



**Projekta “Skaitliskās modelēšanas pieeju izstrāde kompleksu multifizikālu mijiedarbības procesu izpētei elektromagnētiskajās šķidrā metāla tehnoloģijās” (Nr. 1.1.1.1/18/A/108) pārskats par paveikto projekta ietvaros laika posmā no 01.07.2020 – 30.09.2020**

Šajā laika posmā projekta grupa ir paveikusi sekojošo:

1. Projekta ietvaros notikuši zinātniskie semināri:  
27.08.2020 notika zinātniskais seminārs “Gāzes burbuļu dinamikas šķidrā metālā magnētiskajā laukā izpēte ar neitronogrāfijas metodi”, kurā uzstājās pētnieks Mihails Birjukovs un stāstīja par sasniegumiem gāzes burbuļu plūsmas šķidrā metālā izpēti.
2. Komandējumi:  
No 07.09.2020-11.09.2020 zinātniskais vadītājs atradās darba braucienā Vācijā, Hannoveres Leibniza Universitātes Elektrotehnoloģijas institūtā, lai saskaņotu un izplānotu modeļeksperimentu veikšanu, kurā piedalīsies projekta darba grupa.
2. Projekta ietvaros iesniegts raksts:  
*A. Chudnovsky, Yu. Ivochkin, A. Jakovics, S. Pavlovs, I. Teplyakov, D. Vinogradov*  
**“Investigations of electrovortex flows with multi electrodes power supply”,**  
*Magnetohydrodynamics*
3. Šajā periodā tika īstenotas darbības nr. 1., 1.1., 1.2., 3., 3.1, 3.2, 3.3., 4., 4.1, 4.2, 4.3., 5., 6., 6.1., 6.2., 6.3., 7., 7.1., 7.2., 7.3., 7.4., 12., 12.1, 12.2, 12.3. Tajās paveikts sekojošais:

**3. Nepieciešamo skaitliskās modelēšanas rīku pilnveidošana (07.2019 – 06.2021)**

**3.1. EOF bibliotēka (aktivitātes atbildīgais V. Dzelme)**

Tika veikts nozīmīgs darbs, lai uzlabotu aprēķinus ar atvērtā koda programmām *Elmer* un *OpenFOAM*:

1. Tika implementēti dažādi algoritmi, kas nosaka, cik bieži un pie kādiem kritērijiem notiek datu apmaiņa starp minētajām programmām.
2. Tika izstrādāta iespēja paātrināt aprēķinus neliela magnētiskā Reinoldsa skaitļa gadījumā, bet kad ir nepieciešams ņemt vērā inducēto strāvu noslēgšanos šķidrā metālā. Šim nolūkam strāvas saglabāšanās likuma izpildīšanās nodrošināšana tika implementēta programmā *OpenFOAM*, tādējādi noņemot slodzi no *Elmer* programmas.

Šķidra metāla magnetohidrodinamikas (MHD) aprēķinu veikšana tikai *OpenFOAM* vidē (bez nepieciešamības lietot *Elmer*) tiek attīstīts kā papildus virziens. Šobrīd ir izstrādāta iespēja modelēt šķidra metāla levitāciju augstfrekvences magnētiskajā laukā, implementējot *OpenFOAM* vidē elektromagnētiskā lauka vienādojumus. Šādi aprēķini ar *OpenFOAM* var būt lēnāki nekā kombinētajā *Elmer/OpenFOAM* un EOF pieejā, taču ir potenciāli precīzāki, jo elektromagnētiskie spēki tiek pārrēķināti katrā laika solī, tādējādi neradot mākslīgas oscilācijas. Lietojot šādu pieeju, salīdzinot ar *Elmer* prasībām, ir nepieciešams arī mazāks operatīvās atmiņas apjoms,

### 3.2 Bolcmaņa šūnu metode (aktivitātes atbildīgais M. Birjukovs)

Tika izanalizētas *lattice Boltzmann method* (LBM) atvērtā koda programmatūras *Palabos* (AGPLv3 brīvpieejas licence) un *Sailfish* (LGPL v3 brīvpieejas licence). Tika noteikts, ka optimālāk ir izmantot *Sailfish*, jo tajā ir vieglāk iebūvēt papildus vienādojumus un sakarības elektromagnētisma aprēķinu veikšanai. *Sailfish*, ir pieejams *GitHub*, tam ir aktīva izstrādātāju komanda un lietotāju kopa, kā arī pietiekami izsmelošs funkcionalitāšu un izmantoto skaitlisko metožu apraksts. Ir pieejams arī nepieciešamais neizotropas turbulences modelis (*large eddy simulation* jeb LES, Smagorinsky). Pašlaik notiek elektromagnētisma aprēķinu implementācija un *Sailfish* modifikācija projekta mērķiem, konkrēti – burbuļu plūsmas simulācijām gan bez, gan ar magnētisko ārējo lauku. *Sailfish* tika notestēts uz vairākām modeļproblēmām, ieskaitot divfāžu plūsmas, un tika konstatēts, ka tas darbojas efektīvi un dod fizikāli ticamus rezultātus. Tiek risināta elektromagnētisma vienādojumu/sakarību formulējuma izvēles problēma – vai izmantot 2-vienādojumu LBM pieeju (šķidrums + lauks), vai arī palīgvektoru metodi magnētiskam laukam. Bez tam, tika izanalizēta iespēja projekta mērķu sasniegšanai izmantot esošās sadarbības ar ārzemju institūtiem, lai potenciāli pārņemtu jau izstrādāto LBM implementāciju ar elektromagnētisko procesu modelēšanu, kuru izmanto citiem mērķiem, un pielāgot to burbuļu plūsmu simulācijām. Šajā kontekstā tiek veidota sadarbība ar Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR).

### 3.3. Komerciālas programmatūras problēmorientēti skripti (aktivitātes atbildīgais S. Pavlovs)

Ar mērķi veikt elektrovirpuļplūsmu skaitliskus aprēķinus izmantojot projekta ietvaros izveidotus matemātiskos modeļus tika pilnveidota sekojoša komerciāla programmatūra:

- *ANSYS Design Modeler* un *ANSYS Maxwell* rīku vīdēs tika sagatavoti skripti modeļu ģeometrijas, kas sastāv no vairākiem elektrodiem, kas pievada līdzstrāvu (vai maiņstrāvu) kausējumam un kurš atrodas nevadošā traukā, uzbūvei;
- *ANSYS Design Modeler* un *ANSYS Maxwell* rīku vīdēs tika sagatavoti skripti aprēķinu režģu ar mainīgu šūnu izmēru uzbūvei, kas ievēro EM lauku un turbulentās plūsmas īpatnības:
  - režģa smalcināšana (izmantojot inflāciju) tuvu elektrodiem lai nodrošināt nepieciešamo aprēķinu precizitāti, kad elektriskās strāvas līnijas šķērso elektrodu un kausējuma robežas;
  - režģa smalcināšana (izmantojot inflāciju) tuvu trauka un elektrodu cietām sienīņām ar mērķi adekvāti modelēt elektrovirpuļplūsmu robežslāņus.
- *ANSYS Maxwell* rīka vidē tika sagatavoti skripti ar mērķi ievadīt parametrus EM lauka modelēšanai.
- *ANSYS Fluent* un *ANSYS CFX* rīku vidēs tika sagatavoti skripti ar mērķi ievadīt parametrus kausējuma elektrovirpuļplūsmas modelēšanai, izmantojot izotropas (piemēram  $k-\omega$ ) vai anizotropas (piemēram LES) turbulences modeļus.

Izveidotie skripti ģeometrijas un režģa sagatavošanai, kā arī EM lauka un kausējuma plūsmas modelēšanas datu ievadīšanai ļauj variet skaitliskā modeļa parametrus plašā diapazonā.

Tika uzsākta skriptu rakstīšana, lai sajūgtu *CFX* un *Maxwell* programmas. Skripti bāzēti uz *ANSYS Workbench* žurnāla failiem, kur ierakstītas aprēķinos veicamās darbības. Šķidrā metāla apgabala ģeometrijas pārnesei no *CFX* uz *Maxwell* tiek izmantota ārēja programma *FreeCAD*, lai konvertētu ģeometriju uz *Maxwell* piemērotāku formātu. Šajā solī tiek izmantots *python* skripts, kuru palaiž caur *ANSYS ACT* konsoli. Pašreiz turpinās darbs pie skriptu pilnveides un testēšanas.

Aprēķini ar šo pieeju ir ļoti lēni, taču vienkāršākajos uzdevumos kalpo kā atvērtā koda programmu un tur izveidoto modeļu verifikācijas rīks, jo atsevišķie modeļi komerciālajās programmās ir detalizēti pārbaudīti un parasti strādā ļoti labi.

#### 4. Partikulāro matemātisko modeļu formulēšana, implementācija un skaitliskā verifikācija (10.2019 – 09.2021)

##### 4.1. Elektrovadoša šķidrums un tā virsmas dinamika mijiedarbībā ar EM lauku (aktivitātes atbildīgais V. Dzelme)

Tika uzlaboti rotējošu pastāvīgo magnētu ierosinātas šķidra metāla virsmas dinamikas skaitliskie modeļi. Tika veikti dažādi verifikācijas aprēķini, variējot gan tīri skaitliskos parametrus (režģa izšķirtspēju un elementu formu), gan arī fizikālos tuvinājumus (sekundārā magnētiskā lauka atmešana, inducēto strāvu noslēgšanās korekcija u.c.), lai panāktu pēc iespējas ātrākus aprēķinus, ievērojami nezaudējot precizitāti.

Tika veikti testa aprēķini ar dažādiem turbulences modeļiem, piemēram,  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  SST un Large Eddy Simulation (LES). Vienkāršākie  $k-\varepsilon$  un  $k-\omega$  SST modeļi dod ātrākus pieņemamus rezultātus, taču tie parasti pārvērtē turbulento viskozitāti un līdz ar to nefizikāli slāpē plūsmu un brīvās virsmas svārstības. LES modeļi, savukārt, prasa krietni vairāk datorresursus un aprēķina laiku, bet spēj labāk atspoguļot eksperimentāli novēroto brīvās virsmas dinamiku. Turbulences modeļa izvēle ir jāpieskaņo prasībām konkrētiem pielietojumiem.

##### 4.2 Šķidra metāla un gāzes burbuļu divfāzu plūsmas mijiedarbība ar EM lauku (aktivitātes atbildīgais M. Birjukovs)

Līdztekus darbam ar LBM (aktivitāte 3.2) tiek izstrādātas/attīstītas alternatīvas modelēšanas metodes magnetohidrodinamiskai (MHD) burbuļu plūsmai, ar kurām var verificēt gan LBM aprēķinus, gan arī izstrādātas eksperimentālās un datu apstrādes metodes, kas nodrošina nepieciešamo aprēķinu rezultātu verifikāciju. Pirmkārt, tiek attīstīts atvērtā koda (*open-source*) rīku komplekts *OpenFOAM + Elmer + EOF-Library* (aktivitāte 3.1) un tas tiek pielāgots MHD burbuļu plūsmas modelēšanai ar *volume of fluid* (VOF) metodi. Tika arī implementēts *OpenFOAM* “viss vienā” risinājums (VOF), kur ar *OpenFOAM* veic gan šķidrums lauku aprēķinus, gan elektromagnētiskā lauka modelēšanu – tam ir potenciāls būt ātrākam kā *OpenFOAM + Elmer + EOF-Library* paketei un arī mazāk atmiņas ietilpīgam. Nodibināti kontakti ar Paul Scherrer Institute (PSI) skaitliskās hidrodinamikas un augstās veiktspējas skaitļošanas grupām un uzsākta sadarbība, kuras ietvaros būs iespējams izmantot PSI skaitļošanas resursus un PSI izstrādāto *PSI-BOIL* simulācijas rīku divfāzu plūsmām, kuru ir plānots papildināt ar elektromagnētisma vienādojumu risināšanas moduļiem un izmantot MHD burbuļu plūsmas simulācijām – tā ir laba alternatīva pašlaik pieejamiem rīkiem. Darbs šajā virzienā ir uzsākts.

##### 4.3. Elektrovirpuļplūsmas (aktivitātes atbildīgais S. Pavlovs)

Izmantojot pilnveidotu (skat. aktivitāti 3.3) komerciālu programmatūru (tai skaitā *ANSYS Maxwell* un *ANSYS Fluent*) tika veikti skaitliskie aprēķini sekojošiem modeļiem:

1. Tiek skaitliski pētīts izveidotais eksperimentālai iekārtai (skat. aktivitāti 6.3) atbilstošais modelis ar divu vara elektrodu līdzstrāvas pievadu (tā sauktā bifilāra shēma) galistāna (InGaSn) kausējumam. Izveidotais skaitliskais modelis tiek izmantots mērīšanas rezultātu salīdzināšanai ar modelēšanas datiem gan EM laukam, gan arī elektrovadošā šķidrums turbulentai plūsmai, kuru ierosina līdzstrāvas mijiedarbība ar savu magnētisko lauku šķidrājā metālā.
2. Tiek skaitliski pētīts izveidotais industriālā mēroga iekārtas modelis ar vienu augšējo elektrodu (kas modelē plazmas kūli) un diviem tērauda elektrodiem no apakšas, kas pievada līdzstrāvu tērauda kausējumam. Izveidotais skaitliskais modelis tiek izmantots elektrovadošā šķidrums turbulētās plūsmās modelēšanai, kas tiek ierosināta līdzstrāvai mijiedarbībojoties ar savu magnētisko lauku. Tika izanalizētas sekojošās likumsakarības:
  - Lorenca spēka un kausējuma ātruma atkarība no elektriskās līdzstrāvas vērtības;
  - kausējuma turbulētās plūsmas momentānā un laikā vidējotā struktūra;

◦ plūsmas rotācija gadījumā, kad kausējums ievietots ārējā vertikālā magnētiskā laukā, kas mijiedarbojas ar līdzstrāvu.

Izveidotie skaitliskie modeļi tiek testēti, variējot telpas un laika diskretizāciju, precizitātes kritērijus u.c. parametrus, kas ietekmē rezultātu precizitāti. Skaitliskie modeļi tiek verificēti arī izmantojot literatūrā publicētos skaitlisko aprēķinu un laboratorijas eksperimentu rezultātus.

## **5. Eksperimentālo metodiku pilnveidošana un aprobācija atbalsta eksperimentu veikšanai (10.2019 – 03.2021) (apakšaktivitāšu atbildīgie V. Dzelme, M. Birjukovs, A. Čudnovskis)**

Tika radikāli pārbūvēts un pilnveidots projektā sākotnēji izstrādātais neitronu radiogrāfijas attēlu apstrādes programmatūras rīks, kas ir pielietojams neitronu, rentģenu, optisko attēlu apstrādei pie zemas signāla/trokšņa intensitāšu attiecības (STA). Tagad šis rīks ir pietiekami universāls tai ziņā, ka var tikt izmantots ne tikai burbuļu detektēšanai un analīzei, kas palielina izmantošanas potenciālu dažādās jomās. Uzlabojumi: trokšņa filtrēšana ar variāciju/PDV filtriem vairākos etapos (mērogos) un fona korekcija ar *color tone map unsharp masking*, kas veido globālo jeb primāro filtru. Papildus tika izstrādāts oriģināls (pēc pieejamas informācijas) algoritms sekundārai filtrēšanai, kam ir noteicošā loma situācijā ar zemu STA un/vai ar lielu objektu (burbuļu) daudzumu attēlos: *Multiscale Recursive Interrogation Filter* (MRIF), kas izmanto sekundāro filtru ar *level set* segmentēšanu. Turklāt tika implementēti jauni rīki statistiskai rezultātu apstrādei, tādi kā *Quantile Spline Envelopes* (QSE), kas ir pielietojams gan kā datu attīrīšanas instruments, gan kā burbuļu trajektoriju kopas analīzes rīks. Tika izveidota (un tiek pilnveidota) bibliotēka, kurā tiek apkopotas izmantotās/izveidotās metodes, lai padarītu izstrādāto kodu pieejamāku citiem potenciāliem lietotājiem, tādiem kā Paul Scherrer Institut (PSI) un Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) speciālisti, kuri jau ir izteikuši interesi un vēlmi izmantot doktora darba izpildes laikā iegūto attēlu apstrādes kodu. Tika izstrādāti arī attēlu apstrādes algoritmi rentģenstaru radiogrāfijas attēliem, kuri iepriekš tika uzņemti eksperimentos HZDR.

Lai pētītu burbuļu kolektīvo dinamiku – aglomerāciju, sadursmes, apvienošanās un fragmentāciju, tika izstrādāts burbuļu (un vispārīgi, objektu) projekciju formu analīzes rīks, kas ir pietiekami universāls, lai aprakstītu praktiski patvaļīgas burbuļu formu projekcijas. Algoritms apraksta burbuļus ar to viduslīniju un fāžu robežu un galveno hordu īpašībām (liekuma, garuma sadalījumi, utt.) un ir balstīts uz minimālā aptverošā skeleta (grāfa) atrašanu no *Voronoi* režģa un skeleta garākām posmam tuvāko burbuļa formas liekuma ekstrēmu noteikšanu, kurus iegūst no burbuļu fāžu robežas formas. Tika izstrādāti arī specializēti attēlu filtri aglomerētu burbuļu un starpburbuļu metāla plēves izšķiršanai – tie ir balstīti uz lokālu adaptīvo segmentēšanu kombinācijā ar PDV trokšņa filtriem. Papildus, no skaitliskajiem aprēķiniem un eksperimentiem iegūto datu analīzei tika implementēta *Dynamic Mode Decomposition* (DMD) plūsmas spektrālās analīzes pieeja, ar kuru iespējams analizēt telpiskās modas burbuļu (un ne tikai) plūsmām. Tika izveidots arī *Multiple Hypothesis* algoritms objektu izsekošanas un trajektoriju rekonstrukcijai, kas ir balstīts uz fizikāliem saglabāšanas likumiem. Identificējot burbuļus un tiem atbilstošās trajektorijas, šis kods ļauj veikt padziļinātu analīzi, it īpaši kombinācijā ar izstrādāto objektu formas analīzes algoritmu.

Tika izgatavota neliela laboratorijas mēroga iekārta, kurā caur šķidru metālu tiek laisti gāzes burbuļi. Tika pētīta burbuļu un to kolektīva mijiedarbība un tās izmaiņas pieliekot sistēmai statisku ārēju horizontālu vai vertikālu magnētisko lauku. Burbuļi tika vizualizēti ar neitronogrāfijas metodi PSI, Šveicē. Šai sistēmai ar datorsimulācijām tika izstrādātas, optimizētas un uzprojektētas horizontālā/vertikāla lauka sistēmas (uz *NdFeB* un *SmCo* permanentiem magnētiem balstītas) – tās tika uzkonstruētas un nogādātas eksperimentiem PSI. Šīs sistēmas tiks izmantotas arī turpmākiem un cita veida eksperimentiem PSI, HZDR un LU.

Ar datorsimulāciju palīdzību tika noteikta jauda, kas nepieciešama gallija sildīšanas aparātam, lai uzturētu galliju šķidrā stāvoklī eksperimentu laikā. Tika arī uzprojektēts uzlabots gallija konteīnera variants un noteikti gāzes padeves caurules parametri. Gan konteīners, gan sildīšanas sistēma tika uzkonstruēti un nogādāti PSI eksperimentiem. Tika izveidota arī iekārta optiskiem mērījumiem burbuļu plūsmai plānā šķidrā metāla slānī – metodikai ir perspektīvas aizvietot rentgenstaru radiogrāfiju pie šķidrā metāla biežumiem  $< 4 \text{ mm}$ . Ar šo iekārtu ir iespējams reproducēt HZDR veiktos eksperimentus, pie kam varēs papildināt jau esošos datus ar mērījumiem magnētiskajā laukā.

Šķidra metāla brīvās virsmas dinamikas izsekošanai eksperimentāli iegūtajos redzamās gaismas attēlos tika izstrādāti ātrdarbīgi *python* skripti. Lai uzlabotu precizitāti un atvieglotu attēlu apstrādi, eksperimentos ir veikti pasākumi, lai uzlabotu kontrastu starp šķidro metālu un fonu, lietojot fona apgaismojumu un tādējādi šķidro metālu padarot tumšu.

Praktiski noslēgusies projekta partnera AS “Latvo” eksperimentālās fizikas laboratorijas izveide. Tika instalēts elektrības kontūrs ar strāvas pievadu. Tika iegādāts un pieslēgts regulējams līdzstrāvas ģenerators ar strāvu līdz 2000 A. Tika iegādāts GaInSn kausējums eksperimentiem ar elektrovadošo šķidrumu ar līdzstrāvas pievadu un tā ievietošanu magnētiskajā laukā.

Tika izveidota eksperimentāla iekārta (sadarbībā ar Maskavas augstu temperatūru pētījumu institūtu) ar divu elektrodu līdzstrāvas pievadu (bifilāra shēma) galinstana (InGaSn) kausējumam. Ar mērķi atlasīt nepieciešamus materiālus eksperimentālās iekārtas izgatavošanai, izmantojot komerciālo *ANSYS Maxwell* skaitliskās modelēšanas rīku, tika izpētītas voltampēra raksturliķnes elektrodiem un galinstana šķidrumam, vārējot elektrodu materiālu (varš, alumīnijs, misiņš, nerūsošais tērauds un grafits).

Ievērojot konvekcijas un/vai starojuma siltumapmaiņu un izmantojot siltuma saglabāšanas likumu, tika novērtētas temperatūras starpības, kas izveidotajā eksperimentālajā iekārtā elektrovirpuļplūsmu pētīšanai var veidoties kausējumā vārējot elektrodu materiālus.

Tiek gatavots kausējuma ātruma mērīšanas eksperiments, izmantojot temperatūras korelācijas metodi. Šiem mērījumiem tika aprobēts sensors, kas sastāv no diviem termopārām, kas novietoti nelielā attālumā un paredzēti tā saucamo termogrammu uzņemšanai

## **6. Izveidoto modeļu un skaitlisko metodiku eksperimentāla verifikācija (04.2020 – 12.2021)**

### **6.1. Elektrovadoša šķidruma un tā virsmas dinamika mijiedarbībā ar EM lauku (aktivitātes atbildīgais V. Dzelme)**

Zemfrekvences elektromagnētiskā lauka ierosinātu šķidrā metāla plūsmu skaitlisko modeļu validācijai tika izveidota laboratorijas mēroga sistēma, kurā šķidra metāla brīvās virsmas pacēlumu un svārstības ierosina rotējoši pastāvīgie magnēti. Tika veikta virkne eksperimentu pie dažādiem sistēmas parametriem – magnētu rotācijas frekvences un pozīcijas pret metālu, šķidrā metāla daudzuma un brīvās virsmas oksidācijas pakāpes. Tika veikti virsmas dinamikas videouzņēmumi, kas tika pārveidoti atsevišķos kadros un apstrādāti, iegūstot brīvās virsmas formu, ko var tieši salīdzināt ar aprēķiniem. Ir panākta laba brīvās virsmas formas sakrītība eksperimentos un aprēķinios uz izveidoto skaitlisko modeļu bāzes.

Augstfrekvences magnētiskā lauka ierosinātu brīvās virsmas dinamikas aprēķinu validācijai šajā projekta posmā tika lietoti eksperimentālie dati no literatūras, kā arī šī projekta petnieku iepriekš iegūtie rezultāti. Šobrīd ir iegūti šķidra metāla slāņa atspiešanas no taisna induktora skaitliskie rezultāti, kas kvalitatīvi sakrīt ar eksperimentiem. Labai kvantitatīvai sakrītībai nepieciešams veikt papildus eksperimentus (tie plānoti vēl šogad), kuros precīzāk piefiksēt un kontrolēt relevantos parametrus.

## **6.2 Šķidra metāla un gāzes burbuļu divfāzu plūsmas mijiedarbība ar EM lauku (aktivitātes atbildīgais M. Birjukovs)**

Papildus jau iepriekš veiktajām divām neitronu radiogrāfijas eksperimentu sērijām, tika tika veiktas jaunas 3 neitronu radiogrāfijas eksperimentu sērijas PSI: 2 eksperimenti uz NEUTRA stara un 1 uz ICON stara. NEUTRA eksperimentos tika turpināta minituarizētas (rezultāti pārnesami uz lielākiem, industriāli svarīgiem mērogiem) argona burbuļu šķidrā gāzē plūsmas sistēmas izpēti, kurā tika nosegtas vairākas sistēmas parametru telpas (*Reynolds-Eotvos-Stuart* bezdimensionālo parametru telpa) plaknes. Šoreiz sistēmas radiogrāfija tika veikta plašākā gāzes padeves ātruma diapazonā, kā arī pie vairākām magnētiskā lauka indukcijas vērtībām, pie kam tika izmantotas divas dažādas magnētiskā lauka orientācijas, horizontālā un vertikālā (attiecībā uz burbuļu celšanas virzienu), kurām ir atšķirīga ietekme uz burbuļu plūsmu. ICON tika veikti testa eksperimenti ar vairākas reizēs intensīvākām neitronu plūsmām (labāka signāla/trokšņa intensitātes attiecība jeb STA, bet trūkums - daudz ātrāka šķidrā metāla aktivācija), kas ļāva labāk izšķirt burbuļu formu dinamiku. Turklāt, pirmo reizi liela biezuma šķidrā metāla sistēmai (30 mm) tika veikta augstas laika izšķirtspējas – 200, 400 un 650 kadri sekundē jeb *frames per second* (FPS) (salīdzinot ar noklusējuma 100 FPS NEUTRA eksperimentos) neitronogrāfija. To varēs izmantot gāzes burbuļu formas analīzes un fāžu robežas dinamikas (*velocimetry*) algoritmu izstrādei un pilnveidošanai. Vēl svarīgi, ka ICON starā notika tā saucamie references eksperimenti, kuros tika veikta zināma formas ķermeņa radiogrāfija ar trokšņa raksturu un STA, kas līdzīgi burbuļu radiogrāfijas apstākļiem. Tas dos papildus verifikācijas kritēriju iepriekš minētajam attēlu apstrādes algoritmam (iepriekš bija 2 kritēriji – atbilstība teorijai un skaitliskās modelēšanas rezultātiem). Pašreizējie starprezultāti parāda, ka izstrādātais attēlu apstrādes rīks funkcionē adekvāti un ir pietiekami precīzs un universāls, lai to lietotu projekta mērķu sasniegšanai. Izmantojot iepriekš minētās izstrādes (aktivitāte 5), tika veiksmīgi apstrādāti līdz šim neizmantojamie eksperimentālie dati (daļa no datiem, dēļ īpaši maza STA) no jau iepriekš veiktajiem neitronu radiogrāfijas eksperimentiem PSI. Tika apstrādāta arī daļa no jaunajiem datiem.

## **6.3. Elektrovirpuļplūsmas (aktivitātes atbildīgais A. Čudnovskis)**

Sadarbības partnera "Latvo" izveidotā eksperimentālā iekārta vispirms tika izmantota pievadītās līdzstrāvas elektriskā potenciāla, kā arī šīs līdzstrāvas magnētiska lauka mērīšanai kausējumā. Šo mērījumu rezultāti tika salīdzināti gan ar iegūto analītisko risinājumu elektriskajam potenciālam kvazi 2D gadījumā, gan arī ar skaitlisku aprēķinu ar *ANSYS Maxwell* rezultātiem magnētiskai indukcijai 3D gadījumā. Aprēķinu rezultāti gan kvalitatīvi, gan arī kvantitatīvi saskaņojas ar mērījumu rezultātiem.

Tika sagatavots un implementēts skaitliskais modelis galinstāna plūsmas un siltuma lauka (kausējumā un elektrodos) aprēķiniem ar *ANSYS Fluent* komerciālu programmu. Tā mērķis ir salīdzināt kausējuma ātruma aprēķinu rezultātus ar mērījumu rezultātiem elektrovirpuļplūsmu eksperimentālajā iekārtā (aktivitāte 5), kas iegūti izmantojot temperatūru korelācijas metodi. Šis skaitliskais modelis eksperimenta ilguma noteikšanai jau tika pielietots kausējuma sildīšanas laika noteikšanai, ņemot verā kombinētu konvekcijas un starojuma siltumapmaiņu uz eksperimentālās iekārtas ārējām robežām.

## **7. Industriālu EM tehnoloģiju kompleksu un būtiski nelineāru modeļu izveide, implementācija un pārbaude (07.2020 – 12.2021)**

### **7.1. Elektromagnētiska lentas liešana (aktivitātes atbildīgais V. Dzelme)**

Ir iesākts darbs pie kausējuma tiešās lentas liešanas procesa skaitlisko modeļu izveides. Pirmais modelis iekļauj tikai hidrodinamiku ar brīvo virsmu, lai noskaidrotu izlietā slāņa biezuma un formas atkarību no sistēmas parametriem (liešanas un lentas vilkšanas ātruma, virsmas spraigumiem u.c. parametriem). Turpmāk tālāk plānots pievienot kausējuma kristalizāciju un elektromagnētisko iedarbību.

## **7.2. Burbuļu plūsmas EM vadība šķidrā metālā reaktorā ūdeņraža ražošanai (aktivitātes atbildīgais M. Birjukovs)**

Darbs šajā apakšaktivitātē nav uzsākts.

## **7.3. Metālu kausēšana līdzstrāvas loka krāsnī (aktivitātes atbildīgais S. Pavlovs)**

Tika izveidots matemātiskais modelis un skaitliski modelēta industriālā mēroga līdzstrāvas loka krāsns ar diviem apakšējiem tērauda elektrodiem ar sarežģītu konfigurāciju (zvaigžņu veida šķērsriezums). Tika pētīti EM lauka un Lorenca spēka sadalījumi atkarībā no apakšējo elektrodu zvaigžņu staru orientācijas un to ietekme uz momentāno un vidējoto tērauda kausējuma plūsmu ar mērķi novērtēt pētāmo efektu pielietojamību kausēšanas tehnoloģiskā procesa efektivitātes paaugstināšanai.

## **7.4. Elektrovadošu kausējumu homogenizācija, attīrīšana un reakciju intensifikācija, izmantojot EM iedarbību (aktivitātes atbildīgais V. Geža)**

Uzsākta ķīmisko reakciju solvera izstrāde OpenFOAM programmā. Solveris bāzēts uz esošā solvera reactingTwoPhaseEulerFoam bāzes, pievienojot iespēju masas pārnesei starp fāzēm. Ir izstrādāts pirmais solvera variants, kurā iespējams modelēt difūziju caur brīvo virsmu no vienas fāzes citā, ar sekojošu reakciju. Turpinās darbs pie solvera testēšanas un uzlabošanas.

Projekta zinātniskais vadītājs A. Jakovičs, e-pasts: andris.jakovics@lu.lv

Administratīvais vadītājs: L. Bandeniece, e-pasts: liene.bandeniece@lu.lv

30.09.2020