



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 01.07.2021– 30.09.2021

Šajā laika posmā projekta grupa ir paveikusi sekojošo:

1. Projekta ietvaros notikuši zinātniskie semināri:
2. Komandējumi:

Projekta darbinieki šajā laika posmā piedalījušies trīs starptautiskās zinātniskās konferencēs:

- a) ICTAM 2021, Milāna, Itālija, 2021 augusts (postera referāts) - P. Zvejnieks, M. Birjukovs, M. Klevs, A. Jakovičs u.c. "MHT-X:Efficient Multiple Hypothesis tracking for Multiphase Flow Analysis";
- b) RMHD2021, Perm, Russia, September 2021 - Chudnovsky A., Ivochkin Yu., Jakovics A., Pavlovs S. "Comparison of computational and measurement results for electrovortex flow in experimental setup with liquid metal and power supply over top and bottom electrodes";
- c) RMHD2021, Perm, Russia, September 2021 - Klevs M., Birjukovs M., Zvejnieks P., Jakovics A. "Dynamic mode decomposition of MHD bubble chain flow";
- d) UIE2021, Čehija, 2021 septembris - V. Dzelme, A. Jakovičs, E. Baake "Liquid metal layer dynamics in transverse alternating magnetic field" ;
- e) UIE2021, Čehija, 2021 septembris - M. Birjukovs, A. Jakovics u.c. "Dynamic Neutron Imaging of Argon Bubble Flow in Liquid Gallium in Horizontal or Vertical Magnetic Field" ;
- f) UIE2021, Čehija, 2021 septembris - A. Čudnovskis, S. Pavlovs, A. Jakovičs "Melt electrovortex flow in DC EAF model with two bottom electrodes in axial magnetic field".

3. Projekta ietvaros publicēts raksts:

- M. Klevs, M. Birjukovs, P. Zvejnieks, A. Jakovičs “Dynamic mode decomposition of magnetohydrodynamic bubble chain flow in a rectangular vessel”, Physics of Fluids, 2021, Volume 33 Issue 8, August 2021.

4. Šajā periodā tika īstenotas darbības nr. 1., 1.1., 1.2., 4., 4.1, 4.2, 4.3., 6., 6.1., 6.2., 6.3., 7., 7.1., 7.2., 7.3., 7.4., 8., 9., 10. 12., 12.1, 12.2, 12.3.

Tajās šajā periodā paveikts sekojošais:

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

Tika pabeigta izveidoto un atvērtā koda programmatūrā Elmer un OpenFOAM implementēto matemātisko modeļu elektrovadoša šķidrums turbulentai plūsmas un virsmas dinamikas aprēķinam ārējā EM laukā pārbaude un skaitliskā verifikācija. Tai skaitā šajā aktivitātē tika analizēti šādu MHD procesu modeļi:

- plūsma aksiāli simetriskā apgabalā ārējā augstfrekvences induktora laukā, iekļaujot semilevitāciju un levitāciju;
- plūsma dziļā taisnstūrveida konteinerā rotējošu pastāvīgo magnētu laukā;
- plūsma plānā metāla slānī uz plakanas virsmas augstfrekvences laukā.
- plūsma un kristalizācija uz kustīgas un dzesētas virsmas.

Verifikācijai tika izmantoti analītiskie novērtējumi un aprēķini izmantojot komerciālās programmēšanas paketes ANSYS komponentes Maxwell, CFX un Fluent. Visos gadījumos verifikācija parādīja iegūto rezultātu ticamību. Eksperimentālā verifikācija notiek 6. aktivitātes ietvaros.

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

Tika pabeigta izveidoto alternatīvo matemātisko modeļu gāzes burbuļu ar dažādu to raksturīgo izmēru un plūsmas intensitāti dažādos procesu bezdimensionālo parametru diapazonos dinamikas šķidrā metālā ar vertikāla vai horizontāla ārējā magnētiskā lauka iedarbību, kā arī bez tās verifikācija. VOF (*Volume of Fluid*) MHD burbuļu plūsmas modeļa verifikācija (netieši) tika veikta ar izstrādāto dinamisko modu dekompozīcijas (*Dynamic Mode Decomposition* (DMD)) metodi. Tika veikta VOF MHD burbuļu plūsmas modeļa validācija, izpētot tolerances un režģa parametru ietekmi uz precizitāti, artefaktu rašanos, u.c. faktoriem. Tika notestēta iespēja esošo VOF MHD modeļi ar *Ghost Fluid* metodi, kas ļaus precīzāk rēķināt spiediena gradientu pie burbuļu virsmām – tas ir svarīgi pareizās burbuļa formas aprēķinam, it īpaši, kad spiediena lauku modificē magnētiskais lauks. Vienlaikus 6. aktivitātes ietvaros turpinājās arī eksperimentālā verifikācija.

Tā kā bija problēmas ar elektromagnētisma modeļa integrēšanu LBM, kā arī ar virsmas spraiguma modelēšanu, tad ka alternatīva sadarbībā ar Paula Šerrera Institutu tika attīstīts viņu PSI-BOIL kods (*open-source*), kuram šī projekta ietvaros tika pievienots elektromagnētisma aprēķins kopā ar burbuļu plūsmu. Tika veikta validācija šķidrums/elektromagnētisma skaitliskajām shēmām Hartmaņa plūsmai noteiktam Ha skaitļa diapazonam, kā arī iegūti pirmie aprēķinu rezultāti bez un ar ārējo magnētisko lauku $Rm \ll 1$ tuvinājumā burbuļu plūsmai.

4.3. Elektrovirpuļplūsmas

Tika pabeigta vairāku atšķirīgu elektrovirpuļplūsmu realizāciju, ko izraisa ar vairākiem elektrodiem un pie atšķirīga to novietojuma attiecībā pret šķidrā metāla tilpumu pievadītā līdzstrāva, skaitlisko modeļu, kas implementēti atvērtā koda programmatūras Elmer un OpenFoam, kā arī ANSYS Maxwell un CFX vidēs verifikācija, salīdzinot to rezultātus savā starpā, kā arī ar iepriekš iegūto analītisko risinājumu vienkāršotām nostādņēm rezultātiem. Iegūtie rezultāti 6. aktivitātes ietvaros tiek analizēti kontekstā ar eksperimentālajiem datiem, kas iegūti laboratorijas eksperimentos.

Visu šo 3 apakšaktivitāšu darbi kā bija plānots ir pabeigti 2021. g. 3. kvartālā.

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

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

Precīzākai metāla virsmas dinamikas detektēšanai rotējošo magnētu lietojumos tika aprobēta iepriekš izveidotā optisko mērījumu sistēma ar iespēju uzņemt lielu kadru skaitu sekundē un uzlabotu telpisko izšķirtspēju. Tas ļauj precīzāk izšķirt turbulento plūsmas struktūru dinamiku uz šķidruma virsmas. Izmantojot šo sistēmu pie dažādām procesa parametru vērtībām (t.sk. magnētu rotācijas ātruma) tika vākti dati aprēķinu modeļu eksperimentālai verifikācijai.

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

Tika turpināta iepriekš veikto eksperimentu sēriju PSI (Šveice) ar NEUTRA un ICON neitronu stariem iegūto rezultātu sistemātiskā analīze un salīdzināšana ar atbilstošu skaitlisko modeļu rezultātiem to verifikācijai. Eksperimentālo datu apstrādei tika uzlaboti un izmantoti īpaši programmatūras rīki (skat. Sadaļu 4.2), kas maksimālu kvantitatīvas informācijas ieguvu par burbuļu formas un plūsmas dinamiku no “trokšņainajiem” mērījumu datiem. Kopumā tika konstatēta uz VOF pieejas bāzētās skaitliskās programmatūras OpenFoam vidē rezultātu laba atbilstība šiem eksperimentālajiem datiem. Ņemot vērā lielo iegūto eksperimentālo datu apjomu šis darbs vēl turpinās.

6.3. Elektrovirpuļplūsmas

Tika turpināta laboratorijas eksperimentu sērijās, kas veiktas sadarbībā ar Maskavas Augsttemperatūru institūtu (MAI) iegūto rezultātu dažādas konfigurācijas elektrovirpuļplūsmām sistemātiska salīdzināšana ar ANSYS Fluent un OpenFoam vidē izveidoto skaitlisko modeļu aprēķinu rezultātiem. Arī šeit kopumā tika konstatēta laba rezultātu atbilstība plūsmai, tomēr problēmas radīja vidējā temperatūras līmeņa saskaņošana starp eksperimentu un aprēķinu. Tika meklēti iemesli šīm novirzēm un izmēģināti iespējamie paņēmieni noviržu samazināšanai

Visu šo 3 apakšaktivitāšu darbus plānots pabeigt 2021.g. 4. kvartālā.

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

7.1. Elektromagnetiska lentas liešana

Nobeigumam tuvojas darbs pie kausējuma tiešās elektromagnetiskās lentas liešanas (*electromagnetic strip casting*) procesa OpenFoam/Elmer atvertā koda programmatūras vidēs implementēto skaitlisko modeļu izmēģināšanas un aprēķinu veikšanas pie dažādiem procesa parametriem. Lai veiktu pilnvērtīgu 3D nestacionārā modeļa realizāciju ar nepieciešamo izšķirtspēju un precizitāti, tas tika pārnest uz augstāzīgu Skaitliskās modelēšanas institūta datorklasteri, kas nodrošina ātrdarbībai nepieciešamo skaitļošanas paralelizāciju. Tika veiktas procesa parametriskās studijas. Papildus plūsmai ar dažādiem turbulences modeļiem (k-eps, w-SST, LES), virsmas

dinamikai, temperatūras laukam, aprēķinā iekļauts arī kristalizācijas procesa apraksts ievērojot kristalizācijas siltuma daudzumu.

7.2. Burbuļu plūsmas EM vadība šķidrā metālā reaktorā ūdeņraža ražošanai

Tika pabeigta cilindriskas reaktora kolonnas ar šķidro metālu un 2 – 4 gāzes ieplūdes vietām matemātiskā modeļa izstrāde un implementācija atvērtā koda programmatūras OpenFOAM/Elmer programmu vidēs. Izvēlēta reaktora kolonas ģeometrija un plūsmas parametri pietuvināti industriāla rakstura iekārtām ar pilnvērtīgu 3D procesa aprakstu skaitliskajā modelī. Izmantojot iepriekš vienkāršotai sistēmai veikto eksperimentu datus skat. Sadaļu 6.2), tika pabeigta izmantoto skaitlisko pieeju precizitātes pārbaude. Tika uzsākti aprēķinu izmēģinājumi pie dažādiem plūsmas parametriem, lai nepieciešamības gadījumā veiktu telpas/laika izšķirtspejas uzlabojumus – aprēķini teik veikti uz ļoti augstāzīga datorklastera pie sadarbības partnera HZDR (vācija).

7.3. Metālu kausēšana līdzstrāvas loka krāsnī

Nobeigumam tuvojas EM, HD un temperatūras lauku skaitliskie pētījumi industriālā mēroga līdzstrāvas loka krāsnij ar diviem sarežģītas konfigurācijas un dažādi pret vannas pamatni orientētiem apakšējiem elektrodiem. Pētījumi tiek veikti izmantojot iepriekš izstrādāto un parbaudīto krasns matemātisko modeli, kas implementēts gan atvērtā koda programmatūras OpenFOAM/Elmer (ar platformas EOF starpniecību), gan ANSYS CMaxwell un CFX vides. Veiktās parametriskās studijas parādīja noteiktu lietojuma mērķim – kausējuma homogenizācijai vispiemērotākos elektrodu konfigurācijas (novietojumu un ģeometriju). Šie pētījumi veidoja arī daļu no priekšizpētes iesniegtajam patenta pieteikumam.

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

Praktiski pabeigta ķīmisko reakciju solvera izstrāde OpenFOAM programmā, kas nepieciešams, lai pētītu elektrovadošu kausējumu (piem., silīcijs, izkausēti metāli) homogenizācijas un attīrīšanas no piemaisījumiem procesus. Sekmīgi tika pārbaudīts solvera pamatvariants, kurš ļauj skaitliski atrisināt saistītas šķidrums mehānikas, termisko, difūzijas un ķīmisko reakciju problēmas. Veiktie skaitliskie eksperimenti ļāva noteikt risināšanai piemērotu skaitlisko parametru diapazonu un novērtēt fizikālo un ķīmisko reakciju aprēķinos pieļaujamo parametru diapazonus. Tādējādi tika pabeigts solvera testēšanas un aprēķinu rezultātu validācijas darbs.

Visu šo 4 apakšaktivitāšu darbus plānots pabeigt 2021.g. 4. kvartālā.

8. Kompleksajiem tehnoloģiju modeļiem atbilstošo modelēšanas metodiku un rīku (programmu) komplektācija un dokumentācija (7.2021 – 6.2022)

Tika uzsākta izstrādāto aprēķinu rīku (programmatūras) dokumentēšana, t.sk., publicējot to struktūru un darbību raksturojošo informāciju zinātniskas publikācijās. Vairāki izstrādātie programmatūras rīki, kas saistīti ar attēlu apstrādi un aprēķinu rezultātu specifisku vizualizāciju jau ir padarīti arī publiski pieejami, tos publicējot repozitorijā GitHub, kur tos var izmēģināt visi interesenti:

- https://github.com/Mihails-Birjukovs/Low_C-SNR_Particle_Detection
- https://github.com/Mihails-Birjukovs/Low_C-SNR_Bubble_Detection
- <https://github.com/Peteris-Zvejnieks/MHT-X>
- <https://github.com/MartinKleivs/PyDMD>
- <https://github.com/MartinKleivs/MOSES-SVD>

Uzsākta arī citu atvērtā koda programmatūras vidē izstrādāto skaitliskās modelēšanas programmu komplektācija, t.sk. padarot tos pieejamus lietotājiem ārpus projekta grupas.

9. Izvēlētu pētāmo komplekso procesu modeļu rezultātu verifikācija, izmantojot industriāla mēroga iekārtu prototipus (7.2021 – 6.2022)

Izstrādāts industriālas iekārtas prototipa kausēšanai ar līdzstrāvas elektrisko loku projekts, uzsākta iekārtas komplektēšana un sagatavots veicamo elektromagnētiskā lauka un temperatūru mērījumu plāns, apzināti tam nepieciešamie sensori un elektronikas komponentes.

10. Būtisko multifizikālās mijiedarbības procesu izveidotajos kompleksajos modeļos likumsakarību parametriska izpēte un modeļu ierobežojumu noteikšana (7.2021 – 6.2022)

Uzsākta 7. aktivitātē izveidoto komplekso modeļu ar būtisku EM, HD un termisko procesu savstarpējo mijiedarbību likumsakarību izpēte, t.sk.,

- šķidrajam metālam (kausējumam) aksiāli simetriskā apgabalā ārējā augstfrekvences induktora laukā, iekļaujot semilevitāciju un levitāciju;
- plūsmai un virsmas dinamikai dziļā taisnstūrveida konteinerā rotējošu pastāvīgo magnētu laukā;
- plūsmai un virsmas nestabilitātēm plānā metāla slānī uz plakanas virsmas augstfrekvences laukā;
- plūsmai un kristalizācijai uz kustīgas un dzesētas virsmas;
- dažādas konfigurācijas elektrovirpuļplūsmām.

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

30.09.2021