

**EIROPAS REĢIONĀLĀS ATTĪSTĪBAS FONDS**

**Uzlabota tehnoloģija protonu - neitronu  
konvertoru šķidra metāla sistēmu izveidei**

**Projekts Nr. 2DP/2.1.1.1.0/10/APIA/VIAA/166  
(Noslēguma atskaite)**

**2010-2013**

Projektā  
piedalījās:

1	Platacis	Ernests
2	Bucenieks	Imants
3	Kļukins	Aleksandrs
4	Buligins	Leonīds
5	Romančuks	Alberts
6	Freibergs	Jānis
7	Lipsbergs	Guntis
8	Goldšteins	Linards
9	Kravālis	Kalvis
10	Ziks	Anatolijs
11	Broka	Maija
12	Lūķis	Pēteris
13	Pagasts	Inguss
14.	Mauriņš	Dainis
15.	Fjodorovs	Viktors
16.	Krisjko	Staņislavs
17.	Skudra	Atis
18.	Gavare	Zanda
19	Švāgere	Anda

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

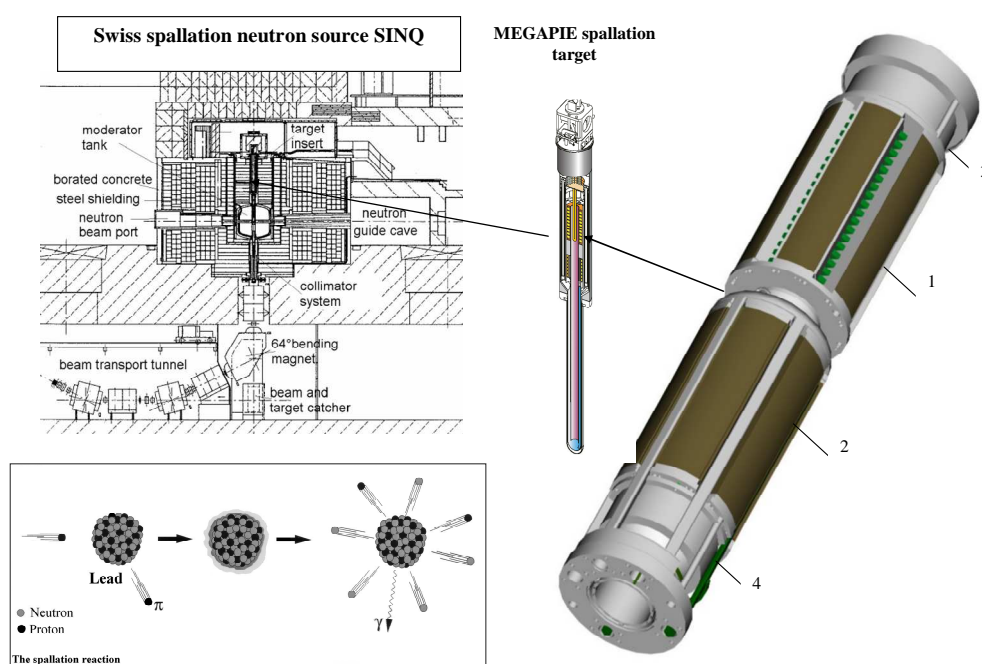
Satura rādītājs	
Ievads .....	4
Aktivitāte Nr. 1 - Neitronu atskaldīšanas prasībām atbilstošo darba materiālu salīdzinājums un atlase. ....	6
Dzīvsudrabs (Hg).....	6
Svina – bismuta (PbBi) eitektika .....	7
PbAu iitektika.....	8
Secinājumi.....	11
Aktivitāte Nr.2." Parametru izvēle šķidra metāla kustībai protonu stara mērķī" Prototipa izvēlēto mezglu optimizēšana ar skaitlisku datortsimulāciju palīdzību. Prototipa izvēlēto mezglu optimizēšana ar skaitlisku datortsimulāciju palīdzību. ....	12
Protonu mērķis. ....	12
Siltumfizikālie aspekti. ....	12
Konventīvā siltuma pārnese .....	14
Konduktīvā siltuma pārnese.....	15
Eksistējošie protonu mērķi.....	16
Siltumpārnese turbulentā plūsmā vienādojumi .....	18
ESS iespējamās protonu mērķa konstrukcijas .....	20
Ātrumu sadalījuma ietekme uz raksturīgajām $t^0$ vērtībām protonu mērķī.....	23
Protonu mērķa siltuma avotu modelēšana ar pastāvīgas strāvas Džoula siltuma avotu palīdzību.....	25
Cietā protonu mērķa termo-hidraulisko parametru novērtējums. Stacionārs mērķis.....	33
Dzesēšana ar hēliju .....	35
Dzesēšana ar ūdeni.....	37
Dzesēšana ar galliju .....	38
Cietā protonu mērķa termo-hidraulisko parametru novērtējums. Rotējošs mērķis .....	39
Secinājumi.....	44
Izmantotā literatūra .....	44
Aktivitāte Nr.3. Metodikas un aprīkojuma izstrāde ekoloģisko prasību nodrošināšanai darbam ar dzīvsudrabu.* .....	46
Biežāk izmantotās dzīvsudraba daudzuma noteikšanas metodes un aparatūra ...	48
Atomu absorbcijas un fluorescences spektrometrijas metodes.....	49
Literatūra.....	51
Aktivitāte Nr.4. Daļiņu konversijas iekārtām atbilstoša specifiska MHD aprīkojuma izstrāde .....	52
Protonu – neitronu mērķis.....	55
Cilindriskais Pastāvīgo Magnētu Sūknis Pb-Bi eksperimentālam kontūram .....	57
Caurteces mērītāju izstrāde .....	60
Aktivitāte Nr.5. Kompakta mērķa stacijas izveidei ieteikto jauno konstruktīvo risinājumu pārbaude/demonstrācija speciālā stendā .....	62
Siltumpārnese un šķidrā metāla plūsmu modelēšana PbBi kontūrā.....	65
Vibrāciju izvērtēšana kontūrā .....	77
Mērīšana.....	78
Mērījumu analīze .....	80
Secinājumi.....	81
Dzīvsudraba kontūrs .....	82
Secinājumi.....	84
Kopsavilkums. ....	84

## Ievads

Neitronu izkliede nodrošina bāzi materiālu struktūras un dinamikas izpētei, kas liek pamatu materiālu zinātnes, ķīmijas, zemes zinātnes, fizikas, kondensētas matērijas izpratnei. Neitroni ir sarežģītas instrumentu iekārtas vitāla komponente. Tā ļauj matērijas struktūras un kustības zondēšanu molekulārā un mikroskopiskā līmenī, nodrošina augstākā līmenī kā dzīves procesu tā arī moderno industriālo materiālu funkcionēšanas izpratni.

Eiropa ir viena no līderēm šajā zinātnes laukā un prezentētais priekšlikums ir saistīts ar šķidro metālu pielietojšanas iespēju atskaldīto neitronu ģenerācijas sistēmās.

Pirmo reizi Eiropā neitroni ar definētu enerģijas līmeni tika „atskaldīti” MEGAPIE projekta ietvaros. Arī Latvijas Universitātes Fizikas institūts (LUFİ) piedalījās minētā projekta ietvaros. Tika izstrādāta, izpētīta un instalēta atskaldīto neitronu iekārtā elektromagnētisko sūkņu sistēma siltumnesēja (PbBi sakausējuma) cirkulācijas nodrošināšanai kontūrā, att.1. Darba temperatūra – 400C°.



UNIVERSITĀTE DE LATVIJAS  
Institute of Physics

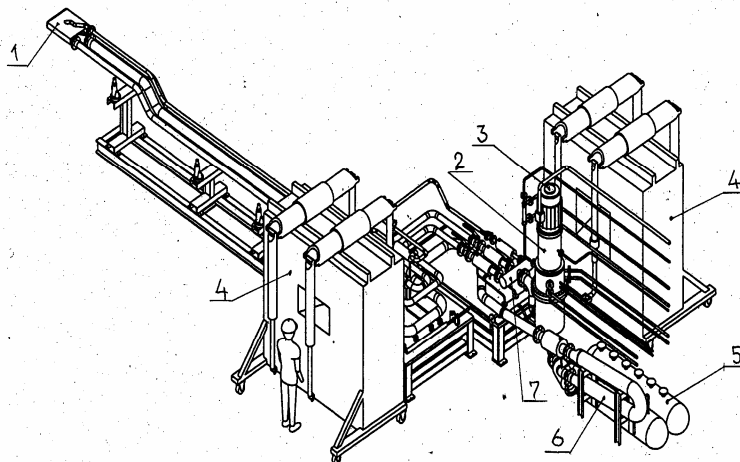
Att.1.

EMP sūkņu sistēma instalēta MEGAPIE atskaldīto neitronu iekārtā.

Aptuveni tanī pat laikā SNS (ASV, Oak Ridge Nacionālā laboratorija) projekta ietvaros neitroni tika „atskaldīti” arī ASV, kā mērķa materiālu izmantojot Hg, att.2.



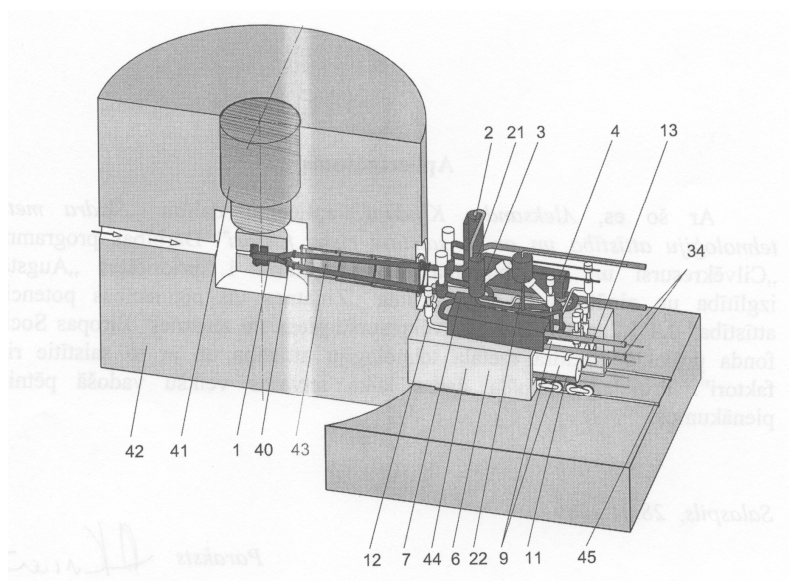
Arī te amerikāņu speciālisti vispirms detalizēti iepazinās ar LU Fizikas institūta Hg laboratorijas aprīkojumu un pieredzi. Pirmais SNS stends paātrināto protonu iestarošanai dzīvsudrabā arī tika izgatavots LUFI. Sevišķi jāatzīmē jau konkrēti iepļānotā Latvijas līdzdalība Eiropas Atskaldīto Neitronu Avota ESS (European Spallation Source) izveidē un ekspluatācijā, kas iecerēta kā multi-disciplināra pētnieciska laboratorija, balstīta uz pasaulē jaudīgāko neitronu avotu, att.3.



Att.2.

SNS atskaldīto neitronu iekārta

1 – neitronu mērķis, 2 – gāzes kondensators, 3 – mehāniskais sūknis,  
4 – aizsardzības siena, 5 – dzīvsudraba tvertne, 6 – siltummainis, 7- kontūra kolektors.



Att.3.

Eiropas atskaldīto neitronu iekārtas (ESS-2003) principiālā shēma

1 – atskaldīto neitronu mērķis

## Aktivitāte Nr. 1 - Neitronu atskaldīšanas prasībām atbilstošo darba materiālu salīdzinājums un atlase.

Neitronu atskaldīšana sākotnēji tika veikta cieta materiāla (volframa) mērķos. Tomēr zemās volframa siltumvadāmības dēļ tā izmantošana ir ierobežota, it īpaši pie nosacīti lielām protona kūļa jaudām. Tāpēc tiek meklēti alternatīvi materiāli.

Dzīvsudrabs un svina bismuta sakausējums tiek uzskatīti par galvenajiem darba ķermeņiem atskaldīto neitronu iekārtās.

Abi šie metāli raksturojas ne tikai ar labām termo-hidrauliskām īpašībām (elektrovadāmība, siltumietilpība, zema viskozitāte), bet arī ar augstu kapacitāti neitronu ražošanā to atskaldīšanas procesā.

### **Dzīvsudrabs (Hg).**

Pēc pašreizējās pieredzes atskaldīto neitronu iekārtās līderis ir dzīvsudrabs Hg. To jau reāli izmanto SNS neitronu atskaldīšanas iekārtā ASV un JAERI /KEK Japānā, kā arī BARC iekārtā Indijā.

Dzīvsudrabs ir samērā inerts metāls ar viszemāko kušanas temperatūru, normālos apstākļos dzīvsudrabs ir šķidrums. Dabā dzīvsudrabs ievērojamos daudzumos ir sastopams oksīda veidā. Dzīvsudrabs veido sakausējumus ar ļoti daudziem metāliem, ieskaitot zeltu, alumīniju un sudrabu, bet ne ar dzelzi. Savienojumos dzīvsudrabam parasti ir vērtība +1 vai +2, ļoti retos gadījumos var būt arī +3. Tīrs dzīvsudrabs nav pārāk toksisks, taču tā organiskie savienojumi (it īpaši metīldzīvsudrabs) ir ļoti toksiski. Dzīvsudrabam ir samērā laba korozijas izturība un tā savienojumi ir diezgan nestabili. Dzīvsudrabu rūpnieciski iegūst no cinobra rūdas. Viena no galvenajām dzīvsudraba priekšrocībām ir tā, ka tas ir šķidrums pie istabas temperatūras, otra – tam nav kristāliskas fāzes.

Konstrukcijas materiālu korozija dzīvsudrabā ir diezgan sīki izpētīta. Te jāatzīmē viegla konstrukcijas materiālu šķīšana dzīvsudrabā. Tās intensitāte ir atkarīga no temperatūras. Arī dzīvsudraba ietekme uz konstrukcijas materiāliem (piemēram uz nerūsējošo tēraudu) ir niecīga. Tikmēr erozijas procesi var tik novēroti dzīvsudraba kontūros, it īpaši pie šķidrā metāla ātrumiem lielākiem par 3m/s.

Te jāatzīmē LU Fizikas Institūta potenciāls – unikālā Hg laboratorija, kā arī pieredze atskaldīšanas iekārtu prototipu izstrādē.

## Svina – bismuta (PbBi) eitektika

Savukārt Eiropā pirmajā lielas jaudas projektā MEGAPIE darba materiāls bija PbBi eitektika.

Pb – 44,5%

Bi - 55,5%

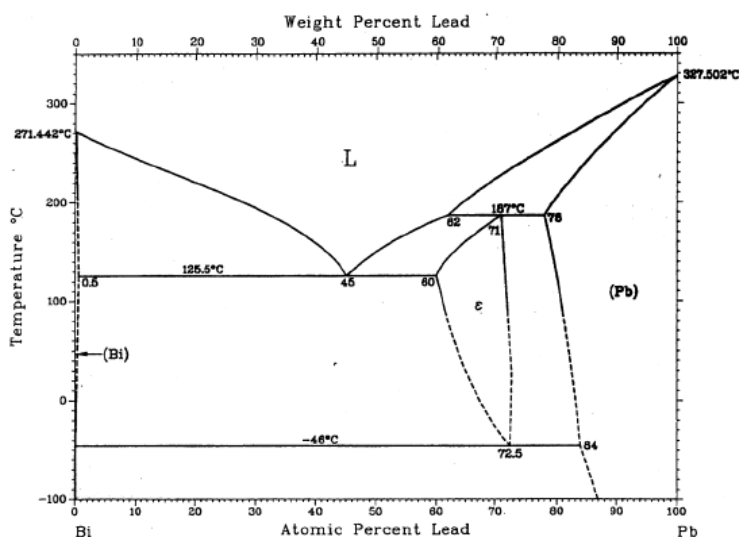
Savas zemās ķīmiskās aktivitātes dēļ svina – bismuta eitektika, saskaroties ar gaisu, ūdeni, vai tā tvaikiem ir uguns un eksplozijas drošs sakausējums. Zems darba spiediens šķidrā metāla kontūrā palielina visas iekārtas drošumu, vienkāršo iekārtas ekspluatāciju. Tomēr kā vienu no negatīvajām eitektikas īpašībām jāatzīmē, ka tam sacietējot palielinās tilpums aptuveni par 1%. Tas var izsaukt papildus spriegumus konstrukcijas elementos un novest pie to bojājumiem.

No PbBi eitektikas fāzu diagrammas, att.1.1. redzams, ka tā kušanas temperatūra ir diezgan zema - 135°C.

Vārīšanās temperatūra - 1670 °C;

Blīvums - 10730 kg/me<sup>3</sup>.

Tas nozīmē, ka darba temperatūra reālā atskaldīto neitronu iekārtā varētu sasniegt pat 300 °C. Pie tāda temperatūras līmeņa darba ķermenis (PbBi) attiecībā pret konstrukcijas materiāliem jau ir diezgan agresīvs.. Tas nozīmē, ka korozijas materiāli apdraud kontūru piesārņošanu un apgrūtina iekārtas ekspluatāciju. Tomēr kā galveno negatīvo eitektikas PbBi īpašību jāatzīmē tas, ka atskaldīto neitronu reakcijas rezultātā rodas radioaktīvi un ilgdzīvojoši polonija izotopi. Bet tā jau ir „inde.”



Att. 1.1. PbBi fāzu diagramma.

Tomēr, neskatoties uz to daudzajām ekspluatācijas priekšrocībām, fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām, minētajiem darba ķermeņiem ir arī virkne ierobežojošu faktoru – augsts tvaiku spiediens, zema vārīšanās temperatūra (Hg), augsta darba temperatūra, korozijas procesi, polonija izotopu rašanās ekspluatācijas laikā (PbBi) u.c. Tas ir pamats jaunu materiālu meklējumiem.

## **PbAu ietekmība.**

Būtiska iecere ir paplašināt potenciāli iespējamo darba materiālu klāstu ar ekoloģiski daudz drošākiem metāliem, vai to sakausējumiem.

Kā viens no pretendentiem uz darba ķermeni atskaldīto neitronu iekārtās tiek minēts arī svina zelta sakausējums. Toties kā darba ķermenis atskaldīto neitronu iekārtās tas ir maz izpētīts.

Šis materiāls ir diezgan eksotisks un tā praktiska izmantošana saistīta ar daudziem nezināmajiem:

- kā izgatavot attiecīgu svina un zelta sastāvdaļu sakausējumu;
- cik homogēns būs sakausējums;
- kāda tā sadarbība ar konstrukcijas materiāliem.

Tāpēc ir jāapgūst PbAu sakausējuma ieguves tehnoloģija, jāizpēta tā termo hidrauliskās īpašības, jāizvērtē korozijas aktivitāti un tā savienojamību ar konstrukcijas materiāliem.

Šinī sakarībā LU Fizikas Institutā sadarbībā ar Šveices Pola Šērera institūtu tiek veikta šī sakausējuma tehnoloģisko un fizikālo īpašību izpēte.

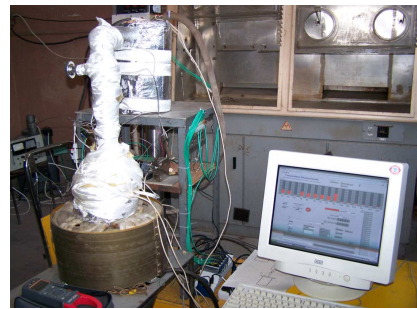
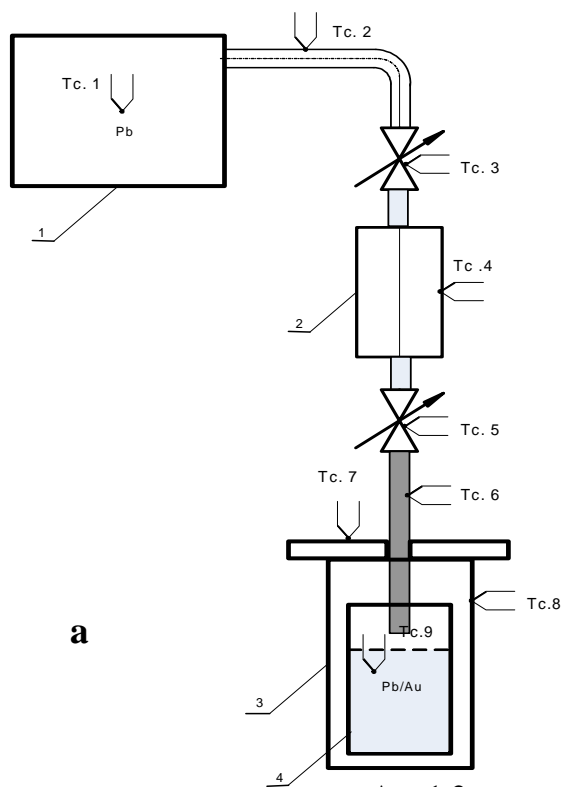
Svina - zelta sakausējuma iegūšanas tehnoloģisko uzdevumu aprūstina tas, ka svins ir stipri oksidējošs metāls. Tā virsma jau pārklājas ar oksīdu kārtu pat pie mīnus zīmes temperatūras. Bez tam jebkurš svina lējums satur ievērojamu daļu oksīdu ieslēgumu veidā. No teiktā izriet, ka nav iespējams iegūt brīvu no oksīdiem svina - zelta sakausējumu vienkārši saliekot tīgelī svina un zelta gabalus vajadzīgā proporcijā.

Otrais tehnoloģiskais uzdevums bija tas, ka lai iegūtu homogenu PbAu sakausējumu, procesa laikā ir jāveic abu komponentu aktīva samaisīšana.

Pirmais uzdevums, svina - zelta bezoksīdu sakausējuma iegūšana, ir atrisināts pēc LUFU izstrādātās shēmas, att.1.2. un LUFU darbnīcā izgatavotās iekārtas. Saskaņā ar principiālo shēmu svina daudzums, kas ievērojami pārsniedz sakausējumam vajadzīgo, tiek ielikts vakuumbūvējamā un ar inerto gāzi (Ar) piepildītā svina tvertnē 1. Kausēšanas procesā tvertni vakuumē. Kad svins tvertnē un zelts tīgelī 4 ir izkausēti, un sasniegtas sakausējuma iegūšanai vajadzīgās temperatūras, svinam 520°C, zeltam virs 1060°C tiek atvērts iekārtas augšējais vents un ar inertās gāzes spiedienu no svina tvertnes tiek piepildīts svina dozators 2, kura tilpums precīzi atbilst tam svina daudzumam, kas nepieciešams dotajam sakausējumam. Svinu ņem no tvertnes vidus daļas, jo tur praktiski nav oksīdu. Pēc dozatora aizpildīšanas aizver augšējo ventīli un atver apakšējo. Dozēts svina daudzums tiek ievadīts tīgelī ar izkausētu zeltu. PbAu sakausēšanai izmatotie tīgeļi ir izgatavoti no alumīnija oksīdu keramikas „Alsint”, ir ķīmiski neitrāli un ar temperatūras izturību līdz 2000°C.

Tīgeļa karsēšanas tinums ir uztīts ar elektriskās pretestības vadu no materiāla „Tanthal”, kam darba temperatūra ir līdz 1400°C.

Otrais uzdevums tika atrisināts ar to, ka PbAu sakausēšanas korpuss ar tīgeli tajā tika ievietoti 3 fāzu induktorā 3. Induktorā skrejošais magnētiskais lauks rada šķidro PbAu metālu rotācijas un virpuļu kustību tīgelī. Līdz ar to kausēšanas procesā tiek panākta abu komponentu aktīva samaisīšanās.

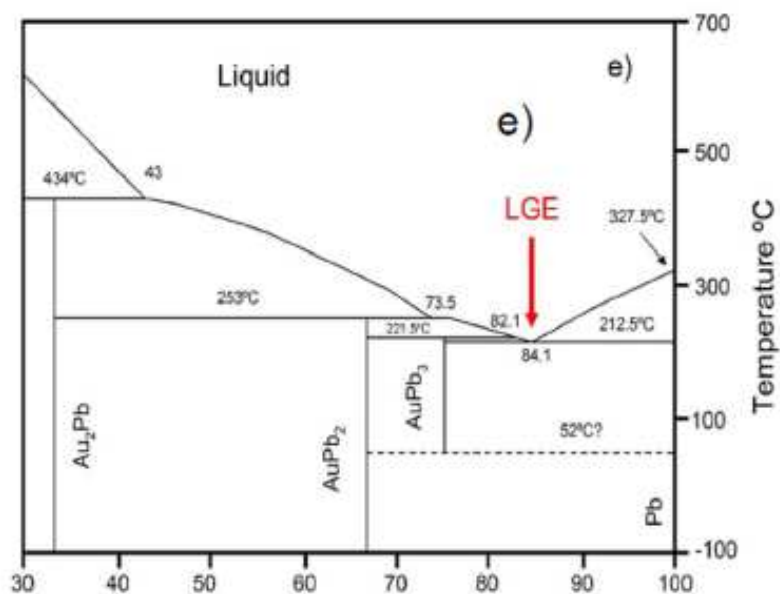


Att. 1.2.

Svina- zelta sakausējuma ieguves iekārta

a - svina- zelta sakausējuma ieguves iekārta; (1- svina tvertne; 2- svina dozators; 3- induktors; 4- tīģelis); b – zelta stienīši; c – PbAu sakausējuma

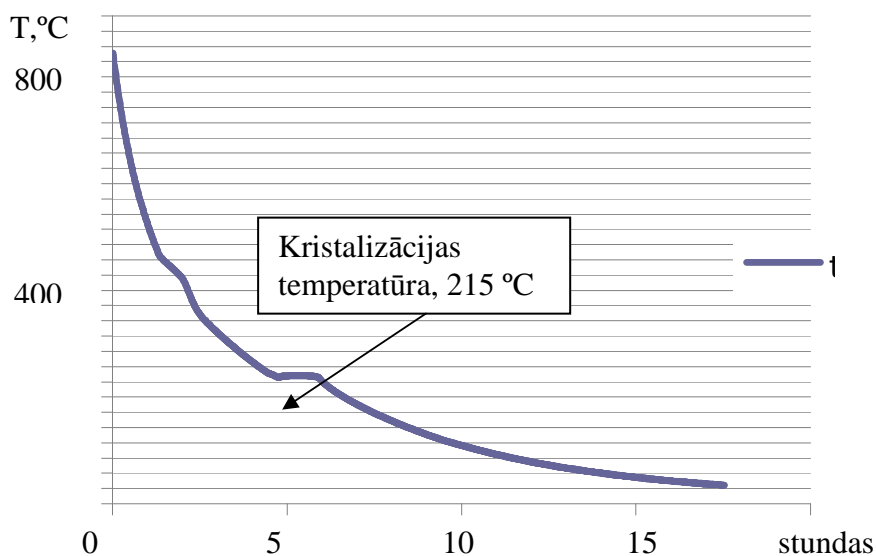
Kā parādīts svina - -zelta eitektikas fāzu diagrammā tā kušanas temperatūra ir 212,5°C, att.1.3.



Att. 1.3.

PbAu sakausējuma fāzu diagramma.

Saskaņā ar iegūtā svina – zelta paraugu kristalizācijas procesa līkni kušanas – sacietēšanas temperatūra (215 °C), att.1.4. ir ļoti tuva teorētiskai, (sk.att.1.3.) Tas raksturo izstrādātā tehnoloģiskā procesa kvalitāti. Nākošais solis varētu būt zelta un svina komponentu sadalījuma iznēte sakausējumā paraugos

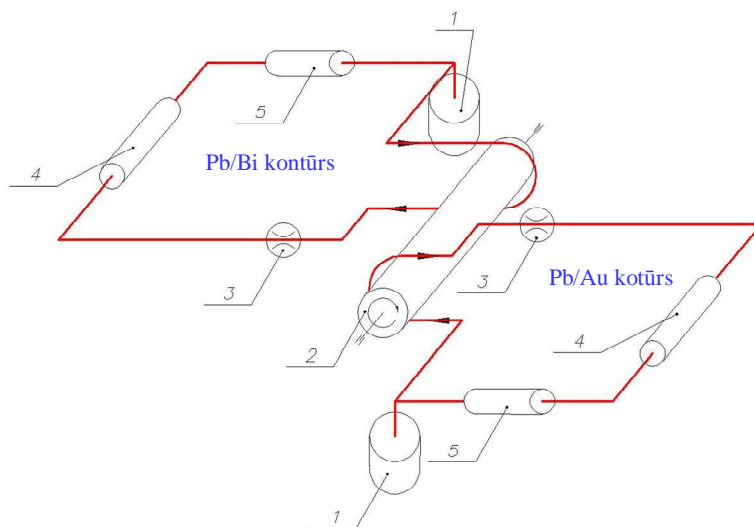


Att.1.4

PbAu eitektikas kristalizācijas raksturlīkne.

Kā jau iepriekš minēts šķidro metālu vai to eitektiku izmantošanas iespējai atskaldīto neitronu iekārtās ir prasība, lai pielietojamais materiāls izsauktu iespējami mazāku konstrukcijas elementu koroziju.

Korozijas testa veikšanai LU Fizikas institūtā tika izstrādāta divu kontūru konstrukcija, no kuriem vienā kontūrā cirkulē PbBi eitektika, bet otrajā - PbAu eitektika, att.1.5. Testa sekcijās ir iemontēti identiska materiāla paraugi korozijas testam. Eitektiku cirkulācijas ātrumi abos kontūros praktiski ir vienādi - aptuveni – 1m/s. Tas dod iespēju salīdzināt konstrukcijas materiālu korozijas intensitāti abos sakausējumos, pie tam identiskos apstākļos. Testa sekciju temperatūra tiek automātiski uzturēta  $400 \pm 2^\circ\text{C}$ , jeb 1% robežās.

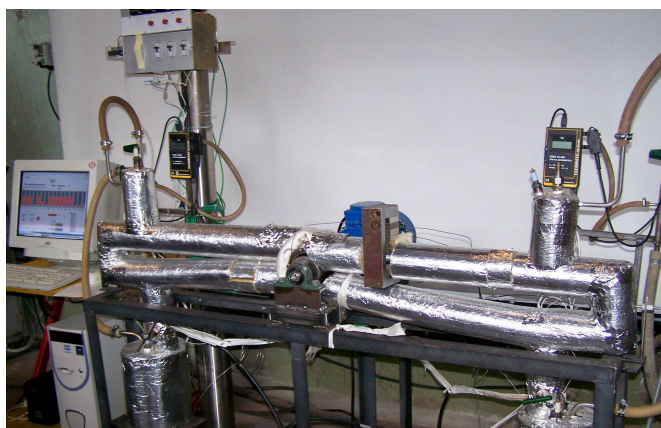


Att.1.5. PbBi un PbAu sakausējumu korozijas stenda principiālā shēma.

1 – sakausējumu tvertnes; 2 – elektromagnētiskais sūknis; 3 – caurteces mērītāji; 4 – paraugu testēšanas sekcijas; 5 – siltummaiņi.

Stends ir aprīkots ar pilnu temperatūras sadalījuma automātisku regulēšanu un mērīšanu, att.1.6.

Mērīšanu ar rezultātu pierakstu nodrošina datorsistēma ar firmas „National Instruments” FieldPoint komplektu un LabView programmatūru.



Att. 1.6. PbAu - PbBi korozijas testēšanas stends

Nerūsejošā tērauda paraugi tika ievietoti kā PbAu sakausējumā, tā arī PbBi sakausējumā. Eksperimenti tika veikti pie temperatūrām 350C un 400C. Analīžu rezultāti parādīja, ka svina – zelta sakausējuma tērauda paraugu korozija notiek nedaudz intensīvāk. Tomēr lai galīgi izvēlētos darba metālu atskaldīto neitronu iekārtai ir papildus jāveic detalizēta materiālu termisko un kodolfizikas parametru analīze, kā arī jāveic to attiecīga eksperimentāla pārbaude.

## Secinājumi

1. Izskatīti vairāki potenciāli pielietojami atskaldīto neitronu iekārtās šķidrie metāli un to sakausējumi (Hg, PbBi, PbAu) un izanalizētas to galvenās termo – hidrauliskās īpašības.
2. Izstrādāta PbAu svina oksīdu nesaturošas eitektikas iegūšanas tehnoloģija un eksperimentālā iekārta.
3. Eitektikas iegūšanas tehnoloģijas pamatā ir induktors ar rotējošo magnētisko lauku, kas rada šķidrā metāla griešanās un virpuļu kustību, tā panākot metālu komponentu labu samaisīšanos.
4. Neskatoties uz visatbilstošākajām šim mērķim dzīvsudraba īpašībām tā pielietošana jaudīgās atskaldīto neitronu iekārtās ir problemātiska tā nosacīti zemās vārīšanās temperatūras dēļ (320C), kā arī problēmām pie Hg utilizācijas iekārtas demontāžas laikā.
5. Tāpēc vispiemērotākais jaudīgās atskaldīto neitronu iekārtās varētu būt PbBi sakausējums. Šinī gadījumā jāpievērš uzmanība tam faktam, ka kodolreakcijas rezultātā rodas polonija izotops.
6. Kā potenciāls materiāls varētu tikt izskatīts arī PbAu sakausējums. Bet tādā gadījumā ir jāveic papildus konstrukcijas materiālu korozijas pētījumi.

## Aktivitāte Nr.2." Parametru izvēle šķidra metāla kustībai protonu stara mērķī" Prototipa izvēlēto mezglu optimizēšana ar skaitlisku datorsimulāciju palīdzību. Prototipa izvēlēto mezglu optimizēšana ar skaitlisku datorsimulāciju palīdzību.

### Protonu mērķis.

Viens no kritiskākajiem Eiropas neitronu avota (ESS) [1] elementiem ir smagā metāla mērķis, kurā notiek protonu neitronu ģenerācija protonu kūļa izraisīto kodolreakciju rezultātā. Ievērojama daļa no kopējās kūļa jaudas izdalās siltuma veidā nelielā tilpumā. Šis siltums jāizvada iespējami efektīvākā veidā, lai nepieļautu konstruktīvo materiālu deformēšanos un sabrukšanu. Šī atskaites sadaļa veltīta protona mērķa siltumfizikālo aspektu analīzei, lai nodrošinātu optimālu konstrukcijas izvēli.

### Siltumfizikālie aspekti.

Protonu kūļa, kas tiek iestarots smagā metāla mērķī parametri ir attēloti 1.tabulā. Kā redzams, tad protoni tiek iestartoti 1 mS impulsu veidā ar frekvenci 20 Hz. Pie 5 MW vidējās jaudas tas atbilst 250 MW momentānai jaudai katrā impulsā, kas raksturo siltuma pārneses svarīgo lomu mērķa konstrukcijas izvēlē.

1.Tabula. ESS neitronu avota protonu mērķa plānotie parametri.

Parameter	Symbol	Unit	Nominal value
<i>General</i>			
Beam particle	-	-	Proton
Energy	$E_b$	GeV	2.5
Average power	$P_b$	MW	5
<i>Profile</i>			
Beam width	$w_b$	[mm]	200
Beam height	$h_b$	[mm]	60
Horizontal sigma ( $w_b = 4 \sigma_x$ )	$\sigma_x$	[mm]	50
Vertical sigma ( $h_b = 4 \sigma_y$ )	$\sigma_y$	[mm]	15
<i>Timing and pulse information</i>			
Proton pulse duration	$t_p$	[ms]	1
Repetition rate	$f_p$	[hz]	20
Time between proton pulses	$t_p$	[ms]	50
Energy content of each proton pulse	$E_p$	[kJ]	250

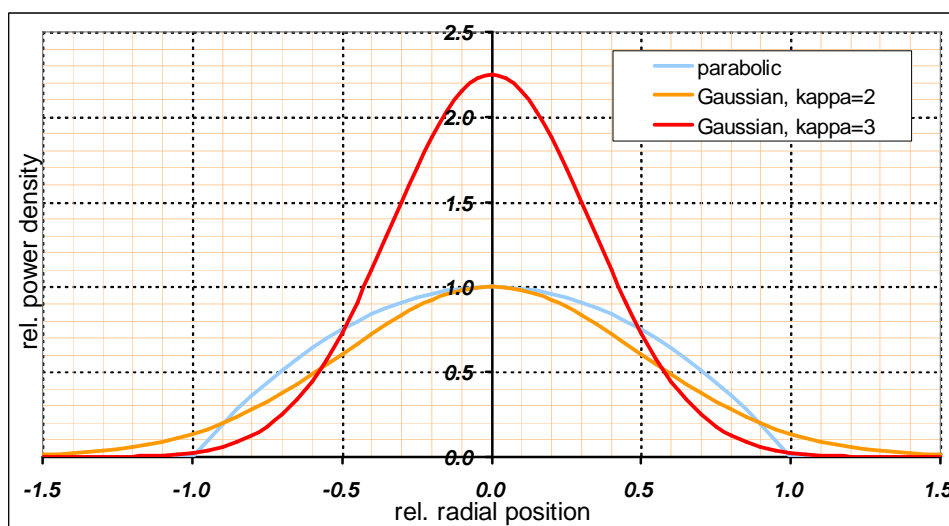


Ja kūlis ar šādiem parametriem tiek virzīts uz smago metālu mērķi, tad tajā izdalās siltums ar vidējo kopējo jaudu apm.  $P_Q=2.94$  MW. Jaudas blīvuma sadalījumus paraboliska un eksponenciāla stara gadījumos apraksta [2] ar formulām (1) un (2) un tie ir parādīti 2.1. un 2.2. attēlos.

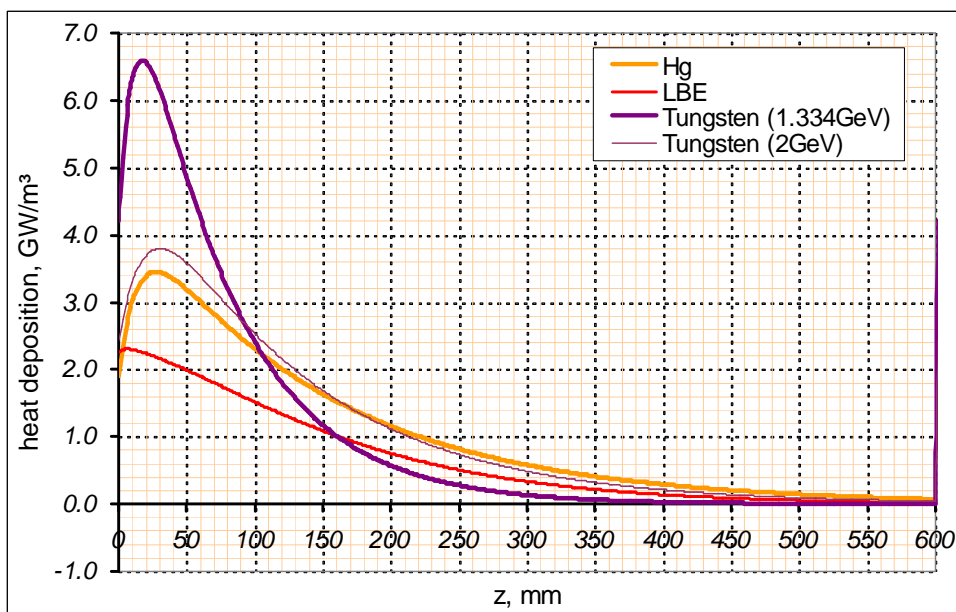
$$\bar{P}(x, y, z) = 4.6 \cdot 10^9 \frac{W}{m^3} \cdot e^{-\frac{z}{0.145m}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{8}{15} - \frac{z}{0.015m}} \right) \cdot \left[ 1 - \left( \frac{x}{0.1m} \right)^2 - \left( \frac{y}{0.03m} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\bar{P}(x, y, z) = \left( \frac{\kappa_\sigma}{2} \right)^2 4.6 \cdot 10^9 \frac{W}{m^3} \cdot e^{-\frac{z}{0.145m}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{8}{15} - \frac{z}{0.015m}} \right) \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \left( \frac{x}{0.1m/\kappa_\sigma} \right)^2 + \left( \frac{y}{0.03m/\kappa_\sigma} \right)^2 \right)} \quad (2)$$

Kā redzams no šiem attēliem un 1. tabulā dotajiem datiem, siltuma izdalīšanās notiek nelielā tilpumā ar izmēriem  $0.2 \times 0.6 \times 0.06$  m, kas ievērojami apgrūtina siltuma pārnesei problēmas.



Att.2. 1. Jaudas blīvuma sadalījumi protonu mērķī paraboliska un eksponenciāla stara gadījumos plaknē, kas perpendikulāra stara izplatīšanās virzienam.



Att.2.2 Jaudas blīvuma sadalījumi protonu mērķī paraboliska un eksponenciāla stara gadījumos stara izplatīšanās virzienā.

### Konvektīvā siltuma pārnese.

Konvektīvās pārnesei gadījumā enerģija, kas izdalās tilpumā, tiek pārnesta ar vides orientētu kustību. Tad siltuma plūsmas blīvums  $q \left( \frac{W}{m^2} \right)$ , kas raksturo enerģijas pārnesei cauri šķērsriezuma laukumam laika vienībā [3] var tikt uzrakstīts ar sekojošu formulu:

$$q = \rho c_p v \Delta T, \quad (3)$$

kur

$\rho$  - šķidruma blīvums  $\frac{kg}{m^3}$ ,

$c_p$  - īpatnējā siltumietilpība  $\frac{J}{kg K}$ ,

$v$  - šķidruma ātrums  $\frac{m}{s}$ ,

$\Delta T$  - temperatūras starpība  $K$ .

Temperatūras starpību  $\Delta T$  nosaka mērķī ienākošā  $T_{in}$  un izejošā  $T_{out}$  šķidruma temperatūru starpība:

$$\Delta T = T_{out} - T_{in}. \quad (4)$$

Ievēdot masas plūsmu  $\dot{m}$ , ko mēra  $\frac{kg}{s}$ , var noteikt no mērķa izejošā šķidruma temperatūru atbilstoši ESS protonu mērķa apstākļiem:

$$T_{out} = T_{in} + \Delta T = T_{in} + \frac{2.94 \text{ MW}}{\dot{m} \cdot c_p}, \quad (5)$$

piemēram, dzīvsudrabam ( $c_p = 136 \frac{J}{kg K}$ ) pie 13 l/s  $\Delta T = 124 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ja mērķī ieejošā dzīvsudraba temperatūra  $T_{in} = 100^\circ\text{C}$ , tad mērķa izejā  $T_{out} = 224^\circ\text{C}$ . Kā redzams, konvektīvā siltuma pārnese ir efektīvs siltuma pārneses veids, kas nodrošina nelielas temperatūru starpības.

Augstākminētie apsvērumi attiecas uz siltuma pārnesi tilpumā pie nosacījuma, ka viss šķidrums tilpums tiek uzsildīts par vienu un to pašu temperatūras starpību  $\Delta T$ . Lai to izdarītu, ātruma sadalījumam plūsmā ir jābūt piemērotam jaudas sadalījumiem (1) un (2). Ja tas netiek realizēts, tad mērķa tilpumā kādā punktā tiks sasniegta maksimālā temperatūra  $T_{V \max}$  un uz virsmas maksimālā temperatūra  $T_{S \max}$  un siltuma pārneses efektivitāti vairs neraksturos  $\Delta T$ , bet gan

$$\Delta T_V = T_{V \max} - T_{in} \quad (6)$$

un

$$\Delta T_S = T_{S \max} - T_{in}. \quad (7)$$

Tādējādi mērķa siltuma pārneses optimizācijas problēma reducējas uz lielumu  $T_{V \max}$  un  $T_{S \max}$  minimizāciju un to teorētiskā apakšējā robeža ir  $T_{out}$ .

## Konduktīvā siltuma pārnese

Konduktīvā siltuma pārnese raksturīga cietiem materiāliem un šķīdriem materiāliem miera stāvoklī. Siltuma plūsmas blīvums [3]  $q \left( \frac{W}{m^2} \right)$  ir:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (8)$$

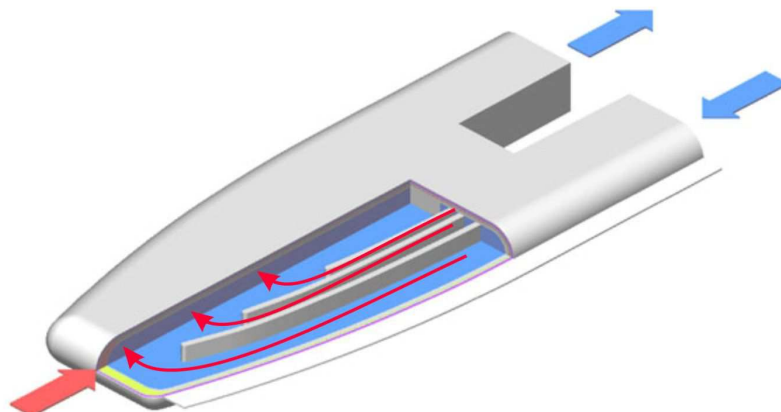
$\lambda$  - siltumvadīšanas koeficients  $\frac{W}{m K}$  (tipiski metāliem  $10 \cdot 10^2$ , piemēram, svins 34, volframs 170),

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$  - temperatūras gradients  $\frac{K}{m}$ .

Kā redzams no formulas (8), lai aizvadītu  $P_Q = 2.94 \text{ MW}$  cauri  $1 \text{ m}^2$  lielam laukumam, nepieciešams temperatūras gradients  $\frac{\Delta T}{\Delta x} = 2.94 \times (10^4 - 10^5) \frac{K}{m}$ , t.i. vairāki simti grādu temperatūras starpība pie raksturīgā izmēra  $10^{-2} \text{ m}$  (šāda izmēra struktūrās notiek siltuma izdalīšanās vairākās piedāvātās mērķa konstrukcijās, cannelloni, volframa rotējošais, u.c.). Tas norāda uz to, ka izmantojot konduktīvo siltuma pārnesi jārēķinās ar ievērojami lielākām temperatūras starpībām, nekā konvektīvās siltuma pārneses gadījumā. Jāatzīmē, ka siltums izdalās šādu struktūru tilpumā, tad tas konduktīvā ceļā tiek pārnesti līdz robežai ar dzesētāju, un tad sāk strādāt konvektīvā pārnese, tādējādi tīra konduktīvā siltuma pārnese protona mērķim nav realizēta nevienā konstrukcijā augsto temperatūru dēļ.

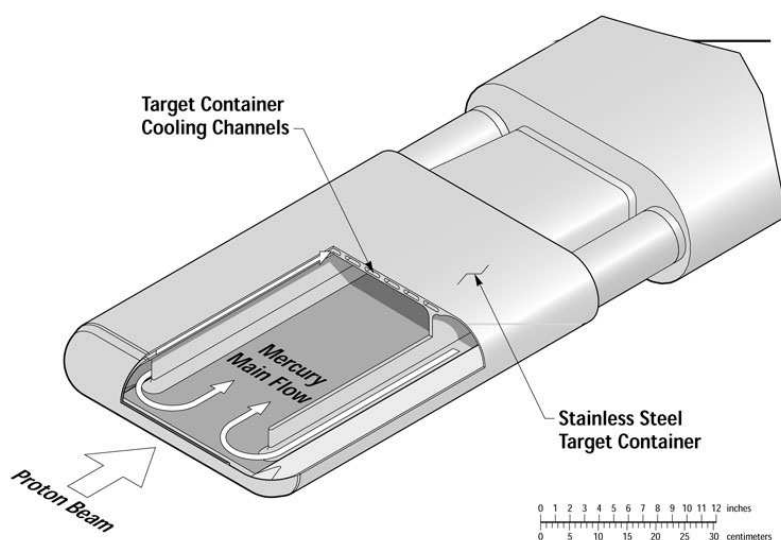
## Eksistējošie protonu mērķi.

Attēlos 2.3. un 2.4. parādītas divas eksistējošo protonu mērķu konstrukcijas, kas balstās uz konvektīvās siltuma pārnese principu. Japānas neitronu avota mērķī plūsmas tiek organizēta ar iekšējo sienu palīdzību, bet Amerikas protonu mērķī ir divas plūsmas – viena dzesē ārējo sienu, otra nodrošina siltuma pārnese tilpumā.



Att.2.3. Japānas neitronu avota JSNS dzīvsudraba protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konvektīvo siltuma pārnese. Parādīts plūsmas virziens mērķī.

JSNS neitronu avotā dzīvsudraba plūsma orientēta perpendikulāri protonu stara virzienam, bet SNS plūsma, kas dzesē mērķa ārējo sienu ir vērsta perpendikulāri protonu stara virzienam, savukārt plūsma, kas nodrošina siltuma pārnese no tilpuma ir orientēta stara virzienā. Jāatzīmē, ka izdevīgāk ir orientēt plūsmu perpendikulāri stara virzienam, tādējādi šķidrums visīsāko laiku uzturas zonā, kurā izdalās siltums. Ņemot vērā siltuma jaudas blīvuma sadalījumus paraboliska un eksponenciāla stara gadījumos (formulas (1) un (2)), var secināt, ka optimāls šķidruma kustības virziens ir vertikāls.

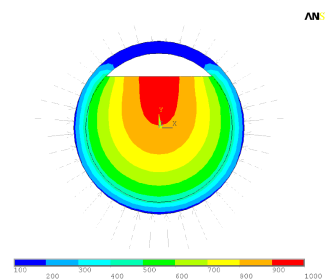
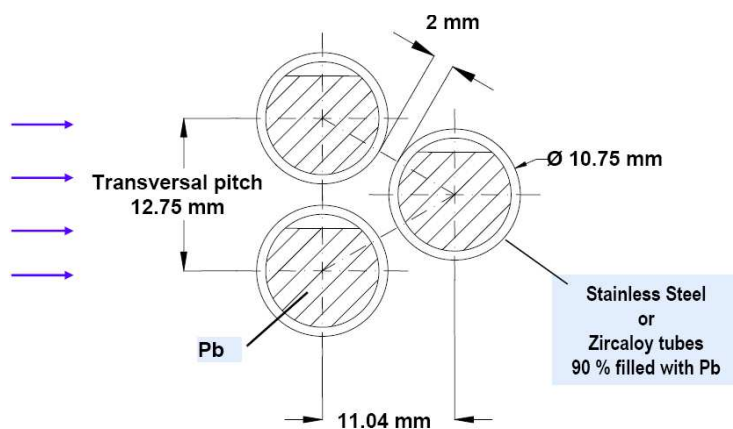


Att.2.4. Amerikas neitronu avota SNS dzīvsudraba protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konvektīvo siltuma pārnese. Parādīts plūsmas virziens mērķī.

Šveices Paula Šērera institūta protonu mērķis parādīts 2.5. un 2.6. attēlos. Šajā mērķī siltuma pārnese balstās kā uz konvektīvo, tā arī uz konvektīvo siltuma pārnese, attiecīgi arī raksturīgās maksimālās temperatūras ir ievērojami augstākas.



Att.2.5. Šveices neitronu avota svina protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konduktīvo siltuma pārnese nerūsējošā tērauda caurulē, kas daļēji aizpildīta ar svinu un ūdens kā dzesētāja konvektīvo siltuma pārnese. Parādīta mērķa konstrukcija [4].



Att.2.6. Šveices neitronu avota svina protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konduktīvo siltuma pārnese nerūsējošā tērauda caurulē, kas daļēji aizpildīta ar svinu un ūdens kā dzesētāja konvektīvo siltuma pārnese. Parādīta mērķa konstrukcijas shēma un temperatūras sadalījums caurules šķērs griezumā [4]. Maksimālā temperatūra stieņa iekšienē sasniedz 900 °C.

2.Tabula. Esošo un plānoto mērķa konstrukciju sasniegto un prognozēto parametru salīdzinājums [5].

Facility	Target	Damag e	Int. Beam	Max. Power	Max. current density	Max. charge density	Time Online
		[dpa]	[MW.hr]	[MW]	[ $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	[ $\text{C}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]	[weeks]
SINQ	Cannelloni Online	25	6840	0.86	31.4	900	104
	MEGAPIE predicted	6	1368	0.72	31.4	214	20
	MEGAPIE online	6.8	1678	0.78	31.4	243	18
SNS	Hg Predicted	10	5000	1.0	12.5?	225	52
	Hg Target 1 online	7.5	3055	0.85	12.5?	162	144
	Hg Target 2 online	7.2	3215	1.0	12.5?	145	52
	Rotating predicted	10	75000	1.5	27.2	4900	520
JSNS	Predicted (no cavitation)	5	6400	1.0	15.5	357	67
	Predicted (cavitation)	2	2500	1.0	15.5	140	26
ESS2003	Predicted [bauer, vlad]	10	7320	5.0	79.6	420	15
ESS2010	Predicted Hg [Ene]	10	10000	5.0	42.5	306	21
ESS2010	Predicted [He-cooled rot.]	10	400000	5.0	42.5	306	840

2. tabulā apkopoti dati par esošo un plānoto protonu mērķu konstrukciju parametriem. Kā redzams no tabulas, tad patlaban lielākās jaudas 1 MW līmenī ir sasniegtas ar dzīvsudraba mērķiem, kas darbojas uz konvektīvās siltuma pārnese principa. Svarīgs parametrs ir mērķu ilgmūžība megavatstundās (MW.hr). Šajā ziņā teorētiskas priekšrocības varētu būt rotējošiem mērķiem, kuri raksturojas ar ievērojami lielāku stara un mērķa mijiedarbības laukumu uz mērķa virsmas. Apvienojot rotējoša mērķa ilgmūžību ar šķidro metālu siltuma pārnese priekšrocībām būtu iespējams izveidot mērķa konstrukciju, kas būtu optimāla pēc vairākiem parametriem.

### Siltumpārnese turbulentā plūsmā vienādojumi.

Turbulentas plūsmas aprakstam izmanto modeļus, populārākie no kuriem balstās uz t.s. Reinoldsa vidējoto Navjē-Stoksa vienādojumu (*Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations*) izmantošanu [9]:

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial U_j U_i}{\partial x_j} = \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -P \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right] \quad (9)$$

kur  $\rho, \mu, \nu = \mu / \rho$  – dinamiskā un kinemātiskā viskozitātes, blīvums,  $P$  – laikā vidējotais spiediens,  $U_i, f_i$  – laikā vidējotās ātrumu un spēku komponentes,  $u_i$  – ātrumu pulsācijas,  $\overline{\rho u_i u_j}$  – turbulētie (Reinoldsa) spriegumi,

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (10)$$

$\mu_t$  – turbulētā viskozitāte,  $k$  – turbulences kinētiskā enerģija. Šajā darbā izmantotajā turbulences SST  $k - \omega$  modelī izmanto pārneses vienādojumus:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (12)$$

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (13)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (14)$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega} \right]} \quad (15)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{1-F_1}{\sigma_{k,2}}} \quad (16)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{1-F_1}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (17)$$

$$F_1 = \tanh \left[ \left( \min \left( \max \left( \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right); \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right) \right)^4 \right] \quad (18)$$

$$F_2 = \tanh \left[ \left( \max \left( 2 \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right) \right)^2 \right] \quad (19)$$

$$D_\omega^+ = \max \left( 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}; 10^{-10} \right) \quad (20)$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (21)$$

Modeļa attiecīgo konstanšu vērtības ir:

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1-F_1) \beta_{i,2} \quad (22)$$

$$\sigma_{k,1} = 1.176, \sigma_{\omega,1} = 2.0, \sigma_{k,2} = 1.0, \sigma_{\omega,2} = 1.168, \alpha_1 = 0.31, \beta_1 = 0.075, \beta_2 = 0.0828 \quad (23)$$



Siltuma pārnesei apraksta vienādojumi:

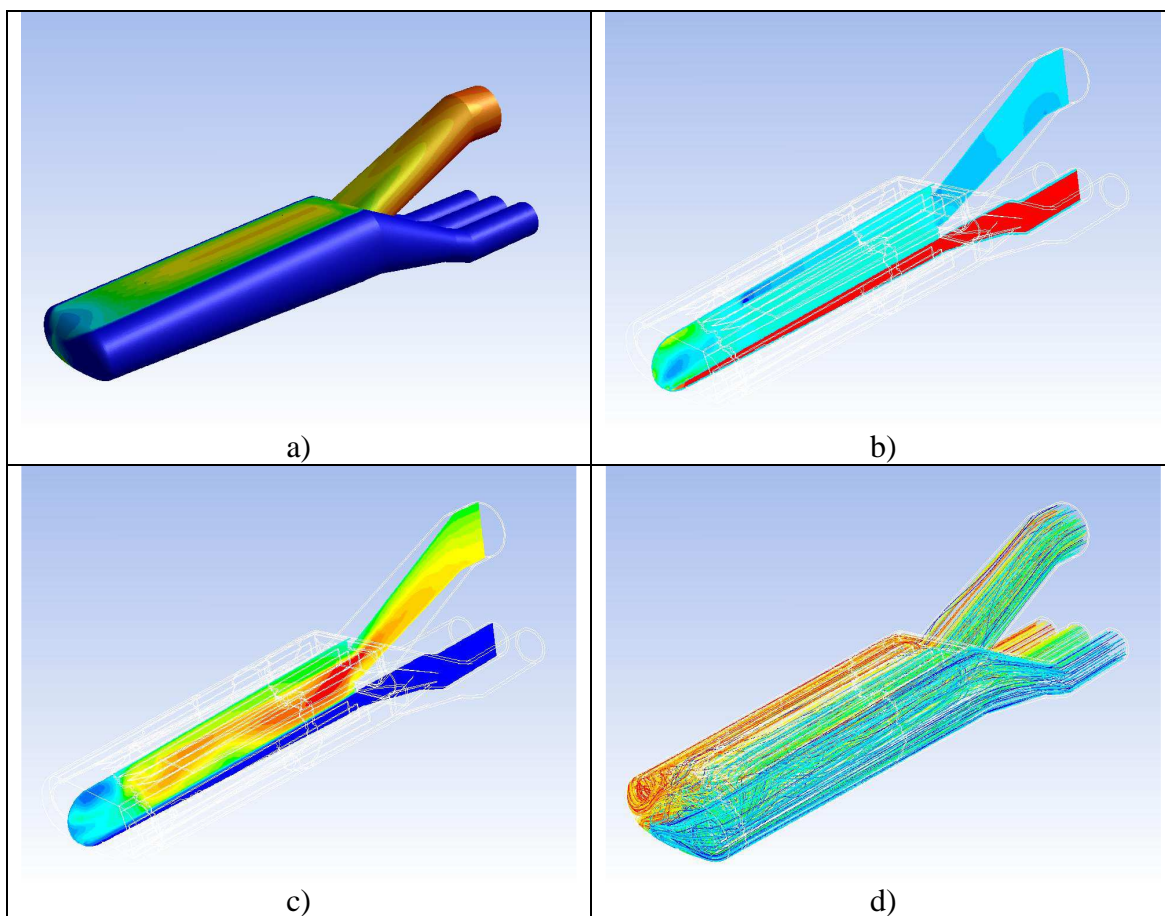
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + Q \quad (24)$$

kur  $Q$  – siltuma avotu blīvums.

Protonu mērķī siltuma avotu blīvumu apraksta ar formulas (1) vai (2) palīdzību. Šī formula aproksimē protona kūļa izraisīto kodolreakciju radīto siltuma izdalīšanos.

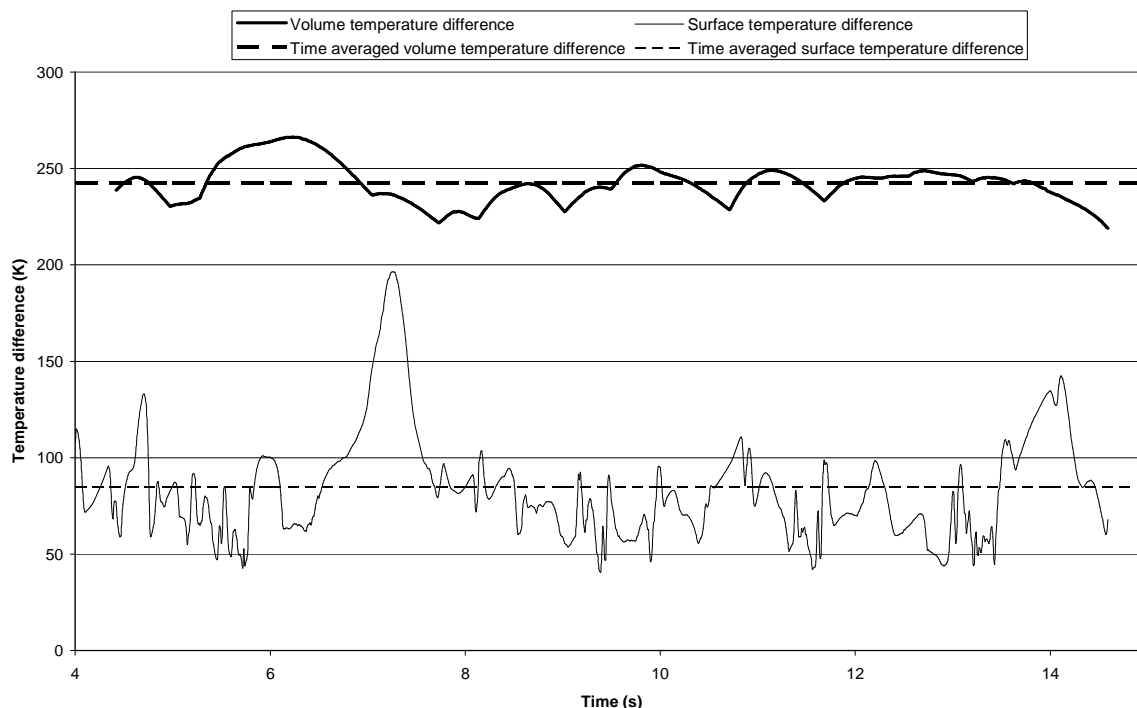
### ESS iespējamās protonu mērķa konstrukcijas.

ESS dzīvsudraba protonu mērķa konstrukcija ir piedāvāta [1], sk.2.7.att. Šajā mērķī šķidrums plūsma tiek organizēta visai komplicētā veidā izmantojot 3 ieejas un vienu izeju. Kopumā siltuma pārnese ir efektīva, taču plūsmas nestabilitātes dēļ novērojamas ievērojamas temperatūras svārstības ar atsevišķiem lēcieniem par 100°C uz mērķa virsmas, sk.2. 8.att.



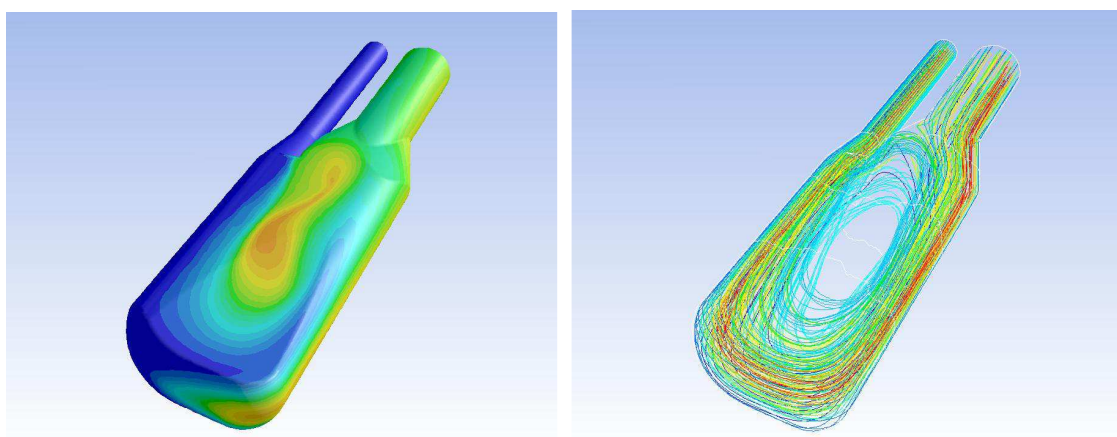
Att.2.7. ESS2003 neitronu avota dzīvsudraba protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konvektīvo siltuma pārnesei. Parādīts temperatūras sadalījums uz mērķa virsmas a), spiediena sadalījums b) un temperatūras sadalījums c) vertikālajā simetrijas plaknē un plūsmas līnijas mērķī d) [6].



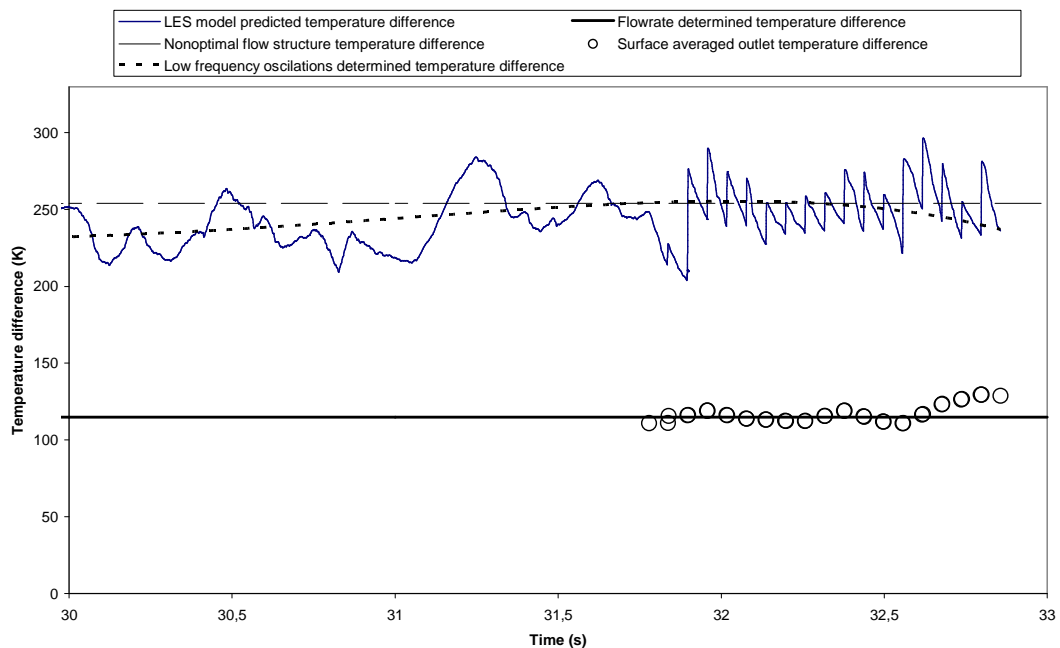


Att.2.8. Tilpuma un virsmas maksimālā temperatūras atkarība no laika ESS2003 neitronu avota dzīvsudraba protonu mērķī [6].

Vienkāršāka un stabilāka mērķa konstrukcija piedāvāta [6], sk. 2.9.att. Šajā mērķī asimetriskas formas ģeometrijā tiek izveidota tranzītplūsma, kura daļēji noslēdzas viena virpuļa veidā. Raksturīgās temperatūras mērķa tilpumā (10.att.) ir ievērojami stabilākas, arī siltuma izdalīšanās nerada ievērojamu maksimālās temperatūras palielināšanos. Jāatzīmē, ka gan ESS2003 mērķī, gan asimetriskajā mērķī maksimālās temperatūras mērķa tilpumā  $T_{V_{max}}$  ievērojami (apmēram 2 reizes) pārsniedz teorētisko novērtējumu (4). Tas norāda uz faktu, ka plūsmas struktūra nav precīzi pieskaņota jaudas blīvumu sadalījumiem (1) un (2), taču jāatzīmē, ka šāda jautājuma nostādne noved pie nereālām konstrukcijām [7].

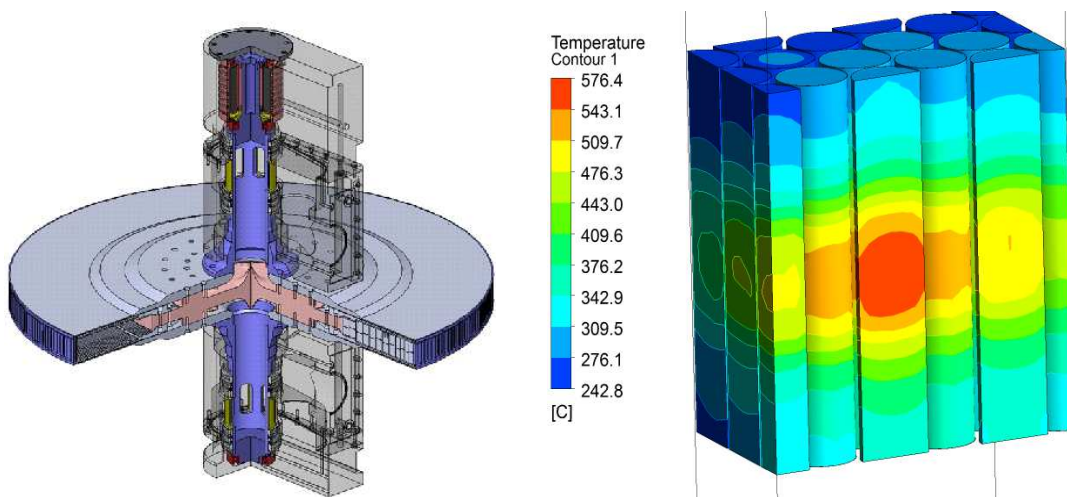


Att.2.9. Noslēgta tipa neitronu avota dzīvsudraba protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konvektīvo siltuma pārnesei. Parādīts temperatūras sadalījums uz mērķa virsmas un plūsmas līnijas mērķī [6].



Att. 2.10. Raksturīgās temperatūru starpības noslēgta tipa neitronu avota dzīvsudraba protonu mērķī. Parādītas temperatūras sadalījums uz mērķa virsmas un plūsmas līnijas mērķī [6].

11.attēlā parādīta viena no iespējamām rotējoša mērķa konstrukcijām. Neitronu ģenerācijai tiek izmantoti volframa stieņi, kurus dzesē ar hēliju. Šajā mērķī siltuma pārnese balstās uz konduktīvo siltuma pārnesei volframa stieņos un hēlija kā dzesētāja konvektīvo siltuma pārnesei. Tas noved pie ievērojami augstākām maksimālajām temperatūrām mērķa tilpumā ( $T_{v_{max}}=577^{\circ}\text{C}$ ) nekā dzīvsudraba mērķos. Jāatzīmē arī, ka patlaban neeksistē neviens rotējošais mērķis un ekspluatācijas pieredzes darbā ar šādiem mērķiem nav.



Att.2.11. Rotējoša tipa neitronu avota volframa protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konduktīvo siltuma pārnesei volframa stieņos un hēlija kā dzesētāja konvektīvo siltuma pārnesei. Parādīta mērķa konstrukcija un temperatūras sadalījums uz mērķa stieņu virsmas [5]. Mērķis rotē ar 10 apgriezieniem minūtē, raksturīgais hēlija spiediens 10 bar,  $v_{\text{He}}=8$  m/s,  $\dot{m}=12.69$  kg/s,  $T_{v_{max}}=577^{\circ}\text{C}$ .

Ir piedāvātas arī citas mērķu konstrukcijas, piemēram, šķidrā metāla mērķis ar brīvo virsmu, taču no siltuma pārnese viedokļa šis mērķis balstās uz konvektīvo siltuma pārnese veidu, tāpēc šeit netiek detalizēti apskatīts.

### **Ātrumu sadalījuma ietekme uz raksturīgajām $t^0$ vērtībām protonu mērķī.**

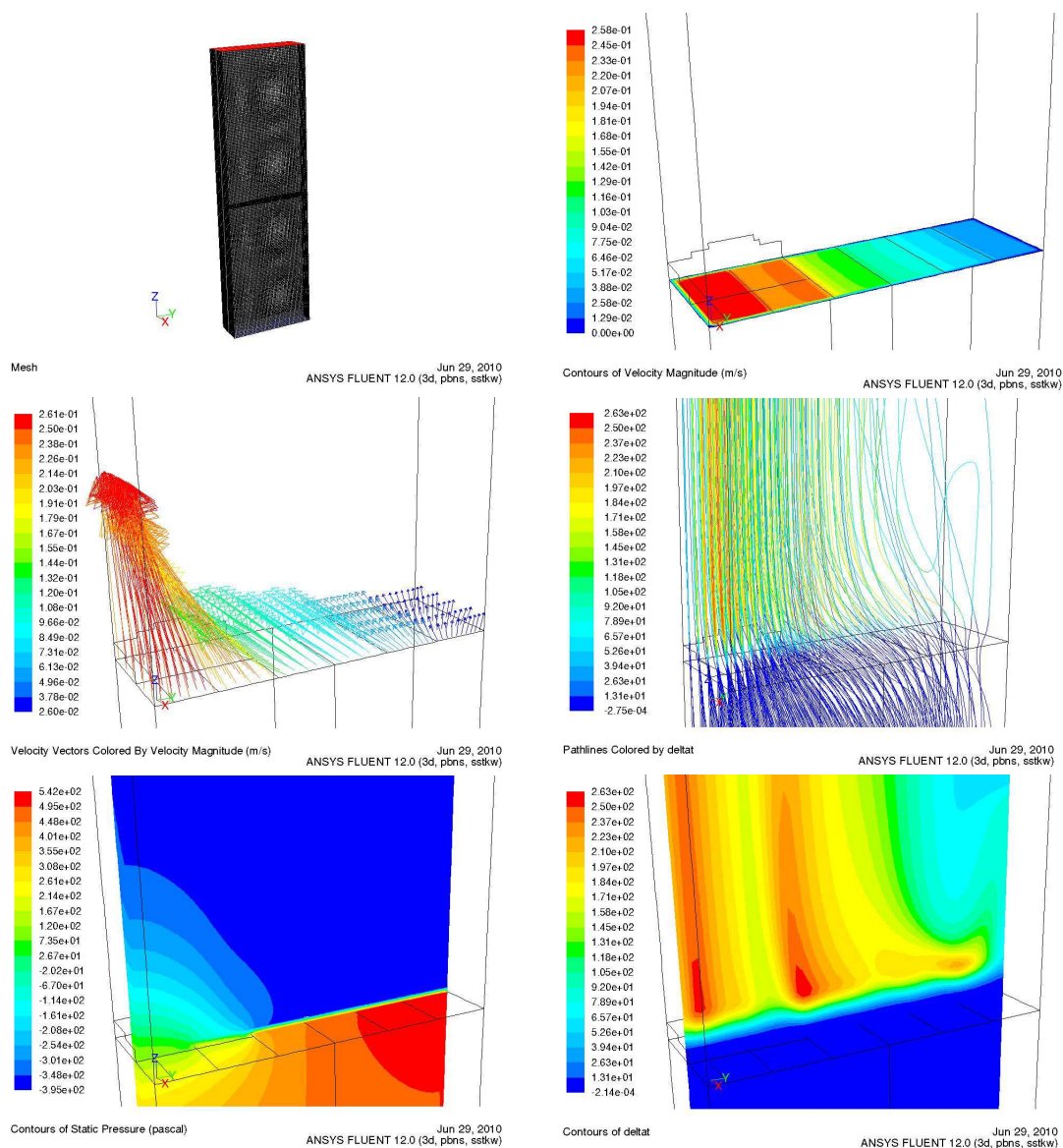
Kā jau tika minēts, konvektīvās siltuma pārnese gadījumā temperatūras starpību starp mērķa izeju un ieeju pamatā nosaka šķidrums masas plūsma un īpatnējā siltumietilpība (formulas (4) un (5)). Ja šķidrums nonākot līdz mērķa izejai ir labi sajaucies, tad šīs sakarības izpildās visai precīzi, kā to var redzēt 10.att. Savukārt maksimālās temperatūras mērķa tilpumā un uz virsmas var būt visai atšķirīgas no izejas temperatūras, tāpēc to novērtējumam ir būtiska loma mērķa konstrukcijas izvēlē.

Lai novērtētu maksimālo temperatūru mērķa tilpumā, apskatītas divas tipiskas plūsmu konfigurācijas – vertikāla plūsma taisnā kanālā (12.att.) un „saliectā” kanālā (13.att.). Abās konfigurācijās izmantots parabolisks jaudas blīvuma sadalījums (formula (1)), šķidrums ir dzīvsudrabs ar plūsmu 13 l/s. Tiek izmantota ANSYS Fluent [10] programmatūra ar  $k-\omega$  turbulences modeli [9].

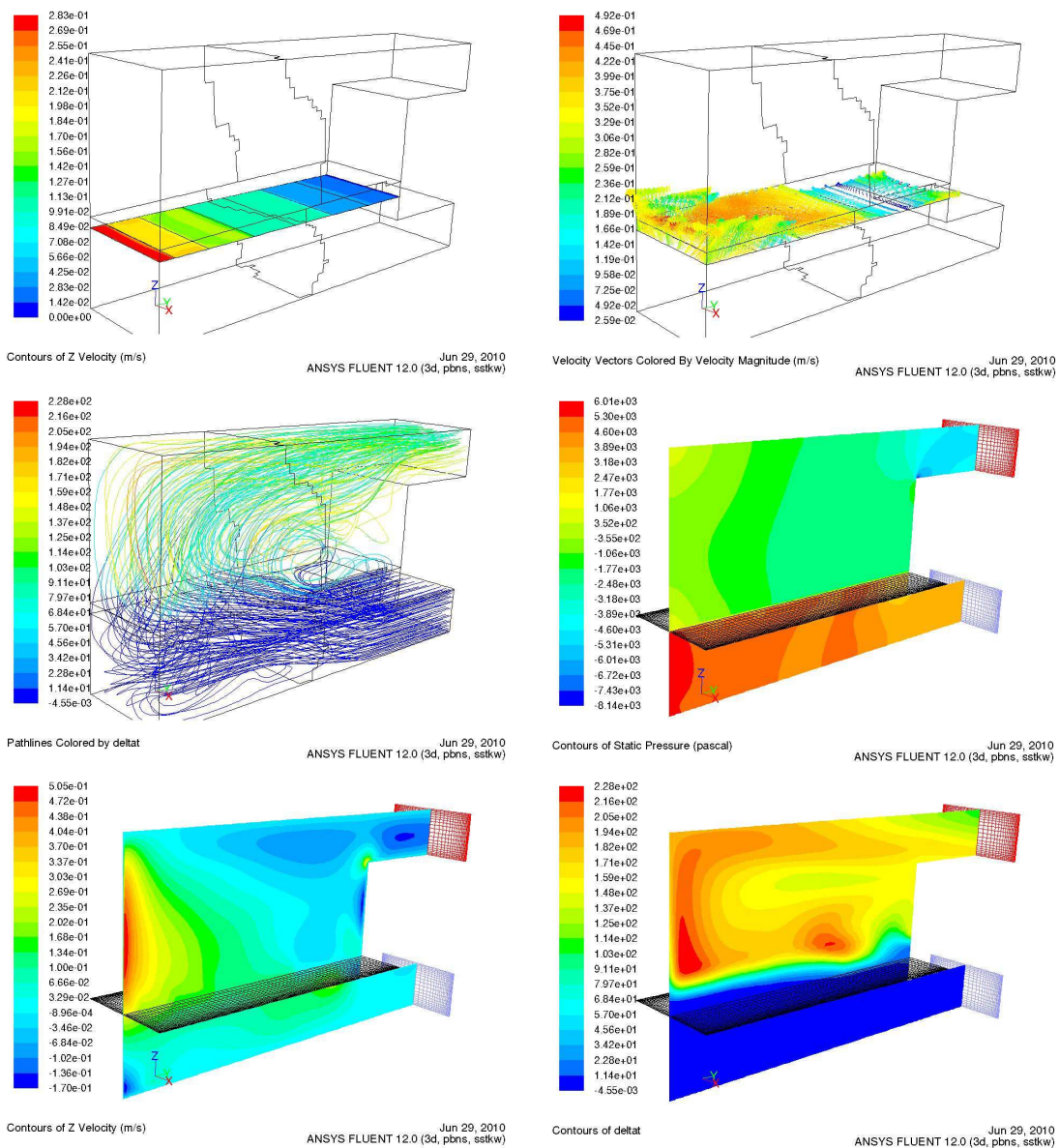
Lai formētu ātruma sadalījumu ar lielāku ātrumu atbilstoši jaudas sadalījumam 2.attēlā, mērķa tilpumā tiek ieviesta plakne, kuras hidraulisko pretestību var mainīt. Tā varētu būt plāksne ar dažāda diametra caurumiem, dažāda diametra lodīšu slānis u.c. konstrukcijas, kas nodrošina plūsmas formēšanu. Kā redzams, šādas plaknes ieviešana, piemeklējot atbilstošās pretestības vērtības, ļauj formēt ātruma lauku, izvēloties lielākus ātrumus zonās, kurās jaudas blīvums ir lielāks un otrādi. Jāatzīmē, ka ātruma lauka formēšana notiek tikai pēc jaudas blīvuma sadalījuma tās koordinātes, kas atbilst protonu stara virzienam, tātad tikai pēc vienas koordinātes. Šāda nepilnīga ātruma lauka pielāgošana jaudas blīvuma sadalījumam noved pie tā, ka  $\Delta T_V = T_{V_{\max}} - T_{in}$  ir lielāks par  $\Delta T = T_{out} - T_{in}$ , pie tam apmēram divas reizes. Ņemot vērā to, ka teorētiski vertikāla plūsma taisnā kanālā varētu būt vislabāk piemērota siltuma pārnesei, šis novērtējums nosaka tos ierobežojumus ar kuriem jāreķinās reālu mērķa konstrukciju izstrādes gaitā. Salīdzinot 12.att. un 13.att. nedaudz negaidīts šķiet fakts, ka „saliectā” kanālā  $\Delta T_V = T_{V_{\max}} - T_{in}$  ir mazāka vērtība nekā taisnā kanālā, jo „saliectā” kanālā plūsma ilgāku laiku atrodas zonām kurā izdalās siltums. Šeit ir jāņem vērā fakts, ka taisnā kanālā plūsma ir tuva plakanparalēlai, tātad sajaukšanās starp šķidrums slāņiem ir visai neliela. „Saliectā”

kanālā plūsma ir ievērojami sarežģītāka, ar lielāku sajaukšanos gan pateicoties vidējotās plūsmas virpuļiem, gan arī turbulentās difūzijas dēļ. Tā kā abās plūsmās ātrumu lauks nav pilnībā pielāgots jaudas blīvuma sadalījumam, tad šī sajaukšanās spēlē pozitīvu lomu un samazina maksimālās temperatūras mērķa tilpumu.

Jāatzīmē arī, ka ar formulām (1) un (2) aprakstītie jaudas blīvumu sadalījumi ir idealizēti un realitātē notiek stara telpiskās svārstības un stara nobīde var sasniegt 1-2 cm. Tas nozīmē, ka nav iespējams izveidot plūsmas konfigurāciju, kas precīzi atbilstu jaudas blīvuma sadalījumam un noteikta loma jāatvēr arī sajaukšanās procesiem.



Att.2.12. Kanāla tipa neutronu avota dzīvsudraba protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konvektīvo siltuma pārnesei. Parādīta ģeometrija, ātruma moduļa sadalījums, ātrumu vektori, plūsmas līnijas, spiediena un temperatūras sadalījums.



Att.2.13. Modificēta kanāla tipa neitronu avota dzīvsudraba protonu mērķis, kurā siltuma pārnese balstās uz konvektīvo siltuma pārnesi. Parādīti ātruma moduļa sadalījums, ātrumu vektori, plūsmas līnijas, spiediena, vertikālās ātruma komponentes un temperatūras sadalījums.

### Protonu mērķa siltuma avotu modelēšana ar pastāvīgas strāvas Džoula siltuma avotu palīdzību.

Eiropas neitronu avota (ESS) [1] smagā metāla mērķī, kurā notiek protonu neitronu ģenerācija protonu kūļa izraisīto kodolreakciju rezultātā izdalās ievērojams siltuma daudzums. Veidojot mērķa prototipus, ir svarīgi novērtēt siltuma pārneses efektivitāti. Tā kā laboratorijas apstākļos nav iespējams nodrošināt enerģijas izdalīšanos ar protonu kūļa palīdzību, nepieciešami alternatīvi siltuma avoti. Šī atskaites sadaļa

veltīta principālas iespējas noskaidrošanai vai ar pastāvīgas strāvas radīto Džoula siltuma iespējams modelēt protona kūļa izraisīto siltuma avotus protonu mērķī. Tā kā laboratorijas apstākļos nav iespējams radīt siltuma avotus tilpumā ar kodolreakciju palīdzību, tad nepieciešami alternatīvi risinājumi. Viens no risinājumiem varētu būt līdzstrāvas radītie Džoula siltuma avoti, kurus nepieciešams realizēt tā, lai tie iespējami precīzāk aprakstītu formulā (17) aprakstīto avotu blīvuma sadalījumu. Lai realizētu šo koncepciju, nepieciešams papildus risināt vienādojumus, kas apraksta līdzstrāvas radītos efektus [10]. Šķidrā metālā elektriskā lauka intensitāti apraksta ar potenciāla  $\varphi$  palīdzību:

$$\vec{E} = -\nabla\varphi. \quad (25)$$

Šāds lauks rada strāvas blīvumu

$$\vec{j} = \sigma\vec{E}, \quad (26)$$

kas apmierina nosacījumu

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0. \quad (27)$$

Tādējādi potenciāls  $\varphi$  apmierina vienādojumu:

$$\Delta\varphi = 0, \quad (28)$$

ku atrisinot iegūst strāvas un no tām nosaka Džoula siltuma blīvumu:

$$Q = \frac{1}{\sigma} \vec{j} \cdot \vec{j}. \quad (29)$$

### Džoula siltuma protonu mērķa modelis.

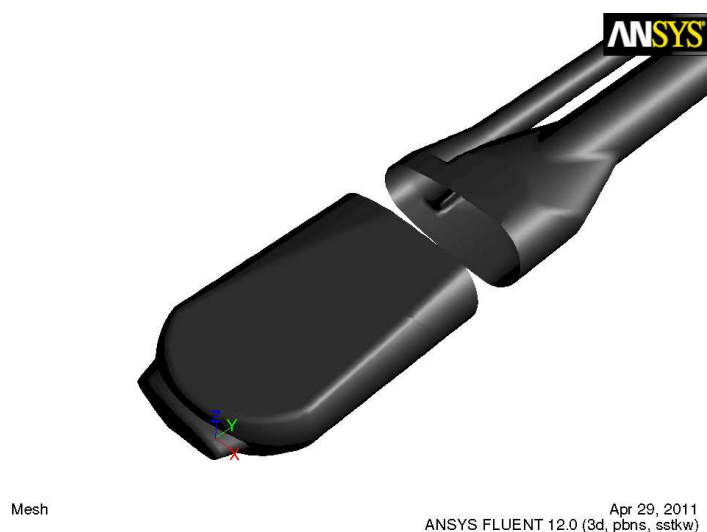
Augstāk minētie vienādojumi tiek risināti protonu mērķa konfigurācijai, kas attēlota 14.att. Darba metāls ir dzīvsudrabs.



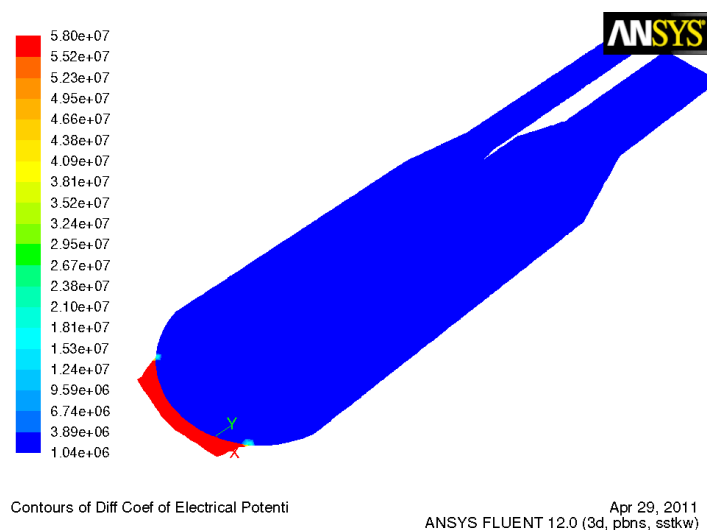
Att.2.14. Aprēķinos izmantotā protonu mērķa ģeometrija.



Strāva mērķa tilpumā tiek radīta, izvietojot 2 elektrodus uz mērķa virsmas un pieliekot potenciālu starpību 1V. Viens no elektrodiem tiek veidots protonu kūļa kontakta zonā, otrs – 0.45-0.6 m attālumā no šīs zonas. Elektrodu izvietojums attēlots 15.attēlā.



Att.2.15. Protonu mērķa ģeometrija. Strāva mērķī tiek radīta uzdodot potenciāla vērtību 1V pārtrauktajā zonā un 0V vara elektrodam mērķa protonu loga daļā.



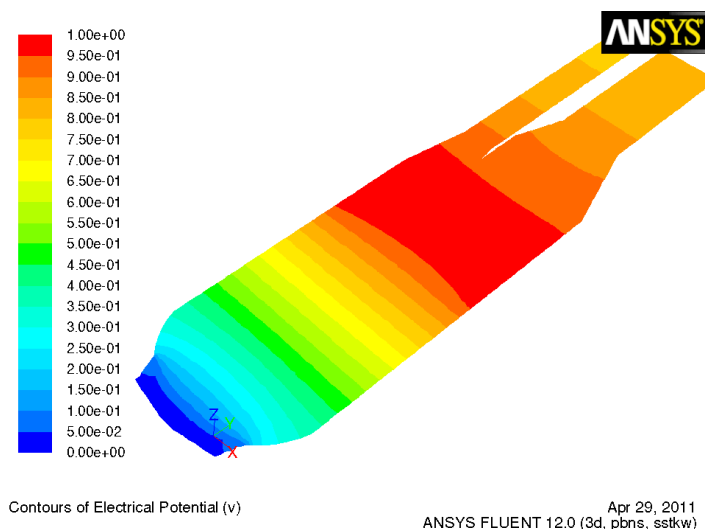
Att.2.16. Elektrovadītspējas sadalījums simetrijas plaknē  $z=0$ .

Par elektroda materiālu izmantots varš, vadītspēju sadalījums mērķa simetrijas plaknē attēlots 3.attēlā.

#### Aprēķinu rezultāti.

Atbilstoši izveidotajam modelim veikti aprēķini pie dažādām dzīvsudraba plūsmām mērķī. Aprēķinu veikti kā Džoula siltuma modelim, tā arī protonu mērķa modelim ar siltuma blīvumu sadalījumu atbilstoši formulai (1).

Aprēķinātie potenciāla un Džoula siltuma blīvuma sadalījumi parādīti 17. un 18. attēlos.



### 2.17. Potenciāla sadalījums protonu mērķī.

Aprēķinātā Džoula siltuma blīvuma sadalījuma atkarība no  $y$  koordinātes salīdzinājumā ar protonu mērķa siltuma blīvumu, ko nosaka formula (1) parādīta 19.attēlā. Kā redzams, abi sadalījumi ir kvalitatīvi līdzīgi. Džoula siltuma blīvuma sadalījumam ir lokāls maksimums pie  $y=0.45$ , ko nosaka elektroda malas radītie strāvas koncentrācijas efekti, taču kopumā rezultāts ir apmierinošs.

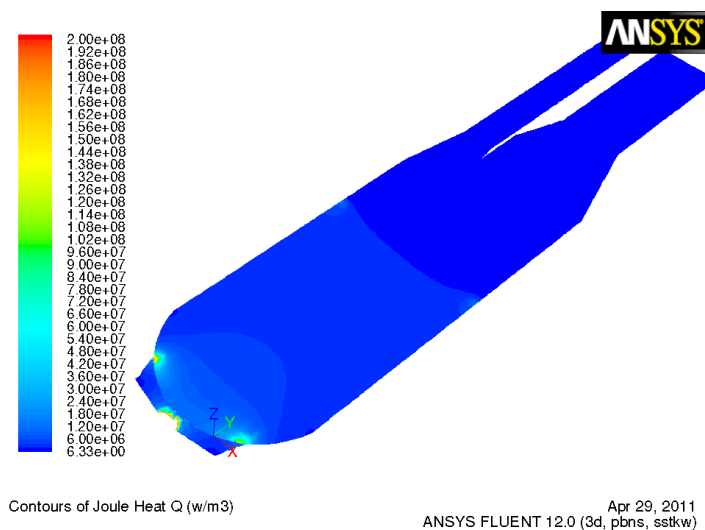
Nākošajā solī tika veikti plūsmas aprēķini un salīdzināti temperatūru sadalījumi abu siltuma avotu gadījumā. Tika veikti aprēķini pie dzīvsudraba plūsmas caur mērķi 10 l/s.

20.attēlā redzama plūsma protonu mērķī: pa kreisi ātruma vektori, pa labi plūsmas līnijas. Kā redzams, veidojas viens virpulis, kura centrs lokalizēts elektroda tuvumā.

21.attēlā parādīts salīdzinājums ātruma modulim un temperatūras sadalījumiem simetrijas plaknē ( $z=0$ ) un uz mērķa virsmas pie 10 l/s izmantojot Džoula siltuma avotus (kreisā kolona) un protonu mērķa siltuma avotus (labā kolona). Kā redzams no šī salīdzinājuma, abos gadījumos veidojas kvalitatīvi līdzīgi temperatūras sadalījumi ar diviem lokāliem maksimumiem mērķa tilpumā. Viens no maksimumiem lokalizēts protonu kūļa kontakta zonas tuvumā ar attiecīgu nobīdi konvektīvās siltuma pārnesei dēļ. Otrs no maksimumiem lokalizēts virpuļa centra tuvumā, ko nosaka nelielā konvekcijas ietekme uz siltuma pārnesei virpuļa centrā.

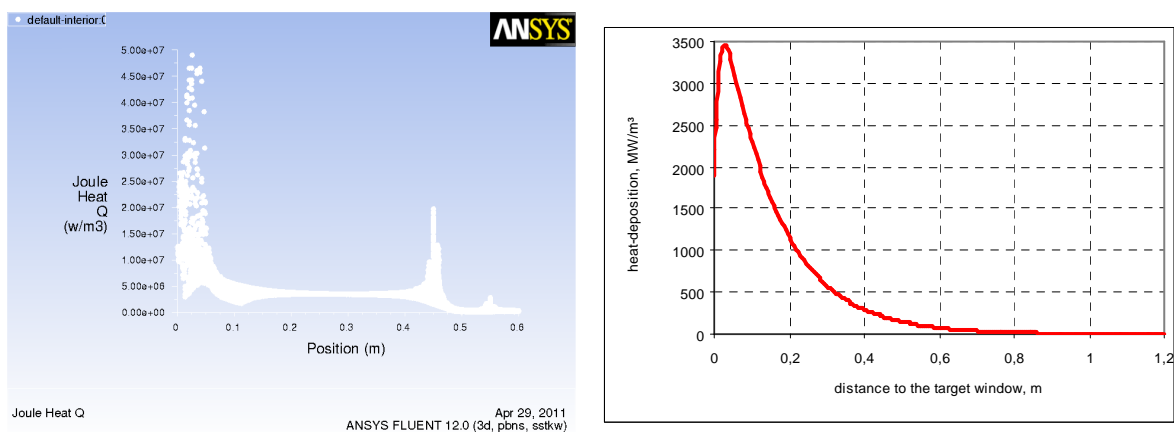


Neraugoties uz zināmām atšķirībām temperatūras sadalījumu detaļās, redzams, ka Džoula siltuma izmantošana protonu mērķī var kalpot par pamatu siltuma pārnesei procesa izpētei.



Att.2.18. Džoula siltuma blīvuma sadalījums protonu mērķī.

Modeļa integrālie parametri attēloti 1.Tabulā. Kā redzams kopējā caur modeli plūstošā strāva ir apm. 60 kA, dzīvsudraba tilpumā izdalās apm. 53 kW, bet vara elektrodā – 2 kW jauda. Šī jauda, protams, ir daudz mazāka par protonu mērķa jaudu, kas ir vienāda ar 2.9 MW, tādējādi šīs jaudas atšķiras 55 reizes. Tas atspoguļojas arī maksimālajās temperatūru vērtībās. Raksturīgās starpības starp temperatūrām mērķa izejā un ieejā abos modeļos atšķiras apm. 60 reižu. Arī šo skaitļu labā sakritība norāda uz perspektīvu šādu modeļu izmantošanu.



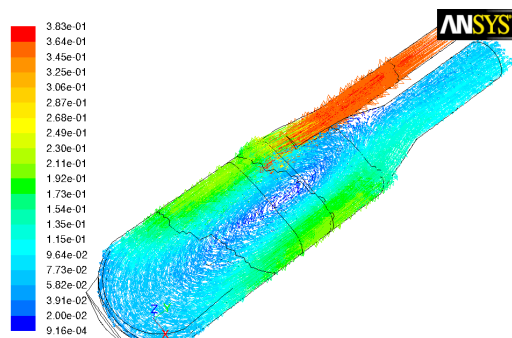
Att.2.19.. Siltuma avotu blīvuma sadalījuma atkarībā no y koordinātes kvalitatīvs salīdzinājums: pa kreisi Džoula siltuma blīvums apskatāmajā modelī, pa labi jaudas blīvums protonu mērķī (formula (1)).

1.Tabula. Integrālie modeļa parametri.

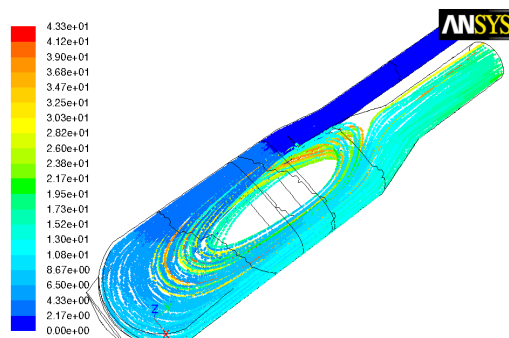
<b>Mass Flow Rate</b>	<b>(Kg/S)</b>
<b>Inlet</b>	<b>135.99998</b>
<b>Outlet</b>	<b>-136.00006</b>
<b>Net</b>	<b>-8e-05</b>
<b>Total Volume Integral</b>	
<b>Joule Heat Q</b>	<b>(W/M3)(M3)</b>
-----	
<b>Mercury_Liquid</b>	<b>53388.707</b>
<b>Copper_Solid</b>	<b>2110.092</b>
-----	
<b>Net</b>	<b>55498.797</b>
<b>Total Heat Transfer Rate</b>	<b>(W)</b>
-----	
<b>Inlet</b>	<b>35047.891</b>
<b>Outlet</b>	<b>-91969.672</b>
-----	
<b>Net</b>	<b>-56921.781</b>
<b>I Approx 60 Ka</b>	

Nelielā temperatūru starpība starp mērķa ieeju un izeju rada varētu radīt grūtības pieņemamas mērījumu precizitātes sasniegšanai. Šo problēmu varētu risināt samazinot plūsmas vērtības, kas radītu temperatūras starpības proporcionālu pieaugumu.

Lai pārbaudītu šo pieeju tika veikti aprēķini Džoula siltuma modelī ar pūsmu 1 l/s. 22.attēlā parādīti ātruma moduļa un temperatūras sadalījumi simetrijas plaknē ( $z=0$ ) un uz mērķa virsmas pie 10 l/s (kreisā kolona) un 1 l/s (labā kolona). Kā redzams 10 kārtēja plūsmas samazināšana ir novedusi pie temperatūras starpības palielināšanās 10 reizes. Tādējādi ir iespējams arī samazināt strāvas vērtības atbilstoši eksperimentālajām iespējām tajā pašā laikā nodrošinot pieņemamu precizitāti temperatūras mērījumiem.

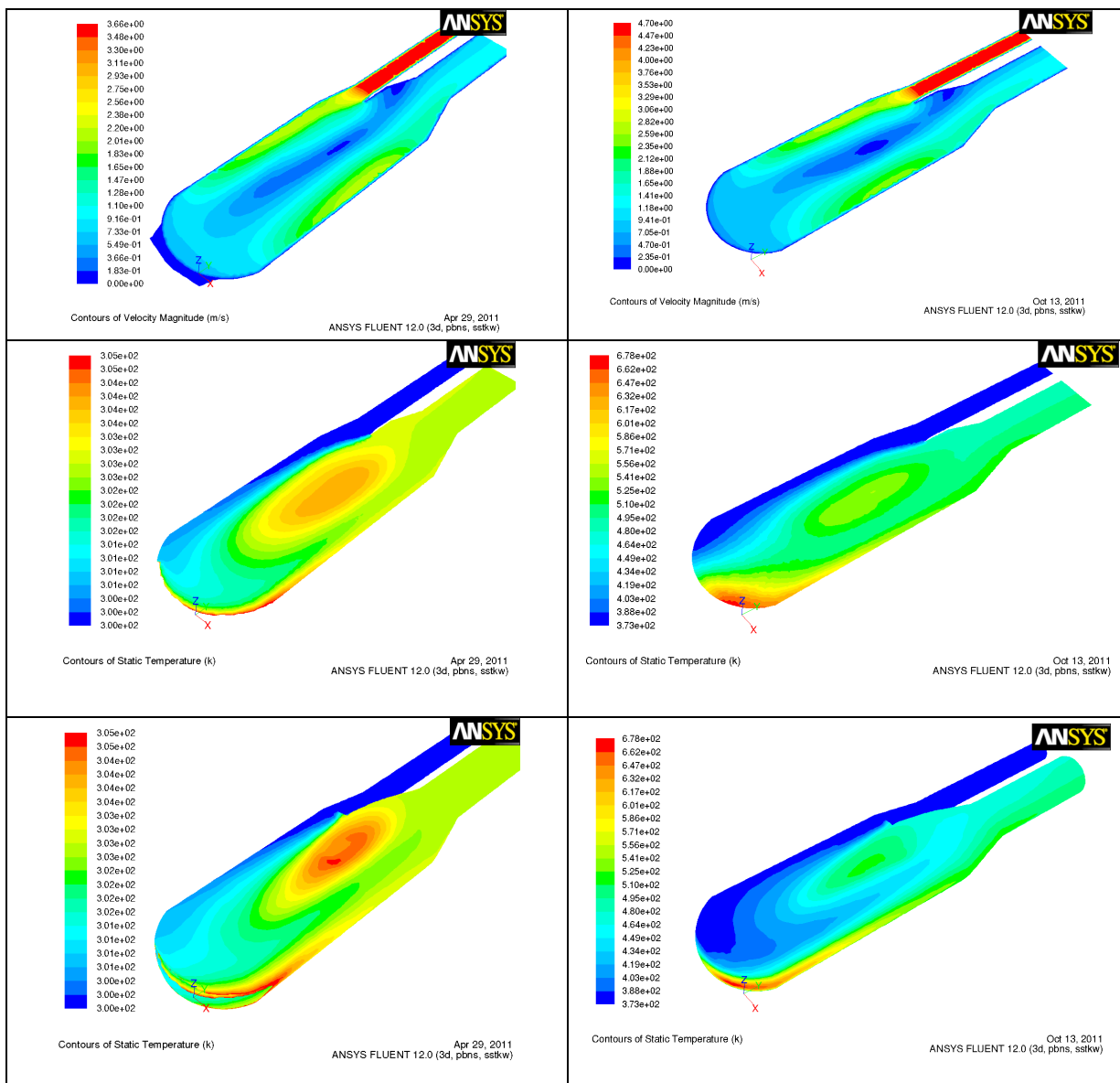


Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude (m/s)  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, sstk)w Oct 13, 2011

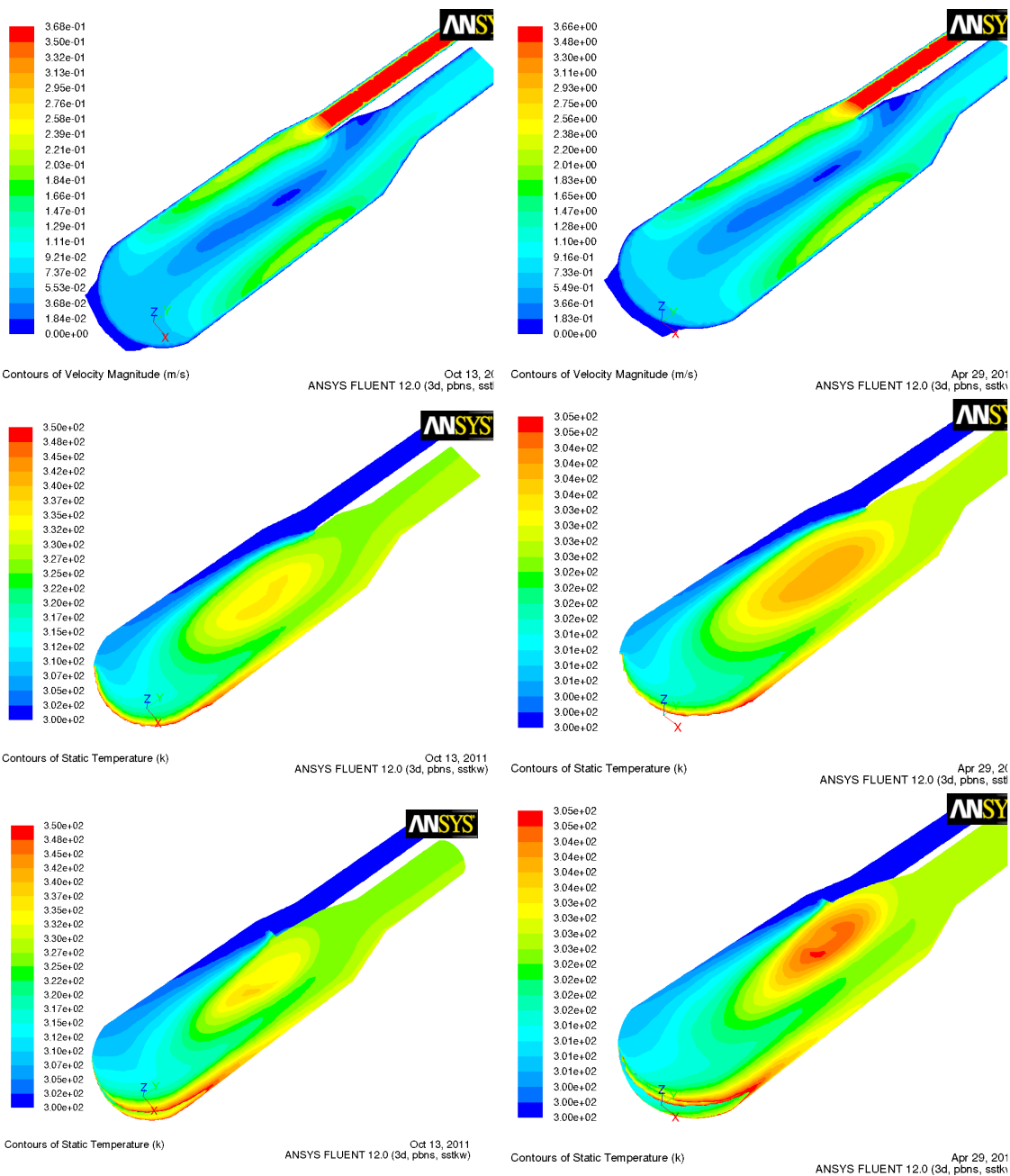


Pathlines Colored by time (s)  
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, pbns, sstk)w Oct 13, 2011

Att. 2.20. Plūsma protonu mērķī: pa kreisi ātruma vektori, pa labi plūsmas līnijas.



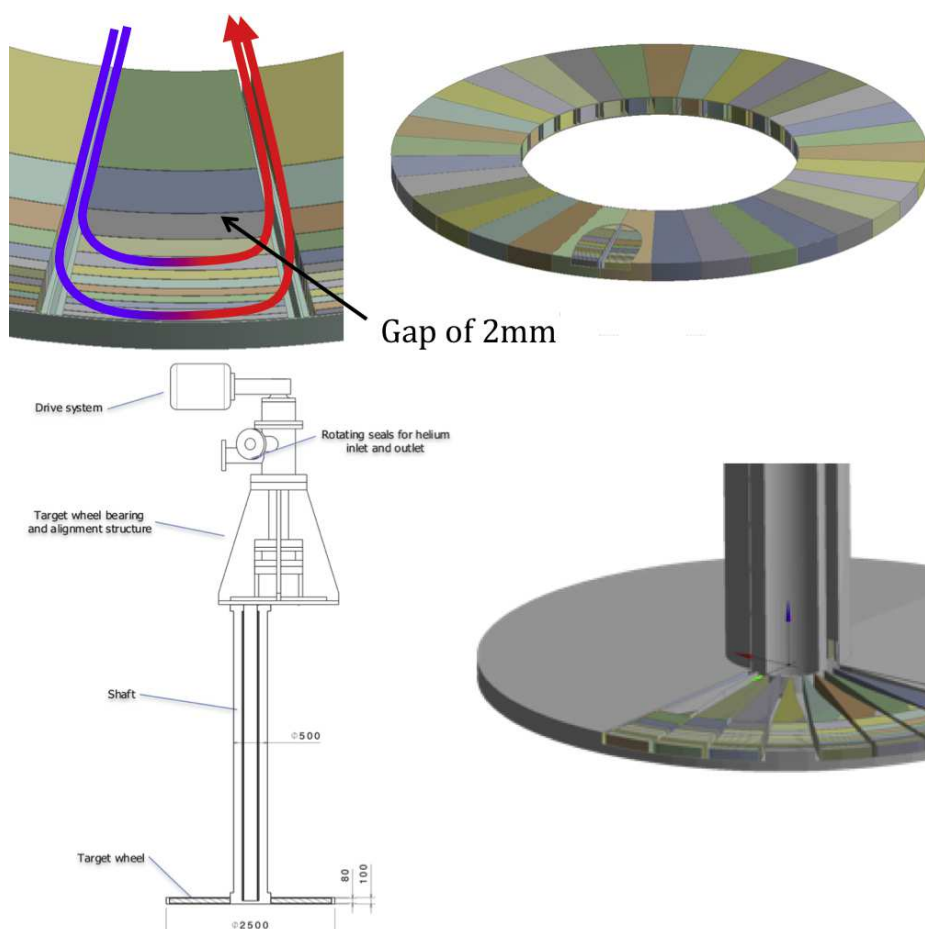
Att.2.21. Ātruma moduļa un temperatūras sadalījumi simetrijas plaknē ( $z=0$ ) un uz mērķa virsmas pie 10 l/s izmantojot Džoula siltuma avotus (kreisā kolona) un protonu mērķa siltuma avotus (labā kolona).



2.22. Ātruma moduļa un temperatūras sadalījumi simetrijas plaknē ( $z=0$ ) un uz mērķa virsmas pie 10 l/s (kreisā kolona) un 1 l/s (labā kolona).

## Cietā protonu mērķa termo-hidraulisko parametru novērtējums. Stacionārs mērķis.

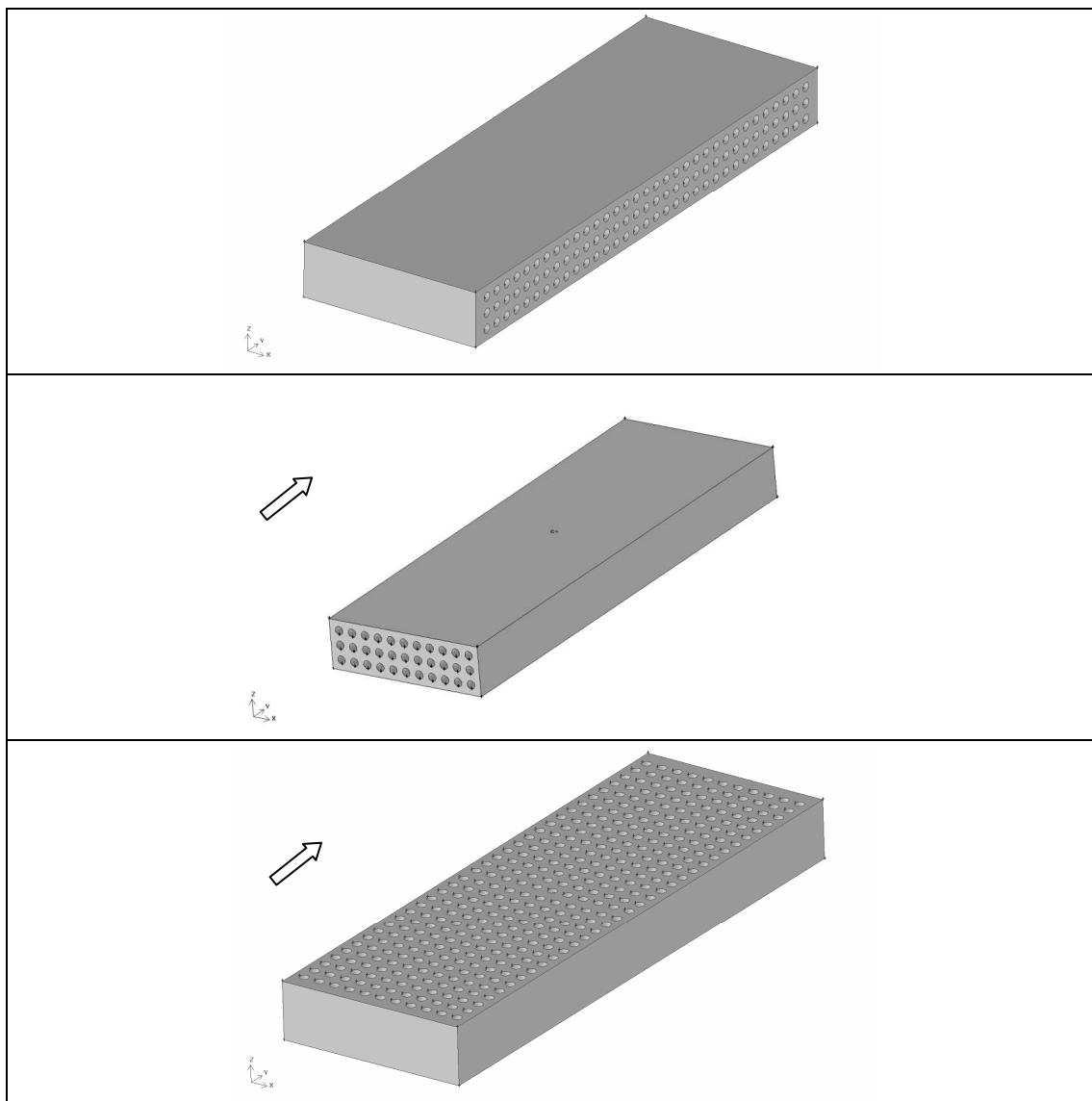
Pateizējā Eiropas neitronu avota (ESS) protonu mērķa viena no koncepcijām paredz cietā mērķa izmantošanu [1], sk.23.att.



Att.2.23.. ESS cietā protonu mērķa konstrukcija [11].

Protonu kūlis mijiedarbojas ar volframa plāksnēm, kas tiek dzesētas ar siltumnesēja palīdzību. Par siltumnesēju plānots izmantot hēliju, tiek apskatīts arī ūdens variants. Neviens no šiem siltumnesējiem nekalpo kā neitronus ģenerējoša vide, tādēļ mērķa efektivitāti lielā mērā nosaka tilpuma daļa, ko aizņem metāls, jo tā mazāka, jo zemāka mērķa spēja ģenerēt neitronus no tilpuma vienības. Metāla tilpuma daļas palielināšana samazina siltumnesējam pieejamo tilpumu dzesēšanas kanālu izveidošanai, kas noved pie maksimālās temperatūras un spiediena starpības pieauguma. Alternatīvs risinājums ir izmantot kā siltumnesēju šķidro metālu, kas pats vienlaicīgi kalpo arī kā neitronu ģenerators. Tas ļauj samazināt mērķa cietā metāla tilpuma daļu un uzlabo mērķa dzesēšanas apstākļus.

Tādējādi optimālu cietā mērķa konstrukciju nosaka virkne faktoru un šīs problēmas atrisināšanai nepieciešama daudzkārtēja siltuma pārnese uzdevumu risināšana sarežģītā ģeometrijā. Šajā situācijā ir lietderīgi apskatīt vienkāršotus siltuma pārnese uzdevumu formulējumus, kas apraksta svarīgākos mērķa darbības aspektus. Ņemot vērā to, ka dzesēšanas kanāli veido sistēmu, kas ir paralēla un perpendikulāra stara virzienam (sk.23.att.), šajā etapā apskatīti mērķa modeļi, kuros dzesēšana notiek kanālos, kas orientēti stara virzienā un perpendikulāri tam (sk.24.att.).



Att.2 24. Apskatītās kanālu sistēmu orientācijas x, y un z ass virzienā. Protonu kūļa virziens sakrīt ar y ass virzienu un ir norādīts ar bultu.

Šādās sistēmās siltuma pārnese procesus raksturo ar empīrisku sakarību palīdzību [3]. Hidraulisko pretestību raksturo ar berzes koeficienta palīdzību:

$$f = \frac{1}{4} \left( \frac{D}{L} \right) \left( \frac{p_0 - p_L}{\frac{1}{2} \rho u_m^2} \right), \quad (30)$$

kuru izsaka ar empīriskas sakarību, kas apkopo eksperimentālos datus:

$$f = \frac{0.0791}{\text{Re}^{1/4}}. \quad (31)$$

Reinoldsa skaitlis nodefinēts kā

$$\text{Re} = \frac{Du_m \rho}{\mu}, \quad (32)$$

kur  $D$  ir kanāla diametrs,  $\rho$  dzesētāja blīvums,  $\mu$  ir dinamiskā viskozitāte, savukārt siltuma pārnese raksturo Nusselta skaitlis

$$\text{Nu}_D = \frac{hD}{k}, \quad (33)$$

kas definēts izmantojot siltuma plūsmu no cilindriskā kanāla sienas

$$q_s = h(T_s - T_m), \quad (34)$$

kur  $h$  – siltumapmaiņas koeficients.

Temperatūras un ātruma vidējās vērtības ir ievestas atbilstoši formulām:

$$T_m = \frac{2}{u_m r_0^2} \int_0^{r_0} u T r dr \quad (35)$$

un

$$u_m = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} u(r, x) r dr. \quad (36)$$

Lielu un vidēju Prandtļa skaitļu (hēlijs un ūdens) gadījumā Nusselta skaitļa korelācijai tiek izmantota sakarība [3]:

$$\text{Nu}_D = 0.023 \text{Re}_D^{4/5} \text{Pr}^{0.4} \quad q_s = \text{const}, \quad (37)$$

bet mazu Prandtļa skaitļu gadījumā (šķidrie metāli) [13]:

$$\text{Nu}_D = 0.685 \text{Pe}^{0.372612}. \quad (38)$$

$T_s$  apraksta sienas temperatūru, kas ir palielinās plūsmas virzienā. Viena kanāla pārnestā siltuma jauda ir

$$P_i = 0.25 \pi c u_m D^2 \rho \Delta T, \quad (39)$$

kur  $c$  ir siltumnesēja īpatnējā siltumietilpība,  $\Delta T$  ir temperatūras starpība starp kanāla izejas un ieejas temperatūrām. Visu kanālu pārnestā jauda ir

$$P = iP_i, \quad (40)$$

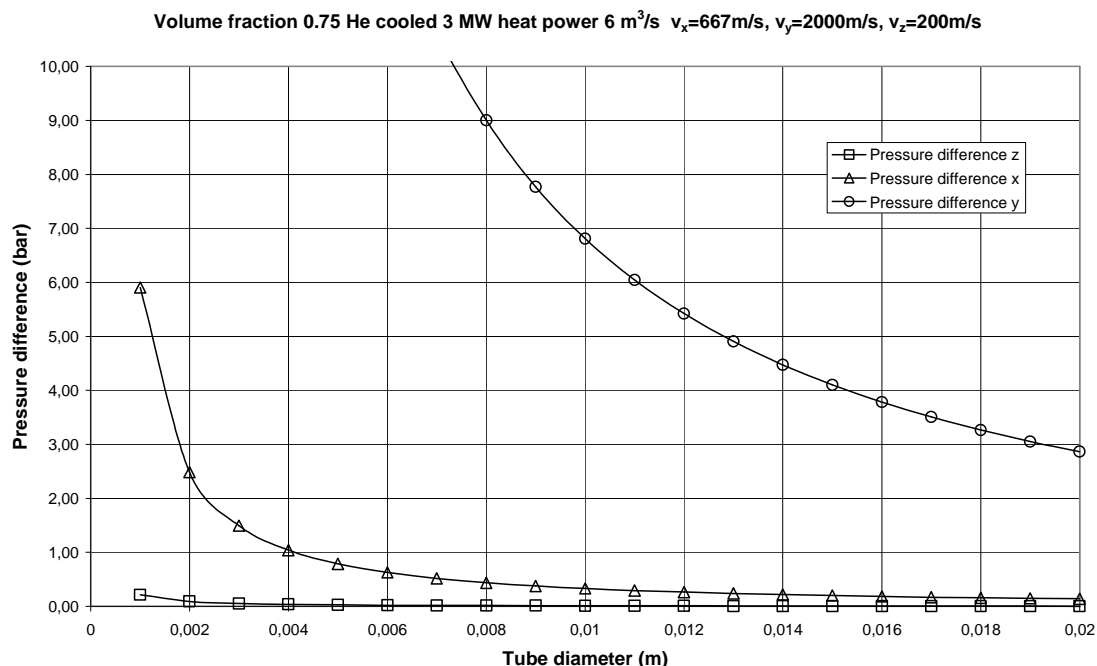
kur  $i$  ir kanālu skaits. Kanālu skaitu nosaka nepieciešamā kanālu laukuma un attiecīgās mērķa skaldnes laukuma attiecība, kas atbilst izvēlētai metāla tilpuma daļai. Aprēķinos izmantota cietā metāla tilpuma daļa 0.75 hēlija un ūdens gadījumā un 0.5 gallija gadījumā. Kopējā jauda  $P$  visos gadījumos ir 3 MW.

### Dzesēšana ar hēliju.

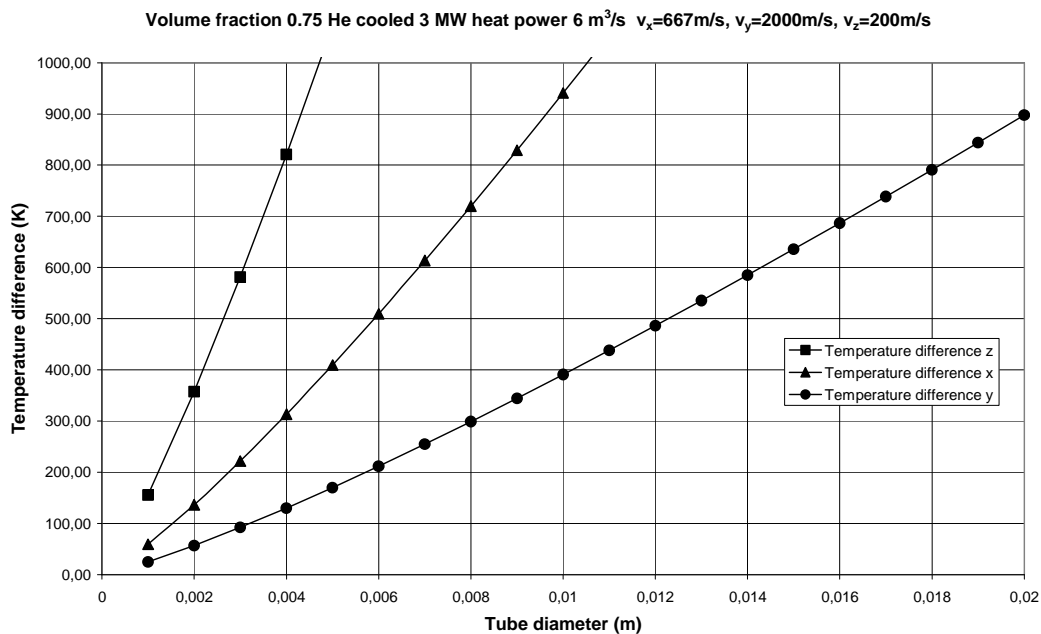
Dzesējot mērķi ar hēliju izmantota ESS noteiktā [1] temperatūru starpība

$$\Delta T = 200 \text{K}, \text{ kas atbilst plūsmai } Q = 0.25 \pi u_m D^2 = 6000 \frac{l}{s}. \quad (12)$$

Kā redzams no 25. un 26.att. kanālu orientācija  $z$  ass virzienā raksturojas ar vismazāko spiediena starpību un vislielāko temperatūras starpību. Nosakot ierobežojumu uz maksimālo sienas temperatūru, var noteikt maksimālo pieļaujamo kanāla diametru. Tā, piemēram, ierobežojot temperatūras starpību starp sienu un siltumnesēju ar  $600\text{ K}$ , kanāla diametrs nevar būt lielāks par  $3\text{ mm}$ . Otrs robežgadījums ir kanālu orientācija  $y$  ass virzienā. pie šī paša temperatūras starpības ierobežojuma kanāla diametrs nevar pārsniegt  $14\text{ mm}$ . Šajā gadījumā novērojams ievērojams spiediena kritums, kas sastāda  $4.5\text{ bar}$  un pie  $7\text{ mm}$  jau pārsniedz  $10\text{ bar}$ .



Att. 2.25. Spiediena starpība dažādām kanālu orientācijām hēlija dzesēšanas gadījumā.

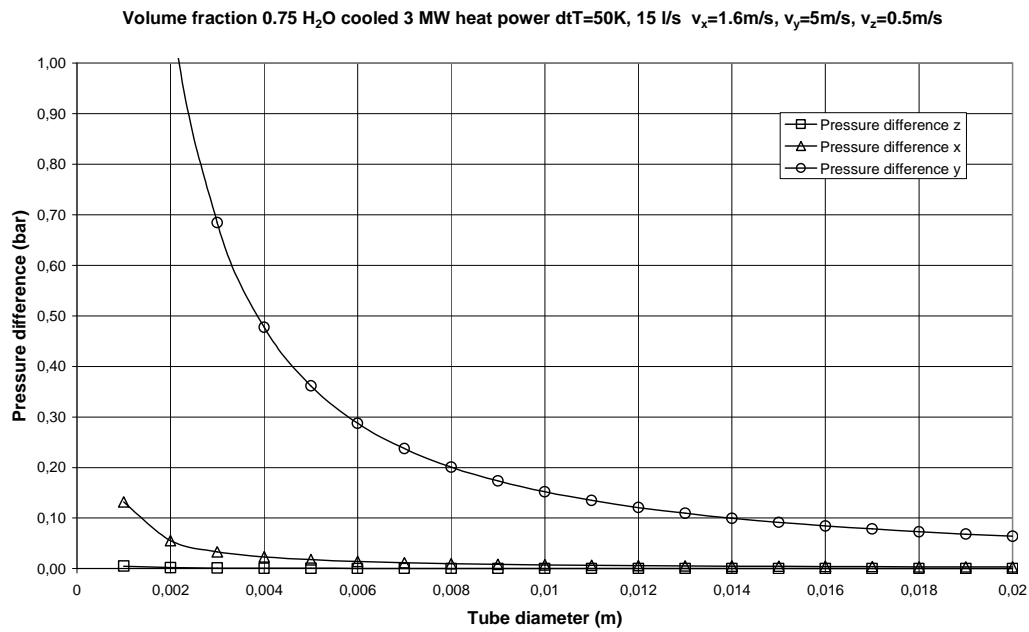


Att.2.26. Temperatūras starpība dažādām kanālu orientācijām hēlija dzesēšanas gadījumā.

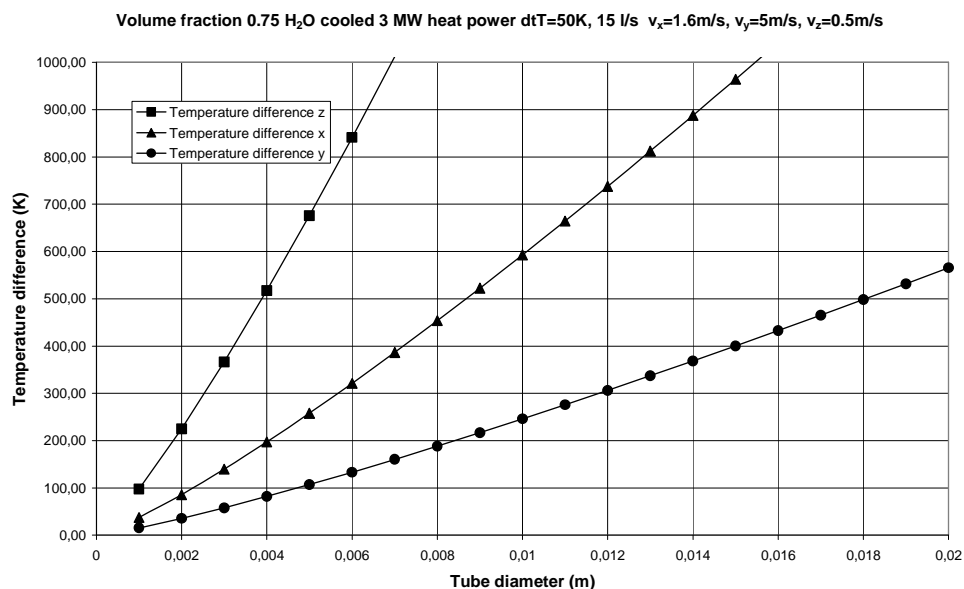


## Dzesēšana ar ūdeni.

Izmantojot kā dzesētāju ūdeni, būtiska loma ir maksimālai temperatūrai, lai nepieļautu ūdens vārīšanos, tādēļ izvēlēta temperatūras starpība  $\Delta T = 50K$ , kas atbilst plūsmai  $Q = 15 \frac{l}{s}$ . Pie šādiem parametriem, kā redzams no 27. un 28.att. spiediena starpība nav noteicošais faktors, kritiska ir temperatūras starpība, lai nepieļautu ūdens vārīšanos kanālu maksimālais diametrs nevar pārsniegt 1-2 mm atkarībā no kanālu orientācijas, vai arī jāpalielina kopējais sistēmas spiediens, lai vārīšanās sāktos pie augstākas temperatūras.



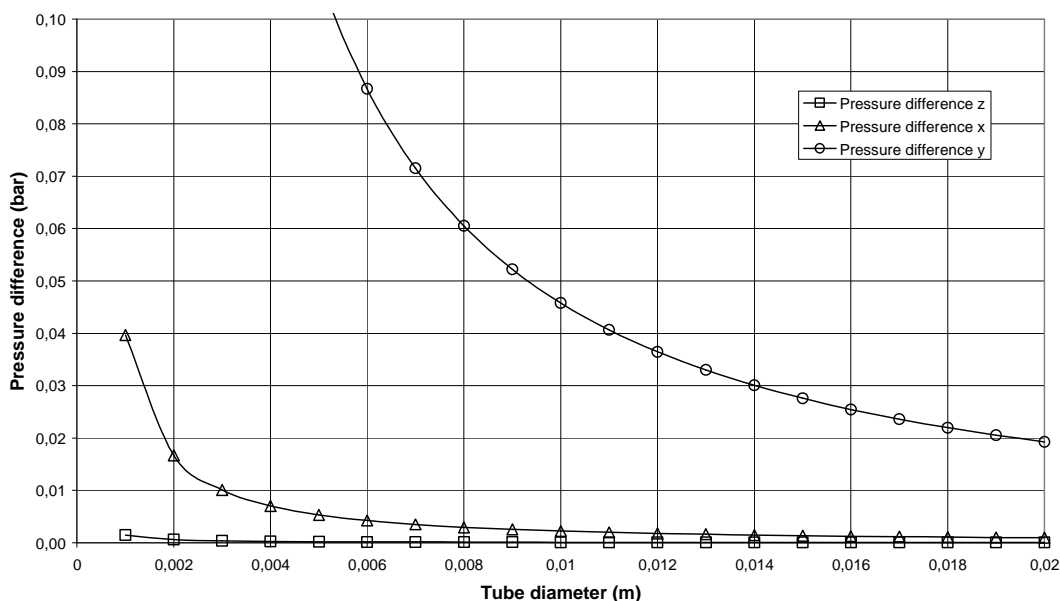
Att.2.27. Spiediena starpība dažādām kanālu orientācijām ūdens dzesēšanas gadījumā.



Att.2.28. Temperatūras starpība dažādām kanālu orientācijām ūdens dzesēšanas gadījumā.

## Dzesēšana ar galliju.

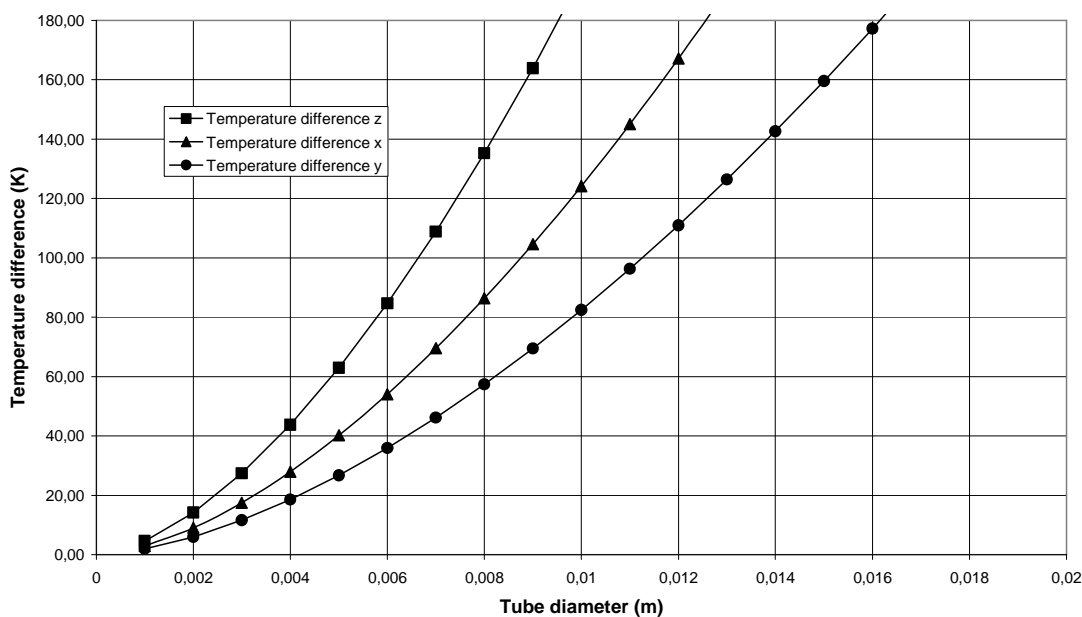
Volume fraction 0.5 Ga cooled 3 MW heat power  $\Delta T=200K$ , 6 l/s  $v_x=0.34m/s$ ,  $v_y=1m/s$ ,  $v_z=0.1m/s$



Att.2.29. Spiediena starpība dažādām kanālu orientācijām gallija dzesēšanas gadījumā.

Dzesējot ar galliju, līdzīgi kā hēlija gadījumā pieņemts  $\Delta T = 200K$ , kas atbilst plūsmai  $Q = 6 \text{ l/s}$ . Kā redzams no 29. un 30.att. ne spiediena ne arī temperatūras starpības nav kritiskas, nepieciešamo jaudu iespējams pārnest ar nelielu spiediena starpību, kas sastāda atmosfēras desmitās daļas pie temperatūras starpības 100-200 K. No siltuma pārneses viedokļa šis dzesēšanas variants ir vispievilcīgākais.

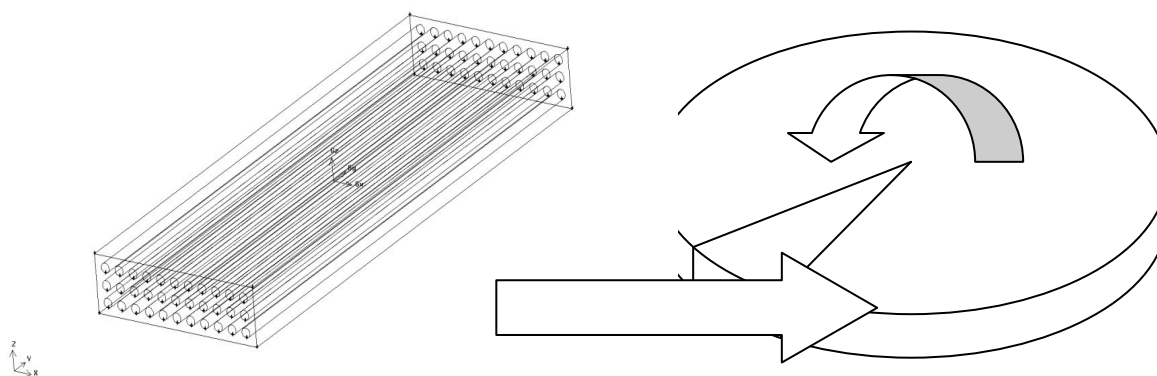
Volume fraction 0.5 Ga cooled 3 MW heat power  $\Delta T=200K$ , 6 l/s  $v_x=0.34m/s$ ,  $v_y=1m/s$ ,  $v_z=0.1m/s$



Att.2.30. Temperatūras starpība dažādām kanālu orientācijām gallija dzesēšanas gadījumā.

## Cietā protonu mērķa termo-hidraulisko parametru novērtējums. Rotējošs mērķis.

Apskatītos mērķa konstruktīvos risinājumus iespējams piemērot rotējošam mērķim. Aktuālā rotējošā mērķa koncepcija [11] paredz rotējošu disku 2.5 m diametrā, kas sadalīts 33 sektoros, tādējādi plūsma katrā sektorā ir 1/33 no kopējās plūsmas. Katrā sektorā izdalās 1/14 daļa no vidējās jaudas, to nosaka protonu kūļa impulsu frekvence. Šie apsvērumi ļauj salīdzināt stacionāra un rotējošā mērķa siltumfizikālās īpašības.



Att.2.31. Apskatītās kanālu sistēmu orientācijas  $x$ ,  $y$  un  $z$  ass virzienā rotējoša mērķa gadījumā. Mērķis ir sadalīts  $n_s=33$  sektoros, 1sekundē 3 MW vidējā jauda izdalās  $n=14$  sektoros.

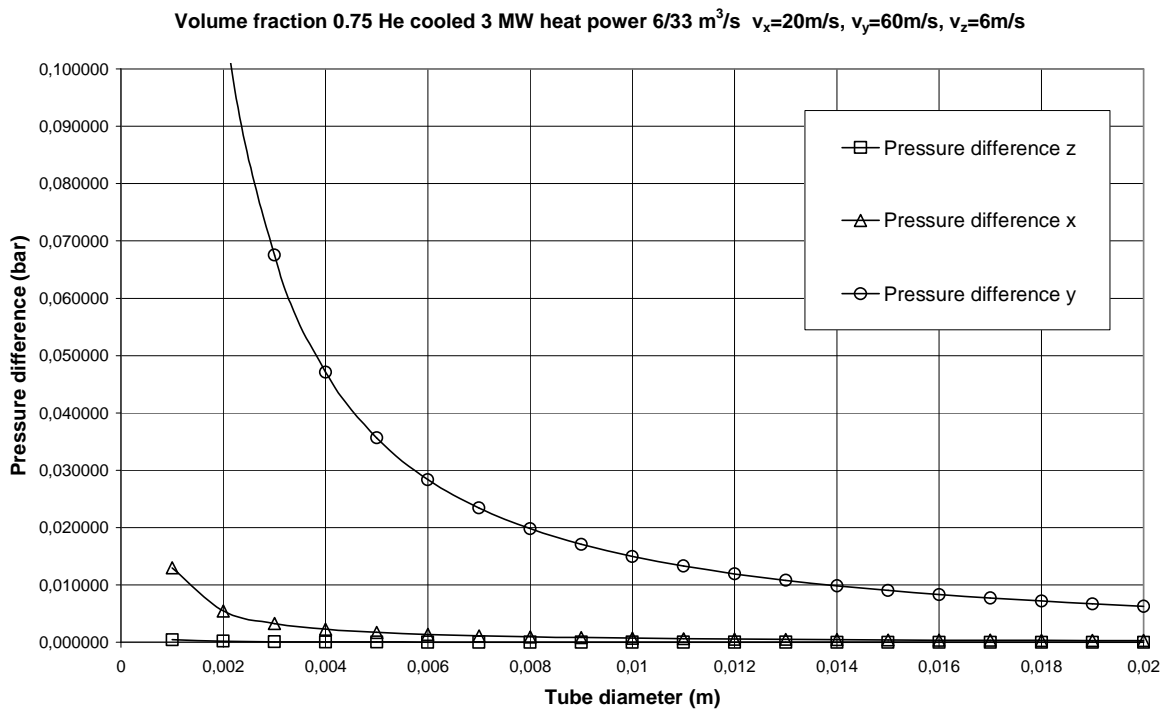
Rotējošā mērķa ietekme uz spiediena starpību ir acīmredzama un izpaužas spiediena starpības samazinājumā, kas kopumā ir vērtējams pozitīvi. Attiecībā uz temperatūras starpību starp sienu un siltumnesēju atbilde nav acīmredzama, jo, lai arī katrā sektorā ir jaudas samazinājums 33 reizes, plūsma ir samazinājusies 33 reizes, kas noved pie siltumapmaiņas koeficienta  $h$  samazinājuma. Hēlija un ūdens gadījumā siltum pārneses atkarība no plūsmas ir spēcīgāka nekā gallijam, tādējādi no siltum pārneses viedokļa pāreja uz rotējošu mērķi gallija gadījumā ir izdevīgāka nekā hēlija un ūdens gadījumā.

Apskatot dzesēšanu ar hēliju (32. un 33.att.) un salīdzinot to ar stacionārā mērķa rezultātiem (25. un 26.att.), redzams, ka siltuma pārneses apstākļi ir nedaudz uzlabojusies, jo pie apskatītā temperatūras starpības ierobežojuma 600 K siltum pārnese iespējama pie lielāka diametra kanāliem – >20 mm (stacionāram - 14 mm)  $y$  virzienam, 13 mm (stacionāram - 7 mm)  $x$  virzienam un 8 mm (stacionāram - 3mm)  $z$  virzienam. Tas ir saistīts ar faktu, ka hēlija siltuma pārneses atkarību no plūsmas ātruma rada mazāku  $h$  samazinājumu (apm. 16.4x, tabulas Pielikumā), nekā 33 kārtējs jaudas samazinājums.

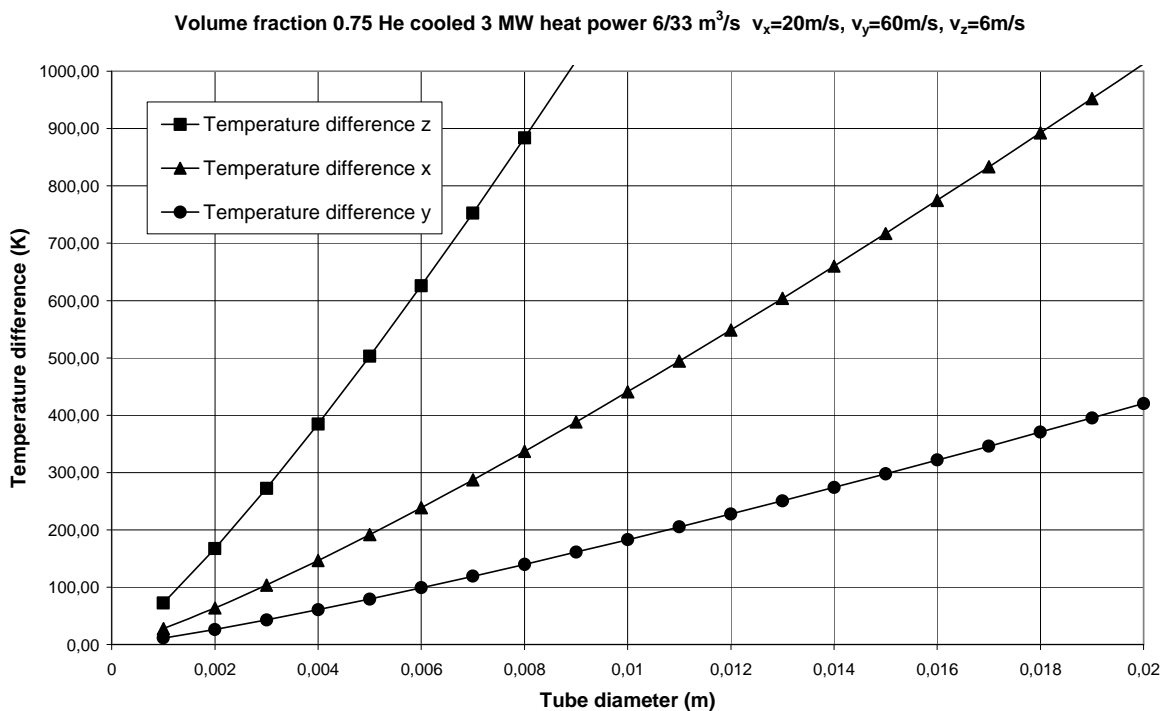
Līdzīga situācija ir arī ar ūdens dzesēšanu (sk.34.un 35.att.), savukārt gallija gadījumā (sk.36. un 37.att.) siltuma pārnese ir uzlabojusies daudz lielākā mērā. Tas ir skaidrojams ar šķidro metālu mazo Prandtļa skaitli, kas nosaka ievērojami lielāku konduktivitātes lomu, tādējādi  $h$  samazinājums ir mazāks (apm. 3.7x), nekā jaudas samazinājums sektorā (33x).

Izmantojot hēliju, rotējošā mērķa konstrukcija tikai daļēji risina lielo ātrumu problēmu, jo kopējā plūsma tiek sadalīta pa sektoriem. Taču plūsmas sadales vietās

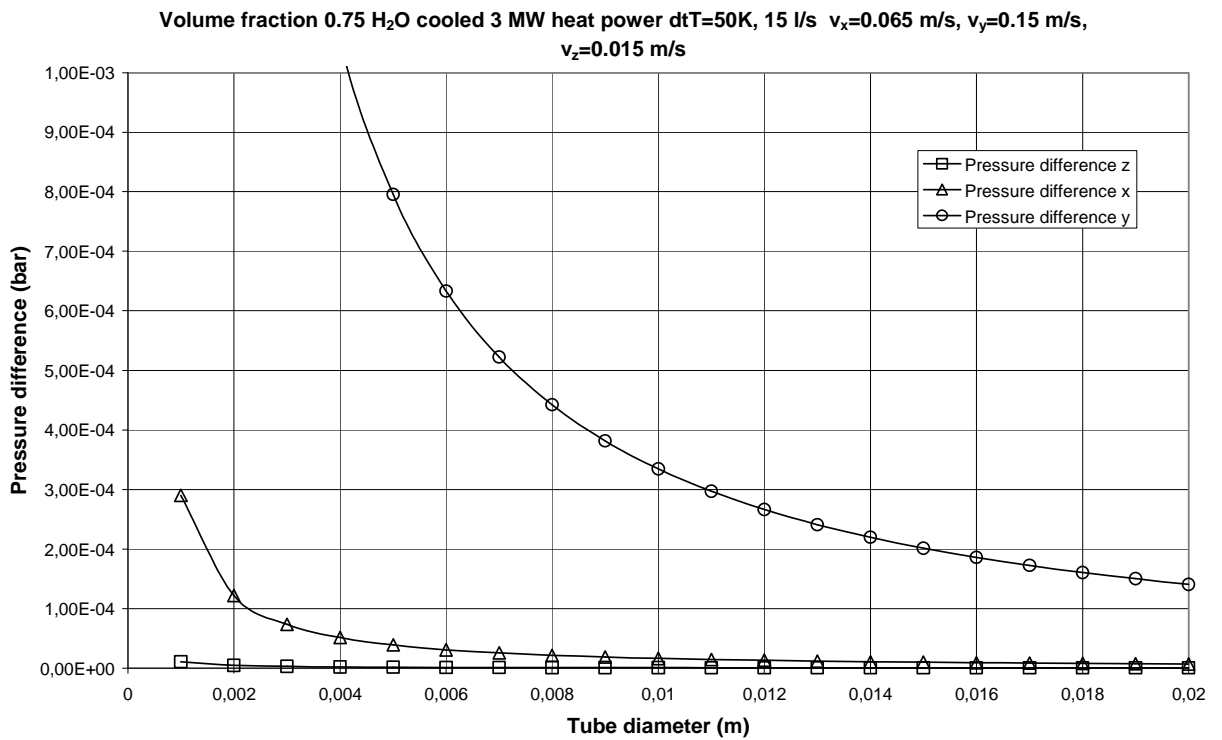
Īpaši jā rūpējas par šķērsriezuma laukuma palielināšanu, lai novērstu lielos lokālos ātrumus, kas sasniedz simtus metru sekundē, sk. 38.att.



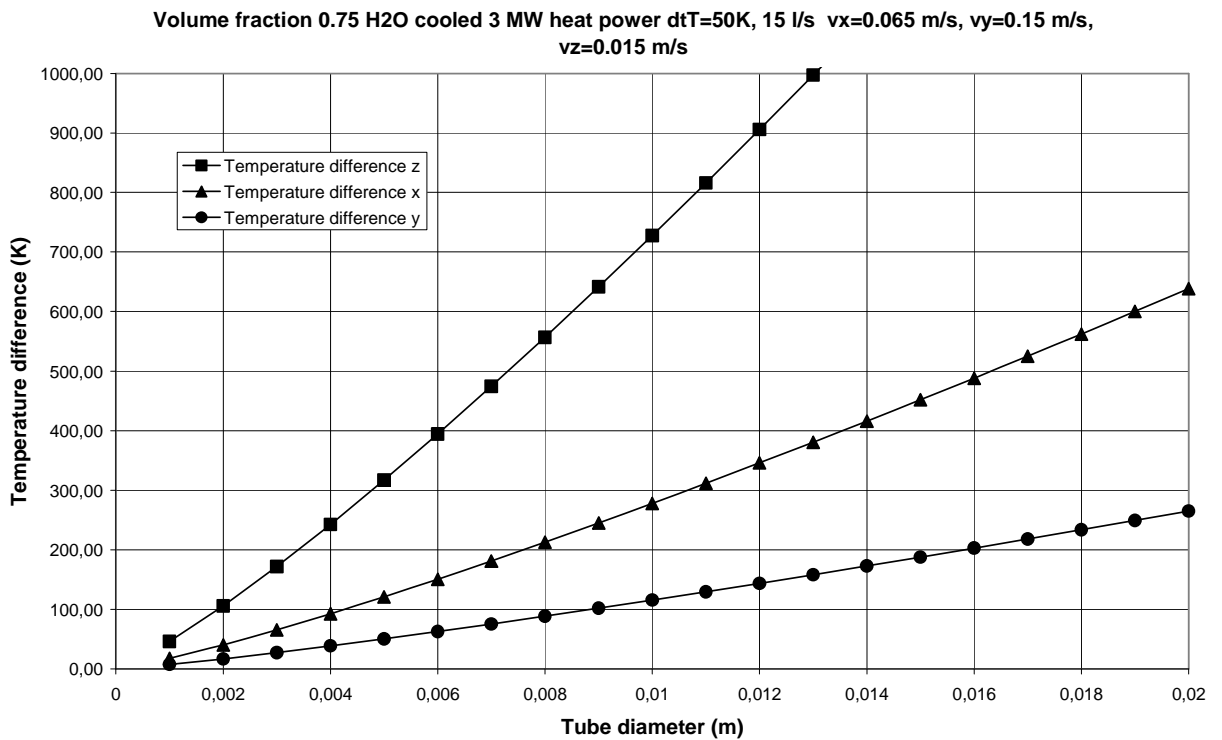
Att.2.32. Spiediena starpība dažādām kanālu orientācijām rotējošā mērķī hēlija dzesēšanas gadījumā.



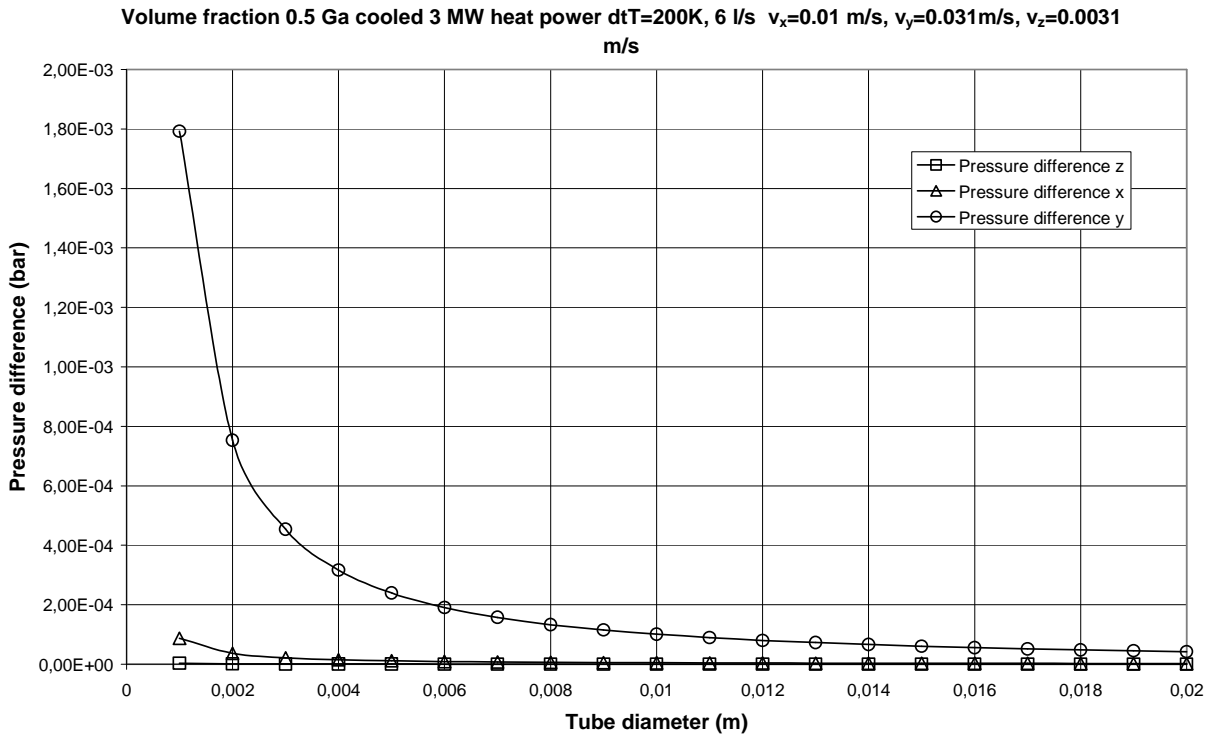
Att.2.33. Temperatūras starpība dažādām kanālu orientācijām rotējošā mērķī hēlija dzesēšanas gadījumā



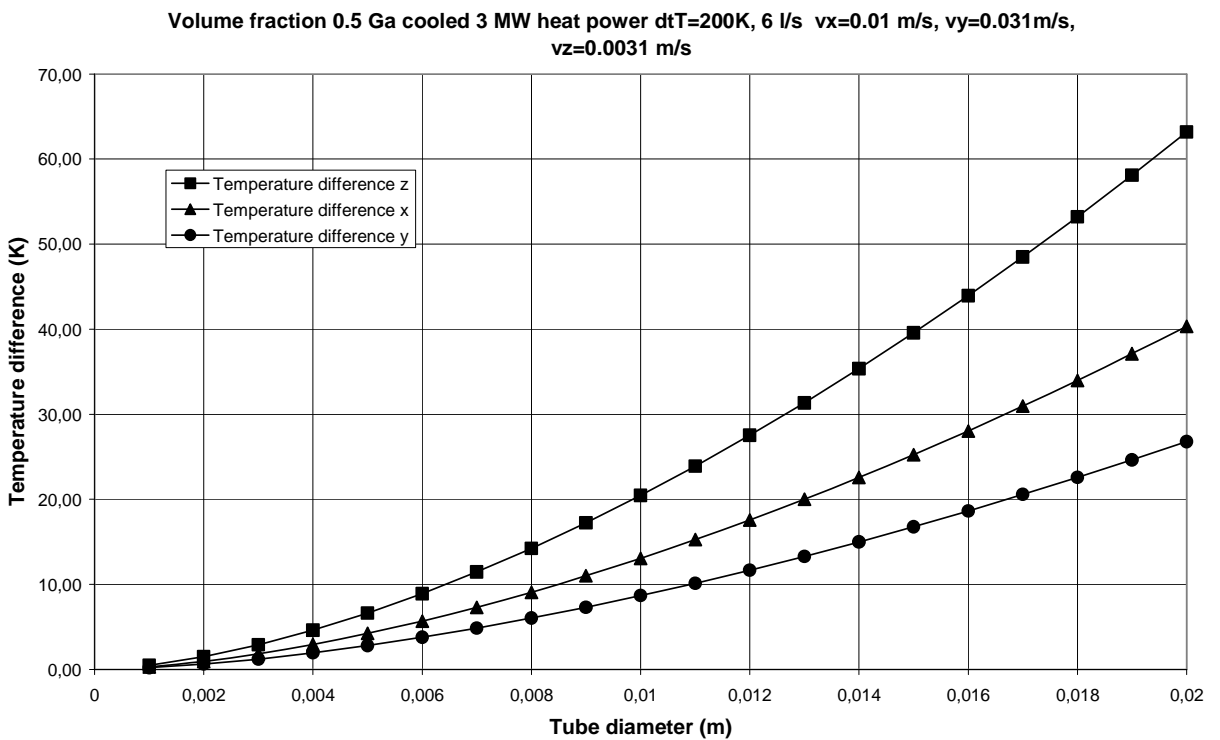
Att.2.34.. Spiediena starpība dažādām kanālu orientācijām rotējošā mērķī ūdens dzesēšanas gadījumā.



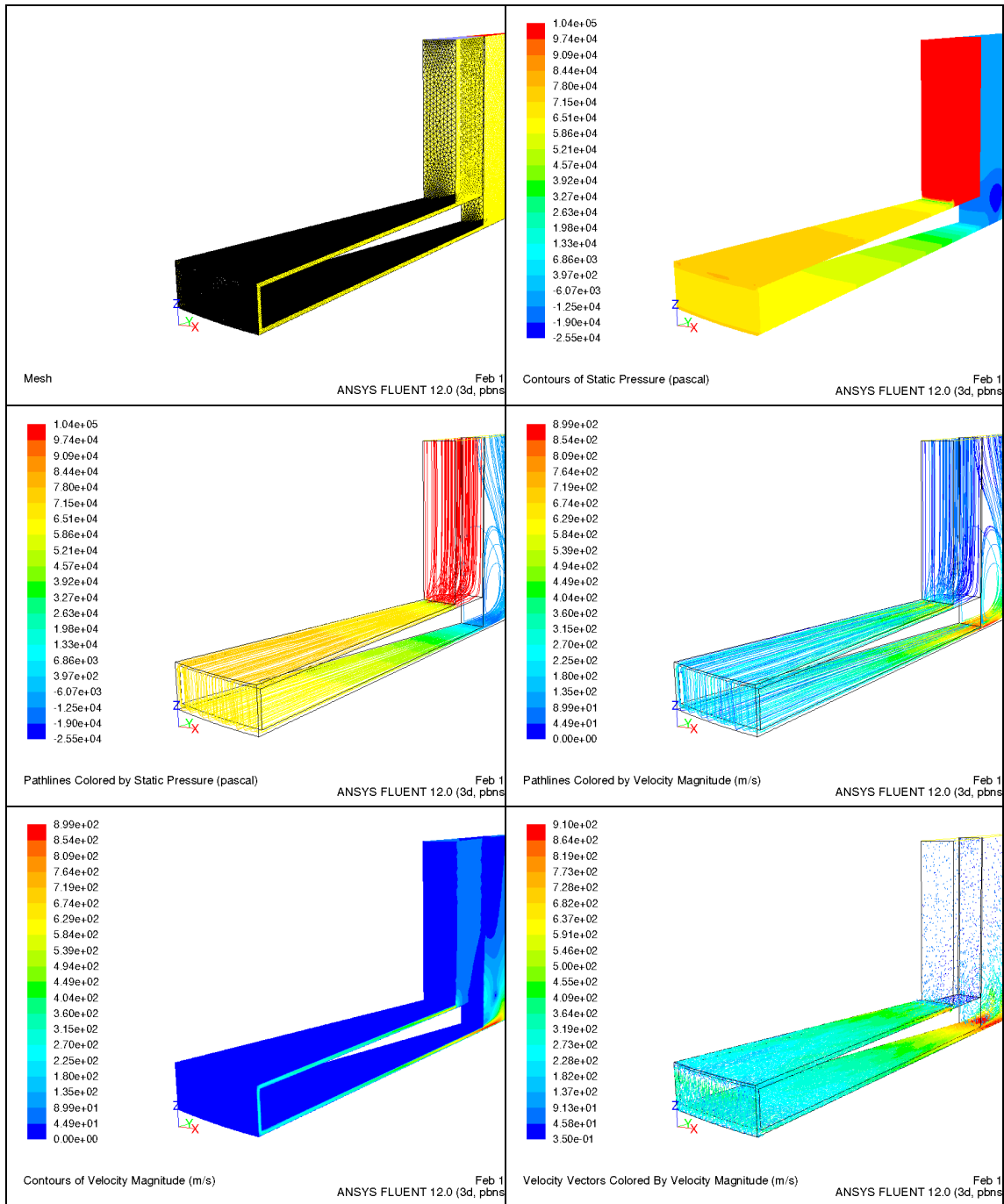
Att.2.35. Temperatūras starpība dažādām kanālu orientācijām rotējošā mērķī ūdens dzesēšanas gadījumā.



Att.2.36. Spiediena starpība dažādām kanālu orientācijām rotējošā mērķī gallija dzesēšanas gadījumā.



Att.2.37. Temperatūras starpība dažādām kanālu orientācijām rotējošā mērķī gallija dzesēšanas gadījumā.



Att.2.38. Ātruma un spiediena sadalījumi rotējošā mērķa sektorā hēlija dzesēšanas gadījumā.

## Secinājumi

Veikto pētījumu rezultātus var apkopot sekojošos secinājumos:

- Konvektīvais siltuma pārnese mehānisms ir vispiemērotākais siltuma pārnesei no protonu mērķa zonas, kurā izdalās enerģija. Pie reāli sasniedzamām plūsmām raksturīgā temperatūru starpība ir 100 °C robežās.
- Konduktīvā siltuma pārnese izmantošana raksturīgās temperatūru starpības palielina 5-10 reizes.
- Formējot ātrumu lauku tikai pēc jaudas blīvuma sadalījuma protonu stara virzienam atbilstošās koordinātes, maksimālā temperatūras starpība ir apmēram divas reizes lielāka par temperatūras starpību starp mērķa izejas un ieejas temperatūrām.
- Efektīvai konvektīvās siltuma pārnese realizēšanai nepieciešams nodrošināt pietiekami intensīvu šķidrums sajaukšanos, lai kompensētu ātruma sadalījuma neoptimālo sadalījumu un samazinātu maksimālo temperatūru mērķa tilpumā.
- Apvienojot rotējoša mērķa ilgmūžību ar šķidro metālu siltuma pārnese priekšrocībām būtu iespējams izveidot mērķa konstrukciju, kas būtu optimāla pēc vairākiem parametriem.
- Ar līdzstrāvas palīdzību protonu mērķī iespējams iegūt kvalitatīvi līdzīgu Džoula siltuma blīvuma sadalījuma kā reālā protonu mērķa konstrukcijā.
- Džoula siltuma jaudas attiecība pret protonu mērķa reālo jaudu pareizi atspoguļojas raksturīgajās temperatūru starpībās starp mērķa ieeju un izeju.
- Variējot plūsmu caur mērķi iespējams piemērot raksturīgās temperatūru starpības eksperimenta iespējām (pieejamās jaudas, temperatūras mērīšanas precizitāte).
- Izmantojot vienkāršotu cietā stacionārā un rotējošā mērķa modeli, kura parametri atbilst ESS koncepcijai un parametriem, parādīts, ka hēlija vai ūdens dzesētāja gadījumos rotējošā mērķa konstrukcijas izmantošana tikai nedaudz uzlabo siltuma pārnese apstākļus.
- Gallija kā dzesētāja izmantošana dod ievērojamas priekšrocības kā spiediena starpības, tā arī temperatūras starpības samazināšanai protonu mērķī.
- Rotējošas konstrukcijas izmantošana gallija gadījumā vēl vairāk uzlabo siltuma pārnese apstākļus salīdzinājumā ar stacionāro mērķi un tas ir saistīts ar gallija (un citu šķidro metālu) mazo Prandtļa skaitli.

## Izmantotā literatūra.

1. The ESS Project: Vol. I, *European Source of Science*; Vol. II, *New Science and Technology for the 21st Century*; Vol. III, *Technical Report*; Vol. IV, *Instruments and User Support*. Available at [http://neutron.neutron-eu.net/n\\_documentation/n\\_reports/n\\_ess\\_reports\\_and\\_more/102](http://neutron.neutron-eu.net/n_documentation/n_reports/n_ess_reports_and_more/102).
2. J.Wolters. Assessment of target concepts with respect to the heat removal capability and the pressure pulse problem. Report: The European Spallation Neutron Source (ESS), FP7-INFRASTRUCTURES-2007-1, GAN202247
3. F.P.Incropera, D.P.DeWitt. Fundamentals of heat and mass transfer. J.Wiley & Sons, 1990.



4. G. Heidenreich. Design of Solid Spallation Targets at PSI. Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, Switzerland. 2nd High-Power Targetry Workshop, Oak Ridge, TN, October 10-14, 2005.
5. Cyril Kharoua. Helium Cooled Rotating Granular Target. 2nd ESS TAC, Lund 2011-01-13.
6. L. Buligins Heat transfer simulations in liquid metal target at ESS conditions. Report: The European Spallation Neutron Source (ESS), FP7-INFRASTRUCTURES-2007-1, GAN202247, 25 pp.
7. I. Platnieks Introduction of transverse to beam flow in the liquid metal target as a way to minimize the heat evacuation system and as a scope to design windowless target. Report: The European Spallation Neutron Source (ESS), FP7-INFRASTRUCTURES-2007-1, GAN202247, 29 pp.
8. S.-E. Kim, D. Choudhury, and B. Patel. Computations of Complex Turbulent Flows Using the Commercial Code ANSYS FLUENT. In *Proceedings of the ICASE/LaRC/AFOSR Symposium on Modeling Complex Turbulent Flows*, Hampton, Virginia, 1997.
9. F. R. Menter. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598-1605, August 1994.
10. ANSYS FLUENT 12.0 Magnetohydrodynamics (MHD) Module Manual. 2009 by ANSYS, Inc.
11. ESS Conceptual Design Report, February 6, 2012, ESS-2012-001. ISBN 978-91-980173-0-4
12. R.B. Bird, W.E. Stuart, E.N. Lightfoot. *Transport Phenomena*. J. Wiley & Sons, 2007.
13. Siman-Tov M., Wendel M, Haines J. and Rogers M, "Thermal-Hydraulic Analysis of the Liquid Mercury Target for the National Spallation Neutron Source" Proc of Reactor Safety (ARS'97), Orlando, Florida, (1997-6).

Iesniegtie raksti: (sk. Pielikumū).

1. Elsevier Editorial System(tm) for Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A

**Internal geometry and coolant choices for solid high power neutron spallation targets.** L. Buligins<sup>a\*</sup>, K. Thomsen<sup>b</sup>, O. Lielausis<sup>c</sup>, E. Platacis<sup>c</sup>, A. Poznaks<sup>c</sup>

<sup>a</sup> University of Latvia, Faculty of Physics and Mathematics, 8 Zellu str., LV-1002, Riga, Latvia, leonids.buligins@lu.lv

<sup>b</sup> Paul Scherrer Institut, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland

<sup>c</sup> Institute of Physics University of Latvia, 32 Miera str., LV-2169, Salaspils, Latvia

\*Corresponding author, e-mail: leonids.buligins@lu.lv, phone: +37167033777, fax: +3717033777

2. Magnetohydrodynamics:

**DEVICE FOR CONTACTLESS CONTROL OF LIQUID METAL FLOWRATE**

A. Romancuks<sup>a</sup>, L. Buligins<sup>b\*</sup>, A. Flerovs<sup>a</sup>, R. Nikoluskins<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institute of Physics University of Latvia, 32 Miera str., LV-2169, Salaspils, Latvia

<sup>b</sup> University of Latvia, Faculty of Physics and Mathematics, 8 Zellu str., LV-1002, Riga, Latvia, leonids.buligins@lu.lv

\*Corresponding author, e-mail: leonids.buligins@lu.lv, phone: +37167033777, fax: +3717033777

### Aktivitāte Nr.3. Metodikas un aprīkojuma izstrāde ekoloģisko prasību nodrošināšanai darbam ar dzīvsudrabu.\*

Pieaugot dzīvsudraba un to savienojumu izmantošanas apmēriem, palielinās arī apkārtējās vides piesārņojuma risks, kuru lielākoties nosaka tieši cilvēka neapdomāta darbība, jo tas ir toksisks ne tikai dzīvniekiem, putniem un zivīm, bet arī cilvēkam. Tieši tādēļ pēdējā laikā šai ekoloģiskajai problēmai pievērš pastiprinātu uzmanību. Eiropas Kopienas Komisija ir izstrādājusi stratēģiju, kuras mērķi iekļauj gan Hg emisijas samazināšanu, gan dzīvsudraba problēmas izpratnes uzlabošanu un tās risinājumus.

Aktivitātes mērķis ir, pirmkārt, Hg piesārņojuma mērīšanas metodikas apgūšana un attīstīšana, un dzīvsudraba piesārņojuma kontrole un novēršana, tādējādi īstenojot EK izstrādāto stratēģiju par Hg emisijas samazināšanu.

Dzīvsudraba kaitīgumu lielā mērā nosaka tas, kāda dzīvsudraba forma un kādā ceļā nonāk cilvēka organismā, piemēram, orāli iekļuvis metāliskais dzīvsudrabs uzsūcas ļoti slikti un pārsvarā tiek izvadīts ārā, savukārt ieelpoti metāliskā dzīvsudraba tvaiki uzsūcas labi, ātri nokļūstot asinīs un izplatoties organismā, iesaistoties reakcijās ar proteīniem, un nokļūstot smadzenēs. Organiskās dzīvsudraba formas, jo īpaši – metildzīvsudrabs (ļoti labi uzsūcas kuņģī, zarnās un lipīdos), tiek uzskatīts par ļoti bīstamu neirotoksīnu.

Eksistē daudz un dažādas metodes dzīvsudraba noteikšanai. Piemēram, gravimetrija, radiometrija, atomu absorbcijas spektrometrija (AAS) (aukstā tvaika, elektrotermālā), atomu fluorescences spektrometrija (AFS), atomu emisijas spektrometrija (AES) [spektrogrāfi, induktīvi saistīta plazma, mikroviļņu ierosināta plazma], neitronu aktivācijas analīze (NAA), masspektrometrija (MS)

LU Atomfizikas un spektroskopijas institūtā daudzu gadu laikā ir uzkrāta pieredze Hg piesārņojuma noteikšanai dažādās vidēs, izmantojot Zēmana dzīvsudraba analizatoru RA-915+. Tāpat ir arī pieredze piesārņojumu attīrīšanā un izpratne par darba metodēm, kas jāievēro darbā ar dzīvsudrabu, kā arī cilvēku saņemtās dozas novērtēšanā pēc Hg koncentrācijas izelpotā gaisā.

Dzīvsudraba dabiska koncentrācija vulkāniskajos un nogulumiežos ir 10-50 ng/g, izņemot cinobru, kurā ir 86,2% dzīvsudraba [1], apkārtējā apkārtējā gaisā intervālā 0.002 – 0.02 mg/dm<sup>3</sup>, jūras ūdenī – ap 0.03 mg/dm<sup>3</sup> [2]. Daļu no aprītē esošā dzīvsudraba dabā sasaista sērs, veidojot nešķīstošu savienojumu HgS, kas akumulējas nogulsnēs.

Kaut arī Hg ir sastopams dabā dažādās formās, tomēr tā palielinātās koncentrācijas apkārtējā vidē ir saistītas ar cilvēka darbību. Ir izstrādāti normatīvi, kas nosaka pieļaujamās Hg koncentrācijas gan dabas ūdeņos, gan dzeramajos ūdeņos, gan arī augsnē. Latvijā šie normatīvi ir sekojoši.

**Augsnes un grunts normatīvi**, kurus Latvijas Republikas teritorijā regulē MK noteikumi Nr.804 "Noteikumi par augsnes un grunts kvalitātes normatīviem" ("LV", 172 (3330), 28.10.2005.) [spēkā ar 29.10.2005.], parādīti 1. tabulā.

1. tabula.

#### Augsnes un grunts normatīvi atbilstoši LR MK noteikumiem Nr. 804

Augsnes tips	Hg µg/kg		
	A	B	C
<i>smilts</i>	250	2000	10000
<i>mālsmilts</i>	540	2000	10000
<i>smilšmāls</i>	800	3000	10000
<i>māls</i>	800	3000	10000

*Piezīmes:*

A - mērķlielums norāda maksimālo līmeni, kuru pārsniedzot nevar nodrošināt ilgtspējīgu augsnes un grunts kvalitāti;

B - piesardzības robežlielums — norāda maksimālo piesārņojuma līmeni, kuru pārsniedzot iespējama negatīva ietekme uz cilvēku veselību vai vidi, kā arī līmeni, kāds jāsasniedz pēc sanācijas, ja sanācijai nav noteiktas stingrākas prasības;

C - kritiskais robežlielums — norāda, ka, to sasniedzot vai pārsniedzot, augsnes un grunts funkcionālās īpašības ir nopietni traucētas vai piesārņojums tieši apdraud cilvēku veselību vai vidi.

**Dzeramā ūdens** kvalitātes normatīvs attiecībā uz dzīvsudraba koncentrāciju ir: **1.0 µg/l**. To nosaka MK noteikumi Nr.235 "Dzeramā ūdens obligātās nekaitīguma un kvalitātes prasības, monitoringa un kontroles kārtība" ("LV", 81 (2846), 30.05.2003.) [spēkā ar 31.05.2003.]. Tāds pats kvalitātes kritērijs ir arī attiecībā uz Hg koncentrāciju dabīgajā minerālūdenī (MK noteikumi Nr.1130 "Noteikumi par dabīgā minerālūdens un avota ūdens obligātajām nekaitīguma un marķējuma prasībām un kārtību, kādā izsniedz atļaujas dabīgā minerālūdens izplatīšanai un sedz izsniegšanas izmaksas" ("LV", 204 (4396), 28.12.2010.) [spēkā ar 29.12.2010.].

**Virszemes ūdeņu**, kurus izmanto vai kurus paredzēts izmantot dzeramā ūdens ieguvei, un **pazemes ūdeņu** normatīvi, saskaņā ar MK noteikumiem Nr.118 "Noteikumi par virszemes un pazemes ūdeņu kvalitāti" ("LV", 50 (2625), 03.04.2002.) [spēkā ar 04.04.2002.], apkopoti 2. tabulā.

2. tabula.

**Virszemes un pazemes ūdeņu normatīvi atbilstoši LR MK Noteikumiem Nr. 118**

Ūdeņu iedalījums	Hg µg/l	
	A	B
dzeramā ūdens ieguvei izmantojamie virszemes ūdeņi	0,5	1,0
pazemes ūdeņi	0,05	0,3

*Piezīmes:*

A - mērķlielums;

B — Robežlielums;

**Pārējiem virszemes ūdeņiem** Hg normatīvi, saskaņā ar MK noteikumiem Nr.118 "Noteikumi par virszemes un pazemes ūdeņu kvalitāti" ("LV", 50 (2625), 03.04.2002.) [spēkā ar 04.04.2002.], apkopoti 3. tabulā.

3. tabula.

**Pārējo virszemes ūdeņu normatīvi atbilstoši LR MK Noteikumiem Nr. 118**

Robežlielums gada vidējā koncentrācija (µg/l)		Robežlielums maksimāli pieļaujamā koncentrācija (µg/l)	
iekšzemes virszemes ūdeņi <sup>(1)</sup>	citi virszemes ūdeņi <sup>(2)</sup>	iekšzemes virszemes ūdeņi <sup>(1)</sup>	citi virszemes ūdeņi <sup>(2)</sup>
0,05 <sup>(8)</sup>	0,05 <sup>(8)</sup>	0,07	0,07

*Piezīmes:*

<sup>(1)</sup> Iekšzemes virszemes ūdeņi ietver visus stāvošos un tekošos ūdeņus uz zemes virsmas, tai skaitā saistītus mākslīgus vai stipri pārveidotus ūdensobjektus.

<sup>(2)</sup> Citi virszemes ūdeņi ietver pārejas un piekrastes ūdeņus, bet attiecībā uz ķīmisko kvalitāti – arī teritoriālos ūdeņus.

Hg normatīvs (pieļaujamā koncentrācija biotas indikatororganismu mīksto audu mitrā masā) virszemes ūdeņu biotas organismos (piemēram, zivīm, gliemjiem, vēžveidīgajiem vai citiem biotas organismiem) saskaņā ar MK noteikumiem Nr.118 "Noteikumi par virszemes un pazemes ūdeņu kvalitāti" ("LV", 50 (2625), 03.04.2002.) [spēkā ar 04.04.2002.] ir **20 µg/kg**.

**Dzīvsudraba un tā savienojumu** (pārrēķinot uz dzīvsudrabu) koncentrācijas gaisā dienas robežlielums (gaisa kvalitātes mērķlielums) ir **1 µg/dm<sup>3</sup>** (MK noteikumi Nr.1290 "Noteikumi par gaisa kvalitāti" ("LV", 182 (4168), 17.11.2009.) [spēkā ar 18.11.2009.]).

#### **Literatūra:**

[1] "Toxicological Profile For Mercury", U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, March 1999. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp46.html> v.s.

[2] **Morita, M., Yoshinaga, J., Edmonds, J. S.** The Determination of Mercury species in environmental and biological samples. *Pure & Appl. Chem.*, 1998, vol.70, No 8., p. 1585 – 1615

### **Biežāk izmantotās dzīvsudraba daudzuma noteikšanas metodes un aparātūra**

Nenoliedzamas līderpozīcijas ir iekarojušas **atomu absorbcijas spektrometrija** (AAS) un **atomu fluorescences spektrometrija** (AFS).

**Atomu emisijas spektrometrija** (AES) vēsturiski ļoti populāra ir ģeoķīmijā. Šajā metodē tiek mērīta dzīvsudrabam atbilstošā starojuma spektra emisijas intensitāte. AES ir izstrādāta, aizstājot agrāk izmantoto liesmas vai elektriskā loka emisiju ar plazmas emisiju, kuru ierosina ar radiofrekvenci, induktīvu saiti, vai mikroviļņiem. [1] pieminēts, ka dažādu autoru norādītais metodes jūtīguma sliekšnis dzīvsudraba analīzei šķīdros paraugos ir 0,5-50 pg/ml, kas gan neliekas īsti ticami, jo [2] norādīti 2 ng/ml, [3] – 0,5 ng/ml.

**Neitronu aktivācijas analīzes** (NAA) un **rentgenstaru fluorescences** (XRF) metožu vērtīgās īpašības ir relatīvi īsais analīzei nepieciešamais operatora laiks, iespēja veikt nedestruktīvu parauga analīzi, kā arī labs jūtīgums. NAA gadījumā tiek mērīta intensitāte gamma starojumam, kuru izdala neitronu bombardēšanas rezultātā izveidojies <sup>197</sup>Hg izotops. Ir gan vēlams, lai paraugi būtu atbrīvoti no pārmērīga liekā mitruma, tāpēc nereti tie tiek sagatavošanas procesā izžāvēti, taču tas rada arī dzīvsudraba zudumus [1]. [2] minēts, ka NAA metodes jūtīgums šķīdriem un cietiem paraugiem atkarībā no ierosmes avota var būt 0,01-10 ng/g robežās. XRF gadījumā tiek mērīts rentgenstarojums, kuru paraugs emitē apstarošanas ar rentgenstariem rezultātā [4]. Kā rentgenstaru avots tiek izmantots radioaktīvs materiāls vai rentgenstaru lampa. Absorbētie rentgenstaru kvanti var izsist elektronus no parauga atomu iekšējām čaulām, radot vakances. Vakances aizpildās no ārējiem elektronu slāņiem, enerģijas starpību atdodot starojuma veidā. Dažādu elementu atšķiršanai tiek izmantots emitētā starojuma viļņa garums, taču metodes pielietojamība ir ierobežota ar galvenokārt kvalitatīvu elementa klātbūtnes detektēšanu ('*screening*'). XRF tiek izmantots tikai cietu paraugu analīzē (piemēram, augsne), dzīvsudraba noteikšanas jūtīgums metodei ir 30 µg/g. XRF mērījumu laiki var mainīties 30 s (sākotnējā pārskatīšana) līdz 300 s (precīzāka analīze). Izmantojot mūsdienu tehnoloģijas, XRF iekārtas var izgatavot ļoti portablas, tāpēc metode nereti tiek saukta arī par FPXRF – '*Field Portable X-ray Fluorescence*'



Att.3.1. – FPXRF iekārtas lietošana lauka apstākļos

**Masas spektrometrija (MS)** var būt ārkārtīgi precīza. Pētāmais paraugs tiek sašķelts, un pēc tam reģistrējot dažādas materiāla sastāvdaļas atkarībā no to masas, nosaka parauga sastāvu. Pagātnē kā avots tika izmantota dzirkstele, taču mūsdienās visbiežāk tiek lietota ar induktīvu sasaisti veidota plazma – metodes nosaukums attiecīgi ir ICP-MS (*‘Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry’*). Metode tiek lietota šķidru un cietu paraugu analīzei, [1] uzrādītais tās jūtības limits ir 8 pg,– 0,2 ng/ml.

**Anoda svītrosšanas voltammetrija (ASV)** ir elektrometrijas paveids, kad ar elektrisku impulsu palīdzību tiek ierosināta dzīvsudraba galvanizācija uz zelta kārtiņas elektroda. Pēc tam, mērot zelta kārtiņas vadītspējas izmaiņu, ir iespējams noteikt dzīvsudraba koncentrāciju šķīdumā. [1] ir minēts jūtīguma sliekšnis 10 ng/ml. Lai gan ar šīs metodes palīdzību ir iespējams atšķirt dažādos dzīvsudraba paveidus, lietošanā tā ir neērta un lēna, tāpēc tās vietā aizvien biežāk izmanto AAS.

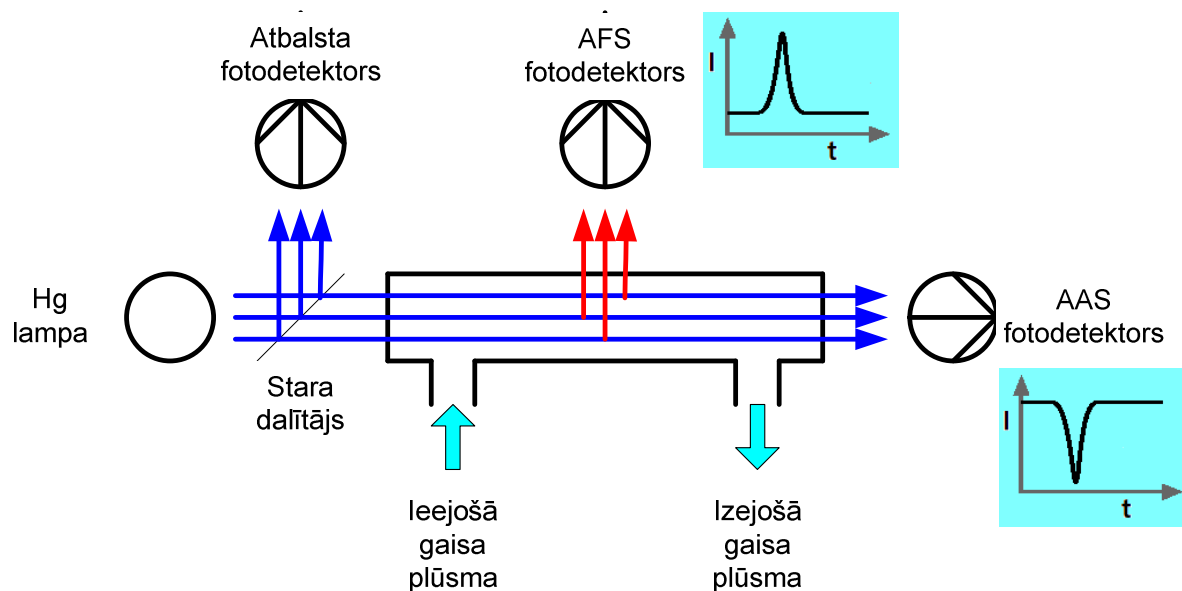
**Gāzu hromatogrāfija (GC)** un **augstas izšķirtspējas šķidrumu hromatogrāfija (HPLC)** ir drīzāk nosaukamas par paraugu sagatavošanas metodēm, kuras tiek lietotas apvienojumā ar citiem mērīšanas paņēmieniem (piemēram, AES), tāpēc šeit tās sīkāk aplūkotas netiek. Vienkāršotus to aprakstus var atrast, piemēram, [5].

[1] ir pieminētas arī citas, mūsu dienās vairs neizmantojamas, taču vēsturiski interesantas metodes. Viena no tādām ir **mikrometrija** – dzīvsudrabs tika no skābes šķīduma uzkrāts vara putekļos un pēc tam destilācijas procesā izgulsnēts uz zelta follijas, un novērtēts vizuāli ar palielināmā stikla vai mikroskopa palīdzību. Pirms AAS ieviešanas 1960-tajos gados populāra bija **kolorimetrija**, kur tika izmantota dzīvsudraba īpašība ar dažiem reaģentiem veidot krāsainus savienojumus, kurus mērot ar spektrofotometriskām metodēm, varēja novērtēt dzīvsudraba daudzumu. Kolorimetrijas jūtīguma robeža bija 1 μg dzīvsudraba.

#### **Atomu absorbcijas un fluorescences spektrometrijas metodes**

Gan AAS, gan AFS ir līdzīgi darbības principi, kuri aplūkoti, izmantojot 5.attēlā parādīto AAS un AFS mēriekārtu darbības shēmu. Atkarībā no paņēmiena, kā analīzes kamerā tiek nogādāts analizējamais materiāls, izšķir dažādus AAS un AFS paveidus, taču dzīvsudraba gadījumā visbiežāk tiek pieminētas CVAAS (*‘Cold Vapour Atomic Absorption Spectrometry’*) un CVAFS (*‘Cold Vapour Atomic Fluorescence Spectrometry’*). Tas saistīts ar to, ka dzīvsudraba īpašība, ka tam ir ļoti liels tvaika spiediens salīdzinoši zemās temperatūrās, ļauj to viegli ievadīt spektrometrā tvaika veidā istabas temperatūrā.

Tvaiku apstāro ar dzīvsudraba lampu, parasti kā darba instrumentu izmantojot dzīvsudraba līniju ar 253,7 nm viļņa garumu (lai gan ir arī risinājumi, kuros tiek lietota 184,9 nm līnija). Lai koriģētu lampas spožuma svārstību radītās kļūdas, stara ceļā tiek ievietots stara dalītājs, kurš daļu krītošā starojuma novirza uz atbalsta fotodetektoru. Pārējais starojums nonāk analīzes kamerā. Kameras otrā galā var mērīt caurizgājušā starojuma absorbciju (AAS), vai arī kameras sānos var mērīt kamerā esošā dzīvsudraba fluorescenci (AFS).



Att.3.2. AAS un AFS mēriekārtu darbības shēma

Galvenā problēma, ar kuru ir jācinās AAS un AFS gadījumā, ir rezultātu atkarība no analīzes kamerā nokļūstošajiem traucējošajiem elementiem.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  un virknei organisko molekulo savienojumu ir izteiktas absorbcijas joslas dzīvsudraba joslu tuvumā, kas traucē AAS. AFS gadījumā pret to daļēji palīdz dzīvsudraba fluorescences frekvences selektīvā rezonanse, taču šai metodei savukārt traucē, piemēram,  $\text{O}_2$  un  $\text{N}_2$  klātbūtne, kas slāpē fluorescenci. Lai šo problēmu risinātu, lieto zelta amalgamācijas metodes, vai alternatīvi (tikai AAS gadījumā) – fona korekcijas metodes ar Zēmana efekta palīdzību [1].

Zelta amalgamācijas metodes būtība ir sekojoša: istabas temperatūrā īsu brīdi notiek selektīva dzīvsudraba adsorbcija uz zelta virsmas. Pēc tam attiecīgā iekārtas daļa no traucējošajiem piemaisījumiem tiek iztīrīta ar īpaši attīrīta gaisa (AAS gadījumā), vai argona (AFS gadījumā) palīdzību. Tad dzīvsudrabu atbrīvo, „slazdu” uzkaršējot, un veic mērījumu. Šāda paņēmiena priekšrocība ir tā, ka līdztekus parauga attīrīšanai ir iespējama arī dzīvsudraba uzkrāšana, paaugstinot iekārtas jutīgumu. Trūkums – palēnināta mērīšana, dārgu materiālu izmantošana (īpaši – ja traucējošo piemaisījumu izvadīšanai tiek lietota inertā gāze).

Veicot fona korekciju ar Zēmana efekta palīdzību, nav nepieciešams uzkrāšanas/karsēšanas cikls un attīrošās gāzes izmantošana, un mērījumus var veikt nepārtraukti.

Nopietns diskusijas materiāls varētu būt šo divu metožu salīdzinājums.

[6] minēts, ka ar CVAAS precizitāte šķīdros un cietos paraugos ir 0,01-1 ng/g robežās. Turpat minēts, ka „Gardis Mercury Analyzer” var sasniegt jūtīgumu gāzveida paraugiem 0,1 ng/m<sup>3</sup> (mērīšanas cikla ilgums 10 min). „Mercury Tracker 3000” sasniedz jūtīgumu tikai 100 ng/m<sup>3</sup>, taču ar daudz īsāku mērīšanas ciklu – 1 s [7].

[2] minēts, ka šķīdros un cietos paraugos AFS metodes jūtīgums var sasniegt 0,001-0,01 ng/g robežās. Minēts iekārtas „PSA – Sir Galahad II System” jūtīguma sliekšnis 0,1 pg, „Tekran Model 2537A” jūtīgums gāzveida paraugiem 0,15 ng/m<sup>3</sup> (mērīšanas cikla ilgums 10 min).

### Literatūra:

[1.] The Determination Of Mercury Species In Environmental And Biological Samples", Technical Report, IUPAC, Pure & Appl. Chem., Vol. 70, No. 8., 1998.

<http://www.iupac.org/publications/pac/1998/pdf/7008x1585.pdf>

[2.] Ambient Air Pollution by Mercury (Hg)", Position Paper, 17 October 2001.

Prepared by the Working Group On Mercury, European Commission.

[http://www.europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/pp\\_mercury.pdf](http://www.europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/pp_mercury.pdf)

[3.] "Toxicological Profile For Mercury", U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, March 1999.

<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp46.html>

[4.] "Field Portable X-ray Fluorescence Spectrometry For The Determination Of Elemental Concentrations In Soil And Sediment", Method 6200, EPA, January 1998.

<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/6200.pdf>

[5.] P.T.Palmer, "A Review of Analytical Methods for the Determination of Mercury, Arsenic, and Pesticide Residues on Museum Objects", Collection Forum, Vol. 16(1-2), 2001.

<http://www.spnhc.org/documents/CF16/palmer.pdf>

[6.] „Ambient Air Pollution by Mercury (Hg)", Position Paper, 17 October 2001.

Prepared by the Working Group On Mercury, European Commission.

[http://www.europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/pp\\_mercury.pdf](http://www.europa.eu.int/comm/environment/air/pdf/pp_mercury.pdf)

[7.] „Mercury Tracker 3000” Technical Specifications. [http://www.mercury-](http://www.mercury-instruments.de/index_Mercury_Instruments.html)

[instruments.de/index\\_Mercury\\_Instruments.html](http://www.mercury-instruments.de/index_Mercury_Instruments.html)

### Raksti, konferences:

1. Viktors Fjodorovs, Egils Bogans, Small-size HFEDL cold-spot investigations with spectrometric and thermophotometric methods, **Abstracts of Developments in Optics and Communications**, April 12-14, 2012, Riga, Latvia, p. 30.

2. Egils Bogans, Janis Skudra, Anda Svagere, Zanda Gavare, Analysis of Mercury pollution in air in urban area of Riga using atomic absorption spectrometry, Peter Lang – Internationaler Verlag der Wissenschaften / Peter Lang – International Academic Publishers

<http://www.peterlang.com/>, in **Book, Umweltbildung, Umweltkommunikation und Nachhaltigkeit / Environmental Education, Communication and Sustainability** (<http://www.peterlang.com/index.cfm?event=cmp.ccc.seitenstruktur.detailseiten&seitentyp=series&pk=764>), *in Press*.

3. G. Revalde, N. Zorina, A. Skudra, Z. Gavare, Diagnostics of microsize light sources in magnetic field, **Romanian Reports in Physics**, *Submitted*

4. Revalde, Z. Gavare, N. Zorina, A. Skudra, Diagnostics of microsize light sources in magnetic field, **In abstracts of 16th International Conference on Plasma Physics**



**and Applications (CPPA 2013)**, Magurele, Bucharest, Romania, June 20-25, 2013, p.81

5. 54. A.Skudra, Z. Gavare, E. Bogans, A. Svagere, N.Denisova, Spectroscopic diagnostics of mercury containing capillary light sources for AAS, International conference on Mercury as Global Pollutant 2013, **In abstracts of International Conference on Mercury as a Global Pollutant 2013**, Edinburgh, UK, 28th July – 2nd August, 2013, G01.

6. G. Revalde, N. Zorina, A. Skudra Deconvolution of Multiple Spectral Lines Shapes by Means of Tikhonov's Regularization Method, **Imaging and Applied Optics, OSA Optics&Photonics Congress**, Arlington, Virginia, USA, June 23-27, 2013 ([www.osa.org/imaging\\_congress](http://www.osa.org/imaging_congress)).

#### **Aktivitate Nr.4. Daļiņu konversijas iekārtām atbilstoša specifiska MHD aprīkojuma izstrāde.**

Atskaldīto neitronu iekārtās viens no galvenajiem mezgliem ir mērķis. Esošajās „spallation” iekārtās (ASV, Japānā, Šveicē) protonu staru kūļa jauda nepārsniedza 1MW. Projektējamajā ESS-S atskaldīto neitronu iekārtā tiek plānota 5MW protonu staru kūļa jauda.

Mērķis tiek pakļauts lielai kombinētai slodzei (radiācijai, temperatūru gradientam, spiediena viļņu iedarbei u.c.). Tas var jūtami saīsināt ne tikai mērķa ekspluatācijas laiku, bet arī novest līdz iekārtas bojājumiem un avārijām. Tāpēc viens no galvenajiem uzdevumiem ir izstrādāt jaunu mērķa koncepciju. Viens no risinājumiem ir ciets rotējošs aptuveni 2.5m diametrā un 8 tonnas smags ar hēliju dzesēts volframa cilindrs. Tomēr lielā mērķa masa, augstā temperatūra (līdz 800°C), dzesēšanas problēmas, volframa putekļi izsauc pret tādu mērķa konstrukciju speciālistu aprindās zināmus iebildumus.

Kā jau minēts iepriekšējā progresa ziņojumā, kā alternatīvs variants tiek izskatīts šķidrā metāla mērķis. Tam ir vesela virkne priekšrocību - augsta siltuma aiznesšanas jauda, nav strukturālas radiācijas bojājumu mērķa materiālā, nav ūdens klātbūtnes protonu staru mijiedarbības zonā, pie tam tas izpilda divas pamatfunkcijas vienlaicīgi – ir darba materiāls un reizē siltumnesējs. Kā vēl vienu priekšrocību var atzīmēt nosacīti vienkāršo mērķa konstrukciju. Un vēl viens arguments par labu šķidrajam mērķim ir lielā siltumnesēja masa. Tas samazina šķidrā metāla radioaktivitātes līmeni ilgākā laika periodā un līdz ar to atvieglo mērķa nomaiņu, apkopi, remontu.

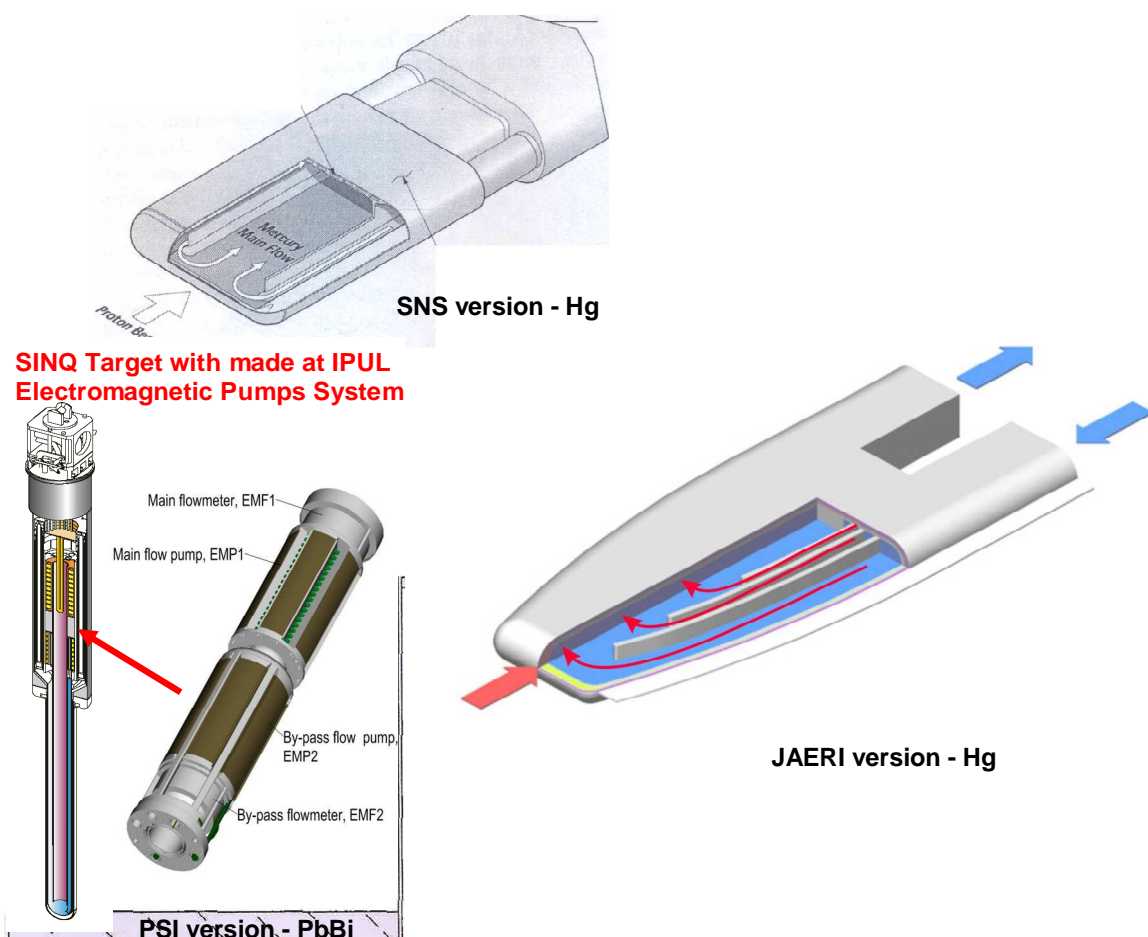
Protams, arī šķidrā metāla mērķim ir savi mīnusi, jo ekspluatācijas gaitā var rasties šķidrā metāla noplūde, dažādi radioaktīvie izotopi, piemēram, polonijs u.c.

Ņemot vērā iepriekš minētos apsvērumus, šķidrā metāla mērķis ir izvēlēts kā rezerves variants arī 5 MW jaudīgajam atskaldīto neitronu projektam Lundā (Zviedrijā). Līdz ar to ir ļoti aktuāla problēma izvērtēt dažādas mērķu konstrukcijas un variantus darbaspējīgus sevišķi smagos ekspluatācijas apstākļos – radiācija, nosacīti augstas darba temperatūras, konstrukcijas materiālu korozija, erozija u.c.

Attēlā 4.1. parādīti ekspluatācijā pārbaudīti vairāki mērķu varianti, kuri tomēr strādā atskaldīto neitronu iekārtās, kurās protonu staru kūļa jauda nepārsniedz 1MW. Minētajos mērķos protonu staru kūlis iedarbojas perpendikulāri mērķa virsmai. Mērķa aktīvais laukums aptuveni ir 20.0 x 6.0 cm<sup>2</sup>. Līdz ar to slodze uz vienu kvadrācentimetru sastāda gandrīz 10 kW. Pie tam jāatzīmē, ka izskatīto mērķu darba



resurss ir diezgan īss – tikai daži mēneši. Pēc tam mērķis ir jānomaina. Tā ir darbietilpīga, dārga un smaga procedūra. Darbi notiek speciālā "karstā" kamerā un visas operācijas tiek veiktas distanciāli ar speciālu mehānismu palīdzību.



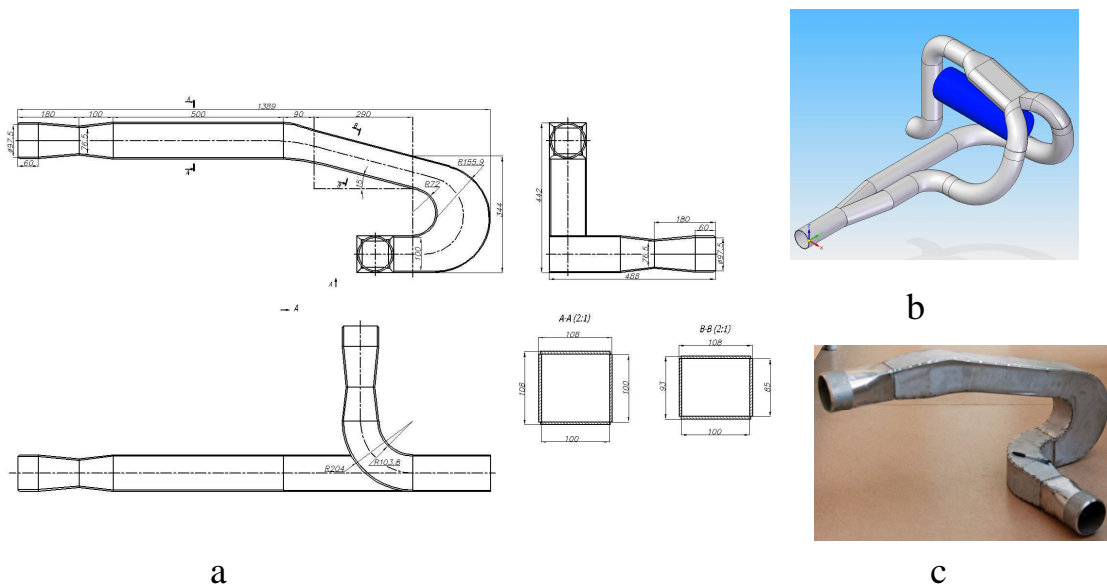
Att. 4.1. Šķidrā metāla mērķa varianti.

1. Trīsplūsmu dzīvsudraba mērķis, Okridža, ASV; 2. Šķērsplūsmas dzīvsudraba mērķis, Jaeri, Japāna; 3. Vertikālais svina – bismuta mērķis, PSI, Šveice.

Tāpēc ļoti aktuāla problēma ir atrast jaunu mērķa risinājumu. Perspektīvs risinājums varētu būt, kad protonu staru kūlis iedarbojas nevis perpendikulāri mērķa virsmai, bet slīpi, att. 4.2. Tādā gadījumā palielinās mērķa virsma uz kuru iedarbojas staru kūlis un līdz ar to samazinās termo-slodze.

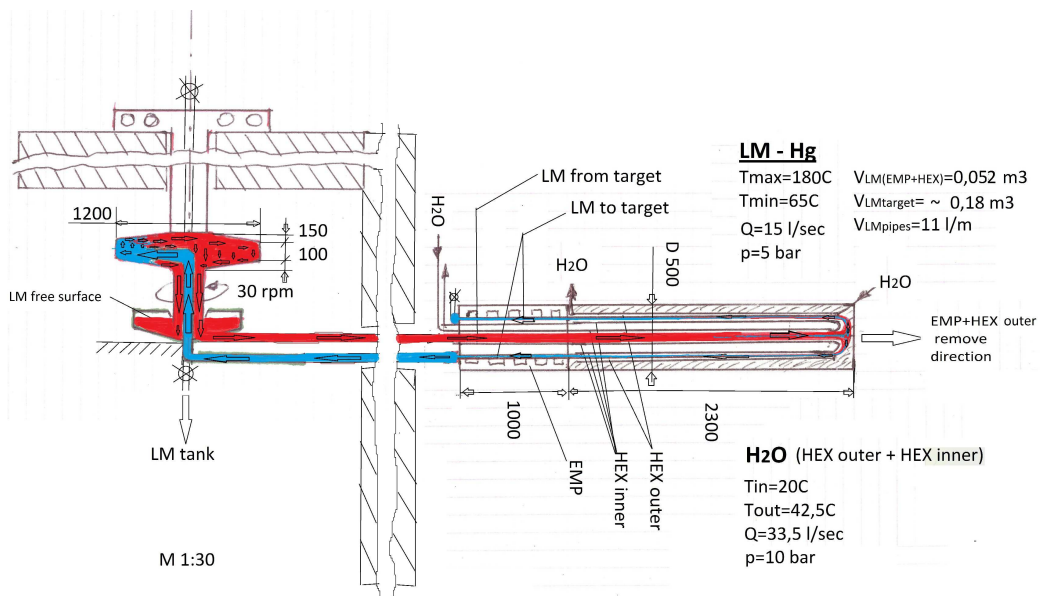
Ļoti interesants risinājums ir rotējošs šķidrā metāla mērķis, att.4.3. Par cik protonu staru kūlis darbojas impulsu režīmā, ir iespēja nodrošināt tādu mērķa rotācijas ātrumu, lai katrs nākošais protonu staru impulss iedarbotos uz jau atdzesētu mērķa sektoru. Protams tāda mērķa konstrukcija ir sarežģīta, it īpaši pievadmechānisms, toties tā darba mūžs būtu ievērojami ilgāks.

Bez tam konkurētspējīgs varētu būt arī rotējošs cietā metāla mērķis dzesēts nevis ar hēliju, vai ūdeni, bet gan ar šķidru metālu, piemēram galliju, (sk. aktivitāti Nr. 2).



Att. 4.2. „Slīpā loga” mērķa modulis.

a - moduļa geometriskie izmēri; b - moduļa shēma; moduļa skats (modulis izpildīts mērogā 1:2).



Att. 4.3. Šķidrā metāla rotējošā mērķa moduļa principiālā shēma.

No šiem apsvērumiem redzams, ka galīga mērķa izvēle prasa nopietnu kā teorētisku, tā arī eksperimentālu izvērtējumu.

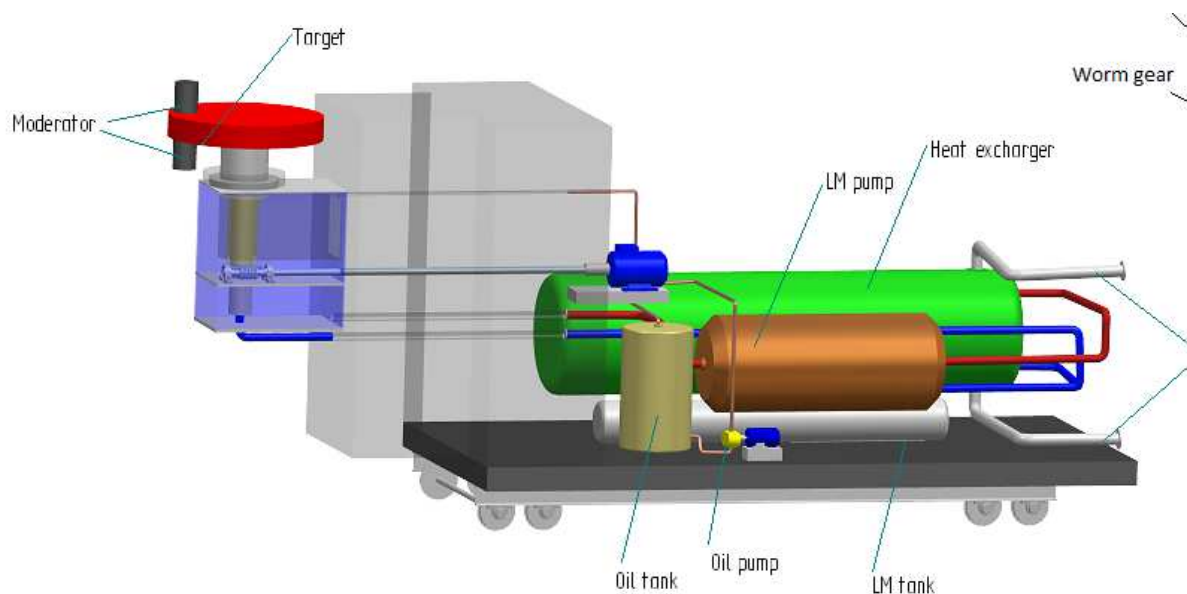
Daļiņu konversijas (protonu - neitronu atskaldīšanas) iekārta ir super sarežģīta. Tādas iekārtas kopējās izmaksas sasniedz vairākus desmitus miljonu EUR. Protams, šī projekta ietvaros nav paredzēts izstrādāt tās tehnisko dokumentāciju, bet tikai izvērtēt iespēju pielietot MHD – tehnoloģijas, atsevišķas ietaises, mezglus turpmākā projekta izstrādē.

Aktivitātes Nr.4. atskaites periodā izstrādāta konversijas iekārtas principiālā shēma, att.4.4. un atsevišķi mezgli (elektromagnētiskais sūknis, caurteces mērītājs, Venturi caurule u.c.), hidrodinamisko pētījumu veikšanai pie šķidrā metāla caurplūdes un temperatūrām maksimāli tuvām reāliem iekārtas ekspluatācijas apstākļiem ( $Q \sim 15\text{L/s}$ ;  $T$  – līdz pat  $350 - 400^\circ\text{C}$ ).

Galvenie daļiņu konversijas iekārtas mezgli ir ;

- protonu – neitronu mērķis;
- šķidrā metāla (PbBi) cirkulācijas kontūrs;
- elektromagnētiskais sūknis;
- siltummainis;
- caurteces mērītājs

Palīgierīces (šķidrā metāla tvertne, ventīļi, līmeņraži, spiediena devēji, vakuuma – gāzes sistēma, izplešanās tvertne u.c.) netiek apskatītas.

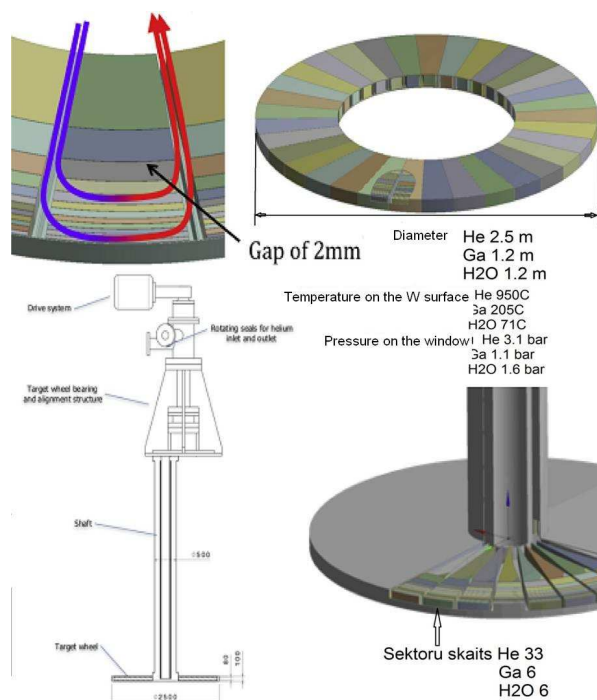


Att.4.4..

Šķidrā metāla daļiņu konversijas iekārtas principiālā shēma.

### Protonu – neitronu mērķis

Viens no visatbildīgākajiem un visvairāk noslogotajiem mezgliem ir protonu – neitronu mērķis. Tieši tanī lielas jaudas protonu kūļa iedarbības rezultātā uz liela „Z” elementu kodoliem tiek atskaldīti neitroni. Izšķir cietu (solid target) , att..4.5. un šķidru metālu mērķus.



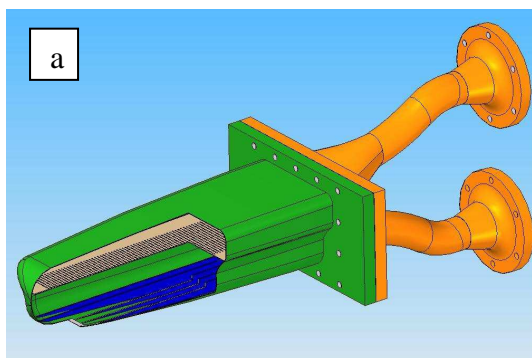
Att. 4.5.

Rotējošs ar hēliju dzesējams ciets volframa mērķis (ESS-S projekts)  
(Volframa diska diametrs 2,5m, masa aptuveni 8000kg).

Šķidro metālu mērķu priekšrocība ir tā, ka tajos šķidrās metāls vienlaicīgi strādā ne tikai kā neitronu ģenerācijas materiāls, bet arī kā siltumnesējs. Visvairāk noslogota zona mērķī ir tā uz kuru krīt protonu kūlis. Tās laukums ir aptuveni (220-250 x 60)mm. Šī zona tiek pakļauta mehāniskai un termiskai slodzēm, pie tam augstas radiācijas apstākļos.

Tika izstrādāti un izanalizēti vairāki šķidrā metāla mērķu modeļi – gan stacionārie, att.4.3, gan rotējošie, att.4.4. Stacionārā mērķa konstrukcija ir vienkāršāka, toties darba resurss ir jūtami īsāks, tikai daži mēneši, bet mērķa nomaiņas operācija ir sarežģītā, darbietilpīga un dārgs process. Šinī sakarībā perspektīvs varētu būt rotējošs šķidrā metāla mērķis. Tiek piedāvāti divi principiāli atšķirīgi varianti – rotējošs tikai šķidrā metāla mērķis, kura diametrs nepārsniedz 1.2 m, bet masa 2000kg, att.4a. un kombinēts volfrāma –gallija rotējošs mērķis, att. 4b , kurā gallijs vienlaicīgi ir neitronus ģenerējošs materiāls un siltumnesējs .

Rotējošā mērķa ideja ir jauna un prasa ne tikai teorētisku analīzi, bet arī eksperimentālu pārbaudi.

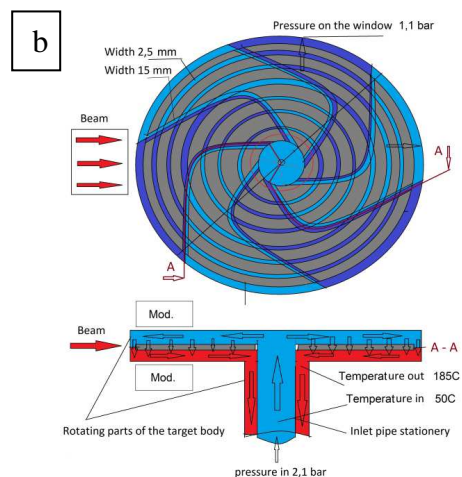
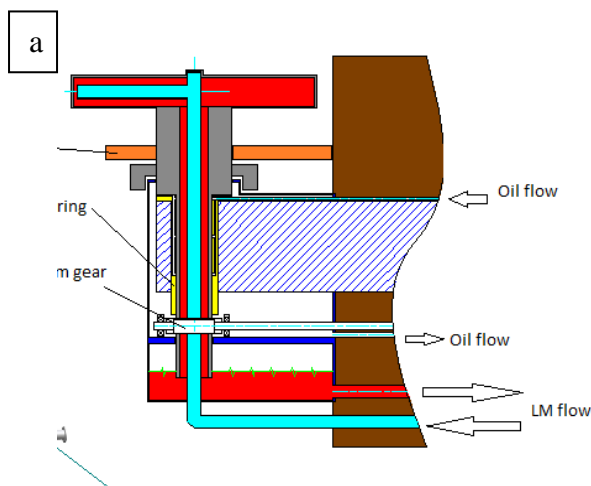
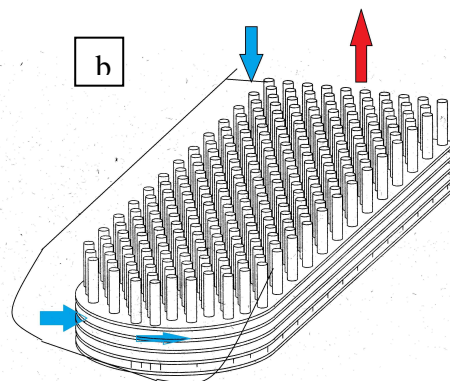


Att. 4.6.

Stacionārs mērķis.

a – „klasiskā” mērķa shēma (šķidrā metāla plūsmas vienmērīgam sadalījumam mērķa iekšpusē instalēts režģis ar mainīgu soli un caurumu diametru);

b – ar volfrāma piniem instalēta un šķidro metālu dzesēta mērķa shēma.



Att.4.7 Rotējoša mērķa modeļi

a – rotējoša šķidrā metāla shēma (šķidrā metāls (PbBi) ar sūkņa palīdzību pa dubultcaurules iekšējo kanālu tiek padots rotējošā cilindrā, kur tas tiek pakļauts protonu kūļa iedarbībai un tālāk pa dubultcaurules ārējo kanālu un šķidrā metāla cirkulācijas kontūru - uz siltummaiņu un atpakaļ uz sūkni);

b - kombinēta volfrāma – gallija rotējoša mērķa shēma (rotējošā un sektoros sadalītā cilindrā ar definētu soli instalēti volfrāma gredzeni, kurus pa dubultcaurules iekšējo kanālu apskalo gallijs. Gallijs strādā ne tikai kā siltumnesējs, bet arī kā neitronus ģenerējošs materiāls. Tas palielina mērķa lietderības koeficientu).

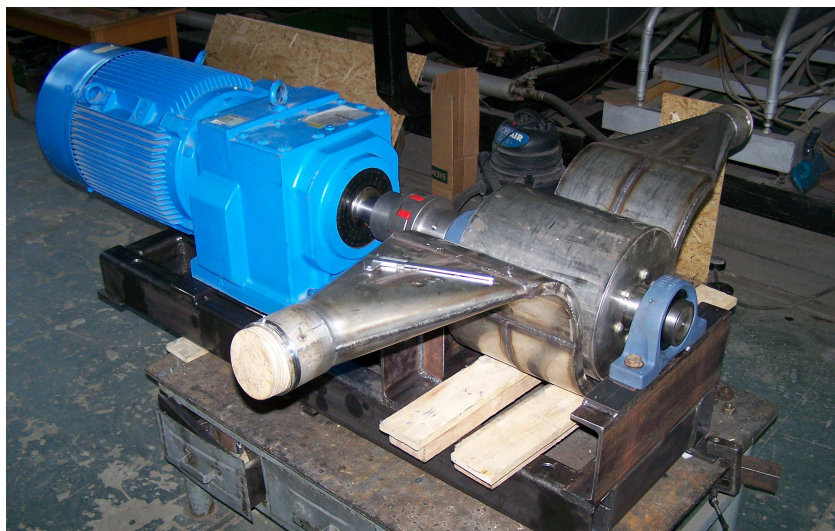
### Cilindriskais Pastāvīgo Magnētu Sūknis Pb-Bi eksperimentālam kontūram

Priekš svina-bismuta (Pb-Bi) eksperimentālā kontūra sūkņa bija izvēlēta elektromagnētiskā pastāvīgo magnētu indukcijas sūkņa konstrukcija, kurai ir vairākas



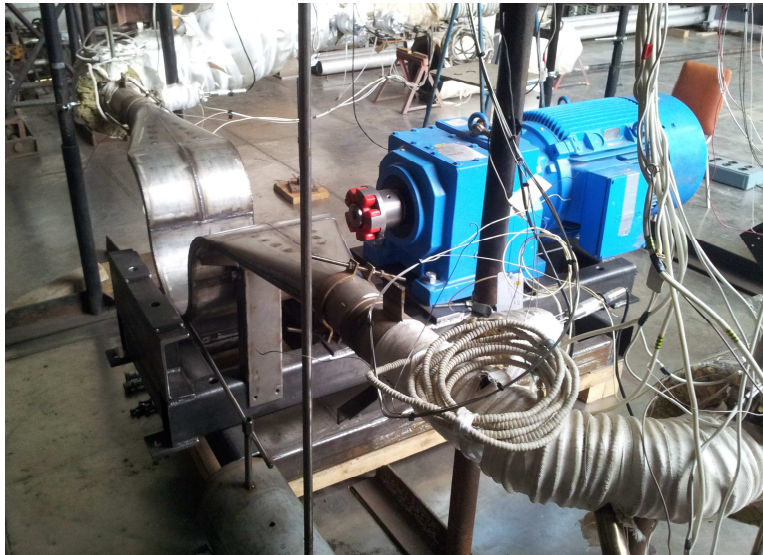
priekšrocības salīdzinājumā ar tradicionāliem 3-fāžu induktoru sūkņiem. Pirmkārt, galvenā elektromagnētiskā pastāvīgo magnētu indukcijas sūkņa priekšrocība ir tā, ka tajā vispār nav tinumu. No šīs galvenās priekšrocības izriet citas būtiskas priekšrocības: nepastāv elektriskās izolācijas problēmas pie augstām darba temperatūrām; sūknim ir vienkāršāka konstrukcija, mazāki gabarīti un svars; lielāks lietderības koeficients (jo nav jātērē enerģija tinumu barošanai un tajā pašā laikā, izmantojot pastāvīgos magnētus, var ģenerēt daudz stiprāku magnētisko lauku un ģenerēt spēcīgākus elektromagnētiskos spēkus, kuri ir proporcionāli magnētiskā lauka intensitātei otrajā pakapē). Papildus, tradicionālo induktoru sūkņu tinumu barošanai ir nepieciešams arī relatīvi dārga nestandarta iekārta – trīs fāžu transformators ar regulējamu spriegumu sūkņa ražotspējas regulēšanai. Savukārt, elektromagnētiskā pastāvīgo magnētu indukcijas sūkņa piedziņai tiek izmantots standarta rūpnieciskais elektriskais dzinējs ar barošanu caur standarta frekvences pārveidotāju dzinēja rotācijas ātruma, un līdz ar to, sūkņa ražotspējas regulēšanai.

Lai nodrošinātu šķidrā metāla (svina-bismuta eutektiskā sakausējuma Pb-Bi) sūkļi slēgtā kontūrā ar caurplūdi līdz 10.0 litriem sekundē Fizikas institūtā tika aprēķināts, konstruēts un izgatavots jaudīgs elektromagnētiskais indukcijas cilindriskais pastāvīgo magnētu sūknis, att.4.8. un kurš tiek uzstādīts eksperimentālajā kontūrā, att. 4.9.



Att. 4.8.

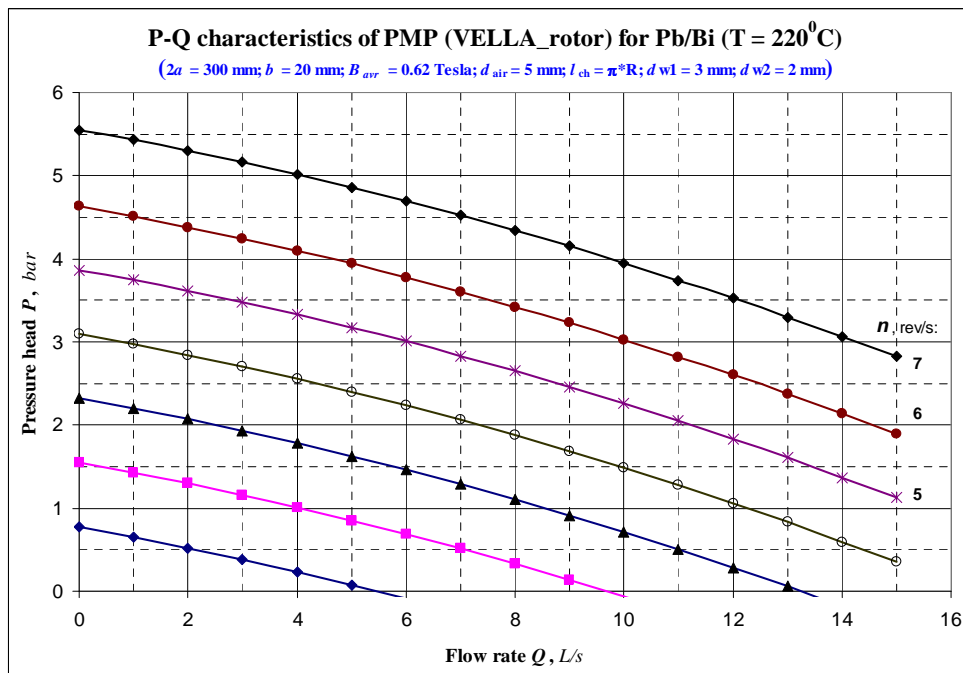
Elektromagnētiskais indukcijas cilindriskais pastāvīgo magnētu sūknis.



Att. 4.9.

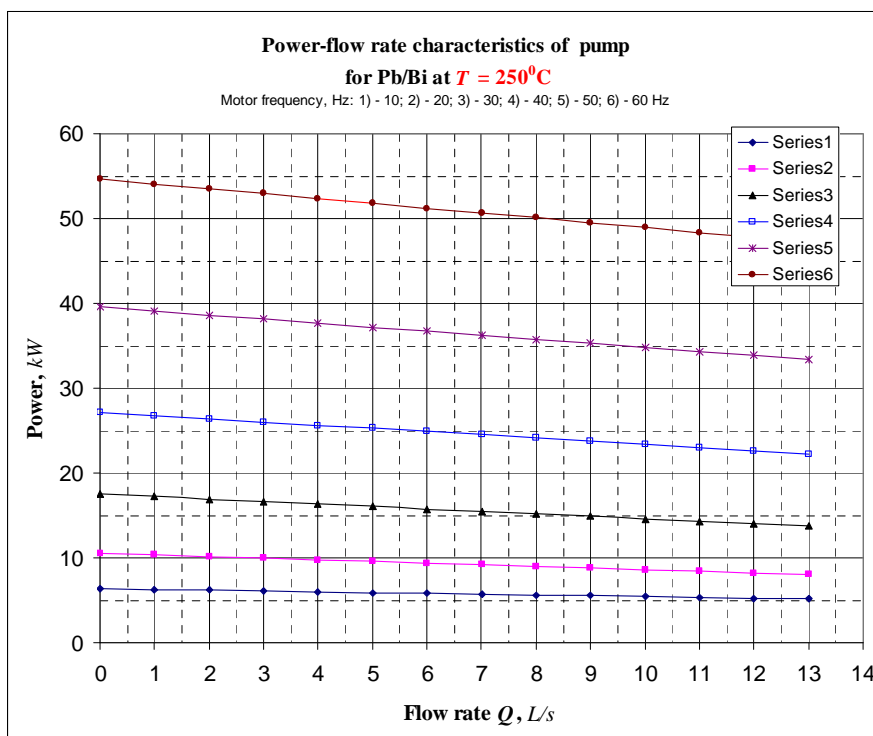
Cilindriskā pastāvīgo magnētu sūkņa instalācija šķidrā metāla kontūrā.

Sūkņa attīstamā spiediena-caurplūdes un caurplūdes-patērējamās elektriskās jaudas raksturlīknes ir parādītas, attiecīgi, att.4.10. un att..4.11.



Att. 4.10.

Sūkņa attīstamā spiediena-caurplūdes raksturlīknes.



Att. 4.11.

#### Sūkņa caurplūdes-patērējamās elektriskās jaudas raksturlīknes

No līknēm att. 4.10. un att.4.11. var redzēt, ka sūknis attīsta spiedienu  $P = 4.0$  bāri un nodrošina caurplūdi  $Q = 10.0$  litrus sekundē pie motora (SIEMENS motor ar reduktoru) barošanas frekvences caur frekvences pārveidotāju tuvu 60 Hz un pie šīs frekvences sūkņa magnētiskā rotora rotācijas ātrums ir 359 apgriezieni minūtē, jeb 7.18 apgriezieni sekundē. Un pie šiem parametriem sūkņa patērējamā elektriskā enerģija ir apmēram 50.0 kW. Pie lielākām sūkņa radītām caurplūdēm (bet līdz ar to pie mazākiem sūkņa attīstamiem spiedieniem) sūkņa patērējama enerģija ir jūtami mazāka, jo sūkņa patērējamā enerģija pirmā tuvinājumā ir proporcionāla sūkņa attīstamam spiedienam otrajā pakāpē. Piemēram, ja sūknis nodrošina caurplūdi  $Q = 13.0$  litrus sekundē pie frekvences 50.0 Hz (attīstot spiedienu  $P = 2.5$  bāri), tad motora patērējamā elektriskā enerģija ir apmēram tikai 35.0 kW 50.0 kW vietā.

#### Caurteces mērītāju izstrāde

Sakarā arvien plašāku augstas temperatūras šķidro metālu pielietošanu fizikāli-tehniskajos eksperimentālajos pētījumos ar mērķi tos izmantot kodolenerģētikā joprojām ir aktuāla drošu un pietiekami precīzu mērīšanas sistēmu izstrāde šķidro metālu plūsmas ātruma, jeb caurteces, operatīvai mērīšanai cauruļvados, t.i. kontūros. Ir zināmi un teorētiski pamatoti indukcijas un indukcijas tipa šķidro metālu caurteces mērītāji. Šo tipu caurteces mērītāju pielietošanai no teorētiskā pamatojuma līdz praktiskajiem mērījumiem ir jāatrisina vairāki izpētes un projektēšanas uzdevumi:

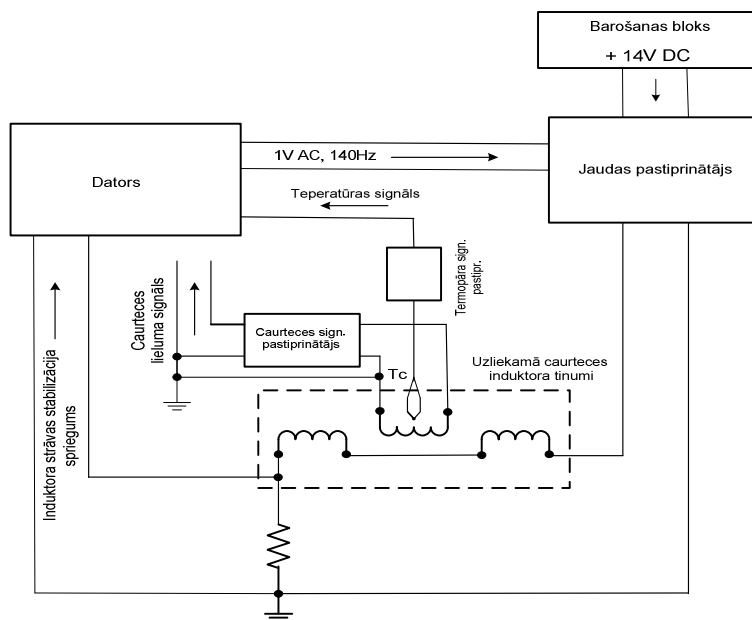
mērītāju pielietošana augstas temperatūras vidē,  $300^{\circ}\text{C} - 600^{\circ}\text{C}$ ;

ļoti lielu elektromagnētisko traucējumu līmeņa vidē, kas atsevišķos gadījumos var pārsniegt derīgā mērīšanas signāla līmeni pat vairākus simtus reizes; iespējami mazināt

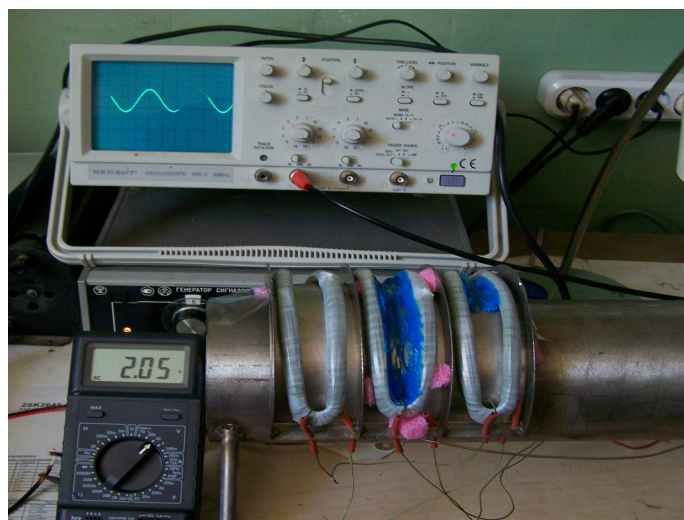


termisko e.d.s. uz signāla noņemšanas elektrodiem, kas mainās līdz ar temperatūras svārstībām, kā šķidrā metāla plūsmā, tā arī elektrodu savienojanas punktos; mērītāju sensoru materiālu izvēle un tehnoloģijas izstrāde tādiem ekstremāliem apstākļiem.

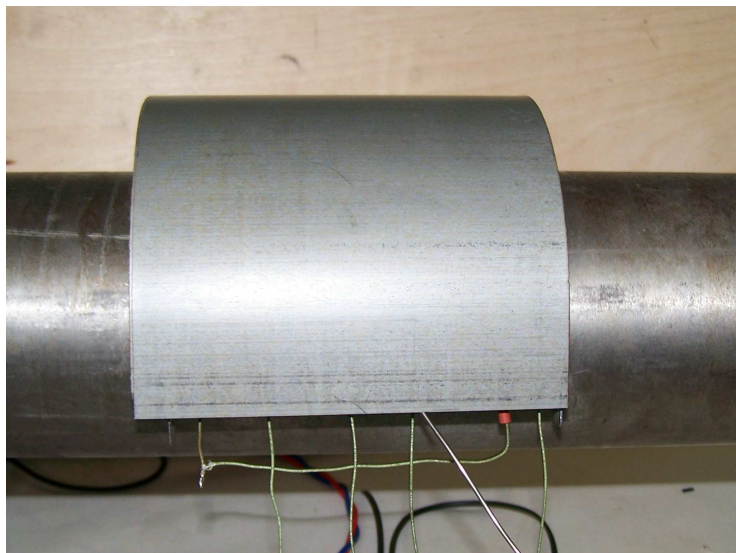
Tieši uz šo uzdevumu risināšanu tika virzīti pētījumu, projektēšanas, eksperimentālās, izgatavošanas, datorprogrammatūras radīšanai mērījumu veikšanai un to rezultātu apstrādei, kā arī izveidoto plūsmas mērītāju kalibrēšanai un testēšanai augstāk minētajos ekstremālajos apstākļos.



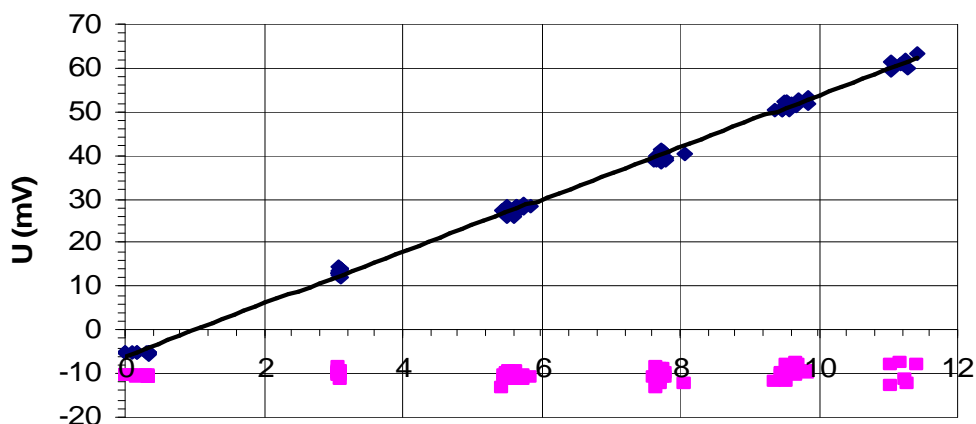
Att.4.12. Caurteces mērītāja shēma



Att.4.13. Caurteces mērītāja induktors izstrādes procesā



Att.4.14. Uzliekamā caurteces mērītāja induktors



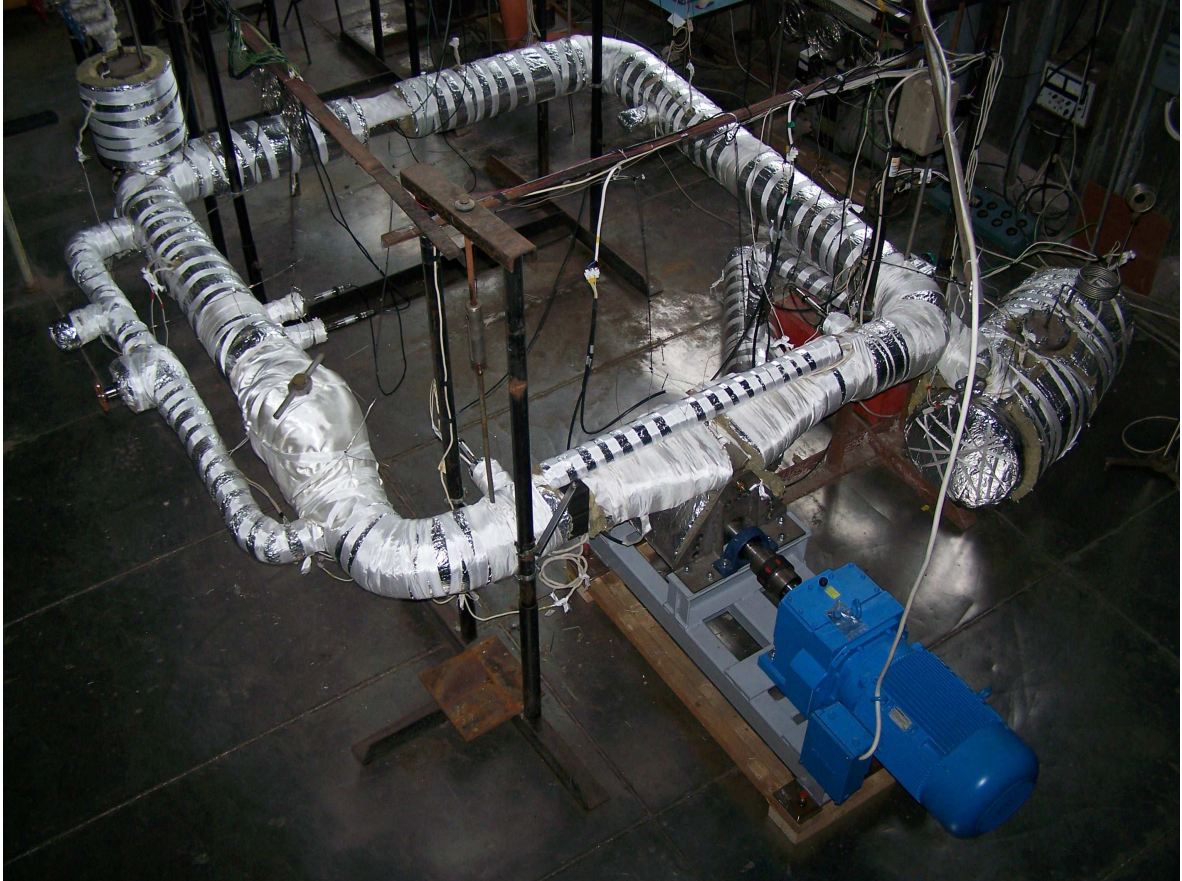
Att.4.15. Caurteces mērītāja testa līkne .

**Raksti:**

I. Bucenieks, Modeling of Induction Rotary Permanent Magnets Flow Meters for Liquid Metals Flows Control, Magneto hydrodynamics, pp.8

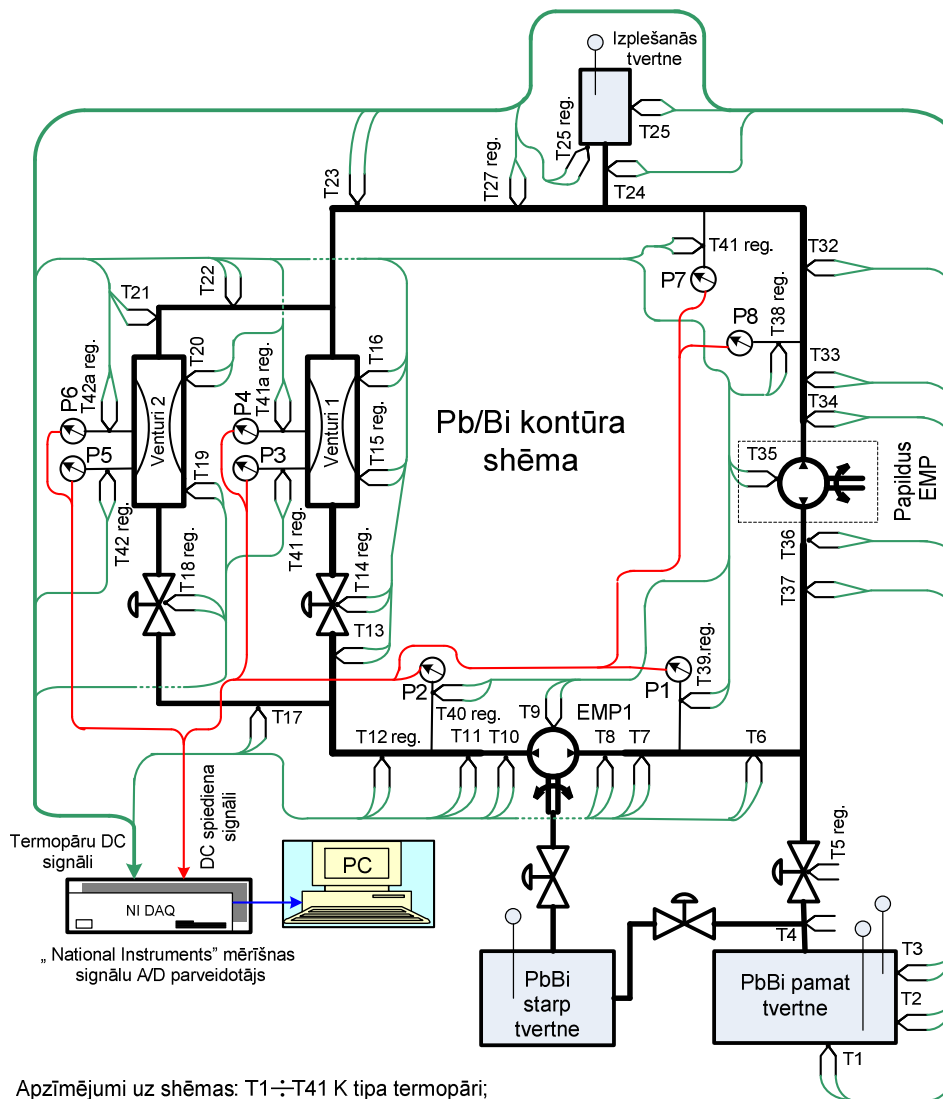
**Aktivitāte Nr.5. Kompakta mērķa stacijas izveidei ieteikto jauno konstruktīvo risinājumu pārbaude/demonstrācija speciālā stendā.**

LU Fizikas Institutā atskaldīto neitronu šķidrā metāla mērķa pārbaudei un testēšanai izprojektēts un izgatavots speciāls stends, att. 5.1. Kā siltumnesējs tajā tiek izmantots svina – bismuta sakausējums. Kontūra darba temperatūra līdz 400°C, caurplūde atkarīga no testējamā sūkņa jaudas. Tā reāli varētu svārstīties 12 -15 l/s robežās.



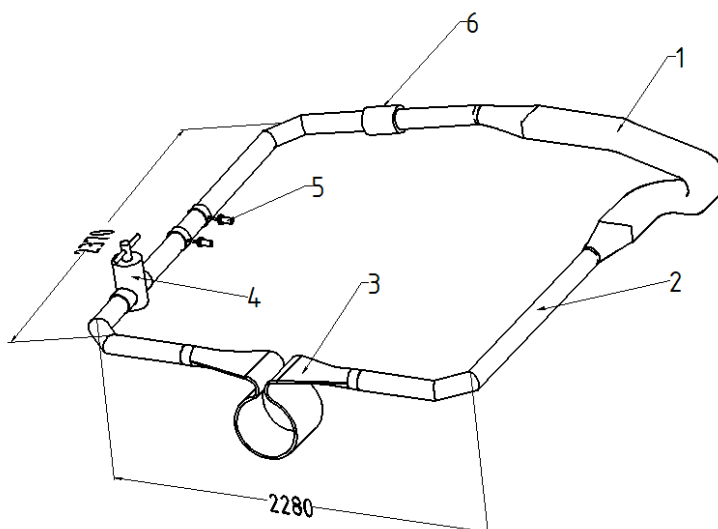
Att.5.1. Svina – bismuta kontūrs.

Kontūra, ar tajā instalētu slīpas „loga” (window) virsmas šķidrā metāla mērķa principiālā shēma parādīta att. 5.3. Pirmajā eksperimentu etapā bija paredzēts testēt „slīpā loga” konstrukcijas atskaldīto neitronu mērķa moduļa un atsevišķu kontūra elementu hidrodinamiku. Lai to izdarītu: tika izprojektēts un izgatavots elektromagnētiskais sūknis, kas varēja nodrošināt kontūrā nepieciešamos eksperimenta parametrus - caurplūdi, spiedienu, temperatūru; otrkārt – izstrādāta mērķa, tanī skaitā arī kontūra un tā atsevišķu mezglu parametru monitoringa sistēma, att 5.2.; treškārt – jānodrošina, vismaz daļēji, protonu staru kūļa iedarbības imitācija uz mērķa virsmu. Kā to izdarīt – atklāts jautājums.



Apzīmējumi uz shēmas: T1 ÷ T41 K tipa termopāri;  
 P1 ÷ P8 elektroniskie spiediena devēji  
 EMP elektromagnētiskais šķidrā metāla sūknis

Att.5.2. Svina – bismuta kontūra kontroles un eksperimentālo lielumu monitoringa shēma.



Att. 5.3. Svina – bismuta kontūra principiālā shēma „slīpā” mērķa moduļa testēšanai



- 1- Mērķa modulis; 2- PbBi kontūrs (diametrs 108 x 4.0; SS316L); 3- Elektromagnētiskā sūkņa kanāls; 4- ventilis; 5- Venturi caurule;
- 6- elektromagnētiskais caurplūdes mērītājs.

**Kontūra darba parametri:**

Temperatūra, °C līdz 400;

Caurplūde, L/s līdz 15;

Spiediens, bari 4

Izplešanās trauks, sildelementi, šķidrā metāla tvertne, vadības sistēma u.c. elementi un mezgli shēmā nav parādīti.



Att.5.4.Svina – bismuta (PbBi) kontūrs ar tanī instalētu „slīpa loga” tipa protonu - neutronu konvertora mērķi. (Priekšplānā augstfrekvences ģenerators (N = 20kW), kurš paredzēts lokālai mērķa zonas (Ø 100mm) uzkarsēšanai līdz temperatūrai aptuveni 700°C).

**Siltumpārneses un šķidrā metāla plūsmu modelēšana PbBi kontūrā.**

Pirmajā eksperimentu sērijā paralēli atsevišķu kontūra (elektromagnētiskā sūkņa, indukcijas caurteces mērītāja, Venturi caurules u.c.) elementu darbības pārbaudei un to kalibrēšanai tika veikti „slīpa loga” mērķa hidrodinamiskie testi un tā iespāids uz kontūra darbību (vibrācijas, kavitācija) atkarībā no PbBi caurplūdes (ātruma) kontūrā. Tika konstatēts, ka kontūra darbība stabila pat pie maza gāzes (argona) virsspiediena izplešanās traukā, spiediena kritums „slīpa loga” mērķī 0.2 baru robežās (atkarībā no PbBi sakausējuma ātruma), bet tika arī novērotas nelielas kontūra elementu vibrācijas. Tomēr galvenais eksperimentu mērķis bija apzināt PbBi plūsmas temperatūru sadalījumu protonu - neutronkonvertora mērķī.

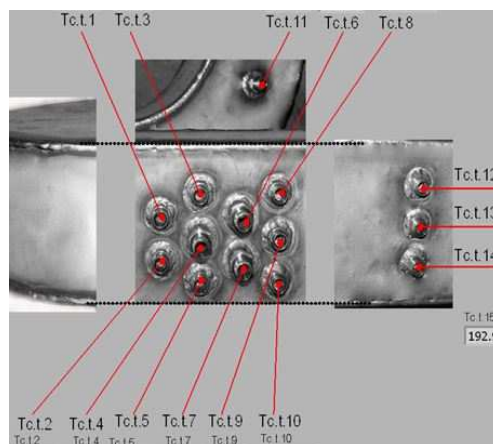
Kā lokāli imitēt protona stara iedarbību uz mērķi?

Šim nolūkam tika izmantots laboratorijas rīcībā esošais augstfrekvences ģenerators. Diemžēl tā jauda tikai N = 20 kW (lietderīgā vēl mazāka – aptuveni 12kW). Ģenerators sildelements parādīts att. 5.5. Tāpēc lielus temperatūras gradientus mērķī sasniegt neizdevās. Temperatūras sadalījums mērķī tika fiksēts

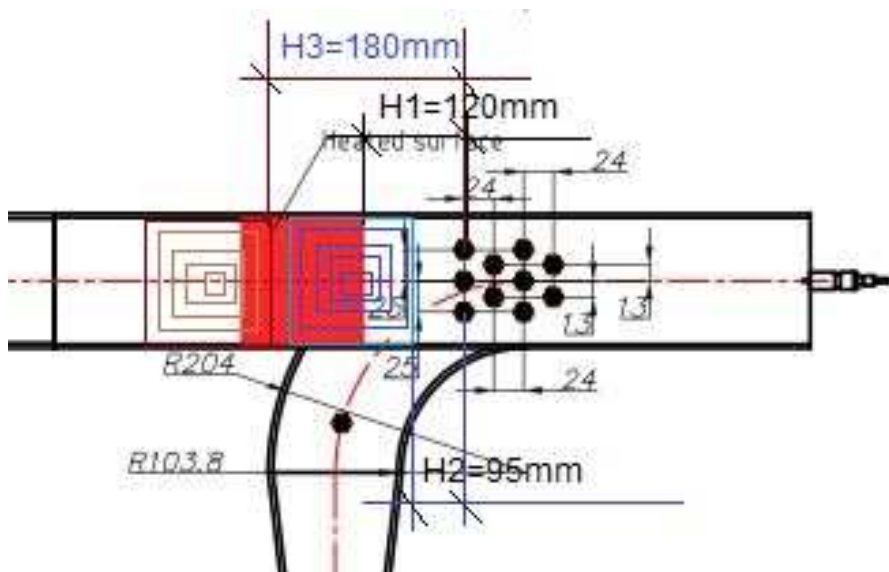
ar tanī instalētiem 16 K tipa termopāriem, att. 5.6. Mērķa sildvirsmas plato atrādās 100 mm attālumā no pirmās termopāru rindas (termopāri bija izvietoti zemāk plūsmas virzienā), att. 5.7.



Att. 5.5. Sildelements.



Att.5.6 Termopāru izvietojums



Att. 5.7. Mērķa sildvirsmā

Termopāri ir novietoti dažādā dziļumā (attālumā no atbilstošās kanāla sienas iekšējās virsmas). Šķidrā metāla temperatūru pirms ieejas karsēšanas zonā mēra termopāri T.t12 – Tc.t14, tie novietoti 10 mm dziļumā. Temperatūras pēc karsēšanas zonas tiek mērītas ar termopāriem Tc.t1 – Tc.t10. Šeit termopāri Tc.t8 - Tc.t10 novietoti 2 mm dziļumā, Tc.t6, Tc.t7 - 4 mm dziļumā, Tc.t3, Tc.t4, Tc.t5 – 6 mm dziļumā un Tc.t1, Tc.t2 – 10 mm dziļumā. Šķidrā metāla temperatūru pietiekamā

attālumā pēc eksperimentālās zonas (metāla temperatūra ir pilnība izlīdzinājusies pa visu kanāla šķērsgrizumu) mēra ar termopāri Tc.t11, Tc.t0.

Lai vērtētu turbulentās siltumpārneses intensitāti, sildīšanas zona tika pārvietota attiecībā pret temperatūru mērīšanas zonu kā parādīts (sk. att.5.7.) Vidus stāvoklī attālums  $H=H1=120$  mm, tālākajā  $H=H3=180$  mm, tuvākajā  $H=H2=95$  mm. Eksperimenti tika veikti pie trim dažādiem vidējiem šķidrā metāla plūsmas ātrumiem: 0,25 m/sec (padeve kontūrā 2 l/sec), 0,48 m/sec (padeve 4 l/sec) un 0,98 m/sec (padeve 8 l/sec). Eksperimenti tika veikti vairākkārt, mērījumu rezultātu atkārtotānos pie vienādiem sākuma nosacījumiem bija ~95% robežās, tātad apmierinoša.

Nākamajos zīmējumos ir parādīts šķidrā metāla temperatūras pieaugums attiecībā pret tā ieejas temperatūru karsēšanas zonā, kā arī karsēšanas procesā šķidrajā metālā ievadītā jauda P. Jauda tika aprēķināta pēc formulas

$$P = Q\rho c(T_{out} - T_{in}), \quad (n1)$$

Šeit Q – šķidrā metāla padeve, c – īpatnējā siltumietilpība,  $\rho$  - blīvums,

$T_{out}$  - vidējā šķidrā metāla temperatūra pēc karsēšanas zonas,

$T_{in}$  - vidējā šķidrā metāla temperatūra pirms karsēšanas zonas.

$$T_{out} = \frac{T_{12} + T_{14}}{2} \quad (n2)$$

$$T_{in} = \frac{T_{12} + T_{14}}{2} \quad (n3)$$

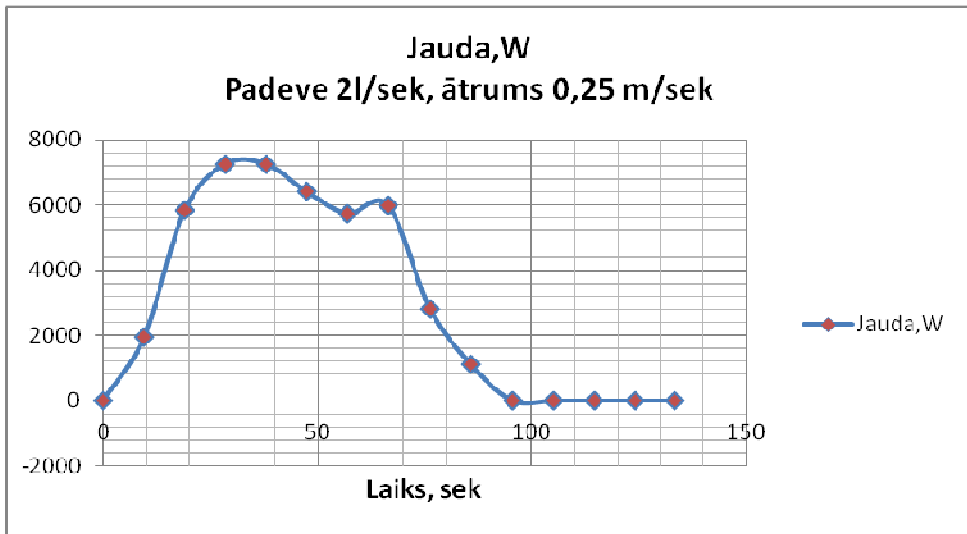
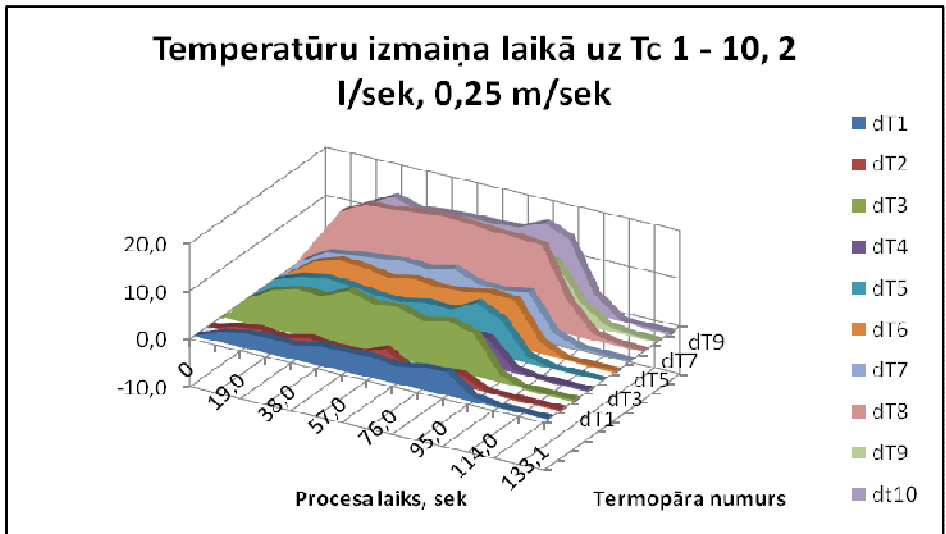
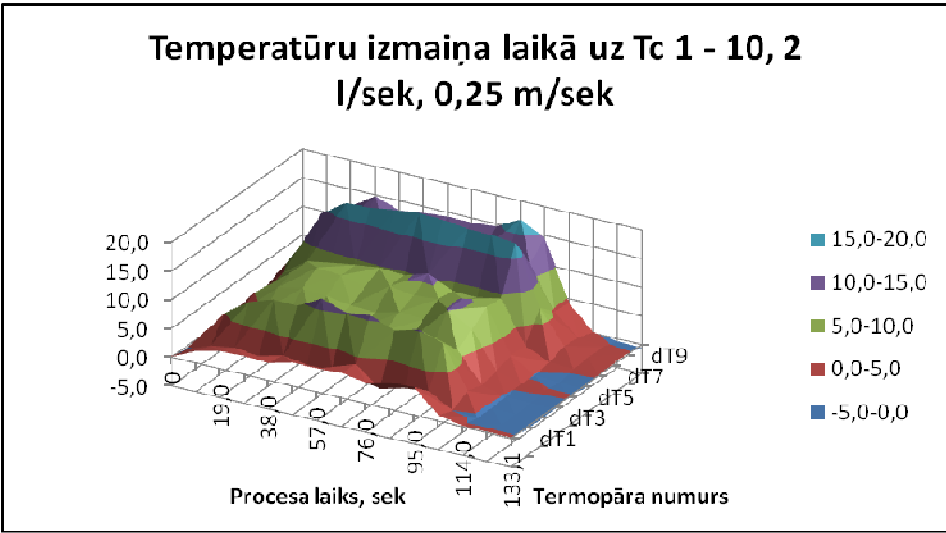
$T_{12}$  - termopāra Tc.t12 mērījumi,

$T_{14}$  - termopāra Tc.t14 mērījumi,

$T_0$  - termopāra Tc.t0 mērījumi,

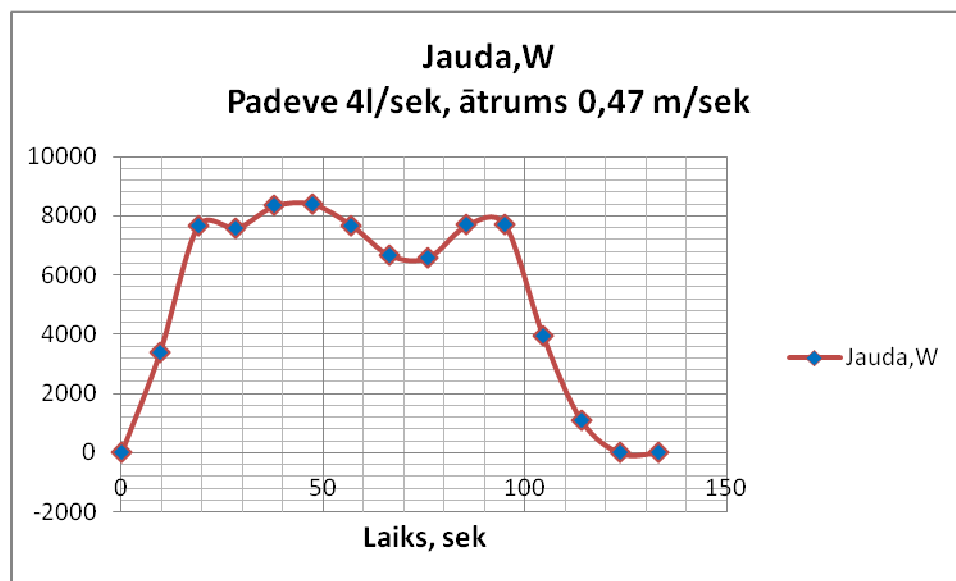
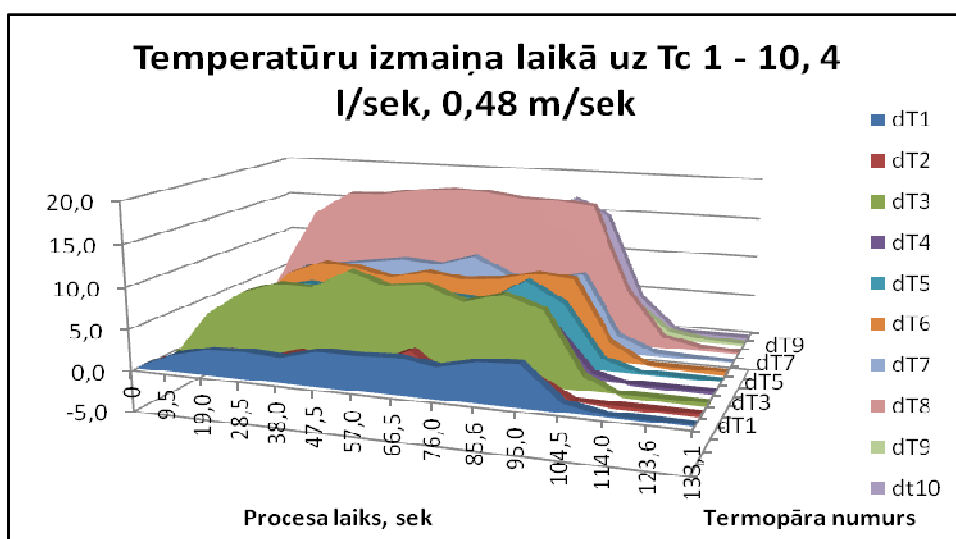
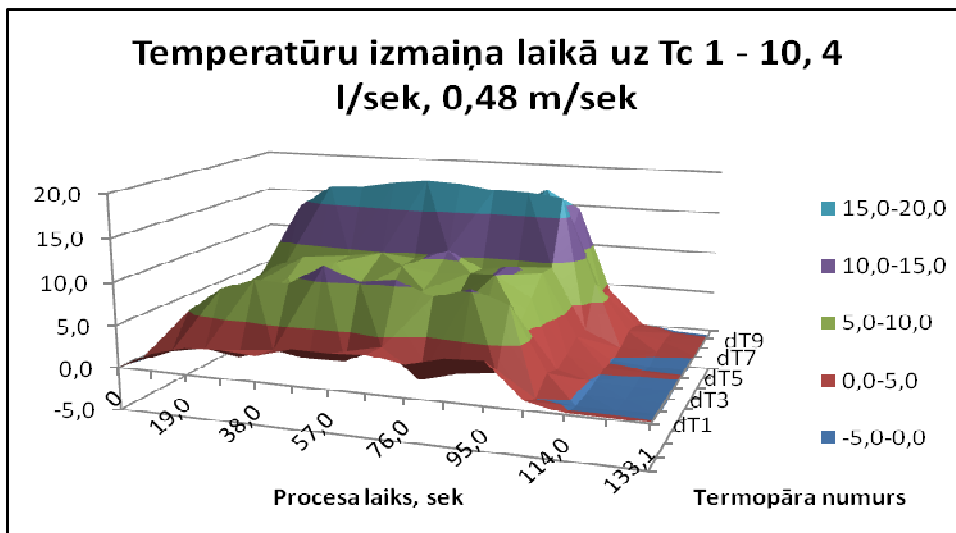
$T_{11}$  - termopāra Tc.t11 mērījumi.

Redzams, ka pie lielākiem ātrumiem jauda ir nedaudz lielāka, tas tādēļ, ka pie lielākiem ātrumiem ir lielāks siltumatdeves koeficients uz karsējamās kanāla sienas un šķidrā metāla saskares virsmas. Redzams arī, ka temperatūru mērījumu līknes nav "gludas". Tas tāpēc, ka mērījumu periods bija 9,5sek, kas, kā rādīja veiktie aprēķini un arī turpmākajās eksperimentu sērijās veiktie mērījumi, kur mērījumu periods bija daudz īsāks – 0,65 sek, ir izteikti lielāks par turbulences radītajām temperatūras svērstībām – to periods ir ~ 1sek. Temperatūru turbulento pulsāciju eksperimentālie mērījumi tiks aprakstīti zemāk.

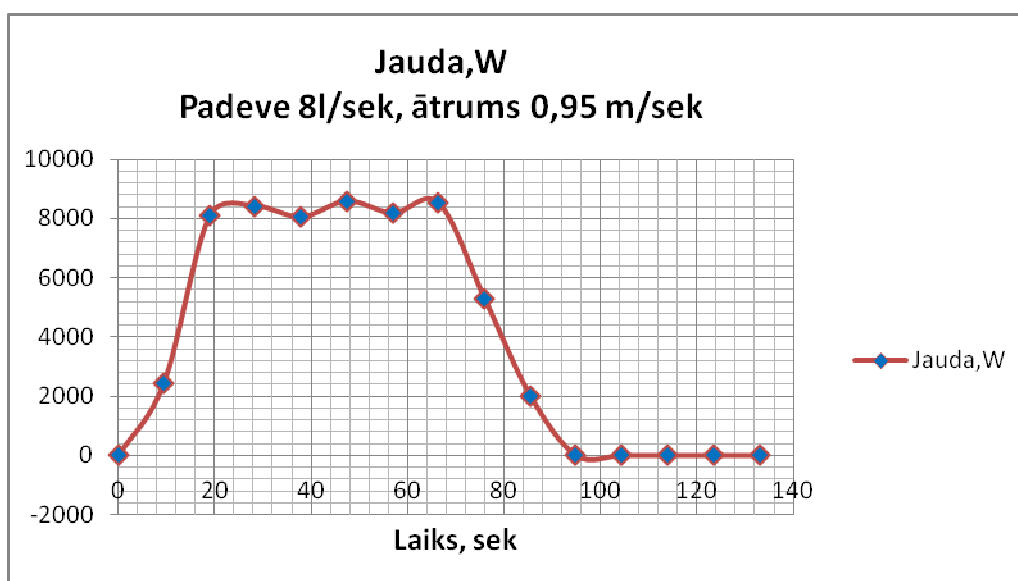
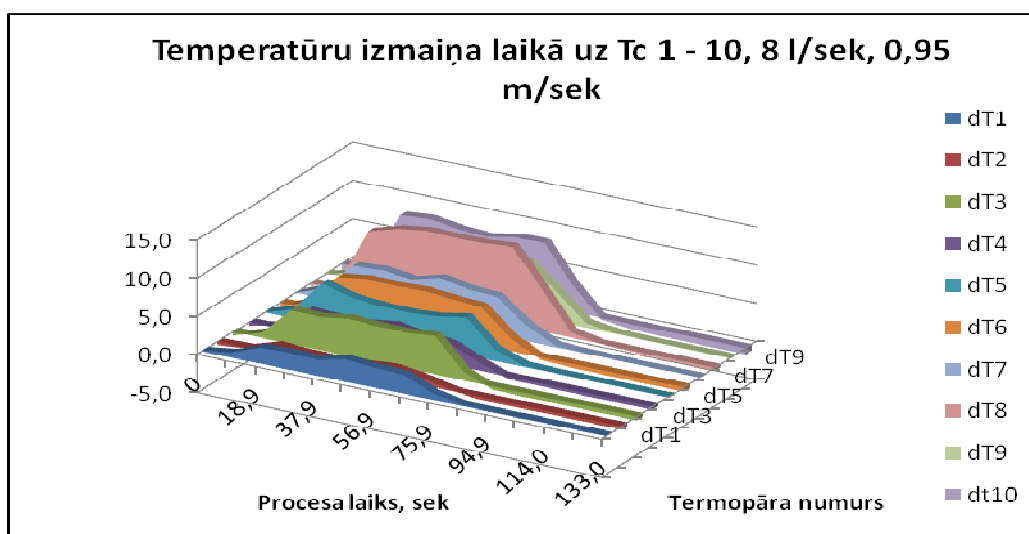
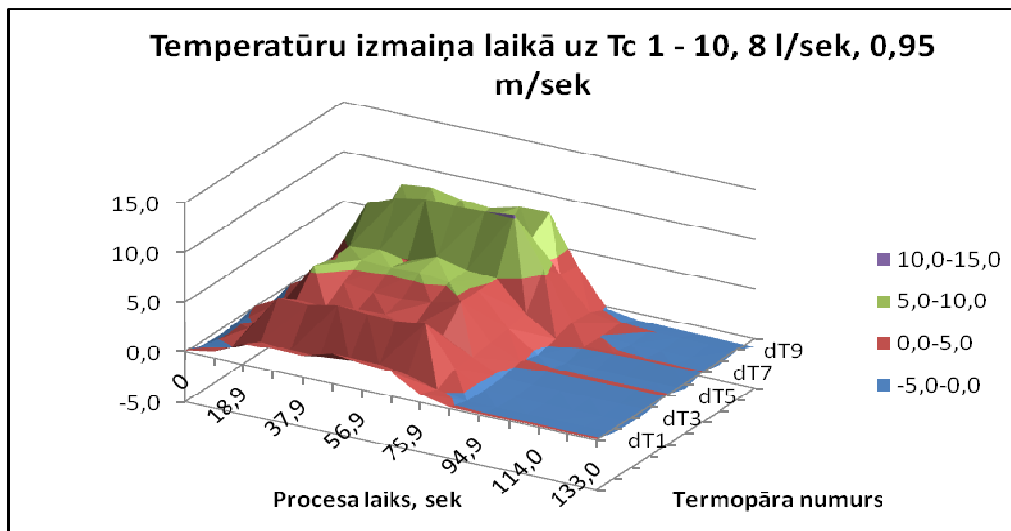


Att.5.8.



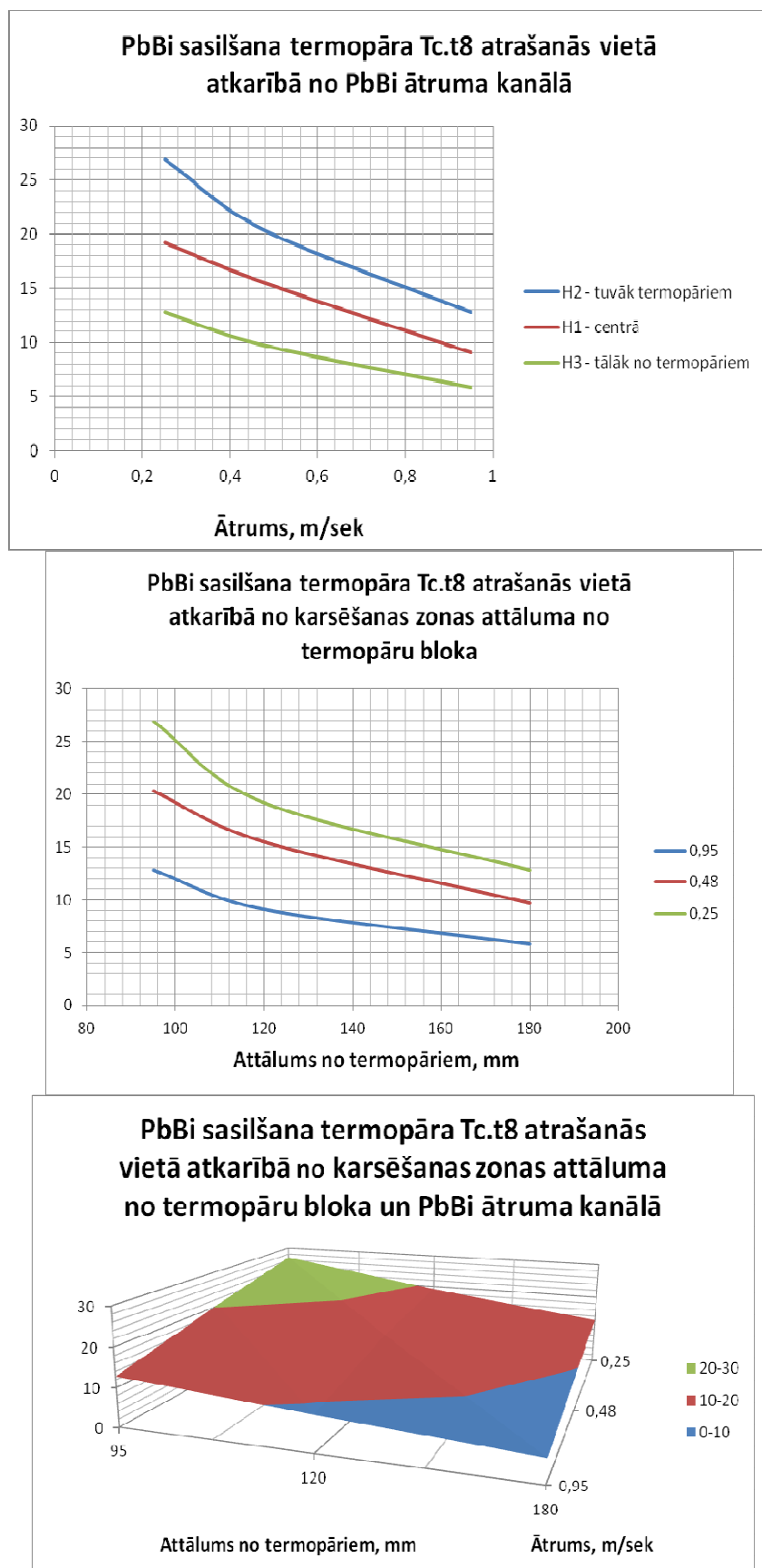


Att.5.9.



Att.5.10.

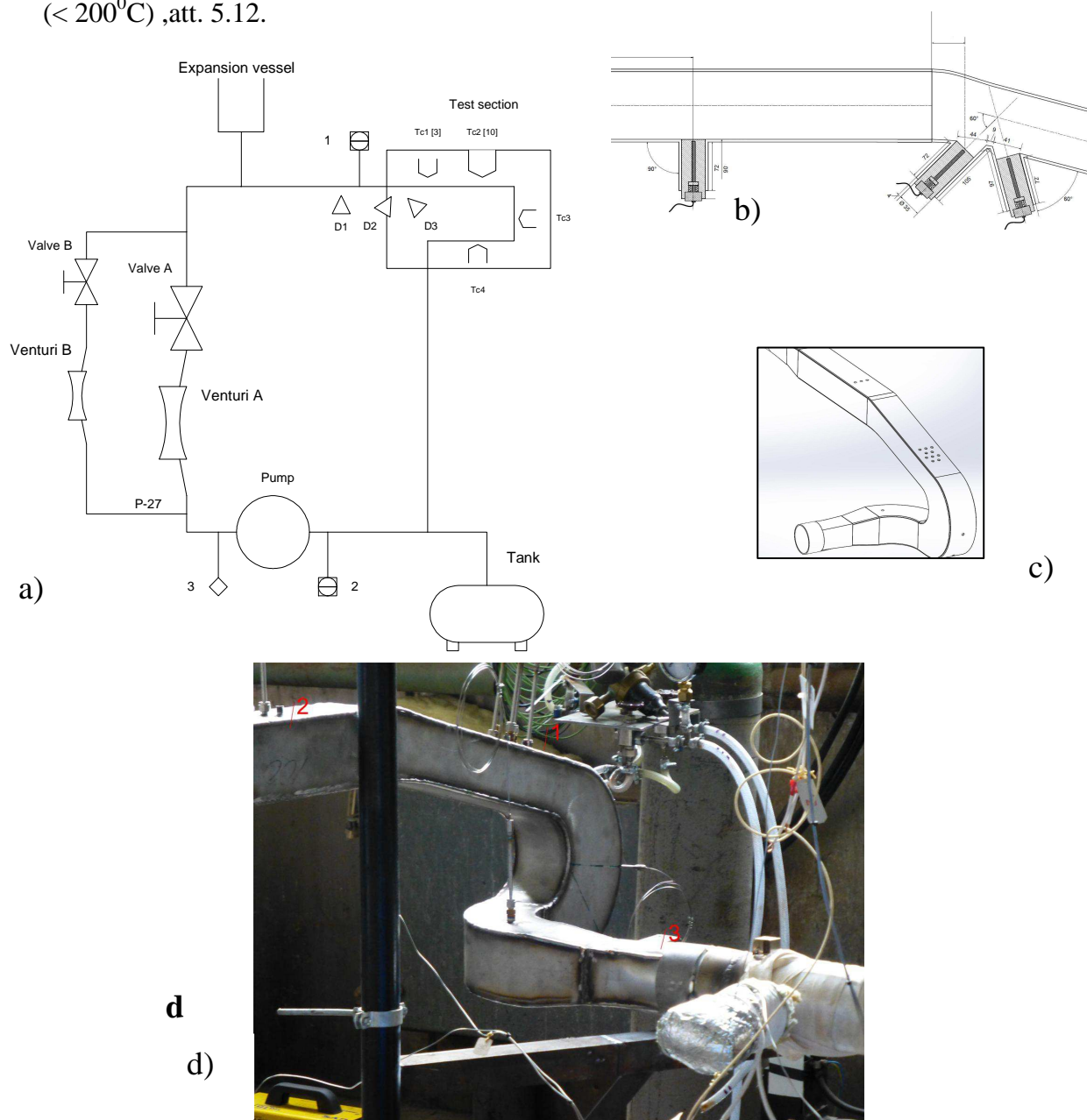
Att.5.11. parādīta šķidrā metāla sasilšanas atkarība no ātruma un karsēšanas zonas attāluma līdz termopāriem.



Att.5.11.

Jo tālāk ir karsēšanas zona no termopāriem, jo zemākas ir samērītās temperatūras. Tas tāpēc, ka temperatūras tiek mērītas karsējamās sienas virsmas tuvumā un jo tālāk ir karsēšanas zona, jo lielākā mērā turbulenta siltumpārnese ir izlīdzinājusi temperatūru pa visu kanāla šķērsgrīzumu. Ātruma efekts temperatūru pazemināšanā tiešā veidā seko no formulas (n1).

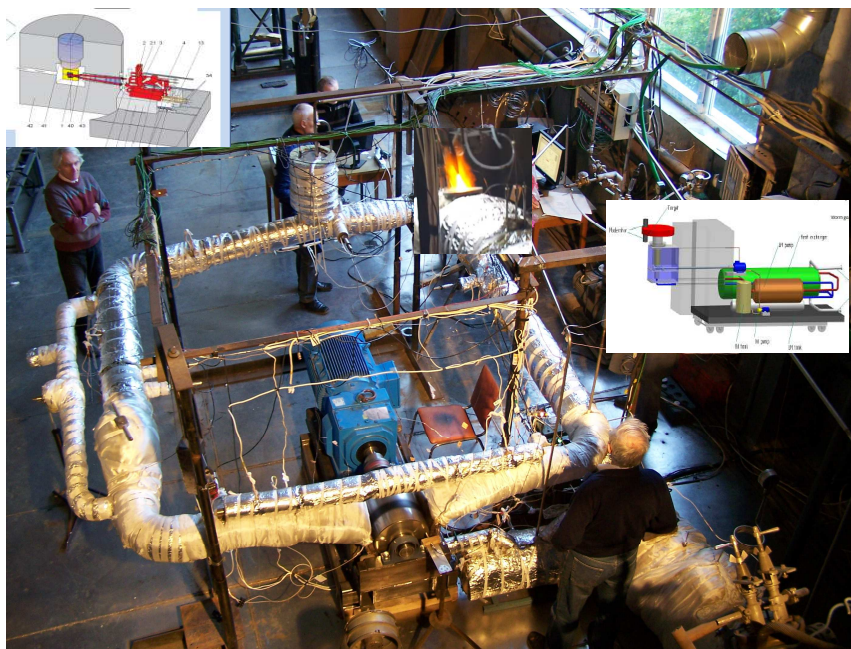
Otrajā eksperimentu sērijā PbBi kontūrs (galvenokārt mērķa modulis) tika nedaudz rekonstruēts. Svina – bismuta plūsmas ātruma sadalījuma pētīšanai mērķī tika instalēti trīs Rossendorfas HZDR institūtā izstrādāti Doplera sensori, kuri tieši paredzēti izmantošanai šķidro metālu kontūros, bet tikai nosacīti zemu temperatūru diapazonā ( $< 200^{\circ}\text{C}$ ), att. 5.12.



Att 5.12. PbBi kontūra rekonstrukcija, šķidrā metāla ātruma sadalījuma pētīšanai

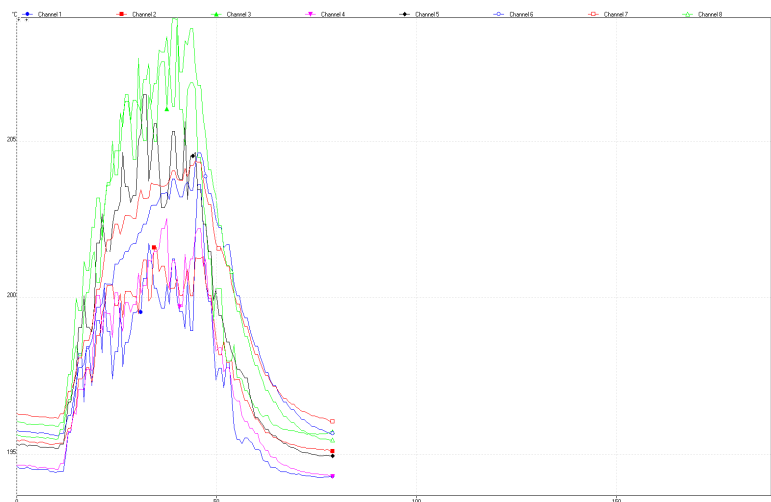
- a - PbBi kontūra principiālā shēma;
- b – Doplera sensoru izvietojuma shēma mērķa modulī;
- c – Termopāru (16 gb.) izvietojuma shēma mērķa modulī;
- d – Mērķa modulis PbBi kontūrā (skats)

Tas ir ļoti svarīgi, jo šķidrajam metālam ideāli jāapskalo loga sienas virsma. Pretējā gadījumā pasliktinās siltumatdeve „logs – šķidrās metāls”, kas var izsaukt lokālu pārkaršanu un loga dehermetizāciju. Tā kā sakausējuma PbBi temperatūras eksperimenta laikā ir virs  $200^{\circ}\text{C}$  devēju darbības resurss diemžēl bija īslaicīgs. Neskatoties uz to tika secināts, ka pie caurplūdes 8L/s šķidrā metāla plūsma ir stabila, mērķa kanāls ir pilnīgi aizpildīts un loga siena apskalota ar PbBi sakausējumu. Temperatūru sadalījuma pētīšanai loga virsmas karsēšanai tika izmantota atklāta liesma, att.5.13.

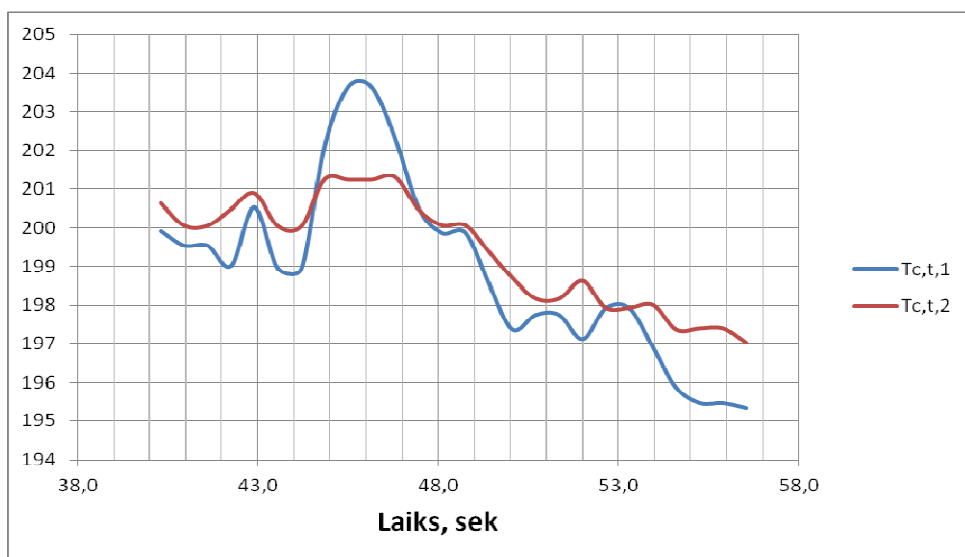
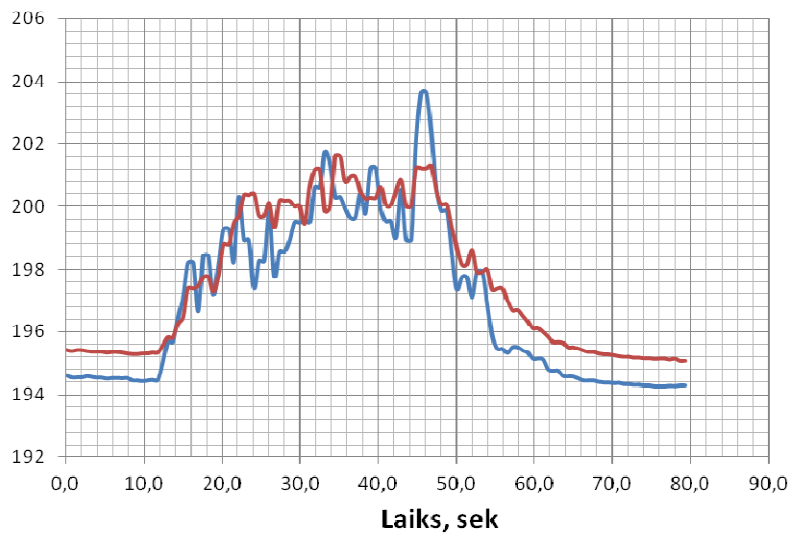


Att. 5.13. PbBi kontūra rekonstrukcija (mērķa karsēšana ar atklātu liesmu).

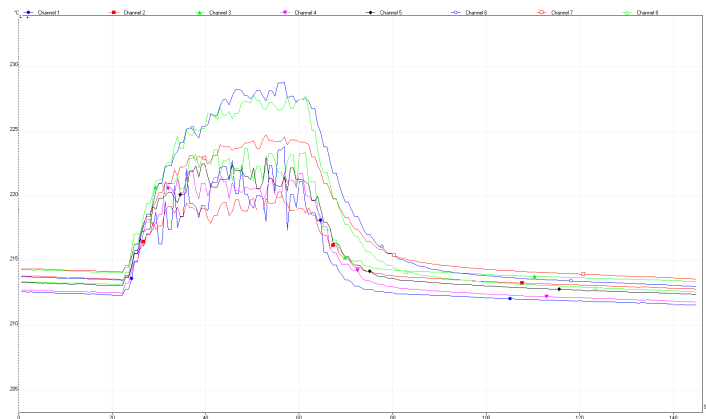
Lai eksperimentāli pētītu turbulences radītās temperatūru pulsācijas, tika veikta eksperimentu sērija, kurā temperatūru mērīšanas intervāls tika būtiski samazināts - līdz 0,65 sek. Att. 14. - 16 parādīti termopāru Tc.t1 - Tc.t8, atsevišķi izdalīti dziļāk novietoto termopāru Tc.t1, Tc.t2 mērījumi un pulsāciju perioda vērtējums uz Tc.t1 mērījumu bāzes.



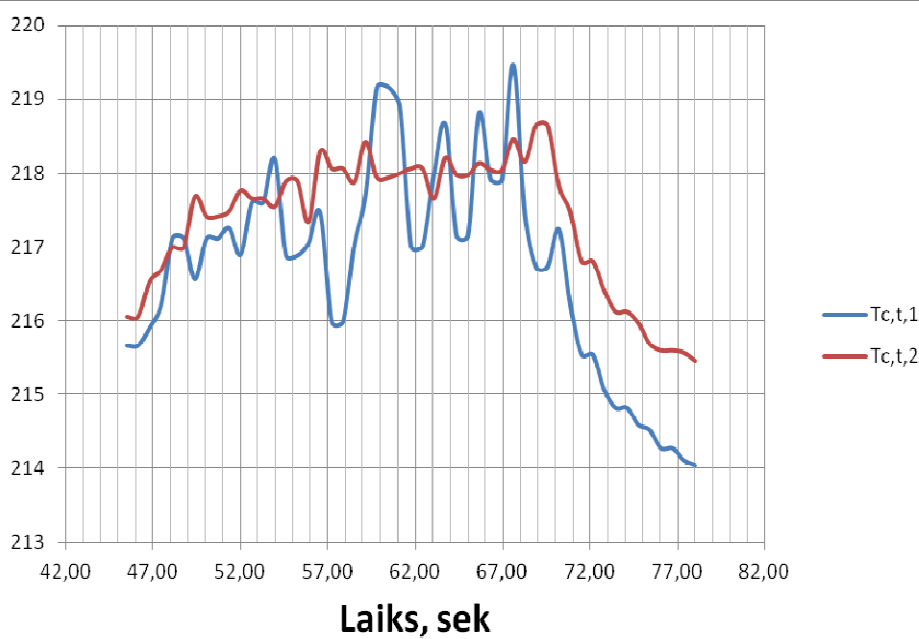
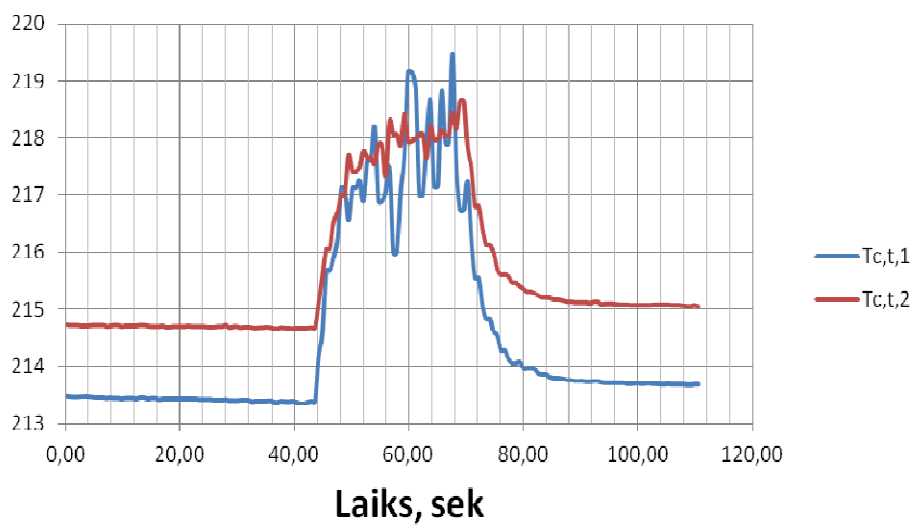
**Temperatūru izmaiņa laikā uz Tc 1 - 2, padeve  
2 l/sek, ātrums 0,25 m/sek, karsēšanas zona  
vidusstāvoklī H1**



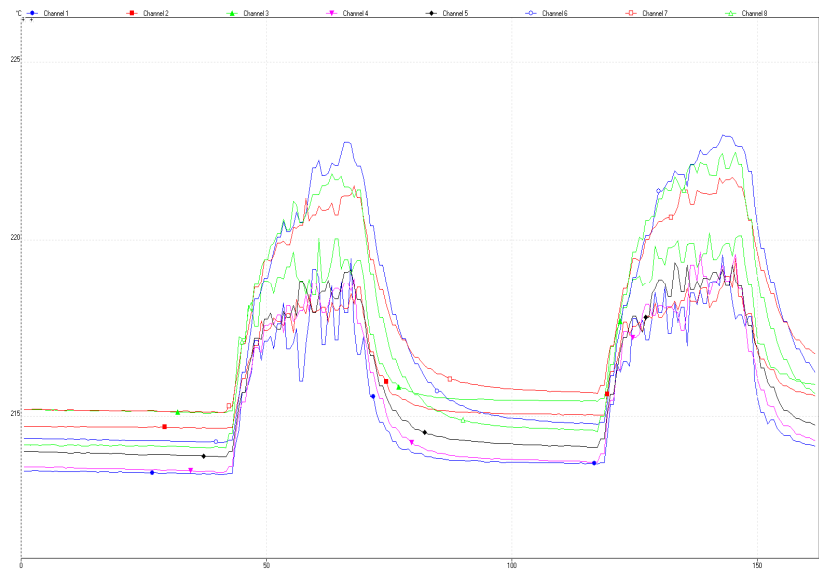
**Att.5.14. PbBi sakausējuma temperatūras pulsācijas raksturs mērķī**



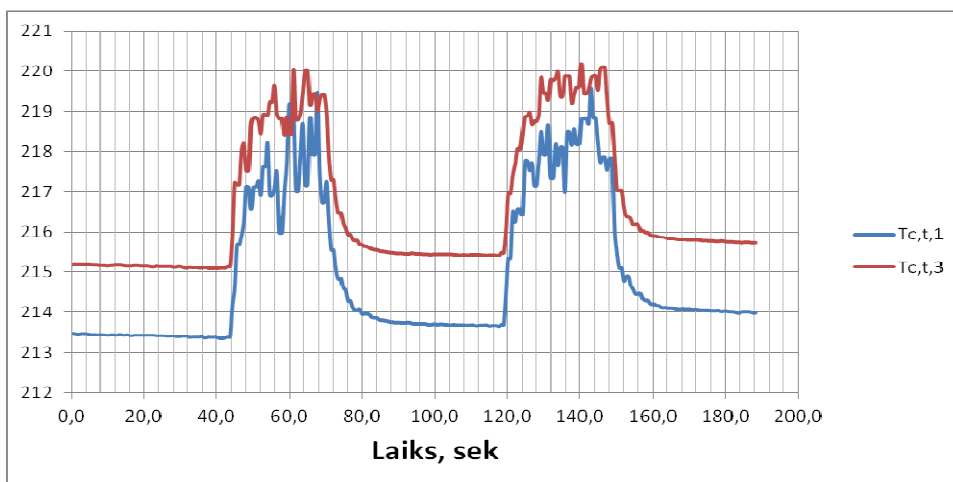
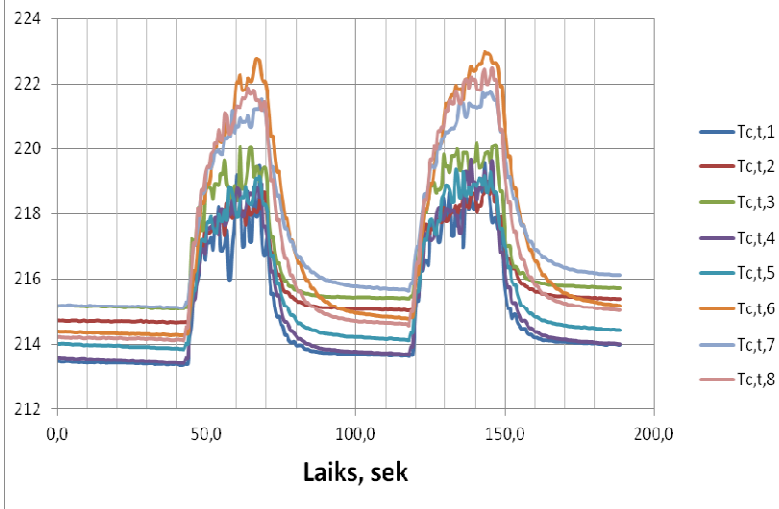
**Temperatūru izmaiņa laikā uz Tc 1 - 2, padeve  
4 l/sek, ātrums 0,48 m/sek, karsēšanas zona  
vidusstāvoklī H1**



Att.5.15.



**Temperatūru izmaiņa laikā uz Tc 1 - 8, padeve 8 l/sek, ātrums 0,95 m/sek, karsēšanas zona vidusstāvoklī H1**







Att.5.16.

Pulsācijas ir izteikti konstatējamas, kaut arī mērīšanas intervāls ir pārāk liels precīzai pulsāciju „izzīmēšanai”: perioda ~ 1-1,5 sek pārliecinošai parādīšanai mērīšanas intervāla vajadzētu būt ne lielākam par 0,2 sek, ko izmantotā mērīšanas aparātūra nenodrošināja. Pulsāciju periods praktiski nav atkarīgs ne no ātruma, ne no mērīšanas vietas, amplitūda 2 - 8 C, atkarīga gan no režīma, gan mērīšanas vietas.

### Vibrāciju izvērtēšana kontūrā.

Kā iepriekš tika minēts, kontūrā fiksētas vibrācijas. Šinī sakarībā paralēli termo - hidrauliskajiem pētījumiem tika veikta vibrāciju analīze un to galvenais cēlonis.ESS kontūra vibrāciju analīze

Uzbūvētajam kontūram tajā ietvertais elektromagnētiskais sūknis ar patstāvīgiem rotējošiem magnētiem rada ievērojamas vibrācijas. Eksperimentā ir paredzēts sūknēt šķidru Svina-Litija sakausējumu un to vēl papildus sildīt. Tas nozīmē, ka iekārtai jau tāpat ir nepieciešams izturēt ievērojamas slodzes, un vibrācijas rada papildu slodzi, kuru nepieciešams novērtēt, lai droši darbinātu iekārtu.

Vizuālie novērojumi pirmoreiz palaižot iekārtu liecina, ka vibrāciju amplitūda (paātrinājumi) mainās atkarībā no rotācijas frekvences. Lai šo novērtēt tika veikti mērījumi ar diviem dažādiem akselerometriem. Sīkāk apskatīts tabulā 1.

Tabula 1. - Mērierīces

Nr.	Nosaukums	Piezīmes
1	3 asu akselerometrs	iebūvēts viedtālrunī SonyEriccson Xperia X10i
2	1 ass akselerometrs	

Lai iegūtu precīzāku rezultātu mērierīces tika novietotas dažādās vietās, savukārt 3 asu akselerometrs novietots netālu no sūkņa, stiprināts pie rāmja.

Datu iegūšana no mērierīces 1 gadījumā ir veikta ar programmu „Accelerometer monitor”, ko bezmaksas iespējams iegūt PlayStore Android veikalā. Tā noglabā datus txt failā atmiņā, tālāk to ielādē datorā un apstrādi veic datorā ar

programmu „Poliharmonikas” sarakstītu speciāli šādai funkcijas izvirzīšanai Furjē transformācijai. Savukārt gadījumā 2 datus apstrādā ar specializētu iekārtu „...”, kur tos saglabā atmiņā, tālāk nosūta datoram un apstrādā ar datorprogrammu „DIAdem”, kuru izstrādājis National Instruments uzņēmums.

Atšķirība mērierīcēs ir galvenokārt iegūto datu apstrādes iekārtā, kur 2 gadījumā ir iespēja iegūt ievērojami augstāku mērījumu skaitu – līdz 20 kHz, kā arī augstāka signāla kvalitāte un mazāki trokšņi. 1 gadījumā ierīces maksimālā frekvence ir 50Hz.

Mērot šāda tipa vibrācijas, pietiek arī ar 50Hz frekvenci, tā kā sūkņa rotācijas frekvence nepārsniedz 4Hz. Iekārta ar mērīšanas frekvenci kHz tika izmantota arī papildu kavitācijas atrašanai.

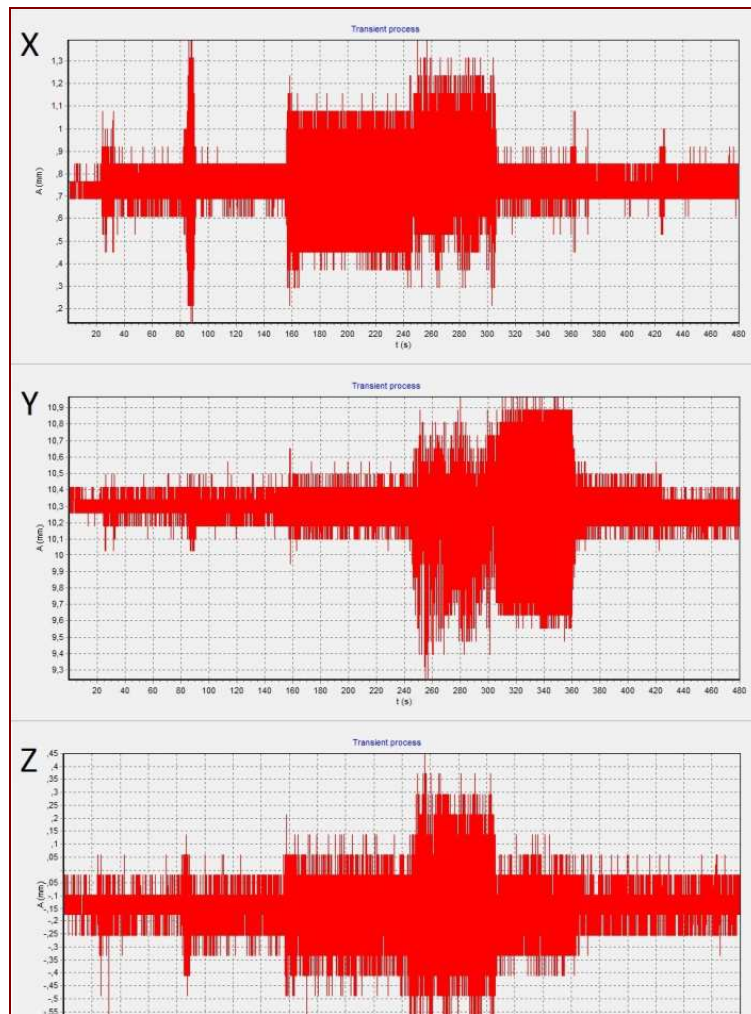
Iegūtie dati no 3 asu akselerometra redzami pielikumā 1.

## Mērīšana

Gadījums 1, kad mērīšanu veic ar 3 asu akselerometru, kas iebūvēts mobilajā viedtālrunī. Attēlā 5.17. redzams, kur novietota mērierīce, apvilks ar sarkanu rāmi.



Att.5.17. – mērierīces novietošanas pozīcija.



Att.5.18. – Paātrinājums, laikā, grafiks iegūts no datiem, nolasītiem tieši no akcelerometra.

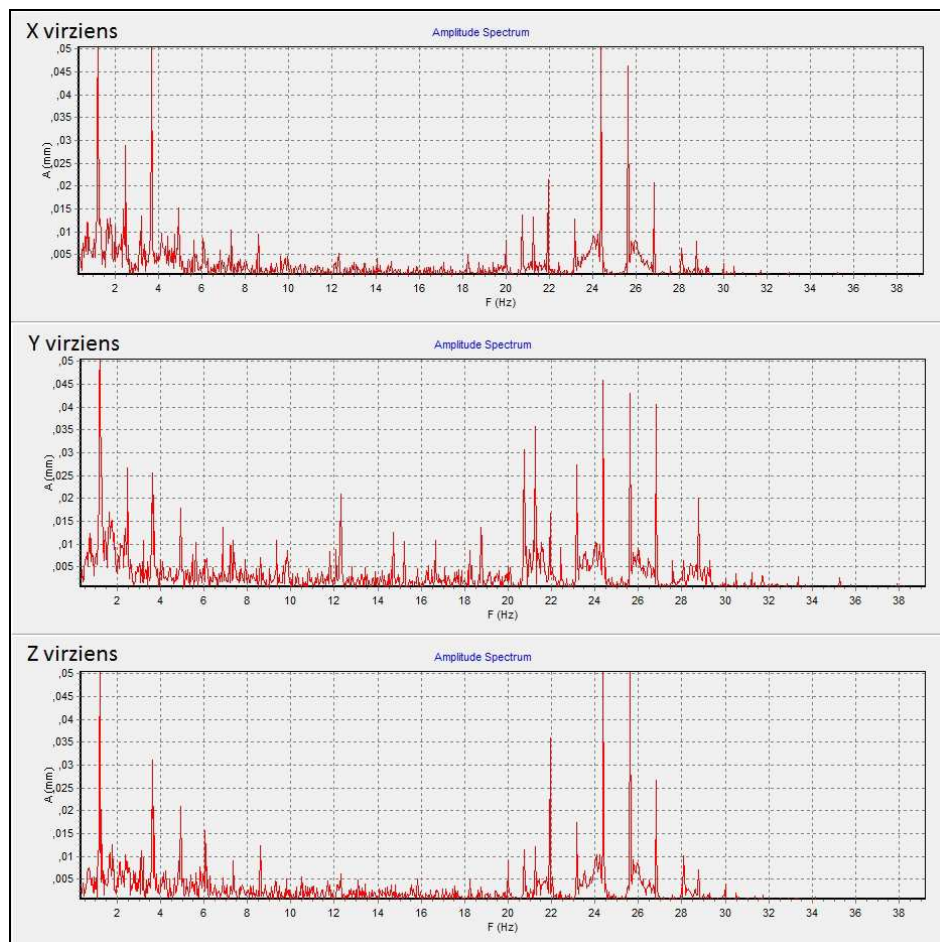
Mērīšanā ieraksta pārvietojumu trīs virzienos, kas sakrīt ar sūkņa rotācijas asi, gravitācijas virzienu un rotora šķērsvirzienu. Datu ieraksta ātrums ir 50Hz. Kanāls tukšs (bez metāla), attiecīgi istabas temperatūra. Tiek mainīts rotācijas ātrums ik pa 5Hz, to palielinot.. Uz horizontālās att 5.18. ass ir laiks sekundēs, savukārt uz vertikālās amplitūda, taču to skaitliskās vienības var neievērot, tā kā nav ņemta vērā mērierīces novietojuma ģeometrija un stiprināšanas elementi, skatīt vienīgi savstarpējo datu amplitūdas. Trīs grafiki norāda uz asīm X, Y un Z. Var novērot, ka ievērojami palielinās amplitūda no 160 līdz 360 sekunde, kas atbilst 20, 25 un 30 Hz iestatījumam frekvenču pārveidotājā. Šajā eksperimentā galvenais rezultāts ir noteikt nevēlamos darba režīmus sūknim, un noteikt rezonanses frekvences.

Gadījumā ar 1 ass akcelerometriem, tie tiek piestiprināti tieši pie metāliska izvirzījuma kanāla malā. Tos izvieta uzreiz vairākus, lai ierakstītu svārstības vairākās vietās, šajā gadījumā divās, salīdzināšanai, un katrā pozīcijā izvieta divus devējus, katru savā virzienā. Tie ir mazāki un ar datoru savienoti ar kabeli. Specializēts dators apstrādā signālu, ātri un kvalitatīvi ar maziem trokšņiem, tos pārveido digitālā formātā, tālākai analīzei ar datoru.

## Mērījumu analīze

Apstrādātos datus analīzē izmantojot datorprogrammas. Vienādojumu skaits ir milzīgs, tāpēc ar roku to darīt pie mūsdienu iespējām ir neefektīvi.

Izmantojot programmu „Poliharmonikas” dati iegūti no 3 asu akcelerometra tiek pakļauti Furjē analīzei, frekvenču diapazonā no 0 līdz 50Hz ar soli 0,1 Hz. Visās trijās asīs. Pie frekvenču pārveidotāja frekvences 20, 25 un 30Hz. Attēlā 5.19. redzama iegūtā raksturlīkne pie 25 Hz frekvences.



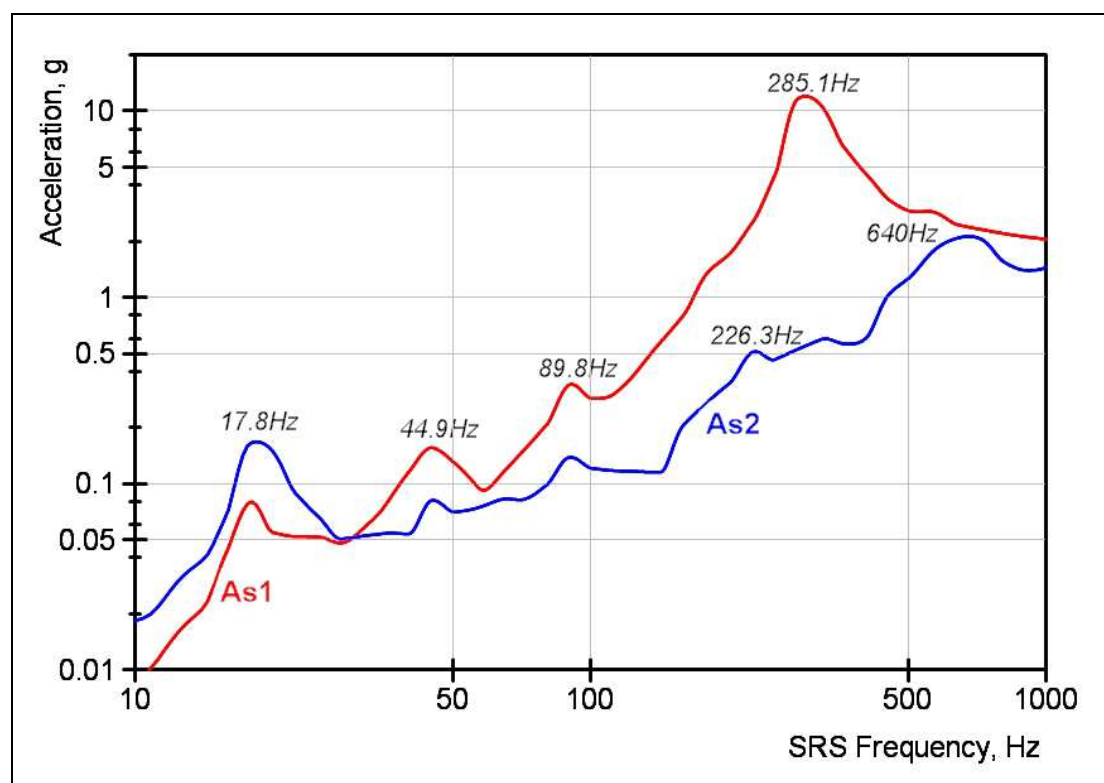
Att.5.19. – Furjē analīze, 25 Hz, X,Y,Z virzieni.

Tāpat kā iepriekš mērvienībām pa y asi var nepievērst uzmanību, tikai ievērot savstarpējo grafika punktu atrašanās vietu. Pa X asi ir frekvences. Šeit vērojami vairāki pīķi pie 1.5, 22, 24.5, 25.5, 27 Hz. 1.5 Hz pīķis varētu norādīt uz rotora griešanās frekvenci. Atlikušie pīķi ir viena no rezonanses frekvencēm kontūram.

Pētot amplitūdu spektrus pie 20Hz un 30Hz, kuriem ir salīdzināmi pīķu augstumi (y ass vienības) ar šo 25 Hz spektru, var novērot, ka pie šīs frekvences amplitūdas ir ievērojami lielākas, tātad šis ir nevēlams darbības režīms. Kā arī pētot vispārīgos datus no akcelerometra, var novērot, ka šīs trīs frekvences nav vēlamas un palielinot rotora griešanās frekvenci jeb ātrumu, darbība stabilizējas. Šie dati korelē ar vizuālajiem novērojumiem iekārtai darbojoties.

Izmantojot precīzos akcelerometrus, veicot tā saucamo „hammer test” (no angļu val. – āmura pārbaude), kas ir apzināta trieciena radīšana ar smagu priekšmetu

(piemēram, āmurs) izslēgtai iekārtai, vai pie zemas slodzes. Ir iegūtas rezonanses frekvences diapazonā līdz 1000Hz. Attēlā 5.20. redzams grafiks frekvencēm.



Att.5.20.– Frekvenču spektrs

Šajā grafikā uz X ass ir frekvences, atliktas logaritmiskā mērogā, un uz Y ass paātrinājums, to salīdzinot ar Zemes paātrinājuma konstanti  $g$  ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ). Šeit, atšķirībā no iepriekšējiem grafikiem skaitliskās mērvienības paātrinājumam ir reālas un vērā ņemamas. Pīķi līknē norāda uz rezonanses frekvencēm. As1 un As2 ir divi mēģinājumi (uzsitieni) viena eksperimenta laikā.

Var novērot, ka pirmā rezonanses frekvence ir pie 18Hz, kas ir relatīvi zema, ņemot vērā, ka kontūrs veidots no nerūsošā tērauda, kas ir ciets materiāls.

### Secinājumi

No trieciena testa, redzamas pirmās rezonanses frekvences, kur pirmā ir pie 18Hz.

3 asu akselerometra iegūtie dati, rāda, ka nevēlams sūkņa darbības režīms ir, kad frekvenču pārveidotājā ir iestatīti 20 līdz 30Hz, tālāk vibrāciju amplitūda ievērojami samazinās.

3 asu akselerometra datu analīze ar Furjē transformāciju rāda, ka rezonanses frekvences ir diapazonā no 18 līdz 24Hz, kas korelē ar rezultātiem iegūtiem no 1 asu akselerometriem.

Pirmā tuvinājumā iespējams iegūt kvalitatīvu rezultātu, arī izmantojot iebūvētu akselerometru viedtālrunī, kuru ir ievērojami vienkāršāk lietot un arī ir lētāks.



## Dzīvsudraba kontūrs.

Stacionārā mērķa konstrukcija ir vienkāršāka, toties darba resurss ir jūtami īsāks, tikai daži mēneši, bet mērķa nomaiņas operācija ir sarežģīts, darbietilpīgs un dārgs process. Šinī sakarībā perspektīvs varētu būt rotējošs šķidrā metāla mērķis. Tiek piedāvāti divi principiāli atšķirīgi varianti –šķidrā metāla rotējošs mērķis, kura diametrs nepārsniedz 1.2 m, bet masa aptuveni 2000 kg, un kombinēts volfrāma –gallija rotējošs mērķis, kurā gallijs ir ne tikai siltumnesējs, bet arī vienlaicīgi neitronus ģenerējošs materiāls . Tā kā gallijs ir ļoti dārgs (1 litrs maksā aptuveni 2.5 tūkstošus dolāru) eksperimenti tika veikti izmantojot dzīvsudrabu. Pie tam dzīvsudrabs ir arī viens no galvenajiem kandidātiem atskaldīto neitronu sistēmās un to jau izmanto līdzīgās iekārtās ASV un Japānā.

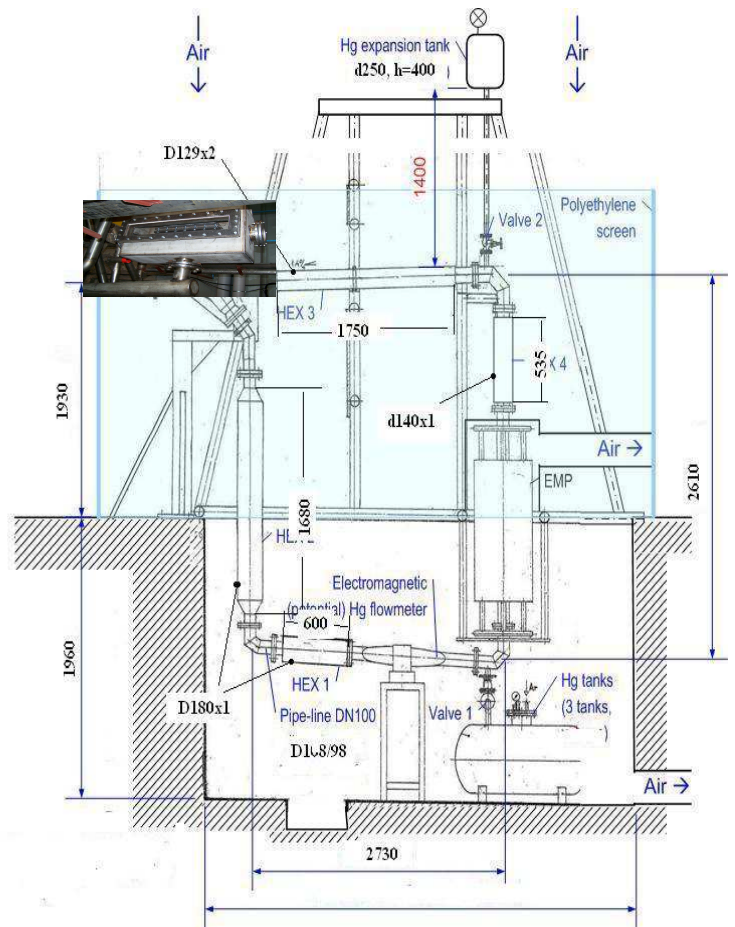
Rotējošā mērķa ideja ir jauna un prasa ne tikai teorētisku analīzi, bet arī eksperimentālu pārbaudi. Tās realizācijai tika rekonstruēts dzīvsudraba kontūrs, att. 5.21. Rotējoša šķidrā metāla mērķī, att.5.22. šķidrā metāls (Hg, PbBi) ar sūkņa palīdzību pa dubultcaurules iekšējo kanālu tiek padots rotējošā cilindrā, kur tas tiek pakļauts protonu kūļa iedarbībai un tālāk pa dubultcaurules ārējo kanālu un šķidrā metāla cirkulācijas kontūru - uz siltummaini un atpakaļ uz sūkni. Rotācijas kustība notās (atkarībā no cilindra diametra) reizes samazina slodzi uz protonu kūļa iedarbības zonu. Protams, arī rotējošam mērķim ir vērā ņemamas nepilnības – gultņu mezgls, blīvslēgs. To darbība ir pie nosacīti augstas temperatūras (līdz pat 350<sup>0</sup>C) un pie tam - radiācijas apstākļos. Tas prasa papildus mezglu aizsardzību un sarežģī konstrukciju.

Tā kā rotējošā mērķa realizācija projektā nebija paredzēta, tika nolemts izstrādāt un izgatavot rotējošā mērķa vienu elementu un pārbaudīt tā darbību, hidrauliskos parametrus pie dzīvsudraba caurteces tuvas caurtecei reālā iekārtā, t.i. 15 - 18 L/s, att.5. 23.

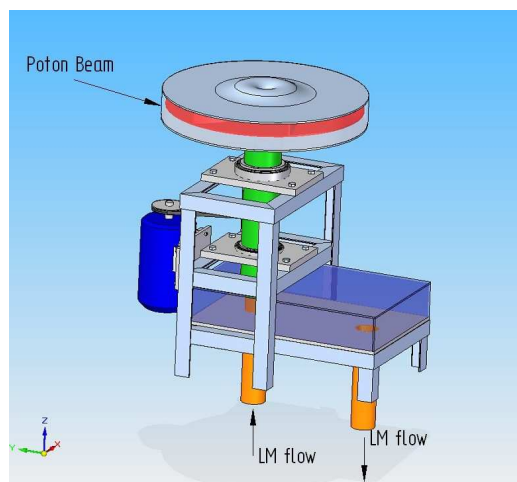
Iegūtie eksperimentālie rezultāti parādīja, ka pie caurteces kontūrā 12 L/s dzīvsudraba plūsma, kuras izmēri bija 20 x 300 x 100 mm ir stabīla un homogēna, spiediena kritums kontūra tuvs 3 bāriem. Tas nozīmē, ka pilnīgi reāli izprojektēt darba spējīgu rotējošu atskaldīto neitronu mērķi, kas atbilstu vajadzīgajām iekārtas tehniskajām prasībām. Pie tam atkarībā no protona kūļa jaudas viegli nodrošināt attiecīgu šķidrā metāla caurteci kontūrā.



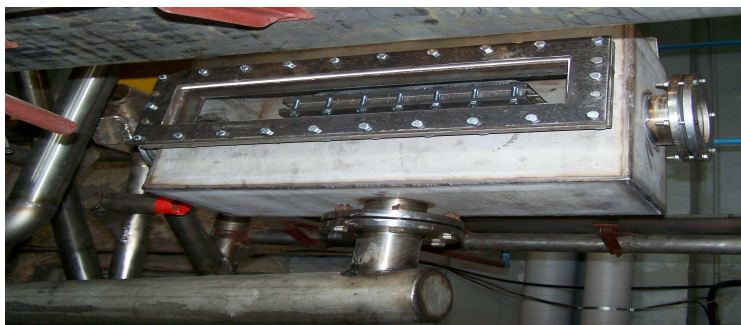
a



Att. 5.21. Dzīsudraba kontūra – kopskats; b – kontūra principiālā shēma ar instalētu tānī stacionāro mērķi.



Att.5.22. Rotējošā atskaldīto neitronu mērķa principiālā shēma.



Att.5.23. Rotējoša mērķa elements instalēts dzīvsudraba kontūrā.  
a – elementa konstruktīvs izpildījums; b – dzīvsudraba strūkļa.

Rotējošā mērķa konstrukcija tika nopatentēta un sanēmts Latvijas patents

### Secinājumi.

- 1- Izstrādāts un izgatavots PbBi kontūrs, kura hidrauliskie parametri (šķidrā metāla caurtece, spiediena kritums (hidrauliskā pretestība), darba temperatūra) tuvi reālas atskaldīto neitronu iekārtas parametriem.
- 2- Instalēts kontūrā un izpētīti termo – hidrauliskie raksturlielumi „slīpa loga” mērķim.
- 3- Izpētīts temperatūru sadalījums mērķī atkarībā no šķidrā metāla caurplūdes, ievadot šķidrā metālā siltumjaudu aptuveni 12 kW.
- 4- Izvērtētas turbulences radītās temperatūras fluktuācijas mērķī.
- 5- Apzinātas vibrācijas kontūrā un to cēlonis.
- 6 - Rekonstruēts dzīvsudraba kontūrs un uz modeļa izvērtētas potenciālas iespējas izstrādāt rotējošu šķidrā metāla atskaldīto neitronu mērķi.

### Kopsavilkums.

1. Projekta laikā (01.10. 2010. – 30. 09. 2013.) praktiski izpildīti visi darbi saskaņā ar atsevišķās aktivitātēs (kopā 5) plānoto darbu programmu.
2. Iesniegti un akceptēti publicēšanai 6 raksti, nolasīti referāti 3 konferencēs, iesniegts starptautiskais patents.