

EIROPAS REĢIONĀLĀS ATTĪSTĪBAS FONDS

**Uzlabotas litija tehnoloģijas izstrāde plazmas
attīrīšanas iekārtu (divertoru) aktīvo virsmu
aizsardzībai**

**Projekts Nr. 2DP/2.1.1.0/10/APIA/VIAA/176
(Progresā ziņojums – 7)**

**2012
01.07. – 30.11.**

Projektā
piedalījās:

1	*Platacis	Ernests
2	Bucenieks	Imants
3	Kļukins	Aleksandrs
4	Muktepāvela	Faina
5	Romančuks	Alberts
6	Kizāne	Gunta
7	Šiško	Andrejs
8	Soboļevs	Anatolijs
9	Kravalis	Kalvis
10	Ziks	Anatolijs
11	Broka	Maija
12	Ivanovs	Sergejs
13	Pagasts	Inguss
14	Jurgensons	Andris
15	Vītiņš	Aigars
16	Celmājs	Jānis
17	Zariņš	Artūrs
18	Leščinskis	Andris

*Kontaktpersona: tel. 67945785; mob. 26513424.
e – pasts: erik@sal.lv

1. Ūdeņraža izotopu detektēšana šķidrā litijā kā divertora aizsargmateriālā (Aktivitāte Nr.1.)

Mērķis – uzlabot tehnoloģiju ūdeņraža izotopu absorbcijai un evakuācijai kodoltermiskā reaktora divertorā

Pētījumi saskaņā ar **Aktivitātes Nr.1. „Ūdeņraža izotopu detektēšana šķidrā litijā kā divertora aizsargmateriālā”** programmu ir pabeigti (sk. Pielikumu Nr.1 „Akts – Atskaite”) Sagatavota publikācija.

Complex system for investigation of tritium sorbtion in liquid lithium.

A. Lescinskis, G.Kizane, Br. Lescinskis, K. Kravalis, A. Romancuks, A. Zik

Institute of Physics University of Latvia
Institute of Chemical Physics University of Latvia

Atomic energy and technology. Thermonuclear synthesis
Вопросы атомной науки и техники Серия Термоядерный синтез
Почтовый адрес: 123182, Москва, пл.Курчатова, д.1
Регион распространения: Россия, СНГ, зарубежные страны
Язык: русский английский

2. Mijiedarbības procesu izpēte uz litija un nerūsējošā tērauda SS316L kontaktvirsmas atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem (Aktivitāte Nr.2; 2010. 4.kv.- 2011. 3.kv.)

Mērķis – izstrādāt tehnoloģiju šķidra litija un nerūsējoša tērauda matricas kontaktvirsmu slapināšanai

Pētījumi saskaņā ar **Aktivitātes Nr.2 „Mijiedarbības procesu izpēte uz litija un nerūsējošā tērauda SS316L kontaktvirsmas atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem”** programmu ir pabeigti (sk. Pielikumu Nr.1 „Akts –Atskaite”). Iesniegta un pieņemta žurnālā „Magnetohydrodynamic No.4” publikācija.

MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF SS316L STEEL WETTING IN LITHIUM FLOW. PART I.

E.Platacis¹, F.Muktepavela², A.Shishko¹, A.Sobolev¹, A.Kļukin¹, A.Zik¹

¹*Institute of Physics, University of Latvia, Salaspils LV2169, Latvia*

²*Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga LV1063, Latvia*

An experimental research is described performed in a vacuum system equipped with a device allowing experiments on wetting the surface of steel SS316L in liquid lithium flow at various process parameters (degree of vacuum, temperature, cleanness of the liquid lithium surface, etc.). The wetting–spreading processes were estimated using a video system in the vacuum chamber and by microstructural analysis after solidification of lithium. It is found that the oxidized steel surface does not prevent wetting at any temperature. At the same time, the presence of lithium oxides is a barrier factor for wetting at low temperatures (up to 450 °C). Cleaning of the liquid lithium surface using a special original lithium injector device has resulted in a successful complete wetting at 350 °C. The device with a Li injector can be used in the future designs of lithium loops.

Optimālo parametru noteikšana litija plūsmai uz slīpas profilētas virsmas gravitācijas spēka ietekmē ārpus magnētiskā lauka

(Aktivitāte Nr. 3)

Pētījumi saskaņā ar Aktivitātes Nr.3 „Optimālo parametru noteikšana litija plūsmai uz slīpas profilētas virsmas gravitācijas spēka ietekmē ārpus magnētiskā lauka” programmu ir pabeigti (sk. Pielikumu Nr.1 „Akts – Atskaite”).

Ir paredzēts Aktivitātes Nr. 3. eksperimentālos rezultātus apkopot ar Aktivitātes Nr. 4. eksperimentālajiem rezultātiem un teorētiskajiem izvērtējumiem un sagatavot publikāciju.

4. MHD procesu izpēte plūstošā Li slānī un priekšlikumu izstrāde magnētiskā lauka iedarbes korekcijai (Aktivitāte Nr.4)

4.1. Ievads

Lai pētītu magnētiskā lauka iespaidu uz plānas šķidrā metāla plēves (Li) plūsmu pa TOKAMAK tipa reaktora TNA (termokodolu neitronu avotos) divertora sistēmas kontaktvirsmu, AKTIVITĀTES Nr.4 ietvaros tika izstrādāta un izveidota eksperimentālā iekārta (Fig.4.1.), kas deva iespēju supravadošā magnēta “Magdalena” solenoidā to realizēt un vizualizēt.

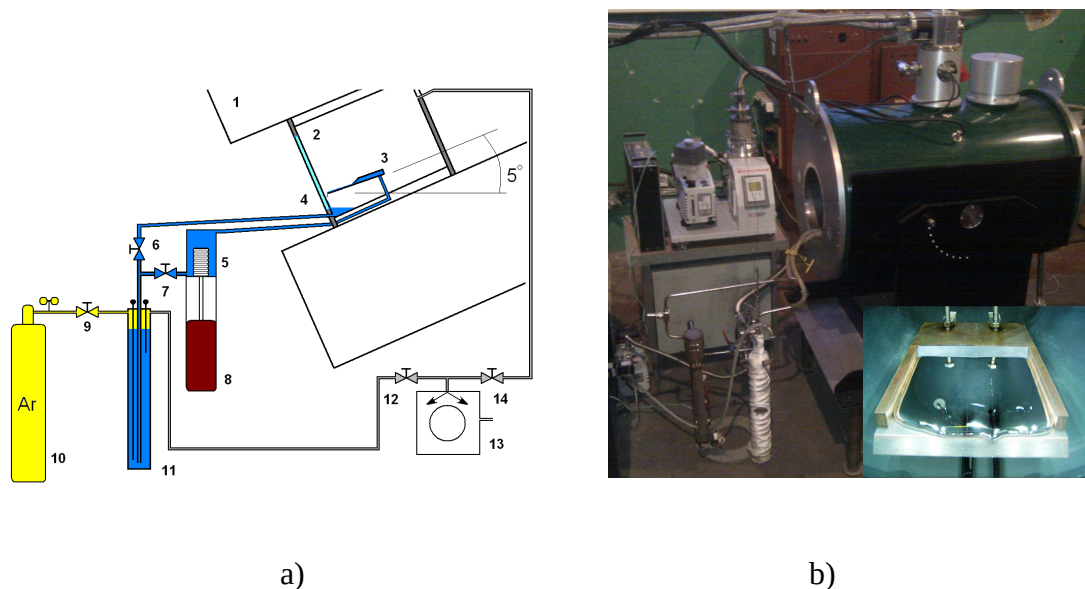


Fig. 4.1.

Iekārta eksperimentu veikšanai ar šķidra metāla plēvi.
a) - iekārtas principiālā shēma; b) – iekārtas kopskats

Jāatzīmē, ka eksperimentos ar šķidro litiju, vienlaicīgi ar vajadzību nodrošināt dziļu vakuumu “karstā” vakuuma kamerā ($T=300-350\text{ }^{\circ}\text{C}$) rodas problēmas ar drošu un ilglaicīgu pētāmo objektu vizualizāciju. Tas ir saistīts ar litija tvaiku ķīmisko aktivitāti. Tvaiku tieša iedarbība īsā laikā izved no ierindas jebkuru optisko

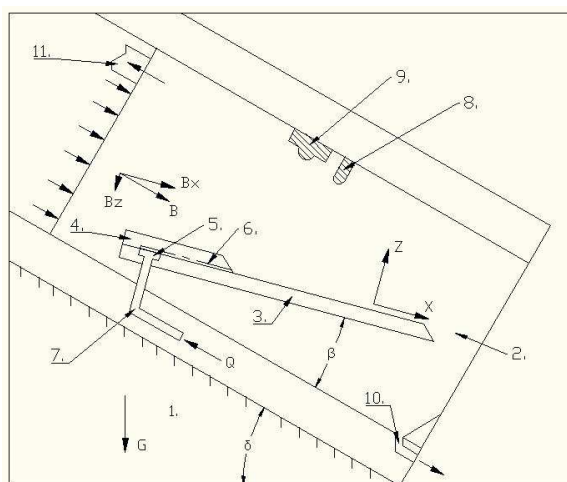
novērošanas sistēmu. Tāpēc eksperimentos kā darba ķermenis tika izmantots eitektiskais kausējums InGaSn ar fizikālajām īpašībām, kas ir tuvas litija fizikālajām īpašībām.

Bez tam, izmantojot kā kontakta virsmu vara pamatni (plāksnīte, pa kuru tek šķidrās metāls), var nodrošināt pēc iepriekšējas amalgamēšanas (pārklāšanas ar galliju) pietiekoši labu pamatnes slapināšanu ar eitektiku InGaSn.

Pie tam ir labs elektriskais kontakts starp šķidro metālu un pamatni. Šāda materiālu izvēle atbilst TNA divertora sistēmas galvenajai koncepcijai, saskaņā ar kuru plāna litija plēve apskalo vara pamatni, pārklātu ar nerūsējošā tērauda kārtiņu ($h=0.1$ mm). Ir labi zināms, ka lielāko iespaidu uz šķidrā metāla plēves veida plūsmu rada magnētiskā lauka komponente, kas ir perpendikulāra pamatnei. No otras puses, tieši tādas TOKAMAK divertora poloidālā magnētiskā lauka komponentes esamība nosaka šķidrā metāla divertora iekārtas funkcionēšanu. Tieši tāda situācija tika realizēta eksperimentos, kur tika novērota homogēna poloidāla magnētiskā lauka iedarbība uz šķidrā metāla plēves veida gravitācijas tecēšanu.

4.2. Eksperimentālās iekārtas apraksts

Supravadošā magnēta “Magdalena” (1) cilindriskā apgabala centrālajā daļā ($D=30$ cm), kur magnētiskais lauks ir praktiski homogēns, tika novietota cilindriskā vakuuma kamera (2) ar tajā novietotu plakanu pamatni un kapilāru sistēmu šķidra metāla ežekcijai, (Fig. 4.1a.) Iekārtas šķērss griezumā ar vertikālu plakni, kas iet caur magnēta asi, ir parādīts Fig.4.2.. Pamatne (3) ar garumu 12cm un platumu 10 cm ir izveidota no 9 mm biezas vara plāksnes. Plāksnītes ieejā praktiski visā pamatnes platumā bija izfrēzēts 4 mm dziļš rezervuārs (5), lai padotu šķidro metālu ežektora sistēmā. Ežektoru sistēma sastāv no pamatnes, un uzgaļa (4), kas izgatavots no tādas pat vara plāksnes. Uzgaļa apakšējā virsmā bija izfrēzēti 0.2 mm dziļi un 2 mm plati celiņi 2 mm attālumā viens no otra. Uzgaļa slīpajā daļā 1 cm attālumā no spraugas izejas celiņu nebija, līdz ar to metāls uz pamatni iztecēja no plakanas spraugas 90×0.2 mm². Šķidro metālu ežekcijas sistēmai pievadīja pa vienu cauruli (7), kas pienāca pie rezervuāra (5) centra.



a)



b)

Fig.4.2.

Eksperimentālā kamera.

a) – kameras principiālā shēma; b) – kameras kopskats

Kā redzams no Fig.4.2a, pamatne ar ežekcijas sistēmu ir novietota zem leņķa $\beta=15^\circ$ C

pret supramagneta asi, tā kā magnētiskajam laukam $\vec{B}_0$ ir normālā komponente $B_z=B_0\sin(\beta)$ attiecībā pret pamatni un tangenciālā $B_x=B_0\cos(\beta)$ komponente.

Supravadošā magnēta konstrukcija ļauj fiksēt solenoidu zem leņķiem $\gamma=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$, u.t.t. attiecībā pret horizontu. Pagriežot magnētu par leņķi $\gamma=20^\circ$, leņķis α starp

brīvās krišanas paātrinājuma $\vec{g}$ virzienu un normāli pret pamatni ir $\alpha=\gamma-\beta=5^\circ$, bet pie $\gamma=30^\circ$ tas ir $\alpha=15^\circ$. Acīmredzot leņķis α raksturo pamatnes slīpumu attiecībā pret horizontu.

Tādā veidā eksperimentālā iekārta ļāva novērot šķidrā metāla gravitācijas tecēšanu pa labi elektriski vadošu pamatni, novietotu zem leņķa $\beta=15^\circ$ attiecībā pret homogēnu magnētisko lauku, un ar slīpuma leņķiem $\alpha=5^\circ, 15^\circ$ attiecībā pret horizontālo plakni. Pie tam izvēlēto pamatnes orientāciju attiecībā pret magnētiskā

lauka $\vec{B}_0$ spēka līnijām (skat. Fig.4.2a.) noteica tas, lai plēves kustības dēļ inducētās strāvas $j_y=v_x B_z$ un magnētiskā lauka tangenciālās komponentes B_x radītā elektromagnētiskā spēka normālā komponente $f_{em}=-v_x B_y B_x$ virziena sakristu ar gravitācijas spēka komponenti $f_x=-\rho g \cos(\alpha)$.

Tālāk sekos magnētiska lauka iedarbības novērtējums uz šķidrā metāla tecēšanu pie augstāk minētiem pieņēmumiem. Noteiktības dēļ uzrakstīsim šķidrā litija ($T=300-350^\circ\text{C}$) un eitektikas InGaSn ($T=30-50^\circ\text{C}$) fizikālās īpašības

	InGaSn	Li
$\rho, \text{kg/m}^3$	6353	500
$\sigma 10^6, \text{Sm}^{-1}$	3.27	3.5
$\nu 10^{-6}, \text{m}^2/\text{s}$	0.34	1
$\rho \nu 10^{-3} \text{Pa s}$	2.16	0.5

4.3. Magnētiskā lauka iedarbības novērtējums uz šķidrā metāla plūsmu kapilāru ežektorā.

Ežektorā šķidrā metāla galvenā plūsma notiek pa 22 identisku kapilāru kanālu sistēmu ar katra kapilāra šķērsgrīzumu $S_k=2b \times 2a=2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ un garumu $L_k=8 \text{ cm}$. Eksperimenta gaitā ar silfonu sistēmas palīdzību rezervuārā (5) tiek padots šķidrā metāls ar caurteci $Q=90 \text{ mm}^3/\text{s}$. Ja pieņem, ka šķidrā metāla ātrums visos kapilāros ir vienāds, tad vidējais ātrums katrā kapilārā ir

$$v_k=Q/22 \cdot S_k \approx 1 \text{ cm/s}.$$

Ja nav magnētiskā lauka ($B=0$), tad šķidram metālam tekot kapilārajos kanālos parādīsies spiediena gradients:

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{3\rho\nu}{a^2} v_k,$$

kur $a=0.1 \text{ mm}$.

Ja ir magnētiskais šķērslauks B_z (izejot no tā fakta, ka katru kapilāro kanālu aptver labi elektriski vadošs materiāls)

$$\frac{dp_B}{dx} = - \frac{\sigma B_z^2 Ha}{Ha - \tanh(Ha)} v_k$$

kur $Ha = aB_z \sqrt{\sigma / \rho \nu}$ ir Hartmana skaitlis, $B_z = B_0 \sin(\beta)$.

Magnētiskā lauka iespaidu uz tecēšanu ežektorā var raksturot ar lielumu $P(Ha)$, kas ir atkarīgs tikai no Ha .

$$P(Ha) = \frac{dp_B}{dp} = \frac{Ha^3}{3(Ha - \tanh(Ha))}$$

Redzams, ka pie $Ha \rightarrow 0$ lielums $P \rightarrow 1$. Šīs sakarības grafiks ir parādīts Fig.4.3.

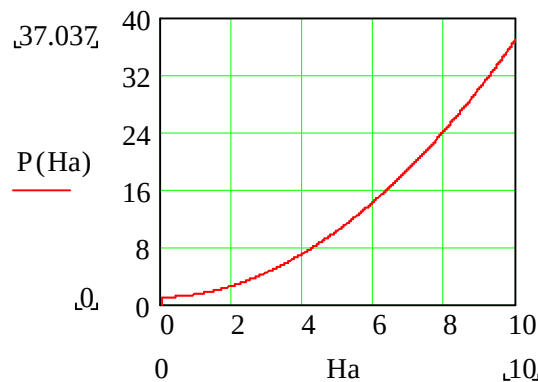


Fig.4.3.

Noteiksim parametra Ha lielumu pie $B_z = 1T$ eitektikai InGaSn un litijam

	Ha	p
InGaSn	3.89	6.8
Li	8.37	26.5

No šejienes seko, ka tāda magnētiskā šķērslauka klātbūtne (kas atbilst laukam $B_0 \approx 4T$ solenoidā) strādājot ar kausējumu InGaSn novedīs pie spiediena zudumu palielināšanās 6.8 reizes, bet strādājot ar litiju – 26.5 reizes. Jāatzīmē, ka tā kā kapilāro kanālu garums L_k apskatāmajā ežektorā ir relatīvi neliels, tad spiediena zudumi pie $B_z = 0$ (jebkuri zudumi ir proporcionāli garumam) ir nelieli. Tāpēc šajā gadījumā nevar sagaidīt, ka, pievadot šķidro metālu tikai platā rezervuāra (5) centram, var iegūt vienmērīgu ātruma sadalījumu visos kapilāru kanālos un, attiecīgi, visā ežektora izejas spraugā. Kā parādīts augstāk, magnētiskais lauks būtiski uzlabo situāciju (sevišķi gadījumā ar litiju), kas bija novērojams arī eksperimentos. Jāatzīmē, ka reālā TOKAMAK divertorā tāda kapilāru sistēma atrastos arī spēcīgā toroidālā magnētiskā laukā, kas arī novestu pie ievērojamas papildus MHD spiediena zudumu palielināšanās kapilāro kanālu zonā.

4.4. Magnētiskā lauka iespaids uz šķidrā metāla plēves veida plūsmu novērtējums

Apskatīsim šķidrā metāla slāni (ar biezumu h), kas no augšas ir norobežots ar brīvu virsmu, bet no apakšas ar plakni, kam ir slīpuma leņķis α pret horizontu. Noteiksim metāla kustību, ko rada smaguma spēks, ja visa sistēma atrodas homogēnā magnētiskā laukā $\vec{B}_0$ (skat. Fig.4.2a).

Izvēlēsimies pamatni kā plakni x,y , ass x ir vērsta šķidrā metāla tecēšanas virzienā, bet ass z ir perpendikulāra plaknei x,y .

Pieņemsim, ka šajā koordinātu sistēmā magnētiskajam laukam $\vec{B}_z$ ir divas

komponentes $B_x=B_0\cos(\beta)$ un $B_z=-B_0\sin(\beta)$, kur β - leņķis, pie kāda vektors $\vec{B}_0$ šķērso plakni x,y (Fig.1). Meklēsim risinājumu, kas ir atkarīgs tikai no koordinātas z .

Apakšējās plaknes elektrisko vadāmību pieņemsim ideālu ($\sigma_{Cu \rightarrow \infty}$). Tad, metālam plūstot ar ātrumu $v_x=v(z)$, metālā tek elektriskā strāva ar blīvumu

$j_y(z)=\sigma v_x(z)B_0\sin(\beta)$. Tā kā ir gravitācijas lauks, tad MHD vienādojumi (ja $v_x=v(z)$) bezindukcijas tuvinājumā ir :

$$\rho\sigma \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \sigma B_0^2 \sin^2(\beta)v + \rho g \sin(\alpha) = 0$$

$$\frac{dp}{dz} + \rho g \cos(\alpha) + \sigma v B_0^2 \sin(\beta) \cos(\beta) = 0$$

Uz brīvās virsmas ($z=h$) ir jāizpildās noteikumiem $p=p_0$ (p_0 – spiediens vakuuma kamerā) un $\partial v / \partial z = 0$. Pie $z=0$ ir jābūt $v=0$. Atbilstošais šiem noteikumiem risinājums ir:

$$v(z) = \frac{\rho g \sin(\alpha)}{B_z^2} \left(1 - \frac{\cosh((h-z)B_z\sqrt{\sigma/\rho\nu})}{\cosh(hB_z\sqrt{\sigma/\rho\nu})} \right)$$

$$p(z) = \rho g \cos(\alpha)(h-z) \left[\frac{1 + \operatorname{tg}(\alpha)\operatorname{ctg}(\beta)(1 - \frac{\sinh((h-z)B_z\sqrt{\sigma/\rho\nu})}{(h-z)B_z\sqrt{\sigma/\rho\nu} \cosh(hB_z\sqrt{\sigma/\rho\nu})})}{(h-z)B_z\sqrt{\sigma/\rho\nu} \cosh(hB_z\sqrt{\sigma/\rho\nu})} \right]$$

kur $B_z = -B_0\sin(\beta)$

Pie dotās šķidrā metāla lineārās caurteces q , kas tiek padota uz pamatni (attiecināti uz garuma vienību ass virzienā), iegūstam:

$$q = \langle v \rangle h = \int_0^h v(z) dz.$$

no kurienes seko vienādojums tekošā šķidrā metāla slāņa biezuma h noteikšanai:

$$\frac{\sigma B_z^2}{\rho g \sin(\alpha)} q = h \left(1 - \frac{\tanh(h B_z \sqrt{\sigma / \rho \nu})}{h B_z \sqrt{\sigma / \rho \nu}} \right)$$

Pie $B_z \rightarrow 0$ iegūstam zināmo izteiksmi

$$h = \sqrt[3]{\frac{3\nu q}{g \sin(\alpha)}}$$

Tālākajās tabulās ir aprēķināti plēves tecēšanas parametri šķidrajam litijam un eitektikai InGaSn pie $q=10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$, kad slīpums starp pamatni un magnētisko lauku B_0 ir $\beta=15^\circ$, bet leņķis α (pamatne pret horizontu) ir $\alpha=5^\circ, 15^\circ, 25^\circ$.

Šajās tabulās vienlaicīgi ar plēves biezumu h un vidējo plēves ātrumu $\langle v \rangle$ ir dota arī ātruma vērtība uz plēves virsmas v_{vir} , kā arī koeficients $f(h)$, kas rāda, cik reizes palielināsies spēka blīvuma normālā komponente, kas darbojas šķidrā metāla virsmas slānī magnētiskā laukā, salīdzinot ar $f_{gz} = -\rho g \cos(\alpha)$:

$$f(h) = 1 + \operatorname{tg}(\alpha) \operatorname{ctg}(\beta) \left(1 - \frac{1}{\cosh(h B_z \sqrt{\sigma / \rho \nu})} \right)$$

Pēdējās tabulas rindās parādītas koeficienta $pp(0)$ vērtības, kas parāda, cik reizi palielināsies spiediena lielums uz pamatni, salīdzinot ar $\rho g h \cos(\alpha)$:

$$pp(0) = 1 + \operatorname{tg}(\alpha) \operatorname{tg}(\beta) \left(1 - \frac{\tanh(h B_z \sqrt{\sigma / \rho \nu})}{h B_z \sqrt{\sigma / \rho \nu}} \right)$$

Tab.1a	Li	$q=10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$	$\beta=15^\circ$	$\alpha=5^\circ$		
$B_x, \text{ T}$		0	0.966	1.932	2.898	3.86
$B_z, \text{ T}$		0	0.259	0.518	0.777	1.035
h, μ		152	595	2217	4951	8786
$\langle v \rangle, \text{ cm/s}$		0.658	0.168	0.045	0.02	0.011
$V_{\text{vir}}, \text{ cm/s}$		0.987	0.182	0.046	0.02	0.011
$f(h)$		1	1.327	1.327	1.327	1.327
$pp(0)$		1	1.301	1.323	1.325	1.326

Tab.1b	Li	$q=10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$	$\beta=15^\circ$	$\alpha=15^\circ$		
$B_x, \text{ T}$		0	0.966	1.932	2.898	3.86
$B_z, \text{ T}$		0	0.259	0.518	0.777	1.035
h, μ		106	231	762	1677	2966
$\langle v \rangle, \text{ cm/s}$		0.946	0.43	0.131	0.06	0.034
$V_{\text{vir}}, \text{ cm/s}$		1.42	0.534	0.135	0.06	0.034
$f(h)$		1	1.986	1.99	1.999	1.999
$pp(0)$		1	1.8	1.97	1.991	1.996

Tab.1c	Li	$q=10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$	$\beta=15^\circ$	$\alpha=25^\circ$		
$B_x, \text{ T}$		0	0.966	1.932	2.898	3.86
$B_z, \text{ T}$		0	0.259	0.518	0.777	1.035
h, μ		90	159	475	1033	1821

$\langle v \rangle$, cm/s	1.11	0.628	0.21	0.097	0.055
V_{vir} , cm/s	1.67	0.828	0.211	0.098	0.055
$f(h)$	1	2.63	2.74	2.74	2.74
$pp)0_{-}$	1	2.24	2.66	2.71	2.73

Tab.2a InGaSn $q=10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ $\beta=15^\circ$ $\alpha=5^\circ$					
B_x , T	0	0.966	1.932	2.898	3.86
B_z , T	0	0.259	0.518	0.777	1.035
h , μ	106	125	211	396	670
$\langle v \rangle$, cm/s	0.943	0.8	0.474	0.252	0.149
V_{vir} , cm/s	1.41	1.173	0.602	0.276	0.155
$f(h)$	1	1.15	1.32	1.326	1.326
$pp)0_{-}$	1	1.11	1.25	1.299	1.314

Tab.2b InGaSn $q=10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ $\beta=15^\circ$ $\alpha=15^\circ$					
B_x , T	0	0.966	1.932	2.898	3.86
B_z , T	0	0.259	0.518	0.777	1.035
h , μ	74	82	102.5	155	242
$\langle v \rangle$, cm/s	1.355	1.22	0.977	0.644	0.413
V_{vir} , cm/s	2.03	1.94	1.38	0.803	0.46
$f(h)$	1	1.26	1.75	1.98	1.999
$pp)0_{-}$	1	1.18	1.53	1.79	1.897

Tab.2c InGaSn $q=10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ $\beta=15^\circ$ $\alpha=25^\circ$					
B_x , T	0	0.966	1.932	2.898	3.86
B_z , T	0	0.259	0.518	0.777	1.035
h , μ	63	66	79	108	158
$\langle v \rangle$, cm/s	1.596	1.515	1.267	0.927	0.633
V_{vir} , cm/s	2.394	2.24	1.83	1.233	0.749
$f(h)$	1	1.324	2.059	2.607	2.734
$pp)0_{-}$	1	1.218	1.733	2.208	2.467

No tabulām ir redzams, ka magnētiskais lauks būtiski iedarbojas uz plēves tecēšanas parametriem (sevišķi Li gadījumā). No šiem datiem seko, ka plānas litija plēves ($h \approx 100 \mu$) tecēšanu var realizēt tikai pie pietiekoši liela pamatnes slīpuma pret horizontu $\alpha \geq 25^\circ$ un tikai pie nelielām normālā magnētiskā lauka vērtībām $|B_z| = B_0 \sin(\beta)$.

Šie aprēķini parāda, ka pamatnes slīpums attiecībā pret magnētisko lauku ir izvēlēts pareizi. Visos gadījumos normālā elektromagnētiskā spēka komponente darbojas tajā pat virzienā kā smaguma spēks. Pie cita slīpuma attiecībā pret magnētisko lauku ($\beta = -15^\circ$), normālais elektromagnētiskais spēks darbotos pret smaguma spēku un pie lielāka pamatnes slīpuma attiecībā pret horizontu (kad $\alpha > |\beta|$), jau pie mazām B_z vērtībām stabila plēves tecēšana būtu problemātiska. Vienīgā iespējamā tievas litija plēves ($h \approx 100 \mu$) tecēšana magnētiskajā laukā $B_z \approx 1 \text{ T}$ ir saistīta ar būtisku inžektoram pievadītās caurtes Q samazināšanu. Taču pie tam būtiski samazināsies litija tecēšanas ātrums (līdz dažiem mm/sec) un dabīgi

palielināsies litija atrašanās laiks uz pamatnes. To ilustrē Tabula 3, kur parādīti litija plēves biezums un vidējais ātrums pie $\alpha=30^\circ$ un dažādām normālām lauka B_z vērtībām un $q=10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$, $q=5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec}$, $q=10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$.

Tab.3 Li $\alpha=30^\circ$						
$q, \text{ cm}^2/\text{s}$	$B_z, \text{ T}$	0	0.2	0.4	0.6	0.8
10^{-3}	h, μ	39	42	52.5	74	112
	$\langle v \rangle, \text{ cm/s}$	0.26	0.24	0.19	0.135	0.09
$5 \cdot 10^{-3}$	h, μ	67	81	150	293	601
	$\langle v \rangle, \text{ cm/s}$	0.75	0.62	0.33	0.17	0.1
10^{-2}	h, μ	84	116	273	566	987
	$\langle v \rangle, \text{ cm/s}$	1.2	0.86	0.37	0.177	0.101

4.5. Eksperimentālie pētījumi par spēcīga magnētiska iedarbību uz šķidrā metāla plēves veida plūsmu

Eksperimenti ar šķidro metālu tika veikti homogēna magnētiskā lauka zonā supravadošā magnētā "Magdalēna" pie $B_0=0 \text{ T}$, 2 T un 4 T . Eksperimentālā stenda shēma ir parādīta Fig.1a,b.

Darba ķermenis bija InGaSn. Vakuuma kamerā ($p_{\text{Ar}}=10^{-7} \text{ mbar}$) šķidro metālu pievadīja pa šķidrā metāla traktu, kas ietver speciāli izstrādātu silfonu sistēmu. Silfonu sistēmu piedzenošais elektrodzinējs strādāja pie 12 V sprieguma, kas nodrošināja pastāvīgu caurteci $Q=90 \text{ mm}^3/\text{s}$ (laika periodā 320 sekundes). Metāla iztecēšana no inžektora kapilāriem uz pamatni notika pa šauru spraugu (platums 90 mm un biezums 0.2 mm) ar vidējo ātrumu $v=0.5 \text{ cm/s}$. Pamatnes virsma pa visu platumu 90 mm bija rūpīgi amalgamēta, lai nodrošinātu vara pamatnes slapināšanu ar šķidro metālu.

Pirmās eksperimentālās sesijas galvenie uzdevumi bija:

1. Vakuuma kameras apgaismojuma (gaismas diodes) testēšana spēcīgā magnētiskā laukā.
2. Video novērošanas sistēmas darba spēju pārbaude spēcīgā magnētiskā laukā (līdz 4 T).
3. Magnētiskā lauka ietekme uz šķidrā metāla ežekcijas sistēmas darbību.
4. Spēcīga magnētiskā lauka ietekme uz šķidrā metāla plēves veida tecēšanas vienmērīgumu un stabilitāti.

Eksperimenti tika izdarīti pie diviem solenoida slīpuma leņķiem

$\gamma=20^\circ$ un 30° . Sakarā ar to pamatnes slīpums pret horizontu bija $\alpha=5^\circ$ un 15° .

Izdarītie eksperimenti apstiprināja, ka apgaismošanas un video novērošanas sistēma ir izvēlētas pareizi un ir darba spējīgas.

Novērojumi tika izdarīti gaismā, ko atstaroja vakuuma kameras aizmugures siena, uz kuru tika virzīts gaismas stars. Lai novērstu atstarojumus, kameras aizmugures siena, kā arī sānu sienas, tika pārklātas ar speciālu pārklājumu (melna matēta krāsa). Pirms pirmās šķidrā metāla padeves uz pamatni uz datora displeja ekrāna bija labi redzamas kā zona pie inžektora izejas spraugas, tā arī liela pamatnes daļa. Amalgamētā virsma izkliedētā gaismā izskatījās gaiši pelēka un matēta. Diemžēl

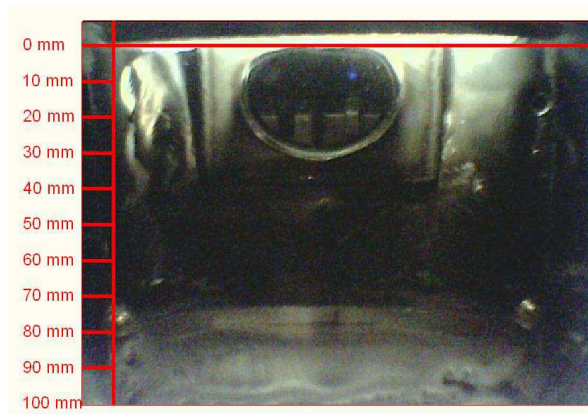
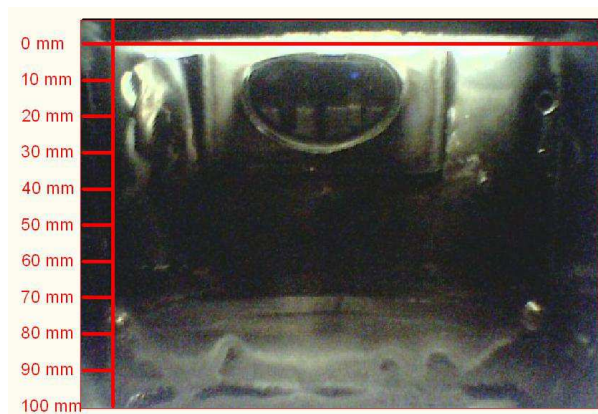
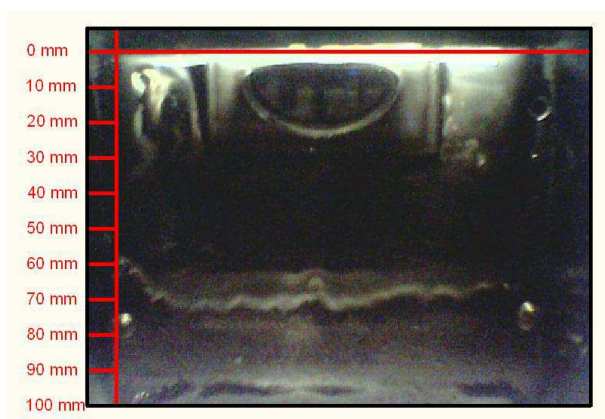
eksperimentā izmantotai video kamerai izšķirtspēja neļāva iegūt skaidrus, kvalitatīvus attēlus, taču varēja redzēt pēdas, ko atstājusi amalgamēšana ar galliju.

Lai novērstu grūti kontrolējamus efektus, kas saistīti ar neideālu pamatnes slapināšanu iespaidu uz šķidrā metāla plēves veida tecēšanu, eksperimenti tika veikti pēc sekojošas metodikas.

Katrā konkrētā situācijā (attiecīgās α un B_0 vērtības) pēc silfonu padeves sistēmas ieslēgšanas ar caurteci $Q=90 \text{ mm}^3/\text{s}$, momentā, kad pie ežektora izejas spraugas parādījās metāls, ežektorā caur silfonu sistēmu no tvertnes īsā laikā tika padota papildus šķidrā metāla porcija, kura, iztekot no izejas sprauslas, apskaloja pamatnes virsmu. Pēc tam, kad šī porcija aiztecēja, pa pamatni tecēja šķidrā metāls ar integrālo caurteci Q .

Jau pēc pirmās šķidrā metāla palaišanas pa pamatni, aina uz displeja ekrāna kardināli izmainījās. Pamatnes virsma, kas tika pārklāta ar šķidro metālu, kļuva spoguļveidīga, un uz ekrāna skaidri varēja saredzēt kameras elementus, kas atspoguļojās no šķidrā metāla virsmas. Redzama bija arī video novērošanas sistēma, kas bija novietota virs pamatnes. Tāpēc vienīgā iespēja identificēt šķidrā metāla kustību ir novērojamās ainas izmaiņu fiksācija laikā. Ja pie $Q=\text{const}$ redzamā aina nemainās laikā, tad tas liecina, ka novērojamā tecēšana ir stacionāra.

Galvenie rezultāti, kas iegūti, analizējot eksperimentu video ierakstus. Video ierakstu analīze parādīja, ka kā bez magnētiskā lauka ($B_0=0$), tā arī ar magnētisko lauku ($B_0=2 \text{ T}$, $B_z=0.5 \text{ T}$) ežekcijas sistēma nenodrošināja šķidrā metāla vienmērīgu padevi pa visu izejas spraugas platumu. No spraugas izplūstošais metāls (pie $Q=90 \text{ mm}^3/\text{s}$) koncentrējās pamatnes centrālajā daļā. Pie tam pie $B_0=2 \text{ T}$ pēc papildus šķidrā metāla porcijas iztecēšanas, no spraugas izplūstošais metāls pakāpeniski koncentrējās spraugas centrālajā daļā, bet novērojamā plakanā plēve, kas tek pa pamatni, nedaudz sašaurinās. Situācija būtiski uzlabojas spēcīga magnētiskā lauka gadījumā ($B_0=4 \text{ T}$, $B_z=1 \text{ T}$) un $\alpha=15^\circ$



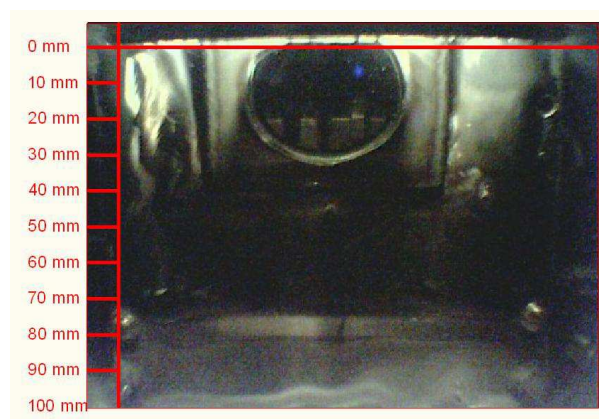


Fig.4.3.

InGaSn plēve formēšanās process un plūsma uz slīpas plaknes magnētiskā laukā

($B = 4T$)

Šajā gadījumā padodot papildus šķidrā metāla porciju, tā vienmērīgi iztecēja no izejas spraugas un vienmērīgi apskaloja visu amalgamēto pamatnes virsmu. Video ieraksti parāda, ka pēc tam, kad papildus porcijas izsauktie attēla kropļojumi ir beigušies, aina laikā nemainās. Tas norāda, ka šajā gadījumā eksperimentā realizējās vienmērīga stacionāra plēves veida tecēšana ar lineāro caurteci $q=10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$.

4.6. Priekšlikumu formulējums magnētiskā lauka iedarbes uz šķidrā metāla plēves veida tecēšanu korekcijai

Pamatojoties uz šajā atskaitē iegūtajiem rezultātiem ir izteikti sekojoši priekšlikumi magnētiskā lauka iedarbības ievērošanai.

1. Pie šķidrā metāla plēves veida divertora izstrādes vajag pareizi orientēt pamatni ar tekošo pa to šķidro metālu attiecībā pret poloidālā magnētiskā lauka spēka līnijām. Pretēja gadījumā plēves veida tecēšana var kļūt neiespējama.
2. Šķidrā metāla plēves veida tecēšana ar plēves biezumu $h \approx 100 \mu$ poloidālā magnētiskā laukā ar $B_z = 0.5 \dots 1 \text{ T}$ ir iespējama tikai pie ļoti mazas lineārās caurteces q . Pie tam litija tecēšanas ātrums būs daži mm sekundē.
3. Izstrādājot ežekcijas sistēmu, galvenā prasība ir šķidrā metāla vienmērīga padeve uz pamatni. Tāpēc vajag maksimāli palielināt MHD pretestību kapilāros kanālos.

5. Ar šķidru litiju aizsargātas divertora virsmas modeļa izveide (Aktivitāte Nr.5; 2012. 2.kv.- 2013. 3.kv.)

Aktivitātes Nr.5. ietvaros jāizstrādā kodoltermiskā reaktora divertora plates modelis, kurā kā siltumnesējs tiek izmantots litijs. Viens no tā galvenajiem nosacījumiem ir spēcīgā magnētiskā laukā nodrošināt plānu litija plūsmu uz nerūsējošas tērauda matricas ar nolūku attīrīt plazmu no dažādiem piemaisījumiem un stimulēt siltumplūsmas pārnesei sistēmā plazma – dzesētājs. Kā tas jau iepriekš atzīmēts, siltumplūsmas jauda milzīga. Tā sastāda aptuveni $3-7\text{MW}/\text{m}^2$, jeb $300 - 700\text{W}/\text{cm}^2$. Aktivitāšu Nr.1 – 4. pētījumu rezultātā tika pierādīts, ka pie labas matricas virsmas slapināšanas spēcīgā magnētiskā laukā ir iespējams radīt gravitācijas spēka ietekmē plānu šķidrā metāla plūsmu ($< 1\text{mm}$) uz slīpas matricas ar ātrumu daži cm/s.

Šinī sakarībā tiek izskatīts kombinēts divertora modelis. Tā pamatā ir nosacīti bieža vara plāksne (varam laba siltumvadāmība) dzesēta ar ūdeni (varbūt pat šķidru metālu) un pārklāta ar plānu korozijas izturīgu materiālu.

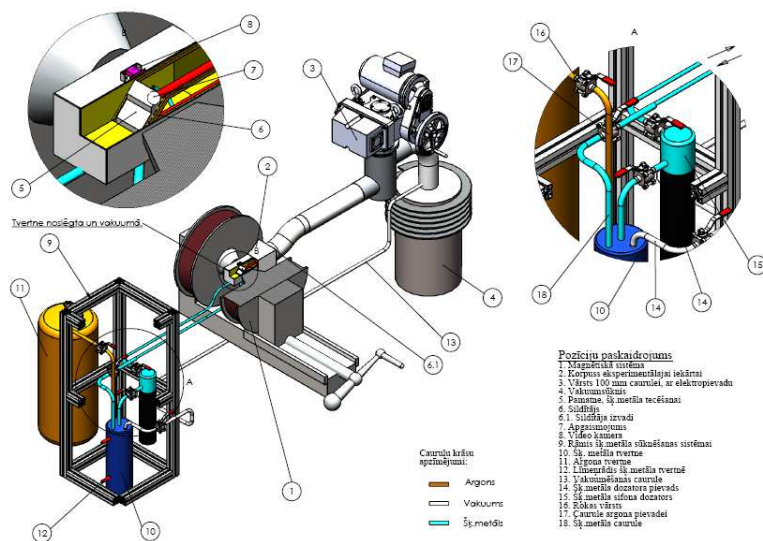


Fig. 5.1.

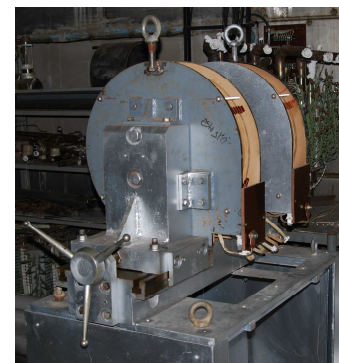


Fig. 5.2.
Elektromagnēts

Lai šo uzdevumu atrisinātu, paralēli teorētiskiem izvērtējumiem, ir paredzēts izprojektēt, izgatavot un samontēt divus litija kontūrus (kas jau daļēji tiek veikts dotajā Atskaides periodā) – vienu, fig. 5.1. ar nolūku atstrādāt litija plūsmas režīmus pie nosacīti vāja magnētiskā lauka ($B < 1,5T$), izmantojot šim mērķim izgatavotu elektromagnētu, fig. 5.2. un otru, fig. 5.3., izmantojot supramagnētu, jau laukā 4 -5T, kas ir tuvs reāla kodoltermiskā reaktora magnētiskajam laukam

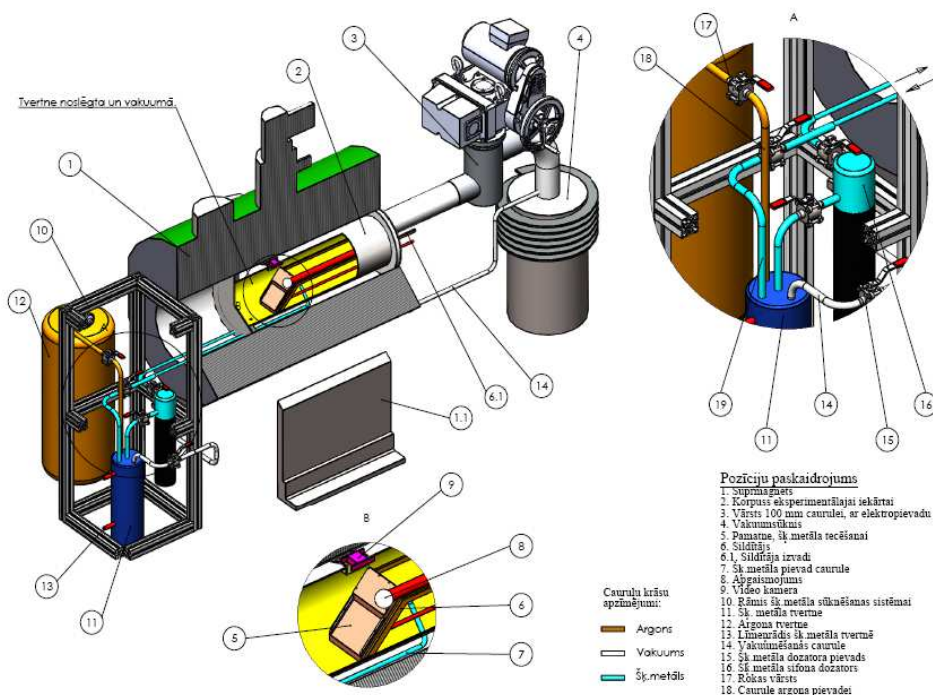


Fig. 5.3.
Litija kontūrs ar kameru instalētu supramagnētā

Kontūri praktiski identiski. To galvenā atšķirība ir eksperimentālo kameru konstrukcijā.

Dotajā atskaides periodā paralēli kontūru projektēšanai un izgatavošanai tika skaitliski izvērtēti divertora modeļa varianti un siltumpārneses procesi tajos.

6. Secinājumi

1. Aktivitāte Nr.1 „**Ūdeņraža izotopu detektēšana šķidrā litijā kā divertora aizsargmateriālā**” un Aktivitāte Nr. 2 „**Mijiedarbības procesu izpēte uz litija un nerūsējošā tērauda SS316L kontaktvirsmas atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem**” ir izpildītas un sagatavotas divas publikācijas
2. Arī Aktivitātes Nr.3 „**Optimālo parametru noteikšana litija plūsmai uz slīpas profilētas virsmas gravitācijas spēka ietekmē ārpus magnētiskā lauka**” darbi ir pabeigti. Aktivitātes galvenie rezultāti apkopoti „Aktā – Atskaitē”. Ir paredzēts Aktivitātes Nr. 3 rezultātus apvienot ar Aktivitātes Nr.4 rezultātiem un sagatavot publikāciju.
3. Aktivitātes Nr.4. teorētiskie izvērtējumi un eksperimentālie rezultāti ir sekojoši:
 - pie magnētiskiem laukiem mazākiem par 2T stabilas un plānas šķidrā metāla plūsmas ($< 1\text{mm}$) ar ātrumu daži cm/s realizēšana pa visu matricas virsmu ir atkarīga no daudziem faktoriem (virsmas slapināšanas kvalitātes, matricas slīpuma leņķa, metāla tīrības, vakuuma kamerā) un saistīta ar nopietnām tehniskām grūtībām.
 - stabilu šķidrā metāla plūsmu ar ātrumu daži cm/s pa visu matricas virsmu izdevās realizēt pie magnētiskā lauka 4T, pie tam orientējot matricu ar tekošo pa to šķidro metālu attiecībā pret poloidālā magnētiskā lauka spēka līnijām noteiktā leņķī.
4. Ir uzsākti Aktivitātes Nr.5.darbi.Tiek veikta litija kontūru projektēšana un izvērtēti siltumpārneses procesi divertora modelī.