



**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 01.01.2021– 31.03.2021**

Šajā laika posmā projekta grupa ir paveikusi sekojošo:

1. Projekta ietvaros notikuši zinātniskie semināri:  
25.01.2021 notika zinātniskais seminārs “Jaunākie X staru radiogrāfijas eksperimentu rezultāti, sasniegumi attēlu un datu apstrādē”, kurā uzstājās FMOF SMI pētnieks Mihails Birjukovs.  
24.02.2021 notika zinātniskais seminārs “Plāns metāla slānis EM laukā un tiešās lentas liešanas process”. Par paveikto projektā stāstīja pētnieks Valters Dzelme.
2. Komandējumi:  
Šajā laika posmā nav bijis neviens darba brauciens, kā arī nav bijusi dalība starptautiskās konferencēs.
2. Projekta ietvaros iesniegti 2 raksti:  
- “Dynamic mode decomposition of magnetohydrodynamic bubble chain flow in a rectangular vessel” M. Klevs, M. Birjukovs, P. Zvejnieks, A. Jakovičs, Physics of Fluids;  
- “MHT-X: Offline Multiple Hypothesis Tracking with Algorithm X”, P. Zvejnieks, M. Birjukovs, M. Klevs, M. Akashi, S. Eckert, A. Jakovics, Physics of fluids;
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**

Veikta nepieciešamo elektromagnētisko un hidrodinamisko procesu modelēšanas atvērtā koda programmatūras rīku (Elmer, getDP un OpenFoam) sasaistes efektivitātes un iespēju pārbaude, ātrdarbīgas sasaistes pilnveidošana, kas tādējādi nodrošina efektīvas magnetohidrodinamisko (MHD) procesu divpusējās mijiedarbības skaitliskās modelēšanas iespējas - tas nepieciešams tādu nestacionāru 3D fizikālo un tehnoloģisko procesu efektīvai izpētei, kur EM un HD lauku mijiedarbībai ir būtiska loma un kur kvalitatīvu rezultātu iegūšanu limitē skaitļošanas resursi (datoru ātrdarbība un atmiņa). Izstrādāti risinājumi, lai optimāli izmantotu pieejamo datoru un izmantojamā SMI datorklastera ražības (ātrdarbība, atmiņa, paralelizācija, datu apmaiņa) raksturlielumus. Uzlabotā aprēķinu procesu paralelizācija būtiski paaugstina ātrdarbību.HD problēmām. Praktiski pabeigti darbi, lai uzlabotu aprēķinu ātrdarbību ar atvērtā koda programmām Elmer un OpenFOAM:

1. Implementēti dažādi algoritmi, kas nosaka, cik bieži un pie kādiem kritērijiem notiek datu apmaiņa starp minētajām programmām.

2. Izstrādāta iespēja paātrināt aprēķinus neliela magnētiskā Reinoldsa skaitļa gadījumā, kad tomēr ir nepieciešams ņemt vērā inducēto strāvu noslēgšanos šķidrajā metālā. Šim nolūkam strāvas saglabāšanās likuma izpildīšanās nodrošināšana tika tieši implementēta programmā OpenFOAM, tādējādi noņemot aprēķinu slodzi no Elmer programmas un būtiski paātrinot aprēķinus.

Kā papildus iespēja/virziens ir izveidota, sekmīgi izmēģināta un tiek lietota šķidra metāla MHD aprēķinu veikšana tikai OpenFOAM vidē bez nepieciešamības lietot Elmer kodu, izmantojot EM lauka laika atkarīgo aprēķinu nevis aprēķinu kompleksajām lauka amplitūdām. Šobrīd ir izstrādāta iespēja modelēt šķidra metāla levitāciju augstfrekvences magnētiskajā laukā, implementējot OpenFOAM vidē elektromagnētiskā lauka aprēķinu modelvienādojumus. 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 (skaitliskas) oscilācijas. Lietojot šādu pieeju ir nepieciešams arī mazāks operatīvās atmiņas apjoms, nekā tas būtu vajadzīgs lietojot Elmer kodus, kas prasīja papildus datoratmiņas rezervāciju.

Tika veiktas vairākas aprēķinu sērijas, lai pārbaudītu iepriekšējā periodā izstrādātās modelēšanas programmu Elmer/OpenFOAM divpusējās sajūgšanas pieejas efektivitāti un precizitāti. Praktiski pabeigts darbs pie dažādu MHD aprēķinu iespēju realizēšanas izpētes, izmantojot tikai OpenFOAM programmatūras vidi. Izveidotā pieeja tika testēta kausējuma EM levitācijas problēmai, iegūtie rezultāti praktiski sakrīta ar Elmer/OpenFOAM aprēķinu rezultātiem. Levitācijas uzdevums ir relatīvi vienkāršs, jo tajā šķidrums nesaskaras ar cietām sienām (neatrodas traukā). Lai modelētu šķidrums traukā, aprēķinu apgabalam tika pievienotas mākslīgas iekšējās sienas, kuras šķidrums nevar šķērsot. Šobrīd atrisināta arī problēma ar adekvātu magnētiskā lauka robežnosacījumu uzdošanu uz šīm iekšējām sienām. Pēdējā periodā aprēķinu metodika tika modificēta lietojumiem EM lentas liešanas procesa modelēšanai, kas ietver gan kontaktvirsmu kustību, gan arī materiāla sacietēšanu atdzīstot. Iegūtā pieredze tiek uzkrāta un dokumentēta un būtiski tiek izmantota aktivitātēs 4, 6 un 7.

### 3.2 Bolcmaņa šūnu metode

Ir apzinātas un izmēģinātas pieejamās brīvpiekļuves programmas, kas realizē Bolcmaņa šūnu metodes (Lattice Boltzmann method - LBM) aprēķinus, kā arī identificētas to kā bāzes pieeju izmantošanas iespējas turpmāk realizējamajiem divfāžu MHD plūsmu aprēķiniem. Konstatēts, ka nav gatavu šādu projekta vajadzībām piemērotu programmu bibliotēku trīsdimensionālu (3D) un nestacionāru divfāžu MHD plūsmu gadījumā un ir nepieciešamas oriģinālas izstrādes, kurās tikai daļēji var izmantot līdzšinājo programmu "rīkus".

Tika izanalizētas LBM atvērtā koda programmatūras Palabos (AGPLv3 brīvpieejas licence) un Sailfish (LGPL v3 brīvpieejas licence) un noteikts, ka viena no perspektīvām iespējām ir izmantot Sailfish, jo tajā ir vieglāk iebūvēt papildus modeļa vienādojumus un sakarības elektromagnētisma aprēķinu veikšanai. Sailfish ir pieejams GitHub, tam ir aktīva izstrādātāju komanda un lietotāju kopa, kā arī pietiekami izsmeltošs funkcionalitāšu un izmantoto skaitlisko metožu apraksts. Šim projektam svarīgi, ka Ir pieejams arī nepieciešamais anizotropas turbulences modelis (large eddy simulation jeb LES). Veikta MHD aprēķiniem nepieciešamā atbilstošo programmatūras kodu kompleksa projektēšana.

Iesākta elektromagnētisma aprēķinu implementācija un Sailfish modifikācija projekta mērķiem, konkrēti – burbuļu plūsmas simulācijām gan bez, gan ar ārējo magnētisko lauku. Sailfish tika notestēts uz vairākām modelproblēmām, ieskaitot divfāžu plūsmas, un tika konstatēts, ka tas darbojas pietiekami efektīvi un dod fizikāli ticamus rezultātus. Tiek risināta elektromagnētisma vienādojumu/sakarību formulējuma izvēles problēma – vai izmantot 2-vienādojumu LBM pieeju (šķidrums + lauks), vai palīgvektoru metodi magnētiskam laukam, bvai arī atteikties no LBM lietojuma EM

laukam, kas sniegtu zināmas priekšrocības koda efektivitātes aspektā. šajā sakarā tika izanalizēta iespēja projekta mērķu sasniegšanai izmantot esošās sadarbības ar ārzemju institūtiem, lai potenciāli pārņemtu jau izstrādāto LBM vai citas metodes 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) Vācijā.

Kā viena no perspektīvām iespējām LBM realizācijai praktiski izvērtēta un izmēģināta grafisko procesoru sistēmu izmantošana. Tīri no resursu viedokļa konstatēta nepieciešamība efektīvu aprēķinu realizācijai papildināt sistēmu ar lielāku grafisko procesoru skaitu. Pilnībā pabeigta attēlu apstrādes programmu izveide, lai nodrošinātu Bolcmaņa šūnas metodes aprēķinu rezultātu un to eksperimentālajai verifikācijai nepieciešamo datu (neutronogrāfijas un/vai rentgenogrāfijas attēlu) ātrdarbīgu kvalitatīvu apstrādi, nodrošinot maksimāli iespējamās kvantitatīvas informācijas par burbuļu dinamiku un parametriem (forma, asu lenķis, ātrumi, svārstības, statistika u.c.) iegūšanu.

Tika pabeigta analīze arī par iespējām 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 modelēšanai šķidrā metālā. Šajā kontekstā tika izveidota sadarbība arī ar University of Greenwich (UG) – šīs sadarbības ietvaros kods TESA (oriģināli radīts sacietēšanas procesu modelēšanai) ar LBM hidrodinamiku un galīgo diferencu elektromagnētismu pašreiz tikt adaptēts burbuļu plūsmas modelēšanai. Pašreizējā izstrādes posmā šī alternatīva šķiet perspektīvāka nekā sākotnēji izvērtētā un izmēģinātā Sailfish programmas modifikācija. TESA jau ir iekļauta arī turbulences procesu modelēšana un fāzu robežu izšķiršana. Šis modelēšanas rīka izstrādes darbs tiek turpināts.

### **3.3. Komerčiālas programmatūras problēmorientēti skripti**

Veikta ar pētāmajiem elektrovirpuļplūsmu procesiem saistīto elektromagnētisko, termisko un hidrodinamisko matemātisko modeļu un attiecīgo procesu sasaistes rīku ANSYS Maxwell, Fluent un CFX vidēs izmēģināšana un noslēgumam tuvojas to pilnveidošana, lai nodrošinātu ātrdarbīgu nestacionāro 3D MHD procesu mijiedarbības simulācijas iespējas elektrovadošā un divfāzu vidē. Šie programmu sasaistes izmēģinājumi realizēti dažādiem elektrovirpuļplūsmas, gāzes burbuļu plūsmu magnētiskajā laukā un ar rotējošiem pastāvīgajiem magnētiem ierosinātu plūsmu matemātiskajiem modeļiem.

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

- ANSYS Design Modeler un ANSYS Maxwell rīku vidēs tika sagatavoti skripti modeļu ģeometrijas, kas sastāv no vairākiem elektrodiem, kas pievada līdzstrāvi (vai maiņstrāvi) kausējumam, kurš atrodas nevadošā traukā, uzbūvei;
- ANSYS Design Modeler un ANSYS Maxwell rīku vidēs tika sagatavoti skripti aprēķinu režģu ar mainīgu šūnu izmēru uzbūvei, kas ievēro EM lauku un turbulentās plūsmas īpatnības, t.sk. nodrošinot:
  - a) režģa smalcināšana (izmantojot inflāciju) tuvu elektrodiem lai nodrošinātu nepieciešamo aprēķinu precizitāti, kad elektriskās strāvas līnijas šķērso elektrodu un kausējuma robežas;
  - b) režģa smalcināšana (izmantojot inflāciju) tuvu trauka un elektrodu cietām sienām ar mērķi adekvāti modelēt elektrovirpuļplūsmu robežslāņus.
- ANSYS Maxwell rīka vidē tika sagatavoti skripti ar mērķi nodrošināt ērtu procesa parametru ievadu EM procesu modelēšanai.
- ANSYS Fluent un ANSYS CFX rīku vidēs tika sagatavoti skripti ar mērķi ievadīt parametrus elektrovirpuļplūsmas modelēšanai kausējumā, izmantojot izotropas turbulences (piem., k-eps, SST) vai anizotropas (piem., 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 un ir sekmīgi izmēģināti.

Ir pabeigta arī alternatīvu skriptu izveide, 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 ģometriju uz Maxwell piemērotāku formātu. Šajā solī tiek izmantots Python skripts, kuru palaiž caur ANSYS ACT konsoli.

Aprēķini ar šo pieeju ir relatīvi 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.

Tuvojas noslēgumam atbilstošo programmas skriptu izmēģināšana, lai nodrošinātu ātrdarbīgu un vienkārši modificējamu aprēķinu veikšanu un 4. aktivitātes sekmīgu izpildi.

Ar mērķi vizualizēt elektrovirpuļplūsmu (EVP) skaitlisko aprēķinu rezultātus, izmantojot projekta ietvaros izveidotos matemātiskos modeļus, ANSYS CFX rīka vidē tika sagatavots skripts, lai ielasītu ar ANSYS Maxwell rīku izrēķinātos rezultātus tālākai vizualizācijai ANSYS CFD Post vidē – tai skaitā līdzstrāvas un tās radītā magnētiskā lauka, elektromagnētisko spēku un to rotora sadalījumus kausējumā.

Iepriekš veidotā ANSYS CFX un Maxwell sajūgšanas pieeja Workbench vidē tika pilnībā pārstrādāta. Tagad aprēķini ar CFX un Maxwell tiek sajūgti ar ārēja python skripta palīdzību, kas pamīšus palaiž katru programmu un apmaina datus bez Workbench vides iesaistes, jo iepriekš tika konstatēts, ka Workbench lietojums palielina kopējo aprēķinu laiku. Jaunākā pieeja tika sekmīgi testēta EM levitācijas problēmai aksiāli simetriskā gadījumā. Rezultāti kvalitatīvi un kvantitatīvi labi sakrīt ar Elmer/OpenFOAM aprēķiniem, kā arī ar literatūras datiem. Tomēr, neskatoties uz šīs pieejas uzlabojumu, aprēķini joprojām ir ievērojami lēnāki nekā ar atvērtā koda Elmer un OpenFOAM pieeju, tomēr būtiski aprēķinu pieeju rezultātu verifikācijai. .

#### **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**

Izveidoti matemātiskie modeļi elektrovadoša šķidrums turbulentai plūsmai un virsmas dinamikai :

- a) aksiāli simetriskā apgabalā ārējā induktora laukā (semilevitācija un levitācija),
- b) taisnstūrveida konteinerā rotējošu pastāvīgo magnētu laukā,
- c) plānam metāla slānim uz plakanas, kustīgas virsmas augstfrekvences laukā,

Modeļi implementēti ANSYS Maxwell un CFX programmatūrā, kā arī atvērtā koda programmatūras paketēs Elmer un OpenFOAM, to sasaistei izmantojot EOF platformu. Veikta to izmēģināšana un praktiski abeigta to testēšana dažādos skaitlisko (režģis, nelineārā mijiedarbība, aproksimācija u.c.) un fizikālo parametru, kas aktuāli turpmākajiem pētījumiem, diapazonos. Būtisks ātrdarbības palielinājums tika sasniegts izmantojot aprēķinu procesu paralelizāciju daudzkodolu sistēmā (klasterī). Izstrādāta arī alternatīva pieeja EM un HD lauku sasaistei atsakoties no EM aprēķina amplitūdu "telpā" un to aizstājot ar nestacionāru aprēķinu tieši OpenFoam vidē, t.o., izslēdzot datu pārsūtīšanas nepieciešamību uz Elmer programmu. Tikā izanalizēti šādas pieejas ieguvumi un trūkumi dažādiem modeļiem.

Būtiski 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 lielāku aprēķinu ātrdarbību būtiski nezaudējot aprēķinu precizitāti.

Tika veikti testa aprēķini ar dažādiem turbulences modeļiem, piemēram, k-eps, k-w SST un Large Eddy Simulation (LES). Vienkāršākie k-eps un k-w SST modeļi dod ātrākus inženierijas līmenī pieņemamus rezultātus, taču tie parasti pārvērtē turbulento viskozitāti un līdz ar to nefizikāli slāpē plūsmu un brīvās virsmas svārstības, kas svarīgas fizikālo procesu būtības labākai izpratnei. LES modeļi, kas adekvātāk atspoguļo ātros procesus, savukārt, prasa krietni vairāk datorresursu (vienmēr nestacionāri un 3D), t.sk. aprēķina laika, bet spēj labāk atspoguļot eksperimentāli novēroto brīvās virsmas dinamiku. Tādējādi turbulences modeļa izvēle ir jāpieskaņo prasībām konkrētiem pielietojumiem.

Sekmīgi pabeigta kristalizācijas modeļu implementācijas un testēšanas OpenFOAM vidē, lai skaitliski modelētu elektromagnētisko lentas liešanas procesu (darbība 7.1). Tika implementēts temperatūras vienādojums un veikti 2D un 3D izmēģinājuma aprēķini bez un ar fāzu pārejas siltuma ievērošanu. Tika veikta skaitlisko parametru optimizācija impulsa vienādojumā, lai korekti modelētu cietās fāzes “bremzēšanos” un materiāla kustību ar konstantu vilkšanas ātrumu.

Iegūtās atziņas tiek dokumentētas un uzkrātas, lai turpmāk veicamajās aktivitātēs 6 un 7) izvēlētos optimālos risinājumus un pieejas.

## 4.2 Šķidra metāla un gāzes burbuļu divfāzu plūsmas mijiedarbība ar EM lauku

Izveidoti alternatīvi matemātiskie modeļi gāzes burbuļu ar dažādu to raksturīgo izmēru un plūsmas intensitāti dažādos procesu bezdimensionālo parametru diapazonos dinamikas izpētei šķidrā metālā ar vertikālu vai horizontālu ārējā magnētiskā lauka iedarbību, kā arī bez tās. Veikta Bolcmaņa šūnu metodes (LBM) skaitlisko algoritmu atlase, izpēte un programmas struktūras projektēšana nestacionāru divfāžu MHD plūsmu modelēšanai trijās dimensijās (3D). Izvēlētas 2 alternatīvas vide šo programmu izstrādei. Pabeigta programmatūras rīku izstrāde un pārbaude burbuļu plūsmu magnētiskajā laukā eksperimentālo datu, kas iegūti neitronogrāfijas un rentgenogrāfijas eksperimentos, analīzei - tas nepieciešams skaitlisko modeļu vispusīgai verifikācijai (skat. arī p. 3.2 un 5).

Līdztekus darbam ar LBM implementācijas risinājumiem (aktivitāte 3.2) ir izstrādātas/attīstītas alternatīvas modelēšanas metodes MHD burbuļu plūsmai (t. sk., izmantojot OpenFoam programmatūru), ar kurām varēs veikt modeļu skaitlisko verifikāciju. Izstrādātas arī oriģinālas eksperimentālo datu apstrādes metodes, kas nodrošina nepieciešamo aprēķinu rezultātu verifikāciju (skat. aktivitāti 6). Pirmkārt, tika attīstīts atvērtā koda (open-source) rīku komplekts OpenFOAM + Elmer + EOF-Library (aktivitāte 3.1) un tas tika veiksmīgi adaptēts MHD burbuļu plūsmas modelēšanai ar volume of fluid (VOF) metodi (aktivitāte 3.2). Tika arī implementēts OpenFOAM “viss vienā” risinājums (VOF), kur ar OpenFOAM veic gan šķidrums lauku aprēķinus, gan elektromagnētiskā lauka modelēšanu – tas testējot parādīja, ka var būt ātrdarbīgāks nekā OpenFOAM + Elmer + EOF-Library paketes risinājums un prasa arī mazāk datora atmiņas resursu. Noteik sadarbība 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 divfāžu plūsmām, kuru ir plānots papildināt ar elektromagnētisma vienādojumu risināšanas moduļiem un izmantot šādi pilnveidotu rīku MHD burbuļu plūsmas simulācijām. Alternatīva ir aktivitātē 3.2 attīstītā aprēķinu metodes modifikācija sadarbībā ar Grinvičas universitātes speciālistiem. Burbuļu fāzu robežas labākai izšķiršanai sekmīgi tiek izmantots IsoAdvector algoritms, kurš iepriekš tika optimizēts, lai nodrošinātu precīzus aprēķinus ilgiem plūsmas laika intervāliem. Darbs šajā virzienā turpinās un jau ir sasniegti pirmie rezultāti plūsmas aprēķinam bez magnētiskā lauka, kā arī tiek implementēts un jau pakāpeniski validēts MHD aprēķins.

### 4.3. Elektrovirpuļplūsmas

5. Izveidoti un pārbaudīti 6 atšķirīgi elektrovirpuļplūsmu, ko izraisa līdzstrāva, ko pievada metālam ar dažādu elektrodu skaitu un atšķirīgu to novietojumu matemātiskie modeļi. Šie modeļi ir implementēti ANSYS Maxwell un CFX programmu vidēs, kā arī veikta skaitlisko modeļu izmēģināšana un testēšana, variējot dažādus to skaitliskos un fizikālo procesu parametrus pieļaujamā diapazonā. Praktiski pabeigti šo modeļu skaitliskā verifikācijai nepieciešamie aprēķini uz dažādām datorsistēmām. Šim mērķim tiek izmantoti gan vēsturiskie eksperimentālie dati (pašu autoru un no literatūras), gan arī sadarbībā ar Maskavas Augsttemperatūru institūta pētniekiem laboratorijas apstākļos jauniegūtie eksperimentālie dati dažādām elektrovirpuļplūsmu sistēmām. Verifikācijas eksperimenti un aprēķini tiek turpināti citām elektrovirpuļplūsmu konfigurācijām.

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

1. Laboratorijas mēroga 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 mērījumu rezultātu salīdzināšanai ar modelēšanas datiem gan EM laukam, gan arī elektrovadošā šķidrums turbulentai plūsmai, kuru ierosina līdzstrāvas mijiedarbība ar savu magnētisko lauku šķidrajā metālā.

2. 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 mijiedarbojoties 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 rezultātus. Skaitliskie modeļi tiek verificēti arī izmantojot literatūrā publicētos skaitlisko aprēķinu rezultātus.

Izmantojot pilnveidotu (skat. aktivitāti 3.3) komerciālajā modelēšanas programmatūrā (tai skaitā ANSYS Maxwell, ANSYS Fluent, ANSYS CFX un ANSYS CFD Post) implementēto matemātisko modeli, tika turpināti plūsmas rotācijas industriālā mēroga iekārtā skaitliskie aprēķini situācijā, kad uz kausējumu iedarbojas arī ārējā vertikālā magnētiskā laukā, kas mijiedarbojas ar līdzstrāvu, kura tiek pievadīta tērauda kausējumam ar vienu augšējo elektrodu un diviem tērauda elektrodiem no apakšas. Šādu modeļu skaitliskā verifikācija ir būtiska plānoto patenta priekšlikumu izstrādei, lai nodrošinātu efektīvāku kausējuma masas homogenizāciju līdzstrāvas loka krāsnīs.

### 5. Eksperimentālo metodiku pilnveidošana un aprobācija atbalsta eksperimentu veikšanai (10.2019 – 03.2021)

Pabeigta skaitlisko modeļu eksperimentālajai verifikācijai nepieciešamo eksperimentālo metodiku, laboratorijas iekārtu, mērījumu tehnikas un datu apstrādes rīku izstrāde un to pilnveidošana:

- gāzes burbuļu plūsmas šķidrajā metālā izpētei ar un bez ārējā (vertikāla vai horizontāla) magnētiskā lauka, izmantojot optisko metodi ar maza biezuma

plakanparalēlu konteineru. Izmantojot skaitlisko modelēšanu izprojektēta nepieciešamā pastāvīgo magnētu konfigurācija vertikāla un horizontāla lauka nodrošināšanai eksperimentālajā sistēmā. Pabeigta 5 dažādu magnētu sistēmu montāža un caurspīdīgu konteineru šķidrā metāla divfāzu plūsmu izpētei izgatavošana, sistēmu komplektācija un izmēģināšana gan neitronogrāfijas iekārtā PSI (Šveice), gan X-staros HZDR (Vācija);

- brīvās virsmas dinamikas detektēšanai, ko ierosina rotējošu pastāvīgo magnētu lauks paralēlskaldņa formas konteinerā. Izmēģinātas un praktiski realizētas optiskās metodes speciālā apgaismojumā un ātrdarbīga virsmas dinamikas filmēšana;

- sadarbībā ar Maskavas augsttemperatūru institūta speciālistiem izstrādāta metode un laboratorijas iekārta ātrumu mērīšanai šķidrā metāla turbulentās plūsmās, izmantojot termisko fluktuāciju zondi un sekmīgi pabeigti sistēmas izmēģinājumi

- izveidoti vairāki sistēmu varianti gallija temperatūras virs kušanas punkta nodrošināšanai laboratorijas eksperimentos;

- pilnīgi no jauna izveidota eksperimentālā laboratorijas iekārta elektrovirpuļplūsmu eksperimentiem ar zemas temperatūras šķidrājiem metāliem pie lielām strāvas intensitātēm (līdz 2000 A) SIA "Latvo". Sekmīgi veikti iekārtas izmēģinājumi.

Veikta atbilstošu eksperimentālo iekārtu montāža un metodiku aprobācija, kas parādīja to piemērotību veicamajiem skaitlisko modeļu verifikācijas eksperimentiem.

Pabeigta eksperimentāli neitronogrāfijā un rentgenogrāfijā, kā arī skaitliski iegūstamo divfāzu plūsmu 2D attēlu oriģinālo apstrādes programmatūras rīku izstrāde, kas nodrošina maksimālo izšķirtspēju pētāmo procesu šķidrājos metālos kvantitatīvai analīzei un daādu fizikālo fenomenu identifikācijai ļoti trokšņaina signāla (tipiski eksperimentiem ar lielu procesu ātrumu) apstākļos.

Izveidota datorvadāma sistēma magnētiskā lauka 3D kartēšanai ap pastāvīgajiem magnētiem. Magnētiskā lauka zonde piestiprināta pie elektroniski vadāma galdņa, ko var vadīt ar programmas skriptu palīdzību. Mērījumu dati tiek ierakstīti ar pieslēgtā osciloskopa palīdzību. Izstrādāta programma, kas nodrošina komunikāciju starp datoru, osciloskopu un magnētiskā lauka zondi.

Tika izmēģināts inovatīvs risinājums optiskiem mērījumiem burbuļu plūsmai plānā šķidrā metāla slānī – šai metodikai ir perspektīvas aizvietot rentgenstaru radiogrāfiju pie šķidrā metāla biezumiem < 4 mm. Šajā gadījumā tad nav nepieciešamas sarežģītas X-staru iekārtas - būs iespējams reproducēt HZDR veiktos eksperimentus, pie kam varēs papildināt jau esošos datus ar mērījumiem magnētiskajā laukā.

HZDR rentgenstaru radiogrāfijas eksperimentālajā iekārtā tika izmēģinātas burbuļu plūsmas Hele-Shaw tipa sistēmās (3 un 6 mm biezuma analogi sistēmai, kura tika pētīta PSI) ar vertikālu un horizontālu stacionāru magnētisko lauku pētījumu iespējas. Tie ir pirmie šāda veida eksperimenti pasaulē, jo līdz šim nav bijis datu šādām sistēmām ar plūsmu magnētiskajā laukā. Papildus HZDR tika aprobēta augstās izšķirtspējas 3D magnetometrija šajā projektā izstrādātajām un PSI & HZDR eksperimentos izmantojamajām magnētiskā lauka sistēmām. Tika noskaidrots, ka sistēmas funkcionē atbilstoši to projektam un specifikācijām.

Eksperimentālai iekārtai, kas tika izveidota sadarbībā ar Maskavas augstu temperatūru pētījumu institūtu, ar divu elektrodu līdzstrāvas pievadu (bifilārā shēma) galinstana (InGaSn) kausējumam tika veikti sekojošie mērījumi temperatūras korelācijas metodes izmēģināšanai un aprobācijai:

- kausējuma un elektrodu sasilšanas temperatūras raksturīknes izvēlētos raksturīgajos punktos pie dažādām pievadītas līdzstrāvas vērtībām,
- ātruma horizontālo komponentu sadalījumi kausējumā starp elektrodiem.

Aktivitāte ir sekmīgi pabeigta plānotajā termiņā.

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

### **6.1. Elektrovadoša šķidrums un tā virsmas dinamika mijiedarbībā ar EM lauku**

Plaša frekvenču spektra elektromagnētiskā lauka ierosinātu šķidrā metāla turbulento plūsmu skaitlisko modeļu validācijai tika izveidota un tiek izmantota laboratorijas mēroga sistēma, kurā šķidrā metāla brīvās virsmas pacēlumu un svārstības ierosina cilindriski rotējoši pastāvīgie magnēti (viens vai vairāki). Šī iekārta tiek izmantota daudzveidīgiem laboratorijas eksperimentiem ar pie dažādiem sistēmas parametriem – magnētu skaita, rotācijas frekvences, pozīcijas attiecībā pret šķidrā metāla konteineru, šķidrā metāla daudzuma (līmeņa) konteinerā un metāla virsmas pārklājuma ar oksīdu vai bez tā, kas būtiski ietekmē virsmas spraigumu. Tika veikti virsmas dinamikas augstas frekvences videouzņēmumi, kas tika pārveidoti atsevišķos kadros un apstrādāti, iegūstot brīvās virsmas formu, ko var tieši salīdzināt ar aprēķiniem. Ir panākta laba brīvās virsmas formas sakritība eksperimentos un aprēķinos uz izveidoto skaitlisko modeļu bāzes. Izmantojot marķierus tiek noteikti arī plūsmas ātrumi uz virsmas. Augstfrekvences virsmas svārstību dati tiek analizēti kontekstā ar HD LES skaitlisko modeli - šis pētījums turpinās.

Augstfrekvences magnētiskā lauka ierosinātu brīvās virsmas dinamikas aprēķinu validācijai šajā aktivitātē tika lietoti eksperimentālie dati no literatūras, kā arī šī projekta pētnieku iepriekš iegūtie rezultāti. Šobrīd ir iegūti šķidra metāla slāņa atspiešanas no taisna (lineāra) induktora skaitliskie rezultāti, kas labi kvalitatīvi un apmierinoši kvantitatīvi atbilst eksperimentu rezultātiem, kas tika iegūti veicot mērījumu sērijas Leibniza Hannoveres universitātes Elektrotehnoloģiju institūtā Vācijā. Labas kvantitatīvās sakritības sasniegšanai minētajā universitātē Vācijā šogad paredzēts veikt papildus eksperimentus, kuros būs iespējas precīzāk piefiksēt un kontrolēt procesa būtiskos parametrus.

Tika izremontēta un izmēģināta defektīvā maza mēroga augstfrekvences lauka ģenerācijas iekārta, kuru paredzēts izmantot kvazi-levitācijas modeļa eksperimentālai verifikācijai, kura pārbaude jau veikta uz iepriekš publicēto līdzīgu levitācijas eksperimentu rezultātu bāzes, sasniedzot labu eksperimentālo un skaitlisko rezultātu atbilstību. Pašreizējais darbu progress ļauj prognozēt, ka 6.1. aktivitātes mērķis - izveidoto metāla dinamikas matemātisko modeļu verifikācija uz eksperimentālo datu bāzes, tiks sasniegts plānotajā termiņā.

### **6.2 Šķidra metāla un gāzes burbuļu divfāzu plūsmas mijiedarbība ar EM lauku**

Papildus jau iepriekš veiktajām divām neitronu radiogrāfijas eksperimentu sērijām, tika veiktas 3 jaunas neitronu radiogrāfijas eksperimentu sērijas PSI (Šveice): 2 eksperimenti uz NEUTRA stara un 1 uz ICON stara. NEUTRA eksperimentos tika turpināta miniaturizētas (rezultāti pārnesami uz lielākiem, industriāli svarīgiem mērogiem) argona burbuļu šķidrā gallijā ķēdes plūsmas sistēmas izpēte, kurā tika nosegtas vairākas sistēmas parametru telpas (Reynolds-Eotvos-Stuart bezdimensionālo parametru telpa) plaknes. Šoreiz sistēmas neitronu radiogrāfija tika veikta plašākā gāzes padeves ātruma/plūsmas diapazonā, kā arī pie dažādām magnētiskā lauka indukcijas vērtībām, pie kam tika izmantotas divas dažādas magnētiskā lauka orientācijas attiecībā uz burbuļu celšanas virzienu (horizontālā un vertikālā), kurām ir būtiski atšķirīga ietekme uz burbuļu plūsmas raksturu atšķirīgo fizikālo iedarbības mehānismu dēļ. ICON iekārtā tika veikti salīdzināšanas eksperimenti ar vairākas reizēs intensīvākām neitronu stara plūsmām (tas nodrošina labāku signāla/trokšņa intensitātes attiecība jeb STA, bet trūkums - daudz ātrāka šķidrā metāla aktivācija, kas kavē eksperimentu sērijas realizāciju) Šie eksperimenti ļāva labāk izšķirt burbuļu formu transformācijas un 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. Šie rezultāti tika



izmantoti gāzes burbuļu formas analīzei un fāžu robežas dinamikas (velocimetry) algoritmu izstrādei un pilnveidošanai (skat. arī aktivitātes 3 un 5). Iegūtie un apstrādātie dati tiek izmantoti attiecīgo burbuļu plūsmu skaitlisko modeļu verifikācijai.

Vēl svarīgi, ka ICON starā tika veikti tā saucamie references eksperimenti, kuros notika zināma formas ķermeņa neitronogrāfija ar trokšņa raksturu un STA, kas līdzīgi reālu burbuļu radiogrāfijas apstākļiem. Tas deva papildus verifikācijas kritēriju iepriekš minētajam attēlu apstrādes algoritmam (iepriekš bija 2 kritēriji – atbilstība teorijai un skaitliskās modelēšanas rezultātiem). Pašreizējie rezultāti jau parāda, ka izstrādātais attēlu apstrādes rīks funkcionē adekvāti un ir pietiekami precīzs un universāls, lai to lietotu projekta mērķu sasniegšanai - divfāžu plūsmas (burbuļi/metāls) matemātisko un skaitlisko modeļu verifikācijai.

Izmantojot iepriekš minētās izstrādes (aktivitāte 5), tika veiksmīgi apstrādāti līdz šim neizmantojamie eksperimentālie dati (daļa no datiem, ar īpaši mazu STA) no jau iepriekš veiktajiem neitronu radiogrāfijas eksperimentiem PSI. Neitronu radiogrāfijas eksperimentos PSI (Šveice) iegūto liela apjoma datu pēcapstrāde un analīze šajā periodā būtiski pavirzījies uz priekšu.

HZDR (Vācija) tika veikti līdzīgi burbuļu plūsmas šķidrā metālā ārējā magnētiskajā laukā rentgenogrāfijas (X-ray) eksperimenti - šinī gadījuma metāla slāņa biezums bija mazāks 2 - 3 cm, kas veido būtisku papildinājumu matemātisko/skaitlisko modeļu verifikācijai nepieciešamo datu kopai. Šo darbu rezultātā tika sagatavoti pamatmateriāli 3 publikācijām: divas no tam ir izstrādātas un iesniegtas izvērtēšanai, trešā tiks pabeigta 2021.g. II. kvartālā. Provizoriski var apgalvot, ka jau pašreiz sasniegta laba skaitlisko un eksperimentālo datu atbilstība un tādējādi aprakstītaas vairākas līdz šim neizanalizētas gāzes burbuļu plūsmas elektrovadošā šķidrūmā mijiedarbības ar ārējo magnētisko lauku.

### **6.3. Elektrovirpuļplūsmas**

Sadarbība ar Maskavas Augsttemperatūru institūtu (MAI) izveidota laboratorijas iekārta elektrovirpuļplūsmu izpētei laboratorijas apstākļos un ir veikta lielākā daļa skaitliskā modeļa verifikācijas eksperimentu divām elektrovirpuļplūsmu konfigurācijām. ANSYS CFX vidē Iegūtie skaitliskie rezultāti labi atbilst eksperimentālajiem. Padziļināti tika analizēti plūsmas ātrumi šķidrā metāla brīvās virsmas tuvumā.

Sadarbības partnera "Latvo" laboratorijā (skat. 5. aktivitāti) izveidotā eksperimentālā iekārta ar atšķirīgu elektrovirpuļplūsmas konfigurāciju un lielu maksimālo strāvu (2000 A) 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. Skaitlisko aprēķinu rezultāti gan kvalitatīvi, gan arī kvantitatīvi saskaņojas ar mērījumu rezultātiem. Turpinājumā plānoti šķidrā metāla plūsmas un tā virsmas deformācijas mērījumi izveidotajā iekārtā.

Tika sagatavots un ANSYS Fluent komerciālajā programmatūrā implementēts skaitliskais modelis galinstāna plūsmas un siltuma lauka (kausējumā un elektrodos) aprēķiniem. Izmantojot to tika salīdzināti kausējuma ātruma aprēķinu rezultāti ar pirmajiem mērījumu rezultātiem elektrovirpuļplūsmu eksperimentālajā iekārtā MAI (aktivitāte 5), kas iegūti izmantojot temperatūru korelācijas metodi. Salīdzināšanas mērķis bija skaitliskā modeļa verifikācija un nepieciešamības gadījumā modeļa parametru pieskaņošana. It īpaši termisko robešnosacījumu pieskaņošana ir būtiska kombinētās konvekcijas un starojuma siltumapmaiņai uz eksperimentālās iekārtas ārējām virsmām adekvātam atspoguļojumam. Šis skaitliskais modelis eksperimenta

ilguma noteikšanai tika pielietots arī kausējuma nepieciešamā ussildīšanas laika noteikšanai, ņemot vērā kombinētu konvekcijas un starojuma siltumapmaiņu uz eksperimentālās iekārtas ārējām robežām.

Ar sagatavoto skaitlisku modeli tika turpināti aprēķini galinstāna plūsmas un temperatūras lauka (kausējumā un elektrodos) sadalījumu noteikšanai ar ANSYS Fluent komerciālo programmu. Aprēķinu rezultāti kausējuma ātrumam, kā arī kausējuma un elektrodu temperatūrai, tika salīdzināti ar laboratorijas mērījumu rezultātiem, kas iegūti eksperimentālajā iekārtā (aktivitāte 5), izmantojot temperatūru korelācijas metodi. Iegūtie eksperimentālie dati tiek izmantoti arī uz atvērtā koda programmatūras bāzes izveidotā elektrovirpuļplūsmas skaitliskā modeļa verifikācijai - šis darbs tiek turpināts.

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

### **7.1. Elektromagnetiska lentas liešana**

Notika darbs pie kausējuma tiešās elektromagnetiskās lentas liešanas procesa skaitlisko modeļu izveides, implementācijas un izmēģināšanas OpenFoam programmas vidē. Pirmais 2D modelis iekļāva tikai hidrodinamiku ar brīvās virsmas dinamiku, lai noskaidrotu izlietā slāņa biezuma un formas atkarību no sistēmas parametriem (liešanas un lentas vilkšanas ātruma, virsmas spraigumiem u.c. parametriem). Nakamajos soļos tam tika pievienoti termiskais, kausējuma kristalizācijas un elektromagnētiskās iedarbības modeļi. Pirmajos lentas liešanas hidrodinamikas aprēķinos tika konstatēts, ka slāņa forma ir stipri atkarīga no kausējuma virsmas spraiguma un slapināšanas īpašībām uz lentas. Stabila forma tiek iegūta, ja kausējums lentu pilnībā slapina un izplūst pa lentas platumu. Pēc kausējuma kristalizācijas (sacietēšanas) modeļa pievienošanas iekļaujot fāzu pārejas siltumu tika veikti 2D izmēģinājuma aprēķini. Pašreiz turpinās šī procesa 3D modeļa implementācija un izmēģināšana. Lai veiktu pilnvērtīgu 3D nestacionārā modeļa realizāciju, to nepieciešams pārnest uz augstražīgu datorklasteri, lai nodrošinātu nepieciešamo aprēķinu rezultātu precizitāti.

### **7.2. Burbuļu plūsmas EM vadība šķidrā metālā reaktorā ūdeņraža ražošanai**

Turpinās reaktora kolonnas ar šķidro metālu atomtiskā modeļa izstrāde un implementācija atvērtā koda programmatūras un ANSYS CFX vidē - izvēlēta ģeometrija un plūsmas parametri, kas pietuvināti industriāla rakstura iekārtām. Sākotnēji modelis aksiāli simetriskā tuvinājumā ir aizstāts ar 3D dinamisko modeli. Parukulārais modelis, kas izstrādāts aktivitātes 4 ietvaros, tika modificēts galliju un argonu attiecīgi aizvietojo ar alvu un metānu., kā arī izmainot ārējās EM iedarbības veidu. Tika pārbaudīts, ka izmantotās skaitliskās shēmas ir adekvātas arī šajā situācijā un ka bezdimensionālās grupas, kas atbilst šādai sistēmai, pieļauj argonam/gallijam iegūto atziņu ekstrapolāciju. Ir uzsākta modeļu divās atšķirīgās programmatūras vidēs provizorisko rezultātu savstarpēja salīdzināšana..

### **7.3. Metālu kausēšana līdzstrāvas loka krāsnī**

Tika izveidots un implementēts matemātiskais modelis, kā arī skaitliski izmēģināta industriālā mēroga līdzstrāvas loka krāsns ar diviem apakšējiem tērauda elektrodziem modelēšana. Izmantojot izveidoto skaitlisku modeli, tika turpināti EM un HD lauku skaitliskie pētījumi industriālā mēroga līdzstrāvas loka krāsnij ar diviem apakšējiem sarežģītas konfigurācijas (zvaigžņu veida, dažādas ģeometrijas un dažādi orientētu pret pamatni) apakšējiem elektrodziem. Tika pētīti EM lauka un Lorenca spēka

sadalījumi atkarībā no apakšējo elektrodu ģeometrijas variācijām un to ietekme uz momentāno un vidējoto tērauda kausējuma plūsmu ar mērķi novērtēt pētāmo efektu pielietojamību kausēšanas tehnoloģiskā procesa efektivitātes paaugstināšanai - lai ar papildus rotācijas palīdzību nodrošinātu kausējuma sastāva un temperatūras homogenizāciju. Darbu turpinot modelis vēl jāpilnveido meklējot šim mērķim vispiemērotākās elektrodu ģeometrijas un novietojumu. Šie pētījumi veido arī bāzi plānotajam patenta pieteikumam.

#### **7.4. Elektrovadošu kausējumu homogenizācija, attīrīšana un reakciju intensifikācija, izmantojot EM iedarbību**

Lai pētītu elektrovadošu kausējumu (piem., silīcijs, izkausēti metāli) homogenizāciju un attīrīšanu tuvojas nobeigumam ķīmisko reakciju solvera izstrāde OpenFOAM programmā. Izstrādne tiek bāzēta uz esošā solvera ReactingTwoPhaseEulerFoam, pievienojot masas pārnesei starp dažādām fāzēm funkcionalitāti. Ir izstrādāts pirmais un uzlabotais solvera variants, kurā iespējams modelēt difūziju caur brīvo virsmu no vienas fāzes citā un arī tai sekojošās reakcijas. Turpinās darbs pie reakciju solvera OpenFOAM programmā pielāgošanas pusvadītāju materiālu un metalurģijas problēmu risināšanai. Pabeigts solvera pamatvariants, kurš spēj risināt sajūgtas šķidrumu mehānikas, termisko, difūzijas un ķīmisko reakciju problēmas. Tika turpināts darbs pie optimālu skaitlisko parametru izvēles un procesu fizikālo parametru uzdošanas variantiem. Tika turpināts darbs pie solvera testēšanas un arī aprēķinu rezultātu validācijas.

Projekta zinātniskais vadītājs A. Jakovičs, e-pasts: andris.jakovics@lu.lv  
Administratīvais vadītājs: L. Bandeniece, e-pasts: liene.bandeniece@lu.lv

31.03.2021