūtas. Dotajā plūsmas režīmā ir sagaidāma bieža starpburbuļu mijiedarbība, lai gan to telpiskais blīvums ir mazāks nekā iepriekšējā testā.

Tomēr šajā gadījumā dati par lokālo tilpuma daļu FOV ir pieejami no mērījumiem [84], un burbuļa tilpums tiek atgūts un padots MHT-X. Tādas pašas formas saglabāšanas likums kā projekcijas apgabalam  $S$  (4), (5), (6) un (8) tika piemērots izsekoto burbuļu tilpumam. Izstrādātais algoritms augšminētajos apstākļos darbojās labi, kā parādīts Attēlos 31-33. Tāpat kā iepriekšējā gadījumā tika izšķirti sadalīšanas/saplūšanas notikumi, kas bija tuvi laikā (Attēls 31), un "daudzi uz vienu" un "viens uz daudziem" tipu notikumi/asociācijas ir daudz biežāki šajā gadījumā, un arī tika pareizi identificēti (Attēls 32). Sīkāka informācija un papildus piemēri ir doti [182].

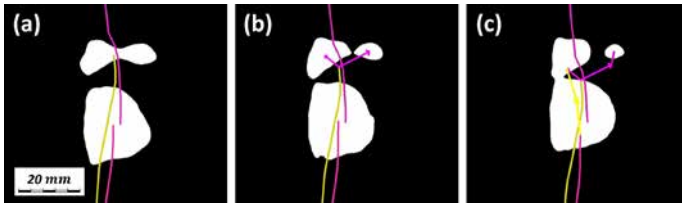


FIG. 31. Pareizi izšķirtu īslaicīgi tuvu sadalīšanas/saplūšanas notikumu gadījums.

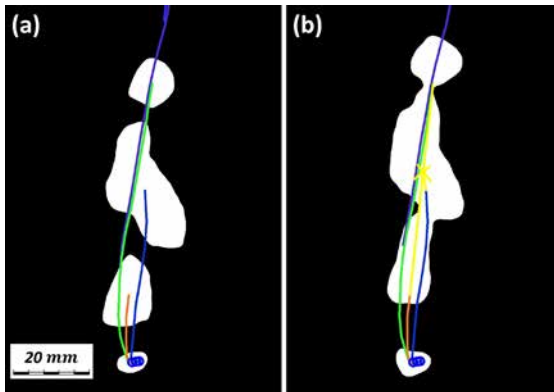


FIG. 32. "Trīs uz vienu" saplūšanas notikums (dzeltenas bultas), kuru izšķīris MHT-X.

Tāpat kā 2D gadījumā, trajektoriju saimes var vizualizēt, kā parādīts Attēlā 33. Biežā saplūšana ir skaidri redzama Attēlos 33a un 33b jo īpaši,

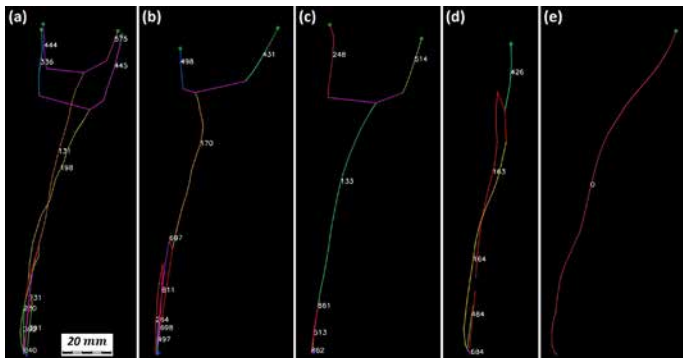


FIG. 33. Representatīvas trajektoriju ģimenes – trajektoriju ir marķētas un iekrāsotas pēc to ID. Tāpat kā 2D testa gadījumā, violetās bultas apzīmē sadalīšanas notikumus, bet sarkanās bultas apzīmē saplūšanas notikumus.

jo tas rada daudzas loģiski saistītas trajektorijas. Jāņem vērā arī ka dažas sadalīšanās notiek arī apakšā, piemēram Attēlā 33a – tas ir tāpēc, ka burbuļi dažkārt atdalās no gāzes tilpuma, kas veidojas ap gāzes ievades sprauslu, nevis tieši no tās. Lai gan šajā gadījumā tas notiek salīdzinoši reti, daži burbuļi paceļas uz FOV augšdaļu bez jebkādas mijiedarbības, piemēram, kā Attēlā 33d.

Dažām lietojumiem var būt interesanti apskatīt sadalīšanas/apvienošanas notikumu statistiku: notikumu atrašanās vietas pēc tipa, to telpiskais blīvums FOV, utt. Turklāt var iegūt leņķus, kuros objekti, šajā gadījumā burbuļi, saplūst vai sadalās, lai iegūtu ieskatu par to, kas virza novēroto uzvedību. Šādas analīzes piemērs ir Attēli 34-36. No Attēliem 34a un 34b var redzēt, ka saplūšanas notikumi galvenokārt notiek apakšā, jo atpaliekošie burbuļi ātri panāk vadošos burbuļus. Šķelšanās diezgan bieži notiek augšpusē, kur burbuļi, kas bieži ir apvienošanās rezultāts, atkal tiek sadalīti mazākos burbuļos, un apakšā, kur burbuļi atdalās (tehniski, nošķēlas) no gāzes tilpuma, kas pastāvīgi veidojas pie ieplūdes sprauslas.

Attēlā 35 ir parādīta statistika leņķiem (a) apvienošanas un (b) sadalīšanas notikumiem. Jāņem vērā, ka saplūšana galvenokārt notiek aptuveni nulle grādu leņķī – tas ir loģiski, ņemot vērā galvenokārt vertikālas sadursmes starp priekšējiem un aizmugurējiem burbuļiem ieplūdes sprauslas tuvumā un virs tās. Tomēr šķelšanās gadījumā ir daudz mazāk sakārtots sadalījums, bez skaidriem maksimumiem, bet ir izteikta asimetrija, jo negatīvie sadalīšanas leņķi ir pēc moduļa lielāki. Attēls 36 sniedz papildu ieskatu, norādot, ka liela leņķa sadalīšanas notikumi ir koncentrēti augšējā (Attēls 36b) kreisajā pusē (Attēls 36a) FOV apgabalā, un lielā mērā ir

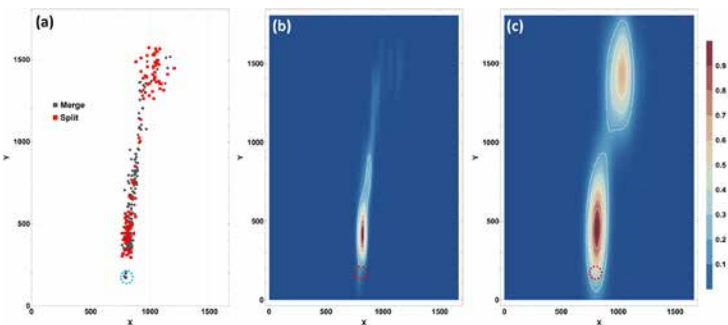


FIG. 34. Normalizētas (a) saplūšanas un (b) sadalīšanas notikumu blīvuma kartes. (a) un (b) tiek normalizēti atsevišķi, un tiem ir kopīga krāsu shēma (pa labi).  $X$  un  $Y$  koordinātes ir norādītas pikseļos. Sarkanie svītrotie apļi ir ieplūdes vietas. Blīvuma kartes tiek aprēķinātas, izmantojot Gausa kodolu ar Silverman metodi.

atbildīgi par augšējo notikumu blīvuma maksimumu Attēlā 34. Ir arī skaidrs, ka liela leņķa saplūšanas notiek galvenokārt FOV apakšējās 2/3.

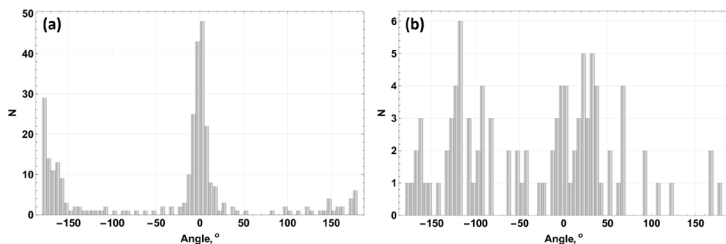


FIG. 35. Virziena leņķa histogrammas (a) saplūšanas komponentēm un (b) sadalīšanas komponentēm.

Šajā testā burbuļu dinamiku MHT-X ir nedaudz sarežģītāk izšķirt, neskatoties uz mazāku objektu telpisko blīvumu, salīdzinājumā ar pirmo testu. Tomēr datu kopa ir salīdzinoši tīra, jo STA oriģinālajos RR attēlos ir diezgan augsta, un viltus pozitīvu detekciju nav. Lai demonstrētu koda noturību pret trokšņainu ievadi un viltus pozitīviem objektiem, tiks apskatīti trešā testa gadījuma rezultāti.

Trešajā testā tiek izmantoti dati, kas iegūti, izmantojot dinamisku NR (100 kadri sekundē) argona burbuļu plūsmā šķidrā gallijā sistēmā, kas detalizēti aprakstīta [152, 153, 158]. NR attēliem, kas iegūti ar lielu kadru ātrumu biežiem šķidrā metāla slāņiem, kā raksturīga iezīme ir ļoti zema STA. Šī iemesla dēļ pat ar uzlabotu trokšņu filtrēšanu un segmentēšanu

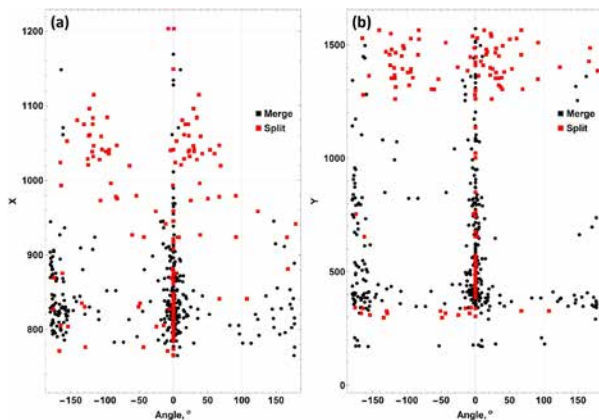


FIG. 36. Saplūšanas un šķelšanas leņķu sadalījumus pa (a)  $X$  un (b)  $Y$  koordinātēm (pikseļos).

dati, kas tiek sniegti kā ievade MHT-X, neizbēgami ir trokšņaini, jo burbuļu centroīdu pozīciju nenoteiktības ir ievērojamas, un daudz lielākas nekā pirmajos divos šeit parādītajos testos. Turklāt dažkārt var rasties viltus pozitīvas detekcijas un neveiksmīgas detekcijas, kas vēl vairāk sarežģī izsekošanu. Lai izolētu šos efektus, tika izvēlētas attēlu secības bez burbuļu mijiedarbības, t.i., vidējā burbuļu atstarpe ir pietiekama, lai izvairītos no sadursmēm. Apskatītajos attēlos paredzamais plūsmas režīms ir burbuļu ķēde [152, 153, 158], kurā attālumu starp burbuļiem nosaka attiecīgā gāzes plūsmas ātruma vērtība (zemas plūsmas ātrums dod gandrīz viena burbuļa plūsmu). Attēlā 37 ir parādītas raksturīgās burbuļu trajektorijas, kas rekonstruētas ar MHT-X. Šeit (a) un (b) parādīti zigzagveida burbuļi, un (c) un (d) galvenokārt ir taisnas trajektorijas, pateicoties plūsmas stabilizācijai ar sistēmai pieliktu ML

Var skaidri redzēt, ka burbuļus (balti svītroti apli Attēlā 37) lielākoties aizklāj attēlu troksnis. Neskatoties uz to un no tā izrietošo troksni objektu datu kopā, ir redzams, ka algoritms darbojas labi un tiek atgūtas garas, konsekventas trajektorijas, kas aptver visu FOV. Jāņem vērā arī tas, ka Attēlā 37d ir divi viltus pozitīvi rezultāti (sarkani punktēti apli), kas pārklājās laikā ar patiesām detekcijām — tie tika izšķirti kā izolēti mezgli (viena mezgla trajektorijas), un risinājuma grafā tie ir savienoti tikai ar ieejas un izejas mezgliem. Papildu demonstrācija, ka MHT-X pareizi ekstrapolē un savieno trajektorijas fragmentus visā kadrā ar noteikšanas kļūmes notikumu, kā arī parāda noturību pret troksni, ir sniegts [182].

Tā kā visa algoritma veiktspēja lielākoties ir atkarīga no Algoritma X

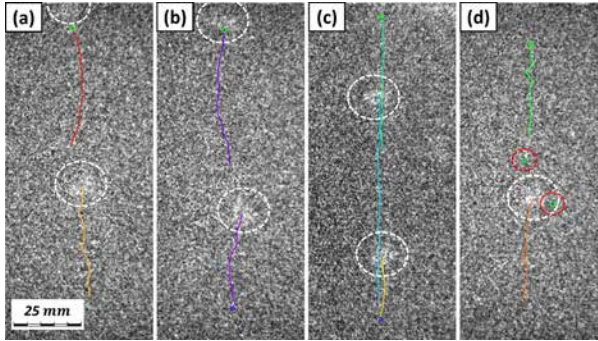


FIG. 37. Neitronu radiogrāfijas attēli ar iezīmētām trajektorijām, kas ir nokrāsotas pēc ID, burbuļiem (balti punktēti apli) un viltus pozitīvām detekcijām (sarkani punktēti apli). Vizuālas skaidrības labad (a-d) ir parādītas tikai līdz pat vairākām jaunākajām trajektoriju malām.

veiktspējas, tiek izpildīts tests, lai to pārbaudītu saistībā ar asociācijas veidiem, kas var rasties izsekošanas problēmās ar sadalīšanas/apvienošanas notikumiem. Testu veic šādi:

1. Ģenerē 2 grupas ar  $m$  un  $n$  objektiem.
2. Asociācijas nosacījumu izpilde ir iestatīta kā gadījuma notikums ar varbūtību 0.3.
3. Asociācijas ierobežojumu izpilde ir iestatīta kā gadījuma notikums ar varbūtību 0.5.
4. Sadala asociāciju kopu nesavienotās kopās.
5. Reģistrē asociāciju skaitu un to, cik daudz skaitļošanas laika nepieciešams, lai Algoritms X izsmeltu katras nesadalītās kopas risinājuma meklēšanas telpu.

Tas tika atkārtots 10 000 reižu visām kombinācijām  $6 \leq m, n \leq 10$ , ierobežojot maksimālo asociāciju skaitu notikumiem "daudzi uz vienu" (un apgriezti) līdz 3, ņemot vērā tikai unikālus nesakārtotus  $(m, n)$  pārus. Iegūtie  $\sim 250K$  datu punkti tika sadalīti vienmērīgās joslās pēc asociāciju skaita un izpildes laika. Pēc tam iegūtās joslas tika vertikāli sadalītas 100 vienādos attālumos no minimālā līdz maksimālajam izpildes laikam. Tālāk tika izveidots diskrets normalizēts blīvuma sadalījums. Rezultātā iegūtie aprēķinu laika sadalījumi pret asociāciju skaitu pa nesaistītām asociāciju kopām ir parādīti Attēlā 38.

Attēlā 38a var redzēt, ka sliktākais scenārijs ir eksponenciāls, kā tam vajadzētu būt. Tomēr eksponenciālā laika gadījumi ir sastopami ļoti reti, un

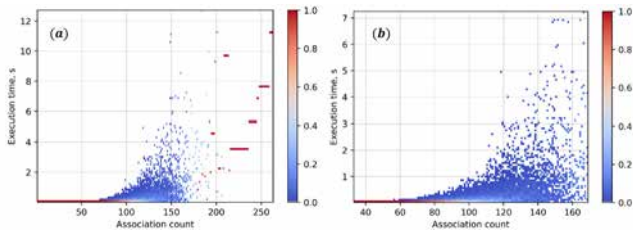


FIG. 38. Algoritma-X skaitļošanas veikspēja asociācijām, kas ir iespējamās izsekošanas problēmās ar objektu sadalīšanas/apvienošanas notikumiem. (a) Visa testa datu punktu kopa un (b) datu apakškopa ar izpildes laiku no 10 ms līdz 8 s, kas ir aptuveni 15% no visas datu kopas.

lielākā daļa gadījumu tiek atrisināti ievērojami ātrāk. Ir vērts atzīmēt, ka problēmas dimensijas palielināšana neuzlabo vai nepasliktina algoritma veikspēju. Ierobežojošie faktori ir objektu telpiskais blīvums un mijiedarbības biežums, kā arī vidējais objektu skaits sadalīšanas/apvienošanas notikumos. Papildu telpiskās dimensijas vienkārši pievieno vairāk koordinātes izsekošanai.

Lai gan šī algoritma versija jau ir ļoti daudzpusīga, kā liecina iepriekš minētie rezultāti, joprojām ir daudz veidu, kā to var uzlabot. Mērķis ir padarīt to plašāk pielietojamu un ļaut atrisināt izsekošanas problēmas ar lielāku objektu blīvumu un nelabvēlīgākiem apstākļiem, kā tas redzams šeit aplūkotojās gadījumos. Saistītajā pētniecības jomā ir vairāki interesējoši gadījumi, kad vēlama skaidra, precīza un robusta objektu izsekošana: dinamiska optiskā, rentgena un neitronu attēlveidošana argona burbuļu plūsmā šķidrā gallija vai GaInSn eitektiskā sakausējuma [29, 30, 84, 152, 153, 158, 184]; gadolīnija oksīda daļiņu plūsmas neitronu attēlveidošana šķidrā gallijā [85–88]; sāls kristālu un šķidro kristālu marķieru optiskā attēlveidošana ūdenī [106, 107]; gadolīnija daļiņu neitronu radiogrāfija putās [105]; burbuļu plūsmas simulācijas [152, 153, 184]. Jo īpaši attiecībā uz burbuļiem MHT-X varētu izmantot burbuļu formas analīzi, tostarp formas evolūcijas izsekošanai un fāzes robežu ātruma noteikšanai (piemēram, apvienojot to ar optiskās plūsmas ātruma mērījumiem).

#### 4. Kopsavilkums

Ir pierādītas iespējas izstrādātām netiešsaistes Beijesa vairāku hipotēžu izsekošanas algoritmam/kodam ar virzīta grafa arhitektūru, kas izmanto Algoritmu X (jau eksistējošo), lai atrisinātu optimālo asociācijas problēmu kā *exact cover* problēmu. Parādītie testa gadījumi norāda, ka pašreizējā implementācija ir pietiekami stabila/efektīva, lai apstrādātu gadījumus ar relatīvi augstu objektu telpisko blīvumu, datu troksni, viltus pozitīvām detekcijām, un noteikšanas kļūmju klātbūtnē. Algoritms spēj atrisināt "viens uz vairākiem" sadalīšanas un "vairāki uz vienu" saplūšanas notikumus objektiem ar mainīgām formām un citiem parametriem.

Sagaidāms, ka kods tiks izmantots daudzās pētniecības jomās tā pašreizējā stāvoklī, un jo īpaši pēc izklāstīto uzlabojumu ieviešanas. Turklāt kods pašlaik tiek izmantots, lai izstrādātu kodu sadalīšanai dinamiskajās modās burbuļu plūsmas simulāciju izvades analīzei, kā arī burbuļu formas analīzei, ieskaitot formas evolūcijas izsekošanu un fāzes robežu ātruma mērījumus, jo īpaši kombinācijā ar formas analīzes algoritmu, kas apskatīts Sadaļā II B 3.

## D. Neutronu radiogrāfija daļiņu plūsmā šķidrā metālā

Šeit aprakstītā attēlu apstrādes un daļiņu izsekošanas metodika ir izstrādāta, pamatojoties uz eksperimentālajiem datiem, ko HZDR pētnieki ieguva pirms šī darba uzsākšanas. Mērķis bija pārbaudīt, vai daļiņu izsekošana ir iespējama vienkāršai etalonsistēmai ar zināmu fiziku, lai pēc tam izstrādātās metodes varētu pielietot modeļu sistēmām, kas emulētu burbuļu astes plūsmu ar un bez ML. Pēc tam daļiņu izsekošanas velocimetriju (DIV) varētu izmantot, lai pētītu burbuļu astes plūsmu šķidrā metālā.

### 1. Neutronu radiogrāfija

Gadolīnija oksīda daļiņu plūsma gallija-alvas sakausējumā tika attēlota, izmantojot dinamisko neutronu radiogrāfiju. Eksperimentālā iekārta ir parādīta un detalizēti aprakstīta [96, 185]. Ņemot vērā, ka neutronu transmisijas attēlveidošana rada daļiņu projekcijas, ir vēlams izvairīties no trīsdimensiju kustības, tāpēc šis eksperiments tiek veikts gandrīz divdimensiju ģeometrijai. Nerūsejošā tērauda cilindriskais šķērslis ar diametru  $5\text{ mm}$  ir centrēts un fiksēts slēgta cilpas plūsmas kanāla taisnā daļā ar vienmērīgu  $30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  taisnstūra šķersgriezumu (plūsma tika attēlota caur  $3\text{ mm}$  dimensiju). Nepārtrauktu šķidrā metāla plūsmu virza diska tipa elektromagnētiskās indukcijas sūkņi uz pastāvīgā magnēta bāzes [96]. Interesejošais reģions, kurā daļiņas ir jāizšķir un jāizseko *tiešā veidā*, ir iezīmēts Attēlā 39. Daļiņu trajektorijas, kuras var vizualizēt, izmantojot minimālā spilgtuma laika projekciju (Attēls 39b), tiek spēcīgi ietekmētas turbulenta astes plūsmas dēļ, pretstatā ļoti gludajām trajektorijām sānos. Analizētais redzes lauks bija ar izmēriem  $408 \times 161$  pikseli (16 bitu viena kanāla attēli), kas atbilst  $37,8\text{ mm} \times 14,9\text{ mm}$ .

Tika parādīts, ka gadolīnija oksīda daļiņas ar diametru  $d_p \in (0, 3; 0, 5)\text{ mm}$  nodrošina pietiekamu attēla STA dinamiskai neutronu radiogrāfijai ar īsu ekspozīcijas laiku [96]. Jāņem vērā, ka pie  $3\text{ mm}$  biezuma neutronu plūsmas virzienā šķidrā sakausējums ir diezgan caurspīdīgs ( $\sim 87\%$  caurlaidība) neutronu starojumam. Gadolīnija oksīdam ir arī zemāka paramagnētiskā jutība nekā tā tuvākajai alternatīvai, gadolīnijam, kas, gluži pretēji, padara daļiņas ļoti jutīgas pret elektromagnētiskās indukcijas sūkņa ML [186, 187].

Radiogrāfija tika veikta ar aukstajiem neutroniem Šveices spallācijas neutronu avota SINQ [188] ICON staru līnijā [189]. Eksperimentālais iestatījums bija tāds, ka iegūtais ģeometriskais neasums (angl. *unsharpness*) ir  $\sim 0,3\text{ mm}$ , kas ir aptuveni mazāko gadolīnija oksīda daļiņu izmērs. Telpiskā izšķirtspēja ir  $10\text{ px/mm}$ . Tika izvēlēts  $10\text{ ms}$  ekspozīcijas laiks



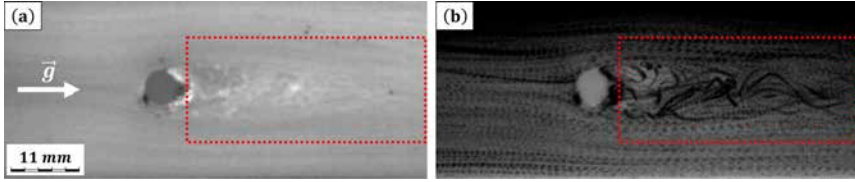


FIG. 39. Pikseļu (a) standarta novirze un (b) minimālās spilgtuma vērtības laikā attēla plūsmas kanālā visos uzņemtajos kadrus. Interesējošais reģions ir norādīts ar sarkanu svītrotu rāmi. Cilindriskais šķērslis redzams abos attēlos. Parādītie attēli tika pagriezti par 90 grādiem pa kreisi attiecībā pret oriģināliem — šeit sākotnēji lejupejošā plūsma ir vērsta no kreisās puses uz labo. Baltā bulta (a) norāda gravitācijas paātrinājumu  $\vec{g}$ .

(atbilst 100 kadriem sekundē), kas nepieciešams, lai notvertu atsevišķas daļiņas, kas pārvietojas šķidrā metāla plūsmā.

## 2. Attēlu apstrāde

Tika parādīts, ka attēlos ir korelēts troksnis ar graudveidīgu struktūru ar vidēji  $\sim 3$  pikseļu viļņa garumu [105] — tā ir ievērojama daļa no tipiskā daļiņu izmēra. Tādējādi attēlos var būt "fantoma" daļiņas (potenciālas viltus detekcijas). Daļiņu radiogrāfijas projekcijām ir ļoti dažādi izmēri un STA/KTA, kas arī mainās laika gaitā, daļiņām pārvietojoties FOV. Turklāt ierakstītajās attēlu secībās ir izteikta globālā spilgtuma nevienmērība, ko var redzēt Attēlā 39b. Ņemot vērā šos faktorus, tika nolemts veidot attēlu apstrādes procedūru, izmantojot lokālo filtru, kas tiek pielietots AL (šajā kontekstā nejaukt ar ADV terminoloģiju), kas tiek ņemti no attēliem. Tā kā attēlos ir ļoti liels daļiņu telpiskais blīvums, tika nolemts skenēt attēlus pilnībā ar daļēji pārklājošu AL. Šai pieejai ir trīs galvenās priekšrocības: pirmkārt, AL pārklāšanās rada informācijas dublēšanos, kam vajadzētu samazināt to gadījumu skaitu, kad tiek izslegtas patiešās daļiņas; otrkārt, lokālā filtrēšana visā attēlā nozīmē samazinātu jutību pret liela viļņa garuma spilgtuma izmaiņām; treškārt, tas labi darbojas ar SVPL algoritmu, kas izstrādāts burbuļiem (Algoritms 5) un modificēts šim gadījumam (paskaidrots tālāk).

Attēlu skenēšana ar daļēji pašpārklājošu AL ir ilustrēta Attēlā 40. Sākotnējais kvadrātveida AL ar malas garumu  $L'$  ir ievietots attēla augšējā kreisajā stūrī. Pēc tam no sākotnējā AL tiek ģenerēta AL kopa, izveidojot AL pozīciju režģi ar horizontālu/vertikālu soli, kuru lielums ir daļa no  $L'$ . Sīkāka informācija par to, kā tiek ģenerēti AL, ir atrodamā [185].

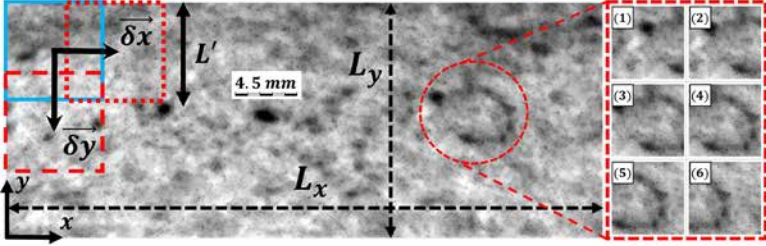


FIG. 40. AL skenēšanas shematiskais attēlojums FOV: sākotnējais AL (gaiši zils) un nobīdīts AL (sarkans) virzienā  $x > 0$  (punktēts) un  $y < 0$  (svītrains). Horizontālās skenēšanas piemērs virzienā  $x > 0$  apgabalam, kas apzīmēts ar sarkanu punktētu apli, ir parādīts apakšattēlos 1-6.

Visas attēlu apstrādes darbības tiek veiktas *Wolfram Mathematica*. Vispārējā attēlu apstrādes shēma ir parādīta Algoritmā 8.  $L'$  tika iestatīts tā, lai tas aptuveni atbilstu paredzamajam daļiņu klasteru mērogam, kas redzams FOV attēlos. Tas ir paredzēts, lai nodrošinātu pietiekamu atkārtotu daļiņu detektēšanu — tiek novērots, ka izvēlētas vērtības ir optimālas šim gadījumam detekcijas precizitātes ziņā. Tomēr mazāki  $\delta x_k$  padara šādu pieeju skaitļošanas ziņā dārgāku, un šajā gadījumā izvēlētais loga soļa lielums faktiski palielina datu apjomu (kopējais attēla laukums)  $\sim 16,9$  reizes. Tāpēc ir jā rūpējas par pamatā esošā attēla apstrādes koda optimizēšanu atmiņas izmantošanas ziņā un pēc iespējas vairāk tā elementi ir jāparalelizē - veids, kā tas tiek darīts, ir izskaidrots [185].

Lokālās filtrēšanas posmi ir parādīti Attēlā 41, un filtra struktūra ir izklāstīta Algoritmā 9 (sīkāka informācija atrodama [185]). Spilgtums ir invertēts, lai izceltu daļiņas, jo, pēc noklusējuma daļiņu intensīvas neitronu plūsmas absorbcijas dēļ, attēlos tās parādās kā zemākas spilgtuma zonas. Tā rezultātā tiek iegūts AL attēls, kā parādīts Attēlā 41b. Pēc tam tiek veikta nelokālās vidējošanas maskēšana (NVM) (Attēls 41c), lai palielinātu daļiņu KTA un noņemtu korelētu troksni attēlu neasuma dēļ, kas ir īpaši svarīgi cieši izvietotu daļiņu grupu izšķiršanai. NVM pārveido sākotnējo attēlu  $x$  izvadē  $y$  šādi:

$$y = 2 * x - w_{nm} * NV(x, r_1, r_p) \quad (9)$$

kur  $NV(x, r_1, r_p)$  ir NV filtrs [170],  $w_{nm}$  ir NV maskas svars, un  $r_1$  un  $r_p$  ir attiecīgi vidējošanas un nelokālās salīdzināšanas rādiusi. Principā tas ir līdzīgs tā saucāmai *unsharp* maskēšanai, taču NVM Gausa filtra vietā tiek izmantots NV filtrs. Novērots, ka šajā gadījumā NVM ievērojami

---

**Algorithm 8:** Apstrādes metodika daļiņu attēliem

---

**Ievade:** Normalizētu attēlu secība (pikseļu spilgtums mainīts uz  $[0; 1]$ ) ar atņemto vidējo tumšo strāvu

*AL ģenerēšana*

- 1 Uzģenerē  $n_x \times n_y$  AL pozīciju režģi [185]
- 2 Izveido attēlu projekcijas uz visiem AL

*Daļiņu detektēšana AL*

- 3 Normalizē AL attēlus
  - 4 Lokālā filtrēšana (Algoritms 9)
  - 5 Daļiņu segmentācija (Algoritms 10)
  - 6 SVPL filtrs (modificēts)
- Globālās daļiņu segmentu maskas rekonstrukcija*
- 7 Kartē SVPL-filtrētas AL daļiņu maskas uz pilnā FOV attēliem [185]
  - 8 Apvienot visas uz FOV kartētas AL maskas
  - 9 Segmentu filtrēšana pēc izmēra
  - 10 Morfoloģiskā atvēršana
  - 11 Aprēķina iegūto segmentu centroīdas

**Izvade:** Centroīdas daļiņām, kuras detektētas katrā FOV attēlā

---

pārspēj vienkāršu *unsharp* maskēšanu, jo NV filtrs daudz labāk uztver korelēto troksni. Izmantotais NV filtrs aprēķina normalizētos svarus  $\tilde{w}$ , lai aprēķinātu vidējo vērtību, kā norādīts [171].

---

**Algorithm 9:** Lokālā (AL) filtrēšana

---

**Ievade:** Normalizēts AL attēls

- 1 Invertē attēla spilgtuma vērtības
- 2 Nelokalās vidējošanas maskēšana (NVM)
- 3 *Soft color tone map masking* (SCTMM)
- 4 Nelokalās vidējošanas (NV) filtrs
- 5 Vidējošanas filtrs

**Izvade:** Filtrēts AL attēls

---

Pēc tam fona samazināšanai tika izmantots SCTMM (1) [158] (Attēls 41d). Tālāk tiek veikta NV filtrēšana (Attēls 41e), kam seko vidējošanas filtrs (Attēls 41f). Jāņem vērā, ka visā AL filtrēšanas procedūrā attēli tiek atkārtoti normalizēti pēc katras filtrēšanas stadijas.

Tālāk filtrētie attēli tiek pakļauti segmentācijas procedūrai, kas aprakstīta Algoritmā 10. Šeit tiek izmantota lokālā adaptīvā (LA) binarizācija (balstīta uz vidējo un standartnovirzi) [173], jo globālais sliekšnis nodrošina ļoti nestabilu daļiņu noteikšanu filtrētajā AL to atšķirīgo STA un KTA dēļ. Tomēr LA binarizācija ir jutīga pret zema spilgtuma daļiņu malām, no

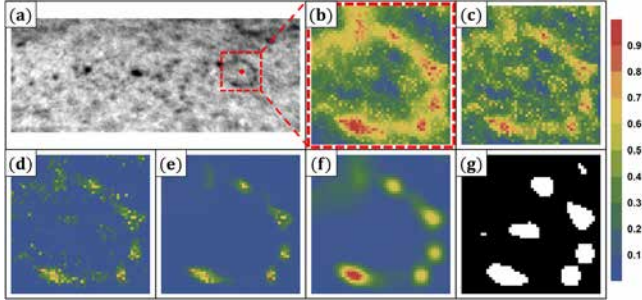


FIG. 41. Lokālā filtrēšana, kas tiek lietota aptaujas logiem (AL): (a) oriģinālais interesējošā reģiona attēls (Attēls 39) ar izceltu AL (sarkans rāmis), (b) krāsains invertēts AL attēls; AL pēc secīgas (c) nelokālās vidējošanas maskēšanas (NVM), (d) *soft color tone map masking* (SCCTMM), (e) nelokālās vidējošanas (NV) filtrēšanas, (f) vidējošanas filtra un (g) SCTMM pielietošanas, kam seko lokālā adaptīvā binarizācija.

kurām daudzas ir iespējami viltus pozitīvi. Šī iemesla dēļ tika izmantota iepriekš aprakstītā SVPL filtrēšanas procedūra ar nelielām izmaiņām, kas izskaidrotas [185]. SVPL pielietojums šajā gadījumā ir parādīts Attēlā 42. Visbeidzot, attēla robežas komponentes tiek noņemtas, lai izvairītos no artefaktiem un mākslīgas daļiņu segmentu sadalīšanas.

---

### Algorithm 10: Lokālā (AL) segmentācija

---

**Ievade:** Normalizēts filtrēts AL attēls (Algoritms 9 un Attēls 41f):

- 1 Pielieto SCTMM
- 2 Lokālā adaptīva (LA) binarizācija
- 3 Robežu komponentu izņemšana

**Izvide:** Daļiņu segmentu maska AL (Attēls 41g)

---

Kad attēlu filtrēšana, segmentēšana un SVPL filtrēšana ir pabeigta AL no oriģinālajiem attēliem, filtrētās AL daļiņu maskas ir jāapvieno pilnās FOV maskās (Algoritms 8). Attēlā 43 parādīti šī procesa posmi. AL daļiņu maskas tiek kartētas uz katru FOV attēlu (melns fons) un summētas (Attēls 43b). Pēc tam tiek veikta segmentu filtrēšana pēc laukuma un morfoloģiskā atvēršana (diska strukturālie elementi) [165] (Attēls 43c). Visbeidzot, atlikušajiem daļiņu segmentiem tiek aprēķinātas daļiņu centroīdas un pēc nepieciešamības arī citi parametri (Attēls 43d).

Ir svarīgi atzīmēt, ka pastāvīgi artefakti attēlos var radīt problēmas, jo tie var radīt sistemātiskas kļūdas trajektorijās, ko izveda izsekošanas



FIG. 42. SVPL darbības ilustrācija: (a) lokālā filtra izvide AL (Attēls 41f) tiek reizināta ar (b) AL daļiņu masku (Attēls 41g) un (c)  $\langle I \rangle \cdot \max(I)$  tiek aprēķināts katras daļiņas maskētām spilgtuma  $I$  sadalījumam, kā [158]. Ar sarkanām punktētām līnijām iezīmētās daļiņas tika identificētas kā viltus pozitīvas detekcijas.

algoritms. Viens šāds artefakts ir redzams attēlā 39a — melns plankums FOV labajā daļā, kas ir pie kanāla sienas pielipusi daļiņa. Šādos gadījumos efektīvs risinājums ir šo artefaktu noņemšana, izmantojot uz tekstūras sintēzi balstītu aizpildīšanu [190]. Artefakti aplūkotojos attēlos ir viegli segmentējami no vidējās projekcijas laika gaitā attēlu secībai, izmantojot Otsu binarizāciju [166]. Aprēķinu veikspējas analīze un daļiņu detektēšanas statistika ir sniegti [185].

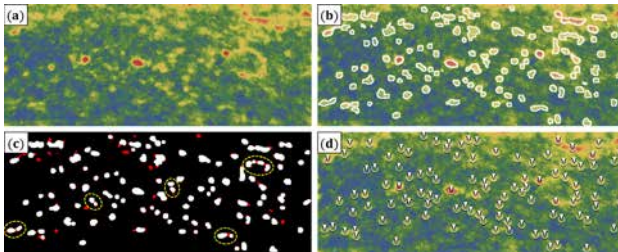


FIG. 43. (a) Krāsains invertētais sākotnējais attēls, (b) konstruēta globālā maska ar detektētajām daļiņām, kas pārklātas virs (a), (c) daļiņu segmenti pēc laukuma filtra un neliela rādiusa morfoloģiskās atvēršanas, izmantojot diska elementus, un (d) daļiņu centriādas no (c), norādīts ar baltām bultiņām, kas pārklātas virs (a). Sarkanās krāsas segmenti (c) ir elementi, kas noņemti no (b) pēc laukuma filtrēšanas un atvēršanas operācijas; dzeltenas pārtrauktas līnijas (c) norāda segmentus, kuri tika sadalīti fragmentos.

## E. Daļiņu trajektoriju rekonstrukcija

### 1. MHT-X modifikācijas

Kad visiem attēliem tika iegūtas daļiņu centroīdas, izsekošana tika veikta ar MHT-X algoritmu [182]. Tā kā šajā gadījumā eksperimentā daļiņu sadalīšanās un saplūšana nenotiek, jāņem vērā tikai daļiņu translācijas, ieejas un izejas notikumi. Tas padara asociācijas ierobežojumus (4,5) liekus un sadalīšanas/apvienošanas statistikas funkcijas (6,8) šeit nav aktuālas. Nosacījumi no sākotnējās implementācijas burbuliem [182] tiek izmantoti ar tālāk norādītajām izmaiņām. Pirmkārt, tiek izmantoti lineāra paātrinājuma un leņķiskās novirzes asociācijas ierobežojumi (2,3), jo kustības ierobežojumi joprojām ir vēlama. Tomēr parametri tiek pielāgoti šeit aplūkotojai sistēmai. Otrkārt, ietekmes sfēra (angl. *sphere of influence*, IS), ko izmanto, lai ierobežotu asociācijas diapazonu (var saistīt tikai objektus ar pārklājošiem IS), tiek modificēta [182]. Tā vietā, lai definētu IS ap daļiņu atrašanās vietām kadros, prognozēšanas modelis nosaka tā reģiona atrašanās vietu  $\vec{r}$ , uz kuru daļiņai ir jāpārvietojas laikā  $\Delta t$ , un definē IS ap šo punktu. Modelis sastāv no splaina ekstrapolācijas daļiņu ātrumam  $\vec{v}_s$  un ekstrapolācijas, kas iegūta, projicējot uz daļiņām ADV ātruma lauku  $\vec{v}_{\text{piv}}$ , kas aprēķināts [96]:

$$\vec{r}(t_0 \pm \Delta t) = \vec{r}(t_0) \pm (\alpha \cdot \vec{v}_s + (1 - \alpha) \cdot \vec{v}_{\text{piv}}) \cdot \Delta t \quad (10)$$

kur  $\alpha$  nosaka prognozēšanas modeļa komponentu svarus.

IS rādiuss  $R$  ir balstīts uz ātruma lielumu, un lielāks ātrums dod mazāku IS:

$$R = R_{\text{max}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{\text{IS}}} \cdot \|\alpha \cdot \vec{v}_s + (1 - \alpha) \cdot \vec{v}_{\text{piv}}\|\right) \quad (11)$$

kur  $R_{\text{max}}$  ir IS rādiusa augšējā robeža un  $\lambda_{\text{IS}}$  ir kontroles parametrs. Ja  $\vec{v}_s$  nav definēts, tas un  $\alpha$  ir iestatīti uz 0. Tas faktiski pieņem, ka daļiņas ar lielāku ātrumu ir grūtāk novirzīt un otrādi, imitējot kustīgo daļiņu redzamības konusus. Ja divi šādi konusi pārklājas, veidojas asociācija.

Izejas un ieejas notikumu statistikas funkcijas tiek saglabātas kā 7, izņemot horizontāla  $x$  ass tagad ir primārā. Translācijas kustības asociācijām ir ieviests modelis, kas ļoti līdzinās asociācijas nosacījumam. Translācijas varbūtības novērtētājs sastāv no trīs komponentēm, ko nosaka daļiņas atrašanās vieta, lineārais paātrinājums un kustības virziena izmaiņas.

Uz atrašanās vietu balstīts asociācijas varbūtības novērtējums salīdzina paredzēto atrašanās vietu ar hipotēzi:

$$p_{\text{pos}} = \mathcal{N}(\delta r, 0, \sigma_{\text{pos}} \cdot \Delta t) \quad (12)$$

kur  $\mathcal{N}(x, \mu, \sigma)$  ir normalizēts Gausa sadalījums ar vidējo  $\mu$  un standarta novirzi  $\sigma$ ;  $\delta r$  ir absolūtā atšķirība starp pozīcijām no prognozes un hipotēzes. Uz pātrinājumu balstīto varbūtību aprēķina šādi:

$$p_{\text{acc}} = \mathcal{N}(a, 0, \sigma_a) \quad (13)$$

Uz virzienu balstītā varbūtības komponente ir paredzēta, lai sodītu lielas izmaiņas kustības virzienā. Sods pieaug ar ātruma lielumu:

$$p_{\text{dir}} = \mathcal{N}\left(\delta\varphi, 0, \pi \cdot \exp\left(-\frac{\|\vec{v}\|}{\lambda}\right)\right) \quad (14)$$

kur  $\delta\varphi$  ir virziena maiņa (leņķis),  $\vec{v}$  ir ātrums un  $\lambda$  ir kontroles parametrs. Kopējā varbūtība tiek aprēķināta kā iepriekš minēto ieguldījumu svērtā summa:

$$p = \beta_1 \cdot p_{\text{pos}} + (1 - \beta_1) \cdot (\beta_2 \cdot p_{\text{acc}} + (1 - \beta_2) \cdot p_{\text{dir}}) \quad (15)$$

kur  $\beta_1$  un  $\beta_2$  ir svāri. Jāņem vērā, ka, lai gan šeit tiek izmantots ADV, un kopumā tas tiek ieteikts labākai izsekošanas nodrošināšanai, principā to var viegli atspējot kodā, ja lietotājam nav nepieciešamo datu.

## 2. Provizoriskie rezultāti

Pirms izsekošanas, [96] iegūtais ADV ātruma lauks  $\vec{v}_{\text{piv}}$  tika interpolēts un projicēts uz katrā kadrā detektēto daļiņu pozīcijām (skaidrots [185]). Daļiņu plūsmas attēli ar daļiņu  $\vec{v}_{\text{piv}}$  projekcijām ir parādīti Attēlā 44. Jāņem vērā, ka saskaņā ar lauku  $\vec{v}_{\text{piv}}$  daudzas daļiņas astes plūsmā bieži pārvietojas pretējos virzienos, un dažreiz normāli vidējām plūsmas virzienam, kā redzams Attēlā 44d. Iegūtais  $\vec{v}_{\text{piv}}$  daļiņām tiek izmantots (10) un (11) kustības prognozēšanai.

Attēli 45 un 46 parāda MHT-X pielietošanas rezultātus attēlu apstrādes koda izvadei. Attēlā 45 ir parādītas dažas no rekonstruētajām trajektorijām FOV ietvaros četros dažādos laika momentos. Jāņem vērā, ka tiek parādīti tikai pēdējie 15 konstruēto trajektoriju segmenti. Šis ierobežojums tika ieviests vizuālas skaidrības labad, taču kompromiss ir tāds, ka lēnāku daļiņu trajektorijas astes plūsmas zonā ir grūtāk parādīt. Neskatoties uz to, var novērot vairākas lietas. Pirmkārt, var novērot, ka trajektorijas netiek

pārtrauktas FOV labās robežas tuvumā, kur atradās artefakts, pirms tas tika noņemts ar tekstūru sintēzes aizpildīšanu. Otrkārt, pat tad, ja vienā trajektorijā vienā reizē redzamo segmentu skaits ir ierobežots, var novērot diezgan garas daļiņu pēdas gan astes plūsmas zonā, gan ārpus tās. Treškārt, var redzēt, jo īpaši Attēlos 45a un 45d, ka blīvi sakārtotas trajektorijas, kas šķērso viena otru tiešā laika tuvumā, ir pareizi rekonstruētas. Tomēr ir arī acīmredzams, ka ir diezgan daudz ievērojami sadrumstalotu trajektoriju, īpaši astes plūsmas zonā.

Attēlā 44 ir parādīta problēma, ka daļiņas, kuras tiek noķertas oscilējošās astes plūsmas zonā, uzrāda gan relatīvi mazus ātruma lielumus, gan straujas kustības virziena izmaiņas. Tas ir ļoti svarīgi pašreizējai MHT-X implementācijai, jo cieši sakārtotas trajektorijas ar zemiem ātrumiem lielumiem saskaņā ar (11) un (14) rada daudzas iespējamās asociācijas trajektoriju savienojumiem. Izmantojot pašreizējo uz splainu balstīto trajektoriju ekstrapolācijas metodi [182], bieži trajektorijas fragmentu neatbilstība ir tāda, ka MHT-X izvēlas priekšlaicīgi trajektorijām piešķirt izejas mezglus, nevis rekonstruēt garākus ceļus no fragmentiem. Tomēr MHT-X joprojām spēj izveidot diezgan daudzas fizikāli nozīmīgas un garas trajektorijas, kuru piemēri ir parādīti Attēlā 46.

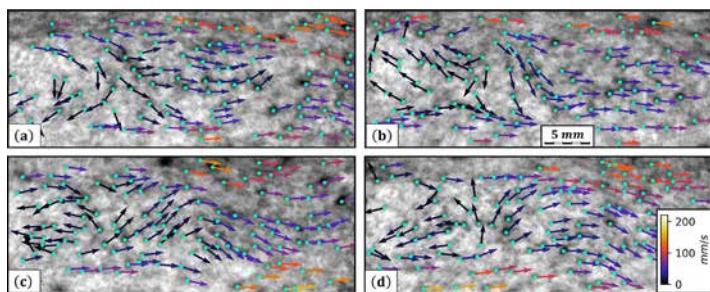


FIG. 44. ADV lauks, kas projicēts uz daļiņu centroīdām dažādos laika momentos. Mēroga parādīts (b) un ātruma krāsu kodēšana (normalizēta visai attēlu secībai) dota (d).



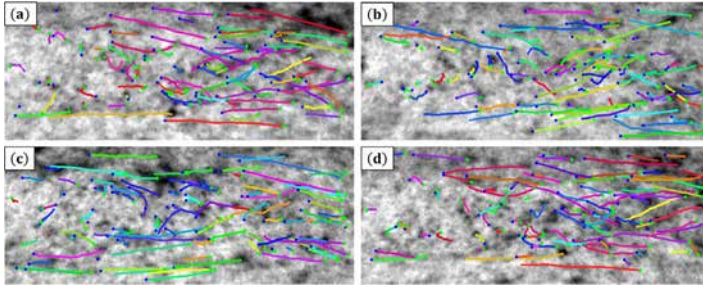


FIG. 45. Konstruēto daļiņu trajektorijas (norādīti ar dažādām krāsām) dažādos laika momentos. Daļiņu *Ieejas* mezgli ir apzīmēti ar ziliem punktiem, savukārt *Izejas* mezgli ir parādīti kā zaļi krustiņi. Katrs no kadriem parāda pēdējos 15 rekonstruēto trajektoriju segmentus. Mērogs ir identisks tam, kas parādīts Attēlā 44.

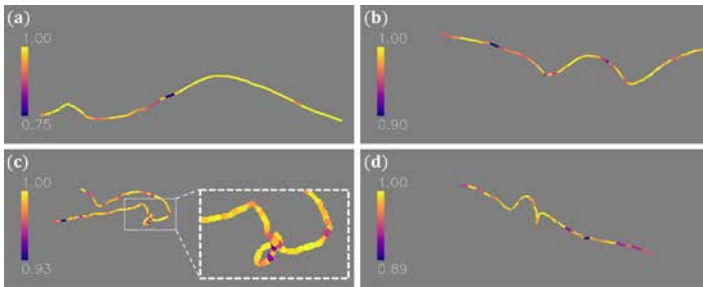


FIG. 46. Reprezentatīvās daļiņu trajektorijas, kas rekonstruētas ar MHT-X. Trajektorijas segmenti ir apzīmēti ar krāsām pēc to varbūtības. Mērogs ir identisks Attēlā 44 parādītajam.

Attēlā 46 ir parādītas dažas garākās trajektorijas, kuras rekonstruēja MHT-X. Attēlos 46a un 46b var redzēt daļiņu trajektorijas, kas pagājušas garām, mijiedarbojušās ar astes plūsmas zonu, un pēc tam izgājušas no tās. Var redzēt Attēlā 46b, ka daļiņu īslaicīgi uztverot astes plūsmai, to ātrums kļūst mazāks, par ko liecina ievērojami īsāki trajektorijas segmenti, kas redzami FOV vidū ( $x$  virzienā). Tas ir redzams arī Attēlā 47.

Tad, daļiņai izejot no astes plūsmas, to atkal paātrina kanāla plūsma. No otras puses, Attēlā 46a redzams, ka daļiņa netika iesprostota astes plūsmā un šķērsoja FOV daudz ātrāk. Trajektorija Attēlā 46c ir visilgākā novērotā segmentu skaita ziņā. Daļiņa vispirms tika novērota un iekļuva astes plūsmas zonā no FOV augšdaļas, un pēc tam tai bija ievērojams

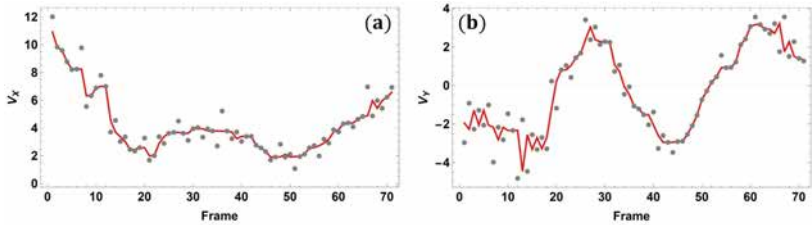


FIG. 47. Daļiņas ātruma dinamika trajektorijai, kas parādīta Attēlā 46b: ātruma (a)  $x$  un (b)  $y$  komponentes, pikseli uz kadru. Pelēkie punkti ir MHT-X izvade, un sarkanās līknes ir mediānas filtrētas (1 punkta rādiusā) ātruma komponentes.

uzturēšanās laiks astes plūsmā, pirms trajektorija tika pārtraukta FOV kreisajā daļā. Šī konkrētā trajektorija ir interesanta vairāku iemeslu dēļ: pirmkārt, tā skaidri parāda to, kas ir redzams arī ADV projekcijas attēlos — daļiņas, kuras notver aiz šķēršļa, bieži tiek novirzītas uz astes plūsmas zonas centru, un pēc tam to virziens ir apgriezts pretēji vidējai kanāla plūsmai [44]; otrkārt, jāņem vērā šīs trajektorijas fragmentu, kas izcelts ar baltu svītru rāmi Attēlā 46c — var novērot, ka trajektorija veido nelielu cilpu. Ir svarīgi, lai šāda kustība ar mazu ātrumu citu potenciāli traucējošu daļiņu klātbūtnē astes plūsmas zonā tomēr tiktu izšķirta ar augstu ticamības pakāpi — var redzēt, ka minimālā segmenta varbūtība ir 0.93 (krāsu josla pa kreisi). Attēlā 46d parādīta līdzīga trajektorija, izņemot to, ka tās kustības virziens uzturēšanās laikā netiek mainīts.

Lai kvantitatīvāk novērtētu MHT-X izvades kvalitāti, tika novērtētas vairākas metrikas atgūtajām trajektorijām: segmentu varbūtības visiem segmentiem, segmentu vidējās varbūtības un normalizētā (attiecībā pret vidējo) varbūtību izkliede trajektorijām, kā arī trajektorijas lieluma sadalījums — tie ir parādīti Attēlā 48.

Vispirms jāatzīmē, ka lielākajai daļai segmentu trajektorijām ar 4+ mezgliem (trajektorijas ar < 4 mezgliem nav izmantojamas pat vietējai DIV) varbūtība lielākoties pārsniedz 0.9 ar strauju maksimumu nedaudz zem 1 (Attēls 48a). Tas ir svarīgi, jo lielāka iespējamība parasti nozīmē mazāk neskaidru trajektorijas rekonstrukciju un lielāku pārliecību, ka rezultāts ir fizikāli adekvāts. Ļoti augsta vidējā segmenta varbūtība konstruētajām trajektorijām (Attēls 48b) un vidējā varbūtības izkliede lielākoties ir 10% no vidējām vērtībām (Attēls 48c) arī liecina par iegūto rezultātu kvalitāti. Visbeidzot, Attēls 48d norāda, ka MHT-X izveidoja dažus simtus trajektoriju ar  $\sim 20$  mezgliem un desmitiem trajektoriju ar 20+ mezgliem. Jāņem vērā, ka trajektorija ar 130+ mezgliem, kas redzama pa labi no lielākās daļas sadalījuma, ir tā, kas parādīta Attēlā 46c. Lai gan padziļinātai

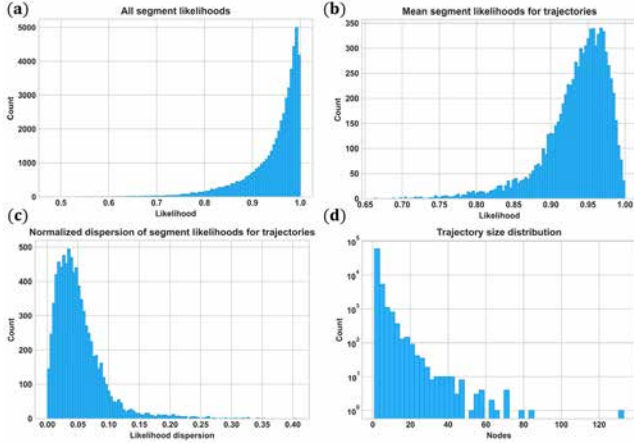


FIG. 48. (a) Visu trajektoriju segmentu varbūtības, (b) visu trajektoriju segmentu vidējās varbūtības, (c) segmentu varbūtības standartnovirze trajektorijās, normalizētas ar vidējām varbūtībām, un (d) mezglu skaits konstruētajām trajektorijām. (a-c) Tiek ņemtas vērā trajektorijas ar 4+ mezgliem.

daļiņu plūsmas dinamikas fiziskai analīzei (uzturēšanās laiks dažādos FOV reģionos, trajektorijas liekums utt.) ir nepieciešams vairāk trajektoriju ar 30+ mezgliem (vēl vairāk lēnākām daļiņām, ko aiztur astes plūsma), nekā pašlaik tiek ražots, bet īsākas var izmantot lokālai DIV. Pēdējais varētu sniegt ieskatu par ātruma lauku mazākos garuma mērogos nekā ADV gadījumā.

Visbeidzot, iepriekš tika pieņemts [96], ka izmantotās gadolīnija oksīda daļiņas galvenokārt ir pasīvie plūsmas marķieri. Tomēr ir vērts pārbaudīt šo pieņēmumu, novērtējot daļiņu Stoksa skaitļa  $Stk$  diapazonu. Konstatēts, ka  $Stk \in (0.067; 0.262)$  (pieņēmumus un izvedumus var atrast [185]), kas nozīmē, ka daļiņām vajadzētu būt diezgan labiem marķieriem. Vēl viena pieeja, lai to pārbaudītu, un arī kvalitatīvi apstiprinātu MHT-X veikspēju, ir veikt trajektoriju ātruma svārstību Furjē analīzi un pārbaudīt, vai cilindra astes svārstību pamatfrekvence  $f_0$  atbilst frekvenču spektram  $f_t$ , kas iegūts no trajektorijām.  $f_0$  var aprēķināt no Strouhala skaitļa  $Sr$  kā  $\tau_0$  apgriezto vērtību — šeit ir  $f_0 \in (3, 95; 5, 54)$  Hz. No otras puses, ņemot pirmās 10 dominējošās frekvences 200 garākajām trajektorijām, un novērtējot konstatēto frekvenču varbūtības blīvumu, atklājas, ka ir skaidra virsotne ar pilnu platumu pie puses no maksimuma, aptverot  $f_t \in (2, 42; 4.23)$  Hz (Attēls 49), kas pārklājas ar  $f_0$  intervālu.

Tas norāda uz atbilstību starp rekonstruēto dinamiku un paredzamajām

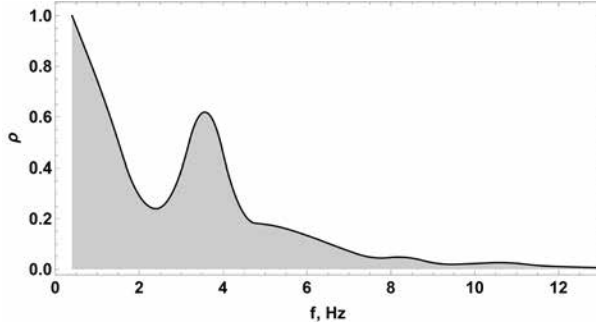


FIG. 49. Gluda normalizēta blīvuma histogramma (Skota (angl. *Scott*) metode, 2. kārtas interpolācija) pirmajām 10 dominējošajām frekvencēm, kas apkopotas 200 garākajām (pēc grafa mezglu skaita) trajektorijām.

plūsmas īpašībām. Visbeidzot, jāņem vērā, ka Stoksa pretestības likums par zemu novērtē pretestības spēku priekš  $Re_p$ , kas ir ievērojami lielāks par 1, kas nozīmē, ka šeit iegūtais  $Stk$  diapazons, iespējams, ir pārvērtēts.

Tātad provizoriskie rezultāti liecina, ka piedāvātā pieeja ir derīga lokālai DIV jau esošā formā, un padziļinātai pilnībā rekonstruēt trajektoriju fizikālai analīzei, un līdz ar to arī astes plūsmas aprakstam, pēc esošās ekstrapolācijas shēmas [182] tiek aizstāts ar labāku risinājumu. Vēlma arī labāka interpolācija ADV laukam, jo tā ietekmē uz ADV balstītas kustības prognozēšanas kvalitāti.

### 3. Papildus paplašinājumi MHT-X

Lai gan modificētajam MHT-X kodam bija laba veikspēja, vairāki koda aspekti bija jāuzlabo, lai daļiņas varētu uzticamāk izsekot visā attēlotajā FOV [182, 185]. Šeit uz Delaunay triangulāciju balstītā ADV lauka kubiskā interpolācija ir aizstāta ar bezdivergences interpolāciju (BDI), kas ievieš plūsmas nesaspiežamības ierobežojumu [191–195]. Tas ir nepieciešams pareizai uz ADV balstītai kustības prognozēšanai šķēršļu astes plūsmās, kur daļiņām ir mazāks ātrums un ļoti svārstīgas trajektorijas, un gadījumos, kad daļiņas iekļūst astes plūsmas zonā vai iziet no tās, kā arī šķēršļu un kanālu sienu tuvumā. Ir veikti arī uzlabojumi neitronu attēlu artefaktu atrašanai un noņemšanai, jo artefakti, kas palikuši no attēlu apstrādes, var pārtraukt trajektorijas vai piespiest tās nepareizi rekonstruēt. Ir parādīts, ka iepriekš minētās izmaiņas izraisa ievērojamu daļiņu izsekošanas kvalitātes pieaugumu, kas ļauj rekonstruēt daudzas trajektorijas, kas aptver visu FOV;

veikt DIV un iegūt frekvenču spektru un varbūtības blīvuma funkcijas (VBF) daļiņu ātrumam; izmērīt trajektorijas liekumu  $\kappa$  un iegūt VBF un FOV karti  $\kappa$ ; novērtēt daļiņu atrašanās vietu FOV — tas viss ir darīts kvazi stacionārai plūsmai ap cilindrisku šķērslī cilindra Reynoldska skaitļa  $Re_c$  diapazonam.

$\kappa$  (bet arī vērpes un liekuma leņķa) mērīšana daļiņu trajektorijām un statistikas iegūšana ir viens no veidiem, kā pētīt dažādas plūsmas klases un jo īpaši turbulento plūsmu, jo  $\kappa$  sniedz informāciju par plūsmas telpiskajiem mērogiem un to mainīgumu laikā. Ir zināms, ka VBF  $\kappa$ , vērpes un izliekuma leņķiem uzrāda algebrisko dilšanu ar eksponentiem atkarībā no plūsmas dimensijas (t.i. 2-/3-dimensiju plūsma, utt.), ko var redzēt arī turbulences enerģijas spektros. Ir diezgan daudz gadījumu, kad šī informācija sniedz atslēgas ieskatu analizētajās dinamiskajās sistēmās [196–211]. Šajā gadījumā plūsma ir praktiski divdimensiju, tāpēc vērpes aprēķini nav iespējami, taču var pārbaudīt, vai daļiņu izsekošanas rezultāti ir atbilstoši, apskatot VBF  $\kappa$ . Ja iegūtie rezultāti ir pietiekami tuvu gadījumiem, kad plūsma ir salīdzināma, tas nozīmē, ka piedāvātās metodes var pielietot plūsmas un turbulences ģeometriskai un statistiskai analīzei šķīdros metālos, pamatojoties uz daļiņu plūsmas radiogrāfijas eksperimentiem. Tajā pašā laikā jānorāda, ka šādi eksperimentālie dati un pētījumi *šķidrā metālā*, lai arī pēc autoru zināšanām ir pieprasīti, literatūrā pašlaik nav pieejami un līdz šim varēja palauties tikai uz simulācijām un teoriju.

Divdimensiju izotropai un viendabīgai turbulencei visievērojamākie pētījumi (eksperimenti, simulācijas un teorija) liecina, ka šeit apskatītajai sistēmai vajadzētu sagaidīt VBF algebrisko dilšanu ar  $k \sim [-2.0; -2.1)$  augsta  $\kappa$  eksponenti, un  $k \sim 0$  zema  $\kappa$  eksponenti visam  $Re_c$  diapazonam, un abām jābūt noturīgam laika gaitā [196, 201–205]. Tika arī novērots, ka  $\kappa$  VBF  $k = 0$  reģions tiek novirzīts uz mazākām vērtībām, palielinoties plūsmas  $Re$ , un, lai gan tas nav skaidri norādīts, šķiet, ka VBF reģions  $k = -2$  ir, otrādi, nobīdīts uz augšu ar  $Re$ , lai gan pieaugumi izskatās mazāki, salīdzinot ar gadījumu  $k = 0$ . Paturot to prātā, iepriekš minētie plūsmas raksturlielumi tiek parādīti diapazonam  $Re_c$ , salīdzināt rezultātus ar esošajiem datiem, kā arī tiek parādīts, kā izsekošanas kvalitāte mainās ar  $Re_c$  fiksētai parametru kopai MHT-X kodam.

MHT-X veic vairākas datu kopas skenēšanas (*grafa skenēšana*) ar pakāpeniski pieaugošiem laika logiem (*loga izmēra skenēšana*), kuros notiek trajektorijas rekonstrukcija. Tas ļauj izmantot kustības modeļus, kas balstās uz savienojumiem starp objektiem, kas izveidoti laikā atpakaļ un uz priekšu, t.i., izmanto *kontekstu*, jo asociācijām, kas starp objektiem tika izveidotas iepriekšējo grafa skenēšanas iterāciju laikā. Jāņem vērā, ka šāda informācija nav pieejama *a priori* no ievades datiem. Šādu modeļu trūkums ir tāds, ka ir jādefinē īpaši gadījumi, kad nav pieejams pietiekams

konteksts. Rezultātā grafa malas, iespējams, tiek veidotas ar (potenciāli) dažādiem modeļiem katras grafa skenēšanas laikā (Attēls 50). Lai gan no tā nevar pilnībā izvairīties, to var novērst, veicot trajektorijas atkārtotu izvērtēšanu, kas ir solis, kas tiek veikts pēc katras pilnīgas grafa skenēšanas. Tas pārreķina varbūtību katrai malai trajektorijas grafā.

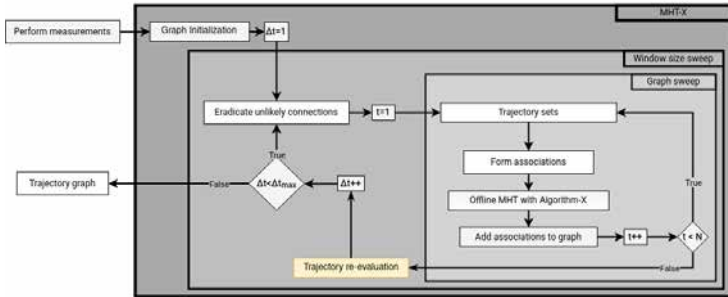


FIG. 50. Atjauninātā MHT-X algoritma blokshēma (salīdzinājumā ar Attēlu 1 no [182]) ar jauno atkārtotās novērtēšanas darbību.

Šis solis ir nepieciešams, jo savienojumi, kas tika izveidoti agrākas grafa skenēšanas laikā, būs izveidoti ar mazāku kontekstu un, retrospektīvā, varētu būt ar pārvērtēt varbūtību. Iepriekš, ja absurdam savienojumam kāda iemesla dēļ tika piešķirta liela varbūtība, to nevarēja novērst, jo varbūtība tika piekārtota tikai savienojuma izveidošanas brīdī. Tagad, kad trajektorija ir pabeigta, tiek pārbaudīts, cik labi katrs tās savienojums sader ar pārējiem. Tas tiek darīts pēc katras pilnīgas grafa skenēšanas. Procedūra ir šāda: katra trajektorija iteratīvi tiek sadalīta divās ap katru no tās malām, īslaicīgi dzēšot pašlaik pārbaudīto malu. Pēc tam īslaicīgi izdzēstās malas varbūtība tiek pārreķināta, pamatojoties uz divām iegūtajām trajektorijas daļām, nododot tās statistikas funkcijām (parādītas [182] un [185]). Līdzīgi tiek atkārtoti novērtētas arī trajektorijas ieejas un izejas savienojuma iespējamības.

Iepriekš, izmantojot interpolētos ADV laukus daļiņu kustības prognozēšanai, ADV vektora lauka komponentes tika uzskatītas par diviem neatkarīgiem skalārajiem laukiem. Interpolācija bija nepieciešama, jo ADV deva vektoru vērtības retā regulārā režģī, un daļiņu pozīcijas varēja atrasties jebkurā interesējošajā FOV vietā ar zempikseļu precizitātes koordinātēm. Katrai no ADV komponentēm tika veikta Delaunay triangulācija ADV punktu režģim, un kubiskā interpolācija tika izmantota daļiņu centrodām, kas atradās trijstūrī, ko veido tuvējie ADV režģa punkti. Citādi tikz izmantota tuvākā kaimiņa interpolācija. Pēc tam interpolētais

ātruma lauks tika projicēts uz daļiņu pozīcijām. Šī diezgan naivā pieeja sniedza pieņemamus rezultātus. Tomēr šeit ir parādīta uzlabota pieeja, izmantojot ADV datu bezdiverģences interpolāciju (BDI). Šīs metodes izmantošanas iemesls ir tas, ka iepriekš izmantotā interpolācijas metode nav balstīta uz fiziku un neuzliek nekādus ierobežojumus interpolētajam laukam. Tikmēr BDI ir īpaši izstrādāta tā, lai interpolētais lauks analītiski atbilstu plūsmas nesaspiežamības ierobežojumam, kam, kā tika pierādīts, ir būtiska ietekme, īpaši gadījumos ar daļiņu plūsmu [191–195]. Šajā gadījumā plūsma ir gandrīz divdimensiju, tāpēc var sagaidīt gandrīz nulles ātruma lauka diverģenci.

Bezdiverģences interpolants izmanto matricu-veida radiālās bāzes funkcijas (RBF), kā ir aprakstīts [191]:

$$\Phi(\vec{x}) := (-\nabla^2 I + \nabla \otimes \nabla)\phi_\delta(\vec{x}) \quad (16)$$

kur  $I$  ir identitātes matrica. Šī interpolācijas metode ir labvēlīga, jo tā atbalsta patvaļīgi atlasītus datus, un to var padarīt skaitļošanas ziņā lētāku, izmantojot daudzlīmeņu pieeju [193]. Pašreizējā ne-daudzlīmeņu implementācija (nākotnē tiks pārveidota uz daudzlīmeņu) izmanto mērogotus RBF:

$$\phi_\delta(\vec{x}) := \delta^{-d}\phi_{\nu,k}\left(\frac{\|\vec{x}\|}{\delta}\right) \quad (17)$$

kur  $\delta$  ir atbalsta rādiuss,  $d$  ir sistēmas kustības dimensiju skaits un  $\phi_{\nu,k}$  ir RBF, kā definēts [192]. BDI pieeja arī ļauj definēt robežnosacījumus (RN) apgabalā, kurā notiek objektu izsekošana. RN ir svarīgi ņemt vērā, jo, papildus nulles diverģences ierobežojumam, plūsmas laukam jāatbilst arī neslīdēšanas (angl. *no-slip*) RN kanāla sienās un šķēršļa perimetrā. Neslīdēšanas RN tika iestatīts atsevišķos, vienmērīgi izvietotos punktus katrai sienai un šķēršļa perimetram (melnas līnijas Attēlā 51a). Šīs papildinformācijas pievienošana ļauj pareizi modelēt robežslāņu šķēršļa un sienu tuvumā un novērst plūsmas līniju krustojumus ar šķērslī un/vai sienām. Tas ir, bez BDI kopā ar RN un pamatojoties tikai uz MHT-X kustības ierobežojumiem un statistiskām funkcijām, daļiņas varētu, piemēram, "tunelēt" cauri telpai, kur atrodas cilindriskais šķērslis. Tādējādi uzlaboto MHT-X izsekošanas veiktspēju ar BDI ADV lauku var saistīt ar vairākiem faktoriem, piemēram, avotu un noteču likvidēšanu ADV laukā, tā lielāku gludumu, un papildu fizikālajiem ierobežojumiem, ko nosaka RN.

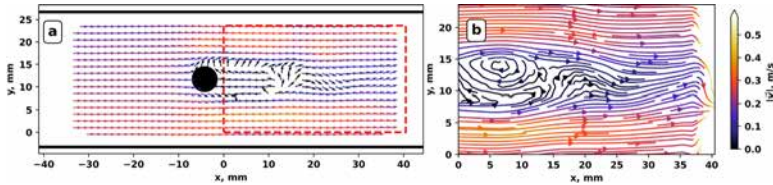


FIG. 51. (a) Vektora lauks iegūts ar ADV. Melnas līnijas ir robežnosacījumi. Sarkanā svītrainā līnija ir interesējošā apgabala kontūrs, kurā tika veikta izsekošana un kur ir uzzīmētas plūsmas līnijas. (b) Interpolācijas rezultātā iegūtās plūsmas līnijas. Interpolētā lauka labajā pusē ir pamanāms artefakts, kur plūsmas pēkšņi maina virzienu, un tās ātrums strauji palielinās (pārāk lielām vērtībām netiek zīmētas plūsmas līnijas), jo tur trūkst ADV datu. Šī kļūda ir nenozīmīga, jo šim reģionam analīzei nav nozīmes.

Iepriekš tika atzīmēts, ka pastāvīgi artefakti attēlos (piemēram, iestregušas daļiņas) var būt problēma, jo tie var radīt sistematiskas kļūdas trajektorijas rekonstrukcijā (piemēram, trajektoriju sadrumstalotība). Šādi artefakti tika noņemti, izmantojot uz tekstūras sintēzi balstītu aizpildīšanu [190] pēc tam, kad tie tika segmentēti no attēla secības apgrieztās vidējās projekcijas, izmantojot Otsu metodi [166]. Tomēr, kā parādīja lielākas datu kopas apstrāde, šī segmentācijas pieeja nav pietiekami stabila (vismaz šajā gadījumā). Tās vietā tika ieviesta Algoritmā 11 aprakstītā metode.

---

### Algorithm 11: Artefaktu detektēšana

---

- 1 Aprēķina attēlu secības vidējās projekcijas (laikā) apgriezto vērtību
  - 2 Aprēķina attēlu secības standarta novirzes projekciju (laikā)
  - 3 Izdalā Soļa 1 izvadi ar Soļa 2 rezultātu
  - 4 Veic *color tone mapping* (CTM) operāciju
  - 5 Pielieto Gausa *total variation* filtru un rezultātu invertē
  - 6 Binarizē ar manuālu sliekšni, izmantojot Otsu metodes izvadi kā sākotnējo minējumu
  - 7 Pielieto aizpildīšanas transformāciju un (pēc izvēles) filtrēšanu pēc izmēra
  - 8 Veic tekstūru sintēzi iegūtajos artefaktu apgabalos visiem attēlu secības kadriem
- 

Tas, starp citu, arī ļauj viegli detektēt šķērslī plūsmas kanālā, Algoritma 11 izvadei piemērojot morfoloģisko atvēršanu [165] un pēc tam segmentu izmēra filtru. Šķēršļa segmentācija ir nepieciešama, lai definētu BDI neslidēšanas RN. Iepriekš minētā metode ir noturīgāka galvenokārt tāpēc, ka 3. darbība rada daudz lielāku KTA artefaktiem, nekā izmantojot tikai apgriezto vidējo projekciju, un optimālo manuālo sliekšni var atrast ļoti ātri, pamatojoties uz sākotnējo Otsu metodes iterāciju (ar to dažos gadījumos



pat var pietikt). Tomēr dažos gadījumos šķēršļa KTA var būt pārāk zems Algoritmam 11, tāpēc 6. darbība tiek aizstāta ar K-medoīdu klasterizācijas segmentāciju [212]. Pēc tam var atlasīt attēla spilguma līmeņu kopu, kura ietver cilindrisko šķērslī, un to, izmantojot (šajā secībā) morfoloģisko atvēršanu, aizpildīšanas transformāciju, morfoloģisko paplašināšanos [165] un vēlreiz atvēršanu.

#### 4. Turpmākie rezultāti

Lai pārlicinātos, ka atjaunināto metožu un koda veikspējas demonstrācija ir godīga, tika nolemts apstrādāt visas attēlu secības, kas atbilst diapazonam  $Re_c \in [988; 4147]$ , izmantojot identiskus iestatījumus gan daļiņu detektēšanas kodam, gan MHT-X. Attēlu apstrāde tiek veikta, kā aprakstīts [185] ar parametriem, kas ir identiski dokumentā norādītajiem. MHT-X kustības modeļi ir tādi, kā aprakstīts iepriekš un [182, 185], un to parametri ir norādīti [213].

Konstatēts, ka vidējais daļiņu izmērs, kas redzams pēc attēlu apstrādes, ir  $\langle d_p \rangle = 0.43 \pm 0.13 \text{ mm}$  pret paredzamo  $d_p \in (0.3; 0.5) \text{ mm}$  [96], kas labi sakrīt. Neliela novirze uz lielākiem daļiņu izmēriem ir izskaidrojama ar daļiņu izmēra izšķirtspējas zemāko robežu, ko nosaka attēlu filtru iestatījumi, kas izmantoti un ņemti no [185]. Ņemot vērā, ka visos gadījumos tiek izmantoti identiski parametri, ir jābūt skaidri novērojamai veikspējas pasliktināšanās izsekošanas procesam, kas sagaidāms, palielinoties  $Re_c$  (daļiņu pārvietojumi laika vienībā kļūst lielāki, trajektorijas fragmentu savienojuma neviennozīmīgums ir biežāks).

Ir definēts ļoti stingrs kritērijs — par *derīgām trajektorijām* tiek uzskatītas tikai trajektorijas ar 20+ grafa mezgliem (notikumi laika gaitā). Tas ir stingrs ar to, ka šādas trajektorijas būs vai nu tās, kas virzās garām astes plūsmas zonai, vai mijiedarbojas ar to bez daļiņu iesprūšanas, un stiepjas visā FOV garumā (paredzams ar izvēlēto kadru ātrumu un raksturīgo daļiņu ātrumu [185]), vai tās, kuras uztver astes plūsma un kuras atrodas tajā ilgāku laika intervālu, reģistrējot maza mēroga plūsmas perturbācijas astes stagnācijas zonā un/vai tās astē, kas svārstās, kad notiek virpuļu atrašanās. Lai gan var iebilst, ka īsākas trajektorijas varētu izmantot laika un ģeometriskās statistikas iegūšanai, kā arī lokālajai DIV, vislabāk ir parādīt, kā ļoti garu trajektoriju, nevis jebkuru trajektoriju daudzums mainās ar  $Re_c$ , jo tie ir garāki informācijas ieraksti, kas sevī ietver daudz vairāk datu par turbulentās plūsmas telpisko un laika raksturu, un labāk uztver zemākas svārstību frekvences.

Kā veikspējas mērs tiek izmantota derīgo trajektoriju  $N_t$  skaita attiecība pret kadru skaitu  $N_f$  attēlu secībā. Attēlā 52 parādīts, kā šī attiecība

mainās, palielinoties  $Re_c$ .

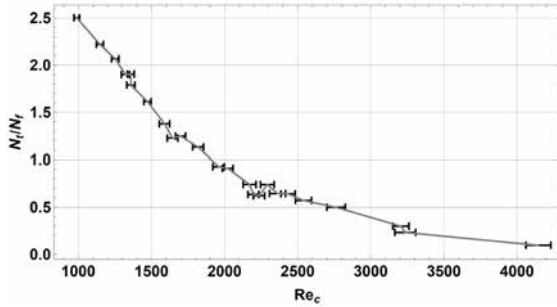


FIG. 52. MHT-X izsekošanas veiktspēja: kopējo derīgo trajektoriju  $N_t$  attiecība pret kadru skaitu  $N_f$  apskatītajā  $Re_c$  diapazonā.

Jāņem vērā, ka  $N_t$  šajā gadījumā parasti ir no 5% līdz 10% no datiem (jeb vidēji vairāki tūkstoši trajektoriju), taču tas ir tāpēc, ka MHT-X izvada visa garuma trajektorijas, tostarp viena mezgla trajektorijas, kas MHT-X sistēmā jāinterpretē kā novērsti viltus pozitīvi notikumi. Derīgo trajektoriju daļa ir daudz lielāka, ja tiek atnesti gadījumi ar  $< 5$  mezgliem. Jāievēro, ka veiktspēja pasliktinās nevienmērīgi: ir konstatēts, ka  $N_t/N_f$  atbilst  $x^n$  ar  $n = -2.13 \pm 0.11$  un  $R^2 = 0.94$ , bet tomēr neatbilst eksponenciālai funkcijai ( $R^2 \sim 10^{-3}$ ) – pēdējo varētu sagaidīt, ja veiktspēja galvenokārt būtu saistīta ar no ātruma atkarīgiem eksponenciālajiem mērogošanas faktoriem MHT-X kustības modeļa vienādojumos [185]. Lai uzlabotu izsekošanu ar lielāku  $Re_c$ , varētu mēģināt apiet problēmas, padarot attiecīgos kustības modeļus mazāk ierobežojošus, t.i., pieļaujot lielākas leņķa izmaiņas ātrākai kustībai. Tomēr acīmredzami to nevar darīt bezgalīgi, jo, pārsniedzot noteiktas  $Re_c$  vērtības, vienkārši būs nepieciešams lielāks kadru nomaiņas ātrums attēlu ierakstam radiogrāfijas eksperimentos.

Attēlā 53 parādīts reprezentatīvs derīgās trajektorijas. Jāņem vērā, ka tās ietver daļiņu kustību astes plūsmas stagnācijas zonā un astē, garām peldošo daļiņu mijiedarbību ar astes plūsmu, kā arī daļiņas, kuras lielākoties netiek ietekmētas. Trajektoriju daudzums un to mezglu skaits, kā arī derīgo trajektoriju fiziskais garums vispārīgā gadījumā ievērojami pārsniedz labāko, kādu iepriekš varēja sasniegt [185]. Lai gan uzlabotai artefaktu detektēšanai un noņemšanai ir svarīga loma, lielāko daļu uzlabojumu var attiecināt uz precīzāku ADV atbalstītu kustības prognozēšanu, kas izriet no daudz labāk interpolētā ADV lauka, ko nodrošina BDI ar RN.

Tāpat kā iepriekš, var izmērīt daļiņu pārvietojumus starp kadriem, taču šoreiz ir pietiekami labas trajektorijas, lai uzkrātu daļiņu ātruma statistiku

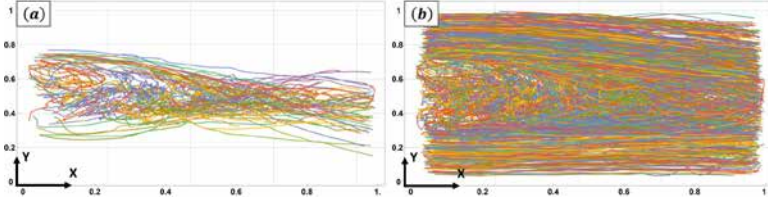


FIG. 53. FOV ietvaros rekonstruēto derīgo trajektoriju piemēri: (a) garākās 150 un (b) 1500 trajektorijas. Krāsas attēlo dažādas daļiņas, un asu atzīmju vērtības tiek normalizētas atbilstoši attiecīgajiem attēla izmēriem.

— Attēli 54 un 55 parāda VBF plūsmas virzienā  $v_x$  un šķērsvirzienā  $v_y$  (asis kā Attēlā 53) ātruma komponentēm visām derīgām trajektorijām katram  $Re_c$ . Protams, izsekošanas veikspējai pasliktinoties,  $Re_c$  tuvojoties maksimumam, VBF kļūst mazāk vienmērīga un trokšņaināka, un gadījumā ar  $Re_c = 4147$  dažiem VBF segmentiem ir daudz mazāks svars, nekā vajadzētu būt (nav parādīts Attēlos 54 un 55). Lai novērtētu fizikālās izmaiņas VBF, palielinoties  $Re_c$ , varētu domāt par VBF šādā veidā. Daļiņas var ļoti rupji iedalīt divās klasēs: tajās, kas ir iesprostotas vai vienkārši pavada daudz laika šķēršļu astes plūsmā (*sakertās daļiņas*), un tajās, kas vai nu iet garām neskartas vai tikai vāji mijiedarbojas ar astes plūsmu (*brīvās daļiņas*), kur pēdējā grupa ir vidēji ātrāka par pirmo. Tad var sagaidīt divas lietas — pirmkārt, pieaugot  $Re_c$ , tiks uztvertas vairāk brīvo daļiņu, un tām būs daudz mazāki ātrumi ar sadalījumu, kas centrēts pie gandrīz nulles ātruma, un ātruma dispersija palielinās ar  $Re_c$ ; otrkārt, brīvajām daļiņām, kas paliek tādas, būs lielāks kopējais ātrums un arī lielāka ātruma izkliede to ātruma VBF ieguldījumā.

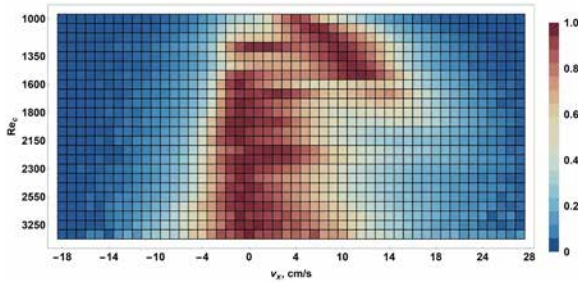


FIG. 54. Atsevišķi ģenerēti (Freedman-Diaconis metode) un normalizēti VBF derīgo trajektoriju plūsmas ātruma komponentei  $v_x$  visam  $Re_c$  diapazonam.

Tas nozīmē, ka pie ļoti zema  $Re_c$  vajadzētu sagaidīt, ka  $v_x$  VBF ir tikai viens maksimums, kas saistīts ar brīvajām daļiņām, jo astes plūsma aiz šķēršļa vēl nebūs pietiekami attīstījusies. Palielinoties  $Re_c$ , sagaidāms, ka sākotnēji vientūlais VBF maksimums sāks sadalīties divās daļās, kad aste sāks notvert daļiņas (izplešas stagnācijas zona un aste), un notverto daļiņu klase kļūst izšķirama kopējā  $v_x$  VBF. Pie lielāka  $Re_c$  astes uztverto daļiņu uzturēšanās laiks ievērojami palielinās, un atbilstošajam VBF maksimumam vajadzētu sākt dominēt virs brīvo daļiņu klases. Tajā pašā laikā ātruma dispersijai ap abiem maksimumiem vajadzētu palielināties, un brīvo daļiņu maksimumam vajadzētu novirzīties uz lielākām ātruma vērtībām. Tomēr, tā kā izsekošanas veikspēja pasliktinās ar  $Re_c$  (Attēls 52), varētu arī sagaidīt, ka brīvo daļiņu maksimums un tā apkārtnē VBF ietvaros kļūst vājāka, jo arvien vairāk ātrāko daļiņu netiek nepareizi apvienotas garākās trajektorijās, kas atbilst derīguma kritērijam. Attēlā 54 ir novērojamas visas iepriekš minētās tendences. Daļiņu sadalīšana divās klasēs nav redzama sīkāk, jo  $Re_c$  vērtību skenēšana nav ļoti blīva intervālā  $Re_c \in \sim [1000; 1200]$ , bet pāreja no brīvo uz uztverto daļiņu dominēšanu VBF var diezgan skaidri redzēt diapazonā  $Re_c \in \sim [1300; 1800]$ . Uztverto daļiņu ātruma izkliede ir asimetriska ar pozitīvu  $v_x$  novirzi, kas kļūst pamanāmāka, palielinoties  $Re_c$ , jo daļiņas ieiet un atstāj astes plūsmas zonu ar lielāku ātrumu kopumā.

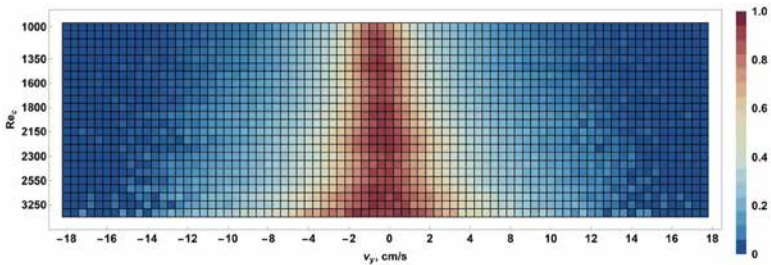


FIG. 55. Atsevišķi ģenerēti un normalizēti VBF derīgo trajektoriju šķērsvirziena ātruma komponentei  $v_y$  visam  $Re_c$  diapazonam.

Kā gaidīts, Attēlā 55 ir parādīta palielināta  $v_y$  VBF dispersija aptuveni ap nulles ātrumu, ko izraisa gan intensīvākas ātruma lauka perturbācijas astes plūsmas stagnācijas zonās, gan tās spēcīgākās svārstības ar augstāku frekvenci. Fakts, ka tiek novērotas šī un iepriekš minētās paredzamās tendences, ir arguments, ka daļiņu detektēšana un izsekošana tiek veikta adekvāti.

Tomēr šis apgalvojums joprojām prasa papildu pierādījumus un pastiprinājumu. Nemot vērā derīgās trajektorijās ģenerētos DIV datus, var arī pārbaudīt, vai MHT-X pareizi nosaka šķēršļu astes plūsmas virpuļu atrašanās frekvenci

$f_0$  – tas ir svarīgi, ja plānots izmantot piedāvātās metodes, lai novērtētu turbulentās plūsmas laika dinamikas raksturlielumus eksperimentos ar šķidriem metāliem. Tāpēc  $f$  spektri tiek aprēķināti visu derīgo trajektoriju  $v_x$  laikrindām (filtrētas ar mediānas filtru ar kodola platumu 1 punkts, lai noņemtu anomālas vērtības, t.i., tiek veikta *low-pass* filtrēšana) visām derīgajām trajektorijām aplūkotajā  $Re_c$  diapazonā. Pēc tam katram  $Re_c$  visu trajektoriju  $f$  spektri tiek apkopoti, sagrupējot visus konstatētos  $f$  notikumus, izmantojot Furjē koeficientu absolūtās vērtības kā svarus. To darot visam  $Re_c$  diapazonam un atsevišķi normalizējot iegūto  $f$  VBF, tiek iegūts Attēls 56.

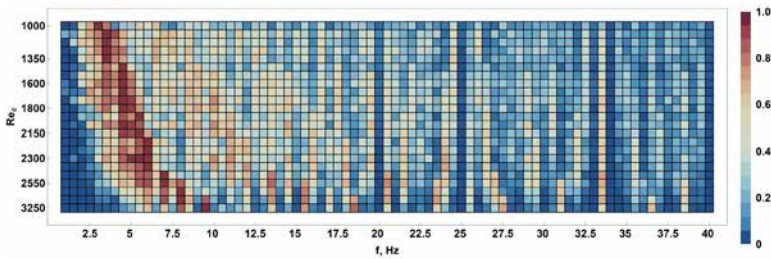


FIG. 56. Frekvenču  $f$  VBF  $v_x$  visam  $Re_c$  diapazonam, kuri apkopoti no  $v_x$  Furjē spektriem visām derīgām trajektorijām katrā gadījumā. VBF normalizācija ir atsevišķa katrai  $Re_c$  vērtībai. Apkopošana tiek veikta, visus  $f$  notikumus derīgām trajektorijām pārveidojot par VBF, izmantojot Furjē koeficientus kā svarus ar 200 frekvenču intervālu VBF izšķirtspēju.

Var redzēt zemāko- $f$  joslu ar spēcīgu maksimumu, kas pāriet uz lielākām  $f$  vērtībām, palielinoties  $Re_c$  — tas atbilst virpuļu atrašanās frekvencei  $f_0$ . Tā kā radiogrāfijas eksperimentu laikā  $Re_c$  diapazons tika atlasīts nevienmērīgi un ir daži  $Re_c$  gadījumi ar diezgan līdzīgām vērtībām, Attēlā 56 nevar redzēt skaidru diagonāli. Tomēr, tā kā novērotā nobīdes josla rada visintensīvākos maksimumus, var ņemt maksimālās VBF vērtības katram  $Re_c$ , iegūt atbilstošo  $f$ , un attēlot vērtības pret  $Re_c$ , salīdzinot eksperimentāli noteikto  $f_0$  ar teorētiski sagaidāmo. Šis salīdzinājums ir parādīts Attēlā 57, kur sagaidāmās  $f$  vērtības tika aprēķinātas no  $Re_c$  diapazona, pieņemot nemainīgu Strouhala skaitli  $Sr = 0.197$  [213]. Gan vizuāli, gan pārbaudot apakšattēlu (a), kas parāda relatīvo kļūdu histogrammu diapazonam  $Re_c$ , var redzēt, ka atbilstība patiešām ir laba. Tomēr lasītājam tiek lūgts uzskatīt labo  $f$  atbilstību maksimālajai  $Re_c$  vērtībai kā laimību sagadišanos, jo atbilstošajam  $f$  VBF (nav parādīts Attēlā 56) ir ārkārtīgi zema STA. Tomēr priekšpēdējās  $Re_c$  vērtības maksimums  $f_0$  ir ļoti skaidrs, neskatoties uz objektīvi sliktāko izsekošanas

veiktspēju pretstatā zemāka  $Re_c$  gadījumiem.  $f_0$  noteikšanas kvalitāti var pārbaudīt arī piemērojot lineāru modeli eksperimentāli iegūtām  $f_0$ . Konstantam  $Sr$  ir  $f_0 = Re_c \cdot St/\rho d^2$  (izvedums parādīts [213]). Paņemot eksperimentālās  $f_0$  vērtības, tiek iegūts  $Sr = 0.196 \pm 0.009$ , kas atbilst sagaidāmajam.

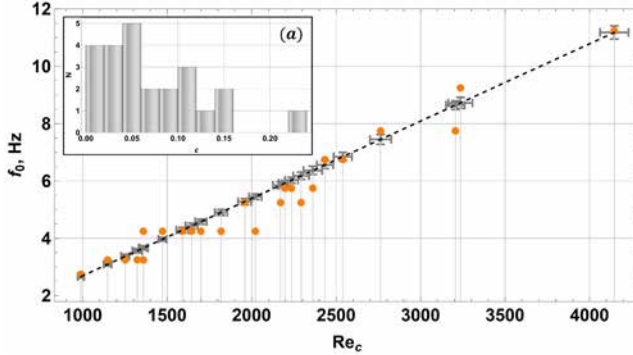


FIG. 57. Virpuļu atrašanās frekvences  $f_0$ : teorētiski paredzētas (pelēki punkti ar kļūdu joslām) un iegūtas no frekvenču VBF (oranži punkti), izvēloties dominējošo frekvences maksimumu katram  $Re_c$ . Melnā pārtrauktā līnija norāda paredzamo lineāro  $f(Re_c)$  tendenci, un (a) parāda relatīvo kļūdu ( $\epsilon$ ) histogrammu teorētiskajām un eksperimentālajām  $f_0$  vērtībām.

Turbulences telpiskais raksturojums ir ļoti interesants arī šķidrajiem metāliem, tāpēc jānoskaidro, vai MHT-X pietiekami kvalitatīvi konstruē trajektorijas, ļaujot pietiekami precīzi atvasināt trajektorijas ģeometrijas statistiku. Šim nolūkam liekums  $\kappa$  tiek aprēķināts gar katru derīgu trajektoriju (procedūra detalizēti izskaidrota [213]). Visas trajektorijas punktiem noteiktās liekuma vērtības tiek normalizētas pret inverso vidējo daļiņu izmēru  $\kappa_0 = 1/\langle d_p \rangle$ , un  $\kappa$  VBF tiek aprēķināts dubultā- $\log_{10}$  mērogā (Freedman-Diaconis metode). Tas tiek darīts visam  $Re_c$  diapazonam, iegūstot VBF kopu, kura parādīta Attēlā 58.

Ir jāatzīmē vairākas galvenās VBF īpašības. Pirmkārt, var ļoti skaidri redzēt, it īpaši (a) un (b) apakšattēlos, ka VBF patiešām uzrāda gandrīz nemainīgu  $k_2 = -0.05 \pm 0.05$  zema  $\kappa$  reģionu (ar daudz mazāku STA zem  $\kappa/\kappa_0 \sim 2.5 \cdot 10^{-4}$ ) un algebriskās dilšanas apgabalu ar  $k_1 = -2.09 \pm 0.04$  – abi ir diezgan tuvu paredzamajām eksponentes vērtībām. Turklāt var novērot divas tendences: zemā  $\kappa$  intervālā VBF līknes nobīdās uz leju, pieaugot  $Re_c$ , kā parādīts (a) — tas atbilst eksperimentāli izmērītajam [205]; augstā  $\kappa$  reģionam apgrieztā tendence ir redzama (c) — lai gan tas nav norādīts, to joprojām var redzēt [205], neskatoties uz to, ka VBF ir

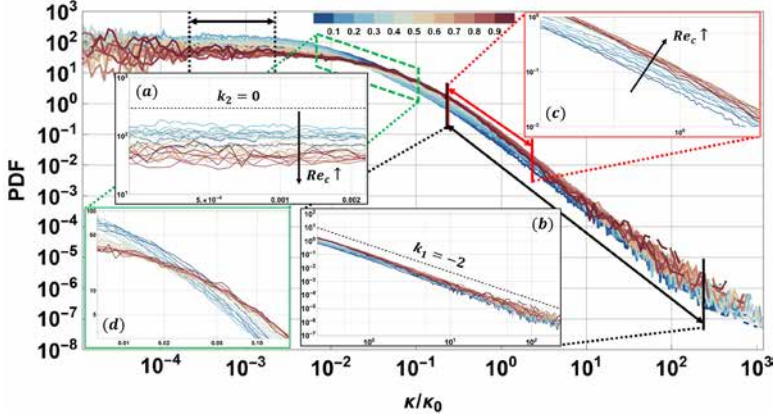


FIG. 58. Trajektorijas liekuma  $\kappa$  VBF (normalizēta uz apgriezto vidējo daļiņu izmēru  $\kappa_0$ ) visām derīgajām trajektorijām dažādiem  $Re_c$  ar līknēm, kas nokrāsotas pēc to attiecīgajām  $Re_c$  vērtībām (krāsu joslas 0 atbilst minimumam  $Re_c$  un 1 ir maksimums), palielinoties no zila uz sarkanu. Apakšattēli (a) un (b) izceļ VBF konstantu ( $k_2 = 0$  atskaites punktētā līnija) un algebriskās dilšanas ( $k_1 = -2$  atskaites punktētā līnija) intervālus. (a) parāda VBF līkņu nobīdi un leju intervālā  $k_2 = 0$ , pieaugot  $Re_c$  vērtībai, un apgrieztu tendenci var redzēt (c) apgabalam  $k_1 = -2$ . Jāņem vērā arī tendences maiņas apgabalu, kas izcelts ar zaļu pārtrauktu rāmi un detalizētāk parādīts apakšattēlā (d).

saspiests (nemodificējot  $k_{1,2}$ ), mērogojot liekuma vērtības attiecībā pret ātruma un paātrinājuma variācijām. Visbeidzot, var skaidri redzēt  $Re_c$  tendences inversiju (d), kas novērota arī [205]. Fakts, ka šie  $\kappa$  VBF elementi un to universālā mērogošana šeit aplūkotajā  $Re_c$  diapazonā tika veiksmīgi reproducēti, kalpo, lai vēl vairāk apstiprinātu parādīto metožu pielietojamību šķidriem metāliem un turbulences raksturošanai tajos.

Ir pārbaudīts, vai pareizi ir aprēķināts ne tikai  $\kappa$  VBF, bet arī  $\kappa$  kartes priekš FOV. Lai to izdarītu,  $\kappa$  kartes tiek ģenerētas no retinātiem  $\kappa$  laukiem, kas apkopoti no visām derīgām trajektorijām konkrētajam  $Re_c$  (procedūra izskaidrota [213]). Piemērs vienai no analizētajām attēlu sekvencēm ir redzams Attēlā 59, kur ir parādīta  $\log_{10}(\kappa/\kappa_0)$  krāsu karte. Augstākās  $\kappa$  vērtības ir koncentrētas šķēršļa astes plūsmas zonā, kā paredzēts, ar vājiem šaurākiem pavedieniem, kas stiepjas uz FOV labo pusi. Kvēldiegu kopai līdzīgo struktūru, kas redzama Attēlā 59a, var saprast, pirms iekrāsošanas kartei  $\log_{10}(\kappa/\kappa_0)$  piemērojot CTM operāciju – saspižot vērtību histogrammu, tiek atklātas skaidras līknes astes plūsmas zonā un ārpus tās, kas nav nekas cits kā vizualizētas trajektorijas, kur dzeltenāki plankumi un

pavedieni ir augstāka  $\kappa$  trajektoriju fragmenti (Attēls 59 b).

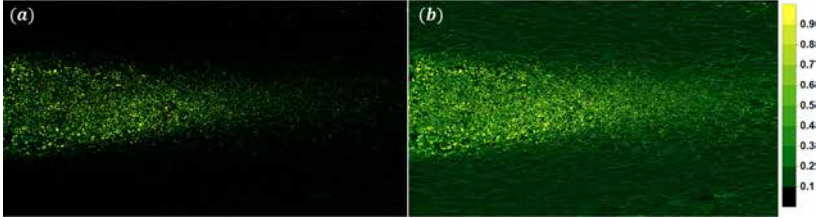


FIG. 59. Trajektoriju liekuma  $\kappa$  kartes piemērs radiogrāfijas FOV, kas iegūts no derīgām trajektorijām. (a) Parāda normalizētā  $\log_{10}(\kappa/\kappa_0)$  krāsu karti, un (b) ir tās versija pēc CTM operācijas.

Interesanti, ka  $\kappa$  sadalījumi, kas redzami  $\kappa$  kartēs dažādiem  $Re_c$ , ir diezgan līdzīgi (parādīts [213]). Lai gan  $X$  (straumes virzienā) profili ir diezgan līdzīgi,  $Y$  profilu platums nedaudz mērogojas ar  $Re_c$ , norādot, ka šķēršļa astes plūsmas zona paplašinās šķērsvirzienā, palielinoties brīvās plūsmas ātrumam, un tas ir loģiski. Attēlā 60 ir redzams, ka liekumam (pus- $\log_{10}$  mērogā) ir plato ar ļoti mazu slīpumu, kas stiepjas no cilindriskā šķēršļa malas ( $X = 0$ ) gandrīz līdz FOV vidum, un tad ātri nokrīt ar  $X$ . Savukārt  $Y$  profils, kā gaidīts, ir diezgan simetrisks.

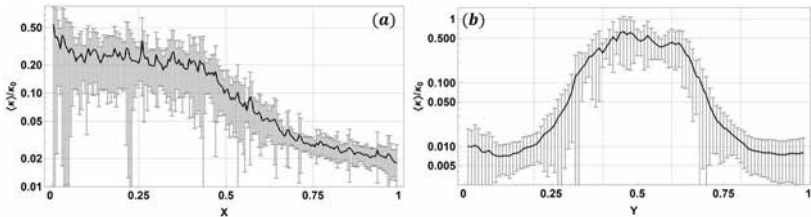


FIG. 60. Vidējie  $\kappa/\kappa_0$  sadalījumi  $Re_c$  diapazonā (a)  $X$  un (b)  $Y$  virzieniem visā FOV.

Protams, ir vēl viena problēma, kas jāapskata –  $\kappa$  statistiku, kas parādīta Attēlā 58, potenciāli var ietekmēt daļiņu sadursmes. Lai gan nevar gaidīt ievērojamu sadursmju skaitu nevienā  $Re_c$  gadījumā, ir jāsniedz vismaz aptuvenš novērtējums tam, cik liela ietekme varētu būt sadursmēm. Lai to izdarītu, tiek izmantots primitīvs sadursmes novērtējuma modelis (skaidrots [213]), kas ņem vērā daļiņas no derīgām trajektorijām, kuras vienlaikus atrodas dotajā kadrā. Izmantojot šo primitīvo modeli, var aptuveni novērtēt, cik bieži un kur var notikt sadursmes — tas ir atspoguļots Attēlā 61, kur



vidējais daļiņu sadursmju skaits uz kadru  $\langle N_c \rangle$  un tā attiecība pret vidējo daļiņu skaitu vienā kadrā  $\langle N_p \rangle$  tiek parādīta aplūkotajā  $Re_c$  diapazonā.

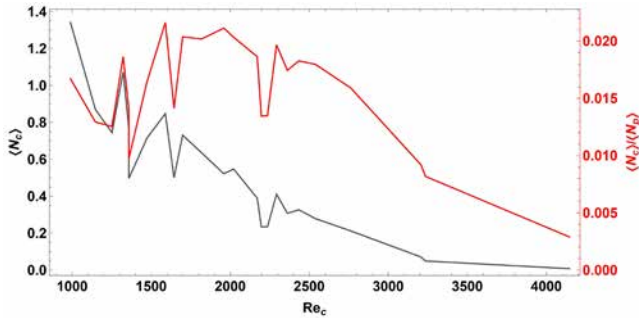


FIG. 61. Vidējais daļiņu sadursmju skaits uz kadru  $\langle N_c \rangle$  (pelēks) un tā attiecība pret vidējo daļiņu skaitu vienā kadrā  $\langle N_p \rangle$  (sarkans) aplūkotajam  $Re_c$  diapazonam.

Jāatgādina, ka jāņem vērā arī MHT-X izsekošanas veikspējas pasliktināšanās, palielinoties  $Re_c$ , kas izskaidro diezgan straujo  $\langle N_c \rangle / \langle N_p \rangle$  kritumu pēc  $Re_c \sim 2500$  sliekšņa. Tomēr var redzēt, ka pat pie  $Re_c < 2500$ , kur vajadzētu redzēt iespējamās sadursmes ar iepriekš minēto vienkāršo modeli, tās ir reti sastopamas, īpaši ņemot vērā, ka FOV vienlaicīgi ir vidēji  $\sim 250$  daļiņas. Attēlā 62 ir parādīts piemērs tam, kā sadursmes, kas aprēķinātas visai attēlu secībai, tiek tipiski sadalītas FOV ietvaros.

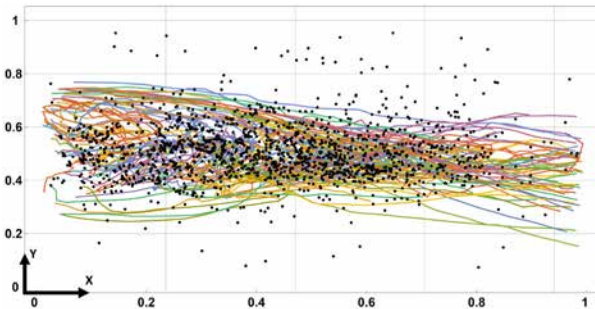


FIG. 62. Sadursmes notikumu sadalījuma (melno punktu) piemērs, kas novērtēts FOV. Kontekstam tiek parādītas trajektorijas, kas iekrāsotas pēc to ID.

Ir skaidrs, ka lielākā daļa sadursmju notiek astes plūsmas reģionā, jo īpaši stagnācijas zonā, kur daļiņas ir pakļautas asam un diezgan haotiskam ātruma lauka perturbācijām. Tas ir sīkāk apskatīts [213]. Sadursmju

telpiskā blīvuma sadalījumi ir diezgan līdzīgi dažādām  $Re_c$  vērtībām.

Zinot, cik bieži un kur sadursmes notiek visvarbūtīgāk, var novērtēt to ietekmi uz daļiņu kustību un trajektorijām, jo īpaši to  $\kappa$  statistiku. Sadursmes enerģiju  $E_c$  var novērtēt no sadursmes daļiņu relatīvā ātruma, kas projicēts uz līniju, kas savieno to centroīdas. Lai padarītu to vienkāršāku, taču godīgāku, tiek pieņemts sliktākais scenārijs, un tiek piešķirts kopējais  $E_c$  (daļiņu masas reizinājums ar projicēto relatīvo ātrumu) sadursmes pāra *abām* daļiņām. Tā kā daļiņu izmēra standartnovirze  $\sigma_d$  ir diezgan maza, var arī pieņemt, ka visām daļiņām ir *vienāda* masa. Lai gan  $E_c$  pati par sevi nav informatīva, tās attiecībai pret katras pāra daļiņas sākotnējo kinētisko enerģiju  $E_0$  ir jānosaka, cik relatīvi mainās kinētiskā enerģija un līdz ar to cik lielā mērā var lokāli tikt ietekmēta trajektorijas forma. Aprēķinot  $E_c/E_0$  katrai daļiņai, kurai paredzēta sadursme, pēc tam konstruējot VBF dubultā  $\log_{10}$  mērogā (Freedman-Diaconis metode), un to darot katram  $Re_c$  gadījumam, iegūst  $E_c/E_0$  VBF, kā redzams Attēlā 63.

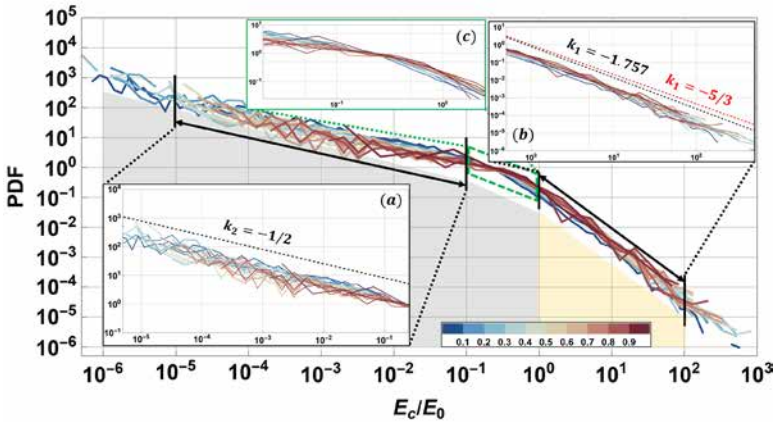


FIG. 63. Sadursmes un sākotnējās kinētiskās enerģijas attiecības  $E_c/E_0$  VBF visām izvērtētajām sadursmēm dažādiem  $Re_c$ . Līknes ir apzīmētas ar krāsām pēc to attiecīgajām  $Re_c$  vērtībām (0 atbilst minimālajam  $Re_c$  un 1 ir maksimālajam), palielinoties no zilas uz sarkanu. Apakšattēli (a) un (b) sīkāk parāda  $k_2 = -1/2$  (atskaites punktētā līnija) un  $k_1 = -1,757/k_1 = -5/3$  (atskaites melnās un sarkanās pārtrauktās līnijas) intervālus  $E_c/E_0$  VBF, attiecīgi. (c) parāda  $Re_c$  VBF nobīdes tendences inversiju, līdzīgi kā Attēlā 58d. Pelēki un dzelteni iekrāsoti VBF apgabali atspoguļo zemo un augsto  $E_c/E_0$  daļu kumulatīvo ieguldījumu ar robežu  $E_c/E_0 = 1$ .

$E_c/E_0$  VBF arī ir algebriskā dilšana un divi atšķirīgi apgabali (augsta un zema  $E_c/E_0$ ), taču atšķirībā no  $\kappa/\kappa_0$  VBF Attēlā 58, algebriskā dilšana

notiek abos reģionos. Ir vilinoši teikt, ka apakšattēli (a) un (b) parāda VBF nobīdi ar  $Re_c$ , kā tas ir redzams  $\kappa/\kappa_0$  Attēlā 58, bet STA šeit ir nepietiekama, lai to droši apgalvotu jebkur, izņemot, iespējams, intervālu  $E_c/E_0 \in \sim (10^{-2}; 10^{-1})$ . Tomēr  $Re_c$  VBF nobīdes tendences inversija, kas ir līdzīga tai, kas parādīta Attēlā 58d, ir diezgan skaidra šeit apakšattēlā (c). Kas attiecas uz algebriskās dilšanas intervāliem, šeit ir zema koeficienta eksponente  $k_2 = -0,498 \pm 0,009$  (gandrīz  $1/2$ , lai gan atbilstība nav tik laba ar  $R^2 = 0.89$ ) un augstas attiecības eksponente  $k_1 = -1.757 \pm 0.011$ . Pēdējais ir ļoti tuvu  $-5/3$ , kas ir ļoti interesanta sakritība. Jāņem vērā, ka pāreja starp  $k_2$  un  $k_1$  algebriskās dilšanas eksponentēm notiek ļoti tuvu  $E_c/E_0 = 1$ , sākot no  $\sim 10^{-1}$ , kas ir, rupji runājot, sliekšnis, pēc kura sadursmēm jāsāk manāmi ietekmēt daļiņu trajektorijas. Tomēr no Attēla 63 ir pilnīgi skaidrs, ka dominējošais ieguldījums attiecīgajā kumulatīvā sadalījuma funkcijā izriet no sadursmēm ar ļoti zemu  $E_c/E_0$ . Tas nozīmē, ka  $\kappa$  statistikai, kas iegūta no trajektorijām, patiešām vajadzētu galvenokārt aprakstīt turbulento pulsāciju ietekmi šķidrā metāla plūsmā. Tā kā  $\langle N_c \rangle / \langle N_p \rangle$  ir ļoti zems un ir ļoti plašs  $E_c/E_0$  vērtību diapazons, STA  $E_c/E_0$  profiliem atsevišķam  $Re_c$  arī nav pietiekami augsts, lai noteiktu, kur  $E_c/E_0$  maksimumi atrodas FOV, vismaz pieņemamās kļūdu robežās [213]. Lai to izdarītu, īpaši lielākiem  $Re_c$ , vienai attēlu secībai nepieciešams ievērojami ilgāks radiogrāfijas ieraksta laiks. Visbeidzot, ja vēlas padziļināti izpētīt sadursmes, ir nepieciešama stingrāka pieeja, un ideālā gadījumā sadursmes būtu jāiestrādā MHT-X kustības modeļos. Tomēr var novērtēt, kur FOV daļiņas pavada vairāk laika, kas parādīts Attēlos 64-66.

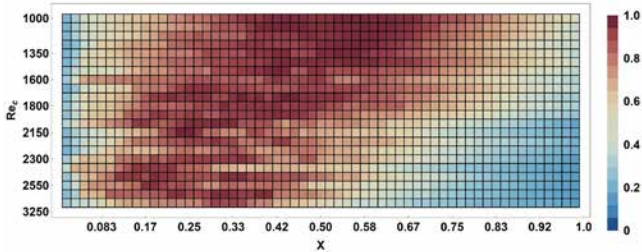


FIG. 64. Daļiņu vidējais telpiskais blīvums  $\rho_p$  gar  $X$  visam  $Re_c$  diapazonam. Krāsu karte parāda normalizētu (atsevišķi katrai  $Re_c$ ) un ar mediānas filtru (kodola rādiuss ir 1 punkts) apstrādātu  $\rho_p$ .

Attēls 64 liecina, ka, pieaugot  $Re_c$ , arvien vairāk daļiņu tiek iesprotas astes plūsmas reģionā, un jo īpaši tās stagnācijas zonā, līdz ar to daļiņu telpiskā blīvuma ( $\rho_p$ ) sadalījuma maksimums pāriet uz mazāku  $X$ . Vidējošana pēc  $Re_c$  arī atklāj, ka stagnācijas zona ir visvairāk daļiņu

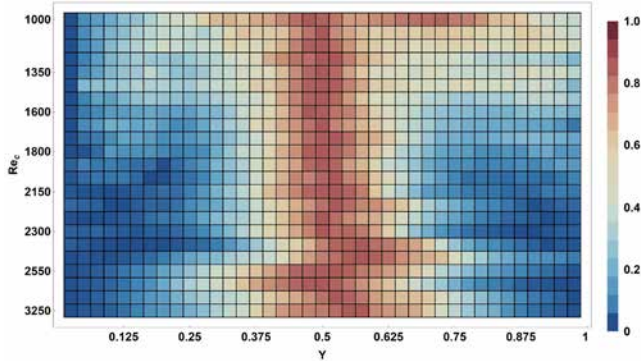


FIG. 65. Daļiņu telpiskais blīvums  $\rho_p$  pret  $Y$  visam  $Re_c$  diapazonam. Krāsu karte rāda normalizētu un ar mediānas filtru apstrādātu  $\rho_p$ .

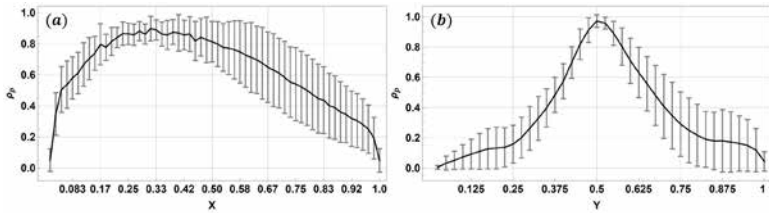


FIG. 66. Vidējā normalizētā daļiņu telpiskā blīvuma  $\rho_p$  sadalījumi gar (a)  $X$  un (b)  $Y$  FOV aplūkotajā  $Re_c$  diapazonā.

apdzīvotā vieta FOV. Tā kā kadru ātrums ir nemainīgs,  $\rho_p$  atbilst daļiņu uzturēšanās laikam. Tomēr jāņem vērā, ka izsekošanas veikspējas pasliktināšanās dēļ lielākiem  $Re_c$  tiks zaudētas dažas daļiņas, kas pārvietojas ar lielāku ātrumu un tikai vāji mijiedarbojas ar astes plūsmu. Tāpēc  $\rho_p$  sadalījumi augstākam  $Re_c$  nesniedzas daudz tālāk par  $X = 0.6$ . Attēls 65, kā paredzēts, parāda, ka, palielinoties  $Re_c$ , relatīvais daļiņu uzturēšanās laiks, ko attēlo  $\rho_p$ , palielinās centrā ( $Y = 0.5$ ) un samazinās prom no tā, ar izteiktāku izkliedi lielākuem  $Re_c$ , astes plūsmas zonas paplašināšanās dēļ.

Visbeidzot, var izmantot DIV ātruma laukus no MHT-X, lai iegūtu nepārtrauktu ātruma lauku ar telpisko izšķirtspēju, kas ir augstāka par ADV – piemēru var redzēt Attēlā 67. Tas tiek darīts, izmantojot BDI un trajektorijas atkārtotu pārgenerēšanu ar interpolāciju, kā paskaidrots [213], ņemot vērā arī šķēršļa un kanāla sienas RN.

Patiešām, kā redzams Attēlā 67, iegūtajam uz DIV balstītam laukam (b) patiešām ir lielāka izšķirtspēja nekā ADV (a), un tas daudz labāk

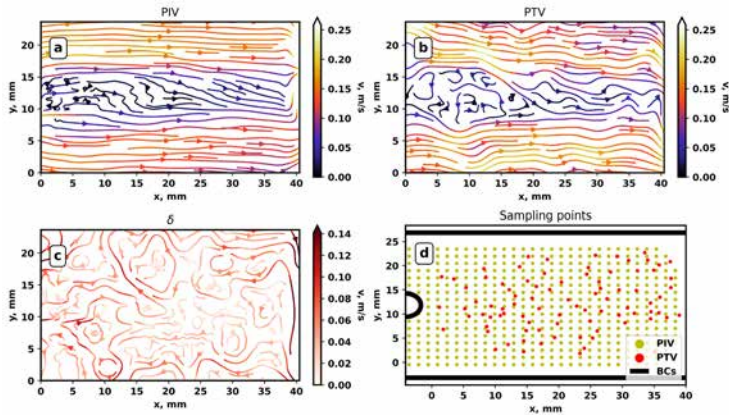


FIG. 67. Uz DIV balstīta nepārtraukta ātruma lauka rekonstrukcija FOV, izmantojot BDI: a) BDI-ADV lauks, ko izmanto kustības prognozēšanai; (b) uz DIV balstīts nepārtraukts lauks, ko nodrošina BDI; (c) ADV un DIV lauku absolūtā starpība; (d) diskrēto ADV un DIV lauku punkti, uz kuriem darbojas DIV.

izšķir smalkākos virpuļus skēršļa astes plūsmā, vienlaikus saglabājot lielāka mēroga plūsmas struktūras. Atšķirība starp ADV lauku (ko varētu uzskatīt par sākotnējo minējumu/iterāciju) un precizēto, uz DIV balstīto BDI lauku, ir parādīta (c). Jāatzīmē, ka vidējošana laikā netiek veikta — (b) parāda nefiltrētu momentānā ātruma lauku, kas rekonstruēts, pamatojoties tikai uz punktiem šajā kadrā (d).

Rezumējot, ir parādītas uzlabotas analīzes metodes daļiņu plūsmā šķidrā metālā, kas attēlota ar neitronu radiogrāfiju, lai gan piedāvātā pieeja ir viegli attiecināma uz citiem attēlveidošanas paņēmieniem, kā arī citām fizikalām sistēmām. Konkrēti, ir parādīts, kā MHT-X objektu izsekošanas kodam tiek pievienots trajektorijas atkārtotās novērtēšanas solis, uzlabojot uz ADV balstītu kustības prognozēšanu ar BDI, kas ņem vērā RN un plūsmas nesaspiežamību. Tika ieviesta arī uzlabota attēlu artefaktu noņemšanas metode neapstrādātiem attēliem, kas nodrošina ievērojami uzlabotu daļiņu izsekošanas kvalitāti. Pēc tam modificētais MHT-X ir verificēts, parādot, ka tas var pareizi izmērīt raksturlielumus turbulentai daļiņu plūsmā šķidrā metālā.

## 5. Kopsavilkums

Ir izstrādāta metodoloģija daļiņu detektēšanai un izsekošanai šķidrā metāla plūsmā, pamatojoties uz neitronu radiogrāfijas attēliem. Risinājums ietver attēlu apstrādes kodu, kas izmanto metodes, kas izstrādātas burbuļiem Sadaļā II A 2 b, kā arī modificēto MHT-X, kas parādīts Sadaļā II C 2, kas ir paplašināts, ieviešot uz BDI-ADV balstītu kustību prognozēšanu daļiņām. Prezentātās metodes un kods ir verificēti, un tika parādīts, ka tie spēj nodrošināt izsekošanas veikspēju, kas ļauj analizēt turbulences telpiskās un dinamikas īpašības daļiņu plūsmai šķidrā metālā. Kods var rekonstruēt gan daļiņu trajektorijas, gan nepārtrauktu ātruma lauku, izmantojot diezgan telpiski retinātus datus.

Jāatzīmē nelokālās vidējošanas maskēšanas (NVM) metode, kas izstrādāta korelētai trokšņu noņemšanai attēlos ar daļiņām. NVM ir vispārināta, efektīvāka *unsharp masking* metodes versija, un, visticamāk, tā būs plaši piemērojama arī ārpus šī darba.

Visi izstrādātie rīki ir atvērtā koda. Attēlu apstrādes kods ir pieejams vietnē *GitHub*: Mihails-Birjukovs/Low\_C-STA\_Particle\_Detection. MHT-X arī atrodams *GitHub*: Peteris-Zvejnieks/MHT-X. Ir arī *GitHub* repozitorijs bezdivergences interpolācijas implementācijai Peteris-Zvejnieks/DivergenceFreeInterpolation, kurā turklāt ir pieejama *Python* PyPi pakotnes formā.

## F. Burbuļu ķēdes plūsmas sadalīšana dinamiskās modās

Lai analizētu burbuļu plūsmas sistēmu simulācijas rezultātus, ir izstrādāta problēmai pielāgota SDM implementācija. Kā testa gadījums tika aplūkota sistēma, kas atbilst šeit aplūkotajos neitronu radiogrāfijas eksperimentos izmantotajai sistēmai.

### 1. Modelēta fizikālā sistēma

Fizikālā sistēma ir vertikāla argona burbuļu ķēdes plūsma šķidrā gallijā, taisnstūrveida stikla traukā,  $150 \times 90 \times 30 \text{ mm}$  [152, 214]. Burbuļi tiek ievadīti vertikāli/horizontāli sistēmas apakšā un paātrināti ceļas augšup peldspējas dēļ, veicot zigzaga trajektorijas ar perturbācijām ārpus plaknes. Gallija brīvā virsma ir  $130 \text{ mm}$  virs trauka pamatnes. Statisko horizontālo ML pieliek, izmantojot pastāvīgo magnētu un dzelzs serdes sistēmu, kurā ir novietots šķidrā metāla trauks [152, 153], un iegūtā ML konfigurācija ir parādīta [152, 214]. Lai ilustrētu, kā SDM var izmantot, lai novērtētu ML un mainīgā gāzes plūsmas ātruma ieplūdes atverē ietekmi, ir apskatīti četri gadījumi:

- 30 sccm plūsmas ātrums, bez ML
- 100 sccm plūsmas ātrums, bez ML
- 30 sccm plūsmas ātrums,  $\sim 265 \text{ mT}$  HML burbuļplūsmas apgabalā.
- 100 sccm plūsmas ātrums,  $\sim 265 \text{ mT}$  HML burbuļplūsmas apgabalā.

kur *sccm* apzīmē *standarta kubikcentimetrus minūtē*. Jāņem vērā, ka 30 sccm plūsmas ātrums radīs efektīvi viena burbuļa plūsmas režīmu, kas kalpos, lai parādītu atšķirības, ko kolektīva dinamika sistēmā ievieš pie 100 sccm.

Dati SDM analīzei ir iegūti, simulējot iepriekš minēto sistēmu uzskaitītajos apstākļos, izmantojot iepriekš aprakstīto skaitlisko modeli [152, 153] ar  $Rm \ll 1$  aproksimāciju. Tas tiek darīts, lai izslēgtu inducētā ML ieguldījumu kopējā ML – šīs sistēmas sistemātiski pētījumi, ieskaitot inducēto ML lielākiem plūsmas ātrumiem, ir ārpus šī darba plāna un ir rezervēti nākamajiem darbiem. Vērtību intervāli citām attiecīgajām bezdimensionālajām grupām ir sniegti [153].

Sekojoš [152, 153], burbuļu ķēdes plūsma tika simulēta, izmantojot *Open-FOAM* un tā *interFlow* algoritmu. Tāpat kā [152, 153], turbulencei tika izmantots  $k$ -vienādojuma SGS LES modelis, kur filtrēšanas sliekšnis ir  $\Delta = \sqrt[3]{V}$ , kur  $V$  ir režģa šūnu tilpums. LES tika izmantots  $k$ - $\omega$  SST vietā, jo SST modelis ievērojami pārvērtē turbulento viskozitāti un dod

rezultātus, kas nesaskan ar eksperimentiem [152, 153]. Iepriekš izmantotās MULES starpfāzu virsmas saspiešanas metodes vietā šeit tika izmantota *isoAdvector* metode, lai modelētu tilpuma daļas lauku [215, 216]. Lai uzlabotu veiktspēju un samazinātu artefaktus tilpuma daļas laukā, *isoAdvector* parametri tika optimizēti, kā norādīts [214]. *isoAdvector* priekšrocība ir tā, ka šeit aplūkotajiem SDM pielietojamības testēšanas uzdevumiem tas ļauj izmantot diezgan rupju homogēnu 1 mm sešskaldņu režģi, vienlaikus novēršot artefaktus burbuļu formas dinamikā. Elektromagnētiskais lauks tika simulēts kā [152, 153], ar nelielām modifikācijām, kas izskaidrotas [214]. MHD plūsma tika simulēta, sasaistot OpenFOAM un Elmer caur *EOF-Library* (MPI) [154]. Hidrodinamiskie un elektromagnētiskie lauki tika risināti atsevišķi, risinot vienu pēc otra. Pieņemts  $Rm \ll 1$ , tāpēc ML tika aprēķināts tikai vienu reizi, aprēķinu sākumā. Sīkāka informācija par lauku sasaisti ir sniegta [214].

## 2. Jaunais SDM algoritms

Apskatīsim dinamisku sistēmu, kura laikā attīstās no stāvokļa  $x_k$  uz  $x_{k+1}$  uz daudzveidības (angl. *manifold*)  $M$  tā, ka pie  $x_k \in M$  ir spēkā  $x_{k+1} = f(x_k)$ . Šeit  $f$  ir attēlojums no  $M$  uz pašu  $M$ , kas nosaka sistēmas evolūciju laika soļos  $k \in \mathbb{Z}$ . Kūpmana (angl. *Koopman*) operators ir lineārs bezgalīgi-dimensionāls operators  $K$ , kas iedarbojas uz skalārām funkcijām uz  $M$  tā, ka jebkurai skalārai funkcijai  $g : M \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $K$  attēlo  $g$  par jaunu funkciju  $Kg$ :  $Kg(x) = g(f(x))$ .  $\varphi_i : M \rightarrow \mathbb{R}$  apzīmē īpašfunkcijas un  $\lambda_i \in \mathbb{C}$  apzīmē Kūpmana operatora pašvērtības:  $K\varphi_i(x) = \lambda_i\varphi_i(x)$ . Augšminētajai MHD sistēmai nepieciešams apskatīt vektoriāla lauka (ātruma, virpuļainības, utt.) SDM. Apskatīsim vektoriālu funkciju  $\vec{g} : M \rightarrow \mathbb{R}^p$ , kas izsaka izmērāmo lauku sistēmā. Ja katra no tās skalārām komponentēm pieder īpašfunkciju  $\varphi_i$  lineārai čaulai, tad var izvirzīt  $\vec{g}$  caur  $\varphi_i$  kā [217]:

$$\vec{g}(\vec{x}) = \sum_{i=0}^{\infty} \varphi_i(\vec{x}) \vec{v}_i \quad (18)$$

Ja  $\vec{g}$  komponentes *nepieder*  $\varphi_i$  lineārai čaulai, var sadalīt  $K$  regulārās un singulārās komponentēs, un projicēt  $\vec{g}$  komponentes uz īpašfunkciju lineāro čaulu [217]. Izteiksmi 18 parasti apskata kā  $\vec{g}(\vec{x})$  izvirzījumu  $\vec{v}_i$  lineārā kombinācijā, bet tas ir ekvivalents  $\vec{g}(\vec{x})$  izvirzījumam  $\varphi_i$  lineārā kombinācijā, kur  $\vec{v}_i$  ir vektoriālie koeficienti izvirzījumam. Šajā darbā īpašfunkcijas  $\varphi_i$  tiks sauktas par Kūpmana īpašfunkcijām, un attiecīgās  $\vec{v}_i$  no 18 par Kūpmana modām attēlojumam  $f$  priekš  $\vec{g}$ . No iepriekš minētā, sistēmas evolūcija laikā no stāvokļa  $\vec{x}_0$  ir uzdots sekojoši:



$$\vec{g}(\vec{x}_k) = \sum_{i=0}^{\infty} K^k \varphi_i(\vec{x}_0) \vec{v}_i = \sum_{i=0}^{\infty} \lambda_i^k \varphi_i(\vec{x}_0) \vec{v}_i \quad (19)$$

Klasiskais SDM algoritms aprēķina tuvinātu lineāru operatoru  $A$ , kas reprezentē apskatāmo sistēmu (lineāru vai nelineāru), un spēj pārnest sistēmu vienu laika soli uz priekšu. SDM kontekstā, sistēmas stāvokļus attēlo, izmantojot matricas

$$X_{m \times n} = \begin{bmatrix} | & | & & | \\ x_0 & x_1 & \cdots & x_{n-1} \\ | & | & & | \end{bmatrix}, \quad Y_{m \times n} = \begin{bmatrix} | & | & & | \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ | & | & & | \end{bmatrix} \quad (20)$$

kur  $x_i$  ir kolonnu vektors, kas attēlo sistēmas stāvokli  $i$ -tajā laika solī. Kolonnas  $Y$  matricā ir sistēmas stāvokļi, kas ir par vienu laika soli pavirzīti uz priekšu no attiecīgajiem stāvokļa vektoriem  $X$  matricā. Šeit tiek pieņemts, ka stāvokļi ir secīgi un sadalīti vienāda garuma intervālos. No šī, sistēmas laikā attīstības vienādojumu var izteikt kā

$$AX = Y \quad (21)$$

Lai noteiktu SDM jeb Kūpmana modu frekvences, ir jāaprēķina  $A$  kompleksās īpašvērtības  $\lambda_i$  un īpašvektori  $\omega_i$ :  $A\omega_i = \lambda_i\omega_i$ , kur  $\omega_i$  veido  $A$  lineāro čaulu. Izmantojot Kūpmana modu sadalījumu un sistēmas stāvokļa korelāciju caur  $A$ , proti,  $Ax_i = x_{i+1}$ , laika soli var izteikt ar  $\lambda_i$  un  $\omega_i$ :

$$A^n x_j = x_{j+n} = \sum_k C_k \lambda_k^n \varphi_k = \sum_k C_k e^{a_k t} e^{i\omega_k t} \varphi_k \quad (22)$$

Ja sistēmā notiek periodiski un/vai kvazi-periodiski procesi,  $\omega_i$  un  $\lambda_i$  atspoguļo raksturīgos laika mērogus sistēmā. SDM atdala dinamiku pēc laika mērogiem, un ar to saistītās sistēmas struktūras (modas) var analizēt atsevišķi.

Parasti matricas  $X$  un  $Y$  ir ļoti lielas, jo tās ir noteiktas ar (parasti smalku) 2D/3D attēlu izšķirtspēju vai mērījumu punktu kopu no eksperimentiem, vai skaitliskā modeļa režģi. Tāpēc precīzi noteikt matricu  $A$  nav praktiski iespējams. Parasti lielāko daļu sistēmas stāvokļu informācijas, kas glabājas  $X$  un  $Y$ , var tuvināti rekonstruēt ar pāris lielumu kārtām mazāku datu apjomu, t.i., pietiekami labi, lai atspoguļotu galvenās struktūras sistēmā. Tas izriet no tā, ka apskatītajām sistēmām parasti ir koherentas

struktūras, kas ir daudz lielākas nekā viens mērīšanas punkts, un tāpēc lielu daļu smalko detaļu var neņemt vērā, nezaudējot nozīmīgu informāciju. Lai aprēķinātu sistēmas īpašvērtības, tiek izmantota *sadalīšana singulārās vērtībās* (SSV).

Klasiskais SDM algoritms ir jutīgs pret troksni datos, jo troksnis rada kļūdas ģenerētajās īpašvērtībās. Tika novērots, ka apskatītajai MHD sistēmai un vairākiem etaloniem (citām vienkāršotām sistēmām), ja paredzamo īpašvērtību lielumi ir tuvu 1, t.i., tie atrodas vai gandrīz atrodas uz vienības apļa kompleksajā plaknē, tad, pat salīdzinoši augstai STA, troksnis var nedaudz samazināt īpašvērtības lielumus. Savukārt dēļ tā pieaug saistītie dilšanas ātrumi, kas rezultātā ļoti ātri slāpē SDM modas līdz gandrīz nulles amplitūdai.

SSV algoritms visus sistēmas stāvokļa datus apstrādā vienlaikus. Ja ievades datu kopa ir ļoti liela, SSV būs nepieciešams liels datora operatīvās atmiņas apjoms. Tas var padarīt neiespējamu datu kopu apstrādi no augstas izšķirtspējas skaitliskām simulācijām un eksperimentiem datoros bez ievērojamiem atmiņas resursiem.

Lai šīs problēmas risinātu, tiek piedāvāta pieeja, kas apvieno vairāku blakus esošu (laikā) sistēmas stāvokļu korelāciju ar tiešsaistes SSV algoritmu. Sistēmas stāvokļa vienādojumu var vispārināt, iekļaujot vairāk kā vienu iepriekšēju sistēmas stāvokli:

$$x_k = A_1 x_{k-1} + A_2 x_{k-2} + \dots + A_d x_{k-d} \quad (23)$$

Šis korelē secīgus sistēmas stāvokļus ar vairākiem iepriekšējiem, kurus var izteikt kā  $x'_{k+1} = K x'_k$ , kur

$$x'_k = \begin{pmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ \dots \\ x_{k-d+1} \end{pmatrix}, \quad K = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_3 & \dots & \mathbf{A}_{d-1} & \mathbf{A}_d \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (24)$$

un  $\mathbf{I}$  un  $\mathbf{0}$  ir  $n \times n$  vienības un nulles matricas, kur  $n$  ir  $x_k$  dimensija. Būtībā 23 ir lineāra kombinācija no sistēmas stāvokļa evolūcijas soļiem (kā tas ir 21), kas savā starpā pārklājas. Šī pieeja pirmo reizi tika piedāvāta [218], lai pētītu sistēmas ar nelielu telpisko dimensiju skaitu, bet metode ir piemērojama arī sistēmām ar lielāku telpisko dimensiju daudzumu. Pārklāšanās nozīmē, ka  $x_k$  tiek izteikts no iepriekšējo  $d$  stāvokļu "slīdošā vidējā", lai filtrētu troksni, kas atrodams momentānos sistēmas stāvokļos. Šo stratēģiju, piemēram, izmantoja [122, 123].

Lai ieviestu šo efektu, sistēmas stāvokļa datiem jābūt atbilstoši reprezentētiem ("sakrautiem"). Definē  $X_i$  kā

$$X_i = \begin{bmatrix} | & | & & | \\ x_i & x_{1+i} & \cdots & x_{n+i} \\ | & | & & | \end{bmatrix} \quad (25)$$

Līdzīgi kā 20 un 21, sistēma tiek izteikta kā

$$M_0 = \begin{bmatrix} X_{d-1} \\ X_{d-2} \\ \vdots \\ X_0 \end{bmatrix}, \quad M_1 = \begin{bmatrix} X_d \\ X_{d-1} \\ \vdots \\ X_1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Šeit matricas  $M_0$ ,  $M_1$  tiek konstruētas, vertikāli sakraužot sistēmas stāvokļu matricas  $X_i$ . Tas nozīmē, ka vienā  $M$  kolonnā ir informācija no  $d$  dažādām  $X$  kolonnām. Tādējādi, tā vietā, lai korelētu tikai blakus esošos stāvokļus, kā tas ir darīts 21,  $d$  sistēmas stāvokļus pārklāj kustīgs korelācijas logs. Šī pieeja ievieš papildu trokšņa noturību SDM, jo lielāks datu "korelācijas rādiuss" efektīvi "vidējo" troksni, ja tāds ir. Darba gaitā tika novērots, ka šī metode var ievērojami palielināt SDM īpašvērtību precizitāti datiem ar zemu signāla/trokšņa intensitātes attiecību. Vienādojumu 23 var interpretēt kā diskretizētu lineāru diferenciālo vienādojumu ar kārtu līdz  $d$ .

Līdzīgi kā SSV tika veikts priekš  $X_0$  klasiskajā SDM algoritmā, šeit SSV tiek veikts priekš  $M_0$ . Tad gan  $M_0$ , gan  $M_1$  tiek projicēti uz  $U$  apakšstelpu, kur  $\tilde{M}_0 = U^* M_0$  un  $\tilde{M}_1 = U^* M_1$ . Pēc tam laikā uz priekšu un atpakaļejošie  $\tilde{K}$  operatori tiek aprēķināti:  $\tilde{K}_+ = \tilde{M}_1 \tilde{M}_0^+$  and  $\tilde{K}_- = \tilde{M}_0 \tilde{M}_1^+$ , kur  $\tilde{M}_0^+$ ,  $\tilde{M}_1^+$  ir  $\tilde{M}_0$ ,  $\tilde{M}_1$  pseido-inversās matricas. Tas ļauj aprēķināt  $\tilde{K}$ :

$$\tilde{K} = \sqrt{\tilde{K}_+ \tilde{K}_-^{-1}} \quad (27)$$

Lai gan var vienkārši izvēlēties  $\tilde{K} = \tilde{K}_+$ , 27 sniedz nelielu precizitātes pieaugumu ar ļoti niecīgu papildus aprēķina izmaksu, tāpēc to ir vērts ieviest [219]. Visbeidzot, tiek aprēķinātas  $\tilde{K}$  īpašvērtības, kur  $\tilde{K} \tilde{\varphi}_i = \lambda_i \tilde{\varphi}_i$ , un īpašvektorus sākotnējā bāzē atgūst, izmantojot  $\varphi_i = U \tilde{\varphi}_i$ .

Lai iegūtu sistēmas  $X$  modas, sistēmas  $M_0$  modas tiek saīsinātas, atstājot tikai pirmos  $m$  elementus (matricā vertikāli no augšas), kur  $m$  ir  $X$  kolonnu garums. Lai gan varētu apgalvot, ka liela daļa informācijas par sistēmu tiek zaudēta šādā veidā, tā kā  $M_0$ ,  $M_1$  satur  $d$  reizes vertikāli atkārtoto

informāciju par  $X$ , lielāko daļu no kopējās informācijas var iegūt no pirmajiem neatkārtotajiem elementiem. Jāņem vērā arī tas fakts, ka vertikāli sakrautās daļējās  $X$  kopijas laika gaitā atšķiras tikai ar fāzi. Apkopojot visu, ierosinātā SDM metode ir aprakstīta Algoritmā 12.

Ir svarīgi ņemt vērā to, ka vienādojumam 27 nav unikāla atrisinājuma. Lai risinātu šo problēmu, ir ieteicams izvēlēties risinājumu, kas vistuvāk saskan ar  $\tilde{K}_+$  un  $\tilde{K}_-^{-1}$ , jo ir sagaidāms, ka matrica  $\tilde{K}$  ir līdzīga šīm abām matricām. Alternatīva pieeja ir  $\tilde{K}$  rēķināt šādi:

$$\tilde{K} = \frac{1}{2} \left( \tilde{K}_+ + \tilde{K}_-^{-1} \right) \quad (36)$$

Pastāv cieši saistīts algoritms, kas ir pazīstams kā HAVOK [220], kas izmanto to pašu sistēmas reprezentāciju kā 26 un arī izmanto SSV, lai no datiem iegūtu struktūras. HAVOK ir cieši saistīts ar SDM un spēj iegūt ļoti nelineāru sistēmu dinamiku.

SDM sadala sistēmu kompleksu svārstību modās:

$$f'(t) = \sum_k C_k \varphi_k e^{iz_k t} = \sum_k C_k \varphi_k e^{a_k t} e^{ib_k t} \quad (37)$$

kur  $C_k \in \mathbb{C}$ . Praksē lielākā daļa no apskatāmām sistēmām aprakstāma ar reālām datu vērtībām:

$$f(t) = \sum_k C'_k \varphi_k e^{a_k t} \cos(b_k t + \phi_k) \quad (38)$$

kur  $C'_k \in \mathbb{R}$ . Tas nozīmē, ka katra reālā moda tiek aprakstīta ar diviem kompleksām modām ar kompleksi saistītām īpašvērtībām, kas faktiski padara pusi no ģenerētajām modām par liekām. Lai to risinātu, reālo vērtību sākuma datus var pārveidot par kompleksu vērtību datiem, pievienojot sākotnējo datu kompleksu versiju ar  $\pi/2$  fāzes nobīdi. Tas nodrošina, ka visas aprēķinātās modas ir unikālas. Lai gan šī metode ievieš skaitliskus artefaktus sistēmas stāvokļos sākumā un beigās (attiecībā uz laiku), to kompensē, nogriežot nelielu daudzumu kompleksos datus no abiem laika galiem. Tomēr jābūt uzmanīgam, jo šajā gadījumā SDM modas imaginārā komponente ne vienmēr (bet iespējams) līdzinās šīs modas reālajai komponentei. Augstāk minētais ir viegli sasniedzams, lietojot procedūru, balstītu uz Hilberta transformāciju, kā ir demonstrēts [214]. Šī metode ievaddatiem pieskaita imagināru kopiju ar  $\pi/2$  fāzu nobīdi visam Furjē frekvencēm.

---

**Algorithm 12:** Custom SDM

---

1 Sakārto datus  $\left[ \begin{array}{c|c|c|c} & & & \\ \hline x_0 & x_1 & \cdots & x_n \\ \hline & & & \end{array} \right]$  matricās

$$X_i = \left[ \begin{array}{c|c|c|c} & & & \\ \hline x_i & x_{1+i} & \cdots & x_{n+i} \\ \hline & & & \end{array} \right] \quad (28)$$

2 Konstruē matricas  $M_0, M_1$

$$M_0 = \begin{bmatrix} X_{d-1} \\ X_{d-2} \\ \vdots \\ X_0 \end{bmatrix}, \quad M_1 = \begin{bmatrix} X_d \\ X_{d-1} \\ \vdots \\ X_1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

3 Aprēķina matricas  $M_0$  sāsināto SSV

$$M_{m \times n} = U_{m \times r} S_{r \times r} V_{r \times n}^* \quad (30)$$

4 Aprēķina matricas  $\tilde{M}_0^+, \tilde{M}_1^+$

$$\tilde{M}_0 = U^* M_0, \quad \tilde{M}_1 = U^* M_1 \quad (31)$$

5 Aprēķina matricas  $\tilde{K}_+, \tilde{K}_-$

$$\begin{aligned} \tilde{K}_+ &= \tilde{M}_1 \tilde{M}_0^+ \\ \tilde{K}_- &= \tilde{M}_0 \tilde{M}_1^+ \end{aligned} \quad (32)$$

6 Aprēķina  $\tilde{K}$

$$\tilde{K} = \sqrt{\tilde{K}_+ \tilde{K}_-^{-1}} \quad (33)$$

7 Aprēķina  $\tilde{K}$  īpašvērtības un īpašvektorus

$$\tilde{K} \tilde{\varphi}_i = \lambda_i \tilde{\varphi}_i \quad (34)$$

8 Aprēķina sistēmas pilnas SDM modas

$$\varphi_i = U \tilde{\varphi}_i \quad (35)$$

9 Saisina modas  $\varphi_i$  līdz pirmajiem  $m$  elementiem.

10 (Neobligāti) Aprēķina SDM modu sākotnējās amplitūdas [117]

---

### 3. Galvenie rezultāti

Simulācijas tika veiktas līdz 20 s no plūsmas laika visiem četriem gadījumiem, kas ir pietiekami, lai sistēma sasniegtu gandrīz stacionāru stāvokli, sākot no stacionāra gāzes un šķidruma ātruma lauka. Sākotnējie apstākļi ir identiski abām šķidruma fāzēm [152, 153].

Lai sniegtu kontekstu SDM analīzei, vispirms tiek analizēta ātruma lauka un virpuļu dinamika. Raksturīgi ātruma lauku stāvokļi dažādos laika momentos četriem šeit aplūkotajiem sistēmas gadījumiem ir parādīti Attēlos 68-71. Vidusplaknes ātruma moduļa sadalījumi tiek attēloti uz trauka sienām, un pēc tam tās tiek apstrādātas ar *ParaView Virsmas LIC*, kas izmanto ekrāna telpas virsmas līniju integrālu konvolūciju (LIC), lai ātruma lauku pārveidotu par straumes līniju kopu ar krāsās kodētu ātruma moduli [221]. Aizēnoti balti-pelēki veidojumi atspoguļo burbuļu virsmas un brīvo metāla virsmu konteinerā augšpusē. Taisnstūra caurule trauka apakšā nodrošina argona ieplūdi sistēmā.

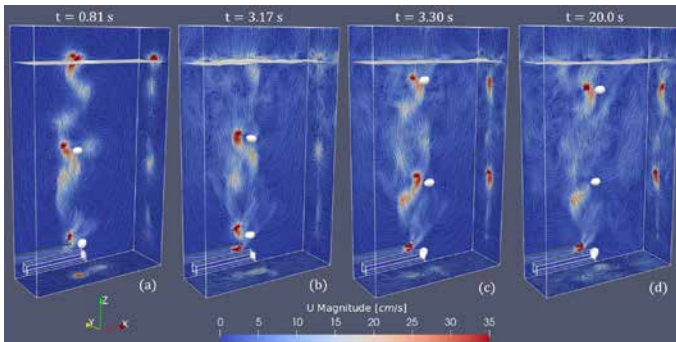


FIG. 68. LIC ātruma lauks burbuļu plūsmā ar 30 *sccm* plūsmas ātrumu bez ML: (a)  $t = 0.81$  s, (b)  $t = 3.17$  s (c)  $t = 3.30$  s, (d)  $t = 20$  s.

Ja netiek pielikts ārējais ML, burbuļu plūsmā ir redzams klasisks virpuļu atrašanās process [11, 23, 26, 222], kas ir visizteiktāk redzams agrākos laika momentos 68a-68c (*XZ* plakne), un vēlāk plūsma kļūst daudz haotiskāka, kā redzams Attēlā 68d. Jāņem vērā, ka gadījumā ar 100 *sccm* bez ārēja ML no burbuļiem tiek atrauti lielāki virpuļi ar lielāku ātrumu (Attēli 69a-69c) un, neskatot acīmredzamo globālo ātruma moduļa pieaugumu, var redzēt, ka atpakaļ virzītā plūsma no brīvās virsmas un sienām ir izteiktāka netālu no konteinerā dibena, lai gan tikai no šiem attēliem vien ir grūti pateikt, cik zemu šis sajaukšanas slānis stiepjas 30 un 100 *sccm* gadījumos. SDM analīzes mērķis būs noteikt, vai abos šajos gadījumos ir kādas īpašas

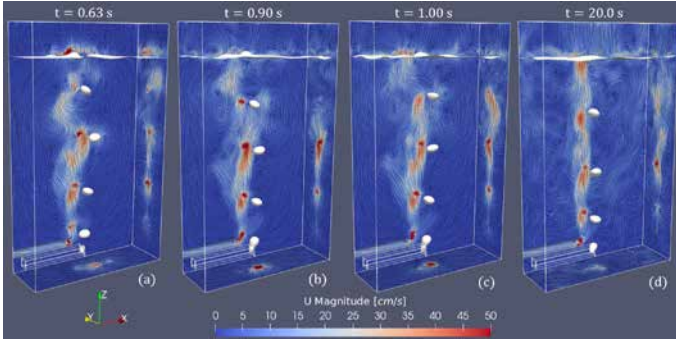


FIG. 69. LIC ātruma lauks burbuļu plūsmā ar 100 *sccm* plūsmas ātrumu bez ML: (a)  $t = 0.63$  s, (b)  $t = 0.90$  s (c)  $t = 1.00$  s, (d)  $t = 20$  s.

plūsmas struktūras, izņemot triviālo vidējo augšupejošo plūsmu burbuļu ķēdē, un kā šīs struktūras atšķiras abos gāzes plūsmas ātruma gadījumos.

Pieliekot pastāvīgu horizontālu ML, tiek panākta gandrīz pilnīga plūsmas laminarizācija 30 *sccm* gadījumā (Attēls 70) un ievērojama plūsmas slāpēšana 100 *sccm* gadījumā (Attēls 71), jo virpuļu atrašanās tiek apturēta, kā paredzēts [11, 13, 15, 222]. Trauka YZ plaknēs, Attēlā 70, LIC ātruma lauks norāda, ka burbuļi ceļas pa aptuveni taisnām līnijām trajektorijām.

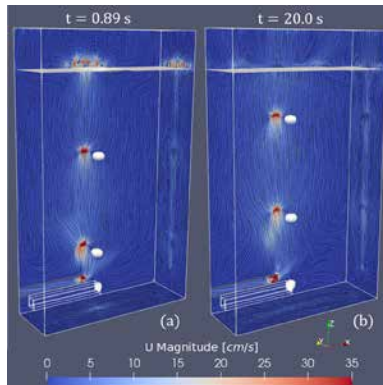


FIG. 70. LIC ātruma lauks burbuļu plūsmā ar 30 *sccm* plūsmas ātrumu ar ML: (a)  $t = 0.89$  s, (b)  $t = 20$  s.

100 *sccm* gadījumā ir būtiska atšķirība – sākotnēji taisnvirziena burbuļu

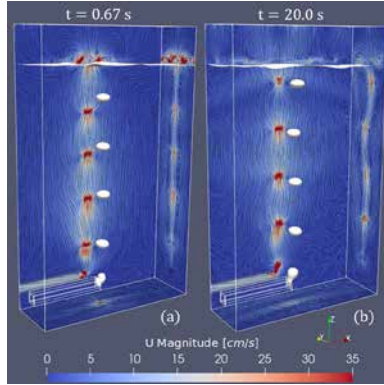


FIG. 71. LIC ātruma lauks burbuļu plūsmā ar 100 *sccm* plūsmas ātrumu ar ML: (a)  $t = 0.67$  s, (b)  $t = 20$  s.

augšupeja, kā redzams Attēlā 71a, vēlāk pāriet uz citām plūsmas struktūrām, kas redzams Attēlā 71b.  $XZ$  plaknē ātruma stāvviļņi veidojas aptuveni pēc pirmajām 10 s no modelētā plūsmas laika, savukārt  $YZ$  plaknē var redzēt, ka trajektorija nedaudz svārstās pie trauka augšpusē, paliekot aptuveni taisna trauka apakšējā pusē. Lai detalizēti analizētu šīs plūsmas struktūras, tiks izmantots SDM.

Lai novērtētu plūsmu tuvāk burbuļiem un burbuļu ķēdei, ir ērti izmantot  $Q$  kritēriju virpuļu noteikšanai.  $Q$  kritērijs ( $Q$ ) ir skalārs lauks, kas apzīmē gan plūsmas virpuļu sirdi ( $Q > 0$ ), gan sedlveida plūsmas zonas ( $Q < 0$ ), un tāpēc ir ļoti piemērots analīzei, kur tiek salīdzināta plūsmas dinamika ar un bez ML pie dažādiem argona ieplūdes ātrumiem [111].  $Q$  lauka definīcija ir dota rakstā [214], kas izmanto definīciju no [111].

Attēli 72-75 parāda  $Q$  laukus iepriekš minētajiem gadījumiem.  $Q$  tiek aprēķināts ar *ParaView*, izmantojot filtru *VTK gradient of unstructured data set*. Pie 30 *sccm* Attēls 72 norāda, ka burbuļu astēm ir klasiska forma ar garenu "matadatu" virpuļu pāriem [11, 23, 26]. Var redzēt, ka 30 *sccm* aptuveni atbilst viena burbuļa režīmam, jo aizmugurējie burbuļi nenonāk izteiktos virpuļos aiz iepriekšējiem burbuļiem. Tas izpildās, jo starp burbuļiem ir pietiekami liela atstarpe, kas izraisa virpuļu sabrukšanu/relaksāciju, pirms var notikt to intensīva mijiedarbība ar burbuļiem. Tas ir vizisitektāk redzams tad, kad plūsma stabilizējas (Attēli 72b-c – skatoties uz attiecīgām laika vērtībām var pamanīt, ka plūsmas stabilizācija notiek daudz ātrāk nekā pie 100 *sccm*) un tiek pārākta tikai dažas reizes, simulācijas sākumā, kam labu piemēru var redzēt Attēlā 72a. Pie 100 *sccm* situācija radikāli atšķiras – Attēlā 73 virpuļi savijas un saduras ar aizmugurējiem burbuļiem,



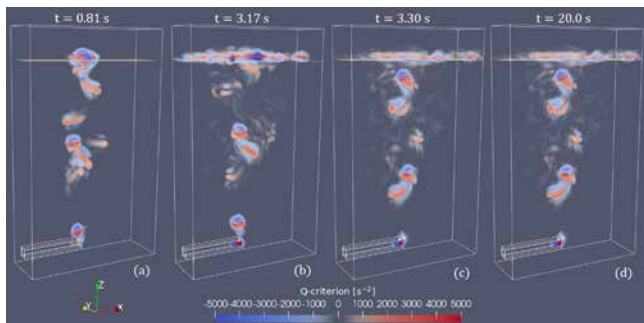


FIG. 72.  $Q$  lauks burbuļu plūsmā ar 30 *sccm* plūsmas ātrumu bez ārēja ML: (a)  $t = 0.81$  s, (b)  $t = 3.17$  s, (c)  $t = 3.30$  s, (d)  $t = 20.0$  s.

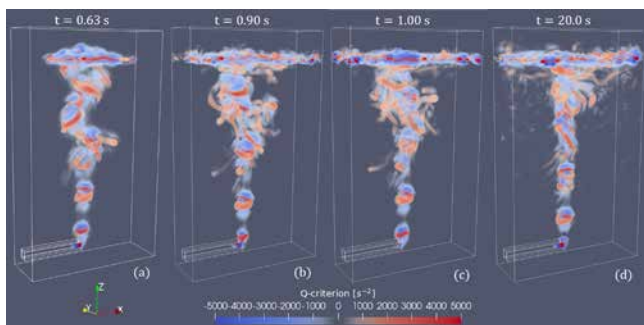


FIG. 73.  $Q$  lauks burbuļu plūsmā ar 100 *sccm* plūsmas ātrumu bez ārēja ML: (a)  $t = 0.63$  s, (b)  $t = 0.90$  s, (c)  $t = 1.00$  s, (d)  $t = 20.0$  s.

kas nonāk iepriekšējo burbuļu astē, un kā rezultātā rodas daudz haotiskāka plūsma.

Ja tiek pievadīts ārējais ML, tad tas faktiski novērš virpuļus ārpus burbuļa tuvumā esošajām zonām, kas ir redzams Attēlos 74 un 75. Lai gan īsie virpuļu serdes pavedieni ir redzami Attēlos 74 un 75 netālu no ieplūdes, tie pilnībā izzūd neilgi pēc burbuļu atdalīšanas no ieplūdes. Papildus tam, burbuļu astes virpuļi ir manāmi vājāki pie 30 *sccm*.

Lai aprēķinātu SDM modas ātruma laukam šķidrā metāla traukā, tika ņemti pēdējie 600 kadri (6 sekundes) no skaitliskās modelēšanas datiem. No datiem tika izgriezta trauka apakšējā daļa ar ieplūdes cauruli, un augšējā daļa ar Ar-Ga brīvo virsmu. Tas tika darīts, lai atbrīotos no efektiem pie ieplūdes caurules efektiem pie brīvās virsmas tā, lai SDM modas atspoguļotu

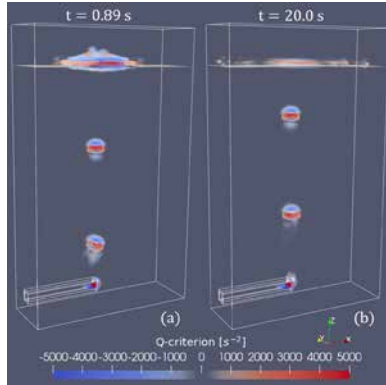


FIG. 74.  $Q$  lauks burbuļu plūsmai ar 30 *sccm* plūsmas ātrumu ar ārēju ML.: (a)  $t = 0.89$  s, (b)  $t = 20.0$  s

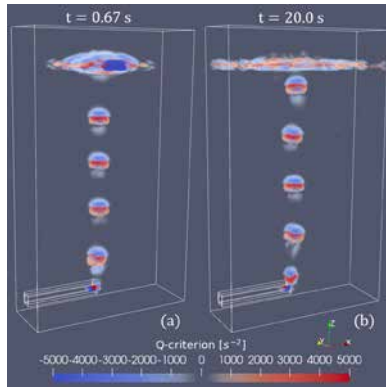


FIG. 75.  $Q$  lauks burbuļu plūsmai ar 100 *sccm* plūsmas ātrumu ar ārēju ML.: (a)  $t = 0.67$  s, (b)  $t = 20.0$  s.

tikai iekšējo plūsmas dinamiku. Dati tiek pārvērsti no reālas kompleksajā formā, pēc kā no 600 kadru datu kopas abiem galiem tiek noņemts 50 kadru buferis, lai izvairītos no artefaktiem. Dēļ tā, SDM reāli tiek veikts 500 ātruma lauka laika kadriem. Procedūra ir identiska visos iepriekš minētajos sistēmas variantos. Ņemot vērā plūsmas struktūras, kas ir redzamas Attēlos 68-75, ir paredzams, ka SDM modas gadījumos, kad tiek pievadīts ML, būs vienkāršākas un telpiski sakārtotākas. Līdz ar to, analīze tiek sākota tieši ar šiem gadījumiem, jo tos ir vieglāk interpretēt un pēc tam salīdzināt

ar gadījumiem, kad netiek pievadīts ML. Dominējošās modas pie 30 un 100 *sccm*, kad tiek pievadīts ML, ir redzamas Attēlos 76-79.

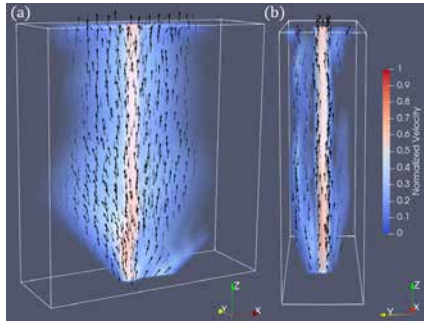


FIG. 76. Nultā ātruma lauka SDM moda pie 30 *sccm* ar ārēju ML: (a) priekšas skats, (b) sāna skats.

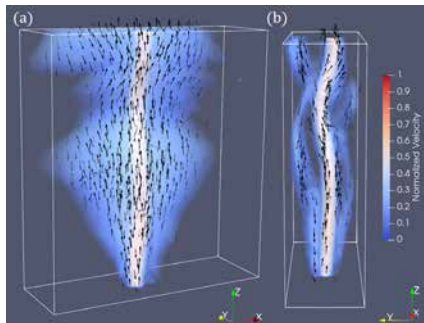


FIG. 77. Nultā ātruma lauka SDM moda pie 100 *sccm* ar ārēju ML: (a) priekšas skats, (b) sāna skats.

Sākot ar 30 *sccm*, un sakārtojot modas pēc to relatīvajām amplitūdām, nulltā (spēcīgākā) ātruma lauka moda ir parādīta Attēlā 76. Šai modai ir ļoti zema frekvence ( $f_0 \sim 0.15 \text{ mHz}$ ,  $f = \omega/2\pi$ ) un niecīgs augšanas/dilšanas ātrums ( $a_0 \sim -1.9 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), tātad šo modu var uzskatīt par stacionāru. Attēlā 76a var redzēt, ka burbuļu ķēdes plūsmas reģionā ir koncentrēts maksimālais normalizētais ātrums nultajā modā. Interesanti ka, kā redzams Attēlā 76b, metāla plūsma *Y* virzienā ir sakārtota trīs loksnes – vienā ar augšupejošu metāla plūsmu ap burbuļa ķēdes apgabalu, kas stiepjas *XZ* plaknē (Attēls 76a) un divas pretplūsmas loksnes pa kreisi un pa labi *YZ*

plaknē. Šai modai ir ļoti izteikta simetrija attiecībā pret  $XZ$  vidus plakni, papildus  $YZ$  plaknei.

Pie 100 *sccm*, nultajā modā ir redzamas līdzīgas struktūras ( $f_0 \sim 0.3$  *mHz*,  $a_0 \sim 1.7 \cdot 10^{-4}$   $s^{-1}$ ) kā pie 30 *sccm* ar ārēju ML, toties šeit simetrija  $YZ$  plaknē tiek izjaukta trauka augšdaļā, kā ir redzams Attēlā 77b, un pretplūsmas loksnes ir mazāk sakārtotas. Trauka augšdaļa nultajā modā veidojas "stāvviļņi" ātruma  $Y$  komponentei, kurus var redzēt Attēlā 78.

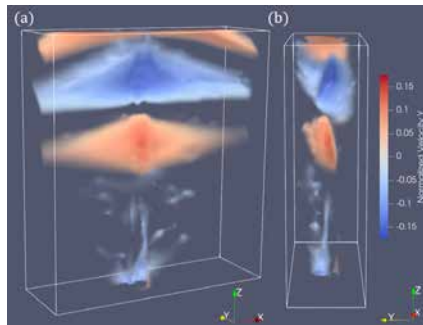


FIG. 78. Nulltās ātruma lauka DMD modas  $Y$  komponente pie 100 *sccm* ar ārēju ML, normalizēta attiecībā pret modas lielumu: (a) priekšas skats, (b) sāna skats.

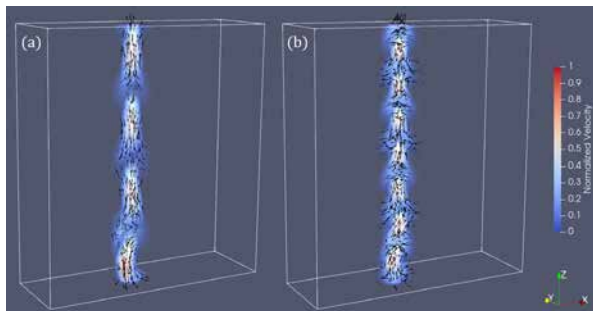


FIG. 79. (a) Pirmā un (b) otrā ātruma lauka DMD moda pie 30 *sccm* ar ārēju ML.

1. un 2. ātruma lauka modas pie 30 *sccm* ar ārēju ML ir attēlotas Attēlos 79a un 79b. Šīs modas, atšķirībā no nulles modām pie 30 un 100 *sccm*, ir nestacionāras, un to plūsmas struktūras svārstās ar attiecīgajām īpašfrekvencēm ( $f_1 \sim 4.2$  *Hz*,  $f_2 \sim 8.5$  *Hz* ar  $a_1 \sim -6.7$  ·

$10^{-3} \text{ s}^{-1}$  un  $a_2 \sim -6.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ). Šīs modas, kā arī to vājākas, augstākas kārtas telpiskās harmonikas (šeit nav parādītas) var interpretēt kā koherences rādītāju burbuļu ķēdes plūsmi. Šajā gadījumā var redzēt telpiski periodiskas vertikālas struktūras, kas norāda, ka ārējais ML nodrošina ļoti sakārtotas burbuļu ķēdes ar stabilām un taisnām trajektorijām. Pie 100 *sccm* šīs harmonikas, kas saistītas ar periodisku burbuļu kustību ķēdē, ir ļoti līdzīgas, toties tām ir lielākas *XY* komponentes. Ir interesanti salīdzināt nultās stacionārās modas pie 30 un 100 *sccm* bez ārēja ML ar iepriekš apskatītajiem gadījumiem – tas ir parādīts Attēlos 80 un 81.

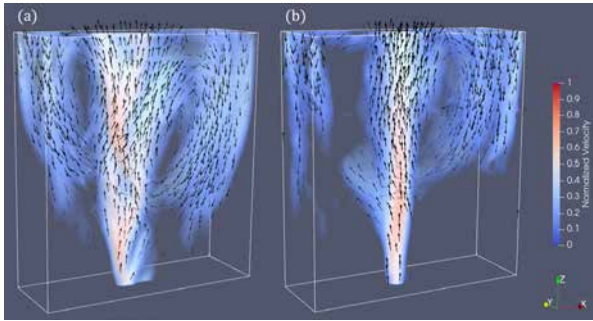


FIG. 80. Nultās (stacionārās) ātruma lauka modas pie (a) 30 un (b) 100 *sccm* bez ārēja ML. Normalizācija katrai modai ir atsevišķa.

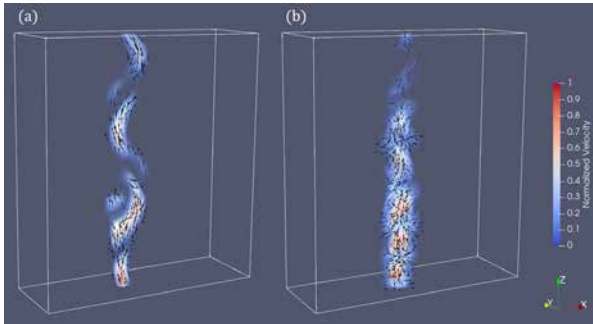


FIG. 81. (A) 2. ātruma lauka moda pie 30 *sccm* un (b) 6. moda pie 100 *sccm* bez ārēja ML. Normalizācija katrai modai ir atsevišķa.

Attēlos 80a un 80b parādītas nultās modas pie 30 ( $f_0 \sim 3.1 \text{ mHz}$  ar  $a_0 \sim -2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) un 100 *sccm* ( $f_0 \sim 2.1 \text{ mHz}$  ar attiecīgi  $a_0 \sim 8.3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), bez ārēja ML. Nultā moda Attēlā 80a aptver daudz vairāk vietas ap burbuļu

ķēdes serdi, kur tās lielums ir salīdzinoši ļoti augsts, turpretīm 80b centrālā zona ir daudz tievāka, kas norāda, ka ir citas modas, kas dominē tālāk no centra; citiem vārdiem sakot, metāla plūsma ap augšupejošo burbuļu ķēdi ir daudz koherentāka pie 30 *sccm*. Otrā lieta, kas jāņem vērā, ir ka 30 *sccm* moda ir daudz simetriskāka pret *YZ* vidusplakni (lai arī daudz mazāk nekā gadījumā ar ārēju ML). Tas ir loģiski, ņemot vērā zemāku plūsmas ātrumu, kas atbilst Attēlam 80a, bet šeit ir nozīmīgi tas, ka, salīdzinot Attēlus 76 un 80a, vairs nav divu simetriju plakņu. Dēļ tā, būtu interesanti tālākās publikācijās izpētīt pāreju no 1 līdz 2 simetriju plaknēm, sākot ar sakārtotām plūsmas loksēm, un pie fiksēta plūsmas ātruma, mainīt ML stiprumu sākot no nulles, kā arī to, kā tiek izjaukta modas simetrija, palielinoties plūsmas ātrumam (piemēram, pie fiksēta ML stipruma).

Tikmēr modas, kas ir redzamas Attēlā 81 gadījumiem bez ML, ir interesantas vairāku iemeslu dēļ. Pirmkārt, pēc amplitūdas tās vairs nav pirmās, bet otrā pie 30 *sccm* (Attēls 81a,  $f_2 \sim 4.3 \text{ Hz}$ ,  $a_2 \sim 1.6 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) un sestā pie 100 *sccm* (Attēls 81b,  $f_6 \sim 10.3 \text{ Hz}$ ,  $a_6 \sim 6.0 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), norādot, ka, kā paredzēts, burbuļu savstarpējās kustības koherence ir daudz zemāka nekā gadījumos ar ML. Turklāt, apskatot Attēlu 81a un Attēlu 81b, var secināt, ka, lai gan tā ir kopumā vājāka salīdzinājumā ar citām plūsmas struktūrām, moda Attēlā 81a parāda koherentu zig-zag kustību, kas stiepjas visā gallija traukā. Turpretī Attēlā 81b var redzēt, ka modas lielums manāmi samazinās virs noteikta augstuma sliekšņa, norādot, ka modai var piemērot *koherences garumu*. Lai to izmēritu, varētu definēt kritēriju, kas ļautu kvantitatīvi noteikt plūsmas ātruma un MF lieluma izmaiņu ietekmi uz plūsmas stabilitāti.

Viens vienkāršs veids kā ieviest koherences garumu ir burbuļu ķēdes modām (kā, piemēram, Attēlos 79 un 81), definējot ātruma moduļa sliekšni, piedzīt tilpumus ar eliptiskiem šķērsgrizumiem, kuri ir ekstrudēti *Z* virzienā gallija trauka garumā. Tad tilpuma garumā ik pēc noteiktā intervāla gar *Z* izrēķināt ātruma moduļa integrālus eliptiskajos šķērsgrizumos. Kā piemērs, tiek apskatītas izteiktākas modas, kuras nosaka burbuļu plūsmu ķēdē katram gadījumam – iepriekš minētās procedūras rezultāts parādīts Attēlā 82. Koherences garuma noteikšanai tiek ieviests sliekšnis 50% no ātruma vērtības, kas ir vistuvāk ieplūdei – var redzēt, ka burbuļu ķēžu koherences garumi pie 30 un 100 *sccm* ar ārēju ML un 30 *sccm* bez ārēja ML pārsniedz ceļa garumu līdz brīvai virsmai, savukārt koherences garums pie 100 *sccm* bez ārēja ML ir  $\sim 7.35 \text{ cm}$  (ieplūde ir zem 2 *cm* atzīmes). Attēls 81b liek domāt, ka burbuļu kustība ķēdē zaudē koherenci virs 3/4 no attāluma starp ieplūdi un brīvo virsmu. Tas arī saskan ar to, kas redzams Attēlā 73, it īpaši simulācijas laika intervāla beigās. Attēls 82 arī atspoguļo burbuļa telpisko frekvenci ķēdēs, gadījumos, kad tiek pievadīts ārējs ML.

Interesanti ir arī izpētīt modas pie 30 un 100 *sccm* bez ārēja ML, kas

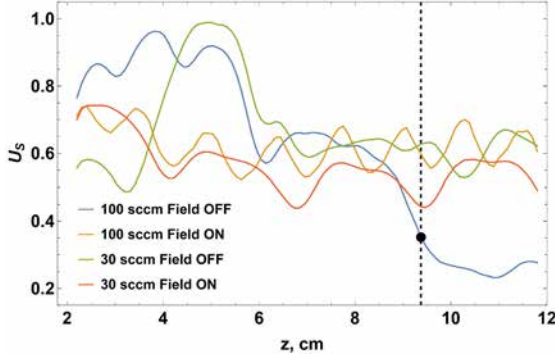


FIG. 82. Normalizēti ātruma moduļa integrāļi  $U_V$  izteiktākajam ātruma lauka modām, kas saistītas ar burbuļu kustības raksturu ķēdē. Integrāļus aprēķina pa eliptiskiem šķērsgrīzumiem dažādos augstumos ( $z$ ), kuros ātruma lieluma vērtības pārsniedz sliekšni, kas visos gadījumos ir identisks.

uztver plūsmas turbulenci – piemēram, modas, kas ir redzamas Attēlos 83-85. 1. ātruma lauka moda pie 30 *sccm* bez ārēja ML ( $f_1 \sim 0.18 \text{ Hz}$ ,  $a_1 \sim 4.6 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) ir redzama Attēlā 83: Attēls 83a norāda, skatoties blakus nultai modai Attēlā 80a, ka šī 1. moda aizņem vietu ap nultās modas centrālo serdi (attiecībā pret trauku un burbuļu ķēdi). Tā sastāv arī no pretīm plūstošām vertikālām strūklām, kuras labāk redzamas Attēlos 83c un 83d. Attēls 83d parāda, ka pretplūstošos reģionus, šķietami, aptuveni ierobežo  $XZ$  vidus plakne, lai gan nav redzamas simetrijas, tādās kādas ir redzamas nultajās modās ar ārēju ML (Attēli 76b un 77b). Attēlā 83b var redzēt arī kaut ko, kas izskatās kā virpuļaina plūsma, augšējā trauka apgabalā.

Salīdzinājumam – Attēlā 84 ir redzama 1. ātruma lauka moda pie 100 *sccm* bez ārēja ML ( $f_1 \sim 0.36 \text{ Hz}$ ,  $a_1 \sim -1.2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Šeit ievērojams cianīga iezīme ir tā, ka atšķirībā no 30 *sccm* gadījuma, šajā modā ir divi skaidri nodalīti reģioni ar pretplūsmu, kas ir redzams Attēlā 84b. Tāpat kā 30 *sccm* gadījumā, šī moda aizņem vietu ap nultās modas serdi (Attēls 80)b, šoreiz ar daudz skaidrāku simetriju attiecībā pret  $XZ$  vidusplakni. Attēls 84c norāda uz virpuļainu plūsmu augšējā modas apgabalā, līdzīgi kā Attēls 83b, bet šeit, plūsma modā ir sakārtotāka, nekā 30 *sccm* gadījumā. Turklāt, atšķirībā no Attēla 83b, Attēlā 84b var redzēt, ka šķiet, ka virpuļveida plūsmas stiepjas tālāk zem brīvās virsmas nekā 30 *sccm* gadījumā.

Tomēr Attēli 68 un 69, kā arī Attēli 72 un 73 liecina, ka ātruma lauks ir haotiskāks 100 *sccm* gadījumā. Iemesls ir tāds, ka pastāv izteikta 2. moda ( $f_2 \sim 0.19 \text{ Hz}$ ,  $a_2 \sim -4.9 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), kas ir parādīta Attēlā 85, kas

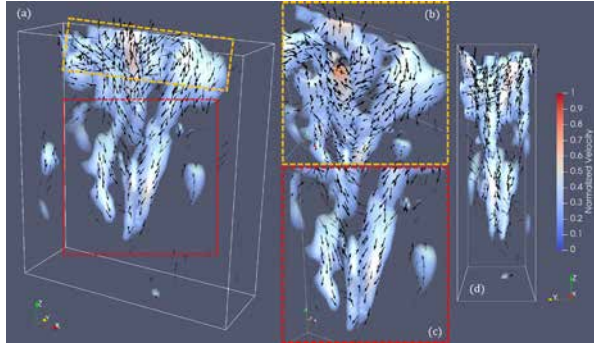


FIG. 83. Pirmā ātruma lauka moda pie 30 *sccm* bez ārēja ML: (a) pilns skats, (b) pietuvināts augšas skats, (c) pietuvināts apakšas skats, (d) sāna skats.

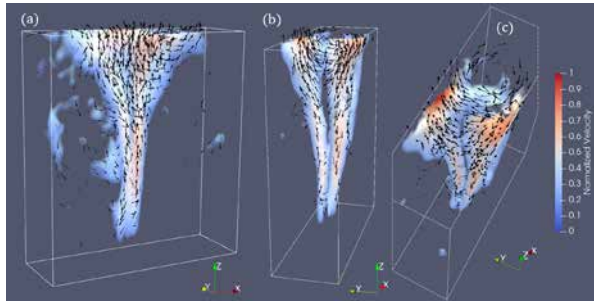


FIG. 84. Pirmā ātruma lauka moda pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a) priekšas skats, (b) sāna skats, (c) augšas skats.

aptver lielāko daļu no trauka tilpuma. Šai modai nav redzama simetrija, un tas, iespējams, nosaka smalkāku nesakārtotu ātruma lauka struktūru, kas ir redzama Attēlos 69 un 73. Līdzīgai modai pie 30 *sccm* ir daudz mazāka amplitūda, kas ir zemāka nekā 2. modai Attēlā 81, kam vajadzētu izskaidrot novērojumus no ātruma un  $Q$  attēliem.

Gadījumos bez ārēja ML pastāv arī augstākas kārtas modas, toties tām ir zemākas amplitūdas, un tās satur struktūras, kas ir līdzīgas struktūrām Attēlā 85, kur raksturīgie telpiskie mērogi samazinās ar modas kārtu. Šādas modas ir jāapskata skeptiski divu iemeslu dēļ: pirmkārt, 1 *mm* kubisks režģis nespēj precīzi uztvert smalkākās plūsmas struktūras augstākas kārtas modās; otrkārt, jo īpaši 100 *sccm* gadījumā, lai attēlotu reprezentatīvākās plūsmas lauka konfigurācijas, visticamāk, ir nepieciešams ilgāks



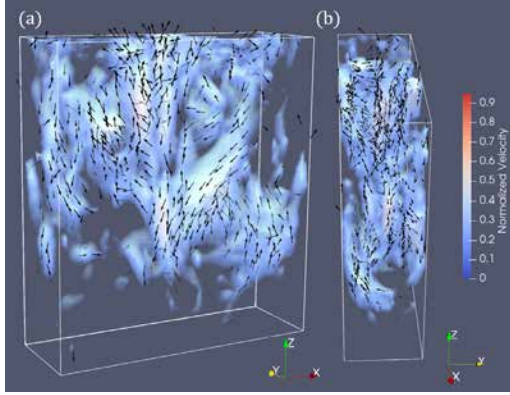


FIG. 85. Otrā ātruma lauka moda pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a) priekšas skats, (b) sāna skats, (c) augšas skats.

datu uzkrāšanas laiks. Tāpēc šeit nav parādītas augstākas kārtas gallija trauka plūsmas modas.

Lai gan daudzām modām sākotnēji var būt lielas vai, tiesi otrādi, ļoti mazas amplitūdas, ir svarīgi ņemt vērā to augšanas ātrumu SDM analizē lietotajā laika intervālā (5 sekundēs). Interesanti ir arī apskatīt modu sākotnējās amplitūdas, frekvenci, un augšanas/dilšanas ātrumu, katrā no šeit aplūkotojām gadījumiem – tas ir redzams Attēlos 86-89.

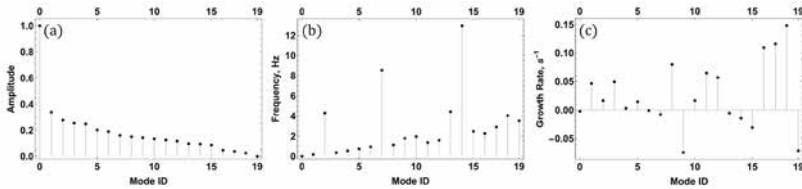


FIG. 86. (a) Sākotnējās normalizētās amplitūdas, (b) frekvences un (c) augšanas ātrumi modām pie 30 *sccm* bez ārēja ML.

Visos gadījumos nultajām stacionārajām modām sākotnējā amplitūda ir vairāk nekā divreiz lielāka salīdzinājumā ar visām citām modām. Var atzīmēt vairākas sakarības gadījumiem, kad nav ārēja ML (Attēli 86 un 87). Pirmkārt, modām ar augstākām laika frekvencēm parasti ir zemākas amplitūdas, izņemot dažas modas, kas atšķiras starp 30 un 100 *sccm*. Vēl viena raksturīga pazīme ir tā, ka normalizētās amplitūdas, pieaugot modu kārtai, 30 *sccm* gadījumā samazinās, vairāk nekā pie 100 *sccm* (skaitļi

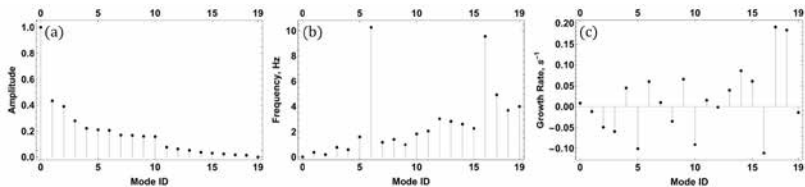


FIG. 87. (a) Sākotnējās normalizētās amplitūdas, (b) frekvences un (c) augšanas ātrumi modām pie 100 *sccm* bez ārēja ML.

86a un 87a), kur pie 100 *sccm* amplitūdas slīpums 1. – 4. modai ir straujāks un ir neliels leciens starp 10. un 11. modu. Interesanti ir arī tas, ka, lai gan augstākas kārtas modām amplitūda nav pārāk mainīga, 1. – 3. un 5. modai pie 100 *sccm* ir diezgan lieli negatīvi augšanas ātrumi (Attēls 87c), kas nozīmē, ka to modu dominance pār augstākas frekvences modām laika gaitā samazināsies. Papildus tam, 6. modai ir ievērojams pozitīvs augšanas ātrums un visaugstākā frekvence (Attēls 87b). Tikmēr pie 30 *sccm* Attēlā 86c ir redzams, ka zemākas frekvences modām ir vai nu ievērojams pozitīvs, vai gandrīz nulles augšanas ātrums, un divām modām ar visaugstāko frekvenci augšanas ātrums ir negatīvs. Tas liek domāt, ka lielāks plūsmas ātrums veicina smalkākas plūsmas struktūras ar mazāku laika mērogu, un DMD ļauj to kvantificēt. Principā, simulācijām ar lielāku režģa izšķirtspēju vajadzētu dot iespēju padziļināti analizēt plūsmas DMD modu struktūru raksturīgos garuma mērogius, izmantojot attēlu apstrādi un/vai spektrālās metodes.

Kad tiek pielikts ārējs ML (Attēli 88 un 89), parādās vairākas nozīmīgas atšķirības. Pirmkārt, tagad nav skaidras sakarības starp frekvenci un modas kārtu, pēc amplitūdas, kā redzams Attēlos 88b un 89b. Otrkārt, Attēli 88a un 89a norāda, ka atšķirībā no gadījumiem bez ārēja ML, ir ļoti straujš modu amplitūdas kritiens pēc 5. modas pie 30 *sccm* un 7. modas pie 100 *sccm* ar ML, pēc kā modu amplitūdas ir tik mazas, ka pat augstās pozitīvās augšanas ātruma vērtības pie 30 *sccm* (Attēls 88) neietekmē kopējo dinamiku. Šīs pozitīvās augšanas vērtības vairāk nekā pusei modu pēc 5. modas pie 30 *sccm* ir krasā pretstatā tam, kas redzams Attēlā 89c pie 100 *sccm*, kur var redzēt, ka lielākajai daļai modu ir ievērojams negatīvs augšanas ātrums. Attēli 88b un 89b norāda uz modu laika frekvences globālo pieaugumu – to var attiecināt uz telpiskām harmoniskām, kas ir saistītas ar burbuļu ķēdi, piemēram, Attēlā 79. Visi šie ir kvantitatīvi rādītāji, ieskaitot mazāku modu skaitu, kas ir nepieciešams sistēmas aprakstīšanai ar ārēju ML – tos var pielietot, lai sistemātiski pētītu, kā ML stabilizē un regulē plūsmas lauku un kā tas tiek traucēts pie lielākiem plūsmas ātrumiem.

Modu augšanas ātrumi parādīti Attēlā 89c izskaidro arī pakāpenisku pāreju no taisnām uz  $YZ$  plaknes zig-zag trajektorijām pie 100  $sccm$  ar ārēju ML (Attēls 77) – nultā moda laika gaitā kļūst izteiktāka, salīdzinājumā ar citām dilstošām modām.

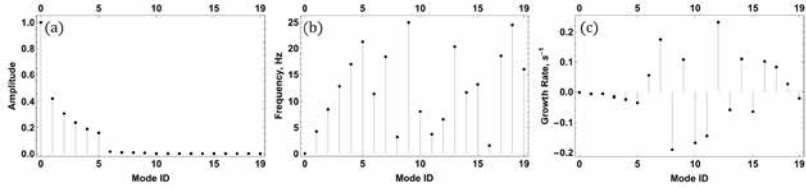


FIG. 88. (a) Sākotnējās normalizētās amplitūdas, (b) frekvences un (c) augšanas ātrumi modām pie 30  $sccm$  ar ārējo ML.

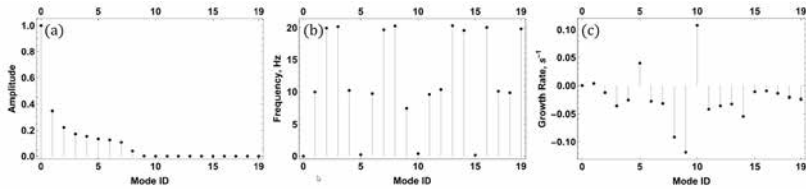


FIG. 89. (a) Sākotnējās normalizētās amplitūdas, (b) frekvences un (c) augšanas ātrumi modām pie 100  $sccm$  ar ārējo ML.

Visbeidzot, ir svarīgi analizēt telpiskās korelācijas pakāpi starp DMD modām – ar to saistītie rezultāti parādīti [214] – viens no galvenajiem secinājumiem šeit ir tas, ka, kopumā, modas, it īpaši spēcīgākās no zemo kārtu modām, ir ļoti ortogonālas, nozīmē, ka ir diezgan droši fiziski attiecināt šīs modas uz dažādiem impulsa pārnese mehānismiem (un to telpiskajām harmoniskām), kas notiek metāla traukā.

Lai detalizētāk analizētu burbuļa astes plūsmu, vispirms ir jāpāriet uz burbuļa atskaites sistēmu, izsekojot atsevišķus burbulus, rekonstruējot to centroīdu trajektorijas un veicot ātruma mērījumus, no kuriem var aprēķināt relatīvā ātruma lauku burbuļa atskaites sistēmā. To veic kā aprakstīts [214]. Reprezentatīvas iegūtās trajektorijas, kas pēc tam tiek izmantotas relatīvo ātrumu lauku iegūšanai visos 4 gadījumos, ir parādītas [214], tāpat kā attiecīgie lokālie  $Q$  lauki (invarianti pret Galileja transformāciju) ap burbuļiem. To interpretācija arī ir sniegta [214] – šajā kopsavilkumā galvenā uzmanība ir pievērsta SDM modām, kas izriet no relatīvā ātruma lauka pie burbuļiem.

Lai aprēķinātu SDM modas astes plūsmas ātruma laukam burbuļa atskaites sistēmā, tiek izmantoti burbuļi ar trajektorijām SDM analīzes laika logā un tiek noņemtas trajektorijas, kas ir īsākas par 10 kadriem. Atlikušās trajektorijas ir apgrieztas, lai iekļautu burbuļus  $z \in [40 \text{ mm}, 110 \text{ mm}]$ . Tas tiek darīts, lai izvairītos no asām lauka pārejām ieplūdes atveres tuvumā un augšpusē. Ātruma lauks tiek atkārtoti uztvertis regulāra paralelograma formas reģionā, kas seko burbuļu centroīdām. Datu ņemšanas reģions (DNR) ir izbīdīts  $z^-$  virzienā, lai uzņemtu vairāk burbuļa astes plūsmas ātruma lauka. DNR izmēri ir:  $x^- = x^+ = 15 \text{ mm}$ ;  $y^- = y^+ = 7,5 \text{ mm}$ ;  $z^+ = 5 \text{ mm}$ ;  $z^- = -15 \text{ mm}$  [214]. DNR ņemtajam ātruma laukam tiek uzklāta sfēriska maska ar rādiusu  $4,5 \text{ mm}$ , kura centrēta uz burbuļa centroīdas – tas tiek darīts, lai maskētu argona ātruma lauka perturbācijas burbuļos. Datu pārveidošana no reālās uz komplekso reprezentāciju tiek piemērota katram lauka režģa punktam trajektorijas laika diapazonā. Lauka momentuzņēmumu sakraušanas stratēģija ir izskaidrota [214], un tā ir tāda, ka SDM nosaka modas visam trajektoriju ansamblim. Sākotnējās amplitūdas tiek aprēķinātas katrai trajektorijai atsevišķi [117]. Tāpat kā globālo (gallija trauka) modu gadījumā, tika aprēķinātas pirmās 20 modas.

Sākot ar 30 *scm* ar pieliktu ML, var novērot, ka burbuļu atskaites sistēmā ātruma lauka modas, īsuma labad sauktas vienkārši par *burbuļu modām*, ir diezgan spēcīgi korelētas [214]. Tas nozīmē, ka atšķirībā no globālām ātruma lauka modām, tie ir jāinterpretē kopīgi un ir nepieciešama padziļinātāka analīze. Šim nolūkam papildus vidējām sākotnējām amplitūdām (kā iepriekš, normalizētām uz nulltām SDM modām) ar standarta novirzēm, frekvencēm un augšanas/dilšanas ātrumiem (Attēls 90), rūpīgi jāizpēta arī normalizēto modu amplitūdu dinamika (Attēls 91), kā arī normalizētās vidējās kvadrātiskās (VK) režīma amplitūdas katrai analizētajai trajektorijai (t.i., dinamiku burbuļu plūsmas laikā, Attēls 92). Jāņem vērā, ka pēdējā gadījumā normalizācija tiek veikta 1. līdz 19. modām vizuālos nolūkos — tas ir tāpēc, ka nultās modas amplitūda ir aptuveni par vienu kārtu lielāka nekā otrās augstākās modas amplitūda, šajā gadījumā 12. moda.

Visstiprākā burbuļu plūsmas ātruma lauka moda ir nultā moda, kas būtībā ir vidējās plūsmas moda ar  $f_0 \sim 2.6 \text{ mHz}$  un  $a_0 \sim -9.4 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , redzama Attēlā 93. Tās relatīvais stiprums citu modu starpā ir tuvu vieniniekam, ar standartnovirzi  $\sim 0.26\%$ . Neskatoties uz nulto modu, kā redzams Attēlos 90 un 91a, sākotnēji dominējošās modas ir 12., 7. un 13., un modām 9, 8, 10 un 11 ir mazāka, bet tomēr ievērojama amplitūda. Vēl ir svarīgas zemākas frekvences modas no 1. līdz 4. un to amplitūdas dinamika, kas ir redzama Attēlā 91b. Jāņem vērā, ka 12., 7., 13., 9. un 10. modas trajektorijas laikā ļoti ātri dilst, savukārt 8. un 11. modu amplitūdas gandrīz nemainās. Ir arī svarīgi, ka sākotnēji 91 attēloto modu amplitūdu

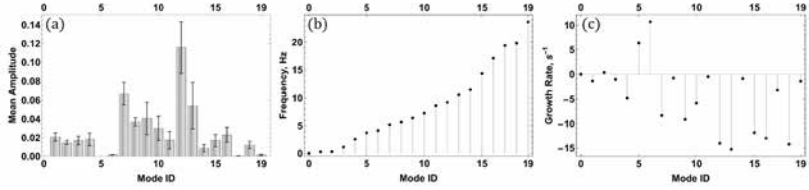


FIG. 90. 30 *sccm* ar ML: burbuļa ātruma lauka moda (a) normalizētās sākotnējās amplitūdas, (b) frekvences un (c) augšanas/dilšanas ātrums. Normalizācija attiecībā pret nullo modu.

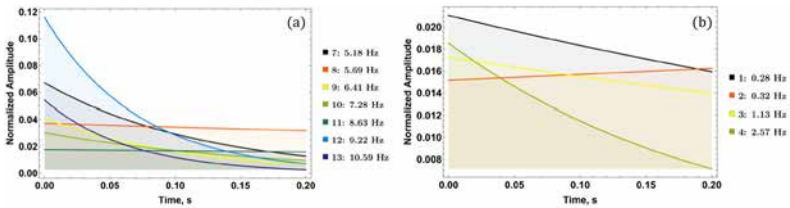


FIG. 91. 30 *sccm* ar ML: normalizēto amplitūdu dinamika vidējā trajektorijas laikā nozīmīgām (a) dominējošām modām un (b) sekundārām modām. Normalizācija attiecībā pret nullo modu. Apzīmējumi sānos: modu kārtas un frekvences.

summa ir  $\sim 0.38$  no nultās modas amplitūdas, toties trajektorijas laika intervāla beigās to kopējais ieguldījums samazinās līdz  $\sim 0.1$ .

Lai saprastu, kāda šai modu dilšanai ir ietekme uz kopējo ātruma lauku, ir jāpārbauda augstākas kārtas modu telpiskās struktūras, kuras ir redzamas Attēlos 94-98, kuri ir sakārtoti pēc vidējās sākotnējās amplitūdas, dilstošā secībā. Šāda veida attēlu kārtība tiek saglabāta visā šajā sadaļā. 1. līdz 4. moda šeit nav parādītas, jo 1. un 2. moda ir tikai nedaudz perturbētas nultās modas versijas (abas ir stipri korelētas ar nullo modu), savukārt 3. un 4. moda ir attiecīgi daudz vājākas 12. un 7. modu versijas. Kombinācijā, modas no 1. līdz 4. sākotnēji veido  $< 8\%$  no nultās modas amplitūdas un ievērojami nodilst trajektorijas laikā (Attēls 91).

12. modai ( $f_{12} \sim 9.22 \text{ Hz}$ ,  $a_{12} \sim -14 \text{ s}^{-1}$ ), kā ir redzams Attēlā 94, pārsvarā ir ļoti izteikta  $X$  komponente ar mazāku  $Y$  virziena ieguldījumu, kas nozīmē, ka šī moda attēlo ātruma lauka svārstības ap burbuli, galvenokārt  $XZ$  plaknē, ar mazāk izteikām  $YZ$  svārstībām. Šo modu var interpretēt kā plūsmas struktūras, kas ir atbildīgas par burbuļa trajektorijas svārstībām  $XZ$  plaknē trajektoriju sākuma stadijās (parādīts [214]). 12. modas eksponenciālā dilšana, kuras amplitūda  $\sim$  samazinās trīs reizes

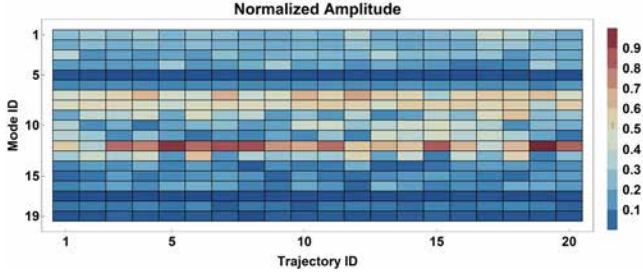


FIG. 92. 30 *sccm* ar ML: normalizētas vidējās kvadrātiskās (VK) amplitūdas modām visās apstrādātajās trajektorijās. Normalizācija tiek veikta ar modām no 1. līdz 19.

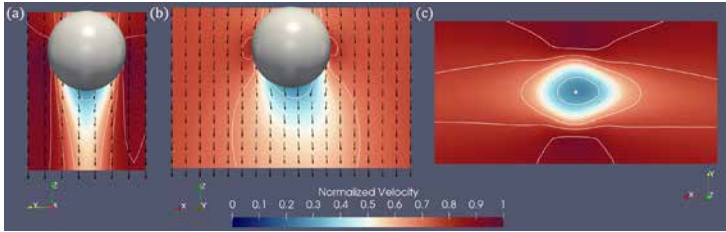


FIG. 93. Nultā burbuļa ātruma lauka moda 30 *sccm* ar ārēju ML: (a)  $YZ$  plaknē, (b)  $XZ$  plaknē un (c)  $XY$  plaknē. Pelēkā sfera (a) un (b) apakšattēlos apzīmē masku, ko pirms DMD pielieto datiem apskatītajā reģionā. Piezīme: pelēkais punkts (c) plaknes centrā ir vieta, kur sfēriskā maska krustojas ar  $XY$  plakni, t.i., plakne atrodas tieši zem maskas. Plaknes  $YZ$  un  $XZ$  sevī ietver sfēriskās maskas centru. Plaknes ātruma lauka vektora garumi (a-c) tiek mērogoti, uz plaknēm projicējot vienmērīgu, vienāda garuma vektoru režģi.

trajektorijas laika intervāla pirmajā trešdaļā, un tās frekvence atbilst strauji slāpētajām svārstībām, kas novērotas trajektoriju  $XZ$  projekcijām. Attēls 92 liecina, ka tas tā ir lielākajai daļai trajektoriju.

Modas 7 ( $f_7 \sim 5.2 \text{ Hz}$ ,  $a_7 \sim -8.3 \text{ s}^{-1}$ ) un 13 ( $f_{13} \sim 11 \text{ Hz}$ , savukārt  $a_{13} \sim -15 \text{ s}^{-1}$ ) satur ātruma lauka svārstības  $YZ$  plaknē,  $Y$  virzienā ar nelielām ārpus plaknes perturbācijām (Attēli 95 un 96). Lai gan iepriekš minētās modas diezgan ātri nodilst, modām 8 ( $f_8 \sim 5.7 \text{ Hz}$ ,  $a_8 \sim -0.8 \text{ s}^{-1}$ ) un 11 ( $f_{11} \sim 8.6 \text{ Hz}$ ,  $a_{11} \sim -0.5 \text{ s}^{-1}$ ), kas ir savstarpēji līdzīgas, augšanas ātrums ir ļoti mazs un, dēļ tā, tās saglabājas plūsmā vidējā trajektorijas laikā. 9. moda šeit netiek parādīta, jo tā ir daudz vājāka nekā 12. moda un ir tai ļoti līdzīga.

Varētu domāt, ka šīs modas nosaka trajektoriju svārstības  $YZ$  plaknē,

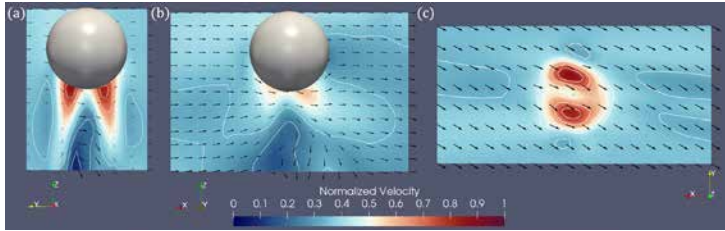


FIG. 94. 12. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

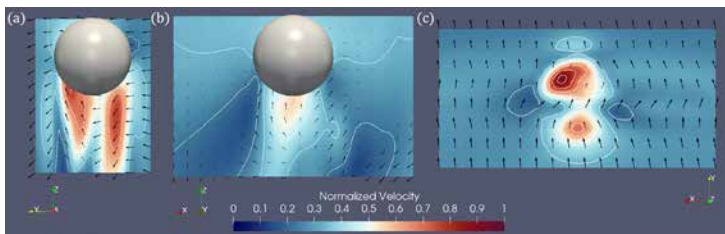


FIG. 95. 7. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

it īpaši ņemot vērā, ka šīm svārstībām ir palielinātas amplitūdas vēlākām trajektorijām [214], kas saskan ar nedaudz lielākām VK amplitūdām, kas novērotas 7., 8. un 11. modā vēlākām trajektorijām (Attēls 92). Svarīgi, ka šo modu periodi ir ar vidējā trajektorijas laika lieluma kārtu vai mazāki par to. Ir svarīgi ņemt vērā, ka šāda uzvedība nav skaidri redzama, skatoties uz trauka atskaites sistēmas modām pie 30 *sccm* ar ārēju ML (Attēls 76),

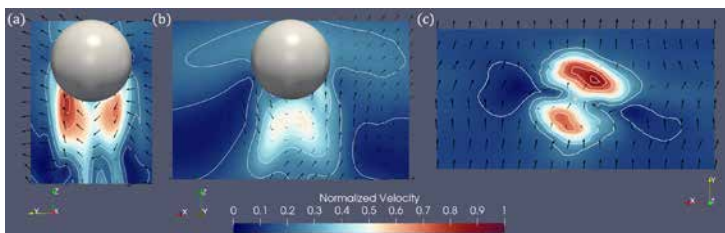


FIG. 96. 13. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

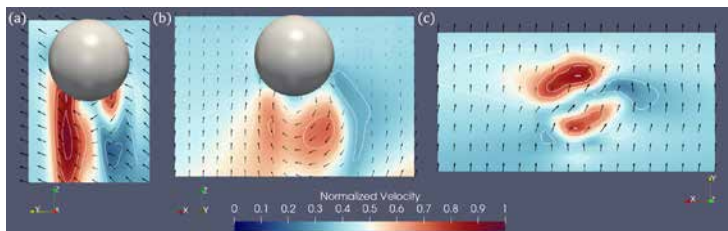


FIG. 97. 8. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

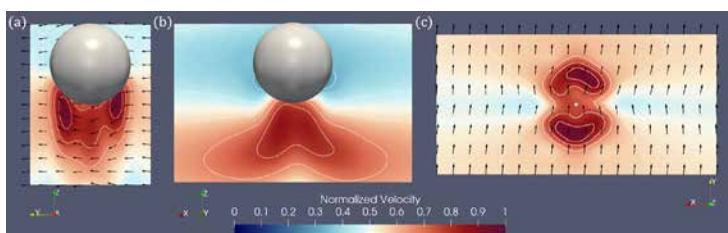


FIG. 98. 11. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

norādot uz iespējamo DMD lietderību, apskatot burbuļa astes plūsmu atsevišķi. Toties augstākai pārlicēbai ir nepieciešams ilgāks DMD datu uzņemšanas laiks katrai trajektorijai.

Jāatzīmē arī ka starp iepriekšminētajām modām ir ievērojama korelācija:  $7 \leftrightarrow (8, 12)$ ,  $8 \leftrightarrow 12$ ,  $11 \leftrightarrow 13$  [214]. Ir svarīgi ar tas, ka šīm modām ir ļoti liela simetrija un nevienā no tām nav maza mēroga telpiskas struktūras, kas norāda uz burbuļa astes plūsmas laminarizāciju ar pievadītu ārēju ML, kas atbilst novērotajai burbuļa astes plūsmai [214].

Modu analīzes rezultāti pie 100 *sccm* ar ārēju ML ir redzami Attēlos 99-101. Tāpat kā 30 *sccm* gadījumā, daudzas no DMD modām ir ievērojami korelētas [214]. Attēls 99a norāda, ka ir tikai divas modas ar salīdzinoši augstām sākotnējām amplitūdām. Toties, atšķirībā no gadījuma ar 30 *sccm*, šeit ir redzams Attēlā 99c, ka ir diezgan daudz modu ar pozitīviem augšanas ātrumiem, kaut arī augšanas ātrumu lielumi ir salīdzinoši mazi, izņemot 16. modu. Taču šai modai ir ļoti maza sākotnējā amplitūda un, neskatoties uz visaugstāko augšanas ātrumu, VK amplitūda ir niecīga, kā redzams Attēlā 101. Interesanti ir arī tas, ka modas augšanas slāpēšana pie 30 *sccm* un 100 *sccm* ar ārēju ML, kas ir novērota Attēlos 90c un 99c, tiek novērota



arī trauka atskaites sistēmas DMD modām (Attēli 88c un 89c) ar atšķirību, ka trauka atskaites sistēmas modu augšanas ātrums pārsvarā ir negatīvs pie 100 *scm*, nevis 30 *scm*, kā tas ir burbuļu modām. Attēli 100 un 101 norāda, ka ir noderīgi tuvāk apskatīt modas 4, 6, 8-10 un 12, jo tās vai nu sākotnēji ir izteikti dominējošas, vai arī saglabājas ar vai pieaug līdz ievērojamai amplitūdai.

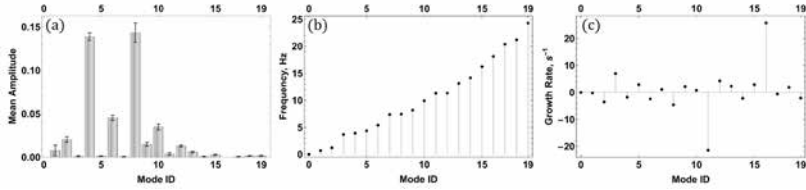


FIG. 99. 100 *scm* ar ārēju ML: burbuļa ātruma lauka modas (a) normalizētas sākotnējās amplitūdas, (b) frekvences un (c) augšanas ātrumi.

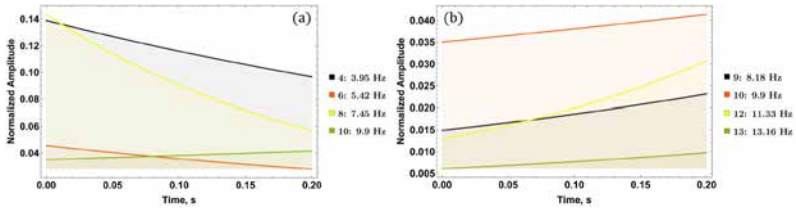


FIG. 100. 100 *scm* ar ārēju ML: amplitūdas dinamika vidējā trajektorijas laikā nozīmīgām modām.

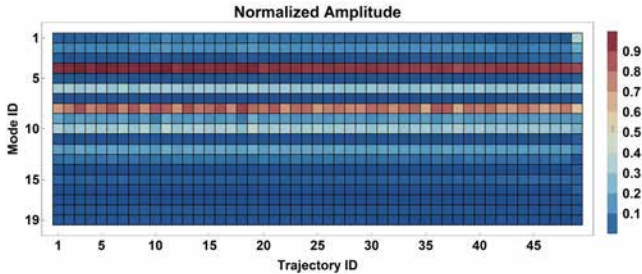


FIG. 101. 100 *scm* ar ārēju ML: normalizētas VK amplitūdas DMD modām visās apstrādātajās trajektorijās.

Nozīmīgas burbuļu modas pie 100 *sccm* ar ārēju ML ir redzamas Attēlos 102-108. Uzreiz ir skaidrs, ka nultā moda ( $f_0 \sim 2.3 \text{ mHz}$ ,  $a_0 \sim 4.6 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , ar relatīvu amplitūdu  $\sim 1$  visām trajektorijām, ar 0.66% standartnovirzi) Attēlā 102 ir ļoti līdzīga 30 *sccm* nultajai modai (Attēls 93). Atšķirība slēpjas izteiktākā, lielākā stagnācijas zonā zem burbuļa. Svarīga atšķirība starp modām šajā gadījumā pret 30 *sccm* ir tas, ka pie 100 *sccm* burbuļa astes plūsmas ir augstas amplitūdas modas ar daudz spēcīgākām  $Z$  komponentēm: modas 8 ( $f_8 \sim 7.5 \text{ Hz}$ ,  $a_8 \sim -4.6 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 104), 10 ( $f_{10} \sim 9.9 \text{ Hz}$ ,  $a_{10} \sim 0.83 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 105), 9 ( $f_9 \sim 8.2 \text{ Hz}$ ,  $a_9 \sim 2.2 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 107) un it īpaši 12 ( $f_{12} \sim 11 \text{ Hz}$ ,  $a_{12} \sim 4.3 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 108) salīdzinājumā ar to, kas redzams Attēlos 95a, 96a un 97a.

Viena atšķirība starp trajektorijām ir ka 100 *sccm* gadījumā nav izteikta sākotnējā burbuļa nobīde  $XZ$  plaknē, atšķirībā no 30 *sccm* [214]. Aplūkojot modas ar nozīmīgam  $X$  komponentēm, ir svarīgi neņemt vērā, ka pie 30 *sccm* ir 12. moda (Attēls 94), kam sākotnēji ir vislielākā amplitūda pēc nultās modas, savukārt pie 100 *sccm* 6. modai ( $f_6 \sim 5.4 \text{ Hz}$ ,  $a_6 \sim -2.4 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 106) ir  $\sim 3$  reizes mazāka sākotnējā amplitūda, salīdzinot ar 4. modu ( $f_4 \sim 3.9 \text{ Hz}$ ,  $a_4 \sim -1.8 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 103), un 8. un 9. modai ir mazāk izteikta  $X$  komponente un vēl mazāka amplitūda visā trajektorijas laikā. Salīdzinoši nelielais  $X$  komponentu ieguldījums šajās modās, iespējams, izskaidro trajektoriju  $XZ$  projekciju atšķirības.

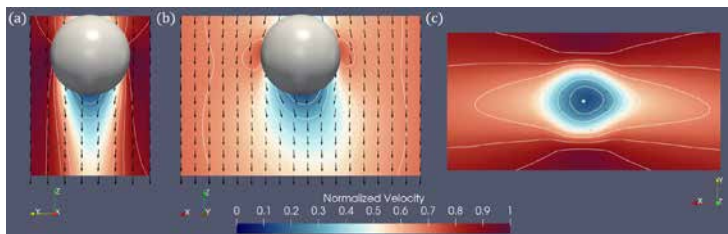


FIG. 102. Nultā moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* ar ārēju ML: (a)  $YZ$  plakne, (b)  $XZ$  plakne un (c)  $XY$  plakne.

Ir svarīgi arī apskatīt trajektoriju  $YZ$  projekcijas pie 30 *sccm* un 100 *sccm* [214] – var manīt, ka novirzes  $YZ$  plaknē kopumā ir lielākas 100 *sccm* gadījumā pat sākotnējām trajektorijām. 4. moda ( $f_4 \sim 3.9 \text{ Hz}$ ,  $a_4 \sim -1.8 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 103), modas 8, 10 un 9 visas veicina burbuļa astes plūsmas ātruma lauka svārstības  $XY$  plaknē,  $Z$  virzienā, un ir dominējošas visas trajektorijas laikā. Turklāt, to kopējais relatīvais ieguldījums ir ievērojami lielāks nekā līdzīgu modu gadījumā ar 30 *sccm*. Lai gan tas varētu izskaidrot trajektorijas svārstības plaknē  $YZ$ , un modu frekvences liecina, ka tas ir ticams, nav skaidri redzams no Attēla 101 ka iepriekšminētajām modām

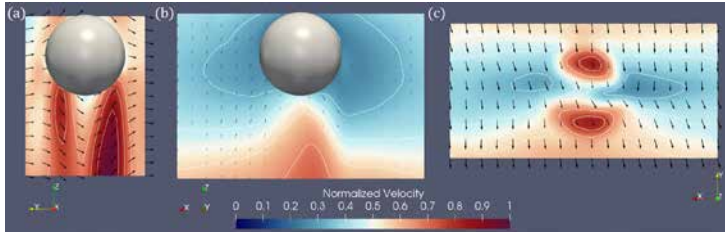


FIG. 103. 4. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

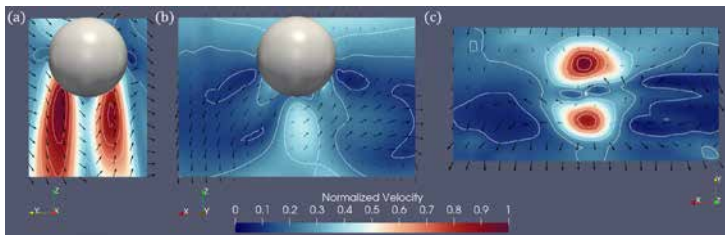


FIG. 104. 8. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

plūsmas laikā vajadzētu izraisīt pāreju no aptuveni taisnas trajektorijas uz trajektorijām ar zig-zag struktūrām metāla konteinerā augšdaļā.

Kā minēts iepriekš, tas lielā mērā izriet no ātruma lauka dominējošās nultās modas trauka atskaites sistēmā (Attēls 77), kura pakāpeniski kļūst vēl izteiktāka nekā citas ātri dilstošās modas (Attēls 89c). Rūpīgāk aplūkojot nozīmīgo burbuļu modu VK amplitūdu vēsturi (Attēls 109), var redzēt,

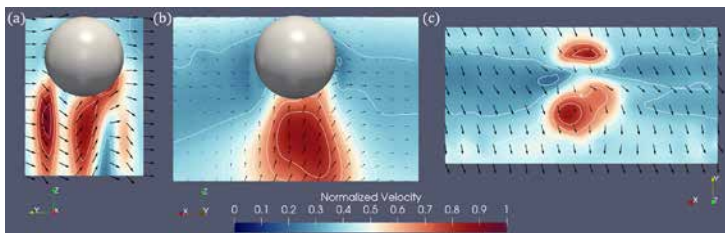


FIG. 105. 10. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

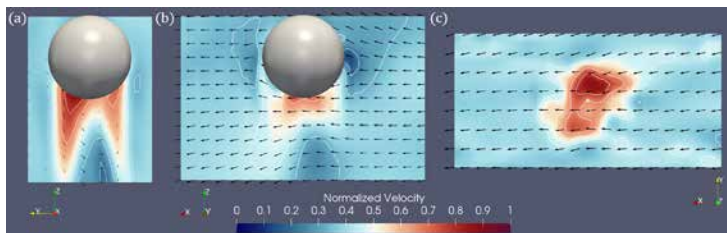


FIG. 106. 6. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

ka modas 4, 8 un 10 uzrāda nelielu negatīvu tendenci. Fakts (tik tālu cik uzrādītie rezultāti norāda), ka trajektorijas formas un to pārejas laika gaitā šajā gadījumā ir izskaidrojamas ar trauka DMD modām, nevis ar burbuļu modām, varētu likt domāt, ka atbildīgas ir lielāka mēroga plūsmas struktūras, nevis burbuļa astes plūsmas struktūras. Tomēr ir pamatoti pieņemt, ka sākotnējā plūsmas asimetrija/traucējumi – un līdz ar to arī attiecīgas burbuļu modas – metāla trauka *YZ* plaknē ir atbildīgas par lielāka mēroga struktūru parādīšanos. Pašas *YZ* plaknes perturbācijas varētu rasties no asimetriskas burbuļu atdalīšanās no argona ieplūdes caurules – būtu loģiski, ka šī asimetrija tiek pastiprināta ar palielinātu gāzes plūsmas ātrumu. Būtu interesanti izpētīt, kā *YZ* simetrija tiek izjaukta, kad plūsmas ātrums mainās no 30 *sccm* līdz 100 *sccm* un lielākām vērtībām, kā arī noskaidrot, kā tas tiek atspoguļots burbuļa DMD modās. Starp aplūkotojām modām ir sekojošās būtiskas korelācijas: 8 ↔ (6, 9), 10 ↔ (4, 12) [214].

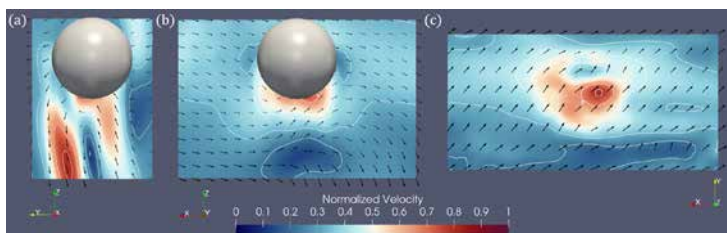


FIG. 107. 9. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

Pārejot pie gadījumiem bez ML, vispirms tiek apskatīts 30 *sccm* gadījums: SDM modu analīzes rezultāti parādīti Attēlos 110-112. Var pamanīt, ka modu frekvences Attēlā 110b, kopumā, ir zemākas nekā abos gadījumos, kad

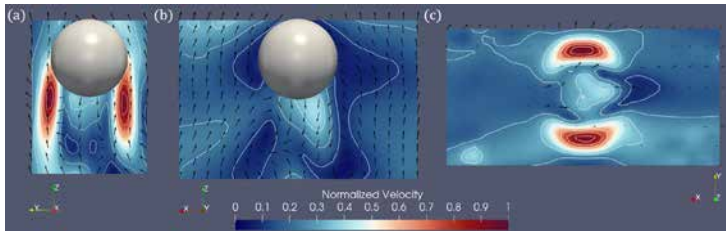


FIG. 108. 12. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* ar ārēju ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

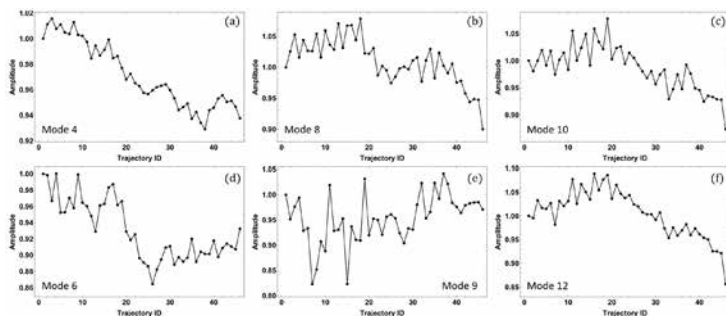


FIG. 109. 100 *sccm* ar ārēju ML: vidējo VK amplitūdu vēsture plūsmas laikā (trajektorijas ID) nozīmīgām burbuļa ātruma lauka modām. Dati ir vidējoti ar 5-trajektoriju platu slidošā vidējā logu. Amplitūdas normalizācija veikta pēc vidējošanas un ir atsevišķa katrai modai: (a) 4. moda, (b) 8. moda, (c) 10. moda, (d) 6. moda, (e) 9. moda, (f) 12. moda.

tiek pievadīts ārējs ML (Attēli 90b un 99b) – šī tendence tika novērota arī iepriekš, metāla trauka ātruma lauka modām (Attēli 86b – 89b). Vēl viena atšķirība, kas ir skaidri redzama Attēlā 111, ir ka gan pirmās nozīmīgās modas, kas ir dominējošas (a), gan mazākas amplitūdas modas (b), veido ļoti nozīmīgu plūsmas daļu, salīdzinot ar nultās modas amplitūdu: attiecīgi  $\sim 0.48$  un  $\sim 0.29$ .

Kā redzams Attēlā 110c, tikai divām modām, 0. un 16., augšanas ātrums ir nedaudz negatīvs, savukārt pārējām modām ir pozitīvs augšanas ātrums, kas noved pie kopēja nenulles modu relatīvā nozīmīguma pieauguma vidējā trajektorijas laikā: iepriekšminēto modu grupu amplitūdu summas, attiecīgi, ir  $\sim 0.65$  un  $\sim 0.48$ . Papildus tam, ir interesanti, ka zemāko frekvenču modām no 1. līdz 3. ir ļoti mazs relatīvās amplitūdas pieaugums. Turklāt Attēls 112 norāda, ka 7. modas (trešā spēcīgākā pēc 0. modas)

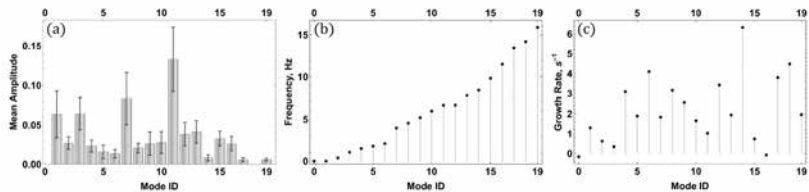


FIG. 110. 30 *sccm* ar bez ārēja ML: burbuļa ātruma lauka modas (a) normalizētas sākotnējās amplitūdas, (b) frekvences un (c) augšanas ātrumi.

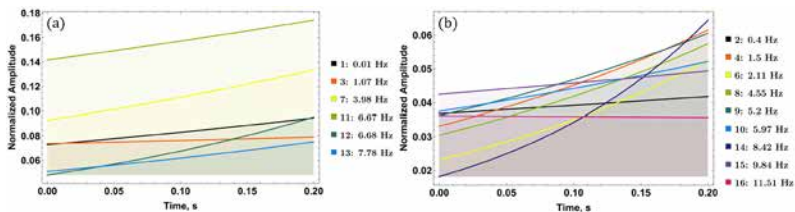


FIG. 111. 30 *sccm* bez ārēja ML: amplitūdas dinamika vidējā trajektorijas laikā nozīmīgām modām.

VK amplitūda plūsmas laikā kopumā palielinās, savukārt 11. modai (otrā dominējošā pēc 0. modas) VK amplitūda ar laiku samazinās. Nozīmīgākās modas ir parādītas Attēlos 113-119.

Nultā moda ( $f_0 \sim 5.4 \text{ mHz}$ ,  $a_0 \sim -0,16 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 113), tāpat kā iepriekš, ir ar vislielāko amplitūdu, kura pēc normēšanas ir  $\sim 1$  visām trajektorijām, ar  $\sim 4.6\%$  novirzi. Lai gan tās dilšanas ātrums ir par lieluma

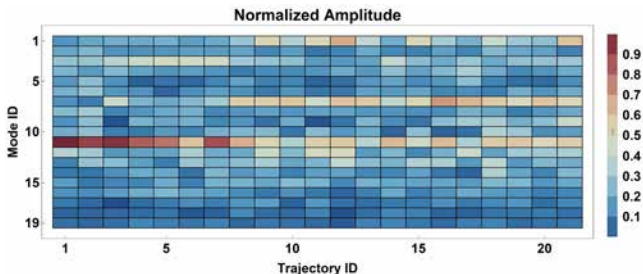


FIG. 112. 30 *sccm* bez ārēja ML: normalizētā vidējās kvadrātiskās (VK) amplitūdas modām visās apstrādātās trajektorijās.

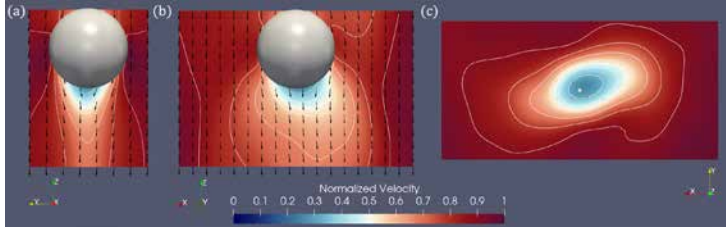


FIG. 113. 0. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *scm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

kārtu lielāks nekā gadījumos, kad tiek pievadīts ārējs ML, tās amplitūda joprojām vidēji samazinās tikai līdz 0.96. Ir skaidrs, it īpaši no Attēla 113c, ka šajā gadījumā nultā moda ir ļoti asimetriska *XY* plaknē, vienlaikus pārsvarā saglabājot simetriju *YZ* plaknē (a). Var manīt, ka nākamās divas dominējošās modas, 11. ( $f_{11} \sim 6.7 \text{ Hz}$ ,  $a_{11} \sim 1.0 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 114) un 7. ( $f_7 \sim 4.0 \text{ Hz}$ ,  $a_7 \sim 1.8 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 115), arī ir diezgan simetriskas, it īpaši *XZ* plaknē. Abās modās var redzēt ļoti izteiktu burbuļa astes plūsmas zonu zem burbuļa, kā arī to, ka abas modas norāda uz dominējošo plūsmu *X* virzienā ar mazāku ieguldījumu *Y* virzienā. Ātruma lauka struktūras, kas ir redzamas Attēlos 114b un 115 b, un modu frekvences, kas atbilst zig-zag trajektoriju viļņu garumiem, ņemot vērā vidējo trajektorijas laiku, liktu domāt, ka šīs modas var būt atbildīgas par virpuļu atrašanās un trajektoriju zig-zag kustību *XZ* plaknē, jo ātruma lauka svārstības *X* virzienā ir visspēcīgākās apgabalos, kur veidojas burbuļu radītie virpuļi [214]. 12. moda ( $f_{12} \sim 6.7 \text{ Hz}$ ,  $a_{12} \sim 3.4 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 117) ir līdzīga modām 11 un 7, bet ir mazāk simetriska un tai ir lielāka *Y* komponente. Papildus tam, modas 11 un 12 ir ļoti izteikti korelētas [214].

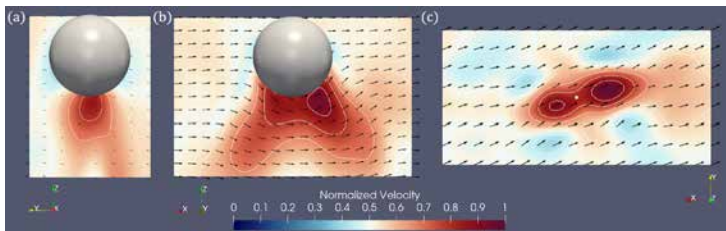


FIG. 114. 11. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *scm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

Pirmā moda ( $f_1 \sim 12 \text{ mHz}$ ,  $a_1 \sim 1,3 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 116) varētu būt saistīta

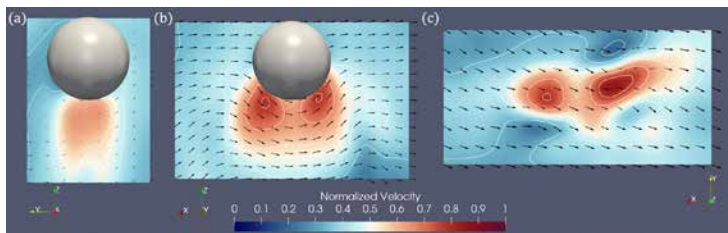


FIG. 115. 7. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *scm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

ar nulto modu, jo tā sevī ietver izteiktu plūsmu *Z* virzienā un plūsmas struktūras Attēlā 116c norāda, ka tā varētu būt augstākas pakāpes nultās modas telpas harmonika (frekvences atšķiras par koeficientu  $\sim 2.2$ ). Jāņem vērā, ka nultā un 1. modas ir manāmi korelētas [214].

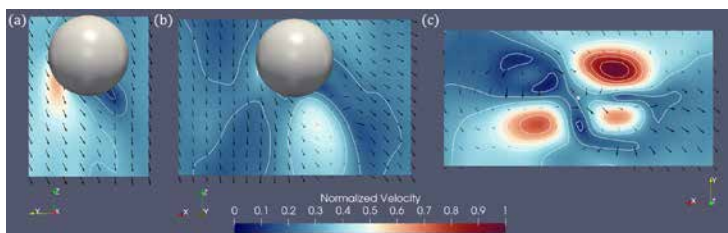


FIG. 116. 1. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *scm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

Pārējās divas no dominējošajām modām ir 3. ( $f_3 \sim 1.1 \text{ Hz}$ ,  $a_3 \sim 0.35 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 118) un 13. ( $f_{13} \sim 7.8 \text{ Hz}$ ,  $a_{13} \sim 1.9 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 119) – tām ir sarežģītas plūsmas struktūras, bez acīmredzamām simetrijām vai skaidru vispārējo ātruma lauka virzienu. Modas, kas sagrupētas Attēlā 111b, ir lielā mērā perturbētas 11., 7. un 1. modu versijās, kurām nav skaidras simetrijas kā 3. un 13. modai.

Modas 15 ( $f_{15} \sim 9.8 \text{ Hz}$ ,  $a_{15} \sim 0.75 \text{ s}^{-1}$ ) un 16 ( $f_{16} \sim 12 \text{ Hz}$ ,  $a_{16} \sim -6.9 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) ir interesantas, jo tās būtībā ir perturbēti 12. modas varianti, kas ir redzami pie 100 *scm* ar ārēju ML (Attēls 108) ar plūsmas ātruma lieluma maksimumu, kas ir pagriezts par  $\pi/2$  *XY* plaknē.

8. moda ( $f_8 \sim 4.6 \text{ Hz}$ ,  $a_8 \sim 3.2 \text{ s}^{-1}$ ), kas ir redzama Attēlā 120, ir pelnījusi īpašu uzmanību, neskatoties uz relatīvi zemu amplitūdu. Ātruma lauka struktūras, kas ir redzamas Attēlā 120b, liecina, ka šī moda, vis ticamāk, ir saistīta ar virpuļu atrašanos – nevis tieši tāpat kā 11. un



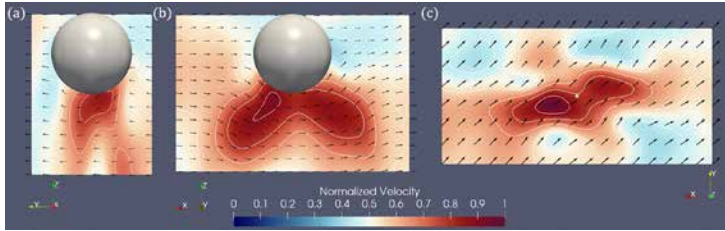


FIG. 117. 12. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

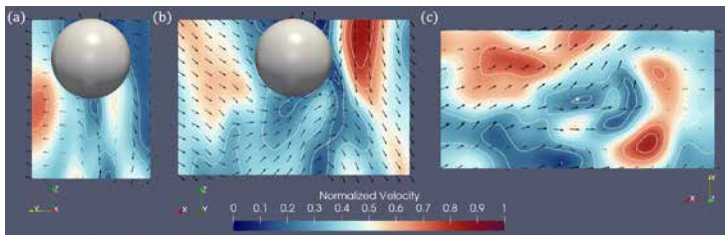


FIG. 118. 3. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

7. moda, bet drīzāk tā reprezentē burbuļa astes plūsmu tūlīt pēc virpuļa atdalīšanas, kur ir augšupejoša plūsma (*XZ* plaknē) burbuļa sānā, no kura ir notikusi atraušanas. Šajā gadījumā, vai drīzāk, aplūkojot šīs modas fāzi, virpuļa atdalīšanās notika pa labi no burbuļa, un virpulis ar pulksteņrādītāja virziena rotāciju izveidoja plūsmas augšupvērsto apgabalu. Neskatoties uz plūsmas lauku, ir vēl divi faktori, kas liecina, ka tā varētu būt pareizā

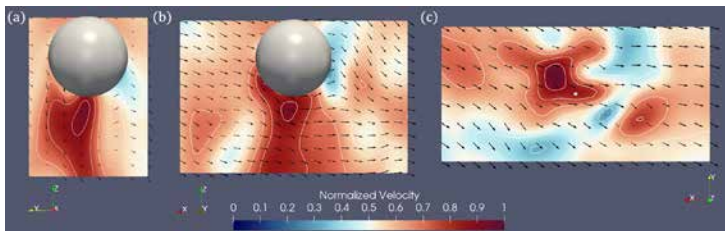


FIG. 119. 13. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

interpretācija. Pirmkārt, modas frekvence ir aptuveni atbilstoša, jo tās periods aptuveni atbilst vidējam trajektorijas laika periodam. Aplūkojot trajektorijas [214], tiek konstatēts, ka zig-zag kustība  $XZ$  plaknē iekļaujas  $\sim 1$ - $1.5$  viļņu garumos, kas nedaudz atšķiras no modas frekvences, bet ir pietiekami tuvu, lai izraisītu aizdomas. Otrkārt, Attēls 111b norāda, ka 8. modas amplitūda trajektorijas laikā ievērojami palielinās (salīdzinot ar sākotnējo vērtību), kas būtu sagaidāms, ņemot vērā, ka, burbulim paātrinoties pacelšanās laikā, arī atdalītie virpuļi uzrāda lielākas ātruma vērtības. Vēl viens neliels arguments ir tāds, ka 8. moda ir diezgan korelēta ar 11. un 12. modām, kas, visticamāk, arī ir saistītas ar virpuļu atrašanos, kā norādīts iepriekš.

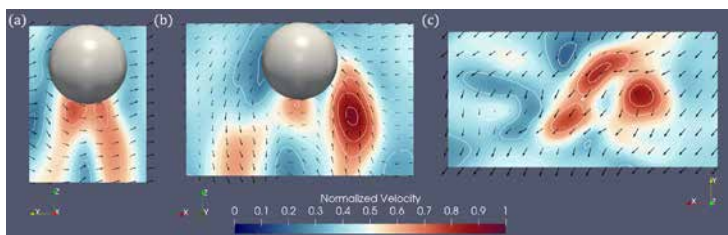


FIG. 120. 8. moda burbuļa ātruma laukam pie 30 *sccm* bez ārēja ML: (a)  $YZ$  plakne, (b)  $XZ$  plakne un (c)  $XY$  plakne.

Trajektorijas  $XY$  projekcijas, izšķobītu spirāļu un blīvi izkārtotu paškrustojošu līniju veidā [214], ir saistītas ar salīdzinoši daudz nesakārtotākajām un asimetriskām modu plūsmas struktūrām, kas ir redzamas šajā gadījumā, atšķirībā no gadījumiem ar ārēju ML. Visbeidzot, lai uzsvērtu korelāciju starp modām, ir šādas atkarības:  $0 \leftrightarrow 1$ ,  $13 \leftrightarrow (7, 11)$ ; korelēti trīskārši  $(3, 11, 12)$  un  $(8, 11, 12)$  [214].

Ņemot vērā augstāk minētās DMD modas pie 30 *sccm* bez ārēja ML, ir svarīgi redzēt, kā tās atšķiras no rezultātiem pie 100 *sccm* bez ārēja ML. Attiecīgie DMD modu analīzes rezultāti ir redzami Attēlos 121-123. Tāpat kā pie 30 *sccm* bez ārēja ML, arī pie 100 *sccm* modu frekvences ir zemākas nekā gadījumos, kad tiek pievadīts ML (Attēls 121b). Jāņem vērā arī tas, ka 100 *sccm* (Attēls 121c) gadījumā augšanas ātrumi, tāpat kā 30 *sccm*, ir pozitīvi, izņemot 0. un 10. modas (0. un 16. pie 30 *sccm*, kā redzams Attēlā 110c). Tomēr kopumā augšanas ātrumi ir lielāki. Vēl viena atšķirība ir ka šeit augstākas frekvences modām sākotnējās amplitūdas ir lielākas nekā pie 30 *sccm* (Attēls 121 salīdzinājumā ar Attēlu 110a). Attēli 122a un 122b parāda dominējošās modas un modas ar mazāku kopējo amplitūdu, attiecīgi – divas visspēcīgākās modas Attēlā 122a, modas 14 un 13, ir augstākas frekvences nekā divas spēcīgākās modas Attēlā 111a. Tā

kā modu grupēšanu dominējošā / sekundārā grupā ir grūti veikt objektīvi, šajā gadījumā par nosacītu robežu tika izmantota 10. moda (Attēls 122b), jo vidējās trajektorijas laikā tā mainās ļoti maz, un tās un 9. modas beigu amplitūdas vidēji ir nedaudz zem 11. modas beigu amplitūdas (Attēls 111a).

Vēl viena būtiska atšķirība ir ka dominējošajām modām pie 100 *sccm* ir zemākas relatīvās sākotnējās amplitūdas nekā 30 *sccm* gadījumā, un to vērtību sadalījums pēc trajektorijām ir mazāk izkliedēts (Attēls 122a). Turklāt amplitūdu starpības starp vidējās trajektorijas laika sākumu un beigām lielākajai daļai modu ir lielākas pie 100 *sccm*. Konkrēti, dominējošo dinamisko modu amplitūdas sākotnēji veido  $\sim 0.44$ , un šī summa vidējās trajektorijas laikā palielinās līdz  $\sim 0.93$  (Attēls 122a). Savukārt mazākas amplitūdas modas sākotnēji kopsummā dod  $\sim 0.26$ , kas trajektorijas laikā kļūst par  $\sim 0.48$ . Nultās modas, kas apraksta vidējo plūsmas lauku, amplitūda ir vidēji  $\sim 1.08$  (sākotnēji 1) ar 5.2% standartnovirzi, kas nozīmē, ka dominējošās nestacionāras modas praktiski "aizēno" vidējo plūsmas lauku, un sekundāras modas arī plūsmā iegulda būtiskas perturbācijas. Tas liek gaidīt daudz perturbētākas burbula astes plusmas struktūras nekā pie 30 *sccm*, kā tam arī vajadzētu būt.

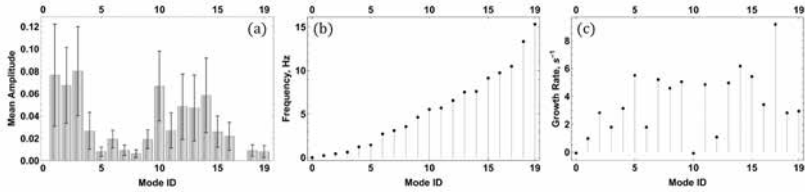


FIG. 121. 100 *sccm* ar bez ārēja ML: burbula ātruma lauka modas (a) normalizētas sākotnējās amplitūdas, (b) frekvences un (c) augšanas ātrumi.

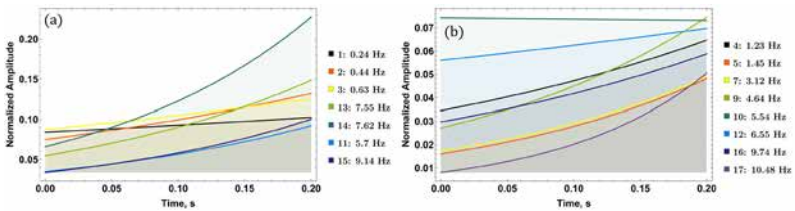


FIG. 122. 100 *sccm* bez ārēja ML: amplitūdas dinamika vidējā trajektorijas laikā nozīmīgām modām.

Ir arī interesanti redzēt, ka modu VK amplitūdu vērtības secīgās tra-

vektoriņās (Attēls 123), šķietami, parāda svārstību tendences piecām dominējošajām modām, kā arī 12. modai – rūpīga pārbaude liecina, ka tā patiešām ir, kā redzams Attēlā 124. Tas ir interesanti, jo rodas jautājums, kā šīs tendences ir saistītas ar trauka atskaites sistēma ātruma lauka modām. Ņemot vērā, ka DMD algoritma apstrādātās trajektorijas aptver plūsmas laiku  $\sim 5$  s un Attēlā 124 ievērojamu ekstrēmu frekvences, šķiet iespējams, ka aplūkotās burbuļa astes plūsmas modas tiek modulētas ar trauka plūsmas modām ar aptuveni  $< 1$  Hz frekvencēm – tas atbilstu 1. līdz 4. trauka atskaites sistēmas modām, kas ir visspēcīgākās pēc nultās trauka plūsmas modas (Attēls 87).

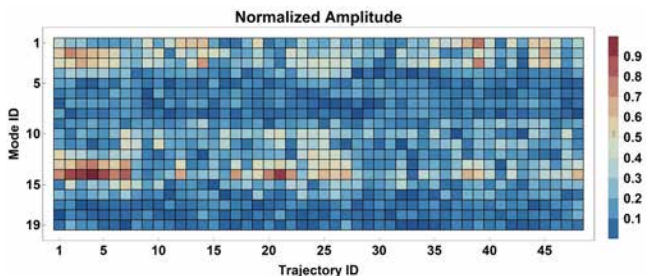


FIG. 123. 100 *sccm* bez ārēja ML: normalizētā vidējās kvadrātiskās amplitūdas (VK) modām visās apstrādātās trajektorijās.

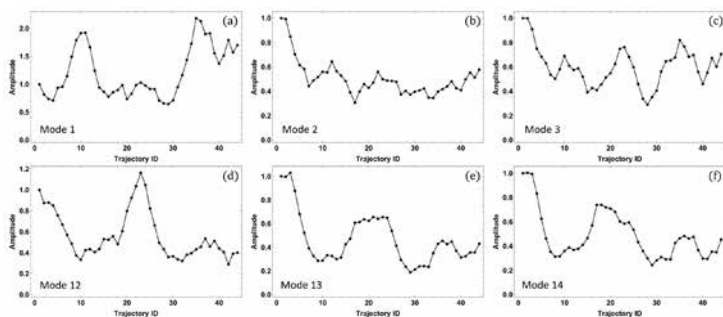


FIG. 124. 100 *sccm* bez ārēja ML: vidējota VK amplitūdu vēsture plūsmas laikā (trajektorijas ID) nozīmīgām burbuļa ātruma lauka modām. Vidējošana tika veikta ar 5 trajektoriju platumu: (a) 1. moda, (b) 2. moda, (c) 3. moda, (d) 12. moda (e) 13. moda, (f) 14. moda.

Ievērojamas burbuļa astes plūsmas modas pie 100 *sccm* ar ārēju ML ir redzamas Attēlos 125-131. Nultā moda, tāpat kā citos gadījumos, ir

stacionāra ( $f_0 \sim 6.6 \text{ mHz}$ ,  $a_0 \sim -6.2 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , Attēls 125) un tā nav tik asimetriska kā nultā moda pie 30 *sccm* (Attēls 113). Tai arī ir daudz attīstītāka burbuļa astes plūsma, kas ir sagaidāms.

14. moda ( $\omega_{14} \sim 7.6 \text{ Hz}$ ,  $a_{14} \sim 6.2 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 126) uzrāda ātruma lauka struktūras, kas atbilst burbuļa astes plūsmai, kad burbulis ir slīpi vērstas *XZ* plaknē [214], kur vienā astes plūsmas pusē veidojas stagnācijas zona, savukārt otrā pusē (*XZ* plaknē) tiek novērots lielāks ātrums. Vēl viens šī pieņēmuma arguments ir tāds, ka modas frekvence labi atbilst vidējai novērotajai trajektoriju svārstību frekvencei [214]. 13. modai ( $\omega_{13} \sim 7.5 \text{ Hz}$ ,  $a_{13} \sim 5.0 \text{ s}^{-1}$ ) ir nākamā augstākā VK amplitūda kopumā, taču šeit tā netiek parādīta, jo tās plūsmas struktūras ir ļoti līdzīgas 14. modai. Modas 13 un 14 ir ārkārtīgi cieši telpiski korelētas (korelācijas vērtība  $\sim 0.97$ ) un norāda, ka 13. moda var būt ar kompleksu fāzi nobīdīta 14. moda, it īpaši ņemot vērā, ka  $\omega_{14} \approx \omega_{13}$  [214].

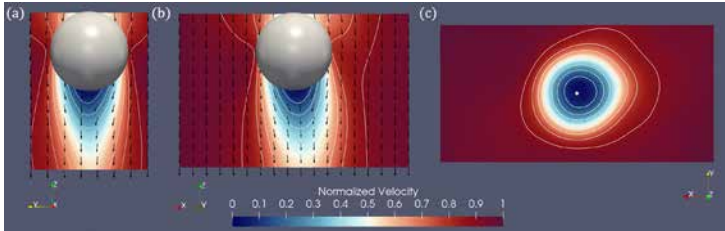


FIG. 125. 0. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

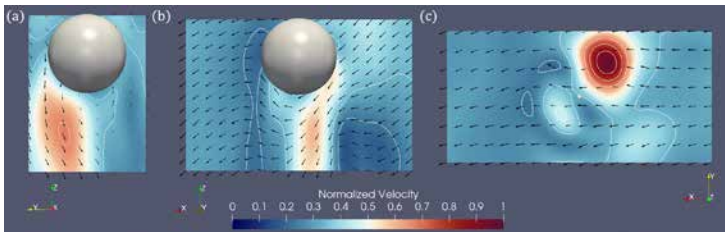


FIG. 126. 14. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

2. moda ( $f_2 \sim 0.45 \text{ Hz}$ ,  $a_2 \sim 2.8 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 127, pēc izskata, nav skaidri saistīta ar noteiktu impulsa pārnēsēšanas mehānismu burbuļa astes plūsmā, bet drīzāk parāda plūsmas svārstības, galvenokārt *XY* plaknē ar samērā zemu frekvenci. Arī 3. modu ( $f_3 \sim 0.63 \text{ Hz}$ ,  $a_3 \sim 1.8 \text{ s}^{-1}$ ) ir grūti interpretēt kā

skaidru fizikālu procesu, ko varētu sagaidīt burbuļa astes plūsmā, tā moda gan drīzāk parāda nesakārtotas zemas frekvences svārstības, galvenokārt  $Z$  virzienā, četru "strūklku" formā, kas ir redzamas Attēla 128c kā četři ātruma lauka maksimumi ar gandrīz nulles  $XY$  komponenti. Divas no tām "strūklām" ir daļēji novērotas Attēlos 128a un 128b. Ir jāņem vērā, ka modas 2 un 3 ir izteikti korelētas [214].

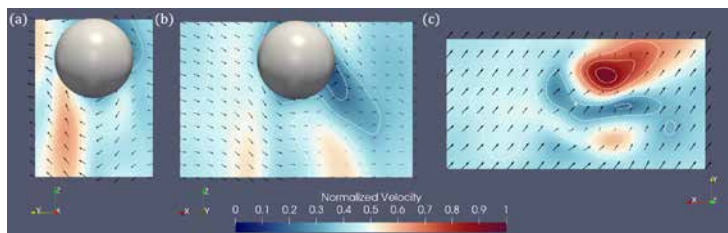


FIG. 127. 2. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a)  $YZ$  plakne, (b)  $XZ$  plakne un (c)  $XY$  plakne.

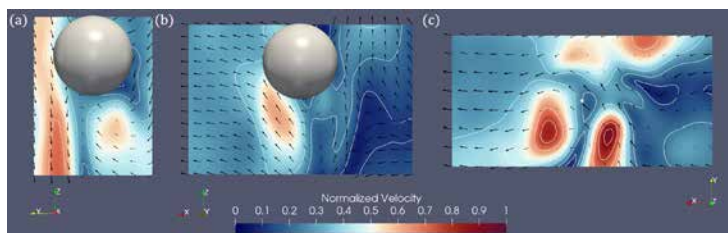


FIG. 128. 3. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a)  $YZ$  plakne, (b)  $XZ$  plakne un (c)  $XY$  plakne.

1. moda ( $f_1 \sim 0.23 \text{ Hz}$ ,  $a_2 \sim 1.0 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 129) veicina ātruma lauka svārstības  $Y$  virzienā ar samērā vāju  $Z$  komponenti, un plūsmas struktūras liek domāt, ka moda var būt saistīta ar burbuļa astes plūsmas svārstībām  $YZ$  plaknē. Tomēr nav skaidrs, kā tas izpaužas, ņemot vērā zemo modas frekvenci.

15. modai ( $f_{15} \sim 9.1 \text{ Hz}$ ,  $a_{15} \sim 5.4 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 130), no otras puses, ir gan laika mērogs, gan plūsmas lauks, kas atbilst burbuļa astes plūsmas svārstībām, kad burbulis periodiski maina slīpuma leņķi. Šī moda ir diezgan simetriska arī  $YZ$  plaknē, ātruma moduļa ziņā, (Attēls 130a) un parāda virpuļainas plūsmas struktūras  $XY$  plaknē (Attēls 130c). 11. moda ( $f_{11} \sim 5.7 \text{ Hz}$ ,  $a_{11} \sim 4.9 \text{ s}^{-1}$ , Attēls 131) ir interesanta ar to, ka tā gandrīz pilnībā parāda burbuļa plūsmas lauka svārstības  $X$  virzienā ar

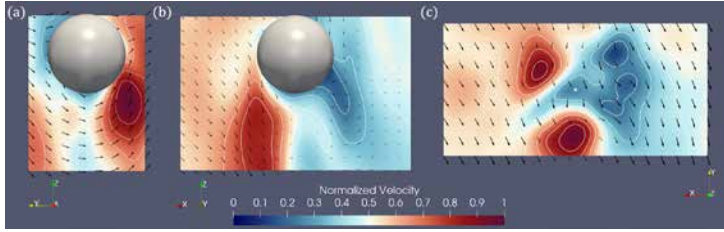


FIG. 129. 1. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

asimetrisku ātruma maksimumu, kas atrodas tieši virs (Attēls 131b) zonas, kurā ir paredzams, ka veidosies burbuļa astes plūsmas virpuļš [214]. Šīs modas frekvence ir diapazonā, kurā moda varētu būt atbildīga par virpuļu atrašanās ietekmēšanu, ar ātruma pulsācijām *X* virzienā. 11. moda arī ir diezgan simetriska *YZ* plaknē.

Citu zīmīgo modu starpā ir 12. ( $f_{12} \sim 5.7 \text{ Hz}$ ,  $a_{12} \sim 4.9 \text{ s}^{-1}$ ), kas, plūsmas lauka struktūrā, ir nedaudz līdzīga 8. modai pie 100 *sccm* ar ārēju ML (Attēls 104), bet ar attīstītāku burbuļa astes plūsmu. 9. modas ( $f_9 \sim 4.6 \text{ Hz}$ ,  $a_9 \sim 5.1 \text{ s}^{-1}$ ) ātruma lauks atgādina 7. modu pie 30 *sccm*, ja nav ārēja ML (Attēls 115), bet ar daudz izteiktākām ātruma maksimumu zonām zem burbuļa, kas ir iegarenas *Z* virzienā, un, kopumā, lielāku *Y* komponenti. 10. moda ( $f_{10} \sim 5.5 \text{ Hz}$ ,  $a_{10} \sim -7.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) savukārt ļoti atgādina modas 2, 13 un 14 šim pašam gadījumam, un ir nedaudz korelēta ar visām trim [214]. 16. moda ( $f_{16} \sim 9.7 \text{ Hz}$ ,  $a_{16} \sim 3.4 \text{ s}^{-1}$ ) būtībā ir 15. moda, bet ar mazāku VK amplitūdu un nedaudz lielāku frekvenci ( $f_{15} \sim 9.1 \text{ Hz}$ ). Ir svarīgi ņemt vērā, ka modas 15 un 16 ir ļoti korelētas [214].

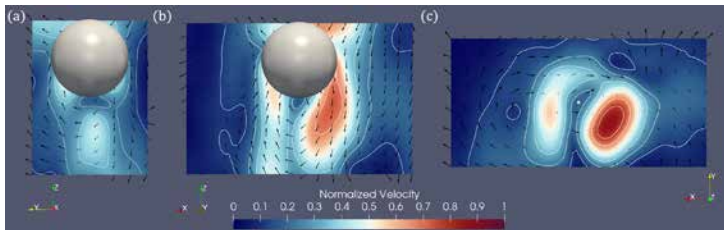


FIG. 130. 15. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

Vel ir jāpiemin, ka, kaut arī dažas no modām pie 100 *sccm* bez ML

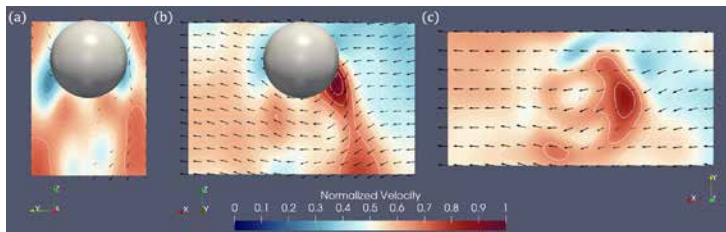


FIG. 131. 11. moda burbuļa ātruma laukam pie 100 *sccm* bez ārēja ML: (a) *YZ* plakne, (b) *XZ* plakne un (c) *XY* plakne.

ir fiziski interpretējamās, vismaz hipotētiski, tās ir ļoti grūti attiecināt uz noteiktām trajektoriju iezīmēm [214]. Lai gan varētu apgalvot, ka dažas sākotnējās trajektorijas var izskaidrot ar 10., 13. un 14. modu sākotnējo dominanci, kas atbilstu svārstībām, kas ir redzamas *XY* burbuļu trajektoriju projekcijās, vēlākas trajektorijas ir ļoti nesakārtotas, dažas bez skaidri saskatāmiem struktūrām, un tāpēc ir ļoti grūti piešķirt specifiskas modas novērotajai uzvedībai [214]. Kaut arī dažas, šķietami nejaušas, trajektoriju perturbācijas varētu būt saistītas ar dažu galveno modu VK amplitūdu svārstībām (Attēls 124), pašlaik nav skaidrs, cik lielā mērā. Apkopojot modu korelācijas, starp modām ir šādas saistības:  $14 \leftrightarrow (2, 13)$ ,  $2 \leftrightarrow (3, 14)$ ,  $11 \leftrightarrow (1, 9)$ ,  $15 \leftrightarrow (1, 9, 16)$  [214].

#### 4. Kopsavilkums

Ar iepriekšminētajiem rezultātiem ir parādīta pirmā veiksmīga SDM pielietošana burbuļu plūsmā ar izšķirtām dinamiskām šķidrums/gāzes robežām – konkrēti, SDM tika izmantots skaitlisko simulāciju izvidei sistēmai, kurā burbuļu ķēdes paceļas taisnstūrveida šķērsriezuma šķidrā metāla traukā. Tika izpētīts, kā gāzes plūsmas ātrums un pielietotais ML ietekmē ātruma lauka dinamiskās modas. Tas tika darīts gan metāla tilpuma mērogā, gan burbuļa astes plūsmas mērogā, un šīs koncepcijas pierādījuma pētījuma rezultāti liecina, ka SDM patiešām ir ļoti perspektīvs rīks, kas var sniegt unikālu ieskatu dažādos impulsa pārnese un burbuļu mijiedarbības mehānismos (tostarp to, kā mijiedarbojas procesi dažādos telpiskos un laika mērogos). SDM analīzi var izmantot, lai izskaidrotu novērotās plūsmas struktūras. Daudz detalizētāks rezultātu kopsavilkums un to fiziskā interpretācija ir sniegti [214].



SDM ļāva novērot vidējās plūsmas simetrijas izmaiņas/sabrukšanu modeļu sistēmās un to izraisīšanas veidu: tika konstatēts, ka plūsmas lauki ir ļoti jutīgi pret ML asimetriju, un nestabilitāte var rasties pat pie mazākiem gāzes plūsmas ātrumiem, pat ja ML mēdz stabilizēt plūsmu kopumā.

SDM modas, kas atbilst burbuļu ķēdei, atklāj svārstību frekvences un astes plūsmas zonas mērogu, kā arī ļauj izmērīt ķēdes koherences garumu, kas ir ķēdes plūsmas stabilitātes mērs.

Novērojot burbuļa astes plūsmas SDM modas burbuļa atskaites sistēmā, var sadalīt dinamiku dažādos impulsa pārnesanas mehānismos. Salīdzinot relatīvo modu amplitūdu un frekvenču statistiku un dinamiku, var secināt, kā astes plūsma ietekmē globālos plūsmas laukus un otrādi – konkrēti, novērojumi liecina, ka plūsmas nestabilitāte un simetrijas sabrukšana izceļas mazos mērogos, iespējams astes plūsmas zonā, un izplatās uz lielākiem mērogiem; ar lielāku telpisko izšķirtspēju SDM varētu skaidri parādīt, kā tas notiek.

Veicot augstākas izšķirtspējas simulācijas (gan telpiski, gan laikā), SDM varētu izmantot arī lai pētītu turbulentas plūsmas struktūras, kas veidojas, attīstoties burbuļu ķēdes plūsmai. Turklāt ar smalkākiem režģiem varētu viegli izpētīt, kā ML ietekmē burbuļu formas dinamiku – konkrēti, kādus virsmas perturbāciju viļņu garumus ML ietekmē visvairāk un kā.

Izstrādātais SDM kods ir gan noturīgs pret trokšņiem, gan atmiņas taupošs, un tas ir pieejams *GitHub*: MartinKleivs/PyDMD. Jaunieviesto klašu nosaukumi sākas ar *mosesdmd*, un visi izmanto ieviesto MOSES-SVD — tā implementāciju var atrast arī *GitHub*: MartinKleivs/MOSES-SVD.

## G. Metāla sakausējuma virzītas sacietēšanas rentgenstaru radiogrāfija

Ērta un pietiekami vispārīga "viss vienā" risinājuma trūkums ir motivācija prezentēt pirmo atvērtā koda versiju, kas izstrādāta, lai automātiski analizētu virzītas sacietēšanas procesu dinamiskās RR attēlus, kuri iegūti, pētot Hele-Šova šūnas. Pašreizējā versijā vēl nav integrēta optiskās plūsmas komponente (piemēram, kods, kas izmantots [142]), taču citādi tā atbilst iepriekš minētajām analīzes funkcionalitātes prasībām. Turklāt kods tika izstrādāts, lai nodrošinātu plašu pielietojamību un ir diezgan izturīgs pret attēla trokšņiem un zemu STA/KTA. Izmantotās pieejas attēlu un datu apstrādei apvieno gan ļabi zināmos pēdējos sasniegumus attēlu apstrādē, gan oriģinālās metodes, īpaši sacietēto struktūru segmentēšanai un dendrītu graudu (klasteru) analīzei. Kodā ieviestās metodoloģijas veikspēja ir demonstrēta, izmantojot datus no *in situ* RR eksperimentiem ar gallija-indija (GaIn) sakausējumu [54, 59].

### 1. Attēlu raksturojums

Visi šeit izmantotie attēli tika iegūti HZDR rentgenstaru laboratorijā. Attēli Hele-Šova sakausējuma šūna ar izmēriem  $35\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 0,15\text{ mm}$  tika uzņemti ar ātrumu 1 kadrs sekundē, ar ekspozīcijas laiku 1 s. Attēlveidošanas sistēmā tika izmantota *Phoenix X-ray XS225D-OEM* rentgenstaru caurule, un tā ir sīkāk aprakstīta [46, 53, 54, 59, 64]. Katram attēla secības ierakstam tika reģistrēti tumšās strāvas signāli un rentgenstaru stara profila signāli turpmākai attēla korekcijai un normalizēšanai priekšapstrādes laikā. Katrai sistēmas parametru kopai tika veikti atkārtoti ieraksti, lai nodrošinātu rezultātu reproducējamību, kā arī lai nodrošinātu datu rezervi. Attēli ir 16 bitu pelēktoņu TIFF, un FOV attēla izmērs parasti ir  $\sim 760 \times 576\text{ px}$ , ar pikseļu izmēru [13, 7; 37, 6]  $\mu\text{m}$  (faktiskais attēla izmērs dažādās attēlu secībās atšķiras robežu apgrīšanas dēļ). Attēls 132 ir iegūta dendrītu izauguma attēla piemērs sacietējošā GaIn sakausējumā [54, 59].

Lai vienkāršotu turpmāko aprakstu un analīzi, ir svarīgi vismaz neformāli definēt galvenās attēlu pazīmes. Attēlā 132 var redzēt *sacietēšanas frontes* (SF) kontūru ar melnu pārtrauktu līkni. Šeit SF tiek definēta kā kontūra FOV reģionam ar sacietējušām struktūrām. Tālāk tiks sniegta precīzāka *operatīva* definīcija attēlu apstrādes kontekstā. Reģions (vai vairāki), kas satur sacietētas struktūras, ko norobežo SF, ir *cieta zona* (CZ). Šajā zonā var būt arī šķidrums *dobumi*, kas izolēti no lielapjoma šķidrums, un *kanāli*, kas ir savienoti ar šķidrumu virs SF – piemēram, viens šāds kanāls vēlāk

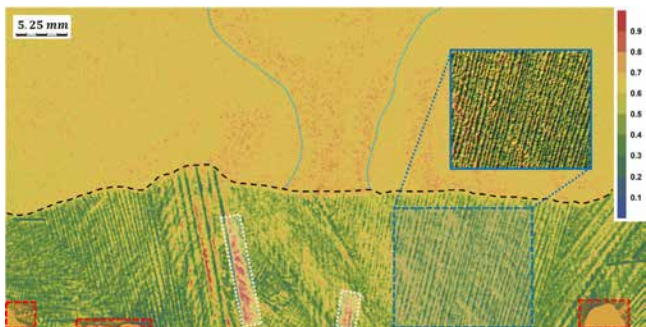


FIG. 132. Tipisks (viltus krāsu) FOV vienā no RR eksperimentiem, pēc pirmapstrādes. Melnā punktētā līkne ir aptuvenš sacietēšanas frontes kontūrs. Gaiši zilā punktētā līnija norāda vienu no konvektīvajām "spalvas" veida plūsmas struktūrām. Iekšfrontes (slēgtie) šķidrā metāla dobumi ir izcelti ar baltiem svītrotiem rāmjiem. Attēla artefakti ir izcelti ar sarkaniem svītrotiem rāmjiem FOV apakšā. Tumši zils svītrots rāmis norāda apgabalu, kas pieder vienam no izveidotajiem dendrīta graudiem – apakšattēls tumši zilā rāmī parāda tā reljefu, vizuālai skaidrībai. Gan viltus krāsu FOV attēlam, gan reljefa attēlam ir vienāda krāsu skala (krāsu josla pa labi) un mērogs (augšējais kreisais stūris).

veidosies no lielākā no slēgtajiem šķidrums dobumiem, kas iezīmēti Attēlā 132. Tādējādi *šķidrā zona* (SZ) ir starpība starp FOV un CZ, atskaitot dobumus un kanālus. Šīs definīcijas tiks izmantotas visā šī kopsavilkuma daļā.

Attēlos ir novērojams Puasona (multiplikatīvs) troksnis, kā arī *salt & pepper* troksnis, ko izraisa īslaicīgi pāreksponēti vai nereagējoši ("mirušie") kameras pikseli. Rentgenstaru plūsma FOV ietvaos ir nevienmērīga, un iegūto attēlu malu tuvumā ir tās kritums. KTA atšķiras SZ un CZ. Konvektīvā slāņa KTA SZ sākotnēji ir diezgan laba, bet parasti laika gaitā pasliktinās, palielinoties šūnas *cietvielas aizpildīšanas faktoram* (CAF, CZ laukuma attiecība pret FOV laukumu) — tas ir tāpēc, ka izšķīdušā viela tiek izspiesta virs SF, SZ tiek piesātināta, un kontrasts starp šķidrā sakausējuma komponentēm samazinās. Turklāt KTA CZ var arī atšķirties atkarībā no attēla, jo ir arī izšķīdušās vielas plūsma pāri sacietējušajam struktūrām, kura potenciāli tās daļēji aizklāj. CZ struktūrām STA parasti ir adekvkvāta, bet tā ir diezgan zema konvekcijas spalvām SZ. Turklāt dažiem attēliem var būt lielāka mēroga artefakti, piemēram, kā parādīts Attēlā 132 ar sarkaniem svītrotiem rāmjiem. Šajā gadījumā artefakti ir vietas, kur divas paralēlas Hele-Šova šūnu sienas tika sakausētas kopā hermetizācijas nolūkos.

## 2. Metodoloģija

### a. Pieņēmumi un apsvērumi

Izstrādātajam attēlu apstrādes kodam ir jāļauj padziļināti analizēt gan SZ, gan CZ laika gaitā, kā arī ar SF evolūciju saistīto dinamiku. Tāpēc mērķi ir šādi: segmentēt SZ un CZ; noteikt SF; identificēt kanālus, kas savienoti ar SZ, kā arī šķidrums dobumus CZ; segmentēt konvektīvas spalvas SZ ietvaros formas analīzei; atgūt CZ robežās esošo struktūru skeletus (šajā gadījumā dendritus); veikt orientācijas analīzi SZ ietvaros identificētajam struktūrām; sadalīt CZ struktūras domēnos (*graudos*) pēc orientācijas un savienojamības; izmērīt izšķīdušās vielas koncentrāciju SF tuvumā.

Par attēliem un fizisko sistēmu tiek veikti šādi pieņēmumi. Apstrādājot CZ, troksnis tiek uzskatīts par baltu Gausa tipa. Tas ir tāpēc, ka pēc priekšapstrādes attēla spilgtums pārāk daudz nemainās mērogos, kas ir daudz lielāki par dendrīta biezumu un atstatumu starp dendrītiem (Attēls 132). Tas ir pretstatā SZ, salīdzinot spilgtuma sadalījumu tumši zilā svītrotajā rāmī ar spilgtuma sadalījumu virs SF. Pastāvīgi lielāka mēroga artefakti (t.i., tie nav pikseli ar anomālām spilgtuma vērtībām) attēlos, ja tādi ir, laika gaitā tiek uzskatīti par nekustīgiem. Dendrītiem CZ ir lineāras vai tikai nedaudz izliektas formas, un tie var pārklāties attēlveidošanas plāknē, un tādējādi to RR projekcijas var krustoties.

Nemot vērā iepriekš minēto, metožu izvēli nosaka šādi apsvērumi. Pikseļu izmērs ir ievērojama daļa no dendrīta platuma, tāpēc ir jābūt uzmanīgiem, mēģinot noņemt troksni no dendrītiem. Tajā pašā laikā, tekstūras CZ ir diezgan smalkas — dendrītu atstatumi ir aptuveni tādā pašā mērogā kā dendrīta platums. STA ir tāda, ka metodes, kas nav pret tekstūrām/morfoloģiju adaptīvas, nevar nodrošināt apmierinošu nedestruktīvu trokšņa samazināšanu. Šķidrums plūsma pāri dendrītiem darbojas kā korelēts troksnis, ja mēģina atgūt dendrītu morfoloģiju. Tas vēl vairāk sarežģī CZ analīzi — šīs problēmas risināšana kopā ar Gausa troksni, kas izriet no nepietiekamas ekspozīcijas, nesniedz pietiekami labus rezultātus, un ir nepieciešama atsevišķa pieeja. Lai gan KTA pie SF ir diezgan augsts piemērs, kas redzams Attēlā 132, citos gadījumos SF nav tik gluda, ir ar mazāku kontrastu, un šķidrums dobumu un kanālu segmentēšana var būt vēl grūtāka. Tātad ir nepieciešami īpaši filtri, lai ievērojami palielinātu šķidrums/cietās fāzes robežas KTA pirms CZ/SZ segmentācijas. Segmentācijas metodei CZ/SZ atdalīšanai ir jādarbojas droši ar potenciāli mainīgu attēla kvalitāti: rentgenstaru lampas radītais stars var mirgot un tam ir nevienmērīga intensitāte; CAF palielināšanās un izšķīdušās vielas izmešana šķīdumā virs SF spēcīgi maina attēla spilgtuma sadalījumu gan lokāli, gan globāli. Izmantotai segmentācijas metodei

ir šie efekti jāmodelē. Metodes, ko izmanto SZ trokšņa samazināšanai, nedrīkst pārmērīgi deformēt vai izmēret konvektīvo spalvu formas, taču trokšņa slāpēšana šeit ir daudz mazāk ierobežota nekā CZ. Attēlu kvalitāte dažādos eksperimentos un attēlu secībās, ko izmanto autors un ieguvuši citi pētnieki, ļoti atšķiras — tāpēc ir vērts izstrādāt kodu, kas ir adaptīvs un var darboties nelabvēlīgos apstākļos, kas, iespējams, ir daudz sliktāks nekā tas, kas redzams Attēlā 132. Šāds kods ar daudziem komponentiem un metodēm neizbēgami būs ar diezgan lielu parametru skaitu – tiem jābūt vai nu galvenokārt fiksētiem/vispārīgiem, vai arī ātri optimizējamiem.

Attēlu apstrāde tiek organizēta pa posmiem, kā norādīts Algoritmā 13.

### b Priekšapstrāde

Attēla priekšapstrāde tiek veikta *ImageJ*, un soļi ir norādīti [223]. Procedūra ietver TSK un PLK, tāpat kā burbuļu plūsmas NR un RR attēliem. PLK procedūra rada STA telpisko atkarību. Pēc priekšapstrādes attēli tiek normalizēti un saglabāti, pēc tam tiek nodoti *Wolfram Mathematica* tālākai apstrādei.

### c Šķidrās/cietās zonu atdalīšana

Dažreiz attēlos joprojām būs artefakti pat pēc apgriešanas un priekšapstrādes (piemēram, kā Attēlā 132). Lai gan PLK nodrošina, ka šādi artefakti vairs nav ievērojamas spilguma anomālijas, šie attēla apgabali joprojām būtiski ietekmē spilgtuma histogrammas un var traucēt attēla filtrēšanu un segmentēšanu. Tāpēc tiek izmantota procedūra, kas identificē un noņem šos defektus, t.i., padara to apgabalus savietojamus ar apkārtējām attēla tekstūrām/fonu. Artefakta maska attēlu secībai tiek iegūta, kā aprakstīts Algoritmā 14.

Jāņem vērā, ka tumšus artefaktus var noteikt, izmantojot identisku procedūru, kas tiek piemērota apgrieztam attēlam. Tiek veikta morfoloģiskā paplašināšanās, izmantojot diska strukturālos elementus [165], lai artefakta maskai būtu drošības buferis. Pēdējais ir nepieciešams uz tekstūras sintēzi balstītai aizpildīšanai, lai pareizi aizpildītu artefaktu zonas, izmantojot paraugus no blakus esošajām tekstūrām, kas atrodas pietiekami tālu no artefaktiem. Parametri ir sniegti [223].

Pirms segmentācijas tiek veikta attēla filtrēšana, lai palielinātu KTA SZ/CZ robežām, ieskaitot šķidrums dobumus (tiem KTA mēdz būt īpaši zems) un kanālus. Šeit filtri tika izmantoti tā, lai tie arī noņemtu dendrītu struktūras, vienlaikus saglabājot lielāka mēroga šķidrums zonas un lielākas atstarpes starp dendrītiem, kas ir piepildīti ar šķidrumu. Tika noņemts *block-matching 3D* (BM3D) filtrēšanu [224–227], jo, atšķirībā no citiem

---

**Algorithm 13:** Attēlu apstrādes metodoloģijas kopējā struktūra

---

**Ievade:** Neapstrādāta attēlu sekvenca

- 1 Attēlu priekšapstrāde
- 2 Artefaktu noņemšana (Algoritms 14)
- 3 CZ segmentācija (Sadaļa II G 2 c & Algoritms 15)
- 4 Identificē kanālus, kas savienoti ar SZ, un arī šķidruma dobumus irkš CZ (Algoritms 16)
- 5 Nosaka SF un segmentē SZ (Algoritms 16)
- 6 Atgūst struktūru skeletus (šajā gadījumā dendrītus) CZ ietvaros (Algoritmi 17, 18 & 19)
- 7 Veic orientāciju analīzi struktūrām, kuras tika identificētas SZ (Algoritmi 20 & 21)
- 8 Sadala CZ struktūras apakšdomēnos (*graudos*) pēc orientācijas un savienojamības (Algoritmi 20 & 21)
- 9 Izmēra šķīduma koncentrāciju virs SF (Algoritms 22)
- 10 Segmentē konvektīvos spalvus SZ ietvaros to formas analīzei (Algoritms 23)

**Izvade:**

- SF forma, augstuma sadalījums un augšanas ātrums laika gaitā
  - Šķīduma koncentrācijas dinamika SF tuvumā
  - Konvektīvo spalvu formas dinamika SZ
  - Dendrītu struktūru kartes ar apzīmētiem elementiem
  - Dendrītu orientāciju spektri CZ
  - Dendrītu orientāciju spektri and relatīvie platumi graudiem (domēniem), kuri tika identificēti CZ
- 

---

**Algorithm 14:** Artefaktu noņemšana priekšapstrādātiem attēliem

---

**Ievade:**

- Vidējoti fona (etalona) attēli
  - Priekšapstrādāto attēlu sekvenca
- 1 Artefaktu masla: binarizācija (iespējams, vaicākos etapos) ar lietotāja definētu sliekšni vai citu piemērotu metodi (piemēram, Otsu [166])
  - 2 Morfoloģiskā paplašināšanās
  - 3 Artefaktu noņemšana, izmantojot uz tekstūras sintēzi balstītu aizpildīšanu [190]

**Izvade:** Attēli bez artefaktiem

---

pārbaudītajiem risinājumiem, tas konsekventi labi saglabāja CZ formu, un arī ievērojami palielināja kanālu un dobumu KTA CZ robežās.

Attēlu filtrēšana tiek veikta divos posmos. Pirmkārt, tiek izmantots BM3D. Tā pamati un skaidrojums par to, kāpēc tiek izmantota noteikta BM3D versija, ir izklāstīti [223], un padziļināts apraksts par BM3D uzbūvi

un darbību ir atrodams [224–227]. Tiek izmantota Tamperes Tehnoloģiju universitātes jaunākā *MATLAB* implementācija (pieejama arī Python versija), kas ir balstīta uz [227]. Tā ir integrēta *Wolfram Mathematica* kodā, izmantojot *MATLink* nepārtrauktai attēlu apstrādes procedūras veikšanai. Otrais filtrēšanas posms ir NV filtrs [170, 171], ko izmanto, lai mazinātu visus pāri palikušos un/vai BM3D izveidotos artefaktus, un vēl vairāk palielinātu KTA SF, dobumiem un kanāliem CZ. NV var uzskatīt par BM3D vienkāršotu/prekursoru versiju. BM3D un NV filtru [172] iestatīšana ir izskaidrota [223].

Neskatoties uz ievērojamiem STA un KTA uzlabojumiem pēc filtrēšanas (Sadaļa II G 2 c), segmentēšana joprojām ir izaicinājums, jo PLK procedūra nekad nav ideāla, un dēļ telpiski mainīga STA un KTA, kā arī pateicoties rentgenstaru kūļa nestabilitātēm, ļoti mainīgiem CAF un izšķīdušo vielu koncentrācijai SZ laika gaitā. Turklāt notiek arī dobumu un kanālu veidošanās, augšana/sarūkšana un izzušana. Testi liecina, ka (vismaz apskatītajos gadījumos) globālās segmentācijas metodes, pat gana kompleksas, nespēj stabili un precīzi noteikt CZ visā attēlu secībā, kas parasti sākas bez CZ un, iespējams, beidzas ar  $CAF \approx 1$ . Tāpēc ir pieņemts empīrisks "fizikā balstīts" modelis, kas aprēķina adaptīvo binarizācijas sliekšni filtrētajiem attēliem. Segmentēšanas darbības ir apkopotas Algoritmā 15.

---

### Algorithm 15: CZ segmentācija

---

**Ievade:**

- Neapstrādāto attēlu sekvenca
  - Filtrēto attēlu sekvenca (Sadaļa II G 2 c)
- 1 (Pēc izvēles) Neapstrādātajiem attēliem pielieto Gausa/vidējošanas filtrēšanu
  - 2 Aprēķina vidējo inverso spilgtumu (VIS) neapstrādātajiem attēliem
  - 3 (Pēc izvēles) Filtrē VIS laukrindus
  - 4 Aprēķina uz VIS balstīta adaptīvā sliekšņa laukrindus (39)
  - 5 Segmentē CZ no filtrētajiem (t.i., pēc BM3D un NV) attēliem, izmantojot adaptīvo sliekšni

**Izvade:** CZ maskas visai attēlu sekvencai

---

Tiek izmantota sākotnējā *neapstrādāto* attēlu sekvenca, jo ir vēlams ņemt vērā arī stara perturbācijas. Vispirms, pēc izvēles, var izmantot maza rādiusa vidējošanas/Gausa filtrēšanu, lai mazinātu *salt & pepper* troksni. Pēc tam tiek aprēķināts vidējais inversais spilgtums (VIS)  $\langle 1 - I(t) \rangle$  visiem (normalizētajiem) attēliem sekvencē, kur  $t$  ir laika/kadra indekss. Lai izvairītos no adaptīvā sliekšņa pārmērīgas pielāgošanas VIS laukrindai, tā (pēc izvēles) tiek filtrēta, izmantojot Gausa TV filtru [228]. Adaptīvais sliekšnis  $\tau(t)$  attēliem no VIS tiek aprēķināts šādi:

$$\tau(t) = 1 - C_1 \cdot f_1(t) \cdot f_2^p(t); \quad \underbrace{f_1(t) = L_{TV}\langle 1 - I(t) \rangle}_{\text{CAF korekcija}}; \\ \underbrace{f_2(t) = (g_1 \circ g_2)(C_2 + 1 - f_1(t))}_{\text{SZ piesātinājuma korekcija}} \quad (39)$$

kur  $g_1(X) = X/\min(X)$ ,  $g_2(X) = X/\max(X)$ ,  $X(t)$  ir laikrinda,  $C_1 > 0$ ,  $C_2 \geq 0$ ,  $p \in \mathbb{R}$  un  $L_{TV}$  ir TV filtrēšana, kas tiek pielietota (ja nepieciešams) VIS laikrindām.

Sliekšņa adaptīvā daļa sastāv no diviem ieguldījumiem:  $f_1(t)$  un  $f_2(t)$ , kur  $f_1(t)$  ir piesaistīts CAF — jo lielāks CAF, jo lielāks ir VIS, jo CZ vājina rentgenstaru ievērojami intensīvāk nekā SZ;  $f_2(t)$  ir korekcija, kuras pamatā ir  $f_1(t)$ , un ņem vērā to, ka, palielinoties CAF, izšķīdinātā viela tiek izstumta no CZ un SZ kļūst ievērojami piesātinātāka. Gan  $f_1(t)$ , gan  $f_2(t)$  arī ietver momentānās globālās apgaismojuma izmaiņas, ko varētu radīt rentgenstaru kuļa mirgošana. Turklāt  $f_2(t)$  ir ļoti svarīga loma gadījumos, kad plūsma SZ strauji pāriet starp dabiskās un piespiedu konvekcijas režīmiem (piemēram, ārējā ML ietekmē), jo šīm pārejām atbilst būtiskas SZ spilgtuma izmaiņas. CZ tiek segmentēta, binarizējot apgrieztos filtrētos attēlus ar attiecīgiem sliekšņiem  $\tau(t)$ . Šeit aplūkotajos gadījumos tika nolemts pirms VIS aprēķināšanas neapstrādātajam attēlam neveikt Gausa/mediānas priekšfiltrēšanu. TV filtrēšana tiek veikta VIS laikrindām [164, 228], lai izvairītos no pārmērīgas pielāgošanas attēliem. Parametri  $C_1$ ,  $C_2$  un  $p$  pie  $\tau(t)$  var diezgan būtiski atšķirties dažādos gadījumos, tāpēc tie ir sniegti katram aplūkotajam piemēram [223]. Tomēr ir vispārīga stratēģija šo parametru ātrai optimizēšanai, kas arī ir dota [223].  $f_2(t)$  (39) ir izstrādāta tā, lai sliekšnis  $\tau(t)$  būtu stingrāks lielākam CAF — tas ir tāpēc, ka atšķiras spilgtums starp CZ un SZ sākotnējās sacietēšanas stadijās ir daudz zemāks nekā tad, kad šūna ar sakausējumu ir gandrīz pilnībā piepildīta ar cieto fāzi. Tas ir saistīts ar faktu, ka lielu daļu CZ sākotnēji caurstrāvo izšķīdušas vielas, kas vēlāk tiek izvadītas SZ.

Pēc tam tiek identificēti šķidrums dobumi un kanāli, noteikta SF un segmentēta SZ — ar to saistītās darbības ir aprakstītas Algoritmā 16. 1. Solis generē CZ masku, kurā nav ietverti artefaktu aizņemtie apgabali — šī ir maska, kas tiek izmantota dendrīta struktūras analīzei Sadaļā II G 2 d. Pēc tam 2. Solī tiek iegūta šķidrās fāzes maska. Attēla ierāmēšana ar 0 spilgtuma vērtības pikseliem 3. Solī tiek veikta, jo dobumiem var būt arī robeža FOV apakšā un sānos. Augšējā robeža nav ierāmēta, jo, tiklīdz SF ir šķērsojis FOV augšdaļu, nav iespējams atšķirt dobumus FOV augšdaļā no kanāliem. Tādā veidā robežkomponentu noņemšana apstrādātajās maskās atstāj tikai dobumus. No 4. līdz 9. Soliem tiek



aizpildīti un izslēgti no šķidrās fāzes maskas detektētie dobumi (4. Solis), un, ja nepieciešams, var arī noņemt CZ segmentācijas artefaktus (ja tādi ir; 5. Solis); aizvēršanas transformācija [165] (6. darbība) tiek veikta, izmantojot diska strukturēšanas elementus, lai noņemtu binārās maskas nelīdzenumus. Nelīdzenumi ar garuma mērogu zem lietotāja definētā diska elementa izmēra tiek aizpildīti konformi maskas robežai; aizpildīšanas transformācija [157] (7. Solis) pabeidz kanālu aizpildīšanu visur, kur tā pēc aizvēršanas bija nepilnīga; 8. un 9. Soli izdala kanālus kā atšķirības starp 7. Soli izvadi un maskām pēc dobumu aizpildīšanas, vienlaikus noņemot maza mēroga segmentus, kas fiziski neatbilst kanāliem, t.i., ir pārāk mazi, lai tos klasificētu kā tādus, vai vienkārši ir artefakti. Lai segmentētu SZ, maskām ar aizpildītiem kanāliem un dobumiem tiek pievienoti artefaktu segmenti ārpus CZ (10.–13. Soli). SF tiek iegūts, SZ maskai piemērojot Canny malu detektēšanas metodi [229]. Pēc tam SF tiek izlīdzināta ar maza rādiusa Gausa filtru, lai novērstu iepriekšējo darbību radītos trokšņus, pēc kā tiek izmantota Otsu binarizācija [166] un retināšanas transformācija [157], ko veic tā, lai SF būtu tieši 1 *px* biezs. Fizika, ko var atgūt no SF stāvokļu secības laika gaitā, ir parādīta tālāk Sadaļā II G 3. Parametri attēlu apstrādei ir norādīti [223].

#### d Cietās zonas analīze

Kad CZ ir segmentēta, var turpināt CZ sacietējušo struktūru analīzi. Tā kā lokālās tekstūras parasti ļoti atšķiras visā CZ, tāpat kā to KTA, tika nolemts sadalīt FOV attēlu vairākos nodalījumos, lai noteiktu, kuros no tiem ir pietiekami daudz CZ nozīmīgai analīzei (*skenēšanas reģioni*), un veikt lokālo filtrēšanu un atgūt CZ struktūru/morfoloģiju. Šī procedūra ir detalizēti aprakstīta Algoritmā 17.

Priekšapstrādātie attēli tiek sadalīti kvadrātveida reģionu režģī. To ģenerēšana ir izskaidrota [223]. Kad attēli ir sadalīti, CZ maskas tiek sadalītas tādā pašā veidā, t.i., attēlu un masku reģioni ar identiskiem attēla pozīcijas indeksiem (piešķirti visiem reģioniem) atbilst pēc pikseliem. Daži reģioni, īpaši attēliem, kas atrodas tuvu secības sākumam, lielākoties tiks piepildīti ar šķidrumu, un tāpēc tie nav piemēroti cietās struktūras analīzei. Identificējot reģionus, kuros meklēt cietas struktūras, tiek ietaupīts ievērojams skaitļošanas laiks. Lai noteiktu reģionus, kuros atrodas ievērojams daudzums cietās fāzes, CAF tiek aprēķināts katram no tiem, izmantojot CZ maskas reģionus. Reģioni, kuru CAF pārsniedz lietotāja definēto sliekšni  $\epsilon_{CAF}$ , tiek apzīmēti kā *skenēšanas reģioni*, un tiek nodoti Algoritmam 18 turpmākai analīzei. Iegaumētie reģionu attēlu pozīcijas indeksi vēlāk tiks izmantoti FOV attēla rekonstrukcijai.

Šeit stratēģija ir izmantot BM3D, lai pēc iespējas nedestruktīvāk filtrētu

---

**Algorithm 16:** SZ, dobumu un kanālu atdalīšana & SF noteikšana

---

**Ievade:** CZ maskas visai attēlu sekvencai (Algoritms 15)

*CZ & šķidrās fāzes masku iegūšana, bez artefaktiem*

- 1 CZ: sareizina CZ maskas ar apgriezto artefaktu masku
- 2 Šķidrā fāze: invertē rezultātu un sareizina ar apgriezto artefaktu masku

*Dobumu & kanālu segmentācija*

- 3 Dobumi: pielieto  $1-p_x$  attēla ierāmēšanu (pikseļu vērtības 0, visām attēla malām, izņemot augšu) 2. Soļa izvadei, noņem robežu komponentes, tad noņem ieviesto attēla rāmi
- 4 Atņem dobuma maskas no atbilstošajām šķidrās fāzes maskām (2. Solis) un invertē iegūtos attēlus
- 5 (Pēc izvēles) Rezultējošām maskām pielieto segmentu izmēra filtru
- 6 Invertē maskas, pielieto aizvēršanas transformāciju
- 7 Pielieto aizpildīšanas transformāciju, rezultātu invertē
- 8 No 7. Soļa rezultāta atņem starpību *tam* un tā versijai pēc segmentu filtrēšanas pēc izmēra
- 9 Kanāli: atrod attēlu starpību 4. (5.) & 8. Soļu izvādēm un veic segmenta izmēra filtrēšanu rezultātam

*SF noteikšana & SZ segmentācija*

- 10 pielieto  $1-p_x$  attēla ierāmēšanu (pikseļu vērtības 0, visām attēla malām, izņemot apakšu) artefaktu maskai, noņem robežu komponentes, tad noņem ieviesto attēla rāmi
- 11 Pielieto aizvēršanas transformāciju
- 12 Saskaita 7. & 11. Soļu rezultātus
- 13 SZ: Invertē 12. Soļa rezultātu
- 14 SF: veic malu detektēšanu 12. Soļa izvadei

*SF korekcija & izlīdzināšana*

- 15 Pielieto maza rādiusa Gausa filtrēšanu SF maskām
- 16 Normalizē attēlus un pielieto Otsu binarizāciju
- 17 Veic retināšanas transformāciju

**Izvade:**

- CZ bez artefaktiem
  - Segmentēta SZ bez artefaktiem
  - Dobumu maskas
  - Kanālu maskas
  - SF stāvokļi
- 

dendrītu tekstūras. Tomēr tika konstatēts, ka kopumā var būt grūti iegūt labus rezultātus, iepriekš nesagatavojot attēlus. Tāpēc pirmais posms ir attēla normalizācija, CTM [167] un PLK. CTM rezultātā ievērojami palielinās dendrītu KTA. Tikmēr PLK izveido attēla spilgtuma kartes rupjo polinomiālu interpolāciju, lai veiktu fona korekciju ("saplacināšanu"), neizmantojot etalona kadrus [230]. Dažos gadījumos tas palīdz samazināt

---

**Algorithm 17:** Attēlu sadalīšana & skenēšanas reģionu identificēšana

---

**Ievade:**

- Pre-processed images
  - CZ maskas bez artefaktu zonām (Algoritms 16)
- 1 Sadala priekšapstrādātos attēlus kvadrātveida reģionu režģī ar sānu garumiem, kas balstīti uz attēla izmēriem
  - 2 Sadala CZ maskas atbilstošos kvadrātveida reģionos; *iegaumē atmiņā*
  - 3 Piešķir visiem reģioniem to pozīcijas indeksus; *iegaumē atmiņā*
  - 4 Aprēķina CAF CZ maskas reģioniem un piešķir vērtības attiecīgajiem attēla reģioniem
  - 5 Apzīmē attēla reģionus ar  $CAF > \varepsilon_{CAF}$  ( $\varepsilon_{CAF} > 0$ , lietotāja izvēlēts) kā *skenēšanas reģionus*

**Izvade:** Skenēšanas reģioni tālākai analīzei (Algoritms 18)

---

---

**Algorithm 18:** Skenēšanas reģionu filtrēšana & dendrītu skeletu atgūšana

---

**Ievade:** skenēšanas reģionu attēli (Algoritms 17)

*Filtru ievades sagatavošana*

- 1 Normalizē attēlus un pielieto CTM operāciju
- 2 Vēlreiz normalizē attēlus un veic PLK

*Attēlu filtrēšana*

- 3 BM3D filtrēšana
- 4 Divas NVM iterācijas
- 5 Pielieto SCTMM
- 6 Veic PLK operāciju

*Dendrītu skeletu atgūšana*

- 7 Segmentē dendrītus, izmantojot 2 sliedzīgu histerēzes binarizāciju
- 8 Invertē iegūto bināro attēlu
- 9 Pielieto retināšanas transformāciju
- 10 Filtrē segmentus pēc izmēra
- 11 Sareizina iegūtās maskas ar atbilstošajiem CZ masku reģioniem (Algoritms 17, 2. Solis)
- 12 Veic morfoloģisko apgriežanu (var būt vairākos etapos)
- 13 Noņem robežas pikselus
- 14 Veic filtrēšanu pēc segmentu izmēra

**Izvade:** Dendrītu skeletu maskas

---

liela viļņa garuma korelēto troksni, ko rada šķidrā metāla plūsma pāri dendrītiem.

Tālāk tiek filtrēti skenēšanas reģioni. Vispirms tiek izmantots BM3D, lai restaurētu dendrīta tekstūras attēlos, un pēc tam tiek veiktas divas

NVM iterācijas, lai mazinātu visus atlikušo korelēto troksni un palielinātu dendrītu KTA. NVM var uzskatīt par vispārinātu, lokāli adaptīvu *unsharp masking* versiju, kura šajā darbā iepriekš tika izmantota daļiņu detektēšanai NR attēlos līdzīgam mērķim, ar labiem rezultātiem [185, 213]. Pēc tam pielieto SCTMM (1), lai vēl vairāk noņemtu fonu un uzlabotu KTA. Šī ir tā pati metode, kas iepriekš tika izmantota burbulu un daļiņu detektēšanai NR attēlos [158, 185]. Visbeidzot, tiek veikta vēl viena PLK iterācija. Ar šiem filtrēšanas posmiem saistītie parametri ir doti [223].

Dendrītu skeletu atgūšana tiek veikta astoņos posmos. Procedūra sākas ar divkārtšo Otsu histerēzes binarizāciju [157], kam seko maskas apgriešana, morfoloģiskā retināšana un segmentu filtrēšana pēc izmēra. Pēc tam iegūtās skeleta maskas tiek reizinātas ar attiecīgajiem CZ masku attēliem, kas apgriez skeleta daļas, kuras atrodas šķidrās fāzes zonās un tādējādi faktiski nevar būt dendrīti. Pēc tam ar vairākkārtēju morfoloģisko apgriešanu [157] tiek noņemtas atlikušās skeleta netīrības, pēc kā tiek noņemti robežu pikseli un vēlreiz tiek veikta filtrēšana pēc izmēra.

Pēc dendrītu segmentācijas ir jāmēra skeleta segmentu orientācijas ( $\varphi$ , attiecībā pret attēla  $X$  asi). Tomēr var gadīties, ka attēlu filtri uzreiz pareizi neizšķir primāros/sekundāros dendrītus vai gadījumus ar dendrītu pārklāšanos. Turklāt dažiem segmentiem var nebūt skaidri noteiktas orientācijas vai tie var būt vienkārši pāri palikuši artefakti. Lai identificētu un labotu šādas *neizšķirtas* (orientācijas nozīmē) struktūras visos skenēšanas reģionu attēlos, procedūrai, kas izklāstīta Algoritmā 19, tiek veikta visiem attēliem. Algoritms 19 izmanto segmentu malu attiecību  $\chi$  kā kritēriju, lai noteiktu, vai skeleta segmentiem ir izšķirta (t.i., labi definēta) orientācija. Tā kā morfoloģiskā retināšana ir viens no Algoritma 18 soļiem un Algoritms 19 nepievieno maskām jaunus pikselus, lielākajai daļai skeleta līniju ir jābūt 1  $px$  biezums un, ja tie ir pietiekami gari, līdz ar to arī augsts  $\chi$ . Segmentu iekrāsošanai pēc  $\varphi$  būs atslēgas loma vēlāk dendrītu graudu sadalīšanās procesā (Sadaļa II G 2 e), bet Algoritma 19 3. Solī tas ir izmantota, lai atdalītu maskas ar sākotnēji izšķirti un neizšķirti segmentiem.  $\varphi$  un  $\chi$  noteikšana ir izskaidrota [223].

Kad maskas ar neizšķirtiem skeletiem ir atdalītas, tiek veikta stūru punktu noteikšana. Tiek izmantota Harris-Stephens metode [231, 232] ar pirmās kārtas Gausa atvasinājumiem. Pēc tam tiek noteikti morfoloģiskie sazarošanas punkti [233]. Pēc tam noteiktie stūra punkti tiek filtrēti, atlasot stūra pikseļu kopas ar pikseļu skaitu zem sliekšņa, un tad tos apvienojot ar konstatētajiem atzarojuma punktiem. Visbeidzot, no iegūtās maskas tiek noņemti pikseļu kopas ar pikseļu skaitu zem sliekšņa. Visbeidzot, kombinētā maska pēc segmentu lieluma filtrēšanas tiek atņemta no ievades maskas ar neizšķirtiem skeletiem. Ar šo procesu saistītie parametri ir norādīti [223]. Kad augšminētais ir izdarīts, izšķirtajiem skeletiem tagad tiek piešķirtas

---

**Algorithm 19:** Neorientētu skeletu izšķiršana

---

**Input:** Skenēšanas reģioni ar dendrītu skeletiem (Algoritms 18)

*Neizšķirto skeletu identifikācija*

- 1 Aprēķina orientācijas leņķus ( $\varphi$ , attiecībā pret attēla  $X$  asi) un malu attiecību ( $\chi$ ) dendrīta segmentiem
- 2 Nokrāso izšķirtos (orientētos) segmentus ( $\chi > \chi_c$ ,  $\chi_c \geq 1$  ir lietotāja uzdots) pēc to  $\varphi$
- 3 Atdala izšķirtos un neizšķirtos segmentus dažādās maskās  
*Izšķir dendrītu skeletus (maskām ar neizšķirtajiem segmentiem)*
- 4 Nosaka skeletu stūru punktus
- 5 Nosaka skeletu sazarošanas punktus
- 6 Stūru un sazarošanas punktu filtrēšana
- 7 No skeletiem noņem atlikušos stūru un sazarošanas punktus  
*Skeletu rekombinācija*
- 8 Atkārtoti nosaka segmentu orientācijas maskām ar (iepriekš) neizšķirtiem segmentiem (7. Solis)
- 9 Nokrāso izšķirtos (orientētos) segmentus ( $\chi > \chi_c$ ) pēc to  $\varphi$
- 10 Summē 9. Soļa rezultātu iepriekš apstrādātajām maskām ar sākotnēji izšķirtajiem segmentiem (3. Solis)

**Izvade:** Skenēšanas reģions ar izšķirtiem dendrītu skeletiem, kuri nokrāsoti pēc to orientācijām

---

krāsas, pamatojoties uz  $\varphi$ , ievērojot  $\chi_c$  kritēriju, un iegūtās maskas tiek rekombinētas ar tām, kas satur sākotnēji izšķirtos skeletus.

Šajā brīdī visi atlikušie neizšķirtie (baltā krāsā) skeleti skenēšanas reģionos tiek uzskatīti par neorientētiem dendrītiem un/vai artefaktiem. Tie ir izslēgti no turpmākās analīzes. Tagad var rekonstruēt globālo (FOV) dendrīta skeleta attēlu, iekārtojot skenēšanas reģionus atbilstoši to pozīcijas indeksiem no Algoritma 17 3. Soļa. Ir arī viegli ģenerēt kartes ar krāsu kodētu dendrītu orientāciju, ar izceltiem dobumiem un šķidrums/cietvielas robežām.

### e Dendrītu sadalīšana graudos

Pirms turpināt iegūtā globālā dendrīta skeleta sadalīšanu graudos, tam ir jāaprēķina *globālais* orientāciju ( $\varphi$ ) spektrs. Tas ir ne tikai fizikāli interesants, bet arī tiks izmantots Algoritmā 20. Lai gan globālais  $\varphi$  spektrs noteikti ir būtisks, bieži vien ir vēlams atšķirt dendrītu "saskaņotas" (virzītas) augšanas zonas, t.i., *dendrītu graudos*, ar to laukumiem un vidējo dendrītu  $\varphi$ . Piedāvātā metode *dendrītu sadalīšanai graudos* (DSG) to dara, ņemot vērā  $\varphi$  līdzību un dendrītu tuvumu, un tas tiek darīts, izmantojot Algoritma 19 ģenerēto  $\varphi$  krāsu telpas attēlojumu. DSG tiek veikta trīs

posmos: primārā skenēšana, kas nosaka dominējošos dendrīta graudus; sekundārā/smalkāka skenēšana, kas pārbauda, vai lielākie graudi ir vēl vairāk jāsadala un vai mazākie graudi ir atbilstīgi; filtrēšanas solis, kas atrisina neskaidrības un pārklāšanos starp atklātajiem dendrītu graudiem. DSG procedūras pirmais solis ir aprakstīts Algoritmā 20.

---

**Algorithm 20:** Dominantu dendrītu graudu detektēšana

---

**Ievade:** Rekonstruētais globālais dendrītu skelets

- 1 Aprēķina globālo  $\varphi$  spektru globālajam skeletam
- 2 Filtrē  $\varphi$  spektru & nosaka tā dominantus pīķus
- 3 Atrod dendrītu segmentus  $\varphi$  pīķu tuvumā krāsu telpā
- 4 Izveido graudu maskas, kas pārklāj dendrītu segmentus

**Izvide:** Atdala dominējošo dendrītu graudu maskas

---

$\varphi$  spektrs tiek nosvērts pēc dendrītu garumiem, un aprēķins ir izskaidrots [223]. Tā kā Algoritma 19 dēļ pastāv kartēšana starp  $\varphi \in (-\pi/2; \pi/2]$  un dendrīta skeleta krāsu vērtībām (normalizētām), var atrast segmentus globālajā skeletā, kas atbilst atlasītajām  $\varphi$  virsotnēm. Lai to izdarītu, maksimālās  $\varphi$  vērtības tiek pārveidotas par koordinātām  $r_\varphi$  CIELAB (CIE76) krāsu telpa, un segmenti ar Eiklīda attālumu  $\delta r_{\text{LAB}}$  robežās no  $r_\varphi$  tiek atlasīti. Atlasītie segmenti tiek tālāk filtrēti, piešķirot tiem svarus  $w_{\text{LAB}} \in [0; 1]$ , pamatojoties uz attālumu no  $r_\varphi$  (no vistālākā līdz tuvākajam, attiecīgi), un saglabājot segmentus ar  $w_{\text{LAB}} > w_c$ . Tas padara procesu izturīgāku pret troksni  $\varphi$  spektrā un palīdz izvairīties no graudu masku pārklāšanās vēlāk. Tomēr dažkārt var būt divu vai vairāku ļoti tuvu virsotņu grupas  $r_\varphi$ , kas apmierina  $\rho > \rho_c$  sliekšni. Šajos gadījumos tādas pīķu grupas ar savstarpējiem Eiklīda CIELAB attālumiem  $< \delta r_\varphi$  tiek aizstātas ar to vidējām  $r_\varphi$  vērtībām. Vēl viena problēma, kas varētu rasties, ir ka  $\varphi \in (-\pi/2; \pi/2]$  un  $\varphi$  spektram nav periodisku robežnosacījumu. Tas nozīmē, ka, ja būtu reālais noteikta platuma maksimums dendrīta orientācijām netālu no  $\varphi = \pm\pi/2$ , Algoritms 20 to uzskatītu par divām  $\varphi$  virsotnēm. To var atrisināt, pārbaudot, vai  $(-\pi/2; \pi/2]$  robežām vistuvāk esošie (*malu pīķi*) ir pietiekami tuvu šīm robežām un viens otram *pāri*  $\varphi = \pm\pi/2$  robežai. Gadījumos, kad tiek noteiktas divi vai vairāki tādi malu pīķi,  $\varphi_1$  un  $\varphi_2$ , tie tiek pakļauti ierobežojumiem  $\min(\pi/2 - |\varphi_{1,2}|) \leq \delta_1$  un  $||\varphi_1| - |\varphi_2|| \leq \delta_2$ . Ja abi ir apmierināti, attiecīgās maskas ar dendrītiem krāsu telpas pīķa diapazonos tiek apvienotas pirms krāsu telpas tuvuma sliekšņa noteikšanas, efektīvi apstrādājot malas pīķus kā vienu ekvivalentu. Parametri šai procedūrai ir sniegti [223].

Kad ir atrasti dendrītu klasteri, kas atbilst katrai  $r_\varphi$  virsotnei, tiem ir jāizveido maska, kas tos norobežos un atdalīs kā vienu graudu. To veic, skeletu klasteriem piemērojot aizvēršanas transformāciju ar diska

strukturešanas elementiem, kas aizpilda atstarpes starp dendrītu skeletiem, vienlaikus neietekmējot skeletu nomaļās daļas, t.i., saglabājot dendrītu formas, kas izvirzītas no to kopas lielākās daļas. Jāņem vērā, ka tas var radīt vairāk nekā vienu graudu masku katram  $r_\varphi$  pīķim, jo dendrītu kopas ar ļoti līdzīgu orientāciju var atrasties pietiekami tālu viena no otras. Tādējādi tiek identificēti graudi, ņemot vērā gan dendrītu orientācijas, gan telpisko sadalījumu. Pēc tam iegūtās graudus pārklājošās binārās maskas tiek filtrētas pēc to laukumiem, un atlikušās maskas tiek atdalītas turpmākai analīzei ar precizētu skenēšanu.

Kad katrai  $r_\varphi$  virsotnei ir identificēti dominējošie graudi, tiem tiek veikta sekundārā skenēšana, kas paredzēta, lai pārbaudītu, vai sākotnēji atrastie graudi ir jāsadala sīkāk. Tas tiek darīts, lai gan (netieši) nodrošinātu graudu unikalitāti, gan samazinātu pārklāšanos un izšķirtu mazākas zonas lielākiem graudiem, kurās ir pietiekami atšķirīga orientācija. Skenēšana veic darbības, kas pamatā ir līdzīgas Algoritmam 20, taču ar šādām modifikācijām: 1. un 2. Soļi tagad tiek piemēroti dendrītiem graudu maskās, nevis globālajam skeletam; tiek izmantota grauda laukumam adaptīvā  $\varphi$  spektra izšķirtspēja.

Pirms  $\varphi$  spektru aprēķina, pie graudiem piederošie dendrīta skeleti tiek izolēti, graudu maskas reizinot ar globālo dendrīta skeletu. Laukumam adaptīvā izšķirtspēja ir iestatīta tā, lai, no vienas puses, algoritms var izšķirt smalkākas orientācijas atšķirības sākotnējos graudos un noteikt pamatā esošās  $\varphi$  virsotnes, bet, no otras puses, neizmantojot pārāk lielu izšķirtspēju mazākiem graudiem ar salīdzinoši mazu dendrītu skaitu. Pēdējā gadījumā algoritms citādi uztvertu spektra troksni kā nozīmīgus orientāciju pīķus, neskatoties uz filtrēšanu. Adaptīvā spektra izšķirtspēja tiek aprēķināta, kā parādīts [223]. Pārējie parametri ir tādi paši kā Algoritmā 20.

Kad sākotnējie graudi ir atkārtoti skenēti un saglabāti, vai tālāk sadalīti un/vai likvidēti, tiek veikts pēdējais DSG posms – tiek novērstas nenoteiktības un pārklāšanās starp graudiem. Šeit ir jāaplūko divi gadījumi: DSG iepriekšējos posmos atsevišķos gadījumos tika ģenerēti divi graudi ar gandrīz identiskām (t.i., pārklājošām) maskām, un tas patiešām ir viens un tas pats grauds; starp graudiem ir daļēja pārklāšanās, bet tā ir fizikāla, jo graudi atrodas blakus un dendrītu orientācija ļoti lēni mainās no viena grauda uz otru, t.i., asas robežas vietā pastāv pārejas zona. Pirmajā gadījumā viena no maskām ir lieka, bet otrajā gadījumā pārklāšanās zona ir jāidentificē un jānorāda kā tāda, jo pārejas zonā nevar skaidri nošķirt divus graudus. Visbeidzot, ir arī jautājums par potenciāli atlikušajiem dendrītiem ar  $\varphi$  vērtībām, kurām ir nozīmīga novirzes attiecībā pret graudu vidējo  $\varphi$ . Šīs problēmas risina Algoritms 21.

Pirmais solis tiek veikts, sareizinot visus iespējamus dendrītu graudu masku pārus. Tad visiem pāriem tiek aprēķināti unikalitātes koeficienti, definēti kā  $u = 1 - S_\cap / \langle S \rangle$ , kur  $S_\cap$  ir pārklāšanās maskas laukums un

---

**Algorithm 21:** Nenoteiktību atrisināšana & graudu sakopšana

---

**Ievade:** Dendrītu graudu maskas pēc precizētās skenēšanas

- 1 Nosaka pārklāšanas maskas dendrītu graudu pāriem
- 2 Aprēķina *unikalitātes koeficientus*  $u \in [0; 1]$  graudu pāriem
- 3 Izslēdz liekus graudus ( $u < u_c$ ,  $u_c$  ir lietotāja uzdots)
- 4 Apzīmē pārklāšanās maskas atlikušajiem unikālo graudu pāriem kā *pārklāšanas zonas* un atņem tās no graudu maskām
- 5 Rezultējošās maskas filtrē pēc izmēra, tad tāpat filtrē maskām atbilstošus segmentus – iegūst gala graudu maskas
- 6 Sareizina globālo skeletu ar iegūtajām graudu maskām, lai izolētu attiecīgos dendrītus
- 7 Izņem dendrītus ar anomālām  $\varphi$  vērtībām un filtrē dendrītus pēc izmēra

**Izvade:** gala dendrītu graudu maskas & skeleti

---

$\langle S \rangle$  ir vidējais graudu laukums pārim. Pāri ar  $u < u_c$  tiek uzskatīti par liekiem, un no šādiem pāriem tiek saglabāta tikai viena graudu maska. Visu pārējo graudu pārklāšanās maskas tiek saglabātas kā pārklāšanās zonas un atņemtas no unikālajām maskām. Atlikušos segmentus nosaka gan kopējās, gan atsevišķas platības. Pēc tam iegūtās maskas reizina ar atbilstošiem skeletiem, lai izolētu graudu dendrītus. Visbeidzot, dendrīta skeleti tiek filtrēti pēc orientācijas un garuma:  $\langle \varphi \rangle$  tiek mērīts graudu dendrītiem, un segmenti ārpus  $\langle \varphi \rangle \pm 5\sigma$  intervāla (pēc noklusējuma) tiek izslēgti, kam seko filtrēšana pēc garuma. Tas noslēdz DSG procesu. Parametri ir norādīti [223].

## f Šķidrās zonas analīze

Izšķīdušās vielas koncentrācijas mērīšana virs SF ietver divus galvenos apsvērumus. Pirmkārt, trokšņa filtrēšana šķidrums apgabalā virs SF jāveic pēc iespējas nedestruktīvi, t.i., lai pārāk daudz nemainītu spilgtuma lauku, jo vēlāk to var izmantot ar Beer-Lambert likumu, lai novērtētu izšķīdušās vielas koncentrāciju. Otrkārt, SZ/CZ segmentācija nekad nebūs perfekta, un dendrītu gali vietām varētu būt nedaudz virs SF, radot kļūdas spilgtuma/koncentrācijas mērījumos — tās ir jāmazina. Abas problēmas risina Algoritms 22.

Konstatēts, ka mediānas, *bilateral* [234] un NV (šajā secībā) filtru kombinācija 1.-3. Soļos pēc parametru regulēšanas rada pietiekami labi filtrētu spilgtuma/koncentrācijas lauku bez būtiskām lielāka mēroga lauka struktūru izmaiņām vai pārmērīgām vērtību nobīdēm. Bilateral filtrs ir izvēlēts jo īpaši tā spilgtuma vērtību diapazona filtra komponentes dēļ, jo ar pareiziem iestatījumiem tam jā saglabā spilgtuma līmeņa kopas attēlos, kas ir diezgan



---

**Algorithm 22:** Izšķīdušās vielas koncentrācijas mērīšana virs sacietēšanas frontes

---

**Ievade:**

- Priekšapstrādāti FOV attēli bez artefaktiem (Algoritms 14)
- Sacietēšanas frontes (SF) maskas (Algoritms 16)

- 1 Pielieto FOV attēliem mediānas filtru
- 2 Pielieto *bilateral* filtru
- 3 Veic NV filtrēšanu
- 4 Uzdo SF-konformu bufera zonu, pabīdot SF kontūra masku augšup
- 5 Definējiet koncentrācijas mērīšanas zonu, konformi izstiepjot SF formas robežu augšup no buferzonas augšējās robežas
- 6 Aprēķina vidējo spilgtumu vertikālajām pikseļu joslām mērīšanas zonā gar FOV platumu
- 7 (Pēc izvēles) Izmanto Beer-Lambert likumu, lai pārietu no spilgtuma uz izšķīdušās vielas koncentrācijas karti

**Izvade:** Vidējais spilgtums/koncentrācija virs SF gar FOV platumu visiem kadriem

---

tuvu. Kad attēli ir apstrādāti, katram kadram tiek noteiktas mērīšanas zonas. Lai risinātu iepriekš minēto problēmu ar dendrīta galiem, kas, iespējams, vietām atrodas virs SF, tiek izveidota buferzona, kurā nenotiek mērīšana — tas tiek darīts, nobīdot SF masku (līkni) uz augšu par attālumu  $d_{\text{buf}}$ . Sākot no šī līmeņa, SF līkne tiek izstiepta attālumā  $d_{\text{samp}}$ , lai izveidotu SF-konformu zonu koncentrācijas mērījumiem no filtrētajiem attēliem. Šeit vidējās vērtības tiek aprēķinātas  $1 \times x$  platām vertikālām joslām ar  $d_{\text{samp}}$  pikseliem virs buferzonas visā FOV platumā. Parametri augšminētajai procedūrai ir doti [223].

Veicot konvektīvo spalvu segmentāciju, spilgtuma vērtību saglabāšana nav tik nopietna problēma, kamēr tiek saglabātas formas. Šeit ideja ir filtrēt attēlus un pēc tam sadalīt iegūto filtrēto SZ spilgtuma karti  $N_{\text{level}}$  līmeņos (spilgtuma vērtību diapazonu kopās), kas sakārtoti pēc to spilgtuma. Pēc tam, atkarībā no gadījuma, var salikt kopā  $N_{\text{plume}}$  līmeņus ar visaugstākiem spilgtumiem, lai iegūtu maskas konvektīvajām spalvām virs SF. Tas tiek darīts, izmantojot Algoritmu 23.

Lai izolētu šķidruma apgabalu FOV ietvaros, attēls tiek reizināts ar SZ masku. Taču pirms reizināšanas virs SZ maskas tiek izveidota buferzona ar morfoloģiskās paplašināšanas transformāciju, izmantojot diska strukturēšanas elementus. Pamatojums šeit ir tāds pats kā gadījumā ar koncentrācijas mērījumiem virs SF — lai novērstu dendrīta galus, kas, iespējams, ir bijuši nepilnīgi segmentēti. Ja tie netiks noņemti, tie veidotu "parazītu" līmeņu kopas un samazinātu faktisko līmeņu kopas skaitu SZ. Spilgtuma (koncentrācijas) līmeņu kopas konvektīvajām spalvām tiek

---

**Algorithm 23:** Konvektīvo spalvu segmentācija

---

**Ievade:**

- Priekšapstrādāti FOV attēli bez artefaktiem (Algoritms 14)
  - SZ maskas ar aizpildītiem dobumiem un kanāliem (Algoritms 16)
- 1 Veic Solis 1-3 no Algoritma 22 (ar citiem parametriem)
  - 2 Gausa filtrēšana
  - 3 NV filtrēšana
  - 4 Izveido bufera sonu virs SZ robežas (SF) SZ masā ar aizpildītiem dobumiem un kanāliem, izmantojot morfoloģisko paplašināšanos
  - 5 Sareizina iegūto masku ar filtrētu attēlu
  - 6 Sadala iegūto attēlu spilguma līmeņu kopā
  - 7 Saliek kopā atlasītos līmeņus, iegūstot konvektīvo spalvu maskas
- Izvade:** Konvektīvo spalvu maskas dažādiem spilguma līmeņiem
- 

iegūtas, izmantojot K-medoīdu metodi [212] ar  $N_{\text{level}}$  medoīdiem — pēc tam līmeņu kopas tiek sakārtotas pēc to vidējā spilgtuma (izņemot cieto elementu un bufera apgabaliem, kuriem ir vizzemākais, nulles spilgtums, pēc maskas reizināšanas) un pirmie  $N_{\text{plume}}$  līmeņi tiek salikti kopā konvektīvo spalvu maskā. Šīs segmentācijas procedūras parametri ir doti [223].

### 3. Galvenie rezultāti

Lai demonstrētu piedāvātā risinājuma noturību, tika nolemts pārbaudīt izstrādāto metodiku un kodu apstākļiem, kas mērķtiecīgi tiek padarīti sliktāki, nekā varētu sagaidīt. Konkrēti, attēlu secības priekšapstrādes laikā tika nolemts PLK izmantot tikai *vienu* kadru. Tādā veidā fona un rentgenstara kuļa sadalījumi, un artefakti, kas uztverti FOV, joprojām tiek kompensēti, taču iegūtā attēla STA ir ievērojami zemāks.

#### a Attēlu filtrēšana & segmentācija

Sākumam aplūko FOV apstrādes posmus pirms CZ un SZ segmentācijas. Attēlā 133 parādīts raksturīgs ievades attēla piemērs salīdzinājumā ar priekšapstrādāto, un pēc tam filtrēto izvadi – šis ir labs piemērs, kurā ir daudzas no reāli sagaidāmām attēla īpašībām. Artefakti parādās kā pāreksponēti stūri un apgabali attēla apakšējā malā (a). Termopāris atrodas (a) augšējā kreisajā stūrī, kas redzami izvīrziņš no kreisās attēla robežas. Jāņem vērā arī lente termopāru piestiprināšanai, kas redzama kā taisnstūrveida laukumi ar lielāku necaurredzamību pie (a) kreisās un augšējās robežas. Šķidruma kanāli un dobumi atrodas FOV apakšējā daļā,

labāk redzami (b). Var novērot, ka, pat ar viena kadra PLK, spilgtuma sadalījums (a) ap rentgenstaru staru asi ir gandrīz pilnībā kompensēts (b), tāpat arī elementi, kas pievienoti attēlotajai šķidrā metāla šūnai. Tomēr, atšķirībā no (a), troksnis tiek pastiprināts (b) un kļūst manāmi rupjāks. Pēc tam artefakti tiek noņemti, un rezultāts tiek parādīts (c) — izveidotajiem artefaktu apgabaliem vairs nevajadzētu ietekmēt NV un BM3D filtru darbību. Visbeidzot, BM3D un NV tiek lietoti šādā secībā, kā rezultātā tiek iegūta izvide, kas redzama (d), ar daudz kontrastējošākam SZ/CZ robežām, kā arī tīrākiem šķidrā metāla dobumiem un kanāliem. Lai gan šķidrā metāla strūkļa (b) augšējā daļā ir ievērojami izkliedēta, šeit tas nerada bažas, jo šīs attēlu filtrēšanas procedūras rezultāts tiek izmantots tikai SZ/CZ atdalīšanai — koncentrācijas mērījumiem SZ tiek izmantoti filtri Algoritmā 22, nevis šajā posmā lietotie.

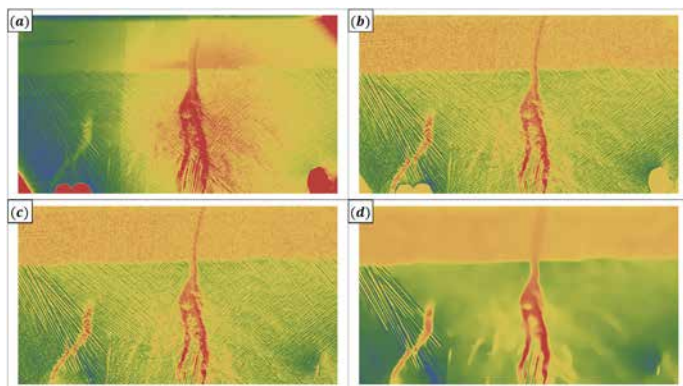


FIG. 133. FOV attēla apstrāde: (a) neapstrādāts attēls, (b) priekšapstrādāts attēls, (c) attēls ar artefaktiem (attēla stūri (a) apakšattēlā), kuri noņemti, izmantojot Algoritmu 14, un (d) gala attēls pēc BM3D un NV filtrēšanas (Sadaļa II G 2c). Krāsu shēma šeit un turpmāk, ja vien nav norādīts citādi, ir identiska Attēlā 132 izmantotajai. Jāpievērš uzmanība uzlabotam SF, šķidrums kanālu un dobumu kontrastam.

Segmentācijas rezultāti (Algoritms 15, izmantojot (39)) pēc FOV filtrēšanas, ir parādīti Attēlā 134. Mazāk caurspīdīgās (zaļākas) struktūras, kas redzamas (b) FOV vidū, veidojās ārēji inducētas piespiedu konvekcijas apstākļos, un dendrītu struktūru augšējā, caurspīdīgākā un mazāk kontrastējošā daļa izveidojās pēc pēkšņas piespiedu konvekcijas izslēgšanas un atgriešanās pie dabiskās konvekcijas režīma (sīkāka informācija [59]). Šeit tiek parādīts, ka segmentācijas algoritmam nav problēmu izšķirt agrākos veidojumus (a) un (b), kur tiek novērota piespiedu konvekcija; tam netraucē

strauja konvektīvo spalvu parādīšanās (c); tiek arī veiksmīgi uztvertas daudz mazāk kontrastainas struktūras, kas redzamas (d) augšējā daļā, kur CAF ir tuvu 1. Vairāk filtrēšanas un segmentācijas rezultātu piemēru, kā arī padziļināta analīze, ir sniegti [223].

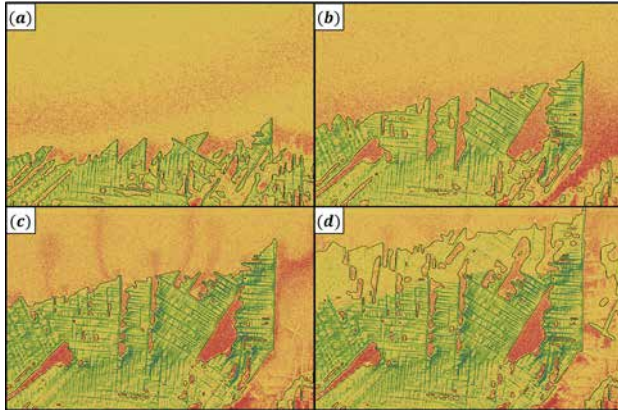


FIG. 134. Piemērs, kas demonstrē izstrādātās CZ/SZ segmentācijas metodes veikspēju. Robežas starp segmentētajām CZ/SZ (melnās kontūras), ņemot vērā apgabalus ar noņemtiem pastāvīgiem artefaktiem, dažādiem laika momentiem (a-d) augošā secībā. Robežas iegūtas, segmentējot ar Algoritmu 15 un 39.

Kad CZ/SZ segmentācija ir pabeigta, šie segmenti tiek tālāk diferencēti, lai atdalītu šķidrums dobumus un kanālus no CZ, un noteiktu SF formu. Ir arī papildus procedūras, kas pasargā pret artefaktiem, kas potenciāli var palikt pāri pēc SZ/CZ segmentācijas, jo diez vai ir iespējams *vienmēr* uzreiz atrast optimālos segmentācijas parametrus. Tāpēc ir labi, ja kodam ir rezerves funkcionalitāte. Attēlā 135 ir parādītas darbības, kas saistītas ar segmentu klašu atdalīšanu.

Abos gadījumos, kad dobumi ir identificēti (Algoritms 16), var viegli iegūt SZ segmentu un pēc tam noteikt SF un atrast kanālus, kas stiepjas zem SF. Piemēri tam, kā SF tiek izsekots gar CZ segmenta robežām, ir parādīti Attēlā 136. Iegūtās SF malu maskas vēlāk tiks izmantotas koncentrācijas mērījumiem virs SF un konvektīvu spalvu segmentācijai SZ.

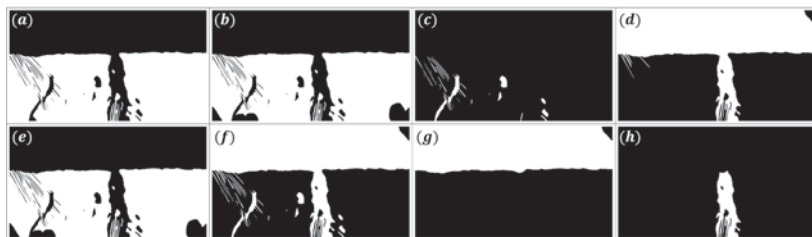


FIG. 135. Segmentu klasifikācijas posmi atdalītiem CZ/SZ: (a) segmentēta CZ, (b) maska (a) ar noņemtiem artefaktiem, kas nav apmales tipa (šeit nav neviena), (c) šķidruma dobumu maska, (d) SZ maska bez dobumiem un apmales vai artefaktiem, (e) maska (b), bet bez artefaktiem (tādu nebija), (f) kombinētās maskas (c) un (d), (g) maskas, kas atdalītas ar SF, un (h) šķidruma kanāla maska. Šis gadījums atbilst attēlu sekvencei, kas aplūkota Attēlā 133.

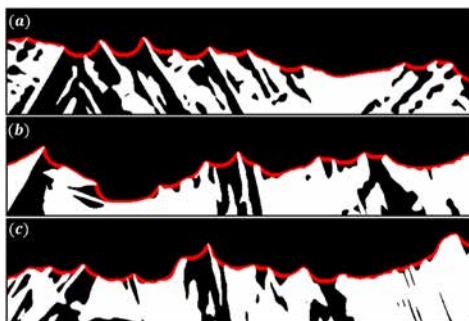


FIG. 136. Piemēri, kas parāda, kā SF (sarkanās līknes) tiek izsekots, pamatojoties uz gala CZ masku, t.i., kā Attēls 135g izriet no Attēla 135e/f.

## b Sacietējušo struktūru analīze

Kad CZ ir identificēts kopā ar dobumiem un kanāliem, var pievērsties CZ sacietējušo struktūru analīzei. Kā norādīts [223], vispirms FOV attēls tiek sadalīts skenēšanas reģionos, un pēc tam katrs no tiem tiek apstrādāts, izmantojot Algoritmu 18. Piemērs ir sniegts Attēlā 137. Jāņem vērā, ka troksnis apgrūtina dendrītu identificēšanu sākotnējos attēlos (a), un Attēlā 137a papildus ir ļoti zems dendrītu KTA, galvenokārt lielāka viļņa garuma korelēta trokšņa dēļ, kas rodas no šķidruma plūsmas. Svarīgi atcerēties, ka dendrītiem ir zemāka rentgenstaru caurspīdīgums nekā apkārtējam šķidrumam, un tāpēc šķidrums (a) attēlots kā balts.

Apakšattēli (b) parāda, ka CTM un bezetalona PLK padara dendrītus

un atstarpes starp tiem daudz skaidrākus, bet STA un KTA praktiski nemainās. Tomēr tika konstatēts, ka šis posms ievērojami uzlabo BM3D veikspēju, kas ir nākamais posms, kura rezultāts ir redzams (c). Lai gan Attēlā 137c redzamās struktūras jau ir skaidrāk saskatāmas cilvēka acij, KTA joprojām ir zemāka, nekā vēlamas, lai nodrošinātu uzticamu segmentāciju. Tas ir tāpēc, ka BM3D īsti nemazina korelēto troksni (BM3D tiek izmantots nekorelēta Gausa trokšņa modelis). Šeit nāk nākamais posms ar divām NVM korekcijas iterācijām un SCTMM operāciju, pēc kurām atkal tiek lietots bezetalona PLK. Šeit NVM noņem lielu daļu korelēta trokšņa, SCTMM ievērojami palielina KTA, un PLK darbojas kā liela viļņa garuma fona korekcija pēc NVM.

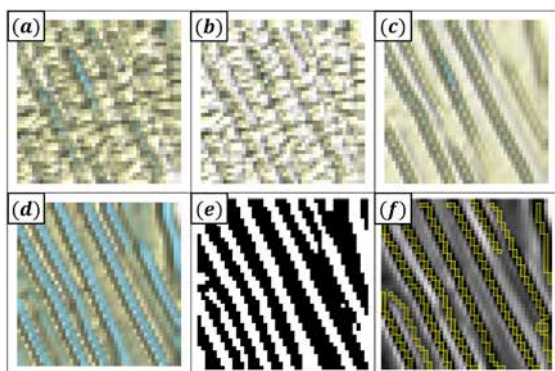


FIG. 137. Skenēšanas reģiona apstrāde, izmantojot Algoritmu 18: (a) krāsa reljefa attēls (iepriekš apstrādāta attēla projekcija), (b) attēls pēc normalizēšanas, CTM un PLK, (c) BM3D izvade, (d) rezultāti pēc divām NVM iterācijām, vienas SCTMM iterācijas un PLK, (e) izvade pēc 2-Otsu (histerēzes) binarizācijas un attēla inversijas, un (f) gala rezultāts pēc segmentu filtrēšanas pēc izmēra un retināšanas transformācijas, pārklājums virs (d) pelēktoņu versijas. Attēla spilgtums palielinās no gaiši zilās krāsas uz baltu.

Pēc tam, dubultā Otsu histerēzes segmentācija un attēla inversija dod dendrīta masku (e), un morfoloģiskā retināšana ar segmentu lieluma sliekšni rada dendrīta skeletu (f). Tagad atliek tikai apgriezt dendrīta skeletus, reizinot to maskas ar CZ masku, kas projicēta uz skenēšanas reģionu — šis process ir parādīts Attēlā 138. Pēc tam, kad katram reģionam ir veikta apgriešana, tiek izveidoti cietās struktūras skeleti visam FOV — piemērs skenēšanas reģionu skeletiem, kas tiek iegūti ar Algoritmu 18 gadījumam, kas aplūkots Attēlos 133 un 135, ir parādīts Attēlā 139.

Tomēr jāievēro, ka daudziem reģioniem Attēlā 139 ir vairāki dendrītu krustojumi un atzarojumi, kas padara orientācijas analīzi problemātisku.

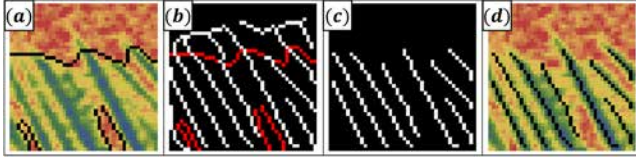


FIG. 138. Skenēšanas reģiona skeleta apgriešanas piemērs, izmantojot SZ masku: (a) krāsains attēls ar CZ robežu (melnas kontūras), (b) skelets ar CZ robežas pārklājumu (sarkanas kontūras), (c) apgriezti skeleti un (b) apgriezti AL skeleti, kas pārklāti virs krāsainā attēla (melnas līnijas).

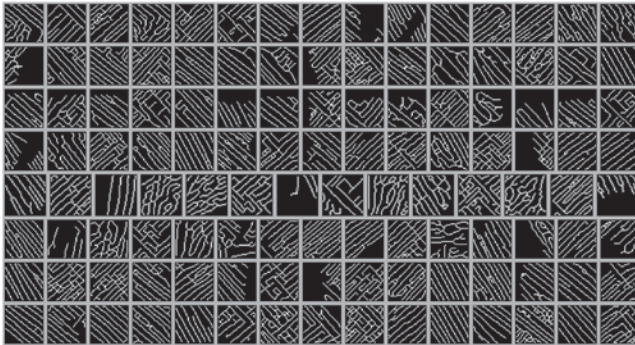


FIG. 139. Atgūto skeletu piemērs attēlam pēc apgriešanas līdz CZ maskai, kas atbilst Attēlam 135(e). Šis gadījums atbilst Attēliem 133 un 135.

Lai mazinātu šo problēmu, katram reģionam tiek piemērots Algoritms 19 (soļi vizualizēti [223]). Lai gan rezultātos ir noteiktas nepilnības un reģionu skeletos kopumā var tikt zaudēts neliels informācijas daudzums, tika konstatēts, ka Algoritmam 19 piemēklēta parametru kopa ļauj atgūt daudz vairāk informācijas, kura citādi tiktu zaudēta. Tas ir ļoti skaidri parādīts Attēlos 140 un 141, kur var redzēt būtisku atšķirību starp pirms un pēc Algoritma 19 pielietošanas.

Kā redzams Attēlā 141, dažiem jaunažiem segmentiem joprojām nav skaidras orientācijas vai tā ir citādi neizšķirta, taču lielākā daļa informācijas, kura nav pieejama Attēlā 140, ir atgūta ar minimāliem zaudējumiem. Tagad var apkopot apstrādātos skenēšanas reģionus globālā skeletā, kas dod rezultātus, kas parādīti Attēlos 142 (atbilst Attēlam 141) un 143.

Lai gan Attēli 142 un 143 jau ir diezgan informatīvi, no rekonstruētajiem skeletiem var atgūt vēl vairāk informācijas. Var izmērīt orientācijas ( $\varphi$ ) spektru, aprēķinot relatīvās orientācijas frekvenci, nosverot pēc dendrīta

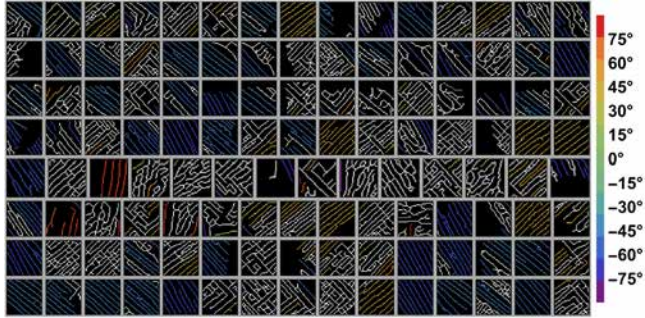


FIG. 140. Skenēšanas reģionu skeleti, kas parādīti Attēlā 139, iekrāsoti pēc to orientācijas attiecībā pret horizontālo attēla asi. Baltas krāsas segmenti ir neorientēti saskaņā ar kritērijiem, kas noteikti Algoritmā 19.

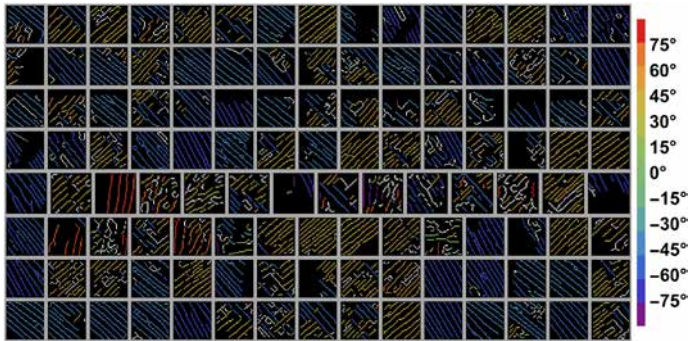


FIG. 141. Tie paši skeleti kā Attēlā 140 pēc Algoritma 19 pielietošanas katram skenēšanas reģionam. Krāsu shēma atbilst Attēlam 140.

segmentu garumiem, lai ņemtu vērā spraugas skenēšanas reģionu robežu dēļ un dendrīta pārtraukumus citu iemeslu dēļ. Piemērs ir parādīts Attēlā 144b, kur  $\varphi$  spektrs ir aprēķināts gadījumam, kas redzams Attēlā 143. Jāņem vērā, ka neorientēti dendrīta skeleti (melnā krāsā Attēlā 143b) netiek ieskaitīti spektrā. Var arī aprēķināt vidējo  $\varphi$  katram reģionam, lai iegūtu rupjāku, bet vienkāršotu pārskatu par to, kā dendrītu  $\varphi$  ir sadalīts pa FOV — tas ir parādīts Attēlā 144a. Turklāt, aprēķinot  $\varphi$  spektrus visai attēlu secībai, var novērot dinamiku laika gaitā. Katram kadram var aprēķināt arī statistiku par šķidruma dobumu (oranži apgabali Attēlā 143b) apgabaliem – to malu attiecību, orientācijām, utt., un vizualizēt to dinamiku. Tas pats attiecas uz kanāliem, kas sniedzas CZ (piemēram, Attēls 142b).



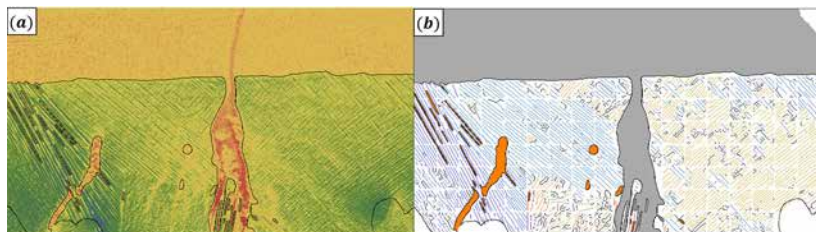


FIG. 142. CZ analīzes rezultāti attēlam no gadījuma, kas aplūkots Attēlā 141: (a) priekšapstrādāts attēls ar pārklātām CZ/SZ robežām (melnas kontūras, iekļauti attēla artefaktu apgabali) un (b) tās pašas CZ/CZ robežas ar dendrīta skeletiem (krāsoti pēc orientācijas, citādi melni, ja tie nav orientēti) un šķidrā metāla dobuma zonām (oranžā krāsā). Pelēkā zona (b) ir šķidrums virs SF un ar to savienotais šķidrā metāla kanāls. Orientācijas krāsu karte ir tāda, kā Attēlā 141.

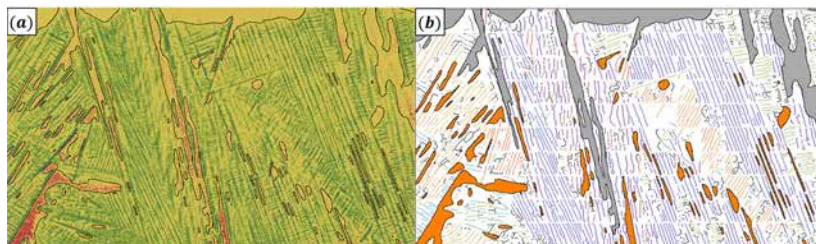


FIG. 143. Vēl viens CZ analīzes piemērs.

Svarīgi ir tas, ka  $\varphi$  spektrs, kas parādīts Attēlā 144b, vēlāk tiek izmantots DSG procedūrā (Algoritms 20), ko izmanto, lai sadalītu globālo dendrītu skeletu, kas redzams Attēlā 143, graudos. Šī procesa piemērs ir parādīts Attēlā 145. Attēls 145a ir Attēls 143b, kurā ir noņemts viss fons un paliek tikai dendrīti — šeit parādīta tikai intensīvākā  $\varphi$  spektra virsotne, kas atbilst Attēlam 144b. (b) var redzēt segmentus ar  $\varphi$  atlasītā  $\varphi$  piķa intervālā (Algoritms 20), un (c) parāda binarizācijas rezultātu, izmantojot krāsu telpas attālums. Pēc tam graudu maskas tiek konstruētas, izmantojot noslēgšanas transformāciju un rezultātam pielieto filtrēšanu pēc segmentu izmēra, kā rezultātā tiek iegūtas graudu maskas, kā parādīts (d). Šīs darbības tiek veiktas katram globālā  $\varphi$  spektra maksimumam, kas izdzīvo pēc spektra trokšņu un piķu intensitātes filtrēšanas (Algoritms 20). Citi DSG piemēri ir parādīti [223].

Kad ir pabeigta precizētā skenēšana un graudu tīrīšana, iegūtos graudus (gan to maskas, gan dendrīta segmentus) var salikt FOV ietvaros – piemēri

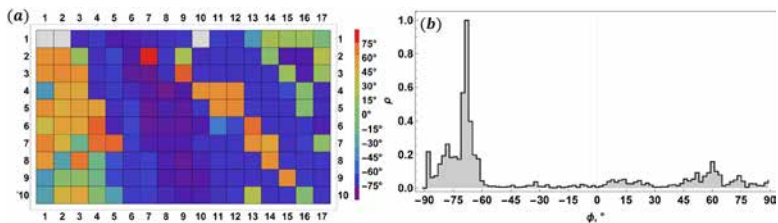


FIG. 144. (a) Mediānas dendrītu orientācijai  $\varphi$  (gadījums Attēlā 143) un (b) orientācijas spektrs rekonstruētajam dendrīta skeletam, izņemot neorientētos segmentus.

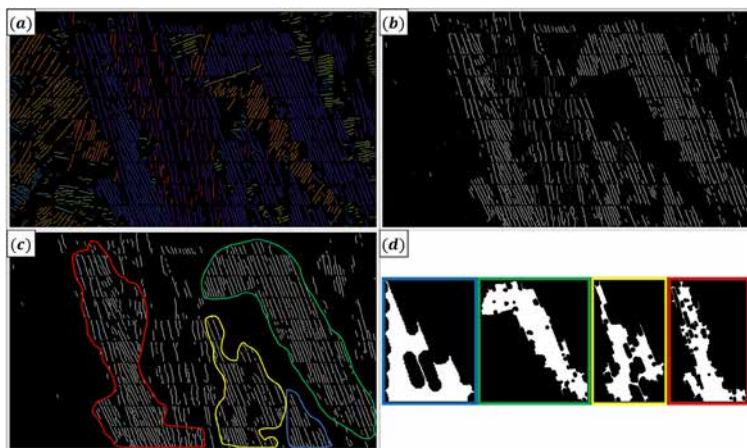


FIG. 145. DSG process (Algoritms 20): (a) globālais dendrīta skelets ar noņemtiem neorientētiem segmentiem, iekrāsots pēc orientācijas, kā parādīts Attēlā 143b, (b) dendrīta skeleta segmenti, kas konstatēti ap galveno orientācijas spektra maksimumu, kas redzams Attēlā 144b, ar pelēktoņu krāsu karti, kas attēlo attālumu līdz pīķim krāsu telpā katram segmentam, (c) segmenti no (b) pēc krāsu telpas attāluma filtra ar aptuvenām kontūrām četriem atklātajiem graudiem, (d) maskas atklātajiem dendrīta graudiem, kas atbilst (c) norādītajam.

ir parādīti Attēlos 146 un 147. Attēlā 146 un jo īpaši (b) redzams, ka atklātie graudi patiešām veido dominējošās dendrītu kopas ar saskaņotām (pietiekami līdzīgām)  $\varphi$  kopām. Jāņem vērā arī ka (a) ar šķidrums dobumiem atdalītie graudi (piemēram, FOV augšējais kreisais stūris un apakšējā labā daļa) ir pareizi atdalīti savā starpā, pat tie, kuriem ir pietiekami līdzīgi  $\varphi$ . Tas ir tāpēc, ka graudu attīrīšanas procesā tiek ņemti vērā

šķidrie dobumi. Redzams, ka konstatētie dendrīta skeleti atbilst ainavai, kas redzama (b) fonā.

Tas pats attiecas uz Attēlu 147, kur (a) var redzēt melnas krāsas skeletu kopu, kas apzīmēta kā nenoteikta, t.i., tā noteikti nepieder nevienam no diviem blakus esošajiem graudiem, un ir apzīmēta kā pārejas zona. Tas ir tāpēc, ka abi graudi atrodas ļoti tuvu šim apgabalam, un dendrītu  $\varphi$  šajā zonā ir kaut kur starp vidējo  $\varphi$  abiem attiecīgajiem graudiem. Varētu šķīst, ka viena no (a) graudiem apakšējā daļa, kas izcelta ar gaiši zilu krāsu, ir jāuzskata par atsevišķu mazāku graudu, jo garie diagonālie dobumi to sadala divās daļās. Tomēr (b) var skaidri redzēt, ka tie faktiski ir savienoti caur vienu no dendrītiem, kas savieno šauru plaisu starp diviem šķidra metāla dobumiem. Līdzīga situācija attiecas uz graudiem, kas Attēlā 146a ir iezīmēti ar gaiši sarkanu krāsu. Ja Attēlā 146b un 147b tiek novērotas dažas nelielas graudu kopas ar līdzīgiem  $\varphi$ , kuras tika izņemtas DSG procesā, tad šie graudi, visticamāk, ir zem izmēra sliekšņa. Protams, vienmēr var attiecīgi pielāgot iestatījumus, ja ir nepieciešams paturēt mazākus graudus.

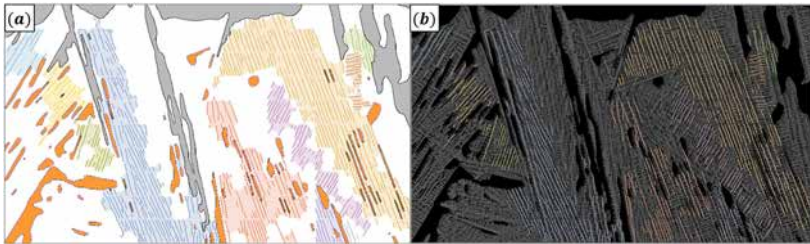


FIG. 146. DSG rezultāti gadījumam, kas atbilst Attēlam 145: (a) dendrītu segmenti, kas iekrāsoti pēc graudu ID ar graudu maskas pārklājumiem, un ar oranžiem laukumiem, kas attēlo šķidrā metāla dobumus, un lielapjoma šķidrumu ar kanāliem, kas izcelti kā pelēkā zonas, un (b) graudu dendrītu skeletu pārklājums. Fons (b) ir priekšapstrādāts attēls (Algoritms ??, kam seko tā inversija, bezetalona PLK, CTM, normalizācija un asināšana) ar maskētu SZ.

Kad dominējošie graudi ir detektēti, var noteikt to relatīvos laukumus (attiecībā pret CZ apgabalu) un  $\varphi$  statistiku, kas parādīts Attēlā 148 gadījumam, kas redzams Attēlā 147. Atkal jāatzīmē, ka to var izdarīt visiem vai atlasītajiem kadriem attēlu secībā, lai novērotu graudu veidošanās dinamiku, fragmentāciju, un to statistikas izmaiņas.

### c Sacietēšanas frontes dinamika

Papildus iepriekšminētajam, iegūstot SF, tagad var aplūkot tā dinamiku. Attēlā 149 parādīts, kā SF augstums virs šūnas gar to platumu laika gaitā

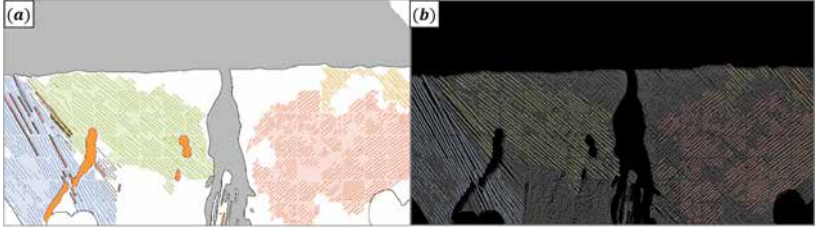


FIG. 147. DSG rezultāti gadījumam, kas aplūkots Attēlā 142. Var redzēt pārejas zonu (melnas krāsas dendrīta segmentus) (a) starp diviem graudiem pa kreisi.

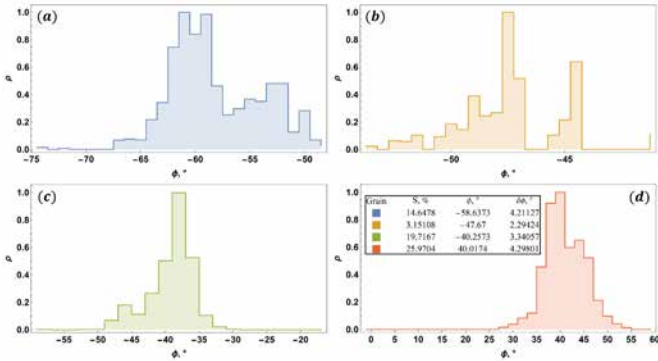


FIG. 148. Dendrīta orientācijas  $\varphi$  spektri graudiem, kas identificēti, izmantojot DSG procesu, kā parādīts Attēlā 147. Krāsas grafikos (a-b) atbilst graudu krāsām Attēlā 147. Tabula (d) parāda graudu laukuma daļu  $S$  (attiecībā pret CZ maskas laukumu), vidējo dendrītu orientāciju  $\varphi$  un tās standartnovirzi  $\delta\varphi$ .

mainās vienā no gadījumiem, kas atrodami [223], SF virzoties vertikāli uz augšu un CAF palielinoties. Tas zināmā mērā satur arī informāciju par formu. Ja pēdējais neinteresē vai ir nepieciešama nepārtrauktāka dinamikas vizualizācija, var generēt vizualizāciju, kā parādīta Attēlā 150, kur krāsa kodē SF augstumu un tās izmaiņas laikā un šūnas platumā visai attēlu secībai.

Attēlu 150 iegūst, pielietojot mediānas filtru frontes augstuma matricai. Pēc tam iegūto matricu var izmantot, lai aprēķinātu momentānā SF izplatīšanās ātruma matricu, kas parādīta Attēlā 151. Ātruma gadījumā tiek veikta anomālo pikseļu izņemšana un *bilateral* filtrēšana (parametri norādīti [223]). Ja interesē vidējā dinamika, to var viegli iegūt no iepriekš minētajām matricām. Atbilstošie rezultāti ir redzami Attēlā 152.

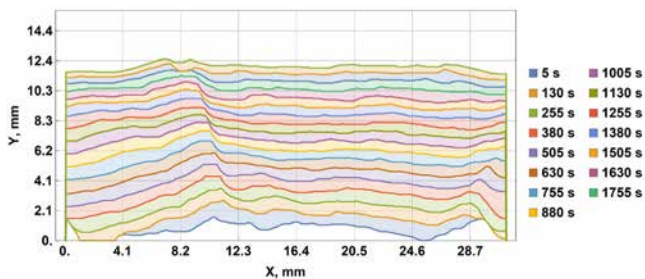


FIG. 149. SF augstums  $Y$  gar šūnas platumu  $X$  dažādos laika momentos (laika vertības pa labi).

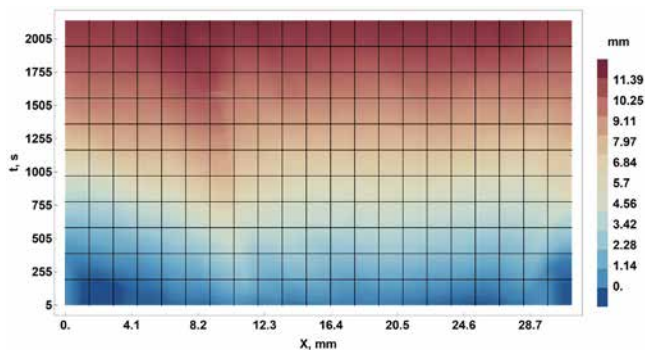


FIG. 150. SF augstums (krāsu atšifrējums pa labi) gar šūnas platumu  $X$  un laikā  $t$  gadījumā, kas parādīts Attēlā 149.

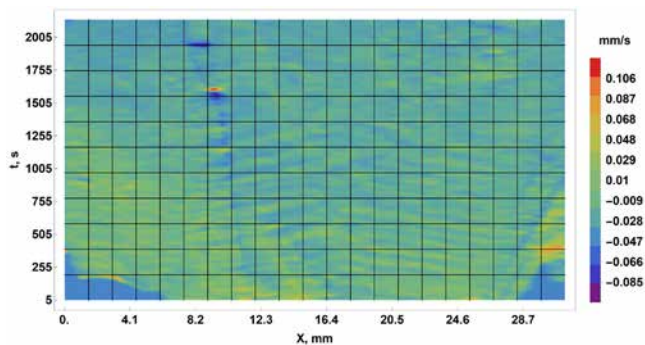


FIG. 151. SF vertikālais ātrums (krāsu kodēts, atšifrējums pa labi) gar šūnas platumu  $X$  un laikā  $t$ .

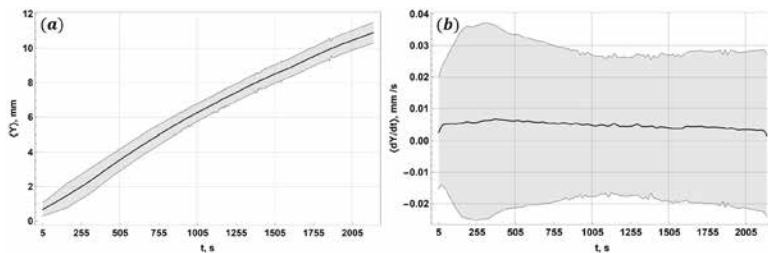


FIG. 152. Vidējā SF dinamika pār šūnas platumu: (a) augstums  $\langle Y \rangle$  un (b) vertikālais ātrums  $\langle dY/dt \rangle$  laika gaitā  $t$ .

Izšķīdinātās vielas koncentrāciju var izmērīt virs SF, kā paskaidrots Algoritmā 22, un attēlot dažādās vietās gar šūnas platumu laika gaitā, kas parādīts Attēlā 153.

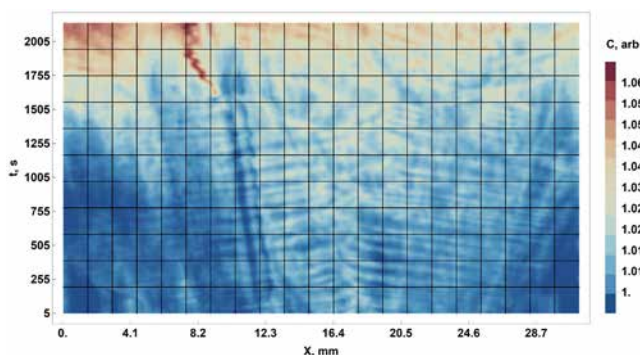


FIG. 153. Šķīduma koncentrācijas dinamika virs SF un gar šūnas platumu  $X$  laika gaitā  $t$ . Koncentrāciju izsaka ar attēla spilgtumu (atbilst  $Ga/In$  koncentrācijai saskaņā ar Beer-Lambert likumu) relatīvās vienībās (attiecībā uz sākotnējo kadru pēc Algoritma 22 piemērošanas), kura ir kodēta ar krāsu, kā parādīts krāsu joslā pa labi.

Jāpievērš uzmanību maksimumam, kas redzams  $X \in (8.2; 12.3)$  mm un  $t \in (1505; 1755)$  s robežās, kas atbilst ātrai kanāla atvēršanai pie SF. Attēls 22 parāda pēkšņu ļoti koncentrētas "pēdas" parādīšanos tajā pašā reģionā, kur ir ātruma minimums/maksimums Attēlā 151. Kad šķidrā metāla dobums šķērso SF un veidojas kanāls, konsekventi tiek konstatēta daudz lielāka rentgenstaru transmisija, kā tam vajadzētu būt, kas nozīmē palielinātu gallija koncentrāciju. Maksimuma nobīde pa kreisi notiek sakarā

ar kanāla izejas vietas maiņu pie SF, ko izraisa pārkausēšana. Jāatzīmē arī joslu struktūru pie  $t \lesssim 1500$  — tie nav artefakti datu apstrādes rezultātā, bet gan fizikālās koncentrācijas svārstības virs SF, kā arī SF fluktuāciju rezultāts.

#### d Konvektīvo spalvu segmentācija

Visbeidzot, var analizēt to, kas notiek virs SF, tas ir iekš SZ, tālāk aplūkojos konvekcijas plūsmas struktūras, izmantojot Algoritmu 23. Tā pielietošanas rezultāti dažādos gadījumos ir parādīti Attēlos 154-155. Tāpat kā ar koncentrācijas mērījumiem tieši virs SF, buferzonas maska ir paredzēta, lai novērstu traucējumus, kas potenciāli izriet no dendrīta galiem, kas parasti var rasties virs SF zema STA/KTA attēliem. Turklāt artefaktu apgabali ir jāizslēdz, jo jebkurai tur esošajai informācijai nav nozīmes. Dotie piemēri padara acīmredzamu, ka kods veiksmīgi segmentē konvektīvās spalvas dotajos gadījumos, un lielā mērā saglabā to formas, neskatoties uz skaidri redzamo lielgraudaino troksni.

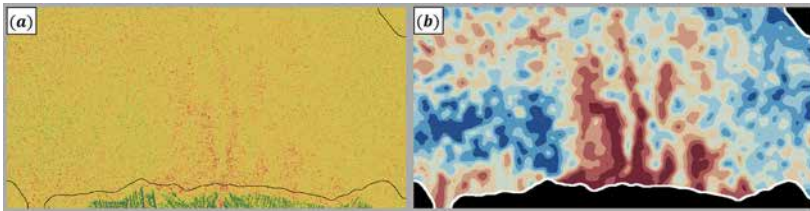


FIG. 154. Ar galliju bagāto konvektīvo spalvu analīze SZ virs SF (Algoritms 23): (a) priekšapstrādāts attēls ar buferzonas kontūrām (melnās līnijas), kas izstieptas no SF un artefaktiem (piemēram, apakšējais kreisais un augšējais labais stūris) un (b) konvektīvās spalvas, kas segmentētas un izceltas ārpus buferzonas (melni apgabali ar baltām robežām). Līmeņu kopas, kas sastāda spalvas, ir iekrāsotas pēc attēla spilgtuma (atbilstoši izšķīdušās vielas koncentrācijai). Krāsu shēma ir tāda, kā Attēlā 153. Šis gadījums sīkāk apspriests [223]. Parādītais kadrs ir tuvu attēlu secības sākumam, kur kovekcijas spalvas ir visintensīvākās.

Šim vairāku spilgtuma līmeņu attēlojumam kopā ar morfoloģisko analīzi, kas parādīta Attēlā 135, kā arī SF dinamiku un CZ analīzi, ir jānodrošina daudz detaļu, kas ļauj veikt padziļinātu analīzi un fizikālo interpretāciju sacietēšanas procesu pētījumosa, izmantojot eksperimentālās pieejas, kas principā ir līdzīgas šeit aplūkotajai. Ir vērts atzīmēt, ka tas, ko var redzēt iepriekš radītajos apakšattēlos (a) ir ar mērķtiecīgi pazeminātu STA. Ņemot vērā (b) redzamos rezultātus, augstākam STA var sagaidīt vēl labākus rezultātus. Tas, protams, attiecas arī uz CZ analīzi.

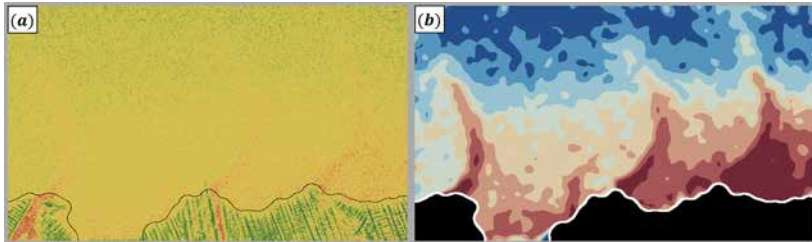


FIG. 155. Vēl viens SZ segmentēto konvektīvo spalvu piemērs. Šeit tiek parādīts agrīnais kadrs no attēlu secības, kas atbilst Attēlam 146.

#### 4. Kopsavilkums

Tika demonstrēts gana adaptīvs un pret trokšņiem izturīgs attēlu apstrādes kods metālu sakausējumu virzītas sacietēšanas procesu analīzei laboratorijas mēroga eksperimentos, izmantojot Hele-Šova šķidro metālu šūnas un dinamisko rentgena radiogrāfiju. Šobrīd izstrādātā metodika ļauj segmentēt šķidrās un sacietējušās zonas redzes laukā, noteikt struktūru skeletus cietajā zonā, veikt orientācijas analīzi, noteikt dominējošos dendrītu graudus (ja tādi ir), kvantitatīvi noteikt sacietēšanas frontes dinamiku un izšķīdušās vielas koncentrāciju virs tās, konstatēt un atdalīt šķidra metāla kanālus un dobumus, kā arī segmentēt un raksturot konvekcijas plūsmu šķidruma zonā. Pat ar mākslīgi pazeminātu STA, kods darbojās droši, un demonstrētā veikspēja ir tāda, ka ir iespējama attēlu padziļināta fizikālā analīze.

Kods apvieno gan jau esošās, gan oriģinālās metodes, tostarp tās, kas izstrādātas burbuļu un daļiņu plūsmas analīzei (Sadaļas II A 2 b un IID), un ir atvērtā koda, pieejams *GitHub*: Mihails-Birjukovs/Meso-scale\_Solidification\_Analysis.



### III. Secinājumi & perspektīvas

Darba galvenais mērķis bija izstrādāt metodes, kas nepieciešamas burbuļu un daļiņu plūsmas fizikālai analīzei šķidrā metālā, kā arī metālu sakausējumu sacietēšanas izpētei. Tas nozīmēja izmantot visperspektīvākās no pašlaik pieejamajām eksperimentālajām pieejām un sagraut barjeru starp eksperimentālo/skaitlisko datu iegūšanu un sistēmas dinamikas fizikālu interpretāciju. Šī darba rezultātus var apkopot šādi:

1. Tika uzlabotas iepriekš aprakstītas eksperimentālās pieejas, un tika parādīts, ka dinamiskā neitronu radiogrāfija (NR) patiešām ir iespējama burbuļu plūsmas attēlveidošanai šķidrā metālā biežās modeļu sistēmās un to var izmantot *kvantitatīvās* analīzes veikšanai. NR ļauj novērot dažādu gāzes plūsmas ātrumu un pieliktā magnētiskā lauka (ML) ietekmi uz burbuļa ķēdes formu, kā arī burbuļu trajektoriju un formas dinamiku. Rezultāti ir ne tikai fizikāli adekvāti, bet tika apstiprināti arī gan netieši, salīdzinot ar skaitliskām simulācijām, gan tieši, veicot NR etalona objektiem, emulējot burbuļu detektēšanu.
2. Iepriekšminētais tika paveikts, izmantojot izstrādāto attēlu apstrādes metodiku, apvienojot gan esošās, gan oriģinālās metodes, kas ļāva detektēt burbuļus attēlos ar zemu signāla-trokšņa attiecību (STA). Ir paredzēts, ka izstrādātais kods un/vai atsevišķi tā elementi būs gana plaši pielietojami ārpus šī darba un tā konteksta.
3. Šobrīd, pat ar ierobežotu eksperimentālo datu daļas analīzi, tika parādīts, ka, atkarībā no ML konfigurācijas, veidojas radikāli atšķirīgi viena burbuļa un burbuļu ķēdes plūsmas režīmi. Piemēram, fiksētam plūsmas ātrumam, burbuļi ķēdē var uzrādīt gandrīz nemainīgu, divpakāpju vai vienpakāpju nevienmērīgu paātrinājumu, katrā gadījumā ar ievērojami atšķirīgām trajektorijām, un ātruma un formas dinamiku. Arī burbuļu ķēdes formas var diezgan krasi atšķirties. Tas ir skaidrs pierādījums tam, ka burbuļu plūsmas kontrole ar ML, ar rūpnieciski nozīmīgiem bezdimensiju parametriem, ir perspektīvs koncepts.
4. Uzkrātā neitronu attēlu datu kopa ir pirmā šajā jomā, kas sistemātiski aptver rūpnieciski nozīmīgu (*Re, Eo, N*) parametru telpas reģionu burbuļu ķēdes plūsmas modeļu sistēmām gan ar vertikāli, gan ar horizontāli vērstu ML. Plānots turpināt datu apstrādi un sistemātiski pētīt pielietotās horizontālā un vertikālā ML ar dažādu stiprumu ietekmi uz burbuļu ķēdes plūsmu taisnstūrveida šķidrā gallija traukā. Tiks pētīta burbuļu forma un kustības parametri dažādām ML konfigurācijām un gāzes plūsmas ātrumiem, un tiks iegūtas korelācijas

ar Reinoldsa ( $Re$ ), Eötvesa ( $EO$ ) un Stjuarta ( $N$ ) skaitļiem. Tam vajadzētu ļaut aprakstīt un paredzēt burbuļu ķēdes nestabilitātes, kas rodas dažādos apstākļos.

5. Tika veikti arī papildu NR eksperimenti ar īpaši augstu kadru ātrumu (līdz 800 kadriem sekundē), lai vēlāk tos izmantotu kā etalonus burbuļu formas dinamikas skaitliskai modelēšanai, kā arī eksperimentālās datu analīzes rīku tālākai izstrādei.
6. Burbuļu ķēdes plūsmas attēlveidošana tika veikta arī izmantojot rentgenstaru rentgenogrāfiju (RR) Hele-Šova variantiem biežākam modeļu sistēmām, kas tika attēlotas ar NR, ar identiskām ML konfigurācijām un atbilstošiem plūsmas ātruma diapazoniem. Iegūtie attēli veido unikālu datu kopu, kas sistemātiski aptver ģeometriski ierobežotu burbuļu ķēdes plūsmu un burbuļu kolektīvo dinamiku. Tika ieviests attēlu apstrādes kods, lai izšķirtu ļoti cieši aglomerētus burbuļus ar ievērojamām neregulārām deformācijām. Lai kvantitatīvi noteiktu formas dinamiku, tika ieviests formas analīzes algoritms. Uzkrātos datus plānots apstrādāt, lai sistemātiski pētītu burbuļu kolektīvo dinamiku dažādās ML konfigurācijās, kas līdz šim vēl nav darīti. Plānots arī apvienot formas analīzes algoritmu ar objektu izsekošanu un optiskās plūsmas ātruma mērījumiem, lai izmērītu burbuļu formas deformācijas ātrumu, kas ļaus padziļināti analizēt burbuļu savstarpējo mijiedarbību un pieliktā ML ietekmi.
7. Lai rekonstruētu burbuļu trajektorijas no attēlu datiem tālākai fizikālai analīzei, tika izstrādāts objektu izsekošanas algoritms MHT-X (netiešsaistes vairāku hipotēžu izsekošana ar Algoritmu X), kas tika demonstrēts kā efektīvs un daudzpusīgs rīks, kas var darboties pat pie spēcīga datu trokšņa un veiksmīgi apstrādāt gadījumus ar burbuļu plūsmu, kad notiek sadalīšanās un saplūšana, izmantojot masas un impulsa saglabāšanas likumus vājā formā kustības prognozēšanai. Paredzams, ka MHT-X atradīs daudz vairāk pielietojumu zinātnieku aprindās, pateicoties tā vispārīgumam un modularitātei. Jāatzīmē, ka šī ir pirmā ziņotā skaitliski praktiska MHT implementācija netiešsaistes izsekošanai, kas ir lieliski piemērota zinātniskiem mērķiem.
8. Augsta kadru ātruma NR, jaunizstrādātas attēlu apstrādes metodikas un paplašinātas MHT-X versijas kombinācija pirmo reizi ir ļāvusi veiksmīgi detektēt un izsekot daļiņas NR attēlos ar daļiņām piesātinātu šķidro metāla plūsmu. MHT-X variants daļiņu izsekošanai var arī rekonstruēt globālo nepārtrauktas plūsmas ātruma lauku no iegūtajiem daļiņu izsekošanas velocimetrijas datiem, izmantojot bezdivergences interpolāciju.

9. Izmantojot iepriekš minētās izstrādnes, tika veikti pirmie veiksmīgie turbulences telpisko un laika raksturlielumu mērījumi no NR attēliem, kas iegūti no daļiņu plūsmas šķidrā metālā, un ir verificēta ieviesta attēlu apstrādes pieeja un MHT-X kods. Īpaši svarīga bija trajektoriju liekuma varbūtības blīvuma funkcijas rekonstrukcija, kas ir turbulences enerģijas spektra attēlojums. Tādējādi ir sagaidāms, ka iepriekš minētajām metodēm būs svarīga loma turpmākajā burbuļu un daļiņu plūsmas, kā arī šķidro metālu turbulences izpētē, un ne tikai. Jo īpaši ir plānots izpētīt burbuļu astes plūsmu, izmantojot daļiņu izsekošanas ātruma mērījumus kombinācijā ar NR.
10. Tika izstrādāts pret troksni noturīgs un atmiņas ekonomisks kods, kas veic sadalīšanu dinamiskajās modās (SDM). Tas tika pielietots burbuļu plūsmas skaitliskās simulācijas izvadei, lai aprēķinātu ātruma lauka modas. SDM atklāja vairākus svarīgus burbuļu plūsmas aspektus: neskatoties uz kopējo plūsmas stabilizāciju ar ML, sistēma izrādās ļoti jutīga pat pret nelielu ML asimetriju, un plūsma tiek destabilizēta pie mazākiem gāzes plūsmas ātrumiem nekā būtu sagaidāms; burbuļu ķēdes stabilitāti var kvantitatīvi noteikt, pārbaudot saistītas modas, un var noteikt ķēdes plūsmas kohērences garumu (stabilitātes augstumu); burbuļplūsmu var sadalīt dažādos impulsa pārnese mehānismos, t.i., var identificēt virpuļu atrašanās modas; var redzēt, ka liela mēroga sistēmas modas modulē burbuļa astes plūsmas modas; turpretim var redzēt, ka nesakārtotākas burbuļu astes plūsmas modas izplata nestabilitātes lielākos plūsmas mērogos.
11. Nākotnē ir plānots piemērot SDM augstākas izšķirtspējas simulācijām, lai pētītu smalkākus telpiskos un laika mērogus plūsmas laukā. Turklāt SDM tiks veikta burbuļu formas svārstībām, lai novērotu, kā ML pielikšana ietekmē virsmas modas. Tas ir interesanti, jo tas ievērojami nosaka individuālo un kolektīvo burbuļu dinamiku. Jāņem vērā, ka demonstrētais SDM pielietojums (atklātā veidā izšķirto) burbuļu plūsmas simulācijām ir pirmais sava veida sasniegums/mēģinājums.
12. Vismaz daļēji ir atrisināta problēma, ka ļoti trūka pietiekami universāla/viss-vienā attēlu apstrādes koda, lai analizētu metālu sakausējumu virzītas sacietēšanas procesu rentgena attēlus. Implementētais (un atvērtās pieejas) kods nodrošina lielāko daļu nepieciešamās funkcionalitātes, apvienojot gan zināmās, gan jaunās metodes. Ir sagaidāms, ka tas būs ļoti vērtīgs pētniekiem sakausējumu sacietēšanas izpētes jomā, bet arī potenciāli ārpus šī konteksta.
13. Visbeidzot, kā solīts, visas izstrādātās metodes, kas ietver attēlu apstrādi dinamiskai NR un RR burbuļu un daļiņu plūsmai šķidrā metālā

un metālu sakausējumu sacietēšanai, burbuļu un daļiņu izsekošanu (MHT-X), burbuļu formas analīzi un SDM, padarītas publiski pieejamas atvērtā koda repositorijos *GitHub*:

- Mihails-Birjukovs/Low\_C-STA\_Bubble\_Detection
- 4n515/X-ray-bubble-detection
- Mihails-Birjukovs/Bubble\_shape\_analysis
- Mihails-Birjukovs/Low\_C-STA\_Particle\_Detection
- Peteris-Zvejnieks/MHT-X
- Peteris-Zvejnieks/DivergenceFreeInterpolation
- Divergence-Free-Interpolant PyPi
- MartinKlevs/PyDMD
- MartinKlevs/MOSES-SVD
- Mihails-Birjukovs/Meso-scale\_Solidification\_Analysis

Detalizēti pārskati par visām pamatā esošajām metodēm ir sniegti ar šo darbu saistītajās publikācijās [152, 153, 158, 182, 185, 213, 214, 223].

14. Izmantojot izstrādātās metodes un kodu, kopā ar uzkrātajām plašajām neitronu un rentgena attēlu datu kopām šķidro metālu sistēmām ar burbuļu un daļiņu plūsmu, kā arī sacietēšanu, mērķis ir pielietot jauno rīku komplektu, lai iegūtu fizikāli nozīmīgas korelācijas no datiem un sniegt jaunu ieskatu un sistemātisku izpēti attiecīgo modeļu sistēmu īpašībās. Turklāt šī promocijas darba gaitā eksperimentos un datu apstrādē uzkrātā pieredze un zināšanas ļaus izstrādāt nākamās paaudzes eksperimentālās metodes – piemēram, kombinētu vienlaicīgu RR vai NR ar ultraskaņas Doplera velocimetriju, un bezkontakta induktīvās plūsmas tomogrāfijas pielietoša burbuļu ķēdes plūsmas sistēmas.

- [1] E. Baake, T. Fehling, D. Musaeva, and T. Steinberg, Neutron radiography for visualization of liquid metal processes: bubbly flow for CO<sub>2</sub> free production of hydrogen and solidification processes in EM field, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **228**, 012026 (2017), publisher: IOP Publishing.
- [2] K. Timmel, S. Eckert, G. Gerbeth, F. Stefani, and T. Wondrak, Experimental modeling of the continuous casting process of steel using low melting point metal alloys — the LIMMCAST program, ISIJ International **50**, 1134 (2010).
- [3] K. Timmel, N. Shevchenko, M. Röder, M. Anderhuber, P. Gardin, S. Eckert, and G. Gerbeth, Visualization of liquid metal two-phase flows in a physical model of the continuous casting process of steel, Metallurgical and Materials Transactions B **46**, 700 (2015).
- [4] T. Wondrak, S. Eckert, G. Gerbeth, K. Klotsche, F. Stefani, K. Timmel, A. Peyton, N. Terzija, and W. Yin, Combined electromagnetic tomography for determining two-phase flow characteristics in the submerged entry nozzle and in the mold of a continuous casting model, Metallurgical and Materials Transactions B **42**, 1201 (2011).
- [5] C. Zhang, Liquid metal flows driven by gas bubbles in a static magnetic field (2009).
- [6] E. Strumpf, Experimental study on rise velocities of single bubbles in liquid metal under the influence of strong horizontal magnetic fields in a flat vessel, International Journal of Multiphase Flow **97**, 168 (2017).
- [7] C. Zhang, S. Eckert, and G. Gerbeth, Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a DC magnetic field, International Journal of Multiphase Flow **31**, 824 (2005).
- [8] Z. Wang, S. Wang, X. Meng, and M. Ni, Udv measurements of single bubble rising in a liquid metal galvanstn with a transverse magnetic field, International Journal of Multiphase Flow **94**, 201 (2017).
- [9] W. I. Shew, S. Poncet, and J.-F. Pinton, Force measurements on rising bubbles, Journal of Fluid Mechanics **569**, 51–60 (2006).
- [10] T. Richter, O. Keplinger, N. Shevchenko, T. Wondrak, K. Eckert, S. Eckert, and S. Odenbach, Single bubble rise in gainsn in a horizontal magnetic field, International Journal of Multiphase Flow **104**, 32 (2018).
- [11] S. Schwarz, An immersed boundary method for particles and bubbles in magnetohydrodynamic flows (2014).
- [12] S. Schwarz and J. Fröhlich, Numerical study of single bubble motion in liquid metal exposed to a longitudinal magnetic field, International Journal of Multiphase Flow **62**, 134 (2014).
- [13] K. Jin, P. Kumar, S. Vanka, and B. Thomas, Rise of an argon bubble in

- liquid steel in the presence of a transverse magnetic field, *Physics of Fluids* **28**, 093301 (2016).
- [14] J. Zhang and M.-J. Ni, Direct simulation of single bubble motion under vertical magnetic field: Paths and wakes, *Physics of Fluids* **26**, 102102 (2014).
- [15] J. Zhang, M.-J. Ni, and R. Moreau, Rising motion of a single bubble through a liquid metal in the presence of a horizontal magnetic field, *Physics of Fluids* **28**, 032101 (2016).
- [16] D. Gaudlitz and N. Adams, Numerical investigation of rising bubble wake and shape variations, *Physics of Fluids* **21** (2009).
- [17] X. Wang, B. Klaasen, J. Degreève, A. Mahulkar, G. Heynderickx, M.-F. Reyniers, B. Blanpain, and F. Verhaeghe, Volume-of-fluid simulations of bubble dynamics in a vertical hele-shaw cell, *Physics of Fluids* **28**, 053304 (2016).
- [18] V. Roig, M. Roudet, F. Risso, and A.-M. Billet, Dynamics of a high-reynolds-number bubble rising within a thin gap, *Journal of Fluid Mechanics* **707**, 444 (2012).
- [19] R. May, F. Gruy, and J. Fröhlich, Impact of particle boundary conditions on the collision rates of inclusions around a single bubble rising in liquid metal, *PAMM* **18**, 1 (2018).
- [20] J.-S. Kroll-Rabotin, M. Gisselbrecht, B. Ott, R. May, J. Fröhlich, and J.-P. Bellot, Multiscale simulation of non-metallic inclusion aggregation in a fully resolved bubble swarm in liquid steel, *Metals* **10**, 10.3390/met10040517 (2020).
- [21] J.-P. Bellot, J.-S. Kroll-Rabotin, M. Gisselbrecht, M. Joishi, A. Saxena, S. Sanders, and A. Jardy, Toward better control of inclusion cleanliness in a gas stirred ladle using multiscale numerical modeling, *Materials* **11**, 10.3390/ma11071179 (2018).
- [22] M. Gisselbrecht, J.-S. Kroll-Rabotin, and J.-P. Bellot, Aggregation kernel of globular inclusions in local shear flow: application to aggregation in a gas-stirred ladle, *Metallurgical Research & Technology* **116**, 512 (2019).
- [23] G. Mougin and J. Magnaudet, Path instability of a rising bubble, *Physical Review Letters* **88**, 014502 (2002).
- [24] M. Tripathi, K. Sahu, and R. Govindarajan, Dynamics of an initially spherical bubble rising in quiescent liquid, *Nature Communications* **6**, 6268 (2015).
- [25] J. Zhang and M.-J. Ni, What happens to the vortex structures when the rising bubble transits from zigzag to spiral?, *Journal of Fluid Mechanics* **828**, 353 (2017).
- [26] D. Gaudlitz and N. Adams, Numerical investigation of rising bubble wake and shape variations, *Physics of Fluids* **21** (2009).
- [27] J. Zhang, K. Sahu, and M.-J. Ni, Transition of bubble motion from spiralling to zigzagging: A wake-controlled mechanism with a transverse magnetic field, *International Journal of Multiphase Flow* **136**, 103551 (2020).
- [28] J. Will, V. Mathai, S. Huisman, D. Lohse, C. Sun, and D. Krug, Kinematics and dynamics of freely rising spheroids at high reynolds numbers, *Journal*

- of Fluid Mechanics **912**, A16 (2021).
- [29] O. Keplinger, N. Shevchenko, and S. Eckert, Experimental investigation of bubble breakup in bubble chains rising in a liquid metal, *International Journal of Multiphase Flow* **116**, 39 (2019).
- [30] O. Keplinger, N. Shevchenko, and S. Eckert, Visualization of bubble coalescence in bubble chains rising in a liquid metal, *International Journal of Multiphase Flow* **105**, 159 (2018).
- [31] T. Ziegenhein and D. Lucas, Observations on bubble shapes in bubble columns under different flow conditions, *Experimental Thermal and Fluid Science* **85** (2017).
- [32] T. Haas, C. Schubert, M. Eickhoff, and H. Pfeifer, A review of bubble dynamics in liquid metals, *Metals* **11**, 664 (2021).
- [33] Z. Liu and B. Li, Large-eddy simulation of transient horizontal gas–liquid flow in continuous casting using dynamic subgrid-scale model, *Metallurgical and Materials Transactions B* (2017).
- [34] W. Yang, Z. Luo, N. Zhao, and Z. Zou, Numerical analysis of effect of initial bubble size on captured bubble distribution in steel continuous casting using euler-lagrange approach considering bubble coalescence and breakup, *Metals* **10**, 1160 (2020).
- [35] W. Yang, Z. Luo, Y. Gu, Z. Liu, and Z. Zou, Numerical analysis of effect of operation conditions on bubble distribution in steel continuous casting mold with advanced bubble break-up and coalescence models, *ISIJ International* **60(10)**, 2234 (2020).
- [36] M. Taborda, M. Sommerfeld, and M. Muniz, LES-Euler/Lagrange modelling of bubble columns considering mass transfer, chemical reactions and effects of bubble dynamics, *Chemical Engineering Science* **229**, 116121 (2021).
- [37] W. Lou and M. Zhu, Numerical simulation of desulfurization behavior in gas-stirred systems based on computation fluid dynamics–simultaneous reaction model (CFD–SRM) coupled model, *Metallurgical and Materials Transactions B* **45**, 1706 (2014).
- [38] Y. Liu, M. Ersson, H. Liu, P. Jönsson, and Y. Gan, A review of physical and numerical approaches for the study of gas stirring in ladle metallurgy, *Metallurgical and Materials Transactions B* **50** (2018).
- [39] Q. Cao and L. Nastac, Numerical modelling of the transport and removal of inclusions in an industrial gas-stirred ladle, *Ironmaking & Steelmaking* **45**, 1 (2018).
- [40] R. Morales, F. A. Calderon Hurtado, K. Chattopadhyay, and S. Guarneros, Physical and mathematical modeling of flow structures of liquid steel in ladle stirring operations, *Metallurgical and Materials Transactions B* **51** (2020).
- [41] E. Ramasetti, V.-V. Visuri, P. Sulasalmi, T. Palovaara, A. Gupta, and T. Fabritius, Physical and CFD modeling of the effect of top layer properties on the formation of open-eye in gas-stirred ladles with single and dual-plugs, *steel research international* **90** (2019).
- [42] A. Nguyen and H.-J. Schulze, *Colloidal science of flotation* (2004).
- [43] M. Fuerstenau, R.-H. Yoon, and G. Jameson, *Froth flotation: A century*

- of innovation (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, Colo., Ix, 2007).
- [44] A.-E. Sommer, M. Nikpay, S. Heitkam, M. Rudolph, and S. Eckert, A novel method for measuring flotation recovery by means of 4D particle tracking velocimetry, *Minerals Engineering* **124**, 116–122 (2018).
- [45] M. Amoorezaei, S. Gurevich, and N. Provatas, Orientation selection in solidification patterning, *Acta Materialia* **60** (2012).
- [46] A. Kao, N. Shevchenko, S. He, P. Lee, S. Eckert, and K. Pericleous, Magnetic effects on microstructure and solute plume dynamics of directionally solidifying Ga-In alloy, *JOM* **72** (2020).
- [47] D. Stefanescu and R. Ruxanda, *Fundamentals of solidification* (2004) pp. 71–92.
- [48] C. Beckermann, Modelling of macrosegregation: Applications and future needs, *International Materials Reviews* **47**, 243 (2002).
- [49] R. Reed, T. Tao, and N. Warnken, Alloys-by-design: Application to nickel-based single crystal superalloys, *Acta Materialia* **57**, 5898 (2009).
- [50] J. D. Madison, Investigation of solidification defect formation by three-dimensional reconstruction of dendritic structures (2010).
- [51] P. Auburtin, T. Wang, S. Cockcroft, and A. Mitchell, Freckle formation and freckle criterion in superalloy castings, *Metallurgical and Materials Transactions B* **31**, 801 (2000).
- [52] C. Beckermann, J. Gu, and W. Boettinger, Development of a freckle predictor via rayleigh number method for single-crystal nickel-base superalloy castings, *Metallurgical and Materials Transactions A* **31**, 2545 (2000).
- [53] A. Saad, C.-A. Gandin, M. Bellet, N. Shevchenko, and S. Eckert, Simulation of channel segregation during directional solidification of In—75 wt pct Ga. qualitative comparison with in situ observations, *Metallurgical and Materials Transactions A* (2015).
- [54] N. Shevchenko, S. Boden, G. Gerbeth, and S. Eckert, Chimney formation in solidifying Ga-25wt pct In alloys under the influence of thermosolutal melt convection, *Metallurgical and Materials Transactions A* **44** (2013).
- [55] M. Asta, C. Beckermann, A. Karma, W. Kurz, R. Napolitano, M. Plapp, G. Purdy, M. Rappaz, and R. Trivedi, Solidification microstructures and solid-state parallels: Recent developments, future directions, *Acta Materialia* **57**, 941 (2009).
- [56] T. Haxhimali, A. Karma, F. Gonzales, and M. Rappaz, Orientation selection in dendritic evolution, *Nature materials* **5**, 660 (2006).
- [57] J. Strickland, B. Nenchev, and H. Dong, On directional dendritic growth and primary spacing—a review, *Crystals* **10**, 627 (2020).
- [58] J. Ramirez and C. Beckermann, Evaluation of a rayleigh-number-based freckle criterion for Pb-Sn alloys and Ni-base superalloys, *Metallurgical and Materials Transactions A* **34**, 1525 (2003).
- [59] N. Shevchenko, O. Keplinger, O. Sokolova, and S. Eckert, The effect of natural and forced melt convection on dendritic solidification in Ga-In alloys, *Journal of Crystal Growth* **417** (2015).
- [60] N. Shevchenko, H. Neumann-Heyme, C. Pickmann, E. Schaberger-



- Zimmermann, G. Zimmermann, K. Eckert, and S. Eckert, Investigations of fluid flow effects on dendritic solidification: Consequences on fragmentation, macrosegregation and the influence of electromagnetic stirring, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **228**, 012005 (2017).
- [61] D. Anderson and P. Guba, Convective phenomena in mushy layers, Annual Review of Fluid Mechanics **52** (2020).
- [62] P. Soar, A. Kao, G. Djambazov, N. Shevchenko, S. Eckert, and K. Pericleous, The integration of structural mechanics into microstructure solidification modelling, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **861**, 012054 (2020).
- [63] B. Cai, A. Kao, E. Boller, O. Magdysyuk, R. Atwood, N. T. Vo, K. Pericleous, and P. Lee, Revealing the mechanisms by which magneto-hydrodynamics disrupts solidification microstructures, Acta Materialia **196** (2020).
- [64] S. He, N. Shevchenko, and S. Eckert, In situ observation of directional solidification in Ga-In alloy under a transverse dc magnetic field, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **861**, 012025 (2020).
- [65] S. Eckert, P. Nikrityuk, B. Willers, D. Raebiger, N. Shevchenko, H. Neumann-Heyme, V. Travnikov, S. Odenbach, A. Voigt, and K. Eckert, Electromagnetic melt flow control during solidification of metallic alloys, The European Physical Journal Special Topics **220**, 123 (2013).
- [66] F. Stefani, T. Gundrum, and G. Gerbeth, Contactless inductive flow tomography, Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics **70**, 056306 (2004).
- [67] T. Gundrum, G. Gerbeth, F. Stefani, and M. Xu, Experimental aspects of contactless inductive flow tomography, Magnetohydrodynamics **42**, 153 (2006).
- [68] T. Vogt, A. Andruszkiewicz, S. Eckert, K. Eckert, S. Odenbach, and G. Gerbeth, Mixing enhancement in gas-stirred melts by rotating magnetic fields, Metallurgical and Materials Transactions B **43**, 1454 (2012).
- [69] O. Keplinger, N. Shevchenko, and S. Eckert, Validation of X-ray radiography for characterization of gas bubbles in liquid metals, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **228**, 012009 (2017).
- [70] L. Liu, O. Keplinger, T. Ziegenhein, N. Shevchenko, S. Eckert, H. Yan, and D. Lucas, Euler-euler modeling and X-ray measurement of oscillating bubble chain in liquid metals, International Journal of Multiphase Flow **110**, 218 (2018).
- [71] B. Krull, E. Strumpf, O. Keplinger, N. Shevchenko, J. Fröhlich, S. Eckert, and G. Gerbeth, Combined experimental and numerical analysis of a bubbly liquid metal flow, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **228**, 012006 (2017).
- [72] M. Banowski, U. Hampel, E. Krepper, M. Beyer, and D. Lucas, Experimental investigation of two-phase pipe flow with ultrafast X-ray tomography and comparison with state-of-the-art CFD simulations, Nuclear Engineering and Design **336**, 90 (2017).
- [73] F. Fischer, D. Hoppe, E. Schleicher, G. Mattausch, H. Flaske, R. Bartel,

- and U. Hampel, An ultra fast electron beam X-ray tomography scanner, *Measurement Science and Technology* **19**, 094002 (2008).
- [74] F. Barthel, M. Bieberle, D. Hoppe, M. Banowski, and U. Hampel, Velocity measurement for two-phase flows based on ultrafast X-ray tomography, *Flow Measurement and Instrumentation* **46**, 196 (2015).
- [75] V. Dzelme, M. Sarma, V. Geža, M. Ščepanskis, and A. Jakovics, Transition of different voltical structures in rotating permanent magnets agitated flow: numerical and experimental neutron radiography investigation, 10th PAMIR International Conference Fundamental and Applied MHD (Cagliari, Italy, 2016).
- [76] M. Ščepanskis, M. Sarma, P. Vontobel, P. Trtik, K. Thomsen, A. Jakovics, and T. Beinerts, Assessment of electromagnetic stirrer agitated liquid metal flows by dynamic neutron radiography, *Metallurgical and Materials Transactions B* **48**, 1045 (2017).
- [77] R. Zboray and P. Trtik, 800 fps neutron radiography of air-water two-phase flow, *MethodsX* **5**, 96 (2018).
- [78] R. Zboray, R. Adams, M. Cortesi, and H.-M. Prasser, Development of a fast neutron imaging system for investigating two-phase flows in nuclear thermal-hydraulic phenomena: A status report, *Nuclear Engineering and Design* **273**, 10–23 (2014).
- [79] R. Zboray and P. Trtik, In-depth analysis of high-speed, cold neutron imaging of air-water two-phase flows, *Flow Measurement and Instrumentation* **66**, 182 (2019).
- [80] S. Heitkam, M. Rudolph, T. Lappan, M. Sarma, S. Eckert, P. Trtik, E. Lehmann, P. Vontobel, and K. Eckert, Neutron imaging of froth structure and particle motion, *Minerals Engineering* **119**, 126 (2018).
- [81] S. Heitkam, T. Lappan, S. Eckert, P. Trtik, and K. Eckert, Tracking of particles in froth using neutron imaging, *Chemie Ingenieur Technik* **91**, 1001 (2019).
- [82] Y. Saito, K. Mishima, Y. .Tobita, T. Suzuki, and M. Matsubayashi, Measurements of liquid-metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe, *Experimental Thermal and Fluid Science* **29**, 323 (2005).
- [83] Y. Saito, K. Mishima, Y. .Tobita, T. Suzuki, M. Matsubayashi, I. Lim, and J. Cha, Application of high frame-rate neutron radiography to liquid-metal two-phase flow research, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **542**, 168 (2005).
- [84] M. Akashi, O. Keplinger, N. Shevchenko, S. Anders, and M. Reuter, X-ray radioscopic visualization of bubbly flows injected through a top submerged lance into a liquid metal, *Metallurgical and Materials Transactions B* **51** (2019).
- [85] T. Lappan, M. Sarma, S. Heitkam, P. Trtik, D. Mannes, K. Eckert, and S. Eckert, Neutron radiography of particle-laden liquid metal flow driven by an electromagnetic induction pump, *Magneto hydrodynamics* **56**, 167 (2020).

- [86] M. Sarma, M. Ščepanskis, A. Jakovics, K. Thomsen, R. Nikoluškins, P. Vontobel, T. Beinerts, A. Bojarevics, and E. Platacis, Neutron radiography visualization of solid particles in stirring liquid metal, *Physics Procedia* **69**, 457 (2015).
- [87] M. Ščepanskis, M. Sarma, P. Vontobel, P. Trtik, K. Thomsen, A. Jakovics, and T. Beinerts, Assessment of electromagnetic stirrer agitated liquid metal flows by dynamic neutron radiography, *Metallurgical and Materials Transactions B* **48**, 1045 (2017).
- [88] V. Dzelme, A. Jakovics, J. Vencels, D. Köppen, and E. Baake, Numerical and experimental study of liquid metal stirring by rotating permanent magnets, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **424**, 012047 (2018).
- [89] Y. Liu, M. Ersson, H. Liu, P. Jönsson, and Y. Gan, A review of physical and numerical approaches for the study of gas stirring in ladle metallurgy, *Metallurgical and Materials Transactions B* **50** (2018).
- [90] Q. Cao and L. Nastac, Numerical modelling of the transport and removal of inclusions in an industrial gas-stirred ladle, *Ironmaking & Steelmaking* **45**, 984 (2018).
- [91] H. Kusuno and T. Sanada, Wake-induced lateral migration of approaching bubbles, *International Journal of Multiphase Flow* **139**, 103639 (2021).
- [92] J. Zhang, L. Chen, and M.-J. Ni, Vortex interactions between a pair of bubbles rising side by side in ordinary viscous liquids, *Physical Review Fluids* **4** (2019).
- [93] J. Zhang, M.-J. Ni, and J. Magnaudet, Three-dimensional dynamics of a pair of deformable bubbles rising initially in line. Part 1: Moderately inertial regimes (2020).
- [94] A. Filella, P. Ern, and R. Véronique, Interaction of two oscillating bubbles rising in a thin-gap cell: vertical entrainment and interaction with vortices, *Journal of Fluid Mechanics* **888** (2020).
- [95] R. Clift, J. Grace, and M. Weber, *Bubbles, Drops, and Particles* (1978).
- [96] T. Lappan, M. Sarma, S. Heitkam, P. Trtik, D. Mannes, K. Eckert, and S. Eckert, Neutron radiography of particle-laden liquid metal flow driven by an electromagnetic induction pump, *Magneto hydrodynamics* **56**, 167 (2020).
- [97] C. Zhang, S. Eckert, and G. Gerbeth, The flow structure of a bubble-driven liquid-metal jet in a horizontal magnetic field, *Journal of Fluid Mechanics* **575**, 57 (2007).
- [98] A.-E. Sommer, K. Ortmann, M. van Heerden, T. Richter, T. Leadbeater, K. Cole, S. Heitkam, P. Brito-Parada, and K. Eckert, Application of positron emission particle tracking (PEPT) to measure the bubble-particle interaction in a turbulent and dense flow, *Minerals Engineering* **156**, 106410 (2020).
- [99] D. Burnard, A. Caden, J. Gargiuli, T. Leadbeater, D. Parker, and W. Griffiths, A positron emission particle tracking (PEPT) study of inclusions in liquid aluminium alloy, *Advanced Materials Research* **922**, 43 (2014).
- [100] D. Burnard, J. Gargiuli, T. Leadbeater, D. Parker, and W. Griffiths, The

- application of positron emission particle tracking (PEPT) to study inclusions in the casting process (2011) pp. 25–28.
- [101] W. Griffiths, Y. Gaber Beshay, A. Caden, X. Fan, J. Gargiuli, T. Leadbeater, and D. Parker, The use of positron emission particle tracking (PEPT) to study the movement of inclusions in low-melting-point alloy castings, *Metallurgical and Materials Transactions B* **43** (2011).
- [102] A. Dybalska, A. Caden, D. Parker, J. Wedderburn, and W. Griffiths, Liquid metal flow studied by positron emission tracking, *Metallurgical and Materials Transactions B* **51** (2020).
- [103] J. Cimbala, D. Hughes, S. Levine, and D. Sathianathan, Application of neutron radiography for fluid flow visualization, *Nucl. Technol.; (United States)* **81:3** (1988).
- [104] T. Lappan, M. Sarma, S. Heitkam, D. Mannes, P. Trtik, N. Shevchenko, K. Eckert, and S. Eckert, X-ray and neutron radiographic experiments on particle-laden molten metal flows (2021) pp. 13–29.
- [105] S. Heitkam, T. Lappan, S. Eckert, P. Trtik, and K. Eckert, Tracking of particles in froth using neutron imaging, *Chemie Ingenieur Technik* **91** (2019).
- [106] S. Anders, D. Noto, M. Seilmayer, and S. Eckert, Spectral random masking: a novel dynamic masking technique for piv in multiphase flows, *Experiments in Fluids* **60**, 68 (2019).
- [107] S. Anders, D. Noto, Y. Tasaka, and S. Eckert, Simultaneous optical measurement of temperature and velocity fields in solidifying liquids, *Experiments in Fluids* **61** (2020).
- [108] N. Chenouard, I. Smal, F. Chaumont, M. Maška, I. Sbalzarini, Y. Gong, J. Cardinale, C. Carthel, S. Coraluppi, M. Winter, A. Cohen, W. Godinez, K. Rohr, Y. Kalaidzidis, L. Liang, J. Duncan, H. Shen, Y. Xu, K. Magnusson, and E. Meijering, Objective comparison of particle tracking methods, *Nature methods* **11** (2014).
- [109] D. Schanz, S. Gesemann, and A. Schröder, Shake-the-box: Lagrangian particle tracking at high particle image densities, *Experiments in Fluids* **57** (2016).
- [110] B. Wieneke, Iterative reconstruction of volumetric particle distribution, *Measurement Science and Technology* **24**, 024008 (2012).
- [111] G. Haller, An objective definition of a vortex, *Journal of Fluid Mechanics* **525**, 1–26 (2005).
- [112] V. Holmen, Methods for vortex identification (2012).
- [113] J. Tu, C. Rowley, D. Luchtenburg, S. Brunton, and J. Kutz, On dynamic mode decomposition: Theory and applications, *Journal of Computational Dynamics* **1** (2013).
- [114] P. Schmid and J. Sesterhenn, Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data, *Journal of Fluid Mechanics* **656**, <https://doi.org/10.1017/S0022112010001217> (2008).
- [115] C. Rowley, I. Mezic, S. Bagheri, P. Schlatter, and D. Henningson, Spectral analysis of nonlinear flows, *Journal of Fluid Mechanics* **641**, 115 (2009).
- [116] A. Seenaa and H. J. Sung, Dynamic mode decomposition of turbulent cavity

- flows for self-sustained oscillations, *International Journal of Heat and Fluid Flow* **32**, 1098 (2011).
- [117] M. R. Jovanović, P. J. Schmid, and J. W. Nichols, Sparsity-promoting dynamic mode decomposition, *Physics of Fluids* **26**, 024103 (2014), 1309.4165.
- [118] J. Rojssel, Koopman mode analysis of the side-by-side cylinder wake (2017).
- [119] J. Manning and R. Baldick, Forecasting short-term dynamics of fair-weather cumuli using dynamic mode decomposition, arXiv:1907.12980 [cs] (2019), 1907.12980.
- [120] J. Grosek and J. N. Kutz, Dynamic mode decomposition for real-time background/foreground separation in video, arXiv:1404.7592 [cs] (2014), 1404.7592.
- [121] I. Ul Haq, K. Fujii, and Y. Kawahara, Dynamic mode decomposition via dictionary learning for foreground modeling in videos, *Computer Vision and Image Understanding* **199**, 103022 (2020).
- [122] B. W. Brunton, L. A. Johnson, J. G. Ojemann, and J. N. Kutz, Extracting spatial-temporal coherent patterns in large-scale neural recordings using dynamic mode decomposition, arXiv:1409.5496 [q-bio] 10.1016/j.jneumeth.2015.10.010 (2020), 1409.5496.
- [123] Y. Shiraishi, Y. Kawahara, O. Yamashita, R. Fukuma, S. Yamamoto, Y. Saitoh, H. Kishima, and T. Yanagisawa, Neural decoding of electrocorticographic signals using dynamic mode decomposition, *Journal of Neural Engineering* **17**, 036009 (2020), publisher: IOP Publishing.
- [124] A. B. Albidah, W. Brevis, V. Fedun, I. Ballai, D. B. Jess, M. Stangalini, J. Higham, and G. Verth, Proper orthogonal and dynamic mode decomposition of sunspot data, arXiv (2020), publisher: Sheffield.
- [125] V. C. Loukopoulos, G. C. Bourantas, and K. Miller, Study of the thermo-magneto-hydrodynamic flow of micropolar-nanofluid in square enclosure using dynamic mode decomposition and proper orthogonal decomposition, *European Journal of Mechanics, B/Fluids* **84**, 272 (2020), publisher: Elsevier.
- [126] R. Taylor, J. N. Kutz, K. Morgan, and B. A. Nelson, Dynamic mode decomposition for plasma diagnostics and validation, *The Review of Scientific Instruments* **89**, 053501 (2018).
- [127] A. A. Kaptanoglu, K. D. Morgan, C. J. Hansen, and S. L. Brunton, Characterizing magnetized plasmas with dynamic mode decomposition, *Physics of Plasmas* **27**, 032108 (2020), <https://doi.org/10.1063/1.5138932>.
- [128] A. Alessandri, P. Bagnerini, M. Gaggero, D. Lengani, and D. Simoni, Dynamic mode decomposition for the inspection of three-regime separated transitional boundary layers using a least squares method, *Physics of Fluids* **31**, 044103 (2019), publisher: American Institute of Physics.
- [129] M. Liu, L. Tan, and S. Cao, Dynamic mode decomposition of gas-liquid flow in a rotodynamic multiphase pump, *Renewable Energy* **139**, 1159 (2019).
- [130] R. Qiu, R. Huang, Y. Wang, and C. Huang, Dynamic mode decomposition and reconstruction of transient cavitating flows around a clark-y hydrofoil, *Theoretical and Applied Mechanics Letters* **10**, 327 (2020).
- [131] W. Wu, C. Meneveau, and R. Mittal, Spatio-temporal dynamics of turbulent

- separation bubbles, *Journal of Fluid Mechanics* **883** (2020).
- [132] E. Ramos, G. Darze, F. Nascimento, J. Faccini, and G. Giralaldi, Comparison of dynamic mode decomposition and deep learning techniques for two-phase flows analysis, *Flow, Turbulence and Combustion* **105** (2020).
- [133] G. Reinhart, D. Grange, L. Abou Khalil, N. Manginck-Noël, N. Niane, V. Maguin, G. Guillemot, C.-A. Gandin, and H. Nguyen-Thi, Impact of solute flow during directional solidification of a Ni-based alloy: In-situ and real-time X-radiography, (2020).
- [134] M. Becker, L. Sturz, D. Bräuer, and F. Kargl, A comparative in situ x-radiography and dnn model study of solidification characteristics of an equiaxed dendritic Al-Ge alloy sample, *Acta Materialia* **201**, 286 (2020).
- [135] P. Delaleau, C. Beckermann, R. Mathiesen, and L. Arnberg, Mesoscopic simulation of dendritic growth observed in X-ray video microscopy during directional solidification of Al-Cu alloys, *ISIJ International* **50**, 1886 (2010).
- [136] T. Werner, M. Becker, J. Baumann, C. Pickmann, L. Sturz, and F. Kargl, In situ observation of the impact of hydrogen bubbles in Al-Cu melt on directional dendritic solidification, *Journal of Materials Science* **56** (2021).
- [137] S. Karagadde, L. Yuan, N. Shevchenko, S. Eckert, and P. Lee, 3-D microstructural model of freckle formation validated using in situ experiments, *Acta Materialia* **79**, 168–180 (2014).
- [138] A. Kao, N. Shevchenko, M. Alexandrakis, I. Krastins, S. Eckert, and K. Pericleous, Thermal dependence of large-scale freckle defect formation, *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* **377** (2019).
- [139] W. Mirihanage, K. Falch, I. Snigireva, A. Snigirev, Y. Li, L. Arnberg, and R. Mathiesen, Retrieval of three-dimensional spatial information from fast in situ two-dimensional synchrotron radiography of solidification microstructure evolution, *Acta Materialia* **81**, 241–247 (2014).
- [140] H. Soltani, G. Reinhart, M. Benoudia, F. Ngomesse, M. Zahzouh, and H. Nguyen-Thi, Equiaxed grain structure formation during directional solidification of a refined Al-20wt.%Cu alloy: In situ analysis of temperature gradient effects, *Journal of Crystal Growth* **587**, 126645 (2022).
- [141] Y. Tang, Y. Wu, Y. Zhang, Y. Dai, Q. Dong, Y. Han, G. Zhu, J. Zhang, Y. Fu, and B. Sun, Intermittent nucleation and periodic growth of grains under thermo-solutal convection during directional solidification of Al-Cu alloy, *Acta Materialia* **212**, 116861 (2021).
- [142] S. Boden, S. Eckert, B. Willers, and G. Gerbeth, X-ray radioscopic visualization of the solutal convection during solidification of a Ga-30 Wt Pct In alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A* **39**, 613 (2008).
- [143] B. Nenchev, J. Strickland, K. Tassenberg, S. Perry, S. Gill, and H. Dong, Automatic recognition of dendritic solidification structures: Denmap, *Journal of Imaging* **6**, 19 (2020).
- [144] K. Tassenberg, B. Nenchev, J. Strickland, S. Perry, and D. Weston, Denmap single crystal solidification structure feature extraction: Automation and application, *Materials Characterization* (2020).
- [145] W. Wan, D. Li, H. Wang, L. Zhao, X. Shen, D. Sun, J. Chen, and C. Xiao,

- Automatic identification and quantitative characterization of primary dendrite microstructure based on machine learning, *Crystals* **11**, 1060 (2021).
- [146] T. Hughes, A. Robinson, and S. Mcfadden, Multiple dendrite tip tracking for in-situ directional solidification: Experiments and comparisons to theory, *Materials Today Communications* **29**, 102807 (2021).
- [147] A. Viardin, K. Noth, M. Torabi Rad, and L. Sturz, Automatic detection of equiaxed dendrites using computer vision neural networks, (2022).
- [148] N. Wang, Y. Tang, Y. Wu, Y. Zhang, Y. Dai, J. Zhang, R. Zhang, Y. Xu, and B. Sun, Dynamic evolution of microstructure morphology in thin-sample solidification: Deep learning assisted synchrotron X-ray radiography, *Materials Characterization* **181**, 111451 (2021).
- [149] J. Schindelin, I. Arganda-Carreras, E. Frise, V. Kaynig, M. Longair, T. Pietzsch, S. Preibisch, C. Rueden, S. Saalfeld, B. Schmid, J.-Y. Tinevez, D. White, V. Hartenstein, K. Eliceiri, P. Tomancak, and A. Cardona, Fiji: An open-source platform for biological-image analysis, *Nature methods* **9**, 676 (2012).
- [150] C. Schneider, W. Rasband, and K. Eliceiri, NIH image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nature Methods* **9** (2012).
- [151] E. Lehmann, P. Vontobel, and L. Wiesel, Properties of the radiography facility NEUTRA at SINQ and its use as European reference facility, *Nondestructive Testing and Evaluation* **16**, 191 (2001).
- [152] M. Birjukovs, V. Dzelme, A. Jakovics, K. Thomsen, and P. Trtik, Argon bubble flow in liquid gallium in external magnetic field, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* **63**, 1 (2020).
- [153] M. Birjukovs, V. Dzelme, A. Jakovics, K. Thomsen, and P. Trtik, Phase boundary dynamics of bubble flow in a thick liquid metal layer under an applied magnetic field, *Physical Review Fluids* **5**, 10.1103/PhysRevFluids.5.061601 (2020).
- [154] J. Vencels, P. Råback, and V. Geža, EOF-Library: Open-source Elmer FEM and OpenFOAM coupler for electromagnetics and fluid dynamics, *SoftwareX* **9** (2019).
- [155] G. Sapiro, Vector (self) snakes: a geometric framework for color, texture, and multiscale image segmentation (1996) pp. 817 – 820 vol.1.
- [156] *CurvatureFlowFilter* (2010).
- [157] R. Gonzalez and R. Woods, *Digital Image Processing* (2006).
- [158] M. Birjukovs, P. Trtik, A. Kaestner, J. Hovind, M. Klevs, D. J. Gawryluk, K. Thomsen, and A. Jakovics, Resolving gas bubbles ascending in liquid metal from low-SNR neutron radiography images, *Applied Sciences* **11**, 10.3390/app11209710 (2021).
- [159] A. Kaestner, S. Hartmann, G. Kühne, G. Frei, C. Grünzweig, L. Josic, F. Schmid, and E. Lehmann, The ICON beamline—a facility for cold neutron imaging at SINQ, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* **659**, 387 (2011).
- [160] P. Perona and J. Malik, Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*

- 12**, 629 (1990).
- [161] J. Weickert, B. Romeny, and M. Viergever, Efficient and reliable schemes for nonlinear diffusion filtering, *IEEE Transactions on Image Processing* **7**, 398 (1998).
- [162] PeronaMalikFilter (2010).
- [163] T. Le, R. Chartrand, and T. Asaki, A variational approach to reconstructing images corrupted by poisson noise, *Journal of Mathematical Imaging and Vision - JMIV* **27**, 257 (2007).
- [164] Totalvariationfilter (2018).
- [165] R. Haralick, S. Sternberg, and X. Zhuang, Image analysis using mathematical morphology, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **9**, 532 (1987).
- [166] N. Otsu, A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **9**, 62 (1979).
- [167] Tone reproduction, in *The Reproduction of Colour* (John Wiley & Sons, Ltd, 2004) Chap. 6, pp. 47–67, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/0470024275.ch6>.
- [168] P. Getreuer, Chan-Vese segmentation, *Image Processing On Line* **2**, 214 (2012).
- [169] J. Kapur, P. Sahoo, and A. Wong, A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **29**, 273 (1980).
- [170] B. Coll and J.-M. Morel, A non-local algorithm for image denoising (2005) pp. 60– 65 vol. 2.
- [171] B. Coll and J.-M. Morel, Non-local means denoising, *Image Processing On Line* **1** (2011).
- [172] Nonlocalmeansfilter (2012).
- [173] M. Sezgin and B. Sankur, Comparison of thresholding methods for non-destructive testing applications, (2004).
- [174] L. Dah-Jye, S. Antani, and L. Long, Similarity measurement using polygon curve representation and Fourier descriptors for shape-based vertebral image retrieval, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* **5032** (2003).
- [175] U. Ramer, An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves, *Computer Graphics and Image Processing. Academic Press Inc.*, August, 1972. vol. 1: pp. 244- 256 : ill. ; diagrams. includes bibliography **1** (1972).
- [176] C. Kim, F. Li, A. Ciptadi, and J. Rehg, Multiple hypothesis tracking revisited (2015) pp. 4696–4704.
- [177] J. Rubio, J. Serrat, and A. López, Multiple target tracking and identity linking under split, merge and occlusion of targets and observations, *ICPRAM 2012 - Proceedings of the 1st International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods* **2**, 15 (2012).
- [178] S. Blackman, Multiple hypothesis tracking for multiple target tracking, *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE* **19**, 5 (2004).
- [179] I. Cox and S. Hingorani, An efficient implementation of Reid’s multiple



- hypothesis tracking algorithm and its evaluation for the purpose of visual tracking, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* **18**, 138 (1996).
- [180] D. Reid, An algorithm for tracking multiple targets, *IEEE Transactions on Automatic Control* **24**, 843 (1979).
- [181] D. E. Knuth, Dancing links, (2000), arXiv:cs/0011047.
- [182] P. Zvejnieks, M. Birjukovs, M. Klevs, M. Akashi, S. Eckert, and A. Jakovics, MHT-X: offline multiple hypothesis tracking with algorithm X, *Experiments in Fluids* **63** (2022).
- [183] G. Brasó and L. Leal-Taixé, Learning a neural solver for multiple object tracking, in *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2020) pp. 6246–6256.
- [184] D. Obiso, M. Akashi, S. Kriebitzsch, B. Meyer, M. Reuter, and A. Richter, CFD modeling and experimental validation of top-submerged-lance gas injection in liquid metal, *Metallurgical and Materials Transactions B* **51** (2020).
- [185] M. Birjukovs, P. Zvejnieks, T. Lappan, M. Sarma, S. Heitkam, P. Trtik, D. Mannes, S. Eckert, and A. Jakovics, Particle tracking velocimetry in liquid gallium flow around a cylindrical obstacle, *Experiments in Fluids* **63** (2022).
- [186] D. R. Lide, ed., *English CRC Handbook of Chemistry and Physics* (CRC Press, Boca Raton, 2019).
- [187] W. Martienssen and H. Warlimont, *Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data* (Springer, Berlin, Heidelberg, 2005).
- [188] B. Blau, K. N. Clausen, S. Gvasaliya, M. Janoschek, S. Janssen, L. Keller, B. Roessli, J. Schefer, P. Tregenna-Piggott, W. Wagner, and O. Zaharko, The Swiss spallation neutron source SINQ at Paul Scherrer Institut, *Neutron News* **20**, 5 (2009).
- [189] A. P. Kaestner, S. Hartmann, G. Kühne, G. Frei, C. Grünzweig, L. Josic, F. Schmid, and E. H. Lehmann, The ICON beamline - A facility for cold neutron imaging at SINQ, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A - Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **659**, 387 (2011).
- [190] Inpaint (2015).
- [191] E. J. Fuselier, Sobolev-type approximation rates for divergence-free and curl-free RBF interpolants, *Mathematics of Computation* **77**, 1407 (2008).
- [192] H. Wendland, Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree, *Advances in Computational Mathematics* **4**, 389 (1995).
- [193] P. Farrell, K. Gillow, and H. Wendland, Multilevel interpolation of divergence-free vector fields, *IMA Journal of Numerical Analysis* **37**, 332 (2017).
- [194] H. Wendland, Divergence-free kernel methods for approximating the stokes problem, *SIAM J. Numerical Analysis* **47**, 3158 (2009).
- [195] B. Tapley, H. Andersson, E. Celledoni, and B. Owren, Computational geometric methods for preferential clustering of particle suspensions, *Journal*

- of Computational Physics **448**, 110725 (2021).
- [196] M. Wilczek, O. Kamps, and R. Friedrich, Lagrangian investigation of two-dimensional decaying turbulence, *Physica D: Nonlinear Phenomena* **237**, 2090 (2007).
- [197] Y. Choi, Y. Park, and C. Lee, Helicity and geometric nature of particle trajectories in homogeneous isotropic turbulence, *International Journal of Heat and Fluid Flow* **31**, 482 (2010).
- [198] R. Pandit, D. Banerjee, A. Bhatnagar, M.-E. Brachet, A. Gupta, D. Mitra, N. Pal, P. Perlekar, S. Ray, V. Shukla, and D. Vincenzi, An overview of the statistical properties of two-dimensional turbulence in fluids with particles, conducting fluids, fluids with polymer additives, binary-fluid mixtures, and superfluids, *Physics of Fluids* **29**, 111112 (2017).
- [199] W. Braun, F. Lillo, and B. Eckhardt, Geometry of particle paths in turbulent flows, *Journal of Turbulence Volume* **7** (2006).
- [200] L. Bentkamp, T. Drivas, C. Lalescu, and M. Wilczek, The statistical geometry of material loops in turbulence, *Nature Communications* **13**, 2088 (2022).
- [201] H. Xu, N. Ouellette, and E. Bodenschatz, Curvature of lagrangian trajectories in turbulence, *Physical review letters* **98**, 050201 (2007).
- [202] A. Gupta, D. Mitra, P. Perlekar, and R. Pandit, Statistical properties of the intrinsic geometry of heavy-particle trajectories in two-dimensional, homogeneous, isotropic turbulence, (2014).
- [203] B. Kadoch, D. del Castillo-Negrete, W. Bos, and K. Schneider, Lagrangian statistics and flow topology in forced two-dimensional turbulence, *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* **83**, 036314 (2011).
- [204] N. Sakaki, T. Maruyama, and Y. Tsuji, Statistics of the lagrangian trajectories' curvature in thermal counterflow, *Journal of Low Temperature Physics* (2022).
- [205] N. Ouellette and J. Gollub, Dynamic topology in spatiotemporal chaos, *Department of Physics Papers* **20** (2008).
- [206] N. Ouellette and J. Gollub, Curvature fields, topology, and the dynamics of spatiotemporal chaos, *Physical review letters* **99**, 194502 (2007).
- [207] X. He, S. Apte, K. Schneider, and B. Kadoch, Angular multiscale statistics of turbulence in a porous bed, *Physical Review Fluids* **3** (2018).
- [208] A. Bhatnagar, A. Gupta, D. Mitra, P. Perlekar, M. Wilkinson, and R. Pandit, Deviation-angle and trajectory statistics for inertial particles in turbulence, *Physical Review E* **94** (2016).
- [209] B. Kadoch, D. del Castillo-Negrete, W. J. T. Bos, and K. Schneider, Transport, flow topology and lagrangian conditional statistics in edge plasma turbulence 10.48550/ARXIV.2205.07135 (2022).
- [210] J. Pratt, A. Busse, and W.-C. Müller, Lagrangian statistics for dispersion in magnetohydrodynamic turbulence, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **125** (2020).
- [211] K. Alards, H. Rajaei, R. Kunnen, F. Toschi, and H. Clercx, Directional change of tracer trajectories in rotating Rayleigh-Bénard convection, *Physical Review E* **97** (2018).

- [212] L. Kaufman and P. Rousseeuw, Partitioning around medoids (program PAM) (1990) pp. 68 – 125.
- [213] M. Birjukovs, P. Zvejnieks, T. Lappan, M. Klevs, S. Heitkam, P. Trtik, D. Mannes, S. Eckert, and A. Jakovics, Particle tracking velocimetry and trajectory curvature statistics for particle-laden liquid metal flow in the wake of a cylindrical obstacle 10.48550/ARXIV.2206.11033 (2022).
- [214] M. Klevs, M. Birjukovs, P. Zvejnieks, and A. Jakovics, Dynamic mode decomposition of magnetohydrodynamic bubble chain flow in a rectangular vessel, *Physics of Fluids* **33**, 083316 (2021).
- [215] J. Roenby, H. Bredmose, and H. Jasak, IsoAdvector: Geometric VOF on general meshes (2018).
- [216] J. Roenby, H. Bredmose, and H. Jasak, A computational method for sharp interface advection, *Royal Society Open Science* **3** (2016).
- [217] I. Mezic, Spectral properties of dynamical systems, model reduction and decompositions, *Nonlinear Dynamics* **41**, 309 (2005).
- [218] S. Le Clainche and J. M. Vega, Higher order dynamic mode decomposition, *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems* **16**, 882 (2017), publisher: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [219] S. T. M. Dawson, M. S. Hemati, M. O. Williams, and C. W. Rowley, Characterizing and correcting for the effect of sensor noise in the dynamic mode decomposition, *Experiments in Fluids* **57**, 42 (2016), version: 3, 1507.02264.
- [220] S. L. Brunton, B. W. Brunton, J. L. Proctor, E. Kaiser, and J. N. Kutz, Chaos as an intermittently forced linear system, *Nature Communications* **8**, 19 (2017).
- [221] B. Loring, H. Karimabadi, and V. Rortershteyn, A screen space GPGPU surface LIC algorithm for distributed memory data parallel sort last rendering infrastructures (2014).
- [222] J. Fröhlich, S. Schwarz, S. Heitkam, C. Santarelli, C. Zhang, T. Vogt, S. Boden, A. Andruszkiewicz, K. Eckert, S. Odenbach, and S. Eckert, Influence of magnetic fields on the behavior of bubbles in liquid metals, *The European Physical Journal Special Topics* **220**, 167 (2013).
- [223] M. Birjukovs, N. Shevchenko, and S. Eckert, An image processing pipeline for in-situ dynamic x-ray imaging of directional solidification of metal alloys in thin cells (2022).
- [224] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, and K. Egiazarian, Image denoising with block-matching and 3D filtering, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* **6064**, 354 (2006).
- [225] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik, and K. Egiazarian, Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering, *IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society* **16**, 2080 (2007).
- [226] M. Lebrun, An Analysis and Implementation of the BM3D Image Denoising Method, *Image Processing On Line* **2**, 175 (2012), <https://doi.org/10.5201/ipo1.2012.1-bm3d>.
- [227] Y. Makinen, L. Azzari, and A. Foi, Collaborative filtering of correlated

- noise: Exact transform-domain variance for improved shrinkage and patch matching, *IEEE Transactions on Image Processing* **PP**, 1 (2020).
- [228] L. I. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi, Nonlinear total variation based noise removal algorithms, *Physica D: Nonlinear Phenomena* **60**, 259 (1992).
- [229] J. Canny, A computational approach to edge detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8**, 679 (1986).
- [230] Brightnessequalize (2017).
- [231] C. Harris and M. Stephens, A combined corner and edge detector, *Proceedings 4th Alvey Vision Conference* **1988**, 147 (1988).
- [232] J. Sánchez, N. Monzón, and A. Salgado, An analysis and implementation of the Harris corner detector, *Image Processing On Line* **8**, 305 (2018).
- [233] Morphologicalbranchpoints (2010).
- [234] C. Tomasi and R. Manduchi, Bilateral filtering for gray and color images (1998) pp. 839–846.

## Pateicības

Autors vēlas uzsvērt, ka šī tēze un visi šeit izklāstītie rezultāti nav tikai autora sasniegumi. Drīzāk disertācija ir svarīgs pieturas punkts kolektīvos centienos, kuros autoram ir svarīga loma. Bez līdzstrādnieku atbalsta lielākā daļa no šeit demonstrētā nebūtu izdevies. Nekādā īpašā secībā, autors vēlas izteikt atzinību tiem, kuru ieguldījums ir veicinājis panākumus.

Autors izsaka dziļu pateicību Andrim Jakovičam (LU), Pavel Trtik (PSI), Knud Thomsen (PSI) un Sven Eckert (HZDR), kuri visi bija tādi mentori, kurus bija patīss prieks sastap, un kurus var novēlēt katram topošajam doktorantam. Andris Jakovičs jau no paša sākuma ir bijis maģistra un doktora darbu vadītājs un kolēģis SMI. Autors ir pateicīgs Andrim par *daudzām* lietām, bet jo īpaši par autora radošās brīvības un neatkarības pieļaušanu un veicināšanu visos SMI kopīgos projektos, un jo īpaši šī promocijas darba gaitā. Mazāk zināms fakts, iespējams, ir ka sākotnēji tika lemts, ka disertācija būs veltīta *lattice Boltzmann* metodes (LBM) pielietošanai MHD burbuļu plūsmas modelēšanā. Tomēr, kad autors norādīja, ka zinātniski "izdevīgāk" un praktiskāk ir koncentrēties uz eksperimentālām un attēlu & datu apstrādes metodēm, vienlaikus ļaujoties uz jau esošajām skaitliskām pieejām, lai dibinātu izmisiģi trūkstošo pamatu nākotnes uz fiziku fokusētiem rakstiem un nākamās paaudzes eksperimentālajām metodēm, Andris uzticēja autoram pētījumu virzīt radikāli citā virzienā, neskatoties uz to, ka LBM bija obligāta sastāvdaļa notiekošā projektā. Šis darbs ir pierādījums tam, ka uzticēšanās ir atmaksājusies, un, iespējams, ir labs piemērs tam, kas notiek, ja vadošie pētnieki un darba vadītāji ciena un atbalsta savu studentu redzējumu, par ko autors ir ļoti pateicīgs. Protams, Andris ir iepazīstinājis autoru arī ar daudziem galvenajiem spēlētājiem pētniecības jomā, kurai pieder šis darbs.

Pateicoties Andra Jakoviča, Mihaila Ščepanska (LU) un PSI iepriekšējai sadarbībai, autoram bija gods satikt Pavelu un Knudu. Pavel un Knud iepazīstināja autoru ar neitronu radiogrāfijas pasauli un PSI veikto pētījumu milzīgo mērogu, kas bija pagrieziena punkts gan darbā, gan autora karjerā. Autors ir parādā Pavelam un Knudam par pirmo neitronu radiogrāfijas kampaņu PSI NEUTRA neitronu staru līnijā, kas tika atvēlēta no personīgā laika pie instrumenta, kas bija uzticības un ieguldījumu žests pats par sevi. Arī Pavel un Knud vienmēr uzmundrināja promocijas darba izstrādi pirmajos posmos, ceļā uz pirmajām lielākajām publikācijām. Nebūs pārspīlēts teikt, ka lielu daļu darba rakstīšanas prasmju uzlabošanās var saistīt ar mentoringu un padomiem, kurus sniedza Pavel un Knud. Pavel ir arī ieguldījis daudz laika un pūļu, lai palīdzētu sagatavoties un veikt eksperimentus NEUTRA. Autors tikās ar Svenu vēlāk, vienā no MHD tematiskajām konferencēm – šis tikšanās rezultātā drīz vien izveidojās pirmā autora un HZDR

sadarbība, kas ir viens no galvenajiem brīžiem gan šī darba panākumiem, gan autora profesionālajai izaugsmei. Autors ir ļoti pateicīgs Svenam par iepazīstināšanu ar citiem HZDR kolēģiem, kā arī tās MHD nodaļu, kuru autors šobrīd uzskata par gandrīz kā mājām prom no mājām. Liela atzinība pienākas Sven arī par to, ka viņš palīdzēja autoram vēl vairāk uzlabot gan rakstu, gan projektu rakstīšanas prasmes. Autors vēlas pateikties Pavelam, Knudam un Svenam par pētniecības vizītu iniciēšanu un atbalstīšanu (kopā ~ 1 gada laikā) un attālināto līgumu noslēgšanu gan ar PSI, gan HZDR, kas ir būtiski veicinājuši autora veikto pētījumu ātrumu un paveiktā apjomu. Paldies arī Andrim, kurš palīdzēja pārejas starp šīm aktivitātēm padarīt gludas un ērtas. Autors arī pateicas Andrim, Pavelam, Knudam un Svenam par sniegto finansiālo atbalstu darba izstrādes gados.

Protams, daudz kas ir pateicoties kolēģiem no Latvijas, SMI pētniekiem. Lai gan Mihails Ščepanskis mainīja darba vietu, pirms SMI kļuva par SMI, tieši viņš sākotnēji iepazīstināja autoru ar toreiz vēl laboratoriju. Turklāt liela daļa darbu pie daļiņu plūsmas radiogrāfijas ir balstīta uz pirmajiem eksperimentiem, ko Mihails veica PSI sadarbībā ar Pavelu un Knudu. Autors vēlas arī ļoti nozīmīgu sākotnējo atbalstu no Valtera Dzemes (LU), kurš ne tikai nodrošināja pirmo skaitliskā modeļa versiju MHD burbuļu plūsmā, bet arī ļoti palīdzēja pirmajā burbuļplūsmas radiogrāfijas eksperimentā PSI, īpaši aparatūras sagatavošanā. Tālāk autors saņēma milzīgu atbalstu no Jevgeņija Telicko (LU), kuram bija atslēgas loma otrās neitronu radiogrāfijas kampaņas uzlabotas eksperimentālās iekārtas uzlabošanā un implementācijā.

Autors uzskata, ka viņa veiksmē ceļā uz šo promocijas darbu ir īpaši izteikta, ņemot vērā iespēju strādāt ar saviem lieliskiem studentiem. Autors priecājas par satikšanos ar Mārtiņu Kļevu (LU), Pēteri Zvejnieku (LU), Ansi Ziemeli (LU) un Aleksandru Jegorovu (LU), un patiesi ir bijis laimīgs strādāt un profesionāli augt kopā ar viņiem. Mārtiņš sniedza ļoti nozīmīgu ieguldījumu kā galvenais SDM koda un metožu izstrādātājs, savukārt Pēteris ir galvenais MHT-X izstrādes dzinējspēks, un kopā ar autoru ir izstrādājis burbuļa formas analīzes kodu. Turklāt abi ir piedalījušies otrajā neitronu radiogrāfijas kampaņā PSI un ir devuši savas idejas arī eksperimentiem. Ansis ir līdzizstrādājis burbuļu detektēšanas kodam rentgena radiogrāfijas eksperimentiem, realizējot savas idejas, kad papildināja autora veikto, un veicot nepieciešamo optimizāciju. Visbeidzot, Aleksandrs, lai gan nav tieši iesaistīts rentgena un neitronu radiogrāfijas eksperimentos vai koda izstrādē, ir bijis ļoti noderīgs diskusijās un, iespējams, dažreiz pat neapzinoties, bieži ir sniedzis noderīgu ieskatu vai alternatīvus viedokļus. Aleksandrs šobrīd strādā pie burbuļplūsmas *optiskās* attēlveidošanas Hele-Šova šķidro metālu šūnās, kas ir svarīgs atzars no šajā darbā aplūkotojā eksperimentiem, savukārt Mārtiņš, Pēteris un Ansis turpina darbu ar SDM, MHT un

rentgena attēlu analīzi, attiecīgi. Autors ir dziļi pateicīgs visiem viņa studentiem par biedriskuma sajūtu un mācīšanos vienam no otra, kā arī par izturību, saskaroties ar dažkārt ārkārtīgi lielo darba slodzi un studijām augstskolā.

Liels paldies jāsaka citiem kolēģiem no PSI, jo īpaši Anders Kaestner, kurš nodrošināja piekļuvi ICON staru līnijai, dalījās ar zināšanām par neitronu radiogrāfiju un palīdzēja eksperimentu laikā, kā arī sniedza daudz vērtīgu ieskatu diskusiju laikā; Jan Hovind, kurš ir atbalstījis PSI eksperimentus visu laiku; Dariusz Jakub Gawryluk, kurš izgatavoja un ziedoja autoram etalona objektus, ko izmanto attēlu apstrādes metožu eksperimentālai validācijai; Marino Corrado, Yohei Sato un Bojan Niceno, kuri ir nodrošinājuši autoru ar alternatīvu skaitliskās simulācijas pieeju burbuļu plūsmas modelēšanai, un kuri šobrīd ir iesaistīti turpmākajos pētījumos par SDM pielietojumu burbuļu plūsmas analīzē. Autors vēlas arī izteikt pateicību saviem kolēģiem no HZDR, kuri bija ne tikai nozīmīgi šī darba līdzstrādnieki, bet arī radīja siltu un produktīvu atmosfēru autora vizīšu laikā HZDR. Konkrēti, autors ir pateicīgs Tobias Lappan par burbuļu plūsmas rentģenu attēlu un daļiņu plūsmas neitronu attēlu nodrošināšanu, kā arī par izcilu atbalstu rentģena radiogrāfijas eksperimentos HZDR; Natalia Shevchenko, kura arī ir ļoti atbalstījusi ne tikai eksperimentu laikā, bet arī daudzos citos veidos palīdzējusi autoram viņa uzturēšanās laikā HZDR, turklāt Natalia ir pirmā, kas testējusi un sniegusi uzlabojumu idejas attēlu apstrādes kodam, kas izstrādāts metālu sakausējumu sacietēšanas pētīšanai, kā arī sniedza eksperimentālos datus autoram darbam; Sascha Heitkam par daudzām garām un atziņu bagātām diskusijām par daļiņu plūsmas fiziku un ļoti svarīgiem padomiem un ieteikumiem rakstiem; Megumi Akashi par MHT-X un formas analīzes koda testēšanai izmantoto datu nodrošināšanu; Thomas Wondrak and Frank Stefani par Mārtiņa Klēva un Pētera Zvejnieka uzņemšanu viņu vizīšu laikā HZDR, kā arī par finansiālā atbalsta sniegšanu un veltīto laiku produktīvām diskusijām; Max Sieger, Thomas Gundrum un Stefanie Sonntag par palīdzību magnetometrijas eksperimentos, kā arī citos jautājumos; Henrik Schulz par palīdzību autoram veikt attēlu apstrādi, izmantojot HZDR augstas veiktspējas skaitļošanas (AVS) centra aparatūru, un palīdzību problēmu novēršanā; Sten Anders un Tom Weier par daudzu ieskatu sniegšanu daudzfāzu plūsmas attēlveidošanas metodēs.

Tāpat autors izsaka pateicību Imantam Buceniekam (LU) par PSI, HZDR un UL eksperimentos izmantoto ML sistēmu konstrukciju; Andrew Kao (Grīničas Universitāte (GU), Lielbritānija) un Catherine Tonry (GU) par nenovērtējamo palīdzību *OpenFOAM*, *Elmer* un *EOF-Library* iestatīšanā un palaišanā AVS sistēmās; Robert Zboray (Empa, Šveice) un Tianshu Liu (Rietumu Mičiganas Universitāte) par veltīto laiku un diskusijām par daudzfāzu plūsmas attēlveidošanu un attēlu apstrādi.

Liels paldies arī Lienei Bandeniecei (LU), Inesei Suijai (LU) un Aida Roch (HZDR) par palīdzību logistikā un formālos jautājumos, bez kuriem daudzi pasākumi noteikti būtu beigušies neveiksmīgi.

Visbeidzot, autors izsaka sirsnīgu pateicību savai ģimenei, kas ir atbalstījusi autoru visā ceļojumā līdz darba noslēgumam, kas bija dažkārt ārkārtīgi noslogojošs gan garīgi, gan fiziski. Autors ir pārliecināts, ka nebūtu ticis līdz galam, ja ne viņam tuvākie cilvēki, un vēlas, lai viņi zinātu, ka šis darbs ir tikpat lielā mērā viņu sasniegums, kā autora..