



**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 01.10.2020 – 31.12.2020**

Šajā laika posmā projekta grupa ir paveikusi sekojošo:

1. Projekta ietvaros notikuši zinātniskie semināri:  
05.10.2020 notika zinātniskais seminārs “MHD burbuļu plūsmas spektrālā analīze”, kurā uzstājās FMOF laborants Mārtiņš Klevs.  
16.10.2020 notika zinātniskais seminārs “Jaunākie neitronu radiogrāfijas eksperimentu rezultāti, sasniegumi, attēlu un datu apstrāde”. Par paveikto projektā stāstīja pētnieks Mihails Birjukovs un FMOF laborants Pēteris Zvejnieks.
2. Komandējumi:  
02.10.2020 notika attālināta starptautiska konference “Advanced problems of Electrotechnology 2020” (APET2020), kurā tika prezentēti 4 referāti projekta ietvaros.  
No 23.10.2020-22.12.2020 projekta pētnieks M. Birjukovs atradās darba braucienā Vācijā, Helmholca centrā Drēzdenē-Rossendorfā, lai veiktu unikālu (pirmo reizi pasaulē) eksperimentu sēriju X-staros, analizējot gāzes burbuļu dinamiku šķidrā metālā dažādas intensitātes ārējā horizontālā un vertikālā magnētiskajā laukā. Komandējuma laikā būtiski tika pilnveidotas arī eksperimentos iegūto datu (attēlu) apstrādes metodes, lai liela trokšņa fona apstākļos iegūtu kvantitatīvus datus par burbuļu kustību un formu.
2. Projekta ietvaros publicēti 2 raksti:
  - “An electrovortex flow around two fully submerged electrodes” A Chudnovsky<sup>1</sup>, Yu Ivochkin<sup>2</sup>, A Jakovics<sup>3</sup>, S Pavlovs<sup>3</sup>, I Teplyakov<sup>2</sup> and D Vinogradov<sup>2</sup>, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering;
  - “Liquid metal free surface dynamics in rotating permanent magnet stirrer” V Dzelme<sup>1</sup>, A Jegorovs<sup>1</sup> and A Jakovics<sup>1</sup>, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering;
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**

Tika veikta aprēķinu sērija, lai testētu iepriekšējā periodā izstrādātās modelēšanas programmu Elmer/OpenFOAM divpusējās sajūgšanas pieejas. Turpinājās darbs pie dažādu MHD aprēķinu iespēju realizēšanas izpēti izmantojot tikai OpenFOAM programmatūras vidi. Izveidotā pieeja tika testēta EM levitācijas problēmai, iegūtie rezultāti praktiski sakrīt ar Elmer/OpenFOAM aprēķinu rezultātiem. Levitācijas uzdevums ir relatīvi vienkāršs, jo tajā šķidrums nesaskaras ar cietām sienām (neatrodas traukā). Lai modelētu šķidrumu traukā, aprēķinu apgabalam var tikt

pievienotas mākslīgas iekšējās sienas, kuras šķidrums nevar šķērsot. Šobrīd tiek risināta problēma ar adekvātu magnētiskā lauka robežnosacījumu uzdošanas uz šīm iekšējām sienām.

### 3.2 Bolcmaņa šūnu metode

Tika pabeigta analīze 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 šķidrajā metālā. Šajā kontekstā tika izveidota sadarbība ar Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) un University of Greenwich (UG) – tās ietvaros kods TESA (oriģināli radīts sacietēšanas procesu modelēšanai) ar LBM hidrodinamiku un galīgo diferencu elektromagnētismu var tikt adaptēts burbuļu plūsmas modelēšanai. Pašreiz šī alternatīva ir perspektīvāka, nekā sākotnēji izvērtētā *Sailfish* modifikācija, kas prasītu daudz liekākus laika resursa ieguldījumus. TESA jau iekļauta turbulences modelēšana un fāzu robežu izšķiršana.

### 3.3. Komerčiālas programmatūras problēmorientēti skripti

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 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.

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

### 4.1. Elektrovadoša šķidruma un tā virsmas dinamika mijiedarbībā ar EM lauku

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

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

Burbuļu fāzu robežas labākai izšķiršanai sekmīgi tiek izmantots *IsoAdvector* algoritms, kurš iepriekš tika optimizēts, lai nodrošinātu precīzus aprēķinus ilgiem plūsmas laika intervāliem. Tika uzturēti kontakti ar Paul Scherrer Institute (PSI) skaitliskās hidrodinamikas un augstās veiktspējas skaitļošanas grupām un tiek turpināta sadarbība, kuras ietvaros ir 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 modelēšanai – tā ir laba alternatīva pašlaik pieejamiem rīkiem. Darbs šajā virzienā ir uzsākts un jau ir sasniegti pirmie rezultāti plūsmas aprēķinam bez magnētiskā lauka, kā arī tiek implementēts un jau pakāpeniski validēts MHD aprēķins.

### **4.3. Elektrovirpuļplūsmas**

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 kausējums ievietots ārējā vertikālā magnētiskā laukā, kas mijiedarbojas ar līdzstrāvu, kura tiek pievadīta tērauda kausējumam ar vienu augšējo elektrodu un diviem tērauda elektrodiem no apakšas.

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

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

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

Darba komandējuma laikā HZDR tika veikta rentgenstaru radiogrāfijas eksperimentu sērija, kuras ietvaros tika pētīta burbuļu plūsma Hele-Shaw tipa sistēmās (3 un 6 mm biezuma analogi sistēmai, kura tika pētīta PSI) ar vertikālu un horizontālu stacionāru magnētisko lauku. Tie ir pirmie šāda veida eksperimenti pasaulē, jo līdz šim nav bijis datu šādām sistēmām ar plūsmu magnētiskajā laukā. Papildus HZDR tika veikta augstās izšķirtspējas 3D magnetometrija izstrādātajām un PSI & HZDR eksperimentos izmantotajām magnētiskā lauka sistēmām. Tika noskaidrots, ka sistēmas funkcionē kā tas ir paredzēts pēc to dizaina procesa un specifiskajām.

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 raksturlīknes izvēlētos raksturīgajos punktos pie dažādām pievadītas līdzstrāvas vērtībām,
- ātruma horizontālo komponentu sadalījumi kausējumā starp elektrodiem.

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

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

Tika izveidots eksperimentāls induktors, lai izmēģinātu iespējas ar zemas frekvences lauku iedarboties uz plānu metāla slānīti. Tika izremontēta un izmēģināta defektīvā

maza mēroga augstfrekvences lauka ģenerācijas iekārta. Šo izstrādņu mērķis ir izveidoto matemātisko modeļu verifikācija.

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

Tika turpināta neitronu radiogrāfijas eksperimentos PSI (Šveice) iegūto liela apjoma datu pēcapstrāde un analīze. Tā rezultātā tika sagatavoti pamatmateriāli 2 publikācijām: viena no tam ir izstrādāta un iesniegta izvērtēšanai, otra tiks pabeigta 2021.g. I. kvartālā.

## **6.3. Elektrovirpuļplūsmas**

Ar sagatavoto skaitlisku modeli tika turpināti aprēķini galinstāna plūsmas un siltuma 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. Salīdzināšanas mērķis bija skaitliskā modeļa verifikācija un nepieciešamības gadījumā modeļa parametru pieskaņošana. It īpaši pieskaņošana ir būtiska robežnosacījumiem kombinētai konvekcijas un starojuma siltumapmaiņai uz eksperimentālās iekārtas ārējām virsmām.

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

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

Pirmajos lentas liešanas hidrodinamikas aprēķinos 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. Darbu turpinot modelim tiek pievienota kausējuma kristalizācija un tiek veikti 2D izmēģinājuma aprēķini.

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

Pašreiz pieejamie skaitliskie modeļi tika modificēti, galliju un argonu attiecīgi aizvietojo ar alvu un metānu. 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.

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

Izmantojot izveidoto skaitlisku modeli, tika turpināti EM un HD lauku skaitliskie pētījumi industriālā mēroga līdzstrāvas loka krāsnij ar diviem apakšējiem tērauda elektrodiem un ar sarežģītu to konfigurāciju (zvaigžņu veida šķērsriezums).

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

Turpinājas darbs pie reakciju solvera izstrādes OpenFOAM programmā un tā pielāgošanas metalurģijas problēmu risināšanai. Pabeigts solvera pamatvariants, kurš spēj risināt sajūgtas šķidrums mehānikas, termisko, difūzijas un ķīmisko reakciju problēmas. Tika turpināts darbs pie optimālas skaitlisko parametru izvēles un fizikālo parametru uzdošanas variantiem. Tika turpināta arī aprēķinu rezultātu validācija.

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

31.12.2020