

Valdemārs Felcis

Termoelektrisko parādību izpēte šķidra metāla porainās sistēmās

Investigation of Thermoelectric Phenomena in Liquid Metal Porous Systems

Anotācija

Kodolsintēzes reaktori ir potenciāli izdevīgs enerģijas avots, tādējādi var iegūt daudz tīras enerģijas. Tomēr, lai realizētu kodolsintēzes reaktorus, ir labi jāsaprot saistītie fizikas fenomeni. Lai izpētītu vienu fenomenu, tika veikts eksperiments, kurā šķidru gallinstanu ierobežoto kobalta plāksne. Sildot kobalta plāksni, termoelektriskā efekta dēļ metālos sāk plūst strāva, kas kopā ar ārējo magnētisko lauku izraisa šķidrums plūsmu. Lai aprakstītu eksperimentu, tika izstrādāts skaitliskās modelēšanas programmas *Comsol* modelis.

Comsol skaitliskais modelis atbilst eksperimentam, lai tiktu iegūti fizikāli rezultāti. Izmantojot skaitliskos rezultātus, detalizētāk analizētas ar termoelektrību saistītās parādības: temperatūras, strāvas blīvuma un šķidrums kustības ātruma lauki. Rezultātā, labāk izprotot termoelektrības darbības principus, tika izveidots skaitliskais modelis, kuru var pielāgot turpmākiem eksperimentiem, lai iegūtās zināšanas varētu pielietot kodolsintēzes reaktoru izveidē.

Atslēgvārdi: termoelektrība, *Comsol*, skaitliskais modelis, šķidra metāla plūsma, gallinstans.

Ievads

Lielākā daļa pieejamās enerģijas uz Zemes nāk no Saules kodolsintēzes procesiem, tāpēc, ja varētu izveidot kodolsintēzes reaktorus uz Zemes, būtu iespējams iegūt daudz enerģijas ar minimāliem kaitīgiem

blakusproduktiem. Kodolsintēzes reaktoriem ir liels potenciāls, kas gadu desmitiem netiek realizēts, jo ir grūti nodrošināt ilgstošu procesu, kas saņemtu vairāk enerģijas, nekā tas patērē. Lai izmantotu reaktorus, ir nepieciešams atrisināt vairākas problēmas, piemēram, kā aizvadīt radīto siltumu tā, ka izveidotais mehānisms var ilgtermiņā neerodēt, izturēt augstās temperatūras un bombardēšanu ar neitroniem. Šajā darbā aplūkots viena risinājuma darbības aspekts.

Viens risinājums ir plazmu, kurā notiek kodolsintēze, ierobežot ar porainu struktūru, pildītu ar šķidro metālu. Iekšējo porainās struktūras virsmu noklāj un noslapina ar šķidro metālu, kuru notur ar magnētu sistēmu. Reaktoros plāno pielietot no volframa veidotas porainas struktūras, pildītas ar alvu. Tā kā saskaras divi metāli, tiek nodrošināts liels temperatūras gradients un ir magnētiskais lauks, termoelektrības efekta rezultātā rodas metāla plūsma. Plūsma ir nepieciešama, lai šķidrums nepārkarstu, ilgtermiņā izturētu bombardēšanu ar neitroniem un varētu tālāk nodot siltumu. Darba mērķis ir izprast termoelektrības darbību šajā procesā. Izpētei tika veikts eksperiments, kura rezultāti izmantoti, lai novērtētu izstrādātā skaitliskā modeļa atbilstību realitātei.

Svarīgi ir definēt vienādojumus, kurus risinām skaitliski. Atrisinot vienādojumus, varam iegūt risināmā lieluma lauku, proti, skaitlisku vai vektorālu vērtību katrā punktā.

- Siltumpārneses vienādojums

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \text{---Iekšējā enerģija} + \rho C_p \vec{u} \times \nabla T \text{---Konvekcija} + \nabla \times (-k \nabla T) \text{---Siltumpārnese} = \vec{J} \times \vec{E} \text{---Džoula siltums,}$$

kur ρ – blīvums, C_p – siltumietilpība pie konstanta spiediena, \vec{u} – šķidruma plūsmas ātrums, k – siltumpārneses koeficients, \vec{J} – strāvas blīvums, \vec{E} – elektriskais lauks

Iekšējā enerģija raksturo to, cik ļoti sasilst pats objekts, konvekcija raksturo to, cik daudz šķidrumu aiznes šķidruma plūsma, siltumpārnese raksturo to, cik daudz siltuma tiek pārnesti no viena materiāla punkta uz blakusesošo. Šie locekļi raksturo to, kā siltums var pārvietoties. Siltuma avots ir diferenciālā formā uzrakstīts Džoula–Lenca likums. Atrisinot šo vienādojumu, iegūstam temperatūras lauku.

- Elektriskās strāvas vienādojumi

$$\vec{E} = -\nabla V$$

$$\nabla \times \vec{J} = 0$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} - \sigma \nabla T,$$

kur σ – elektrovadītspēja, V – elektriskais potenciāls, S – Zēbeka koeficients

Pirmais vienādojums ir elektriskā potenciāla definīcija, otrs vienādojums ir strāvas blīvuma nepārtrauktība, ja nav neviena lādiņa avota. Trešais vienādojums ir strāvas blīvuma definīcija, papildināta ar termoelektrības efektu [Du Terrail Couvat et al. 2015], konkrēti, Zēbeka efekts. Īsi raksturojot, temperatūras dēļ materiālā atomu enerģijas līmeņi var novirzīties tā, ka rodas potenciāla starpība starp diviem dažādiem materiāliem. Alternatīvi to var uzskatīt par empīrisku faktu – nodrošinot temperatūras gradientu starp dažiem diviem metāliem, sāks plūst strāva.

Atrisinot šos vienādojumus, var iegūt elektriskā potenciāla lauku, no kura, veicot matemātiskas darbības, var iegūt pārējos divus laukus.

- Šķidruma pārnese

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \times \nabla) \vec{u} \text{---} \text{Inerciālie spēki} - \sigma (\vec{u} \times \vec{B}) \times \vec{B} \text{---} \text{Inducētā plūsma} = \\ -\nabla \times \rho \text{---} \text{spiediena spēki} + \mu \Delta \vec{u} \text{---} \text{viskozie spēki} + \vec{J} \times \vec{B} \text{---} \text{Lorenca spēka blīvums} \\ \rho \nabla \times \vec{u} = 0, \end{aligned}$$

kur ρ – spiediens, \vec{B} – magnētiskais lauks, μ – dinamiskā viskozitāte

Pirmā vienādojuma kreisā puse raksturo to, kā var notikt šķidruma transports, bet labā puse raksturo spēka blīvumus, kas dzen šķidruma plūsmu. Neparastie locekļi ir inducētā plūsma [Wang et al. 2016: 1169–1179] un Lorenca spēka blīvums. Inducētā plūsma rodas ārēja magnētiskā lauka efekta dēļ, un tā lomu plūsmā raksturo Stjuarta skaitlis. Neņemsim vērā šajā modelī inducēto plūsmu, bet vēlāk novērtēsim, vai šis bezindukcijas tuvinājums nerada lielu kļūdu. Lorenca spēks izriet no Maskvela lauka vienādojumiem. Otrs vienādojums ir masas nepārtrauktības vienādojums.

Atrisinot šos vienādojumus, var iegūt spiediena un šķidruma ātruma laukus. Runājot par Najvē stoksa vienādojumu, ir iespējams veikt tā bezdimensionalizāciju un rezultātā iegūt vairākus skaitļus, kas raksturo plūsmu.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}$$

$$Pe_L = \frac{Lu}{\left(\frac{k}{\rho C_p}\right)}$$

$$N = \frac{B^2 L \sigma}{\rho u},$$

kur L – raksturīgais garums, u – šķidruma kustības ātruma modulis

Uzrakstītie skaitļi: Reynolds skaitlis raksturo, vai plūsma ir lamināra vai turbulenta, Peklē skaitlis raksturo, vai siltumpārnēsē dominē siltumvadīšana vai konvekcija, Stjuarta skaitlis raksturo magnētiskā lauka ietekmi uz plūsmu un to, cik nozīmīgs ir inducētās plūsmas loceklis.

1. Darbā izmantotās metodes

1.1. Eksperimenta apraksts

Eksperimentā nosacīti tiek aplūkota viena pora no reaktoros plānotā porainā materiāla. Sākumā aplūkosim eksperimenta shēmu, kurā attēlotas būtiskākās eksperimenta sastāvdaļas.

1. attēlā redzams, ka šķidro metālu no sāniem ierobežo vara ietvars un kobalta plāksne, bet no apakšas – plāna titāna plāksne, lai nodrošinātu labāku slapināšanu. Zem visa ir izolējošs materiāls. No augšpuses ir brīva virsma. Eksperimentālā iekārta atrodas starp magnētiem, kas ir savienoti ar dzelzs skrūvēm, lai palielinātu magnētisko lauku starp magnētiem. Tā kā ir nodrošināts temperatūras gradients starp diviem dažādiem metāliem, tad



1. attēls. Eksperimenta shēma

- 1 – šķidrās gallinstans ($x = 32, y = 12, z = 3$) mm, 2 – Kobalta plāksne (46, 0,6, 3) mm, 3 – vara ietvars (58, 58, 4) mm, 4 – izolators, 5 – magnētiskais lauks ($B = 0,2$ T)

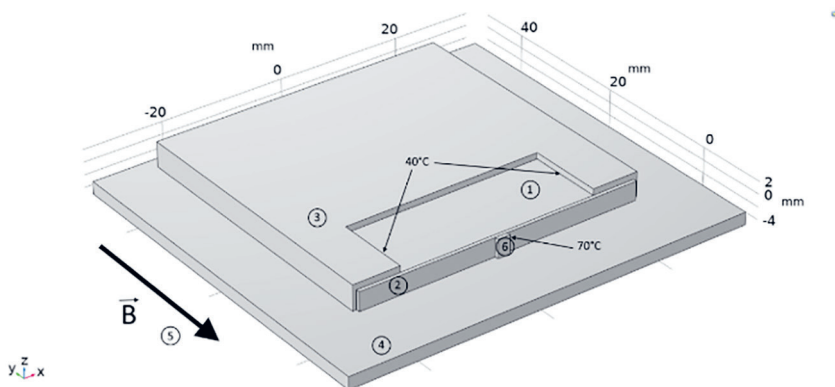
ar termoelektrības efekta palīdzību inducējas strāva. Inducētā strāva, mijiedarbojoties ar ārējo magnētisko lauku, rada tilpuma spēkus, kuri izraisa šķidrums plūsmu. Toties virsmas spraiguma dēļ nevar novērot nekādu šķidrums kustību. Pēc skābes pievienošanas, kas nokodina virsējo šķidrā metāla kārtu un mazina virsmas spraigumu, novērota strauja metāla plūsma.

Tika veikts eksperimenta video ieraksts, no kura tālāk tuvināti noteikts šķidrums plūsmas ātrums. Būtiskākais uzdevums ir ar video palīdzību kvantificēt plūsmas ātrumu, bet virsmas deformācijas novērtēt tikai kvalitatīvi.

1.2. Skaitliskais modelis

Comsol veidotais modelis atbilst 1. attēlam. Aplūkosim modelēto objektu *Comsol* programmatūrā, papildinātu ar robežnosacījumiem.

2. attēlā 1.–3. apgabala dimensijas ir tādas pašas kā 1. attēlā norādītās dimensijas. 4. un 6. apgabala izmēri tika novērtēti, apskatot eksperimenta videoklipā aptuveno proporciju pret zināmu garumu, piemēram, gallinstana garumu pa x asi. Veicot eksperimentu, tika nomērīta temperatūra uz norādītajām robežām, kas strauji nemainījās eksperimenta norises laikā pat bez dzesēšanas. Kā minēts 2.1. sadaļā, nav ņemta vērā plāna



2. attēls. **Comsol** eksperimenta modeļa izskats ar robežnosacījumiem

1 – šķidrums gallinstans, 2 – koblalta plāksne, 3 – vara ietvars, 4 – izolators, 5 – magnētiskais lauks ($B = 0,2 \text{ T}$), 6 – sildītājs (izolatora materiāls). Uz robežas starp 2 un 6 ir $70 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūra, bet starp 1 un 3 uz norādītajām robežām – $40 \text{ }^\circ\text{C}$

tērauda plāksne zem 1. apgabala, toties, aplūkojot avotu [Corcoran et al. 2018: 92-100], var redzēt, ka tērauda Zēbeka koeficients ir $\sim -1,2 \mu\text{V/K}$, bet starpība starp gallinstana un kobalta Zēbeka koeficientiem ir $40 \mu\text{V/K}$. Šie lielumi atšķiras par kārtu, tāpēc kļūda, kas rodas, neievērojot tērauda plāksni, nav liela.

Izveidotajā *Comsol* modelī tiek risināti 1. sadaļā minētie vienādojumi siltumpārnesei, elektriskajām strāvām, šķidrums plūsmai kopā ar tilpuma spēka nosacījumu. Modelī fizikas vienādojumi tiek rēķināti, izmantojot galīgo elementu metodi, proti, izveidotais modelis (skat. 2. attēlu) tiek sadalīts mazākās šūnās (šajā gadījumā tetraedros), un katrai šūnai tiek aprēķināts vienkāršots sadalījums, piemēram, pieņemot, ka šūnas ietvaros aprēķinātā lauka vērtība pieaug lineāri. Temperatūras un elektriskā potenciāla lauki katrā šūnā tiek sadalīti, izmantojot kvadrātisku funkciju, bet šķidrums plūsmā tiek izmantota lineāra funkcija gan šķidruma ātruma, gan spiediena laukam. Parasti, palielinot šūnu skaitu, pieaug aprēķinu precizitāte. Šī darba modelī ir $\sim 109\,000$ šūnu.

Veiksim aprēķinus ar izveidoto *Comsol* modeli, risinot to laikā (angļu val. *transient*), proti, ar noteiktu laika soli, katrā solī aprēķinot visu lauku vērtības. Alternatīva ir risināt stacionāro gadījumu, bet tas slīktāk atbilst veiktajam eksperimentam, jo netika gaidīts, līdz tiek sasniegts stacionārais stāvoklis.

Būtiski ir pieminēt arī izmantotās fizikālās konstantes, kuras potenciāli var atšķirties atkarībā no avota. Tā kā galvenokārt analizējam gallinstana šķidruma plūsmu, es norādīšu ar to saistītos koeficientus.

Tabula

Gallinstana īpašības [Plevachuk et al. 2014: 757-763]

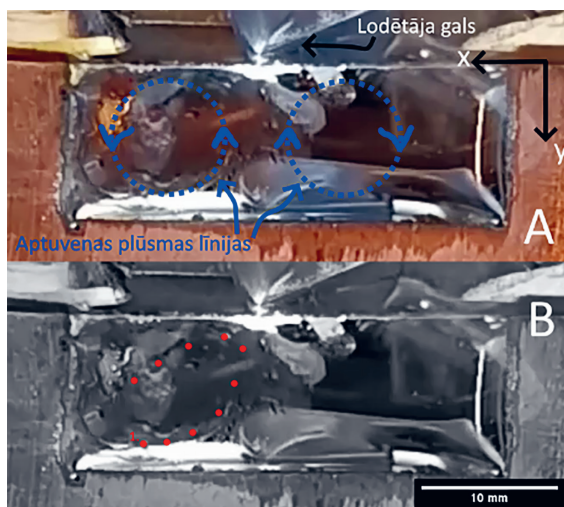
Lielums	Vērtība	Dimensija
Blīvums (ρ)	6000	kg/m ³
Elektriskā vadāmība (σ)		S/m
Dinamiskā viskozitāte (μ)	0,0016	Pa × s
Siltumietilpība pie konstanta spiediena	50	J/(kg × K)
Starpība Zēbeka koeficientiem varam un gallinstanam (ΔS)	40	$\mu\text{V/K}$
Vadītspēja (k)	30	W/(m × K)

2. Rezultāti un diskusija

Aplūkosim eksperimentālos rezultātus un salīdzināsim tos ar *Comsol* modeļa rezultātiem. Kā minēts 2. sadaļā, šķidrajam metālam tika pievienota skābe, kas reaģēja ar metālu, veidojot burbuļus un reakcijas produktus, kuru kustību varēja novērot.

3. attēla A un B daļā redzams tas pats laika moments, kad tika sākti veikt mērījumus no video. Jāievēro, ka atšķirībā no 1. attēla ir cits asu novietojums, un var redzēt, kur ir pielikts lodētāja gals. A daļā ir iezīmētas aptuvenās plūsmas līnijas, izvietotas simetriski ap līniju, kas sākas no lodētāja gala un tālāk turpinās pa y asi.

Attēla B daļā ar sarkaniem punktiem ir apkopoti mērījumi 0,3 s izgriezumā no pilnā eksperimenta videoklipa. Mērījumi sākas no punkta, kurš ir atzīmēts ar 1, un turpinās plūsmas virzienā, kā redzams A daļā. A daļā uz virsmas var redzēt gaišākus apgabalus – burbuļus un reakcijas produktus. Šādos gaišākos apgabalos dažkārt var izšķirt atsevišķu vēl baltāku punktu. Mērījumi tika veikti ik pa 0,03 s, atzīmējot šāda baltā punkta kustību. Vizuāli novērtējot, izsekotais punkts varētu pārvietoties aptuveni ar vidējo



3. attēls. Eksperimentāli novērotā šķidrā gallinstana plūsma

A – pirmais aplūkotais laika moments krāsās, B – mērījuma punktu vizuāls apkopojums A attēla laika momentā

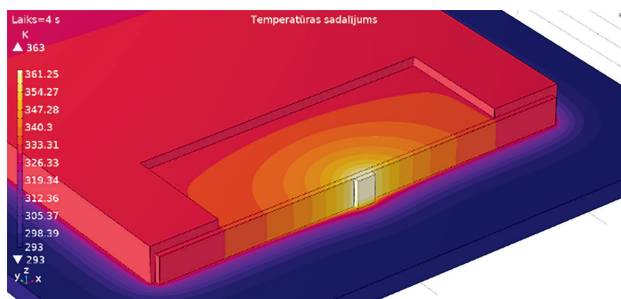
plūsmas ātrumu, jo tas atrodas pa vidu starp rotācijas centru un sienu. Mērījumiem tika izmantota attēlu apstrādes programma *ImageJ*, iegūstot datus par sarkano punktu koordinātēm, jau mērogotu izmantojot 3. attēlā pievienoto skalu. Pēc pēdējā mērījuma punkta vairs nevar tik viennozīmīgi noteikt, kā tālāk aplūkotais punkts pārvietojas.

Varam tuvināti novērtēt kustību pa nomērīto trajektoriju ar vidējo ātrumu $\sim 7,4 \pm 1,2$ cm/s, aprēķinātu no vidējiem ātrumiem starp secīgiem punktiem. Kļūda tika iegūta, aprēķinot standartnovirzi iegūtajam ātrumu sadalījumam.

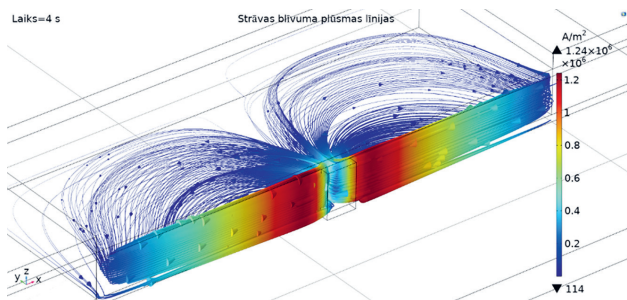
Virsmas deformācijas bija grūti ievērot, toties varēja skaidri redzēt, ka skābes un metāla reakcijas produkti un burbuļi (gaišie apgabali) strauji pārvietojās uz $x+$ pusi. To var skaidrot ar to, ka $x-$ pusē paaugstinās šķidrā metāla virsma un simetriski otrā pusē virsma ir zemāka, tāpēc gaišie apgabali pārvietojas uz virsmas.

Aplūkosim *Comsol* modeļa darbību pakāpeniski, aplūkojot atsevišķi temperatūras, strāvas un plūsmas sadalījumus, kaut gan jāievēro, ka modelī visi šie sadalījumi tiek aprēķināti vienlaicīgi. Eksperimentā var novērot, ka metāla plūsma sākas principā uzreiz pēc lodētāja gala pielikšanas pie kobalta. Tāpēc nav vērts aplūkot stacionāro stāvokli, bet atbilstošāk būtu aplūkot risinājumu laikā. Veiksim aprēķinus modelī līdz 4 s, kas ir tuvu izvēlētajam eksperimenta video fragmenta ilgumam – 3,6 s.

4. attēlā labi redzami izvēlētie robežnosacījumi – 70 °C (363 K) pie sil-dītāja un 40 °C (333 K) uz abiem x ass sāniem. Aplūkojot izotilpumus, var novērtēt temperatūras gradientu, kas ar termoelektības efekta palīdzību inducēs strāvu. Var redzēt, ka gradients sākumā strauji nodilst, ejot radiāli



4. attēls. Temperatūras sadalījums izotilpumos eksperimenta modelī pēc 4 s



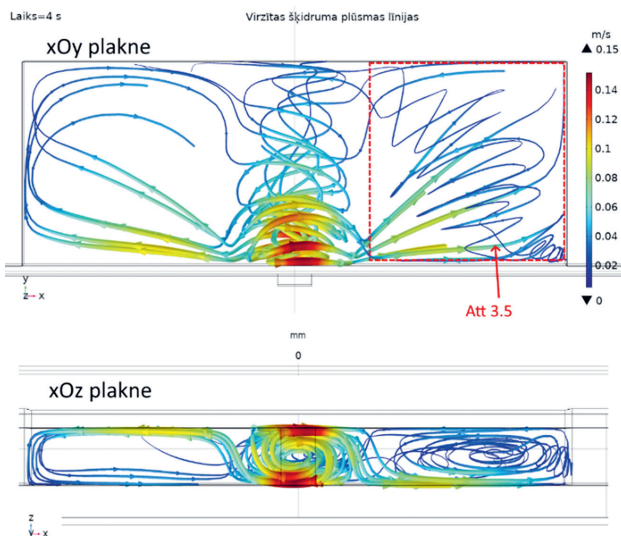
5. attēls. **Strāvas blīvuma virzītas plūsmas līnijas ar rādīsu atkarībā no strāvas blīvuma vērtības aplūkotajā punktā**

prom no siltuma avota. Ņemot vērā, ka strāvām ir jānoslēdzas un temperatūras gradients ir radiāli simetrisks, varam gaidīt, ka strāvas būs tuvu spoguļsimetriskas. Simetriskums ir atkarīgs no tā, kāda siltumapmaiņa ir noteicošā – difūzija vai konvekcija. Ja dominē konvekcija, tad vēl jāņem vērā tas, kāda ir plūsma – lamināra vai turbulenta. Pēc modeļa rezultātiem aplūkosim bezdimensionālos lielumus, kas raksturo to, kam ir lielāks īpatsvars.

Patiešām, 5. attēlā var redzēt, kādā mērā spoguļsimetrija ir ap sildīšanas avotu, un tā nav ideāla. Strāvas kontūras nenoslēdzas viennozīmīgi vienā plaknē, ko ir grūti saskatīt šajā attēlā. Ņemot vērā iepriekš minēto, siltumapmaiņā visdrīzāk dominē konvekcija, jo ir redzama asimetrija šķidruma plūsmas dēļ.

Strāvas blīvuma un magnētiskā lauka mijiedarbības dēļ rodas tilpuma Lorenca spēks, kas izraisa šķidruma plūsmu, kura redzama 6. attēlā.

6. attēlā redzamas daļēji simetriskas plūsmas līnijas. Dažas līnijas nenoslēdzas, jo tika sasniegti skaitliski mazi ātrumi, kurus principā var uzskatīt par 0 m/s. Varam ievērot, ka x- pusē, skatoties no xOz ass, šķidrums plūst uz virsmu, – tas nozīmētu, ka šī puse būtu paaugstināta. Un x+ pusē notiek pretējais, kas atbilst eksperimentāli novērotajam faktam par reakcijas produktu un burbuļu pārvietošanos uz to pašu pusi. Atbilstoši lielajam temperatūras gradientam pie sildīšanas vietas vērojamas visstraujākās plūsmas. Saistība starp plūsmas līnijām 6. attēlā un 3. attēlā redzamajiem reakcijas produktiem uz virsmas nav tik vienkārša, jo reakcijas produkti nevarēja nokļūt zem virsmas, tāpēc trajektorija var atšķirties. Toties tas nemaina faktu, ka reakcijas produkti pārvietosies ar ātrumu, kas ir tuvs šķidruma plūsmas ātrumam.



6. attēls. Virzītas šķidrā metāla plūsmu līnijas xOy un xOz plaknē

Izmantojot eksperimentāli noteikto plūsmas ātrumu, varam noteikt Reynoldsa, Peklē un Stjuarta skaitli, lai raksturotu veiktā eksperimenta plūsmas dabu un pārliecinātos, vai modelis to paredz.

Vēl ir nepieciešams raksturīgais garums, tāpēc izmantosim hidraulisko diametru.

$$D_h = \frac{4A}{P},$$

kur A – šķērsriezuma laukums, P – noslapinātais perimetrs

Aplūkosim šķērsriezumu yOz plaknē un pusi no gallinstana y virziena. Izmantojot 1. sadaļā minētās formulas bezdimensionālajiem skaitļiem ar vērtībām no 2. tabulas, var iegūt šādas vērtības:

$$Re \sim 2220$$

$$Pe_L \sim 6$$

$$N \sim 26$$

No šiem skaitļiem varam tuvināti secināt, ka plūsma ir pārejā no lamināras uz turbulentu, tajā izpaužas abu veidu plūsmu daba. Jau no $Pe_L \sim 1$ sāk dominēt konvekcija [Chhabra & Shankar 2018: 529–546]. Peklē skaitlis atbilst spriestajam par strāvas plūdlīnijām 5. attēlā, tikai tagad varam precīzāk

raksturot plūsmas dabu, izmantojot Reinoldsa skaitli. Spriežot pēc Stjuarta skaitļa, bezindukcijas tuvinājums šajā gadījumā ir pieņemams un neradīja pārāk lielu kļūdu. Toties, aplūkojot citu mērogu, šim eksperimentam ir jāpārliecinās par šī skaitļa lielumu un jāveic precīzāks aprēķins pēc vajadzības.

Secinājumi

1. Izdevās eksperiments, kurā makroskopiskā līmenī bija vērojamas termoelektrības efekta sekas.
2. No eksperimenta bija iespējams nomērīt šķidruma plūsmas ātrumu, kuru varēja salīdzināt ar veiksmīgi izstrādāto eksperimenta skaitlisko modeli.
3. Termoelektrības principi izprasti tā, ka var sākt pielāgot skaitlisko modeli sarežģītākiem un cita mēroga eksperimentiem.

Izmantotie avoti un literatūra

1. Chhabra, R., & Shankar, V. (2018). *Coulson and Richardson's Chemical Engineering*. 7th ed. S. l.: Elsevier Ltd., pp. 529–546.
2. Du Terrail Couvat, Y., Gagnoud, A., Brasiliano, D., Budenkova, O., & Fautrelle, Y. (2015). Numerical modelling of thermoelectric magnetic effects in solidification. In: *8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials*. Cannes.
3. Corcoran, J., Raja, S., & Nagy, P. B. (2018). Improved thermoelectric power measurements using a four-point technique. *NDT & E International*, 94, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.12.002>
4. Plevachuk, Y., Sklyarchuk, V., Eckert, S., Gerbeth, G., & Novakovic, R. (2014). Thermophysical properties of the liquid Ga–In–Sn eutectic alloy. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 59(3), 757–763. <https://doi.org/10.1021/je400882q>
5. Wang, J., Fautrelle, Y., Nguyen-Thi, H., Reinhart, G., Liao, H., Li, X., Zhong, Y., & Ren, Z. (2016). Thermoelectric magnetohydrodynamic flows and their induced change of solid–liquid interface shape in static magnetic field-assisted directional solidification. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 1169–1179. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3277-6>