

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 (Noslēguma atskaite)

> > 2010 - 2013

Projektā piedalījās:

1	*Platacis	Ernests
2	Bucenieks	Imants
3	Kļukins	Aleksandrs
4	Muktepāvela	Faina
5	Romančuks	Alberts
6	Ķizāne	Gunta
7	Šiško	Andrejs
8	Mencendorfs	Gatis
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	Zubkovs	Vitālijs

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

SATURA RĀDĪTĀJS

IEVADS6			
1. AKTIVITĀTES NR.1. "ŪDEŅRAŽA IZOTOPU DETEKTĒŠA	NA ŠĶIDRĀ LITIJĀ		
KĀ DIVERTORA AIZSARGMATERIĀLĀ"	10		
Litija fizikālās īpašības	10		
Kušanas temperatūra	10		
Viršanas temperatūra	10		
Tvaika spiediens	11		
Blīvums	12		
Viskozitāte	13		
Virsmas spraigums	14		
Slapināšana	15		
Litija termiskās īpašības	15		
Entalpija	15		
Kušanas entalpija	16		
Siltumkapacitāte	16		
Litija ķīmiskās īpašības	18		
Vispārīgās ķīmiskās īpašības	18		
LiH fizikālās īpašības	19		
Blīvums	19		
Kušanas temperatūra	19		
Kušanas entalpija	19		
Siltumkapacitāte	19		
Siltumvadītspēja	20		
Litija – ūdeņraža mijiedarbība	20		
Ūdeņraža izotopu difūzija izkausētā litijā	21		
Ūdeņraža izotopu atdalīšana no litija	24		
Rezultātu daļa eksperimentu īstenošanai	25		
Eksperimentālās iekārtas konstruēšana	25		
Reaktora materiāla izvēle	25		
Reaktora funkcionalitātes prasības			
Rezultāti un to izvērtējums	27		
Tritija sorbcijas-desorbcijas sistēma I	27		
Reaktora aktīvā zona kopā ar integrēto tritija iegūšanas kameru	27		
Reaktora noslēgšana	28		
Atsevišķā tritija iegūšanas kamera	29		
Eksperimenta norise			
Eksperiments izmantojot integrēto tritija avota kameru	29		
Reaktora sagatavošana un savienošana	29		
Reaktora saslēgšana (skat. 1.13. att.)	30		
Reakcijas norise	30		
Eksperiments izmantojot atsevišķo tritija avota kameru	30		

Tritija izdalīšana	30
Reaktora sagatavošana un savienošana	30
Keaktora saslegšana Tritija jevadīšana reaktora tilnumā	30 21
Tritija sorbcijas-desorbcijas sistēma II	31
Tritija skalošana no reaktor	34
<i>AT. 1.22.</i> NESAISTĪTĀ TRITIJA IZPŪŠANA NO NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA REAKTORA AR 0,2 GRAMIEM	37
ATT.1.23. TRITIJA IZDALĪŠANĀS NO NERŪSĒJOŠĀ TĒRAUDA REAKTO	
0.2 GRAMIEM LITIJA	37
-,	•••
VIELAS ΡΑΠΙΩΑΚΤΙVΙΤΑΤΕς ΑΦΡΕΚΙΝΙ	
VIELAS KADIOAKIIVIIAIES AI KEĶIŅI	50
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
APVIENOJOT VIENADIBAS (1) UN (2) IEGUST SEKOJOSO VIENADIBU ((3) 39
EKSPERIMENTĀLO DATU MATEMĀTISKĀ APSTRĀDE	39
Secinājumi	41
2. AKTIVITĀTE NR 2. "MIJIEDARBĪBAS PROCESU IZPĒTE UZ LITIJA	UN
NERŪSĒJOŠA TĒRAUDA SS316L KONTAKTVIRSMAS ATKARĪBĀ NO	
TEHNOLOGISKIEM PARAMETRIEM"	43
	44
Eksperimentālā iekārta un metodes	44
Literatūras pārskats par Li īpašībām un slapināšanas efektiem. Tērauda SS316L struktūras un īpaš	ības
pētījumi	45
Slapināšanas eksperimenti ar netīro Li virsmu pie dažādas temperatūras	4′/ 49
Slapināšanas eksperimenti ar tīro Li virsmu pie 350°C dzilā vakuumā	48 49
Secinājumi	50
Raksti:	51
Konferences:	51
3. AKTIVITĀTE NR. 3. OPTIMĀLO PARAMETRU NOTEIKŠANA LITIJA PI	ŪSMAI
UZ SI ĪPAS PROFILĒTAS VIRSMAS GRAVITĀCIJAS SPĒKA IFTEKMĒ Ā	RPUS
	52
	ŰĽ
4. AKTIVITATE NR.4. MHD PROCESU IZPETE PLUSTOSA LI SLANI UN	<u>-</u>
PRIEKSLIKUMU IZSTRADE MAGNETISKA LAUKA IEDARBES KOREK	CIJAI57
Eksperimentālās iekārtas apraksts	60
Magnetiska lauka iedarbibas novertejums uz skidra metala plusmu kapilaru ezektora	01
Eksperimentālie pētījumi par spēcīga magnētiska iedarbību uz škidrā metāla plēves veida plūsmu	03 67
Priekšlikumu formulējums magnētiskā lauka iedarbes uz šķidrā metāla plēves veida tecēšanu kore	kcija 70
,	J
	Dewve
J. ANTIVITATE NN.J.AN JNIDNU LITIJU AIZJANGATAJ DIVENTUKA VI MODELA IZVEIDE	
IVIUDEĻA IZVEIDE	/ 1

ATT. 5.1. LITIJA KONTŪRA PRINCIPIĀLĀ SHĒMA			
ATT. 5.2. LITIJA KONTŪRS AR KAMERU INSTALĒTU SUPRAMAGNĒTĀ (MONTĀŽA)	72		
SILTUMA JAUDAS PLŪSMAS BLĪVUMS	88		
Secinājums	96		
Raksti	97		
Konferences:			
Patenti:	98		

Ievads

Kodolsintēzes reaktoru darbības pamatā ir sintēzes reakcija starp diviem ūdeņraža izotopiem – deiteriju un tritiju. Reakcijas rezultātā veidojas viens 14 MeV neitrons, kas savu enerģiju atdod reaktora apvalkam. Otrs reakcijas produkts ir 3,5 MeV jaudīga alfa – daļiņa. Kopā ar neizdedzināto deiterija un tritija daļu, kā arī ar dažāda veida netīrumiem tas veido tā saucamos "kodolsintēzes pelnus", kurus novada divertorā. Šī iemesla dēļ tiek novadīti 15 – 20% no ģenerētās termālās enerģijas. Mūsdienu eksperimentālajās iekārtās tas sastāda termisko slodzi uz divertora virsmas 5 –10 MW/m² līmenī.

Kodolsintēzes TOKAMAK tipa reaktoros ,fig. 1.1. divertors ir viena no tā svarīgākajām sastāvdaļām, kura nodrošina vakuumkameras pirmās sienas aizsardzību pret augstas temperatūras plazmu.





Att. 1. Kodolsintēzes reaktora kopskats

1- magnetvads; 2 – vakuumkamera; 3 – primārā tinuma spoles; 4 – toroidālā lauka spoles; 5 – poloidālā lauka spoles; 6 – divertora zona.

Karstās termokodolu plazmas iedarbība uz sienām un vajadzīgā plazmas sastāva uzturēšana ietver sevī veselu rindu sarežģītu problēmu:

- daļiņu plūsmas uz sienu un sienas erozijas samazināšanu,
- plazmā ģenerētās enerģijas aizvadīšanu,

- piemaisījumu plūsmas no sienas uz plazmu samazināšanu,
- termokodolu reakcijas produkta hēlija un piemaisījumu aizvadīšanu no plazmas u.t.t

Lai atrisinātu šāda veida problēmas, TOKAMAK vakuumkamerā tiek organizēta speciāla divertora zona, kurā no augstās temperatūras plazmas plūsmas perifērijas (gar magnētiskā lauka separatrisi) tiek izvadītas piemaisījumu daļiņas, hēlijs, ūdeņraža izotopu – deitērija un tritija kodoli, fig.1. 2. [1, 2].



Shēma ūdeņraža izotopu un plazmas piemaisījumu izvadīšanai no plazmas augsttemperatūras zonas

Tieši šajā divertora zonā lokalizējas sadarbība starp karsto plazmu un piemaisījumu uztveršanas divertora iekārtām (UDI). Tām ir jāaizvada lieli siltuma enerģijas daudzumi, kas var sasniegt 25 MW/m². Izdarītā analīze parāda, ka "tradicionālā" koncepcija – divertora plāksnes ar cietu dzesējamo termoizturīgu virsmu (volfrāma, grafīta, silicija karbīda) nevar nodrošināt apmierinošu UDI tehnisko risinājumu, jo tām piemīt virkne trūkumu: paaugstināta virsmas erozija un/vai korozija, īslaicīgs resurss, sliktas absorbcijas īpašības, kas pasliktina augstemperatūras plazmas parametrus.

TOKAMAK reaktoros, kas paredzētii neitronu ražošanai, kur plūsmas jauda nav tik intensīva, cietie UDI varētu apmierināt šīs prasības, bet to zemās absorbcijas īpašības pasliktina kā izlādes nosacījumus, tā arī būtiski pasliktina augstās temperatūras plazmas īpašības. Strādājot ar nekustīgu absorbējošo slāni, kā līdz šim, novērojama ātra tā piesātināšanās. Bez tam, nepastāv iespēja piemaisījumus aizvadīt.

Tāpēc paralēli cietajam divertoram tiek apskatīta iespēja izmantot šķidros metālus, piemēram litiju.

Pēdējos gados veiktie eksperimenti reālos TOKAMAK reaktoros parādīja, ka litija klātbūtne UDI tā vai citādi uzlabo augstas temperatūras plazmas īpašības un ļauj būtiski samazināt jaudu, kas nepieciešama plazmas sakarsēšanai. To varētu izskaidrot ar litija unikālajām īpašībām absorbēt no plazmas aizejošās daļiņas.

Viens no risinājumiem paredz, ka divertorā plazmas attīrīšanai un jaudas novadīšanai izmanto liela ātruma (līdz 10 m/s) gallija strūklu vai pilienu vairogu. Tomēr magnētiskā lauka klātbūtnē pie lieliem šķidrā metāla ātrumiem rodas nopietnas magnetohidrodinamiskās problēmas.

Ir zināms divertors [Patents RU2051430], kurā izmantota augsti enerģētisko daļiņu plūsmu uztverošo plāksni ar piestiprinātu no metāla šķiedrām izveidotu materiālu ar kapilāru sistēmu šķidrā litija padevei. Siltuma jauda tiek uztverta, iztvaicējot litiju. Siltuma jaudas aizvadīšanai ir izveidotas paralēli magnētiskā lauka separatrisei novietotas kondensatoru plāksnes ar piestiprinātu no metāla šķiedrām izveidotu materiālu ar kapilāru sistēmu litija tvaiku kondensēšanai un šķidrā litija aizvadīšanai. Tomēr šajā divertorā izmantotā litija iztvaicēšana var radīt kameras piesārņošanu un litija nogulsnēšanos uz citiem tokamaka konstrukcijas elementiem. Lielam litija tvaiku daudzumam nokļūstot tokamaka kamerā, pastāv risks nodzēst plazmu. Bez tam zināmajā divertorā ir grūti kontrolēt augsti enerģētisko daļiņu absorbciju litija tvaikos, līdz ar to netiek nodrošināta pietiekama plazmas attīrīšana.

Izejot no augstāk minētā, reaktoros-neitronu avotos kā UDI iesaka izmantot dzesējamās divertora plāksnes, kas ir pārklātas ar plānu lejup tekošu litija plēvi, fig. 1.3a, vai strūklu barjeru, fig.1.3b.

Šāda litija plēve darbojas kā pastāvīgi atjaunojama darba virsma, kura tieši kontaktējas ar plazmu. Pie tam siltuma jaudas aizvadīšanu nodrošina dzesējamās divertora plāksnes, bet šķidrais litijs uz šo plākšņu virsmas ir vajadzīgs tikai plazmas piemaisījumu absorbcijai un to aizvadīšanai.



Att..3 Iekārtas shēma ūdeņraža izotopu absorbcijai a – ar plānas šķidrā litija plēves palīdzību; b – ar strūklu barjeras palīdzību

b

Izstrādātā projekta mērķis::

uzlabot tehnoloģiju ūdeņraža izotopu absorbcijai un evakuācijai kodoltermiskā reaktora divertorā.

Tas ietver 5 (piecas) aktivitātes:

- Ūdeņraža izotopu detektēšana šķidrā litijā kā divertora aizsargmateriālā;
- Mijiedarbības procesu izpēte uz litija un nerusējoša tērauda SS316L kontaktvirsmas atkarības no tehnoloģiskiem parametriem;
- Optimālo parametru noteikšana litija plūsmai uz slīpas profilētas virsmas gravitācijas spēka ietekmē ārpus magnētiskā lauka;
- MHD procesu izpēte plūstošā Li slānī un priekšlikumu izstrāde magnētiska lauka iedarbes korekcijai;"
- Ar šķidru litiju aizsargātas divertora virsmas modeļa izveide.

1. Aktivitātes Nr.1. "ūdeņraža izotopu detektēšana šķidrā litijā kā divertora aizsargmateriālā"

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

ERAF projekta "Uzlabotās litija tehnoloģijas izstrāde plazmas attīrīšanas iekārtu (divertoru) aktīvo virsmu aizsardzība" ietvarā 1. aktivitātes uzdevums ir ūdeņraža izotopu detektēšana šķidrā litijā kā divertora aizsargmateriālā. Pētījuma mērķis ir izpētīt tritija sorbciju un desorbciju izkausētā litijā, tai skaitā, paplašinātais mērķis būtu iespējamo litija savienojumu, piem., litija tritīda (LiT) rašanās un termiskās sadalīšanas procesa pētījumi. Tritiju sorbcijasdesorbcijas pētījumiem iegūst no tritiēta parauga termiskās difūzijas ceļā no tā difundē tritiju (T₂), kas turpmāk var saistīties reakcijā ar izkausētu litiju. Viens no svarīgākajiem šī uzdevuma veikšanas darba praktiskajiem uzdevumiem, ir eksperimentālās iekārtas konstruēšana. **Darba mērķa īstenošanai** izveidota multifunkcionāla iekārta tritija sorbcijai desorbcijai šķidrā litijā, apkopota literatūra par šķidro litiju, litija hidrīdu, kā arī ūdeņraža izotopu iedarbību ar šķidro litiju.

Litija fizikālās īpašības

Kušanas temperatūra

Litija kušanas temperatūra ir 180,54 ${}^{\circ}C$. Vairums literatūras avotos kušanas temperatūra variē no 179 līdz 186 ${}^{\circ}C$. Šī temperatūra ir divtik augstāka par *Na* kušanu, taču tā ir ievērojami mazāka par vairums citu metālu kušanas temperatūru. Tāpēc šis ir viens no iemesliem kāpēc *Li* tiek plaši izmantots kā reaktoru dzesējošais un siltuma novadīšanas aģents (*šķidrums*).

Viršanas temperatūra

Viršanas temperatūra salīdzinoši ar citiem sārmu metāliem ir salīdzinoši zema, aptuveni $1347^{\circ}C$. Litija viršanas temperatūra pie normālajiem apstākļiem daudzos literatūras avotos tiek uzdota no $1317 \, \text{l}$ īdz $1370^{\circ}C$.

Normālā litija operatīvā temperatūra (*temperatūra, pie kuras mēdz strādāt*) ir no 200 līdz 550 $^{\circ}C$. Slēgtā sistēmā, pie normāla atmosfēras spiediena, litija viršana nenotiks tik ilgi, līdz tas

nesasniegs temperatūru, kas ir krietni augstāka par viršanas punktu. Tas atļauj litija sistēmām strādāt bez spiediena pieauguma, tādējādi samazinot izturības prasības attiecībā pret aparātu konstrukcijām.

Tvaika spiediens

Tvaika spiediens (P) jeb līdzsvara tvaika spiediens ir spiediens kāda šķidruma tvaikam, kas ir termodinamiskajā līdzsvarā ar savu kondensēto fāzi slēgtā sistēmā. Litijam piemīt samērā zems tvaika spiediens pie kušanas temperatūras, aptuveni 10^{-10} mm Hg. Ir sastādītas vairākas vienādības, ar kuru palīdzību var izrēķināt tvaika spiedienu pie dažādām temperatūrām. Viena no vienādībām, ar kuru var aprēķināt litija tvaika spiedienu robežās no 700 līdz 1400 $^{\circ}C$ ir vienādība (1). Vienādībai (1) dotajā temperatūru diapazonā ir laba korelācija ar eksperimentāli noteiktām tvaika spiediena vērtībām, un ir tuvi rezultāti salīdzot ar citām, sarežģītākām vienādībām.

$$\lg P = 8.00 - 8143T^{-1} \tag{1}$$

kur,

0

P – tvaika spiediens, mm Hg; T – absolūtā temperatūra, K;

Tvaika spiediena pieauguma līkne temperatūru diapazonā no 800 līdz 1200 ${}^{0}C$ parādīta 1.1. attēlā.



Att. 1.1. Litija tvaika spiediens atkarībā no temperatūras

Blīvums

Cietā fāzē litija blīvums ir 0,534 g/cm³. Ar sekojošo vienādību (2) ir iespējams aprēķināt šķidrā litija blīvumu temperatūru diapazonā no 200 līdz 1600 $^{\circ}C$ ar precizitāti $\pm 0,3\%$.

$$\rho_{II} = 0.515 - (1.01 \times 10^{-4})(T - 200)$$
 (2)

kur,

 ρ_{Li} – litija blīvums pie temperatūras T, g/cm³;

T – temperatūra no 200 līdz 1600 °C, °C;

Attēlā 1.2. apskatāms litija blīvuma atkarība no temperatūras. Litija blīvumu apraksta lineāra funkcija, kur blīvums samazinās temperatūrai pieaugot.



Attēlā 1.2. Litija blīvums atkarībā no temperatūras, diapazonā no 200 līdz 1600 °C

Virs $1600 \,{}^{0}C$ litija blīvums strauji samazinās. Sava zemā blīvuma dēļ, šķidro metālu sūkņiem ir mazāka sūkšanas slodze, nekā tas būtu ar citiem metāliem. Tā ir vēl viena būtiska priekšrocība litija izmantošanai kodolindustrijā.

Viskozitāte

Viskozitāte (η) ir šķidruma pretestības mērs, kas noteikts to deformējot bīdes vai stiepes procesā.

Ir definētas divu tipu viskozitātes. Dinamiskā un kinemātiskā viskozitāte. Kinemātiskā viskozitāte ir attiecība starp šķidruma dinamisko viskozitāti un tā blīvumu pie dotās temperatūras. Dinamiskā viskozitāte apskata šķidruma pretošanās spēju izmainīt to formu. Šī iekšējā berze ir lielums, kas parāda cik grūti ir likt šķidrumam plūst.

Ir divas dinamiskās viskozitātes aprēķināšanas vienādības pie dažādiem temperatūru diapazoniem, vienādība (3), kas darbojas diapazonā no 180,54 līdz $1000^{\,0}C$ un vienādība (4), diapazonam no 600 līdz $1200^{\,0}C$. Vienādība (4) var tikt izmantota, lai ekstapolētu viskozitāti pie vēl lielākām temperatūrām.

$$\lg \eta = 0,4936 - 0,7368 \lg T + 109,95 \cdot T^{-1} (3)$$

kur,

 η – dinamiskā viskozitāte, cP (centipuāzi);

T – temperatūra diapazonā no 180,54 līdz 1000 $^{\circ}C$, K;

$$\lg \eta = 726,07 \cdot T^{-1} - 1,3380 \ (4)$$

kur,

 η – dinamiskā viskozitāte, cP;

T – temperatūra diapazonā no 600 līdz 1200 $^{\circ}C$, K;



Att. 1.2. Litija viskozitāte atkarībā no temperatūras

Virsmas spraigums

Virsmas spraigums (σ) ir šķidruma virsmas īpašība, kas ļauj pretoties ārējiem spēkiem.

Molekulāro spēku mijiedarbība starp diviem šķidrumiem ir viegli un izteikti novērojama. Uz šķidruma virsmas (*piemēram, uz šķidrā litija*) patstāvīgi neveidojoties šķidrumam, virsmas molekulas rada spēkus, kas virsmai liek uzvesties kā membrānai, kas būtu pārvilkta pāri šķidruma virsmai. Tas ir saistīts ar to, šķidruma molekulas stipri piesaistās pie gāzu molekulām (*piemēram, ar gaisu*). Šķidrajam litijam virsmas spraigums ir lineāra funkcionāla sakarība no temperatūras. Tas tika konstatēts eksperimenta laikā, kad radās nepieciešamība izliet litiju no tīģeļveidīga konteinera, rezultātā, pat apgriežot to otrādi un spēcīgi kratot, tīģeli, kura diametrs bija aptuveni 2.54 cm (*1 colla*), no litija nevarēja atbrīvot. Liela virsmas spraiguma un maza blīvuma kombinācija nodrošināja to, lai litijs noturētos metāla konteinerā. Sakarība (*5*) apraksta šķidrā litija virsmas spraigumu atkarībā temperatūras. Sakarība pielietojama temperatūru diapazonā no 200 līdz 1300 $^{\circ}C$. Virsmas spraiguma un temperatūras

$$\sigma_{II} = 0.16 \cdot (3550 - T) - 95 (5)$$

kur,

 $\sigma_{{\scriptscriptstyle Li}}$ – virsmas spraigums šķidrajam litijam, dyne/cm;

T – temperatūra diapazonā no 200 līdz 1300 $^{\circ}C$, K;



Att. 1.3. Litija virsmas spraiguma atkarība no temperatūras

Slapināšana

Slapināšana apraksta spēju šķidrumam brīvi izplatīties (*plūst*) pa cietu virsmu. Šķidrumiem ar maziem virsmas spraigumiem parasti piemīt labas slapināšanas spējas. Analītiski tīrs litijs neslapinās nerūsējošā tērauda virsmu līdz 315 ${}^{0}C$, bet sāks slapināt jau pie $400 {}^{0}C$. Neattīrīts litijs, kas saturēs mikro piemaisījumus, neslapinās nerūsējošā tērauda virsmu līdz ~ 480 ${}^{0}C$.

Litija termiskās īpašības

Entalpija

Entalpija ir termodinamiskā funkcija, kas parāda iekšējās enerģijas daudzumu un sistēmai pieejamo spiedienu un tilpumu. Litija entalpiju pie kādas konkrētas temperatūras var aprēķināt pēc vienādībām (6) un (7). Vienādības (6) precīzais darbības diapazons ir robežās no 190 līdz 650 $^{\circ}C$, bet vienādības (7) no 500 līdz 1300 $^{\circ}C$.

$$H_T = 270,4 + C_P (T - 453,6) \qquad (6)$$

kur,

 H_T – entalpija pie temperatūras T, cal/g;

 C_p – siltumkapacitāte, cal/g- ${}^{0}C$;

T – temperatūra diapazonā no 190 līdz 650 $^{\circ}C$;

$$H_T = -5,075 + 1,0008T - 5,173 \times 10^3 T^{-1}(7)$$

kur,

 H_T – entalpija pie temperatūras T, cal/g;

T – temperatūra diapazonā no 500 līdz 1300 $^{\circ}C$;

Attēlā 1.5. apskatāmi eksperimentālo datu taisne, kas verificē vienādību (6).



Att.1.4. Litija entalpija atkarībā no temperatūras

Kušanas entalpija

Kušanas entalpija jeb kušanas siltums ir enerģijas daudzums, kas nepieciešams lai pārvērstu vienu molu vielas no cietas fāzes šķidrā. Temperatūru, kuru process sasniedz ir kušanas temperatūra.

Litija kušanas siltums sasniedzot $180,54^{\circ}C$ ir 103,2 cal/g.

Siltumkapacitāte

Siltumkapacitāte (C_p) jeb siltumietilpība ir izmērāms fizikāls lielums, kas raksturo siltuma daudzumu, kas nepieciešams lai izmainītu substances temperatūru par uzdoto lielumu. Attēlā 1.6 parādīta litija siltumkapacitāte kalorijās uz gramu par vienu celsija grādu (cal/g- ^{0}C). Litijam piemīt lielākā siltumkapacitāte no visiem cietajiem elementiem, šis fakts to padara to par vērtīgu siltumapmaiņas aģentu dzesēšanas iekārtās.



Att. 1.5. Litija siltumkapacitāte

Siltumvadītspēja (k) ir materiāla spēja vadīt siltumu. Litija siltumvadītspēja temperatūru diapazonā no 0 līdz 100 ${}^{0}C$ pēc SI sistēmas ir 84,7 $Wm^{-1}K^{-1}$ [a3]. Pēc ārpus sistēmu mērvienībām tas atbilst 1,67 *cal / sek* · $m \cdot {}^{0}C$.

Litijam, kā vairums metāliem, siltumvadītspēja ir atkarīga no temperatūras. Litija siltumvadītspēju ļoti plašā temperatūru diapazonā apraksta apieztā parabola, temperatūrai pieaugot līdz noteiktam punktam pieaug arī siltumvadītspēja, pēc tam turpinot celt temperatūru siltumvadītspēja krītas. Eksperimentāli ir noteiktas trīs empīriskās vienādības (8 – 11) litija aptuvenai siltumvadītspējas aprēķināšanai, pie trim dažādiem temperatūru diapazoniem.

no 250 līdz $950^{\circ}C$: $k_{250-950^{\circ}C} = 10,1+2,94\times10^{-3}T$ (8) no 300 līdz $1100^{\circ}C$: $k_{300-1100^{\circ}C} = 10,48+4,98\times10^{-3}(T-180,6)-0,58\times10^{-6}(T-180,6)^2$ (9) no 320 līdz $830^{\circ}C$: $k_{320-830^{\circ}C} = 8,24+7,46\times10^{-3}T$ (10) **vidējā vienādība**: $k = 9,59+4,55\times10^{-3}T$ (11)

kur,

 k_{T1-T2} – siltumvadītspēja temperatūru diapazonā no T1 līdz T2, *cal / sek* · *m*·⁰*C*; *T* – temperatūra, ⁰*C*; Attēlā 1.7 ir apkopoti vairāku, neatkarīgu eksperimentu noteiktie litija siltumvadītspējas lielumi. Ir redzams, ka lielumiem nav laba lineārā korelācija (*skat. 1.7. att.*), taču tupinot punktu fiksēšanu vēl pie lielākām temperatūrām, var saskatīt, ka punkti izvietojas uz apgrieztās parabolas līknes. Samērā nelielos diapazonos var izmantot lineārās sakarības *Li* siltumvadītspējas aprēķināšanai (*skat. 1.7. att.*).



Att. 1.6. Litija siltumvadītspēja atkarībā no temperatūras

Litija siltumvadītspēju vislabāk aprakstošā vienādība, kas ir vidējais lielums no vienādībām (8), (9) un (10) ir vienādība (11). Attēlā tā ir iezīmēta ar raustīto līniju (*skat. 1.7. att.*).

Litija ķīmiskās īpašības

Vispārīgās ķīmiskās īpašības

Litijs ir pats neaktīvākais metāls no visas sārmu metālu saimes, taču speciālos apstākļos tam piemīt laba reaģētspēja. Litijs aktīvi reaģē ar halogēniem, emitējot gaismu. Tas ļoti aktīvi reaģē ar vairums neorganiskajām skābēm, īpaši ar atšķaidītām. Taču aukstā un koncentrētā sērskābē litijs pasivējas un reakcijas noris lēni. Izkausēts litijs īpaši aktīvi reaģē ar cementu (*betonu*) un citiem materiāliem, kas satur mitrumu. Reakcijas noris ar sprādzienu. Tas aktīvi stājas reakcijās arī keramiskajiem izolācijas materiāliem, tādiem kā porcelāns. Pie augstām temperatūrām, izkausēts litijs reaģē ar visām gāzēm, bet temperatūrā virs 200 ^{0}C to var apstrādāt parafīna tvaikos. Vairums apstākļos, tas tiek uzskatīts par inertu hēlija atmosfērā. Mitrums jeb neliela ūdens klātbūtne, jūtami katalizē litija – gāzu reakcijas. Izkausēts litijs nereaģēs ar skābekli un oglekļa dioksīdu pilnīgi sausā gaisā, bet 10 līdz 15 ppm mitruma

klātienē, jau istabas temperatūrā, notiks reakcijas ar gaisā esošo skābekli, slāpekli un ogļskābo gāzi. Litijs viegli reaģē ar gaisu, ūdeni, skābekli, oglekli, slāpekli un ūdeņradi pat inertajos šķidrumos, kuros tas tiek uzglabāts. Šo elementu piesārņojums litijā, saskarsmē ar citiem metāliem, veicina to koroziju. Stabilie binārie savienojumi, kā litija oksīds, nitrīds, hidroksīds, hidrīds un hlorīds ir ļoti korozīvi savienojumi. Metāliskie piemaisījumi arī katalizē daudzas litija reakcijas.

LiH fizikālās īpašības

Blīvums



LiH blīvuma atkarība no temperatūras cietā un šķidrā fāzē apskatāma 1.9 attēlā.

Att.1.9. LiH blīvuma atkarība no temperatūras

Kušanas temperatūra

Kušanas temperatūra no vairākiem literatūras avotiem variē robežās no 686 - 688 ^{0}C .

Kušanas entalpija

Kušanas entalpija tiek uzdota ar samērā lielu drošības intervālu: $7000 \pm 2000 \ cal / mol$.

Siltumkapacitāte

LiH siltumkapacitātes atkarība no temperatūras cietā un šķidrā fāzē apskatāma 1.10 attēlā. Līdzīgi kā Li siltumkapacitātes gadījumā, arī LiH siltumkapacitāte krītas pēc kušanas temperatūras sasniegšanas.



Att.1.10. LiH siltumkapacitātes atkarība no temperatūras

Siltumvadītspēja

LiH siltumvadītspējas atkarība no temperatūras cietā fāzē apskatāma 1.11. attēlā.



Att. 1.11. LiH siltumvadītspējas atkarība no temperatūras

Izkausētam LiH siltumvadītspēja ir noteikta kā 0,0188 $Cal/\sec/cm/{}^{0}C$ pie 710 ${}^{0}C$.

Litija – ūdeņraža mijiedarbība

Litijs var reaģēt ar ūdeņradi veidojot aktīvu hidrīdu ar augstu kušanas temperatūru. Reakcija noris saskaņā ar reakcijas vienādojumu (12):

$$Li(s) + \frac{1}{2}H_2(g) - > LiH(s)$$
 $\Delta H_{25^0C} = -21,61\frac{kcal}{mol}$ (12)

Atkarībā no veidošanās apstākļiem, litija hidrīds var būt vai nu balts, kristālisks pulveris vai arī veidot adatveidīgus kristālus. Ūdeņraža reakcija ar tīru izkausēta litija virsmu lineārās

korelācijas, ir pirmās pakāpes reakcija, ar aktivācijas enerģiju 12,6 kcal/mol. Litija gadījumā, aktivācijas enerģija ir mazāka, nekā ūdeņraža reakcijai starp nātriju vai kāliju. Reakcijas ātrumu attiecība litijam, nātrijam un kālijam 250 $^{\circ}C$ temperatūrā ir attiecīgi 43:4:1. Paaugstinot temperatūru reakcijas ātrums lineāri pieaug. Attēlā 1.8 parādīta temperatūras ietekme uz ūdeņraža absorbciju šķidrā litijā. Reakcija starp izkausētu litiju un tīru ūdeņradi augstākās temperatūrās sāk noritēt jau 400 $^{\circ}C$ temperatūrā, un beidzas ļoti ātri pie 710 $^{\circ}C$. Iestājoties reakcijas (*12*) līdzsvaram, ūdeņraža parciālais spiediens ir aptuveni 40 tori 700 $^{\circ}C$ temperatūrā. Ūdeņraža šķīdība izkausētā litijā ir aptuveni 17 reizes augstāka 500 $^{\circ}C$ temperatūrā nekā 900 $^{\circ}C$ temperatūrā (*pie viena un tā paša spiediena*), 94% no litijā izšķīdušā ūdeņraža var tikt ekstrahēti paaugstinot temperatūru līdz 900 $^{\circ}C$. Litijā esošie piemaisījumi var izraisīt reakcijas pašaizdegšanos un sprādzienu. Visi šie dati attiecināmi uz relatīvi tīrām eksperimentālajām sistēmām un vielām, atkarībā no izejvielu tīrības, vērtības var mainīties.

Ūdeņraža izotopu difūzija izkausētā litijā

E.A. Kuslers (*E.A. Culer, 1976.*) ir vispārinājis, ka jebkura solvāta šķīdība jebkurā šķidrajā solventā ir aptuveni konstanta, kas atbilst $0.7 \times 10^{-5} cm^2 / s$. Kaut arī šis apgalvojums ir samērā vispārīgs un tiecas uz precizēšanu, piemērotāka sakarība difūzijas matemātiskai aprakstīšanai balstās uz Stroka – Einšteina (*Stroke- Einstein, 1905*) vienādojuma (1) [a1].

$$D = kT / 6\pi \cdot \bar{r}\mu \quad (1)$$

Kur k- Bolcmaņa konstante, $1,3805 \times 10^{-13}$; $T - absolūtā temperatūra, K; \bar{r} - efektīvais rādiuss difundējamai vielai, cm;$

Relatīvi sfēriskai molekulai efektīvais rādiuss būs:

$$\bar{r} = (3V/4\pi N_{Av})^{1/3}$$
 (2)

kur, V- ir molekulārais tilpums pie normālās viršanas temperatūras, $cm^3 / g \cdot mol$;

 N_{Av} – Avogadro skaitlis, $6,02 \cdot 10^{23}$ molek / mol;

Priekš nesfēriskām molekulām, to efektīvo rādiusu nosaka pēc to pseido hidrodinamiskās mobilitātes (*Brenners*, 1974).

Efektīvais *LiH* molekulas rādiuss ir 1,7Å, un to var aprēķināt pēc vienādojuma (2). Ievietojot šo rādiusu vienādojumā (1), tam zūd korelācija ar eksperimentāli noteiktiem datiem, cēlonis tam ir tas, ka difundējamais savienojums nav tikai *LiH* savienojuma molekula. Ūdeņradis difundējot šķidrā litijā var veidot vairākus savienojumus, ne tikai *LiH*, bet arī Li_2H , Li_3H un vēl lielāku savienojumu molekulas. Priekš mazākām molekulām, kas difundējas nepolimēru šķidrumos, biežāk lietotās vienādības, kas apraksta difūzijas korelāciju ar eksperimenta apstākļiem ir :

$$D = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(M_B)^{1/2T}}{\mu^* V_a^{0.6}} \quad (3)$$

un

$$D = 8,2 \times 10^{-8} \frac{T}{\mu^*} \frac{1 + \frac{3V_B^{2/3}}{V_A}}{(V_A)^{1/3}} \quad (4)$$

kur, V_A un V_B – solvāta un solventa molekulārie tilpumi, cm³ / mol;

 M_{B} – solventa molmasa, g/mol;

T – absolūtā temperatūra, K;

 μ^* – solventa viskozitāte, cP;

No abiem šiem vienādojumiem izriet, ka šķidruma difūzija ir proporcionāla dalījumam absolūtajai temperatūrai ar viskozitāti:

$$D = \frac{aT}{\mu} \quad (5)$$

kur, a – ir noteiktā konstante, kas ir neatkarīga no temperatūras konkrētam solvāta – solventa pārim;

Vienādība (5), kas ir piemērota universāli visām nepolimēru sistēmām, var tikt izmantota lai ekstapolētu pieejamos, ūdeņraža - litija difūzijas datus zemu temperatūru režīmos. Turklāt, tā kā molekulārais tilpums ir lielā mērā neatkarīgs no izotopa masas, tad vienādības (1), (2) un (4) prognozē, ka konstante a vienādībā (5) ir neatkarīga no izotopa. Tādējādi, pie jebkuras temperatūras, visu ūdeņraža izotopu difūzijai šķidrajā litijā jābūt vienādai.

Šķidruma viskozitāte temperatūru diapazonā no 185 – 1000 $^{\circ}C$ ir droši aprakstāma sekojošā veidā:

$$\log_{10} \mu^* = 1,4936 - 0,7368 \log_{10} T + 109,95/T$$
 (6).

Nav sagaidāms, ka litija viskozitāte ir ietekmējama ar mazām ūdeņraža koncentrācijām. Pielietojot vienādības (5) un (6) uz eksperimentāli iegūtiem datiem par litija – ūdeņraža difūziju augstās temperatūrās, ir novērota difūzijas korelācija, kas piemērojama visiem ūdeņraža izotopiem. Eksperimentāli ir atrasts konstantes a lielums, kas ir 2,86×10⁻¹⁰ erg/cmK ar standartnovirzi 18%. Ūdeņraža izotopu difūzija šķidrajā litijā ir aprēķināta sekojoši:

$$\log_{10}(D \pm 18\%) = -9,038 + 1,737 \log_{10} T - 110/T$$
(7)

Kaut arī vienādība (7) apraksta tikai ūdeņraža izotopu difūziju tīrā litijā, to var izmantot kā palīglīdzekli, lai prognozētu ūdeņraža izotopu difūziju litija sakausējumos, kā litija – svina, litija – alumīnija un citos sakausējumos, kas ir noderīgi kodolsintēzes reaktoru konstrukcijās. Tabulā 1.1. ir apkopoti eksperimentāli noteiktie ūdeņraža difūzijas koeficienti šķidrā litijā, četrām dažādām temperatūrām un dažādu spiedienu variācijām. Eksperimentāli dati parāda zināmu difūzijas koeficientu atkārtojamību, kas apstiprina iepriekš klāstīto sakarību pielietojumu praksē.

1.1. tabula

 H_2 difūzijas koeficienti metāliskajā Li pie augstām temperatūrām, pie dažādiem spiedieniem

Temperatūra,	Spiediens,	Difūzijas koeficients,
${}^{0}C$	Pa	cm^2/s
800	575,0	0,97
800	15,6	1,10
800	15,6	0,95
800	1097	1,11
800	1097	1,04
800	1097	1,33
800	1097	1,25
800	1097	1,30
805	575	1,33
855	575	1,54
905	575	2,85

Ūdeņraža izotopu atdalīšana no litija

Litijs ir viens no galvenajiem elementiem, kas paredzēts tritija pavairošanai D - T kodolsintēzes reaktoros. Pašdzesējošā litija virsslāņa koncepcija arī ir viena no galvenajām idejām termiskās kodolsintēzes reaktoros (*ITER*). Tomēr tritija atgūšana no litija līdz paredzētajam, pieļaujamajam līmenim (~ *1 appm*) joprojām ir galvenais tehniskais jautājums. Tas ir saistīts ar ļoti augstu tritija šķīdību litijā, un ļoti zemas tritija koncentrācijas nepieciešamību litijā, lai minimizētu tritija daudzumu pavairošanas virsslānī (*eng. breeding blanket*). Ir attīstītas vairākās daudzsološas metodes tritija atgūšanai no litija:

- izkausētās sāls metode (eng. molten salt recovery), lieto aktīvo metālu sāļus kā, LiCl KCl, LiF – LiCl vai LiF – LiCl – LiBr, lai ekstrahētu ūdeņraža izotopus no izkausēta litija.
- caurspiešanās loga metode (eng. the permeation window), lieto termiski izturīgus, metāliskos logus, kam piemīt ūdeņraža izotopu saķērājspējas, kā cirkonija vai itrija logus.
- destilācija jeb termālās desorbcijas metode, pamatojas uz litija hidrīda, deiterīda un tritīda termisko sadalīšanu un komponentu atdalīšanas metodi.
- aukstā slazda metode (*eng. cold trapping*).
- šķidro metālisko eluentu metode, izmanto eluentus, kas satur retos (*Ce, La, Y*) un pārejas metālus (*Co, Ni, Fe, Mn*).

Izkausētās sāls metode, ir vienīgais veiksmīgais process, ar kura palīdzību ir izdevies atgūt tritiju no litija līdz vēlamajai koncentrācijai (~1 *appm*). Tomēr, pēc tritija ekstrakcijas ar sāli, litijs būs zināmā mērā piesārņots ar izmantoto sāli, kas ietekmēs litija otrreizējo izmantošanu tritija pavairošanas slānī.

Visvairāk pētītā metode ūdeņraža izotopu atdalīšanai no litija, ir ūdeņraža caurspiešanās caur metāla vai metālu sakausējumu logu, kas atdala ūdeņradi no litija. Šo metālu sakausējumiem ir jāpiemīt augstai caurlaidībai pie temperatūrām, kas pārsniedz 850 $^{\circ}C$. Lai process būtu efektīvāks, metode būtu jāpapildina ar hīdrīdus veidojošu sakausējumu,

kas absorbētu un uzglabātu atdalīto tritiju. Aprēķini liecina, ka ar šo metodi ir iespējams panākt tritija koncentrāciju litijā no 1 līdz 10 wt ppm.

Jaunāks tritija atgūšanas process ir bāzēts izmantojot auksto slazdu, kas izstrādāts attīstoties ITER koncepsijai. Taču arī šai metodei ir savi trūkumi. Viens no galvenajiem ir tritija koncentrācijas samazināšana tikai līdz ~400 appm, kas ir nepietiekoši otrreizējai efektīvai litija izmantošanai. Tāpēc aukstā slazda metode vēl netiek uzskatīta par efektīvu metodi šī uzdevuma veikšanai. Taču pastāv dažādas šīs metodes modifikācijas. Piemēram, lai gan tritija koncentrācija ir tikai 1 appm, apzināti pievienojot ūdeņradi litijā, pie aukstā slazda temperatūras kopējā ūdeņraža koncentrācija sasniedz piesātināto koncentrācijas līmeni. Tādējādi, dzesējot litija plūsmu, tritijs tiks izgulsnēts kopā ar pievienoto ūdeņradi. Nogulsnētais materiāls ir litija hidrīda un tritīda maisījums Li(H+T), kas tritija atgūšanai tiks sadalīts pie 600 ^{0}C . Tritijs tiks atdalīts no pievienotā ūdeņraža ar kriogēno destilāciju.

Šķidro sakausējumu saķērēji jeb šķidro metālisko elementu sakausējumi var uzturēt tritija koncentrāciju litijā zem 1 wt ppm, tomēr ir salīdzinoši grūti atgūt tritiju no metāliskā eluenta. Kā arī ir iespējamas litija un šķidrā eluenta savstarpējās reakcijas. Šie fakti padara šo metodi mazāk vilinošu kā citas..

Rezultātu daļa eksperimentu īstenošanai

Eksperimentālās iekārtas konstruēšana

Reaktora materiāla izvēle

Izvērtējot literatūrā aprakstīto informāciju, no tās seko, ka strādājot ar šķidro jeb izkausētu litiju, ļoti stingri jāievēro darba drošības noteikumi. Rezultātā pieņemts lēmums, eksperimentālās iekārtas aktīvo zonu veidot no ķīmiski izturīgā tērauda, no kā arī gatavo ķīmiski izturīgos autoklāvus. Izvēlētā tērauda marka reaktora aktīvajai zonai ir "*Stainless Steel 304l*" (*pēc ASV standartiem*).

Reaktora funkcionalitātes prasības

Reaktoram jābūt izturīgam pret agresīvām vielām, kā litijs, kas ir aktīvs sārmu metāls, un augstākās temperatūrās labprāt stājas dažādās aizvietošanas reakcijās ar citiem metāliem. Metālam jāsaglabā savas īpašības augstās temperatūrās - 800 $^{\circ}C$, tas nedrīkst oksidēties vai radikāli izmainīt savu struktūru (*karsējot*, *dzesējot*). Reaktoram jātur samērā ekstremāli apstākļi (- 800 $^{\circ}C$), tai laikā jāievēro dažādu metālu izplešanās koeficienti. Nedrīkst pieļaut reaktora hermētiskuma izmaiņas paaugstinot temperatūru, kas varētu rasties, izplešoties citām reaktora daļām. Reaktoram jābūt absolūti hermētiskam, lai nepieļautu tritija gāzes noplūdi, kā arī vides sasmērēšanu ar radioaktīvo piesārņojumu. Reaktora aktīvās zonas tērauda sieniņu biezumam jābūt pietiekošam dēļ iespējamās korozijas. Reaktora aktīvajai zonai jābūt maksimāli vienkāršas konstrukcijas, lai tā saturētu pēc iespējas mazāk vītņoto detaļu, lai novērstu tritija noplūdi vītnēs, kas apgrūtinātu tā izvadīšanu uz tritija detektoru. Jābūt divvirzienu aktīvās zonas komunikācijām, tas ir, jābūt diviem atsevišķiem pieejas kanāliem pie reaktora, no kuriem vienu saista ar tritija detektoru. Reaktoram jābūt viegli izjaucamam un maksimāli miniatūram, lai varētu ērti manipulēt hermētiskajā dearētajā vakuumboksā ar ierobežotu tilpumu, kā arī ērti transportējamam uz tritija sorbcijas-desorbcijas eksperimentu boksu. Viegli apkopjama reaktora konstrukcija ir svarīga prasība un nepieciešamība, lai būtu iespēja veikt tīrīšanu un dezaktivāciju pēc eksperimentiem.

Reaktors ir multifunkcionāls, ir iespēja T_2 avotu karsēt gan vienlaicīgi ar litiju, kā rezultātā izdalītais tritijs uzreiz stājas reakcijā ar šķidro litiju, gan arī atsevišķi.

Darba gaitā tika izveidotas vairākas tritija sorbcijas-desorbcijas sistēmas.

Rezultāti un to izvērtējums

Tritija sorbcijas-desorbcijas sistēma I



Reaktora aktīvā zona kopā ar integrēto tritija iegūšanas kameru

Att. 1.12. Reaktora aktīvās zonas uzbūve, iekļaujot tritija termiskās difundēšanas kameru no Be lodītēm.

A, B – reaktors izjauktā veidā; C – reaktors savienotā veidā 1 – reaktora aktīvā zona, 2- avota kasete, 3 – avots, 4 – tērauda sietiņš, 5 – Cu blīvējums, 6 – reaktora galva, 7, 8 – gāzu apmaiņas kapilāri, 9, 10 – kapilārus noslēdzošie vārsti.

Reaktora noslēgšana



Att.1.13 Reaktora pilnīga noslēgšana A – nenoslēgts reaktors; B – pilnīgi noslēgts reaktors 1 – skrūves, 2 – blīvējuma paplākšņi, 3 – reaktora apakšējais atloks, 4 – bultskrūves, 5 – reaktora augšējais atloks, 6 – distanceri, 7 – centra balsts, 8 – centrs

Atsevišķā tritija iegūšanas kamera



Att. 1.14. Iekārta tritija termiskai difundēšanai no tritija avota, atsevišķi no reaktora 1 - tērauda caurulīte, 2 - tritija avots), 3, 4 - noslēdzošie vārsti

Eksperimenta norise

Eksperiments izmantojot integrēto tritija avota kameru

Reaktora sagatavošana un savienošana (skat. 1.12. att.)

Visu iekārtu ievieto hermētiskā, vakumētā un dearētā boksā, Ar atmosfērā. Noteiktu litija iesvaru ievieto reaktora aktīvā zonā (1). Avota kasetē (2) ievieto vienu vai vairākas tritiētas lodītes (3), un pašu kaseti ievieto reaktorā (1). Reaktoru savieno ar reaktora galvu (6), kur starp reaktora aktīvo zonu (1) un reaktora galvu (6) ir metāla blīvējums (5). Pie reaktora aktīvās zonas ir divi gāzu apmaiņas pievadi (7), (8), kurus noslēdz noslēdzošie vārsti (9) un (10).

Reaktora saslēgšana (skat. 1.13. att.)

Savienoto reaktoru (skat. 1.12. att. C) noslēdz ar noslēdzošajiem atlokiem (3) un (5). Atloki tiek saskrūvēti ar četrām nerūsējošā tērauda bultskrūvēm (1) un (4). Noslēdzošā atloka (5) centru (8), kas ir pievienots centra balstam (7), pievieno jebkurai rotācijas iekārtai (maisītājam).

Reakcijas norise

Reaktoru (skat. 1.13. att. B) ievieto mufeļkrāsnī un veic karsēšanu izvēlētās temperatūrās. Šajā laikā reaktora telpā noris divi paralēlie procesi - tritija difundēšana no tritiētām lodītēm un tritija sorbēšanās (reakcija) ar šķidro litiju. Pēc reakcijas beigām reaktoru izņem no mufeļkrāsns un ļauj tam atdzist.

Nosaka neizreaģējošā (neabsorbētā) tritija daudzumu. Pieslēdz reaktora pievada vārstam (9) (skat. 1.12. att.) tritija detektoru, bet vārstam (10) nesējgāzes pievadu. Atver abus vārstus. Caur vārstu (10) konstantā plūsmā laiž nesējgāzi, (skat. 1.12. att.) izspiež abas gāzes uz tritija detektoru. Hermētiskajā boksā, izjauc reaktoru un izņem tritiēto lodīšu kaseti. Atkārtoti saslēdz reaktoru, kā rakstīts iepriekš.

Veic tritija desorbciju un caur vārstu (10) izskalo reaktora telpu ar nesējgāzi un reaktoru ievieto atpakaļ mufeļkrāsnī, karsē temperatūrā (~700 - 750 ^{0}C). Pēc noteikta izkarsēšanas laika atkārtoti veic tritija izpūšanu uz tritija detektoru.

Eksperiments izmantojot atsevišķo tritija avota kameru

Tritija izdalīšana (skat. 1.14. att.)

Eksperimenta būtība ir tāda pati kā iepriekš, taču atšķirība ir tā, ka tritijs tiek difundēts no tritija avota atsevišķā iekārtā, atsevišķi no reaktora. Savas vienkāršās uzbūves dēļ, tas dod iespēju izkarsēt lodīti daudz augstākās temperatūrās (1000 + ${}^{0}C$), nekā to tehniski atļauj pats reaktors. Tritija avotu (2) ievieto nerūsējošā tērauda "U" veida caurulītē (1), kur abos galos tā tiek noslēgta ar noslēdzošajiem vārstiem (3) un (4). Caurulītes "U" veida gals līdz pusei tiek ievietota mufeļkrāsnī un karsēta ap 1000 ${}^{0}C$, kur šajā laikā no tritija avota efektīvāk un ātrāk difundē tritijs.

Reaktora sagatavošana un savienošana (skat. 1.12. att.)

Reaktoru sagatavo precīzi kā aprakstīts iepriekš, izņemot posmu par tritija avota kaseti.

Reaktora saslēgšana (skat. 1.13. att.)

Reaktoru saslēdz precīzi kā aprakstīts iepriekš.

Tritija ievadīšana reaktora tilpumā

Pēc reaktora saslēgšanas, reaktora vienu vārstu pieslēdz vakumsūknim, reaktora zonu vakuumē. Reaktora vienu no vārstiem (skat. 1.12. att.) ar pievadu savieno kopā ar vienu no tritija kameras vārstiem (skat. 1.14. att.). Pievada otrajam (brīvajam) vārstam pieslēdz nesējgāzes balonu, un atver attiecīgo vārstu, panākot nesējgāzes ieplūšanu "U" veida caurulītē un spiediena pieaugumu tajā. Atver reaktora vārstu un "U" caurulītes otro vārstu. Notiek visu gāzu iesūkšana reaktora telpā.

Sorbcijas-desorbcijas norise ir analoģiska (*neveic posmu ar tritija avota izņemšanu*). Veic karsēšanu līdz 700 – 780.

Tritija sorbcijas-desorbcijas sistēma II Paraugu sagatavošana eksperimentam



1. Litija ielādēšana reaktorā un kopējās iekārtas saslēgšana

Att. 1.15 Li ielādēšana un iekārtas saslēgšana

 Vakuumboksā ievieto nepieciešamos instrumentus, kas nepieciešams sistēmas (skat. 1.15. att.) saslēgšanai:

- 2 x 13 mm bultskrūvju atslēgas savienojuma (sav 4) saslēgšanai
- Sorbcijas iekārtu izjauktā stāvoklī (krāni (k1), (k2) un (k3) ir atvērtā stāvoklī)
- Nepieciešamo litija daudzumu
- Visu nepieciešamo Li nomazgāšanai no eļļas (lupatas, spirts, petroleja, papīrs)
- Skalpeli un āmuru Li sagriešanai
- Vārglāze, 50 mL
- Svari

- Noslēdz vakuumboksu un izveido inertu (Ar) atmosfēru. Tas sevī iekļauj, vakuumēšanu un piepildīšanu ar argonu (1 – 3 reizes) un kontroli.
- Nomazgāto, nosvērto Li gabaliņu ievieto reaktora telpā (skat. 1.1. att.).
- Saslēdz iekārtu (sav 4).
- Noslēdz krānus (k1), (k2) un (k3).
- Iekārta ir sagatavota izņemšanai no vakuumboksa un turpmākajām manipulācijām.



Tritija avota pieslēgšana un vakuuma izveidošana kopējā sistēmā

Att. 1.16.. Tritija avota pieslēgšana un vakuuma izveidošana kopējā sistēmā

- Tritija avotu ievieto kvarca ampulā un pievieno trīskanālu savienojumam (trij 1), kas savukārt pievienots pie kopējās sistēmas savienojuma (sav 2).
- Vakuumē tritija avota ampulu. Pie savienojuma (sav 6) pievieno vakuumsūkni uz izsūknē atmosfēras gāzes no tritija avota ampulas, saslēdzošajiem lokanajiem un cietajiem pievadiem un trīskanālu savienojuma (trij 1).

- Pēc gāzu atsūkšanas ar žņaugu noslēdz lokano savienojumu (sav 6), izvairoties no atmosfēras gāzu iekļūšanas vakuumētajā ampulā. Izslēdz un atvieno vakuumsūkni.
- Uz savienojuma (sav 5) pievieno nelielu lokanā pievada gabalu. Ar žņaugu noslēdz savienojumu (sav 5).
- 5. Pie savienojuma (sav 3) pievieno vakuumsūkni.
- 6. Lēnām atver krānus (k1) un (k2), notiek argona spiediena izlīdzināšanās.
- Ieslēdz vakuumsūkni un lēnām atver pēdējo krānu (k3). Tiek izsūknētas visas gāzes, kas ir visā sistēmas tilpumā.
- Pēc gāzu izsūknēšanas (vakuummetra rādījumi) noslēdz krānus (k1) un (k3). Krāns (k2) paliek atvērtā stāvoklī.
- 9. Izslēdz un atvieno vakuumsūkni no savienojuma (sav 3).
- 10. Sistēma ir sagatavota litija reaktora un tritija ampulas vienlaicīgai karsēšanai.
- 11. Vienlaicīgi pie dažādu temperatūru gradientu programmām, divās cauruļkrāsnīs tiek karsēti iekārtas (skat. 2. att.) abi gali, tas ir, tritija avota ampula un reaktors, kas satur Li. Procesu veic darba boksā. Tritija avota ampulas karsēšanas laikā (1000 °C) desorbētais tritijs sorbējas litijā, kas ir šķidrā stāvoklī (200 °C). Pēc noteikta laika (3 h), kad tritija ģenerēšanās vairs nenotiek, procesu pārtrauc. Abas krāsnis lēnām atdzesē līdz istabas temperatūrai.
- 12. Atvieno trīskanālu savienojumu (trij 1) un tritija avota ampulu no (sav 2)
- 13. Iekārta ir sagatavota tritija skalošanai un detektēšanai.



Att.1.17.. Tritija izpūšana no reaktora tilpuma

- 1. Rotametri (rot 1) un (rot 2) ir noregulēti uz nepieciešamajiem plūsmas ātrumiem.
- 2. Uzliek žņaugu uz starp trīskanālu savienojuma (trij 1) un savienojuma (sav 5).
- 3. Veic lokano pievadu skalošanu no nesorbēdā tritija. Skalošanu veic līdz aktivitāte (Cps) normalizējas (paliek konstanta).
- 4. Pēc aktivitātes normalizēšanās pārliek žņaugu starp trīskanālu savienojumiem (trij 1) un (trij 2).
- 5. Lēnām atver krānus (k1) un (k2). Nesējgāze cirkulē caur reaktora tilpumu, izspiežot tritiju uz skalotni, no tās uz detektoru. Analoģiski kā iepriekš, veic nesorbētā tritija skalošanu no reaktora telpas līdz konstantai aktivitātei (Cps).
- 6. Pēc izskalošanas noslēdz krānus (k1) un (k2).
- 7. Reaktors (Li) ir gatavs termiskās desorbcijas procedūrai.
- 8. Nepārtraucot skalošanas gāzes plūsmu pakāpeniski sāk karsēt reaktoru līdz LiT sadalīšanās temperatūrai (690 ⁰C). Karsēšanas laikā būtiski pieaug aktivitāte (Cps).
- 9. Skalošanu pārtrauc līdz aktivitāte ir samazinājusies līdz fona līmenim un saglabājas konstanta.

- 10. . Lēnām samazina temperatūru līdz istabas temperatūrai, nepārtraucot skalošanu un aktivitātes detektēšanu.
- 11. Aizver krānus (k1) un (k2).
- 12. Iekārta gatava demontāžai un tīrīšanai.



Att. 1.18. Temperatūras kontrole tritija ģenerēšanas un tritija sorbcijas-desorbcijas kamerā ar litiju



Att. 1.19. Vakumēšanas sistēma, tritija monitors, datu pieraksta sistēma, skaitīšanas (P10, argometāns (10 % metāns) un nesējgāzes (He+0.1.% H₂) baloni.1 – vakuumetrs, 2 – vakuumsūknis, 3 – H³ detektors, 4 – skaitīšanas gāze un nesējgāze



Att.1.20. Darba bokss, tritija avota karsēšanas krāsns, litija karsēšanas krāsns, sorbcijas – desorbcijas iekārta un pievadu komunikācijas 1 – darba bokss, 2 – tritija avota mufeļkrāsns, 3 – litija mufeļkrāsns



Att.1.21. Tritija sorbcijas-desorbcijas sistēmas, tritija monitora un datu pieraksta kopskats


At. 1.22. Nesaistītā tritija izpūšana no nerūsējošā tērauda reaktora ar 0,2 gramiem litija. Kopā izpūsti 3,52 MBq nesaistītā tritija.



Att.1.23. Tritija izdalīšanās no nerūsējošā tērauda reaktora ar 0,2 gramiem litija temperatūras programmētās desorbcijas procesā. Summārais izdalītā tritija

daudzums aprēķināts pēc sākuma fona 6,01 cps. Summārā izdalītā tritija daudzuma beigu vērtība: 4,2 MBq.



Att.1.24. Tritija izdalīšanās no nerūsējošā tērauda reaktora ar 0,2 gramiem litija temperatūras programmētās desorbcijas procesā.
 Summārais izdalītā tritija daudzums aprēķināts pēc beigu fona 41,9 cps. Summārā izdalītā tritija daudzuma beigu vērtība: 3,2 MBq.

_Vielas radioaktivitātes aprēķini

Vispārīgi vielas kopējo radioaktivitāti var izteikt ar divām sekojošām vienādībām, vielas pussabrukšanas periodu (1) un kopējās radioaktivitātes saistību ar vielas sabrukšanas ātruma konstanti (2).

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1)$$
$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N (2)$$

kur $t_{1/2} - vielas sabrukšanas pusperiods, s;$ $\lambda - vielas sabrukšanas ātruma konstante, s⁻¹;$ A - vielas kopējā radioaktivitāte, Bq/s; $-\frac{dN}{dt} - sabrukšanas momentānais ātrums, s⁻¹;$ N - kopējais daļiņu skaits vielā; Apvienojot vienādības (1) un (2) iegūst sekojošo vienādību (3).

$$A = \frac{m}{M_A} N_A \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$
 (3)

kur A-vielas radioaktivitāte, Bq/s; m – vielas masa, g; M_{A} – vielas molmasa, g/mol; N_A – Avogadro skaitlis [6,02×10²³ mol⁻¹]; $t_{1/2}$ – vielas sabrukšanas pusperiods, s;

Tritija gadījumā, vienādojums (3) var tikt transformēts pielietojot gāzu sistēmām atbilstošas konstantes un parametrus, iegūstot atbilstošo vienādojumu (5).

$$\frac{m}{M_{A}} = n = \frac{V}{V_{0}} \quad (4)$$
$$A = \frac{V}{V_{0}} N_{A} \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (5)$$

kur

A-vielas radioaktivitāte, Bq/s; V – vielas tilpums, L; V_0 – molārais tilpums, [22,4 L/mol], ; N_A – Avogadro skaitlis [6,02×10²³ mol⁻¹]; $t_{1/2}$ – vielas sabrukšanas pusperiods, s;

Eksperimentālo datu matemātiskā apstrāde



nesaistītā tritija izpūšana no auksta termisko desorbciju. reaktora.

Att.1.25. Neadsorbētā un ķīmiski Att.1.26. Tritija atgūšana no Li veicot

Pūšot tritiju no auksta reaktora (skat.1.25. att.) ir redzams, ka samērā liels tritija daudzums (3,52 Mbq jeb 35%) ir nesorbējies un arī ķīmiski nesaistījies ar litiju pat pēc divu stundu karsēšanas pie 220 ⁰C, kurā litijs ir šķidrā stāvoklī.

Pūšot tritiju termiskās desorbcijas procesā (skat.1.26. att.) ir redzams, ka tritija izdalīšanās ātrums strauji pieaug palielinoties karsēšanas temperatūrai. Fakts parāda labu tritija izdalīšanas tendenci atkarībā no temperatūras. Maksimālais tritija izdalīšanās ātrums sasniedz pat 2,08 kB/s, kas ir aptuveni tāds pats (2,04 kB/s) kā pūšot tritiju no auksta reaktora (skat. 5. 1. att.). Kopējais izdalītais tritija daudzums termiskās desorbcijas procesā ir 4.20 MBq jeb 42% (skat. 1.26. att.).

Kopējais izdalītais tritija daudzums ieskaitot nesorbēto un termiski desorbēto tritiju sastāda 7.72 MBq. Sākotnēji injicētais daudzums sastādīja 10 MBq, tas nozīmē, ka samērā liels tritija daudzums (2.28 MBq jeb 23%) joprojām paliek neizdalīta no litija. Fakts norāda, ka viena pati termiskā desorbcija nav pietiekoši efektīva tritija atdalīšanai no litija. Un šī termiskās destilācijas metode būtu jālieto kombinēti kopā ar citām atgūšanas metodēm. Minimāls litija daudzums tika konstatēts arī aukstajā slazdā, kas liecina, ka litija tvaiki var tikt pārnesti caur sistēmu neskatoties uz to, ka litijam ir samērā zems tvaika spiediens. Litija tvaiki netika konstatēti sistēmā pēc aukstā slazda, kas norāda uz to, ka litija tvaiki viegli kondensējas uz aukstām virsmām.

Ir redzams (skat.1.25. att.), ka detektētā tritija aktivitāte, kas nav saistījusies ar litiju ir 3,55 Mbq. Zinot kopējo iegūto tritija aktivitāti un pussabrukšanas periodu (12,32 gadi), izmantojot vienādību (5) aprēķina izpūstā tritija tilpumu (V).

1 gads = 31556926 sekundes

$$A = \frac{V}{V_0} N_A \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \Longrightarrow V = \frac{A \cdot V_0 \cdot t_{1/2}}{N_A \cdot \ln 2} = \frac{3,55 \times 10^6 \cdot 22,4 \cdot 388781328,3}{6,02 \times 10^{23} \cdot \ln 2} = 7,4 \times 10^{-8} L = 74 \text{ nL}$$

Analoģiski veic tilpuma aprēķinu termiskajā desorbcijā atgūtajam tritijam, kur tā atgūtā aktivitāte ir 4.20 mBq (skat. 2. att.).

$$V = \frac{A \cdot V_0 \cdot t_{1/2}}{N_A \cdot \ln 2} = \frac{4,20 \times 10^6 \cdot 22,4 \cdot 388781328,3}{6,02 \times 10^{23} \cdot \ln 2} = 8,8 \times 10^{-8} L = \frac{88 \text{ nL}}{2}$$

Zināms, ka litijs aktīvi reaģē ar ūdeņradi veidojot stabilu hidrīdu ar augstu kušanas temperatūru, reakcija ir stipri eksotermiska un noris saskaņā ar reakcijas vienādojumu (6).

$$Li(s) + \frac{1}{2}H_2(g) - > LiH(s)$$
 $\Delta H_{25^0C} = -21,61\frac{kcal}{mol}$ (6)

Saskaņā ar reakciju (6), visam tritijam būtu bijis ķīmiski jānoreaģē ar litiju jau pie standartapstākļiem (25 ⁰C). Taču no aprēķiniem redzams, ka operējamie tritija tilpumi ir nano līmenī (74 un 88 nL), tas nozīmē, ka efektīvai tritija sorbcijai nepieciešami maksimāli samazināt visus brīvos un liekos tilpumus. Tas ir, jāizmanto maksimāli minimāls reaktora tilpums, ar maksimāli lielu saskarsmes laukumu un pēc iespējas īsākiem reaktora pievadiem – izvadiem. Taču šāda tehniskā minituarizācija apgrūtinās citas palīgoperācijas un radīs citas problēmas, piemēram, litija tvaiku iekļūšana sistēmas kapilāros un kapilāra kanāla nosprostošanu. Palielinot operējamo tritija daudzumu (tilpumu), tiks pārsniegta tritija monitora detektēšanas robeža, kas noved pie eksperimenta pārtraukšanu pusceļā.

Secinājumi

1. Saskaņā ar projekta uzdevumu un laika grafiku pētījumi Aktivitātes Nr. 1

"Ūdeņraža izotopu detektēšana šķidrā litijā kā divertora aizsargmateriālā" ietvarā ir izpildīti, izplānotas un konstruētas sistēmas triitja sorbcijas-desorbcijas pētijumiem šķidrā litijā, novērtēta tritija sorbcija-desorbcija

2. Sagatavota publikācija, saņemts apstiprinājums par publicēšanu,

3. nolasīts referāts.

Raksti

1. 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.. Регион

распространения: Россия, СНГ, зарубежные страны. Язык: русский английский

2. Saņemts apstiprinājums par raksta

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. "Experimental setup for analysis of sorption and desorption of tritium in liquid lithium under different external conditions" publicēšanu žurnālā IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

3. Nolasīts referāts A. Lescinskis, G.Kizane, Br. Lescinskis, K. Kravalis, A. Romancuks, A. Zik "Analysis of sorption and desorption of tritium in liquid lithium under different external conditions," 14-15 October 2013, AEUL-Association EURATOM-University of Latvia workshop "Behaviour of tritium in divertor materials".

2. Aktivitāte Nr 2. "Mijiedarbības procesu izpēte uz litija un nerūsējoša tērauda SS316L kontaktvirsmas atkarībā no tehnoloģiskiem parametriem"

Mūsdienu kodolsintēzes iekārtu projektos liela uzmanība tiek pievērsta ar plazmu kontaktējošo divertora materiālu meklēšanai. Litijs ir viens no vadošajiem kandidātiem, bet tā izmantošana saistīta ar šķidra superplāna (0.1 - 0.4 mm) Li slāņa plūsmas iegūšanu, ko pat laboratorijas apstākļos eksperimentu veikšanai ir grūti izdarīt. Viena no galvenajām problēmām ir pilnas litija slapināšanas ar tērauda pamatni iegūšana.

Kā viens no svarīgākajiem faktoriem plānas litija plēves kustībai uz slīpas nerūsējošā tērauda plāksnes ir laba matricas virsmas slapināšanas nodrošināšana.

Kā to izdarīt?

Slapināšanas procesi uz Li – nerūsējošā tērauda (316, 316L) vienmēr bija uzmanības centrā, neskatoties uz to, ka ir uzkrāta liela teorētiskā un eksperimentālā pieredze. Jāņem vērā, ka slapināšanas process ir ļoti sarežģīts un atkarīgs no daudziem faktoriem. Svarīgākie no tiem ir:

- kontaktējošo materiālu atomu uzbūve;
- iespēja mijiedarbībai pēc fāžu diagrammas;
- cietas vielas tīrība;
- temperatūra;
- piemaisījumi šķidrā metālā un cietā vielā;
- vide utt.

Divertora projektā izskatītie materiāli (tērauds SS316L un litijs) līdz šim pie nosacīti zemām temperatūrām (300 – 350C) nebija pētīti atkarībā no slapināšanas tehnoloģiskiem parametriem. Tāpēc, lai nodrošinātu projektā uzstādītās prasības (teicama slapināšana, teicama litija plūstamība), tiek izstrādāta jauna uzlabota litija slapināšanas tehnoloģija. Tā ietver:

- tērauda virsmas attīrīšanas procesu izpēti, kontrolējot to ar analītiskām, optiskām un mikromehāniskām metodēm;
- piemērotu kušņu noteikšanu;
- attiecīgu temperatūras un hidrodinamisko režīmu piemērošanu;

precīzu slapināšanas leņķa noteikšanu, izmantojot SEM un AFM metodes.

Kvalitatīvai tērauda virsmas slapināšanas pārbaudei bija jāizstrādā un jāizgatavo vairākas eksperimentālās ierīces un stendi. Kā augstāk minēts, darba uzdevums bija izpētīt slapināšanas procesus atkarībā no daudziem parametriem, no kuriem galvenie: virsmas tīrības un slapināšanas temperatūra, un dod rekomendācijas par optimāliem parametriem litija plūsmai uz slīpas virsmas gravitācijas spēka ietekmē ārpus magnētiskā laukā.

Uzdevumi:

- 1. Literatūras pārskats par Li īpašībām un slapināšanas efektiem.
- 2. Tērauda SS316L struktūras un īpašības pētījumi
- 3. Li un tērauda virsmas tīrības ietekme uz slapināšanas procesiem.
- 4. Temperatūras ietekme uz SS316L virsmas slapināšanu ar Li.
- 5. Ar mikrostruktūras metodēm izpētīt litija slapināšanas iespējas pie 350⁰C speciāli konstruētā vakuuma kamerā, kur litija virsmai jābūt absolūti tīrai.
- 6. Optimālo parametru noteikšana Li slapināšanai un plūsmai.

Eksperimentālā iekārta un metodes.

Lai veiktu eksperimentus ar tīru šķidrā litija brīvo virsmu, LU Fizikas institūtā bija izstrādātas un izgatavotas dažādas iekārtas. Pēdējā varianta kopskats un modernizētas iekārtas shēma ir redzami att.2.1., a, b. Speciāli izgatavotā, attīrīta un pie 500⁰C iepriekš karsēta, vakuuma iekārta ļauj iegūt vienmērīgu tīra litija slāņa plūsmu pa tērauda SS316L pamatnes slīpo virsmu. Iekārta ļauj veikt eksperimentus pie dažādām temperatūrām – līdz 500 °C, un optiski fiksēt eksperimenta norisi. Temperatūra, spiediens kamerā, Li plūsmas padeve un parauga leņķis ir automātiski regulējumi.



Att.2.1. Vakuuma iekārtas (a) un shēma eksperimenta novadīšanai (b)

1 – paraugs; 2 – vakuuma kamera; 3 – trauks ar litiju (Li); 4 – parauga trauks; 5 – ksilola slēdzis; 6 – piltuve;7 – aukstā kamera ar šķidru slāpekli (N2); 8 – difūzijas vakuumsūknis; 9 – mehāniskais vakuumsūknis; 10 – balons ar argonu (Ar); 11 – līmeņrādis; 12 – tvertne ar litiju (Li); 13 – sildelements; P – vakuummetrs; T – termopāris; V1...V8 – ventiļi.

Tērauda struktūra, slapināšanas novērtēšana gan pēc mikrostruktūras, gan pēc slapināšanas leņķa (θ) bija veikti izmantojot mikrostruktūras analīzi atoma spēka ASM (VEECO) un optiskā Nikon Eclipse L150 mikroskopos. Lai paraugus aizsargātu pret oksidēšanos, tie bija pārklāti ar plānu vakuuma eļļas slāni.

Literatūras pārskats par Li īpašībām un slapināšanas efektiem. Tērauda SS316L struktūras un īpašības pētījumi

Li ir tipisks metāls ar valences konfigurācijas 2s. Tas ir vieglākais metāls, blīvums 0.5316 g / cm³, kušanas temperatūra ir 180,54 ° C, tajā pašā laikā, vārīšanās temperatūra normālā spiedienā ir ļoti augsta - 1343 ° C. Litijam piemīt ļoti augsts virsmas spraigums pie kušanas temperatūras ($\sigma = 406 \text{ mN} / \text{m}$) salīdzinot, piemēram, ar nātrija ($\sigma = 200 \text{ mN} / \text{m}$) bet kapilāros Li ir liels spiediens $Pc = 2 \sigma (T) \cos \theta / R_{ef}$, kur θ -slapināšanas leņķis , R_{ef} - poras efektīvais rādiuss.

Li viegli oksidējas $(-\Delta Z = 696, 6 \cdot 10^{-6} \text{ J/kmol})$, veidojot Li₂O oksīdu, kam ir liels blīvums 2,16g/cm³. Tas nozīmē, ka tīrs šķidrs Li var reaģēt ar oksidēto tērauda virsmu, jo viegli var atņemt skābekli un izveidotie Li oksīdi var no virsmas iegrimt tērauda masā. No otras puses, oksidētai šķidra Li virsmai ir ļoti zemā iespēja slapināt

tērauda virsmu. Tie dati ir ļoti svarīgi strādājot ar tekošo šķidro Li pa oksidēto tērauda virsmu. SS 316L ir austenīta struktūras Cr-Ni tērauds. Tam ir ļoti liela korozijas pretestība un no nerūsējoša tērauda 316 atšķiras galvenokārt ar pazemināto oglekļa saturu. Tēraudam ir sekojošs sastāvs Cr-17,2%, Ni-10,9%, Mo-2,1%, Mn-1,6%, C-0,03%, Fe –bāze.

Kā redzams, tēraudam 316L ir liels Ni saturs, kas savukārt ļoti labi reaģē ar Li. Šis faktors spēle pozitīvu lomu slapināšanai, bet galvenokārt pie nelielās temperatūras. No otras puses, no literatūras datiem ir zināms, ka tērauda komponentu šķīdība litijā pieaug ar temperatūru pēc likuma $\ln x = a - b/T$, kur x- metāla šķīdības molārā daļa.

Tērauda virsma tika slīpēta un attīrīta no taukiem pirms eksperimenta novadīšanas. Tērauda mehāniskas īpašības un struktūra tika analizēti un tie atbilda austenītam pēc atkvēlināšanas



Att.2.2. ASM tērauda SS316L virsmas 2D (a)-40x40µm, 3D attēli (b) un virsmas reljefs (c).

Kā redzams no Att.2.2., atoma spēka mikroskopā (ASM) tērauda virsma ir nelīdzena, kas saistīts ar mehānisko slīpēšanu. Graudu izmērs ir 5-10µm, redzama tipiska austenīta struktūra.

Slapināšanas eksperimenti ar netīro Li virsmu pie dažādas temperatūras.

Kā parādīja pirmie slapināšanas rezultāti, pārklāta ar oksīdiem Li šķidra virsma neslapina tēraudu pie zemām temperatūrām, leņķis ir $\approx 90^{\circ}$, att.2.3., jo no termodinamikas nav nekādas iespējas mijiedarbībai uz kontakta robežvirsmām.



Att.2.3. a - netīra Li piliens uz tērauda virsmas x2,5, **b** - mikrostruktūra optiskajā mikroskopā (Nikon Eclipse L150) pēc slapināšanas ar Li pie 300⁰C.

Ar temperatūras paaugstināšanu slapināšana uzlabojas. Kā redzam, pēc 450° C (Att.2.4.) notiek Li ar oksidēto virsmu slapināšanas process, un pie 500° C šis process iet pilnā mērā. Li –slānis bija diezgan biezs. Optiskajā mikroskopā bez kodināšanas redzama tērauda graudaina struktūra, graudu robežas ir ļoti platas, att.2.3, b. Tas liecina par to, ka pie 300° C - 450° C mijiedarbība starp Li un tēraudu notiek pa graudu robežām, bet Li slānis neturas, slapināšanas nav.



 $T^{0}_{,0}$ C Att.2.4. Li (oksidēta virsma) slapināšanas leņķis (θ ,grad) tērauda (SS316L) virsmas mikrostruktūra atkarībā no slapināšanas temperatūras.

Optiskajā mikroskopā pie T< 300° C Li slānis neturas , slapināšanas nav, bez kodināšanas pie 300° C - 450° C redzama tērauda graudaina struktūra, graudu robežas ir ļoti platas. Tas liecina par to, ka mijiedarbība starp Li un tēraudu notiek pa graudu robežām,

Rezultāti parādīja, ka tērauda oksīds sekmē slapināšanu, savukārt Li₂O nemijiedarbojas ar tēraudu un ir šķērslis slapināšanai. Slapināšana ar netīro Li virsmu tiek stimulēta ar temperatūras palīdzību, sākot jau no 450^{0} C. Bet no otras puses tas var izraisīt citu Li izplūšanas kinētiku, jo notiek tērauda virsmas struktūras un īpašību izmaiņas. Tas var pasliktināt arī slapināšanas procesus kā arī izsaukt Li tvaiku spiediena palielināšanu, kas nav vēlams.

Slapināšanas eksperimenti ar tīro Li virsmu pie 500[°]C

Rezultāti ar tīro šķidra Li virsmu pie 500[°]C parādīja, ka lielu lomu pie 500[°]C spēlē Li tvaiki. Tērauda virsma, pirmkārt, kodinās ar litija tvaikiem, process iet ar ķīmisko mijiedarbību, jo bez Li slāņa tērauda virsmai jau bija redzamas graudu robežas elementi, att.2.5. Šis process nosaka arī pirmo adhēzijas stadiju, kad virsma pārklājās ar šķidro litiju. Tuvu pie pārejas zonas tērauds/Li veidojas plāns Li slānis.



Att.2.5. Tērauds/ litijs pārejas zona un Li slāņa struktūra. (T=500^oC).

Plānā pārklājumā, att. 2.6, nevar precīzi nomērīt Li graudu izmēru (d<1 μ m), jo Li ļoti ātri atdziest. Tas apgrūtina kristālu veidošanos, jo parametrs ΔT ir liels. Var arī veidoties amorfa veida Li slānis. Litija mikrostruktūra biezākā pārklājumā (h > 1-2 μ m) ir redzama att.2.5, garudu izmērs ir d=1,5-3 μ m.



Att.2.6. Ar litiju saslapināta tērauda virsma 500C temperatūrā.

Struktūrā arī eksistē melnās fāzes, kas liecina par slikto vakuumu kamērā, jo pie augstas temperatūras Li ir lielāka iespēja reaģēt ar piemaisījumiem un atmosfēru. Li iztvaikošanas dēļ, tokomaka tehnoloģiskas prasības ir saistās ar Li plūsmu pie zemākas temperatūras. Šajā sakarā svarīgi bija iegūt tīra litija slapināšanas iespējas pie 350°C. Iekārtaa tika modernizēta ar iespēju turpināt eksperimentus pie 350°C dziļā vakuumā (10⁻⁵ mbari).

Slapināšanas eksperimenti ar tīro Li virsmu pie 350°C dziļā vakuumā

Pirmie eksperimenti tika veikti pie tādas ģeometrijas, kad Li plūsma izplatās pa gandrīz vertikālu tērauda plakni. Varētu domāt, ka Li virsma būs ļoti tīra un slapināšanas process notiks ātri. Bet plūsmu var ietekmēt dažādi faktori: piemēram, Li virsma var saturēt daudz netīrumu, kuri noskaloti no pievadcaurulēm pa kurām tiek organizēta Li plūsma. Rezultātā redzam, ka lielāka daļa Li pārklājuma slapina tērauda virsmu loti labi, slāņa biezums ir liels, att. 2.7.,



Att. 2.7. Austenīta tērauda plakne slapināta ar Li pie temeratūras 350C

un izejošā graudainā austenīta tērauda struktūra nav novērojama, att.2.8a. Tomēr neskatoties uz to vietām ir redzamas Li oksīdu pēdas ,att. 2.8b.(b).





Att.2. 8a,b, Li bieza pārklājuma mikrostruktūra, (a,b) iegūta pēc plūsmas, kas izplatās pa vertikālo plakni, pie 350 ⁰C.





Att. 2. 9. Li plāna slāņa mikrostruktūra

Att. 2.9. ir redzama Li slapināšanas slāņa mikrostruktūra optiskajā mikroskopā (Eclipse , Nikon). Litijam ir sava smalka struktūra ar graudu izmēru d \approx 1-3 µm, tērauda austenīta struktūra nav redzama, bet ir redzamas atsevišķas svītras, pēdas pēc plaknes mehāniskās apstrādes. Tas liecina, ka litija slānis nav pārāk biezs, aptuveni h \approx 100 µm.

Secinājumi

Veikto eksperimentu sērija paradījs, ka var nodrošināt pietiekami labu austenīta tērauda plaknes slapināšanu ar litiju pie nosacīti zemas temperatūras (350 C) pie nosacījuma, ka abu komponentu virsmas ir tīras un vakuums kamerā ir 5 x 10 – 5 x 10

m bari. Dažādu netīrumu,kā arī Li₂O klatbūtne kamerā jau ir šķērslis slapināšanai. Šajā gadījumā slapināšanu var uzlabot paaugstinot temperatūru 400-500⁰C robežās, kas divertora apstākļos nav vēlams, jo kā parādīja eksperimenti, sākas intensīva litija iztvaikošana. Optimālos pstākļos Li tīra virsma slapina oksidēto tēraudu jau pie 350^oC un iespējams var izplatīties pa slīpo plakni gravitācijas spēka ietekmē..

Raksti:

- Platacis, F.Muktepavela, A.Shishko, A. Sobolev, A. Klyukin, A.Zik Microstructural analysis of SS316L steel wetting in lithium flow. Part I. *Magnetohydrodynamics*, v. 48 (2012), No. 4, pp. 503–511
- 2.A.Shishko, F.Muktepavela, A.Kļukins, E.Platacis, A Sobolevs. The effect of divertora poloidal magnetic field on the liquid metal thin film flow. *Magnetohydrodynamics*,(2013) (in press, accepted for publication)
- 3.A.Šiško,F.Muktepāvela, A.Kļukins, Ē.Platacis, A.Soboļevs Divertora poloidāla magnētiskā lauka ietekme uz šķidra metāla tecēšanu. . (2013),. LU CFI,
 29thScientific Conf. February 20-22 . Abstract p.62

Konferences:

A.Šiško,F.Muktepāvela, A.Kļukins, Ē.Platacis, A.Soboļevs Divertora poloidāla magnētiskā lauka ietekme uz šķidra metāla tecēšanu. LU CFI, 29thScientific Conf. February 20-22 . Rīga, 2013. Abstract p.62

F. Mukt<u>epavela</u>, R. Zabels, V. Sursajeva, L. Grigorjeva, K.Kundzins. Adhesion processes on interfaces and grain boundaries during sintering of ZnO powders with different morphology.XIV Intern. Conf. Intergranular and Interphase Boundaries in Materials. Iib2013. 23-28 June 2013, Halkidiki Greece. Book of Abstracts, p.183.

3. Aktivitāte Nr. 3. Optimālo parametru noteikšana litija plūsmai uz slīpas profilētas virsmas gravitācijas spēka ietekmē ārpus magnētiskā lauka

Praktiski Aktivitātes Nr. 2 pētījumu rezultātā tika atrisināta loti būtiska problēma – nerūsējošā tērauda un šķidra litija kontaktvirsmu slapināšana un izstrādāta tehnoloģija praktiskai pielietošanai. Tas ir loti svarīgi tālākajai izpētes darbu virzībai, jo kā parādīja iepriekš veiktie eksperimenti, plānu litija plūsmu uz slīpas plaknes gravitācijas spēku ietekmē var organizēt tikai pie labas kontaktvirsmu slapināšanas.

Plēves mazais biezums (ideāli līdz 100 µm) aizkavē tās sabrukšanu, kad uz to iedarbojas lielas impulsveida elektromagnētiskās un termiskās slodzes. No tā izriet vajadzība pētīt plānu litija plēvju absorbcijas - desorbcijas īpašības attiecībā pret deiteriju un tritiju atkarībā no tā koncentrācijas un temperatūras. Tāda analīze ļaus novērtēt laiku, kādā plēve varēs efektīvi noturēt uz to krītošās daļiņas un formulēt prasības attiecībā pret litija plēves tecēšanas ātrumu.

Pirms litija eksperimentu uzsākšanas tika veikta rinda priekšdarbu un eksperimentu. Pirmkārt bija jāatrisina kā padot definētu litija daudzumu (caurplūdi) uz slīpo tērauda plakni. Bet tā kā litija plūsmas biezums uz tērauda plaknes ir atkarīgs no tā caurplūdes, plūsmas padeves ātrumam jābūt regulējamam. Šī problēma tika atrisināta izstrādājot šim nolūkam speciālu plūsmas dozātoru ar regulējamu elektropiedziņu, att. 3.1.



Att. 3.1. Dozātora principiālā shēma.

Dozātors bija jānokalibrē, t.i. jānosaka plūsmas biezums uz tērauda plaknes atkarībā no silfona kustības ātruma dozātorā.Ir zināms, ka spirts labi slapina tīru tērauda virsmu. Paralēli dozātora kalibrēšanai tika pētīta arī spirta plūsma un tās biezums uz tērauda plaknes. Novērojumi rādīja, ka pie labas virsmas slapināšanas ir iespējams organizēt uz slīpas plaknes gravitācijas spēka ietekmē vajadzīgā biezuma (0.2 - 0.4 mm) un ātruma (3 - 5 cm/s) plūsmu, att. 3.2.



Att. 3.2. Dozātora kalibrēšana.

a – stenda kopskats; (b – 3.40.00; c - 3.40.56; d – 3.41.52; e – 3.43.04; f – 3.44.88) – laika sprīdis sekundēs.

Ja dL = 50mm (horizontālais marķējums), tad piemēram dT = 3.43.04 – 3.40.56 = 2.48 s . Tas nozīmē, ka plūsmas ātrums (50: 2.48) uz plaknes ir 20.16 mm/s. Jautājums atklāts – vai ir iespējams organizēt stabilu un homogēnu dažas milimetra desmitdaļas biezas litija filmas plūsmu uz slīpas matricas, jo salīdzinot piemēram ar

spirtu, litija virsmas spraiguma spēki ir 10 – kārt lielāki.

Lai organizētu eksperimentus ar litiju tika rekonstruēts "slapināšanas" stends, att. 3.3





b

Att. 3.3. Stends litija plūsmas pētīšanai uz slīpas tērauda plaknes; principiālā shēma; b – stenda kopskats.

a – stenda

Stenda galvenais mezgls ir termo – barokamera. Attiecīgas inženiersistēmas nodrošina eksperimentam atbilstošus apstākļus – temperatūru, vakuumu, inerto gāzu spiedienu utt. Stenda darbības princips parādīts att. 3.4.



Att. 3.4. Litija stenda darbības shēma

Termo - barokamerā tika instalēta regulējama nerūsējošā tērauda plakne un speciāla ietaise, kura izpildīja inžektora funkcijas. Praktiski litijs tika padots uz slīpo tērauda plakni pa caurumu sistēmu ar noteiktu soli. Caurumu diametrs ļoti mazs – 0.2mm. Tas mums palīdzēja atbrīvoties no dažādiem netīrumiem, kā arī no litija oksīdiem. Nerūsējošā tērauda plakni telpā varēja mainīt un novērot plūsmas raksturu atkarībā no plaknes leņķa pret horizontu. Eksperimenta gaita tika fisēta uz video, att. 3.5. Jāsaka, ka litija plūsmu, atbilstošu tokamaka prasībām (stabīlu un vienmērīgi izplatītu pa visu tērauda plaknes virsmu) bez magnetiskā lauka iegūt neizdevās. Pie tam intensīvas litija iztvaikošanas dēļ bija apgrūtināta plūsmas vizuāla novērošana.





Att. 3.5. Eksperiments dziļā vakuumā pie 350° C.

Att. 3.5. hronoloģiskā secībā redzams kā dotajā eksperimentā litijs izplūst no inžektora caurumiem pilienu veidā (Li ļoti liels virsmas spraiguma spēks) un veidojot atsevišķas celiņus ar labu slapināšanu lēni tek pa slīpu tērauda plakni pakāpeniski celiņiem saplūstot kopā. Tomēr nepietiekoši dziļa vakuuma apstākļos (tikai 5 x 10 - 5mbari) redzams, ka litija virsma pārklājas ar plānu litija oksīdu kārtiņu un litija plūsma realizējas tikai zem minētās oksīda kārtiņas. Litija plūsmas esamību varēja konstatēt pēc atsevišķiem pilieniem, kuri pilēja nosēdtraukā.

Litija iztvaikošanas dēļ nebija iespējas turpināt "video eksperimentu", bet beigās, pēc kameras atdzēšanas un plaknes izņemšanas no kameras bija redzama tērauda plaknes pilna slapināšana ar litiju. Par to liecināja arī mikrostruktūras pētījumi.

Veikto eksperimentu rezultātā konstatēts:

Ir iespējams organizēt plānu (0.2 – 0.5mm) litija plūsmu uz slīpas plaknes (nerūsējošā tērauda matricas) gravitācijas spēka ietekmē. Plūsmas raksturs (viendabīgums, stabilitāte) un parametri (ātrums, slāņa biezums) atkarīgi no:

- tērauda matricas slapināšanas kvalitātes;

- tērauda matricas orientācijas telpā;
- vides, kurā tiek veiktas attiecīgas darbības.

Lai nodrošinātu plānu (0.2 -0.5mm) litija plūsmu uz nerūsējošā tērauda matricas gravitācijas spēku ietekmē ar ātrumu daži centimetri sekundē atbilstoši minētiem faktoriem:

- izstrādāta un pārbaudīta tērauda plaknes slapināšanas ar šķidru litiju tehnoloģija, proti, augsta atbilstošo komponentu (litija un tērauda matricas) virsmu tīrība, temperatūra 350⁰ C un dziļš vakuums (5x 10⁻⁵ mbari),
- matricas slīpuma leņķis attiecībā pret horizontu ir 30° 45° (no slīpuma leņķa atkarīgs plūsmas ātrums un daļēji biezums);
- darba vide, kā jau iepriekš minēts vakuums un maksimāli attīrītas (kodinātas un pasivētas) pievadcauruļu un citu konstrukcijas elementu virsmas.

Pie tam ļoti svarīgi ir izvērtēt šķidra litija siltuma slodzi uz divertora platēm. Šos darbus Līguma ietvaros veica St. Pēterburgas Lietišķās Fizikas Tehniskajā universitātē. Aprēķini parādīja, ka siltumslodze uz divertora platēm "double-null" magnētiskā konfigurācijā nepārsniedz 3 -7 MW/m². Tie ir pilnīgi reāli lielumi un atbilst, piemēram, kodoltermiskā reaktora FNS-ST tehniskajām prasībām, sk. Pielikumu Nr.2

Paralēli Kazahstānas Nacionālā Kodolpētniecības centra reaktorā tika veikti eksperimenti ar litija paraugiem neitronu plūsmā, Pielikums 3.

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

Veikt MHD procesu izpēti litija plūsmā pie temperatūrām 300⁰C - 400⁰C, pie tam magnētiskā laukā, sagādā lielas grūtības. Tāpēc tika nolemts eksperimentus veikt vairākos etapos.

Pirmkārt, izmantot jau esošo supra magnētu, att.4.1. kura magnētiskais lauks ir regulējams 0 -5,6 T robežās un litiju šķidra metāla kontūrā aizvietot ar InGaSn sakausējumu.



Att. 4.1. Supramagnēts (B = 0 - 5.6T)

Tā kā InGaSn sakausējumam un litijam ir loti atšķirīgi virsmas spraiguma spēks un blīvums, lai nodrošinātu adekvātu eksperimentālo rezultātu analīzi un izpratni, tērauda matricas slīpuma leņķis ir jāsamazina no 30^0 uz 5^0 .

Jāatzīmē, ka eksperimentos izmantot InGaSn sakausējumu ir loti ērti. Tas ir šķidrs istabas temperatūrā un nav toksisks.

Paralēli minētajiem darbiem atskaites periodā praktiski ir pilnīgi rekonstruēts elektromagnēts, att.4.2. Tam, protams magnētiskais lauks ir daudz mazāks - tikai 1,2 T. Toties ir iespējams instalēt šķidra metāla kontūru un eksperimentēt pie augstām temperatūrām, nebaidoties ierīci izvest no ierindas. Elektromagnētā bija paredzēts

instalēt litija kontūru gadījumā ja supramagnētā rastos problēmas ar vakuumkameras arējā korpusa dzesēšanu.





Att.4.2. Elektromagnēts (B = 1.2T)

Kā jau minēts, lai pētītu magnētiskā lauka ietekmi uz plānas šķidrā metāla plēves (Li) plūsmu pa TOKAMAK tipa reaktora divertora sistēmas kontaktvirsmu, aktivitātes Nr.4 ietvaros tika izstrādāta un izveidota eksperimentālā iekārta (Att. 4.3.), kas deva iespēju supravadošā magnēta "Magdalena" solenoidā to realizēt un vizualizēt, att. 4.4.



Fig. 4.3.

InGaSn minikontūrs a – principiālā shēma; b – kopskats 1 - supra magnēts; 2 – vakuumkamera; 3 – tērauda matrica (sk. fig.3.1.); 4 komunikācijas; 5 – dozātors; 6, 7, 9, 12, 14 – ventīļi; 8 - elektromotors; 10 – argona balons; 11 – InGaSn bāka; 13 – vakuumsūknis. Jāatzīmē, ka eksperimentos ar šķidro litiju, vienlaicīgi ar vajadzību nodrošināt dziļu vakuumu "karstā" vakuuma kamerā (T=300-350 °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. Arī tāpēc eksperimentos kā darba ķermenis tika izmantots eitektiskais kausējums InGaSn ar fizikālajām īpašībām, kas ir tuvas litija fizikālajām īpašībām.



Att.4.4. InGaSn mini kontūrs instalēts supramagnētā

Bez tam, izmantojot kā kontakta virsmu vara pamatni (plāksnīte, pa kuru tek šķidrais metāls), var nodrošināt pēc iepriekšējas amalgamēšanas (pārklāšanas ar galliju) pietiekoši labu pamatnes slapināšanu ar eitektiku InGaSn, kā arī elektrisko kontaktu starp šķidro metālu un pamatni. Šāda materiālu izvēle atbilst TOKAMAK divertora sistēmas galvenajai koncepcijai, saskaņā ar kuru plāna litija plēve apskalo vara pamatni, pārklātu ar nerūsējošā tērauda kārtiņu (h=0.2 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. Attiecīgā situācija tika realizēta eksperimentos, kur tika novērota homogēna poloidāla magnētiskā lauka iedarbība uz šķidrā metāla plēves veida gravitācijas tecēšanu.

Eksperimentālās iekārtas apraksts

Supravadošā magnēta "Magdalena" cilindriskā apgabala centrālajā daļā (D=30 cm), kur magnētiskais lauks ir praktiski homogēns, tika novietota cilindriska vakuuma kamera (2) ar tajā novietotu plakanu pamatni un kapilāru sistēmu šķidra metāla ežekcijai. Iekārtas šķērsgriezums ar vertikālu plakni, kas iet caur magnēta asi, ir parādīts Fig.4.5.. 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 sistēma. 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 attāluma viens no otra. Uzgaļa slīpajā daļā 1 cm attālumā no spraugas izejas celiņu nebija, līdz ar to metāls uz pamatni iztecēja no plakanas spraugas 90x0.2 mm². Šķidro metālu ežekcijas sistēmai pievadīja pa vienu cauruli (7), kas pienāca pie rezervuāra (5) centra.





a)

b)

Att. 4.5. Eksperimentālā kamera.

a) – kameras principiālā shēma; b) – kameras kopskats Kā redzams no att..4.5a, pamatne ar ežekcijas sistēmu ir novietota zem leņķa β =15 °C pret supramagneta asi, tā kā magnētiskajam laukam \vec{B}_o ir normālā komponente $B_z=B_o sin(\beta)$ attiecībā pret pamatni un tangenciālā $B_x=B_o cos(\beta)$ komponente. Supravadošā magnēta konstrukcija ļauj fiksēt solenoidu zem leņķiem $\gamma=10^{\circ}$, 20° , 30° , 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 $\beta=15^{\circ}$ attiecība pret homogēnu magnētisko lauku, un ar slīpuma leņķiem $\alpha=5^{\circ}$, 15° attiecībā pret horizontālo plakni. Pie tam izvēlēto pamatnes orientāciju attiecībā pret magnētiskā lauka \vec{B}_o spēka līnijām (skat. att.4.5a.) noteica tas, lai plēves kustības dēļ inducētās strāvas $j_y=v_xB_z$ un magnētiskā lauka tangenciālās komponentes B_x radītā elektromagnētiskā spēka normālā komponente $f_{em}=-v_xB_yB_x$ virziena sakristu ar gravitācijas spēka komponenti $f_x=-\rho gcos(\alpha)$.

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

	InGaSn	Li
ρ , kg/m ³	6353	500
$\sigma 10^{6}, \mathrm{Sm}^{-1}$	3.27	3.5
$v10^{-6}, m^2/s$	0.34	1
ρν10 ⁻³ Pa s	2.16	0.5

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 šķērsgriezumu $S_k=2bx2a=2x0.2 \text{ mm}^2$ un garumu $L_k=8 \text{ cm}$. Eksperimenta gaitā ar silfonu sistēmas palīdzību rezervuārā (5) tiek padots šķidrais metāls ar caurteci Q=90 mm³/s. Ja pieņem, ka šķidrā metāla ātrums visos kapilāros ir vienāds, tad vidējais ātrums katrā kapilārā ir

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

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 mm.

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

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

kur $Ha = aB_z \sqrt{\sigma/\rho v}$ 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.4.6.



Att. 4.6.

	На	р
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.

Magnētiskā lauka iespaida 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 homogenā magnētiskā laukā \bar{B}_o (skat. Fig.4.5a).

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

Pieņemsim, ka šajā koordinātu sistēmā magnētiskajam laukam \vec{B}_z ir divas komponentes $B_x=B_o\cos(\beta)$ un $B_z=-B_o\sin(\beta)$, kur β - leņķis, pie kāda vektors \vec{B}_o 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 $j_y(z)=\sigma v_x(z)B_o\sin(\beta)$. Tā kā ir gravitācijas lauks, tad MHD vienādojumi (ja $v_x=v(z)$) bezindukcijas tuvinājumā ir :

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

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

$$v(z) = \frac{\rho g \sin(\alpha)}{B_z^2} (1 - \frac{\cosh((h-z)B_z \sqrt{\sigma/\rho v})}{\cosh(hB_z \sqrt{\sigma/\rho v})})$$
$$p(z) = \rho g \cos(\alpha)(h-z)) \begin{bmatrix} 1 + tg(\alpha)ctg(\beta)(1 - \frac{\sinh((h-z)B_z \sqrt{\sigma/\rho v})}{(h-z)B_z \sqrt{\sigma/\rho v}} \cos(hB_z \sqrt{\sigma/\rho v}) \end{bmatrix}$$
$$kur B_z = -B_0 \sin(\beta)$$

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

$$q = < v > h = \int_0^h v(z) dz$$

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

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

Pie B_z→0 iegūstam zināmo izteiksmi

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

Tālākajās tabulās ir aprēķināti plēves tecēšanas parametri šķidrajam litijam un eitektikai InGaSn pie q= 10^{-6} m²/sec, kad slīpums starp pamatni un magnētisko lauku B_o ir β =15 °, bet leņķis α (pamatne pret horizontu) ir α =5 °, 15 °, 25 °.

Šajās tabulās vienlaicīgi ar plēves biezumu h un vidējo plēves ātrumu <v> 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} =- $\rho gcos(\alpha)$:

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

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

$$pp(0) = 1 + tg(\alpha)tg(\beta)(1 - \frac{\tanh(hB_z\sqrt{\sigma/\rho\nu})}{hB_z\sqrt{\sigma/\rho\nu}})$$

Tab.1a Li $q=10^{-2}$ cm ² /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	152	595	2217	4951	8786		
<v>,cm/s</v>	0.658	0.168	0.045	0.02	0.011		
V _{vir} , 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°				
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	231	762	1677	2966		
<v>,cm/s</v>	0.946	0.43	0.131	0.06	0.034		
V _{vir} , 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 $q=10^{-2} cm^{2}/s$ $\beta=15^{\circ}$ $\alpha=25^{\circ}$							
B _x , T	0	0.966	1.932	2.898	3.86		
B_z, \overline{T}	0	0.259	0.518	0.777	1.035		
h, µ	90	159	475	1033	1821		

<v>,cm/s</v>	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	$q=10^{-2} cm^2/s$	s $\beta = 15^{\circ}$ α	=5°				
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		
<v>,cm/s</v>	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 $q=10^{-2}$ cm ² /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		
	1 255	1.00	0.077	0 6 4 4	0.410		

<v>,cm/s</v>	1.333	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	$a - 10^{-2} \text{ cm}^{2}/\text{s}$	$\beta B = 15^{\circ}$ o	-25°		

Tab.2c InGaSn $q=10^{-2}$ cm ² /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	
<v>,cm/s</v>	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	
0	1	1.218	1733	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~100 µ) tecēšanu var realizēt tikai pie pietiekoši liela pamatnes slīpuma pret horizontu $\alpha \ge 25^{\circ}$ un tikai pie nelielām normālā magnētiskā lauka vērtībām $|B_z|=B_o sin(\beta)$.

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 (β =-15 °), 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 plānas litija plēves (h≈100 µ) tecēšana magnētiskajā laukā $B_z \approx 1$ T ir saistīta ar būtisku inžektoram pievadītās caurteces 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 α =30 ° un dažādām normālām lauka B_z vērtībām un q=10⁻⁷ m²/sec, q=5*10⁻⁷ m²/sec,

 $q=10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec.}$

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

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 $B_0=0$ T , 2 T un 4 T. Eksperimentālā stenda shēma ir parādīta att.4.3a,b.

Darba ķermenis bija InGaSn. Vakuuma kamerā $(p_{Ar}=10^{-7}mbar)$ 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 mm³/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 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 šķirā 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 kontrolējamos 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_o vērtības) pēc silfonu padeves sistēmas ieslēgšanas ar caurteci Q=90 mm³/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 šķidrais 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=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 ($B_o=0$), tā arī ar magnētisko lauku ($B_o=2$ T, $B_z=0.5$ T) ežekcijas sistēma nenodrošināja šķidrā metāla vienmērīgu padevi pa visu izejas spraugas platumu. No spraugas izplūstošais metāls (pie Q=90 mm³/s) koncentrējās pamatnes centrālajā daļā. Pie tam pie $B_o=2$ T pēc papildus šķidrā metāla porcijas iztecēšanas, no spraugas izplūstošais metāls pakāpeniski koncentrējas spraugas centrālajā daļā, bet novērojamā plakanā plēve, kas tek pa pamatni, nedaudz sašaurinās. Situācija būtiski uzlabojas spēcīga magnētiskā lauka gadījumā ($B_o=4$ T, $B_z=1$ T) un $\alpha=15^{\circ}$











Att.4.7. 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 realizējas vienmērīga stacionāra plēves veida tecēšana ar lineāro caurteci $q=10^{-2}$ cm²/s.

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

Pamatojoties uz šajā aktivitātē iegūtajiem rezultātiem ir izteikti sekojoši priekšlikumi magnētiska lauka iedarbības ievērošanai.

- 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.
- Šķidrā metāla plēves veida tecēšana ar plēves biezumu h≈100 µ poloidālā magnētiskā laukā ar B_z=0.5...1 T ir iespējama tikai pie ļoti mazas lineārās caurteces q. Pie tam litija tecēšanas ātrums būs daži mm sekundē.
- Izstrādājot ežekcijas sistēmu, galvenā prasība ir šķidrā metāla vienmērīga padeve uz pamatni. Tāpēc vajag maksimāli palielināt MHD pretestību kapilāros kanālos.

5. Aktivitāte Nr.5.Ar šķidru litiju aizsargātas divertora virsmas modeļa izveide

Aktivitātē Nr.5. paredzētie darbi ir visietilpīgākie. Praktiski 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 pārnesi sistēmā plazma – dzesētājs. Kā tas jau iepriekš atzīmēts, siltumplūsmas jauda milzīga. Tā sastāda aptuveni 3-7MW/m^{2,}, jeb 300 – 700W/cm².

Aktivitāšu Nr.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 (< 1mm) uz slīpas matricas ar ātrumu daži cm/s.

Šajā sakarībā tika iz ıbinēts divertora modelis. Tā pamatā ir nosacīti bieza vara plāksne (varam laba siltumvadāmība) dzesēta ar ūdeni (varbūt pat šķidru metālu) un pārklāta ar plānu korozijas izturīgu materiālu,piemēram nerūsējošo tēraudu. Lai šo uzdevumu atrisinātu, paralēli teorētiskiem izvērtējumiem, tika izprojektēts, izgatavots un samontēts litija kontūrs ar nolūku atstrādāt litija plūsmas režīmus, izmantojot supramagnētu, jau laukā 4 -5T, kas ir tuvs reāla kodoltermiskā reaktora magnētiskajam laukam.



Att. 5.1. Litija kontūra principiālā shēma.



Att. 5.2. Litija kontūrs ar kameru instalētu supramagnētā (montāža).

Kontūra konstrukcija identiska InGaSn kontūram. Tā galvenā atšķirība ir eksperimentālā kamera, att.5.3.



Att.5.3. Termo – barokameras testēšana.

Visi kontūra elementi un mezgli izpildīti no nerūsējošā tērauda. To virsma attaukota un kodināta. Pirms kameras instalēšanas supramagnētā tajā tika ievietoti divi
nerūsējošā tērauda plaknes paraugi: vienam – galvaniskā ceļā uznesta plāna vara kārtiņa, otram – tikai notīrīta virsma. Eksperimenta mērķis bija pirmkārt - vēlreiz pārbaudīt paraugu slapināšanas kvalitāti un izvēlēties optimālāko variantu, kā arī pārliecināties par iespēju sasniegt maksimāli dziļu vakuumu (5 x 10- 7 - 5 x 10- 8mbari), att. 5.4.



a



Att. 5.4. Tērauda virsmas slapināšanas tests a – tīra tērauda parauga virsma; b – virsma pārklāta ar vara kārtiņu.

Pēc paraugu vizuālas apskates tika nolemts supramagnētā instalēt tērauda plakni, pārklātu ar plānu vara kārtiņu, jo litija kārtiņas klājums izskatījās homogenāks.



Att. 5.5. Litija plūsmas organizēšanas princips uz tērauda plaknes.

Pēc visu kontūra sistēmu pārbaudes un veiktajiem priekšdarbiem kamera tika instalēta supramagnētā (sk.att. 5. 2.). un veikta eksperimentu sērija magnētiskā laukā dziļa vakuuma (2 x 10-7mbari) apstākļos. Šķidrā litija temperatūra tia uzturēta 350 – 380 C robežās.

Litija plūsmas process magnētiskā laukā uz slīpas tērauda plaknes gravitācijas spēka ietekmē parādīts att. 5. 6.





a







Att. 5.6. Plānas litija plūsmas ģenerēšanas process uz slīpas tērauda plaknes.

Att. 5.6. redzams, ka lēnas silfona kustības rezultātā, litijs no dozātora pa inžektora mikrokanāliem tiek padots uz slīpu tērauda plakni (30 pret horizontu). Litija virsmas spraiguma spēku ietekmē izejā no inžektora praktiski vienlaicīgi parādās litija pilieni (att.5.6a) un atsevišķu celiņu veidā plūst pa slīpo plakni pakāpeniski apvienojoties kopā (att.5.6b) un gala rezultātā veidojot pietiekoši stabilu un homogēnu plūsmu uz tērauda plaknes. Litija plūsmas plēves biezums tika aprēķināts, izejot no silfona kustības ātruma (litija caurteces) un plaknes izmēriem. Tas bija 0.3 – 0.5 mm robežās. Plūsmas ātrums aptuveni 5cm/s. Šie parametri noteikti pēc zemāk izstrādātās un aprakstītās aprēķinu metodes.

Ja eksperimenta laikā ar šķidro litiju novērošanas sistēma parāda stacionāras vienmērīgas plūsmas esamību, tad izmantojot iepriekš zināmo caurteces q vērtību var noteikt plēves plūsmas galvenos parametrus: tās biezumu, ātrumu un citus. Bet ir zināms ka uz plēves plūsmas parametriem spēcīgi iedarbojas poloidālais magnētiskais lauks B_p kuram ir litija plūsmas pamatplates virmai vērsta minētā magnētiskā lauka normālā komponente. No otras puses tieši šāda magnētiskā lauka B_p plates virsmai vērstās normālas komponentes esamība nodrošina pašas kā tādas divertora kontakta iekārtas funkcionēšanu.

Izstrādātā metodika ļauj noteikt šķidrā litija plēves plūsmas biezumu atkarībā no lineārās caurplūdes q, atkarība no poloidāla magnētiskā lauka B_p lieluma un orientācijas, atkarībā no plūsmas pamatplates slīpuma \Box pret horizontu. Tiek pieņemts ka poloidālais magnētiskais lauks B_p ir vienmērīgs un tam ir normāla plēves plūsmas pamatplates virsmai komponente:

$$B_{z} = -B_{0} \cdot \sin \beta$$

kā arī vienlaikus tangenciāla komponente:

$$B_x = -B_0 \cdot \cos \beta$$

kura ir vērsta litija plūsmas virzienā. Ir vērts pieminēt ka stiprais toroidālais magnētiskais lauks B_t neiespaido šķidrā litija plūsmu tāpēc ka šī magnētiskā lauka inducētais elektriskais lauks $Vx B_t$ pilnīgi tiek kompensēts ar plēvē inducēto elektriskā potenciāla gradientu. Šeit \Box ir leņķis zem kura magnētiskā lauka B_p vektors šķērso plēves plūsmas pamatplati.

Piedāvājamā metodika balstās uz magnētiskās hidrodinamikas vienādojumu risinājumiem:

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

ar šādiem robežu nosacījumiem:

uz plēves plūsmas brīvās virsmas z = h jābūt apmierinātiem sekojošiem nosacījumiem:

 $p = p_0$ ($p_0 = 0$ – spiediens vakuuma kamerā) un dv/dz = 0, uz plēves plūsmas pamatplates pie lieluma z = 0 jābūt v = 0.

Šeit ρ ir šķidrā litija īpatsvars, \Box ir šķidrā litija kinemātiskā viskozitāte, ρ ir šķidrā litija elektriskā vadāmība un g ir brīvās krišanas paātrinājums. Šo magnētiskās hidrodināmikas vienādojumu atrisinājums priekš v(z), kas atbilst minētiem robežu nosacījumiem intervālā ($0 \le z \le h$), ir sekojošs:

$$v_{(z)} = \frac{\rho g \sin \alpha}{\sigma B_z^2} \left(1 - \frac{ch[(h-z)B_z \sqrt{\sigma/\rho v}]}{ch[hB_z \sqrt{\sigma/\rho v}]}\right), \text{ kur } B_z = -B_0 \sin \beta.$$

Pie uzdotās šķidra litija lineārās caurteces q, kas ir padota uz plēves plūsmas pamatplati tiek nodrošināts ka:

$$q = \langle v \rangle \cdot h = \int_0^h v_{(z)} dz.$$

No šejienes izriet transcendentiālais vienādojums magnētiskajā lukā plūstošā šķidrā litija plēves biezuma noteikšanai:

$$h(1 - \frac{th[hB_z\sqrt{\sigma/\rho\nu}]}{hB_z\sigma/\rho\nu}) = \frac{\sigma B_z^2}{\rho g \sin} \cdot g$$
(1)

Kad magnētiskais lauks B_0 tiecas uz nulli ($B_0 \rightarrow 0$) tad no šī vienādojumu risinājuma iegūstam sekojošo plēves biezuma lielumu:

$$h = \sqrt[3]{3\nu q / g \sin \alpha} \tag{1a}$$

Šajā gadījumā vidējais šķidrā litija plēves plūsmas ātrums tiek aprēķināts pēc sekojošas formulas:

$$\langle v \rangle = q/h,$$
 (2)

kur h ir vienādojuma (1) atrisinājums.

Tālāk zemāk sekojošā tabulā priekš ilustrācijas ir doti plūstošo šķidrā litija plēvju parametri, kuri tika aprēķināti pamatojoties uz iegūtam formulām. Pie tā tiek pieņemts ka no spraugveidīgas sprauslas šķidrais litijs iztek vienmērīgi pa visu plūsmas pamatplates platumu ar uzdoto caurteci $q = 1 \text{ mm}^2$ /s. Leņķis β pie kura magnētiskais lauks šķērso plūsmas pamatplati ir 15 grādi. Aprēķinos tika mainīti magnētiskā lauka B_0 vērtības un plūsmas pamatplates leņķa pret horizontu vērtības: α = 5° , $\alpha = 15^{\circ}$ uņ $\alpha = 25^{\circ}$. Tabulā līdzās plēves plūsmas biezuma vērtībām h un viedējā ātruma $\langle v \rangle$ vērtībam ir dotas arī vērtības ātrumiem uz plūsmas brīvās virsmas $v_{(h)}$, kā arī vērtības f_{em}^* - kuras raksturo inducēta elektromagnētiskā spēka normālās komponentes blīvumu uz plūsmas brīvās virsmas un kuras ir normētas pēc attiecīgās gravitācijas smaguma komponentes $f_{gz} = -\rho g \cdot \cos\alpha$:

$$f_{em}^* = \frac{f_{emz}(h)}{f_{gz}} = tg\alpha \cdot ctg\beta(1 - \frac{1}{ch[hB_z\sqrt{\sigma/\rho\nu}]}).$$

Vēl viena vērtība kas raksturo magnētiskā lauka iespaidu uz šķidrā litija plēves veidīgo plūsmu ir spiediena vērtība uz pašas plūsmas pamatplates:

$$p_{(0)} = \rho g h \cos \alpha + q \sigma B_0^2 \sin \beta \cdot \cos \beta.$$

Relatīvās vērtības $p_0 = p_{(0)}/\rho gh$ arī ir dotas tabulā. No tabulas datiem izriet ka magnētiskais lauks stipri iespaido visus šķidrā litija plēvēs plūsmas parametrus. No šiem datiem seko ka plāna ($h \approx 0.1$ mm) plēves plūsma var but realizēta tikai gadījumā kad plūsmas pamata plaknei slīpums pret horizontu ir vismas vai lielāks par 25 grādiem ($\alpha \ge 25^0$) un arī tikai pie relatīvi nelielām magnētiskā lauka komponentes $B_z = B_o \cdot \sin\beta$ vērtībām perpendikulārām plēves plūsmas pamata platei.

Šķidrā litija plēvēs plūsmas parametru tabula $(q = 1 \text{ mm}^2/\text{s}; \beta = 15^0)$

α	$B_0[T]$	0	1	2	3	4
	<i>h</i> [mm]	0.152	0.59	2.22	4.95	8.79
5^0	<v>[mm/s]</v>	6.58	1.68	0.45	0.2	0.11
	< <i>v</i> _{<i>h</i>} >	9.87	1.82	0.46	0.2	0.11
	[mm/s]	0	0.327	0.327	0.327	0.327
	f_{em}^*	1	1.301	1.323	1.325	1.326

	p_0					
	<i>h</i> [mm]	0.106	0.231	0.762	1.67	2.97
15^{0}	<v>[mm/s]</v>	9.46	4.3	1.31	0.6	0.34
	$\langle v_h \rangle$	14.2	5.34	1.35	0.6	0.34
	[mm/s]	0	0.986	0.99	0.999	0.999
	f_{em}^{*}	1	1.8	1.97	1.991	1.996
	p_0					
	<i>h</i> [mm]	0.09	0.159	0.475	1.033	1.82
25^{0}	<v>[mm/s]</v>	11.1	6.28	2.1	0.97	0.55
	< <i>v</i> _{<i>h</i>} >	16.7	8.28	2.11	0.98	0.55
	[mm/s]	0	1.63	1.74	1.74	1.74
	f_{em}^{*}	1	2.24	2.66	2.71	2.73
	p_0					

Piedāvātā metodika plēves veida plūsmu parametru noteikšanai tika pārbaudīta modelējošos eksperimentos, izmantojot eitektisko sakausējumu In-Ga-Sn (indijs-galijs-alva) supravadošajā elektromagnetā "Magdalena" līdz četru teslu stipra magnētiskā lauka vērtībām.

Jāpiebilst, ka litija plūsmas stabilitāte lielā mērā atkarājas no magnētiskā lauka lieluma, kas darbojas uz litija plūsmu inžektora mikrokanālos, radot tāda veidā papildus hidraulisko pretestību un stabilizējot vienlaicīgu litija plūsmu inžektora izejā. Veikto eksperimentu rezultāti loti tuvi TOKAMAK divertora tehniskajām prasībām un perspektīvā varētu tikt izskatīts kā alternatīvs un konkurētspējīgs divertora risinājums reālai konstrukcijai.

Paralēli kontūru projektēšanai, izgatavošanai un plūsmas pētīšanai tika skaitliski izvērtēti divertora modeļa varianti un siltumpārneses procesi tajos.

Realizējamā projekta pamatā ir ideja izveidot plānu litija plūsmas plēvi uz divertora virsmas dozējot definētu litija daudzumu, kas plūst ar noteiktu ātrumu cauri

inžektora kanālu sistēmai. Kanāli inžektorā, kuram uzlikts magnētiskais lauks, rada papildus hidraulisko pretestību, tādā veidā stabilizējot šķidrā metāla plūsmu, kas izplūst no inžektora spraugas un tālāk nonāk uz divertora plaknes virsmas. Spiediens kanālu sistēmā ir ievērojami lielāks nekā kolektorā un tas atkarīgs no magnētiskā lauka lieluma. Līdz ar to palielinot magnētiskā lauka vērtību kanālu sistēmas efektivitāte tikai pieaug. Divertora virsmai jānodrošina ideāla slapināšana ar šķidro metālu.

Divertora modulis (att.5.7.) sastāv no divertora moduļa plaknes 1, kas savukārt sastāv no moduļa pamatnes pārklātas ar plānu nerūsējošā tērauda plāksni, šķidrā metāla uztvērēja 2, kapilāru sistēmas 3, uzmontētas uz sildāmas pamatnes 4, kolektora 5, komunikācijām 6, kas savieno šķidrā metāla kolektoru 5 ar dozatoru, kurā instalēts elastīgs elements (piemēram silfons) 8, regulējama piedziņas mehānisma 7 un šķidra metāla rezerves tvertnes 9.

Šķidrais metāls no dozatora 8 ar regulējama piedziņas mehānisma 7 palīdzību pa komunikācijām 6 tiek padots uz kolektoru 5, no kurienes vienmērīgi pa kapilāru sistēmu 3 šķidrais metāls nonāk uz jau iepriekš uzkarsētas divertora moduļa plaknes 1 un ar ātrumu, kas ir atkarīgs no divertora plaknes orientācijas telpā un šķidrā metāla padeves ātruma dozatorā, nonāk uztvērējkolektorā 2. Lai realizētu stabilu un vienmērīgu šķidrā metāla plūsmu pa divertora moduļa virsmu; pirmkārt - jānodrošina tās ideāla slapināšana un otrkārt - jāorganizē magnētiskā lauka iedarbība kanālu sistēmā perpendikulāri šķidrā metāla plūsmai tajos. Pie tam plazmas izlādes laikā, lai izslēgtu šķidrā metāla pārkaršanu un tā iztvaikošanu, jānodrošina intensīva divertora moduļa pamatnes dzesēšana. Šķidrajam metālam lēni plūstot pa divertora plakni 1 notiek plazmas attīrīšana no tā saucamajiem "kodolsintēzes pelniem", kā arī tritija absorbcija. Tādā veidā plazma tiek attīrīta no dažādiem piemaisījumiem, bet siltumjauda, kas krīt uz divertora plakni tiek novadīta dzesējot divertora plaknes pamatni. Divertora pamatnes dzesēšanas efektivitāte lielā mērā nosaka visas tokamak sistēmas darbības efektivitāti.



Att. 5.7. Divertora moduļa principiālā shēma.

Šādas ar lēni plūstošas Li plēves pārklātas divertora pamatnes konstrukcijas izgatavošanas tehnoloģijas izstrādes nolūkā tiek aprēķināts un izgatavots divertora pamatnes modelis, kas parādīts att.5.8.



Att. 5.8. Divertora moduļa plakne.

Pamatne 105x155x27,5mm izgatavota no vara plāksnes, kurā ir izveidoti cilindriski dzesēšanas kanāli, pa kuriem plūst šķidrais Ga. Kanālu sieniņas no Ga iedarbības aizsargātas ar nerūsējošā tērauda čaulu. Pamatnes konstrukciju un

dzesēšanas sistēmu jāveido tā, lai caur Li plēvi aizvadāmās jaudas blīvums būtu maksimāli iespējamais. Tas panākams ar dzesēšanas sistēmu uzturot Li plēves temperatūru tuvu maksimāli pieļaujamajai pa visu plēves laukumu. Tas iespējams, ja visi dzesēšanas kanāli ir savienoti hidrauliski paralēli un Ga padeve ir tik liela, lai tā sasilšana izejot caur kanāliem būtu minimāli iespējama. Ātrumam kanālos jābūt maksimāli iespējamam, lai nodrošinātu labu siltumatdevi no tērauda čaulas uz šķidro Ga. Ātruma lielumu kanālos ierobežo pieļaujamais spiediens dzesēšanas sistēmā un nerūsējoša tērauda korozijas intensitātes ierobežojumi.

Pie šādiem nosacījumiem optimizācijas uzdevumu par kanālu izvietojumu pamatnē var vienkāršot, padarot to par telpiski divdimensiālu un stacionāru laikā.

Vispārīgā gadījumā temperatūras režīms izrēķināms no klasiskiem termodinamikas vienādojumiem:

$$\nabla(\mathbf{\lambda}\nabla \mathbf{T}) + \mathbf{q} = \mathbf{c}\rho\partial\mathbf{T}/\partial\mathbf{t},\tag{n1}$$

Šeit λ - siltumvadīšanas koeficients,

c, ρ – atbilstoši īpatnējā siltumietilpība un blīvums,

T, t, ∇ - atbilstoši temperatūra, laiks un atvasinājuma operators pēc telpiskām koordinātēm.

Mūsu gadījumā var pieņemt $\partial T/\partial t = 0$ un paliek divas telpiskās koordinātes.

Divertora pamatnes enerģētiskā mijiedarbība ar apkārtējo vidi ir diezgan sarežģīta, bet mūsu gadījumā pieņemam, ka uz Li plēves ārējās virsmas ir maksimāli pieļaujamā temperatūra T = 400 C.

$$[T]_{SLi} = 400,$$
 (n2)

Uz pārējām pamatnes ārējām virsmām un dzesēšanas kanālos ir 3. veida robežnosacījumi:

$$[\partial \theta / \partial n]_{\rm S} = - \alpha \theta_{\rm S} / \delta$$

Šeit $[\partial \theta / \partial n]_s$ - atvasinājums normāles virzienā uz ārējās virsmas,

 $\theta_S = T_S - T_o$, kur T_S - temperatūra uz pamatnes ārējās virsmas, T_o - apkārtējās vides temperatūra, $\theta = T - T_o$, α - siltumatdeves koeficients, kas atkarīgs no vides plūsmas veida (brīvā konvekcija, plūsma kanālos), kanālu konfigurācijas, plūsmas ātruma un vides parametriem. Parasti šo koeficientu aprēķina pēc pusempīriskām formulām, kas atrodamas daudzos literatūras avotos. Mēs izmantojam tos, kas doti [1]. Pamatnes

konstrukcijā izmantoto materiālu (varš, Li, nerūsējošais tērauds, Ga) fizikālās īpašības tiek ņemtas no [1].

Analītiski optimizācijas uzdevums (maksimālās siltuma jaudas blīvuma uz Li plēves laukuma vienību atkarība no pamatnes konstrukcijas parametriem) nav atrisināms, tāpēc tiek veikta skaitlisko aprēķinu sērija, kur mērķtiecīgi tehnoloģiski pieļaujamās robežās tiek mainīti dažādi konstrukcijas parametri un atrasts variants, kad siltuma jaudas blīvums uz Li plēves laukuma vienību ir vislielākais un arī maksimāli vienmērīgs pa visu Li plēves virsmu.

Skaitliskie aprēķini tiek veikti, izmantojot FEMM 4.2 programmatūru [2 – 8].

Aprēķinos tiek pieņemts, ka šķidrā Ga temperatūra dzesēšanas kanālu ieejā ir 60 C, Li plēves biezums ir 0,3 mm, Li plēvei ir ideāls termisks kontakts ar nerūsējoša tērauda pārklājumu, kas aizsargā vara pamatni no Li iedarbības, pārklājuma biezums 0,2 mm. Nerūsējoša tērauda pārklājumam ir ideāls termisks kontakts ar vara pamatni. Tiek pieņemts, ka nerūsējošā tērauda čaulas, kas aizsargā dzesēšanas kanālus no šķidrā Ga iedarbības ir ideālā termiskā kontaktā ar vara pamatni. Protams, ka termiskā kontakta kvalitāte starp visiem divertora pamatnes elementiem būtiski samazina maksimālo siltuma jaudas blīvumu caur Li plēvi (tika veikti novērtējumu aprēķini), tāpēc ir jāizvēlas tehnoloģiskie risinājumi, kas šo termisko kontaktpretestību samazina līdz minimumam.

Tiek variēts attālums no Li plēves līdz pirmajai dzesēšanas kanālu rindai h, attālums starp dzesēšanas kanāliem a, attālums starp pirmo un otro dzesēšanas kanālu rindām h1, nerūsējošā tērauda čaulas, kas aizsargā dzesēšanas kanālus no šķidrā Ga iedarbības, biezums d. Dzesēšanas kanālu summārajam šķērsgriezuma laukumam jābūt tādam (ne mazākam), lai nodrošinātu nepieciešamo šķidrā Ga padevi pie pieļaujamā spiediena dzesēšanas kontūrā (< 3-4 bar). Ga padevei, savukārt, jābūt tik lielai, jai aiznestu caur Li plēvi paņemto jaudu, sasilstot par relatīvi nelielu temperatūru (10 -15 C), lai būtiski nesamazinātos caur Li plēvi aizvadāmā siltuma jauda dzesēšanas kanālu izejā, salīdzinot ar jaudu dzesēšanas kanālu ieejas zonā, tādejādi nodrošinot plūsmas blīvuma pietiekamu vienmērīgumu pa visu Li plēves virsmu. Šie nosacījumi un izgatavošanas tehnoloģiskās iespējas tādējādi ierobežo iespējamo dzesēšanas kanālu rindu skaitu un atsevišķo kanālu diametru variācijas. Skaitliski aprēķinātie un analizējamie varianti parādīti Tabulā n1.

Aprēķinu rezultāti: katram variantam tiek parādīts temperatūras un siltuma jaudas plūsmas blīvuma sadalījums krāsu toņu grafiskā attēlojumā. Uz šiem

zīmējumiem doti arī siltuma plūsmu virzienu vektori un temperatūru ekvipotenciālās līnijas. Parādīts arī siltuma jaudas blīvuma sadalījuma pa dzesējamās pamatnes platumu grafiskais attēlojums.

V1	V11	V12	V13	V14			
h, mm	7,00	7,00	3,50	3,50			
a, mm	5,00	5,00	5,00	5,00			
d, mm	0,50	0,05	0,50	0,05			
D1, mm	16,00	16,00	16,00	16,00			
, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	,		ĺ ĺ				
D, mm	15,00	15,90	15,00	15,90			
n	5	5	5	5			
		-	-	-			
V2	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27
h, mm	6,00	6,00	6,00	2,20	6,00	3,00	2,20
a, mm	5,00	5,00	5,00	5,00	7,00	3,00	5,00
<i>.</i>	,	,					
d, mm	1,00	0,50	0.05	1,00	2,00	0,50	0.50
,	,	,	,	,	,	,	,
h1, mm	3,30	3,30	3,30	3,30	3,00	2,00	3,30
D1, mm	8,00	8,00	8,00	8,00	10,00	10,00	8,00
D, mm	6,00	7,00	7,90	6,00	6,00	9,00	7,00
n	15	15	15	15	11	15	15
n1	8	8	8	7	6	8	7
1				1	1		1
n2	7	7	7	8	5	7	8
	V1 h, mm a, mm d, mm D1, mm D, mm n V2 h, mm d, mm d, mm h1, mm D1, mm D1, mm n n 1 n 2	V1 V11 h, mm 7,00 a, mm 5,00 d, mm 0,50 D1, mm 16,00 D, mm 15,00 n 5 V2 V21 h, mm 6,00 a, mm 5,00 d, mm 1,00 h1, mm 3,30 D1, mm 8,00 D1, mm 6,00	V1 V11 V12 h, mm 7,00 7,00 a, mm 5,00 5,00 d, mm 0,50 0,05 D1, mm 16,00 16,00 D, mm 15,00 15,90 n 5 5 V2 V21 V22 h, mm 6,00 6,00 a, mm 5,00 5,00 d, mm 1,00 0,50 h1, mm 3,30 3,30 D1, mm 8,00 8,00 D, mm 6,00 7,00 n 15 15 n1 8 8 n2 7 7	V1 V11 V12 V13 h, mm 7,00 3,50 3,50 a, mm 5,00 5,00 5,00 d, mm 0,50 0,05 0,50 D1, mm 16,00 16,00 16,00 D, mm 15,00 15,90 15,00 n 5 5 5 V2 V21 V22 V23 h, mm 6,00 6,00 6,00 a, mm 5,00 5,00 5,00 d, mm 1,00 0,50 0,05 h, mm 6,00 5,00 5,00 d, mm 1,00 0,50 0,05 h1, mm 3,30 3,30 3,30 D1, mm 8,00 8,00 8,00 D, mm 6,00 7,00 7,90 n 15 15 15 n1 8 8 8 n2 7 7 7	V1 V11 V12 V13 V14 h, mm 7,00 7,00 3,50 3,50 a, mm 5,00 5,00 5,00 5,00 d, mm 0,50 0,05 0,50 0,05 D1, mm 16,00 16,00 16,00 16,00 D, mm 15,00 15,90 15,00 15,90 n 5 5 5 5 V2 V21 V22 V23 V24 h, mm 6,00 6,00 6,00 2,20 a, mm 5,00 5,00 5,00 5,00 d, mm 1,00 0,50 0,05 1,00 h1, mm 3,30 3,30 3,30 3,30 D1, mm 8,00 8,00 8,00 8,00 n 15 15 15 15 n 15 15 15 15 n 8 8 7 7	V1 V11 V12 V13 V14 h, mm 7,00 7,00 3,50 3,50 a, mm 5,00 5,00 5,00 5,00 d, mm 0,50 0,05 0,05 0,05 D1, mm 16,00 16,00 16,00 16,00 D, mm 15,00 15,90 15,90 15,90 n 5 5 5 5 V2 V21 V22 V23 V24 V25 h, mm 6,00 6,00 6,00 2,20 6,00 a, mm 5,00 5,00 5,00 7,00 4,00 a, mm 5,00 5,00 5,00 7,00 4,00 a, mm 5,00 5,00 5,00 7,00 4,00 1,00 2,00 h1, mm 3,30 3,30 3,30 3,30 3,00 10,00 D1, mm 8,00 8,00 8,00 8,00 6,00 6,00	V1 V11 V12 V13 V14 h, mm 7,00 3,50 3,50 - a, mm 5,00 5,00 5,00 5,00 - d, mm 0,50 0,05 0,05 0,05 - - D1, mm 16,00 16,00 16,00 16,00 - - D, mm 15,00 15,90 15,00 15,90 - - V2 V21 V22 V23 V24 V25 V26 h, mm 6,00 6,00 6,00 2,20 6,00 3,00 a, mm 5,00 5,00 5,00 7,00 3,00 a, mm 5,00 5,00 5,00 7,00 3,00 d, mm 1,00 0,50 0,05 1,00 2,00 0,50 h, mm 3,30 3,30 3,30 3,30 2,00 0,50 h1, mm 3,30 3,30 3,30 3,30 2,00

Tabula n1

Raksturīgāko divertora moduļu (varianti Nr., Nr. V21, V23, V26, V 27 un V13) teorētiskie temperatūras sadalījuma un siltuma jaudas plūsmas blīvuma novērtējumi parādīti att. 5.9.

Šķērsgriezums



Temperatūras

3.664e+002 : 3.832e+002 3.496e+002 : 3.664e+002
3 496e+002 · 3 664e+002
5. 500 . 002 . 5.0010 .002
3.328e+002 : 3.496e+002
3.160e+002: 3.328e+002
2.991e+002: 3.160e+002
2.823e+002 : 2.991e+002
2.655e+002 : 2.823e+002
2.487e+002:2.655e+002
2.319e+002:2.487e+002
2.151e+002 : 2.319e+002
1.983e+002 : 2.151e+002
1.815e+002: 1.983e+002
1.647e+002:1.815e+002
1.479e+002:1.647e+002
1.310e+002:1.479e+002
1.142e+002:1.310e+002
9.743e+001:1.142e+002
8.062e+001:9.743e+001
<6.381e+001:8.062e+001



Siltuma jaudas plūsmas blīvums

7.643e+006	i:>8.046e+006
7.241e+006	i: 7.643e+006
6.839e+006	i:7.241e+006
6.437e+006	: 6.839e+006
6.035e+006	: 6.437e+006
5.633e+006	i: 6.035e+006
5.231e+006	i:5.633e+006
4.829e+006	5.231e+006
4.427e+006	: 4.829e+006
4.025e+006	: 4.427e+006
3.623e+006	: 4.025e+006
3.221e+006	: 3.623e+006
2.819e+006	: 3.221e+006
2.417e+006	i: 2.819e+006
2.015e+006	: 2.417e+006
1.613e+006	: 2.015e+006
1.211e+006	: 1.613e+006
8.095e+005	i:1.211e+006
4.075e+005	i: 8.095e+005
<5.449e+00	03:4.075e+005
Density Plot: F ,	, W/m^2





Šķērsgriezums



Temperatūras

81 - F	3.826e+002 : >4.000e+002
1	3.652e+002:3.826e+002
1	3.478e+002:3.652e+002
1	3.303e+002:3.478e+002
1	3.129e+002:3.303e+002
1	2.955e+002: 3.129e+002
	2.781e+002:2.955e+002
	2.607e+002:2.781e+002
	2.433e+002:2.607e+002
	2.258e+002 : 2.433e+002
	2.084e+002 : 2.258e+002
-	1.910e+002 : 2.084e+002
-	1.736e+002:1.910e+002
-	1.562e+002 : 1.736e+002
	1.388e+002:1.562e+002
	1.214e+002:1.388e+002
	1.039e+002:1.214e+002
	8.652e+001:1.039e+002
	6.910e+001:8.652e+001
	<5.169e+001:6.910e+001
Densi	ty Plot: Temperature (K)



Siltuma jaudas plūsmas blīvums





Siltuma jaudas plūsmas blīvums pa Li plēves platumu



Šķērsgriezums



Temperatūras

	1
	3.826e+002 : >4.000e+002
	3.651e+002 : 3.826e+002
	3.477e+002 : 3.651e+002
	3.303e+002 : 3.477e+002
	3.129e+002 : 3.303e+002
	2.954e+002:3.129e+002
	2.780e+002 : 2.954e+002
	2.606e+002 : 2.780e+002
	2.432e+002 : 2.606e+002
	2.257e+002 : 2.432e+002
	2.083e+002 : 2.257e+002
	1.909e+002:2.083e+002
	1.735e+002:1.909e+002
	1.560e+002:1.735e+002
	1.386e+002:1.560e+002
	1.212e+002:1.386e+002
	1.038e+002:1.212e+002
	8.634e+001:1.038e+002
	6.892e+001:8.634e+001
	<5.149e+001:6.892e+001
Don	situ Plati Tamparatura (K)
Den	sity Flot: Temperature (K)

Siltuma jaudas plūsmas blīvums



Siltuma jaudas plūsmas blīvums







Šķērsgriezums



Temperatūras

	3.824e+002 : >4.000e+002
	3.649e+002 : 3.824e+002
	3.473e+002 : 3.649e+002
	3.298e+002: 3.473e+002
	3.122e+002: 3.298e+002
	2.947e+002 : 3.122e+002
	2.771e+002 : 2.947e+002
	2.595e+002 : 2.771e+002
	2.420e+002 : 2.595e+002
	2.244e+002 : 2.420e+002
	2.069e+002 : 2.244e+002
	1.893e+002 : 2.069e+002
	1.718e+002 : 1.893e+002
	1.542e+002 : 1.718e+002
	1.366e+002 : 1.542e+002
	1.191e+002 : 1.366e+002
	1.015e+002 : 1.191e+002
	8.398e+001:1.015e+002
	6.642e+001:8.398e+001
	<4.886e+001:6.642e+001
Dens	sity Plot: Temperature (K)



Siltuma jaudas plūsmas blīvums







91

Šķērsgriezums



Temperatūras

	3.826e+002 : >4.000e+002
	3.651e+002:3.826e+002
	3.477e+002:3.651e+002
	3.302e+002:3.477e+002
	3.128e+002: 3.302e+002
	2.953e+002:3.128e+002
	2.779e+002 : 2.953e+002
	2.605e+002 : 2.779e+002
	2.430e+002 : 2.605e+002
	2.256e+002 : 2.430e+002
	2.081e+002 : 2.256e+002
	1.907e+002:2.081e+002
	1.732e+002:1.907e+002
	1.558e+002:1.732e+002
	1.384e+002:1.558e+002
	1.209e+002:1.384e+002
	1.035e+002 : 1.209e+002
	8.603e+001:1.035e+002
	6.858e+001:8.603e+001
	<5.114e+001:6.858e+001
Den	sity Plot: Temperature (K)



Siltuma jaudas plūsmas blīvums

	7.326e+006 : >7.711e+006
	6.940e+006:7.326e+006
	6.555e+006:6.940e+006
	6.169e+006:6.555e+006
	5.784e+006:6.169e+006
	5.398e+006:5.784e+006
	5.013e+006:5.398e+006
	4.627e+006:5.013e+006
	4.242e+006:4.627e+006
	3.856e+006:4.242e+006
	3.471e+006:3.856e+006
	3.085e+006:3.471e+006
	2.700e+006:3.085e+006
	2.314e+006:2.700e+006
	1.929e+006:2.314e+006
	1.543e+006:1.929e+006
	1.158e+006 : 1.543e+006
	7.725e+005:1.158e+006
	3.870e+005:7.725e+005
	<1.522e+003:3.870e+005
Dens	ity Plot: F , W/m^2







Vidējās un integrālās siltuma plūsmas blīvumu un jaudu vērtības šiem variantiem dotas Tabulā n2.

							<u>Fabula n2</u>	<u>!</u>
Divrindu varianti	V2	¥21	V22	¥23	¥24	¥25	V26	V27
Dzesēšanas kanālu summārais virsmas laukums	S2, m2	4,38E-02	5,11E-02	5,77E- 02	4,38E- 02	3,21E- 02	6,57E- 02	5,11E- 02
Vidējā siltuma jaudas plūsma uz Li plēves laukuma	B # 11/m 7	4.54	5 86		5 33	3 40	774	7 20
Vienibu		4,34	3,00	7,40	3,33	3,40	/,/4	/,40
Jauda, kas tiek aizvadīta caur eksperimentālā moduļa Li plēvi uz dzesēšanas								
sistēmu	kW	/ 73,84	95,06	/ 153,91\	86,7	/ 55,29	126	117,15
Jauda, kas aiziet uz dzesēšanas sistēmas pirmo	1-137	52 52	7678		55 77	26.18	112.03	96 77
	<u>K vv</u>	32,32	/0,/0	(140,11)		30,10	112,05	80,77
Ga padeve dzesēšanas	1/ook	20	3.0		20	20	4.0	3.0
Sistema Co vidãia	1/ SCK	2,0	5,0	+,U	2,0	2,0	4,0	5,0
Ga videja sasilšana izejot caur divertora pamatnes modeļa dzesēšanas								
kanāliem	C	16,8	14.5	17.5	19.8	/ 12.6	14,4	17.8
Ga nadeve 1.		10,0	1 1,0	<u> </u>	<u> </u>			11,0
kanālu rindā	l/sek	1,1	1,6	2,1	0,9	1,1	2,1	1,4
Ga sasilšana izejot caur divertora pamatnes modeļa	C	22.5	21.9		27.3	15.1	24.0	28.3
Co atrume 1	C	22,5	21,5		21,5		24,0	20,5
kanālu rindā	m/sek	4,72	5,20	5,31	4,72	6,43	5,72	5,20
Vidējais siltuma jaudas, kas aiziet otrās rindas dzesēšanas kanālos, plūsmas			. 12					
blīvums	MW/m2	1,31	1,12	0,48	/ 1,9	/ 1,17	0,86	1,87
Jauda, kas aiziet uz dzesēšanas sistēmas otro kanālu rindu	W	21,32	18,28	7,8	30,93	19,11	13,97	30,38
Ga padeve 2.				\square			1	1
kanālu rindā	l/sek	0,9	1,4	1,9	1,1	0,9	1,9	1,6
Ga sasilšana izejot caur divertora								
pamatnes modeļa	С	10,4	6,0	1,9	13,2	9,6	3,4	8,7

2. kanālu rindu				\ge				
Ga ātrums 2. kanālu rindā	m/sek	4,72	5,20	5,31	4,72	6,43	5,72	5,20

Vienrindas varianti	V1	V11	V12	V13	VIA
		3,65E-	3.87E-	3,65E-	3,87E-
Dzesēšanas kanālu summārais virsmas laukums	S1, m2	02	62	02	<u> </u>
Vidējais siltuma jaudas blīvums uz Li plēves					
laukuma vienību	MW/m2	5,48	8,49	6,42	<u>/11,04</u>
Jauda, kas tiek aizvadīta caur eksperimentālā					
moduļa Li plēvi uz dzesēšanas sistēmu	kW	89,16	138,23	104,54	179,03
Ga padeve dzesēšanas sistēmā	l/sek	6,00	6,00	6,00	6,00
Ga ātrums kanālos	m/sek	6,79	5,97	6,79	5,97
Ga sasilšana izejot caur divertora pamatnes modeli	С	6,8	10,5	7,9	13,7

No vidējās siltuma jaudas blīvuma uz Li plēves laukuma vienību maksimālo lielumu viedokļa labākie varianti ir ar nerūsējoša tērauda kanālu aizsargčaulas biezumu 0,05mm. Taču tehnoloģiski tik plānu čaulu urbumos nav iespējams izveidot, tāpēc šie varianti V23, V12, V14 nav realizējami. Varianti V21, V24 ar čaulas biezumu 1 mm un V25 ar čaulas biezumu 2 mm, protams, nav konkurētspējīgi ar variantiem V11, V13, V22, V26, V27 ar čaulas biezumu 0,5 mm. Tehnoloģiski šādu čaulu ir iespējams ielodēt vara plāksnes riņķveida urbumos, nodrošinot pietiekami labu termisko kontaktu starp varu un nerūsējošo tēraudu. No variantiem V11, V13, V22, V26, V27 labāki ir V13, V26, V27, tie, kam attālums h no dzesēšanas kanāliem līdz Li plēvei ir mazāks. No tehnoloģiskiem apsvērumiem konkrētajam modelim Dzesēšanas kanālu garums ir 155 mm) šo attālumu nevar ņemt mazāku par 2 mm. Ja kanālu garums būs lielāks, tad h minimālā vērtība būs lielāka. No variantiem V13, V26, V27 labāki ir divrindu varianti V26, V27, jo tiem ir lielāks dzesēšanas kanālu summārais virsmas laukums, tātad būtisku lomu spēlē virsmas lielums, caur kuru siltuma jauda aiziet dzesētāja - šķidrajā Ga. Lai nodrošinātu labu siltumpārvadi no nerūsējoša tērauda aizsargčaulas uz šķidro Ga, siltumatdeves koeficientam jābūt 40000 - 60000 W/m2/K robežās. Att.5.10 parādīts siltumatdeves koeficienta novērtējums atkarībā no ātruma/diametra attiecības parametra analizējamās konstrukcijas dzesēšanas sistēmai Ga temperatūru diapazonā 50 – 150 C.



Att.5.10. Siltumatdeves koeficienta novērtējums.

Redzams, ka_parametram jābūt robežās 200 – 400. Tas nozīmē, ka pie Ga ātrumiem līdz 5 - 6 m/sek nepieciešamo rezultātu var sasniegt tikai, ja kanālu diametrs nepārsniedz 10 -12 mm.

Secinājums

Maksimālais siltuma jaudas plūsmas blīvums, kas sasniedzams ar Att. 5 .8. parādītās konstrukcijas divertora pamatnes modeli, kas tiek dzesēts ar šķidro Ga, ir 7 – 8 MW/m2.

Aktivitātes Nr.5., ietvaros Rīgas Tehniskās Universitātes Ķīmijas Institutā tika izstrādāta tehnoloģija un izgatavots divertora plaknes modelis, att. 5.11.





Att.5. 11. Divertora plaknes modelis

- 1.S.S.Kutateladze, V.M.Borishansky. Spravochnik po teploperedache, GEI, Leningrad-Moskva, 1959.
- 2.Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, User's Manual, October 16, 2010, David Meeker, <u>dmeeker@ieee.org</u>, 2010.
- 3.F. M. White, *Heat and mass transfer*, Addison-Wesley, 1988.
- 4.R. Haberman, *Elementary applied partial differential equations*, Prentice-Hall, 1987.
- 5.P. E. Allaire, Basics of the finite element method, 1985.
- 6.R. W. Freund, "Conjugate gradient-type methods for linear systems with complex symmetric coefficient matrices," SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing, 13(1):425-448, January 1992.
- 7.E. F. D'Azevedo, P. A. Forsyth, and W. Tang, "Ordering methods for preconditioned conju- gate gradient methods applied to unstructured grid problems," SIAM J. Matrix Anal. Appl., 12(4), July 1992.
- 8.D. A. Lowther, E. M. Freeman, and B. Forghani, "A sparse matrix open boundary method for finite element analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, 25(4)2810-2812, July 1989.

Raksti.

A. Shishko etc. "Magnetic field influence on gravitational super thin film flow of liquid metal in the divertor zone of spherical Tokamak."

Konferences:

E.Platacis, A.Sobolevs, AShishko "**Difficulties of creation of thin lithium film on the stainless steel substrate'' 3rd International Symposium on Lithium Applications for Fusion Devices** Frascati, Italy ,October 9-11, 2013

> European regional development fund Project Nr. 2DP/2.1.1.0/10/APIA/VIAA/176

Patenti:

•

K. Kravalis etc. "A cooled divertor module for plasma treatment" (iesniegts 09.2013.)

Kopsavilkums.

- 1. Projekta laikā (01.10. 2010. 30. 09. 2013.) praktiski izpildīti visi darbi saskaņā ar atsevišķās aktivitātēs (kopā 5) plānoto darbu programmu.
- 2. Nopublicēti ? raksti, iesniegti un akceptēti publicēšanai ? raksti, nolasīti referāti ? konferencēs, iesniegs starptautiskais patents.
- 3. Noslēgti 4 līgumi, no kuriem 3 ar ārzemju instancēm:
- "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan";
- "Technical University Applied Physics" St. Petersburg, Russia;
- "Tokamak solutions UK Ltd Culham Innovation Centre" England un
- Rīgas Tehniskās Universitātes Ķīmijas Institūtu.