

NACIONĀLAIS  
ATTĪSTĪBAS  
PLĀNS 2020



**EIROPAS SAVIENĪBA**

Eiropas Reģionālās  
attīstības fonds

---

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē



Latvijas Universitātes

**Fizikas Institūts**

**EIROPAS REĢIONĀLĀS ATTĪSTĪBAS FONDS**

**Elektrosārņu process labākai titāna  
nogulsņējumu morfoloģijai**

**Projekts Nr. 1.1.1.1./16/A/85  
( Progresā ziņojums - 9 )**

**01.01.2019-07.06.2019**

Projektā piedalās:

1. Platacis Ernests\*
2. Kravalis Kalvis
3. Linards Goldšteins
4. Mihails Majorovs
5. Blumbergs Ervīns
6. Kaģalnickovs Vadims
7. Serga Vera
8. Krūmiņa Aija
9. Alberts Romančuks
10. Sudņikovičs Sergejs
11. Šints Viesturs
12. Andrejs Šiško
13. Kaldre Imants

\*Projekta zinātniskais vadītājs: tel. 67944700; mob. 26513424.

e – pasts: erik@sal.lv

Projekta administratīvā vadītāja: **M. Broka**; tel. mob. 29166326

e – pasts: maija.broka@lu.lv

**Projekta uzdevums :**

- Veikt rūpnieciskos pētījumus ar mērķi izstrādāt jaunu tehnoloģiju, kas balstīta uz Krola un elektrosārņu procesiem un tehnoloģijas prototipu Ti/TiAl sakausējumu iegūšanai.

**Projekta rezultāti:**

- Jābūt izveidotam jaunas Ti/TiAl sakausējumu iegūšanas tehnoloģijas prototipam;
- Jābūt apstiprinātai un aizstāvētai projekta izpildes gaitā izstrādātajai tehnoloģijai patenta formā, publicētiem 4 oriģināliem zinātniskiem rakstiem un 6 ziņojumiem starptautiskās konferencēs.

➤ **Aktivitāte Nr. 1. Tehnoloģijas prototipa izstrāde, integrējot galvenās tehnoloģiskās komponentes.**

➤

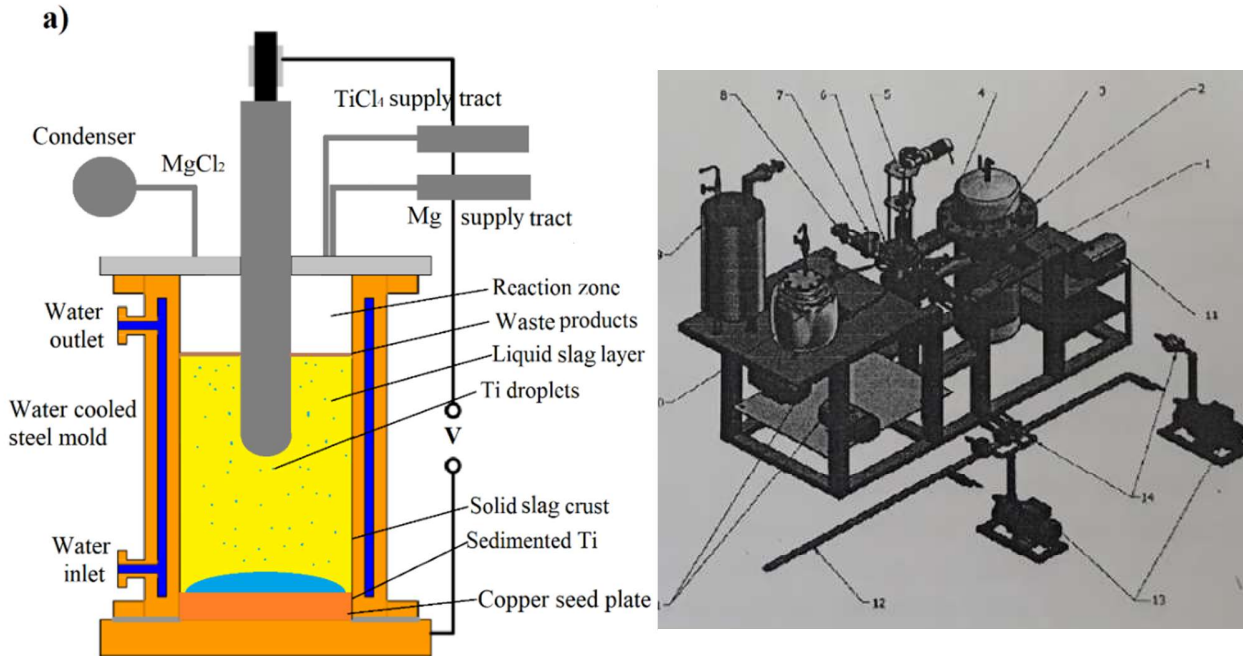


Fig 1.1. a) Titāna elektrosārņu ražošanas tehnoloģijas procesa principiālā shēma;  
b) Titāna ražošanas eksperimentālās iekārtas skice.

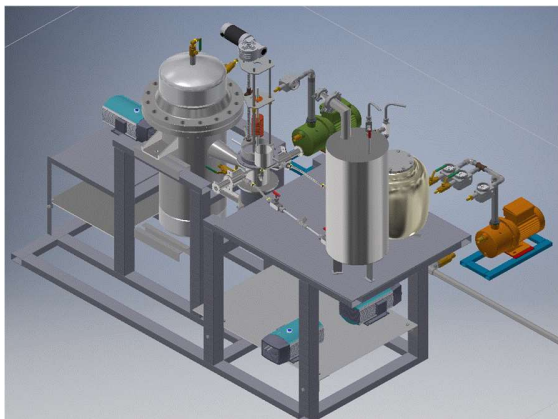


Fig.1.2. a) Titāna ražošanas eksperimentālās iekārtas skice.  
b) Titāna elektrosārņu ražošanas tehnoloģijas procesa prototipa stends

Aktivitātes Nr.1 veikto darbu rezultātā tika izstrādāts titāna, titāna- alumīnija elektrosārņu ražošanas tehnoloģijas prototipa bāzes variants, fig.1.1, 1.2, kurš, atkarībā no tālāk veikto

eksperimentu rezultātiem, tiek pilnveidots un rekonstruēts. Uz prototipa veikta sērija eksperimentu, kuru rezultātā ir izzināti un izpētīti pētāmās titāna ražošanas tehnoloģijas pamatprincipi, īpatnības, kā arī izvertētas prototipa darbaspējas. Aktivitāte ir pabeigta iepriekšējā atskaites periodā un rezultāti izklāstīti Progresa ziņojumā - 7.

## **Aktivitāte Nr.2. Eksperimentālā validācija**

Praktiski eksperimentālās aktivitātes uz tehnoloģijas prototipa ar vienu elektrodu ir izsmeltas. Ir veikti pāri par 24 eksperimentiem, tanī skaitā eksperimenti ievadot reaktorā  $TiCl_4$  un veicot reducēšanas reakciju pilnā apjomā.

Veikta eksperimentu sērija nolūkā izstrādāt šķidra titāna tetrahlorīda padeves sistēmu reaktorā, izmantojot kombinēto elektrodu, kurš sastāv no magnija (procesa gaitā tiek patērēts) un wolframa (procesa gaitā netiek patērēts). Magniju ievadīja šķidrājos sārņos (NaCl) ar agrāk izstrādāta paņēmiena palīdzību - izkausējot magnija elektrodu. Eksperimentā (Nr.17), kurā izmantots divkārs magnija pārākums salīdzinājumā ar stehiometriju (uz ~ 190 g  $TiCl_4$  ~ 90 g Mg), ņemot paraugus no sacietējušās sārņu vannas un veicot šo paraugu analīzi, konstatēts:

- Kompakti metāliski lietņi atrodami uz wolframa elektroda virsmas, kā arī sārņu vannas tilpumā. Saskaņā ar rentgenfluorescences analīzes (XRF) rezultātiem šo materiālu sastāvā pamatelementi ir Ti un Mg. Analizējot ar XRF metodi lietni no sārņu vannas iekšējā tilpuma, noskaidrots, ka paraugs satur 45,2 sv.% titāna un 47,6 sv.% magnija. Lietnī, kurš nogriezts no wolframa elektroda virsmas Ti saturs -50,4 sv.%, Mg - 40,3 sv.%.
- Metāla paraugā, kurš ņemts no noņemamā paliktņa, rentgenogrāfiskā fāžu analīze (XRD) uzrādīja kristālisko fāžu NaCl,  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  un Mg klātbūtni. Saskaņā ar XRF analīzi Mg un Ti saturs ir attiecīgi 67,0 sv. % un 3,5 sv. %.
- Titāns un magnijs smalki dispersā veidā atrodams visos sārņu paraugos, kas ņemti no dažādām sārņu sistēmas zonām (garnisāža, sārņu vannas iekšējais tilpums). Titāna saturs šajos paraugos variējas no 2 līdz 13 sv.%.
- Wolframa saturs pēc eksperimenta ņemtajos paraugos no dažādām sārņu sistēmas zonām saskaņā ar XRF analīzi nepārsniedz 0,1 sv. %.
- Reducēšanās reakcijas norisi pierāda sārņu paraugu rentgenogrāfiskās fāžu analīzes rezultāti. Konstatēta metāliska titāna, kā arī reducēšanās reakcijas produkta  $MgCl_2$  fāžu klātbūtne.
- Izjaucot reaktoru un ņemot paraugus analīzēm, novērojama intensīva garaiņu izdalīšanās, kas saistīta ar neizreagējuša titāna tetrahlorīda klātbūtni. Tas liecina par reducēšanās reakcijas nepilnīgu norisi.

Vēlāk sekojošo "tukšo" eksperimentu (Nr,18) (bez  $TiCl_4$  iesmidzināšanas) gaitā konstatēts, ka wolframa elektroda daudzkārtējas izmantošanas laikā notiek ievērojama elektroda erozija:

volframa saturs sārņu paraugos ir no ~ 1 līdz ~ 17 sv.% atkarībā no parauga ņemšanas zonas. Vislielākais metāla daudzums atrasts sārņu vannas apakšējā daļā.

Lai nodrošinātu pilnīgu titāna tetrahlorīda reducēšanu ar magniju elektrosārņu procesa laikā, veikta "tukšo" eksperimentu sērija sārņu sastāva optimizēšanai. Galvenie izvēles kritēriji bija optimāla elektrovadītspēja, kas nodrošina sārņu uzturēšanu šķidrā agregātstāvoklī elektrosārņu procesa gaitā, un blīvums, kam šķidrā stāvoklī jābūt lielākam par šķidra magnija blīvumu. Pētījumu gaitā izmantoti sekojoša sastāva sārņi:  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{NaF}+5 \text{ sv.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NaCl}+5 \text{ sv.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NaCl}+10 \text{ sv.}\% \text{ NaF}$ ,  $\text{NaCl}+5 \text{ sv.}\% \text{ NaF}+5 \text{ sv.}\% \text{ Al}_2\text{O}_3$ . Veikto eksperimentu rezultāti ļāva noteikt sārņu sastāvu, kas atbilst augstāk minētajiem kritērijiem -  $\text{NaCl}+10 \text{ sv.}\% \text{ NaF}$ .

#### **Eksperiments Nr. 17. №. (27.02.19).**

Eksperimenta nosacījumi. Sārņi šķidri-  $\text{NaCl} \approx 500 \text{ g}$  (reaktors pirms sārņu iepildīšanas tika skalots ar argonu un vakuummēts). Aizmetnis – nerūsējošais tērauds,  $\text{TiCl}_4 - 170 \text{ g}$ ,  $\text{Mg} - 90 \text{ g}$ . Elektrods kombinēts -  $\text{W-Mg}$ .  $U = 13 \text{ V}$ ,  $I = 300-400 \text{ A}$ . Eksperimenta ilgums pēc  $\text{TiCl}_4$  ievadīšanas reaktorā – 20 min..

#### Eksperimenta mērķis.

Definētas magnija elektroda masas izkausēšana reaktorā reducēšanas reakcijas nodrošināšanai,  $\text{TiCl}_4$  ievadīšana reaktorā, magnija un titāna sadalījums reaktora tilpumā un sārņu vannā.



Fig. 2.1. Reaktors pēc augšējā vāka demontāžas . (Parādījušies dūmi, kas liecina, ka daļa  $\text{TiCl}_4$  nav izreaģējusi).



Fig. 2.2. Reaktora apakšējā daļā redzama sārņu vanna.



Fig. 2.3. Nerūsējošā tērauda aizmetnis pa kreisi un demontēta sārņu vanna kopā ar elektrodiem.



Fig. 2.4. Sārņu vanna.

Lai veiktu XRD un XRF analīzes sārņu vanna tika sadalīta divās daļās. Augšējā – 2/3 no kopējā augstuma ar masu 299g un apakšējā – 154g ( Uz aizmetņa bija liels metālis veidojums. (Sk. ķīmisko sastāvu tabulā 2.1.).

Jautājums – kāpēc reducēšanas reakcijas rezultātā neizraģējareģenti pilnībā? (sk eksperimentu Nr.18)



Fig. 2.5. Sārņu vanna kopā ar elektrodiem.

### Paraugu Rentgena - fāžu un Rentgena - fluorescences analīžu rezultāti

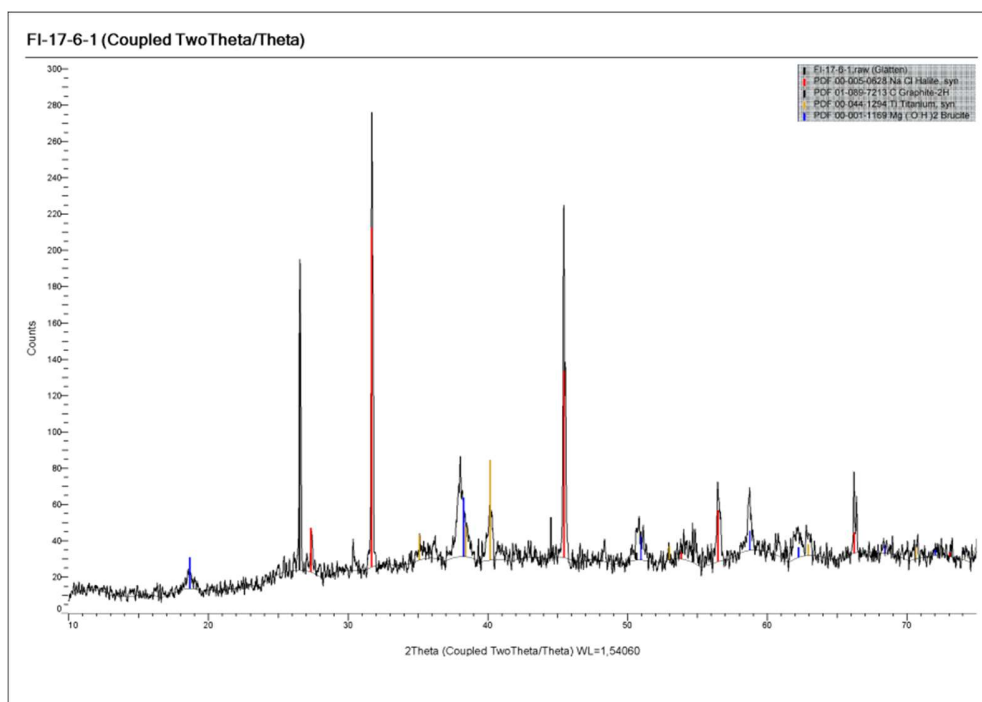


Fig. 2.6. Parauga 17/6-1 rentgena difraktogramma P NaCl (PDF 00-005-0628); C Graphite-2H (PDF 01-089-7213); Ti (PDF 00-044-1294); Mg(OH)<sub>2</sub> (PDF 00-001-1169).

Tab.2.1. Parauga 17/6-1 rentgena - fluorescences analīzes rezultāti

Elementi (masas %)	Ti	Cu	Cl	Zn	Mg	Fe	W	Cr	Ni	Mn	Pb	Mo	Si
	66,8	12,4	5,8	4,1	3,7	3,6	1,3	0,66	0,38	0,35	0,31	0,16	0,05

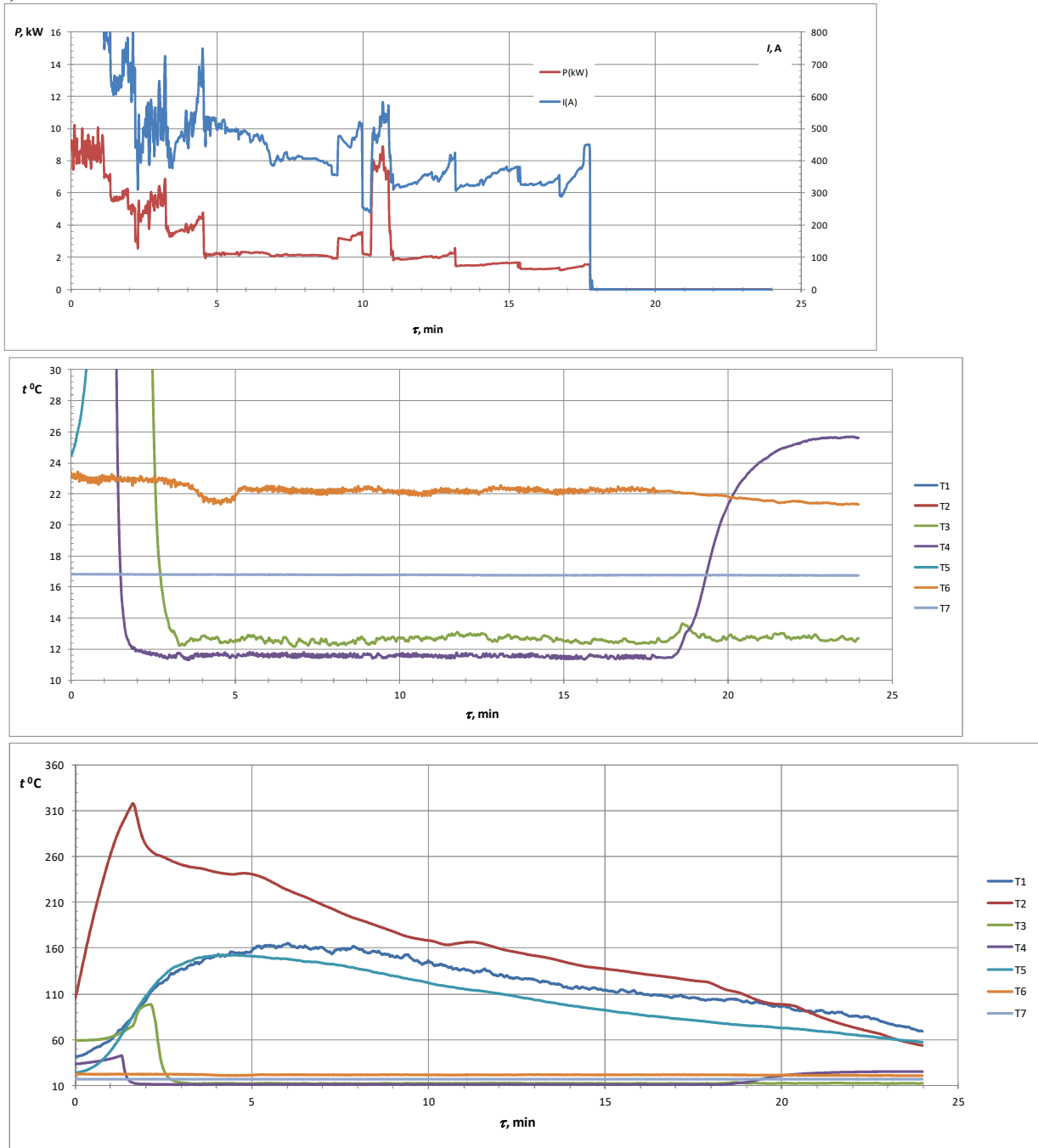


Fig. 2.7. Tehnoloģiskā procesa strāvas – sprieguma raksturlīknes un temperatūru sadalījums uz reaktora sienām



Fig. 2.7. Redzams, ka 2. minūtē tiek ievadīti sārņi ( $T_2 \geq 310^\circ\text{C}$  uz nedzesējamās reaktora sienas posma). 5. min. tiek ievadTiCl<sub>4</sub>. Sākas reducēšanas reakcija, ko apstiprināja.paraugu analīzes rezultāti.

### **Eksperiments № 18 (07.03.19).**

Eksperimenta nosacījumi. Sārņi šķīdri- NaCl  $\approx$  500 g (reaktors pirms sārņu iepildīšanas tika skalots ar argonu un vakuummēts). Aizmetnis – nerūsējošais tērauds, TiCl<sub>4</sub> – 170 g, Mg – 90 g. Elektrods kombinēts - W-Mg.  $U = 13$  V,  $I = 300$ -400 A. Eksperimenta ilgums pēc TiCl<sub>4</sub> ievadīšanas reaktorā – 20 min. TiCl<sub>4</sub> reaktorā netika ievadīts.

Eksperimenta mērķis.

Magnija definētas masas izkausēšanas režīmu noteikšana reaktorā. Magnija sadalījuma noteikšana reaktora tilpumā un sārņu masā.



Fig. 2.8. Reaktora iekšpuse un elektrodi pēc eksperimenta.



Fig.2.9. Sārņu vanna reaktorā.



Fig. 2.10. Elektrodi un sārņu vanna kopā ar tērauda aizmetni pēc eksperimenta.

### Paraugu Rentgena - fāžu un Rentgena - fluorescences analīžu rezultāti

(Analīze veikta 10 paraugiem. Atskaitē ievietots un aprakstīts viens - raksturīgākais)

Sārņu vanna tika sadalīta trijās daļās:

Augšējā - 127.4g;

Vidējā - 80.9g un

Apakšējā - 97g.

No katras daļas tika ņemti vairāki paraugi un veikta to ķīmiskā sastāva analīze. Raksturīgākā parauga ķīmiskais sastāvs un Rentgena difraktogramma parādīti fig. 2.11. un tabulā 2.2.

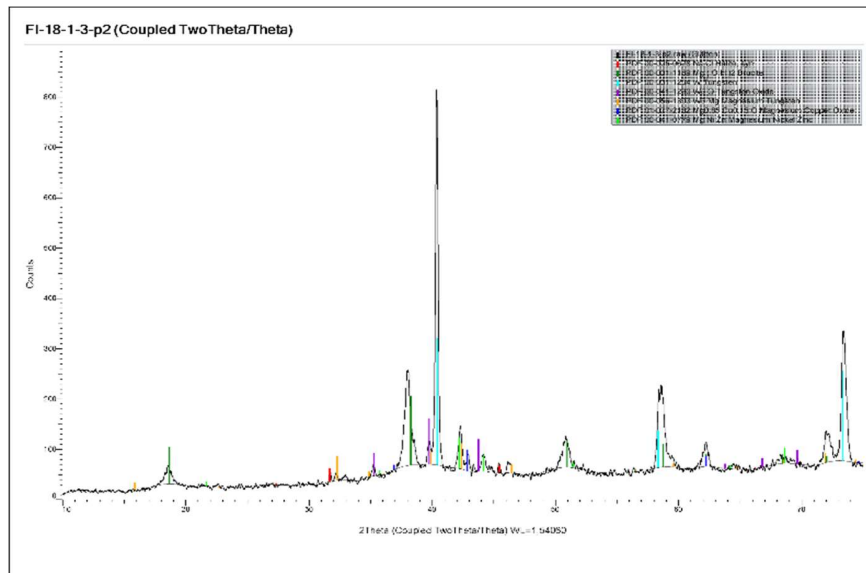


Fig. 2.11. Parauga 18/2-2 Rentgena difraktogramma.: NaCl (PDF 00-005-0628); Mg(OH)<sub>2</sub> (PDF 00-001-1169); W (PDF 00-001-1204); W<sub>3</sub>O (PDF 00-041-1230); W<sub>3</sub>Mg (PDF 00-056-1303); Mg<sub>0.85</sub>Cu<sub>0.15</sub>O (PDF 01-077-2182); MgNiZn (PDF 00-041-0779).

Tab. 2.2. Parauga 18/2-2 Rentgena - fluoriscences analīzes rezultāti

Elementi (masas %)	Mg	Zn	Cu	Cl	Al	Mn	Ni	Fe	Ti
	79,73	9,79	3,35	3,1	1,4	1,01	0,96	0,18	0,06

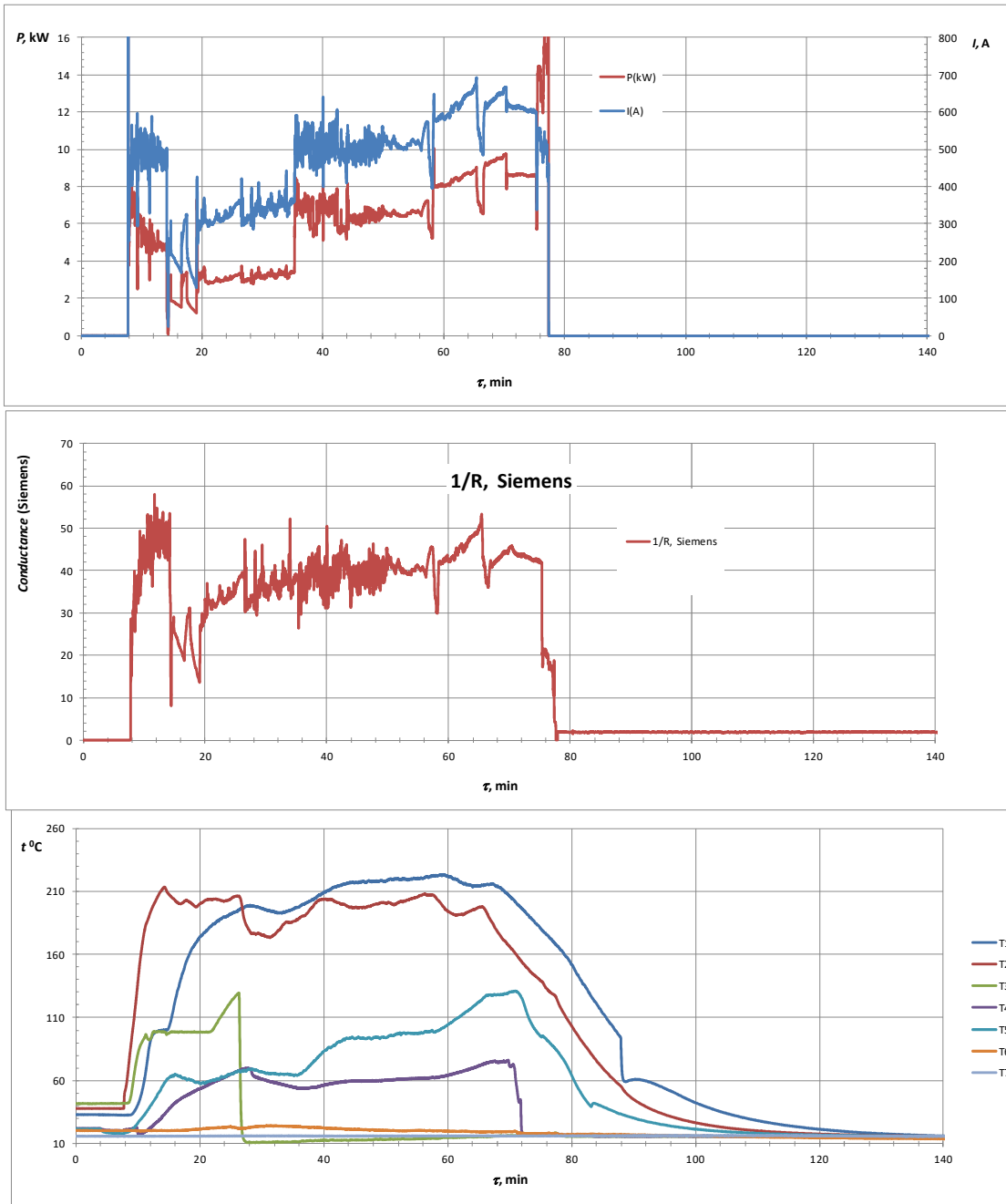


Fig. 2.12. Tehnoloģiskā procesa strāvas – sprieguma raksturlieknes un temperatūru sadalījums uz reaktora sienām

Eksperimenta laikā un paraugu analīzes rezultātā konstatēts, ka magnijs šķīdros NaCl sārņos grimst. Īsslēgums netika fiksēts, jo uz reaktora sienām bija izveidojies ciets sārņu slānis. Praktiski tas izpilda elektroizolatora funkcijas. Lai veiksmīgi noritētu reducēšanas reakcija ir nepieciešams izmantot sārņus ar lielāku blīvumu nekā magnijam.

### Eksperiments № 19. (21.03.19).

Eksperimenta nosacījumi. Sārņi šķīdri-  $\text{CaF}_2 \approx 500$  g (reaktors pirms sārņu iepildīšanas tika skalots ar argonu un vakuummēts). Aizmetnis – nerūsējošais tērauds,  $\text{TiCl}_4 - 170$  g,  $\text{Mg} - 90$  g. Elektrods kombinēts - W-Mg.  $U = 13$  V,  $I = 300-400$  A. Eksperimenta ilgums pēc  $\text{TiCl}_4$  ievadīšanas reaktorā – 20 min..

Eksperimenta mērķis.

Iegūt elektrosārņu pārkausēšanas procesa parametrus, izmantojot  $\text{CaF}_2$  sārņus

### Paraugu Rentgena - fāžu un Rentgena - fluorescences analīžu rezultāti

(Analīze veikta 9 paraugiem. Atskaitē ievietots un aprakstīts viens - raksturīgākais)

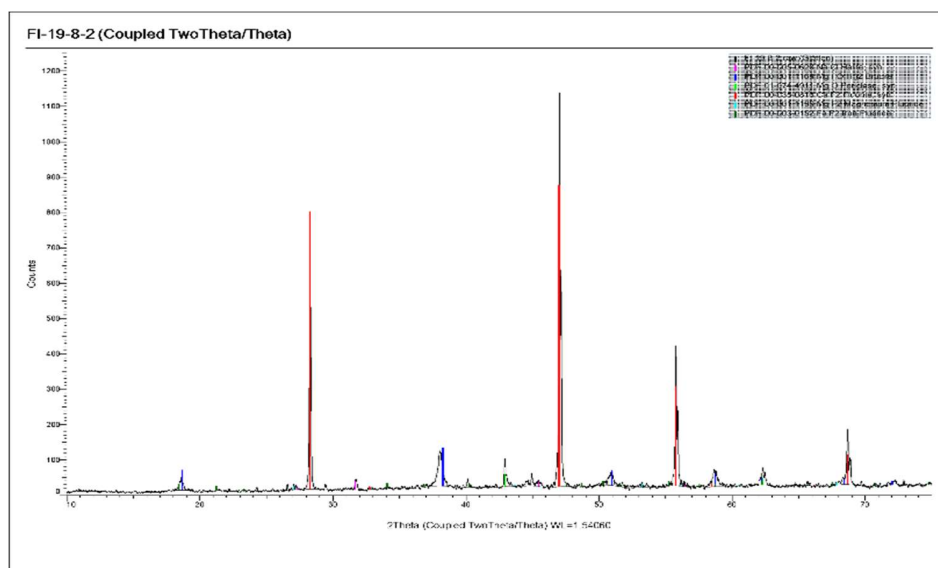


Fig. 2.13. **Parauga 19/8-2:** Rentgena difraktogramma **NaCl** (PDF 00-005-0628); **Mg(OH)<sub>2</sub>** (PDF 00-001-1169); **MgO** (PDF 01-074-4911); **CaF<sub>2</sub>** (PDF 00-0350816); **MgF<sub>2</sub>** (PDF 00-001-1196); **FeF<sub>2</sub>** (PDF 00-003-0152).

Tab. 2.3. Parauga 19/8-2 Rentgena - fluorescences analīzes rezultāti

Elementi masa.%)	CaF <sub>2</sub>	Cu	Mg	Zn	Fe	Cl	Cr	Ni	W	Mn	Mo	Sr
	95,29	1,37	1,32	0,74	0,58	0,17	0,12	0,12	0,12	0,07	0,01	0,01

Reaktorā ar vienu elektrodu augsttemperatūras sārņu  $\text{CaF}_2$  pielietošana ir ierobežota, jo tā kušanas temperatūra ( $1480^\circ\text{C}$ ) ir augstāka par magnija iztvaikošanas temperatūru ( ). Eksperimenta laikā Mg tvaiki daļēji izplūda pa sārņu iepildīšanas kanālu. Izmantot  $\text{CaF}_2$  sārņus var tikai hermētiski noslēgtā reaktorā, pie tam, ja uz tā sienām ir izveidots cietu sārņu slānis.

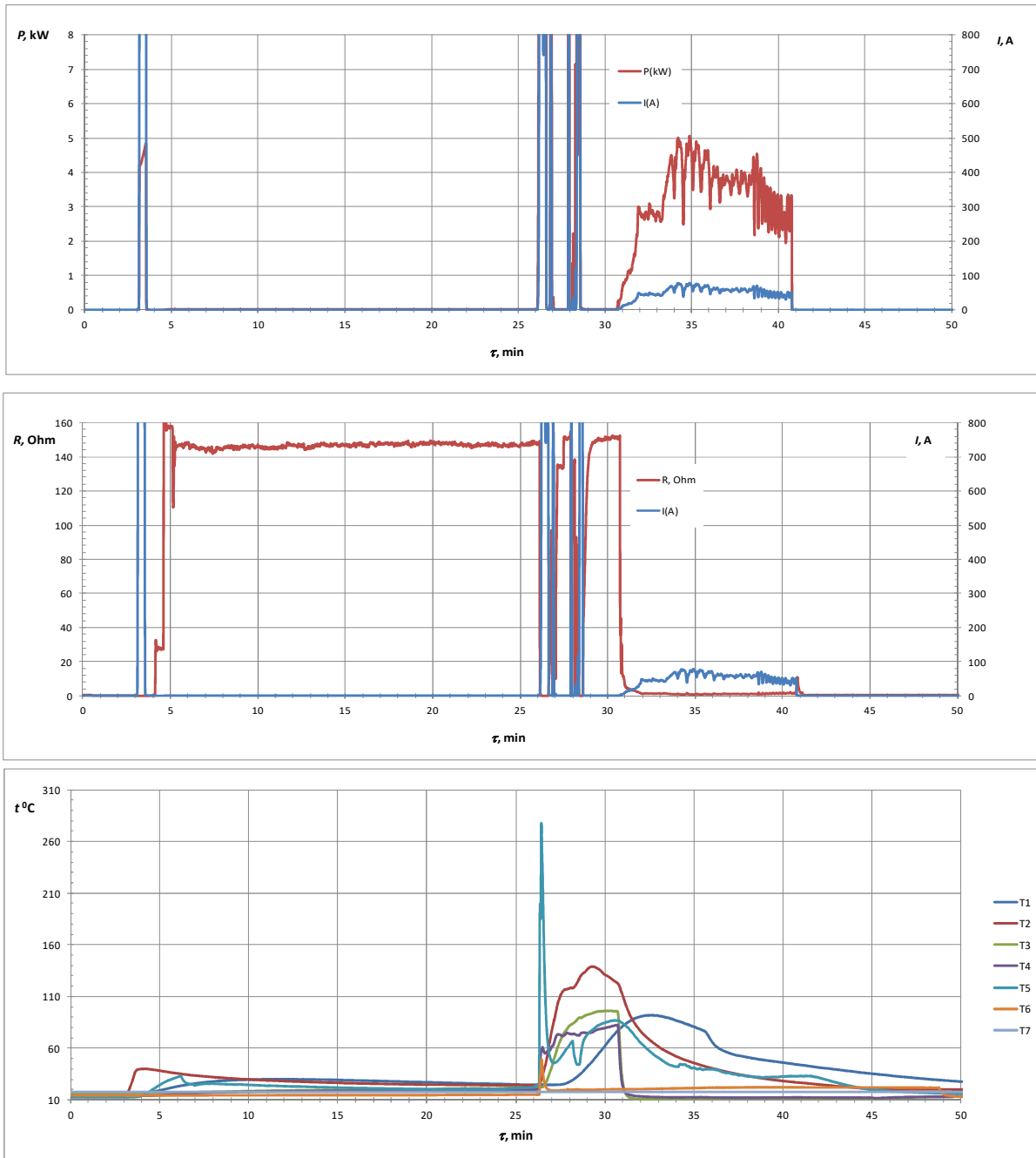


Fig. 2.14. Tehnoloģiskā procesa strāvas – sprieguma raksturliiknes un temperatūru sadalījums uz reaktora sienām.

## **Eksperiments № 20 (10.04.19).**

Eksperimenta nosacījumi. Sārņi šķidri-  $\text{CaCl}_2 \approx 500 \text{ g}$  (reaktors pirms sārņu iepildīšanas tika skalots ar argonu un vakuummēts). Aizmetnis – nerūsējošais tērauds,  $\text{TiCl}_4$  – 170 g, Mg – 90 g. Elektrods kombinēts - W-Mg.  $U = 13 \text{ V}$ ,  $I = 300\text{-}400 \text{ A}$ . Eksperimenta ilgums pēc  $\text{TiCl}_4$  ievadīšanas reaktorā – 20 min..

### Eksperimenta mērķis.

Magnija elektroda definētas masas izkausēšana,  $\text{TiCl}_4$  ievadīšana reaktorā, magnija un titāna sadalījuma izziņāšana reaktora tilpumā un kušņos.



Fig. 2.15. Reaktora kopskats



Fig. 2.16. Metāls virs sārņu vannas



Fig. 2.17. Apakšējais reaktora vāks pēc demontāžas (redzami dūmi)

## Paraugu Rentgena - fāžu un Rentgena - fluorescences analīžu rezultāti

(Analīze veikta 4 paraugiem. Atskaitē ievietots un aprakstīts viens - raksturīgākais)

### Paraugs 20/4. Sārņi CaCl<sub>2</sub>

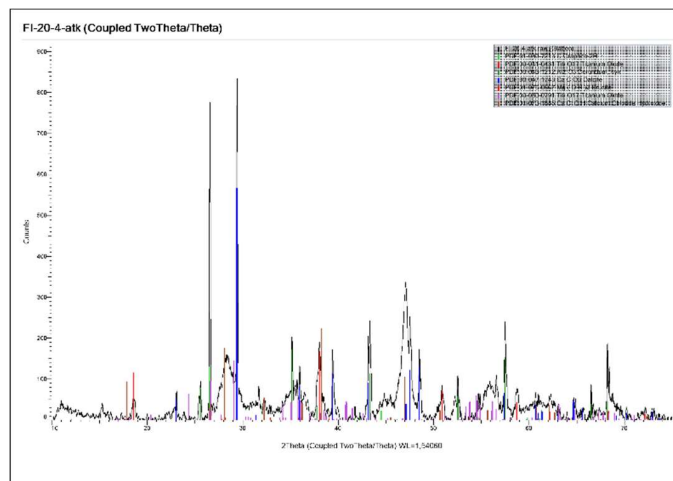
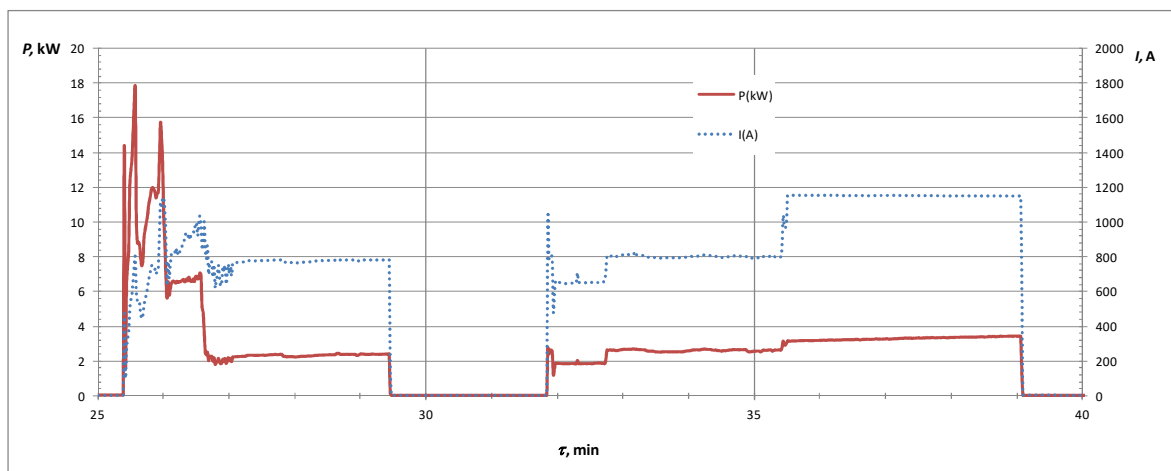


Fig. 2.15. Parauga 20/4 rentgena difraktograma. **C Graphite-2H** (PDF 01-089-7213); **Ti<sub>9</sub>O<sub>17</sub>** (PDF 00-011-0431); **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** (PDF 00-046-1212); **CaCO<sub>3</sub>** (PDF 00-047-1743); **Mg(OH)<sub>2</sub>** (PDF 01-076-0667); **Ti<sub>9</sub>O<sub>17</sub>** (PDF 00-050-0791); **CaClOH** (PDF 01-073-1885)

Tab.2.4. Parauga 20/4 rentgena fluorescences analīzes rezultāti

Ca	Cu	Ti	Cl	Zn	Fe	Mg	Br	Si	Al	Mn	Pb	Cr	K	Ni
43,64	25,1	7,8	6,59	4,2	3,95	3,6	2,13	1,2	0,6	0,40	0,2	0,2	0,16	0,08



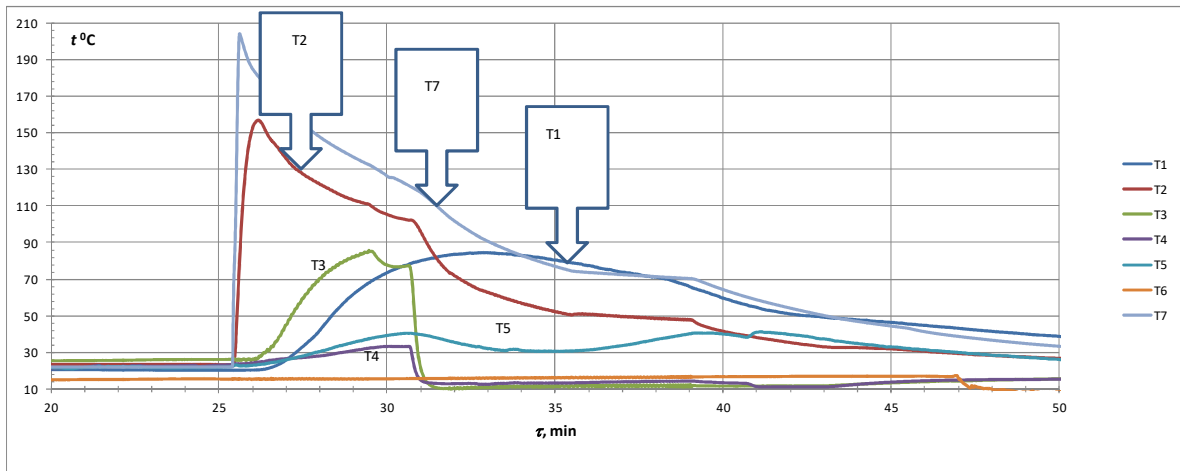
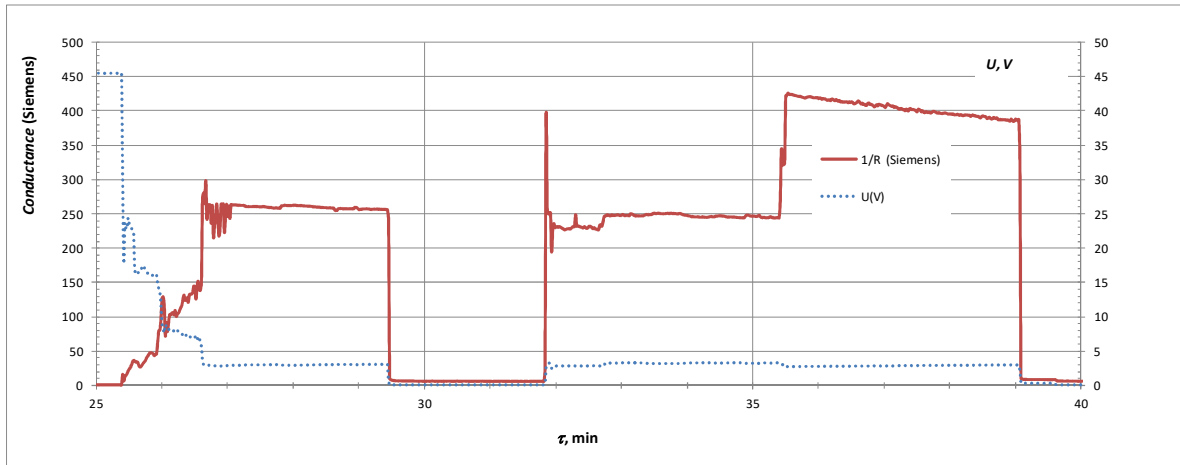


Fig.2.18. Tehnoloģiskā procesa strāvas – sprieguma rakstrurlīknes un temperatūru sadalījums uz reaktora sienām.

Izmantojot  $\text{CaCl}_2$  sārņus, lai uz reaktora sienām veidotos ciets sārņu slānis, nepieciešams temperatūru pacelt līdz  $1935^\circ\text{C}$ . izkausētais Mg (blīvums  $1.584\text{g/cm}^3$ ) atradās virs  $\text{CaCl}_2$  (blīvums  $2.15\text{g/cm}^3$ ) sārņu vannas. Rezultātā īsslēgums, reaktora atdzišana un Mg kristalizācija. Tāpēc tikai neliela Mg daļa spējēja nonākt reakcijā ar  $\text{TiCl}_4$ .



Lai veiktu tālāku projekta virzību un izstrādātu un pārbaudītu titāna- alumīnija sakausējuma iegūšanas tehnoloģiju, bija nepieciešams rekonstruēt esošo reaktoru, palielinot tā izmērus (diametru un augstumu) un organizēt 3 – elektrodu sistēmu (W, Mg un Al). Pie tam palielinot reaktora diametru tiek palielināta reakcijas komponentu savstarpējā saskares virsma, kas labvēlīgi ietekmē reducēšanas reakcijas norisi. 3 – elektrodu reaktorā ir instalēta augsttemperatūras volfrāma – rēnija termopāra un spiediena sensors. Tas ļaus fiksēt reducēšanas reakcijas parametrus, izziņāt reaktorā notiekošos procesus un salīdzināt tos ar teorētisko izvērtējumu

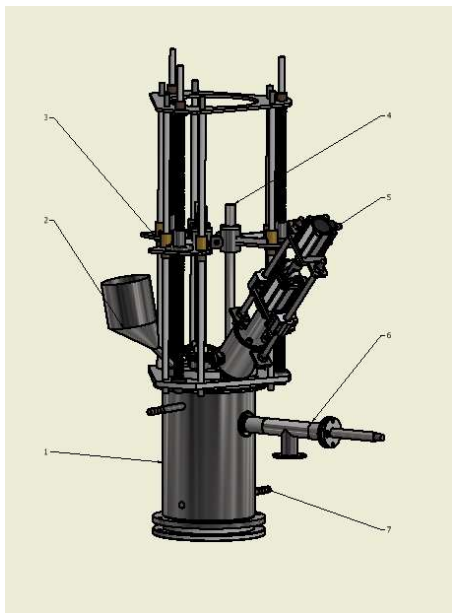


Fig. 2.19. 3 – elektrodu reaktors: principiālā shēma pa labi; reaktora korpuss pa kreisi

### Aktivitāte Nr. 3. Mērījumi, modelēšana un raksturošana.

#### 3. Titāna tehnoloģijas prototipa skaitliskais modelis.

3.1. Modeļa apraksts, bezdimensiju kritēriju un svarīgāko parādību aplēse.

Skaitliskā modeļa ģeometrija, fig 3.1.a sastāv no ūdens dzesēta nerūsējošā tērauda cilindriskā reaktora ar iekšējo diametru 60 [mm] un augstumu 160 [mm].

Reaktora centrā tiek ievadīts volfrāma elektrods ar diametru 5 [mm] un garumu 120 [mm]. Ierīci piepilda ar šķīdriem CaF<sub>2</sub> sārnēm. Starp reaktora vāku un sārnju virsmu ir atstāta telpa (h = 40mm) reducēšanas reakcijas (TiCl<sub>4</sub> + Mg) realizācijai.

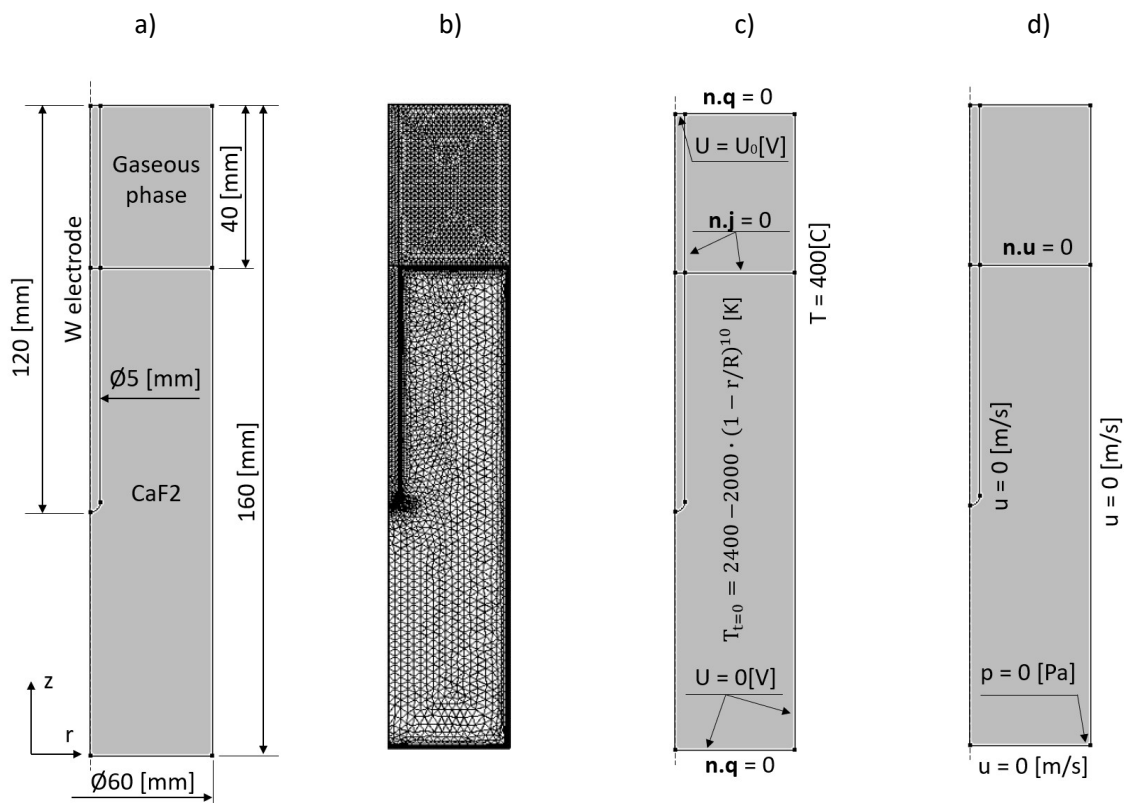


Fig.3.1. a) modeļa ģeometrija; b) modeļa tīkls; c) elektroenerģijas un siltuma pārnese robežnosacījumi; d) hidrodinamiskās problēmas robežnosacījumi

1. tabula: Materiālu īpašības, kas izmantotas aprēķinos [3], [4]

	CaF <sub>2</sub> (solid)	CaF <sub>2</sub> (liquid)	W	Gas	Unit
Density	3180	3179 - 0.391 x T [K]	19200	0.8	kg/m <sup>3</sup>
Specific heat	1280	1680	250	0.52	J/kg·K
Thermal cond.	4.5	0.1	95	0.3	W/m·K
Electric cond.	0.01	640	18.7e6	-	S/m
Viscosity	100	0.017	-	-	Pa·s

Lai izvērtētu bezdimensionālos parametrus, ņemot vērā tab.1 norādītos lielumus, pieņemts, ka šķidro sārņu CaF<sub>2</sub> blīvums  $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ , blīvuma variācijas intervāls šķidrā fāzē -  $\Delta \rho = 438 \text{ kg/m}^3$ , raksturojošais garums -  $R = 0,03 \text{ m}$ , raksturīgais ātrums -  $v = 0,01 \text{ m/s}$ .

Pirmkārt, lai noteiktu plūsmas raksturu reaktorā, novērtējam Reinaldsa skaitli. Ja  $Re < 2000$ , tad ir paredzams, ka šķidrums plūsma būs lamināra

$$Re = \frac{\rho R v}{\mu} = \frac{2300 * 0.03 * 0.01}{0.017} \approx 41 \quad (1)$$

Toties noteiktais Peclet skaitlis, kas raksturo konvektīvo un izkliedējamo siltuma pārnesei attiecību, ir liels. No tā var secināt, ka pat mazu šķidrums kustību gadījumā siltuma konvekcija dominē par difūziju:

$$Pe = \frac{\rho R v C_p}{k} = \frac{2300 * 0.03 * 0.01 * 1680}{0.1} \approx 1.2 * 10^4 \quad (2)$$

Aplēstais Releja skaitlis, kas raksturo gravitācijas spēka attiecību pret difūziju, arī ir ļoti liels. Tādējādi ar lielu varbūtību var secināt, ka sāksies termiskā konvekcija (kritiskā  $Ra = 1000 \dots 2000$ ):

$$Ra = \frac{R^3 \Delta \rho g C_p \rho}{\mu k} = \frac{0.03^3 * 438 * 9.81 * 1680 * 2300}{0.017 * 0.1} = 2.6 * 10^8 \quad (3)$$

Aplēsto bezdimensionālo skaitli, kas nosaka turpmākos pieņēmumus un fizisko saskarni izvēlētajā skaitliskajā modelī var izteikt sekojoši:

1. Elektrosārņu pārkausēšanas procesā šķidrums kustība (plūsma) notiks, pateicoties temperatūras un blīvuma starpībai kausējumā (gravitācijas spēks).

2. Šo plūsmu var raksturot kā lamināru

3. Rezultātā siltuma pārnese šķidrums noris pateicoties konvekcijas fenomenam

3.2. Skaitliskā programmatūra, fizikālās saskarnes robežas un sākotnējie nosacījumi

Skaitliskie aprēķini tika veikti, izmantojot PROGRAMMATŪRU COMSOL Multiphysics 5.3. No diskusijas par elektrostatisks, siltuma pārnesei cietvielu un šķidrums fizikālajām saskarnēm tika izmantotas laminārās plūsmas saskarnes. Gāzes fāzē virs sārņiem tikai siltuma vadāmības problēma ir risināta.

Kā redzams tabulā 1, visas  $CaF_2$  īpašības ir atkarīgas no temperatūras. Lai modelētu gravitācijas spēku šķidrās plūsmas modelī, ir ņemta vērā blīvuma atkarība no temperatūras. Citas īpašības tiek modelētas kā konstantes, un pāreja no cietā uz šķidro stāvokli tiek panākta pakāpeniski, ar temperatūras soli  $\Delta T = 400^\circ C$ ,  $T_{melt} = 1418^\circ C$ , robežās. Skaitliskais modelis – 2D-asimetrisks, izmantots tīkls ar 6335 elementiem. Fizikālo problēmu robežnosacījumi parādīti fig.3.1 b), c), d).

Aprēķinos pieņemts, ka spriegums, ātrums un spiediens reaktorā vienādi ar nulli. Sākotnējā temperatūra reaktorā tika definēta kā rādiusa funkcija:

$$T_{(t=0)} = 2400 - 2000 (1 - r/R)^{10} K,$$

kas atbilst sākotnējam stāvoklim, kad reaktora iekšpusē tiek ievadīti šķidrums sārņi un uz reaktora sienas veidojas cietums sārņu slānis. Elektroda spriegums  $U_0$  variēts no 25 līdz 40 V.

Modelējot  $\text{CaF}_2$  šķidrums/cietās fāzes maiņu un šķidrums plūsmu, kad tiek sasniegta sliekšņa temperatūra, ļoti strauji mainās šķidrums viskozitāte (vairāk nekā 5800 reizes). Tādā gadījumā sārņi zem kritiskā temperatūras sliekšņa ir praktiski sasaluši. Tā kā piemērotais gravitācijas spēks ir noteikts kā temperatūras progresijas funkcija, tas darbojas tikai šķidrā fāzē. Šī pieeja ļauj modelēt sārņu plūsmu un cietā sārņu slāņa veidošanos uz reaktora sienām ar samērā vienkāršiem līdzekļiem. Tā kā elektroenerģijas jauda ir nosacīti augsta, fāžu maiņas latentais siltums modelī netiek ņemts vērā.

### 3. Skaitlisko aprēķinu rezultāti.

Aprēķinātā elektriskā potenciāla, temperatūras un ātruma sadalījuma rezultāti ja darba spriegums  $U_0 = 40 \text{ V}$ ,  $t = 100 \text{ s}$  ir parādīti fig.2. Elektriskā potenciāla līnijas, fig. 2a, rāda, ka sārņu cietais slānis uz reaktora ūdens dzesētās sienas darbojas kā elektriskais izolators. Fig.2.b ir parādītas strāvas līnijas, kas plūst virzienā no elektroda uz reaktora apakšējo vāku. Izklaidētās elektriskās jaudas blīvuma maksimums ir tuvu elektroda galam. Šāds jaudas blīvuma sadalījums izraisa ievērojamu temperatūras paaugstināšanos elektroda tuvumā (skatīt temperatūras kontūras fig.2.c) un gravitācijas spēka izraisītu plūsmu augšpusi elektrodam (uzkarsētā daļa) un lejpus gar cieto sārņu slāni, fig.2d. Ja elektroda spriegums  $U_0 = 40 \text{ V}$  un lēstā elektriskā jauda  $\sim 28 \text{ kW}$ , sārņi ir pilnīgi izkusuši, reaktora centrālajā daļā tiem ir paaugstināta temperatūra, n, gravitācijas spēka ietekmē notiek sārņu plūsma, uz sienām veidojas plāns cieto sārņu slānis  $\sim 3 \text{ mm}$ .

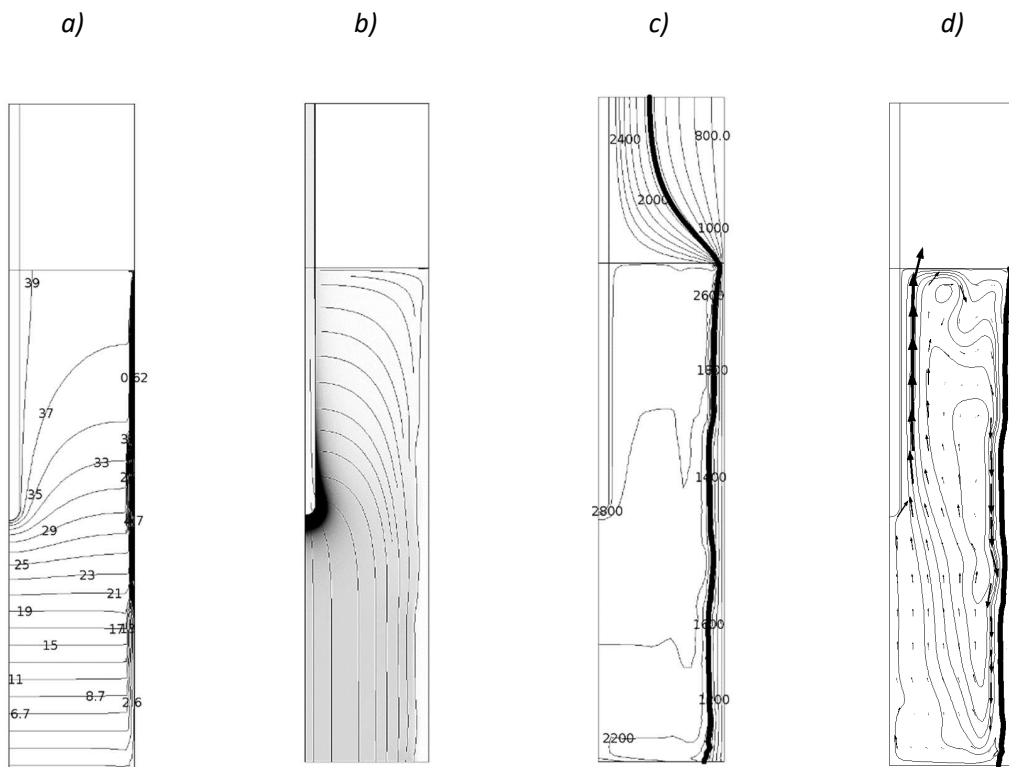


Fig. 3.2.  $U = 40$  V,  $t = 100$  s: a) sprieguma līnijas U, V; b) izkliedētās elektriskās jaudas blīvuma (max 10 kW/cm<sup>3</sup>) un elektriskās strāvas sadalījums; c) temperatūras diagramma un fāzes maiņas fronte T, K; d) ātruma līnijas un vektori (max = 0,07 [m/s]).

Aprēķinātā elektriskā potenciāla, temperatūras un ātruma sadalījuma rezultāti, ja spriegums ir  $U_0 = 25$  [V] un  $t = 100$  [s] ir parādīti fig. 3. Jāatzīmē, ka šajā gadījumā elektriskā jauda ir ~ 10 kW, kas ir nepietiekama, lai pilnīgi izkausētu sārņus, cietais CaF<sub>2</sub> sārņu slānis veidojas tikai reaktora augšpusē. Fig. 3a ir parādītas elektriskā potenciāla līnijas, fig.3b liecina, ka strāva ievērojami izmaina vadoša/šķidrums virziena izmaiņām. Līdzīgi kā iepriekš, izkliedētās elektriskās jaudas blīvuma maksimums ir pie elektroda gala, kas rada augstu temperatūru elektroda tuvumā (skatīt temperatūras sadalījumu fig. 3c), un gravitācijas spēka ietekmē elektroda tuvumā sārņu plūsma tiek organizēta augšpus elektroda tuvumā un lejpus gar cieto sārņu slāni uz atdzesētām reaktora sienām, fig.3d. Ja  $U_0 = 25$  V gadījumā sārņi pilnībā neizkūst un uz ūdens dzesētām sienām veidojas pārāk biezs (~ 5 mm) cieto sārņu slānis.

Līdzīgas analīzes ir veiktas, ja  $U_0 = 30$  V un  $U_0 = 35$  V. Integrālie elektriskie, kā arī citi raksturīgie parametri ir apkopoti Tab. 2.

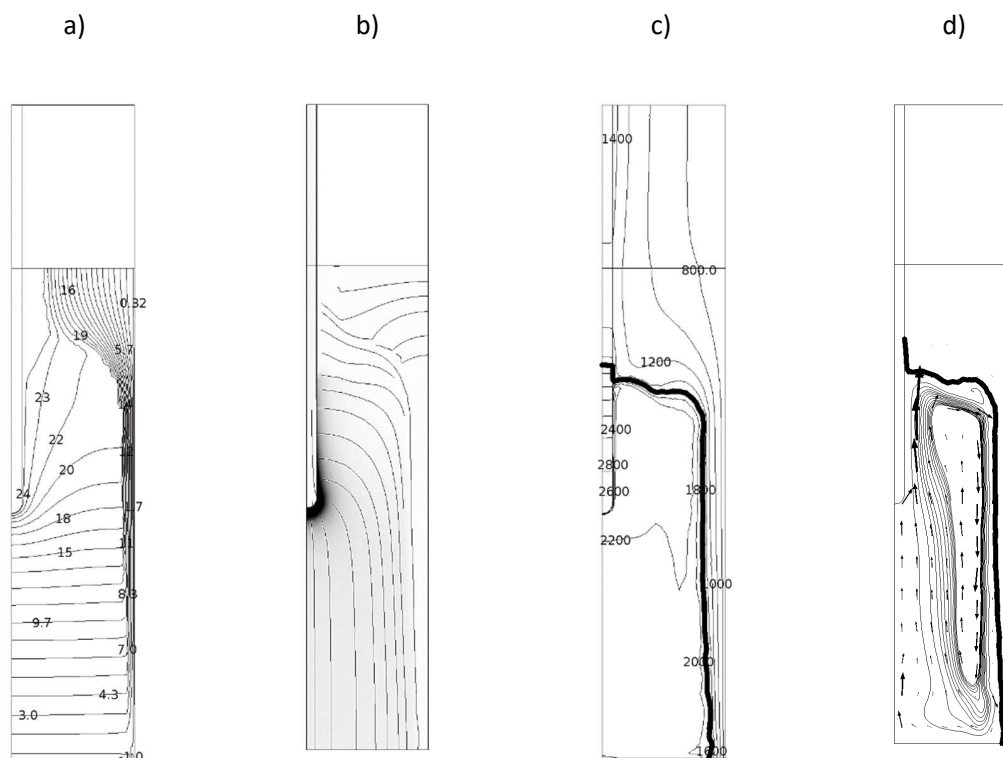


Fig. 3.3.  $U = 25$  V,  $t = 100$  s: a) sprieguma līnijas U, V; b) izkliedētās elektriskās jaudas blīvuma un elektriskās strāvas līniju sadalījums; c) temperatūras līnijas un fāzes maiņas fronte T, K; d) ātruma racionalizācijas un vektoru sadalījums T, [K]; d) plūsmas ātruma līnijas un vektori.

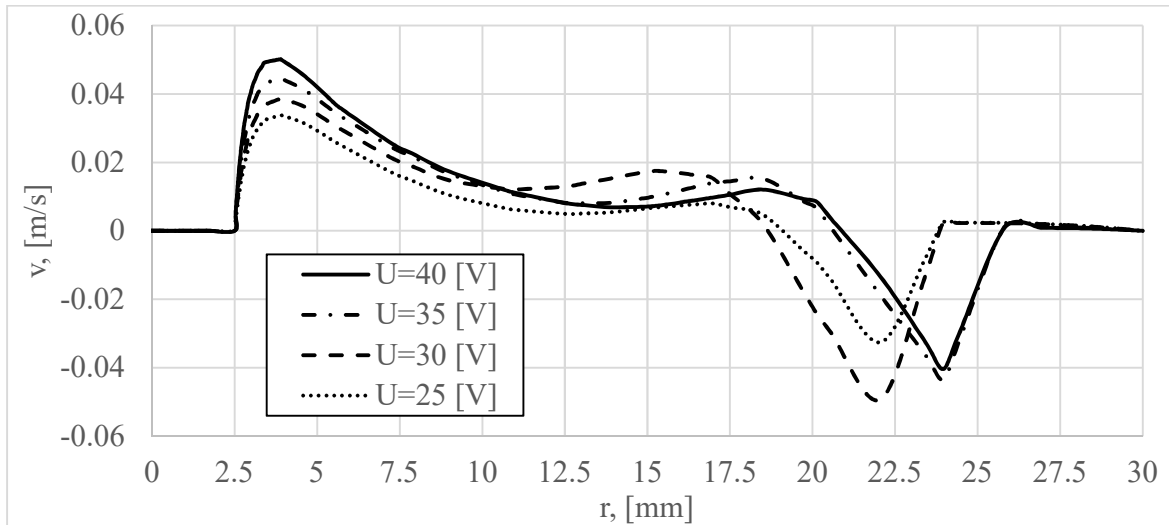


Fig. 3.4. Aksiālā ātruma sadalījums pa rādiusu 1 cm virs elektroda gala.

Fig. 4. ir parādīts sārņu plūsmas ātruma sadalījums pa reaktora rādiusu. Kā jau iepriekš tika minēts sakausējumā veidojas toroidāi virpuļi un to intensitāte ir atkarīga uz elektrodā pieliktā sprieguma. Teperatūras sadalījums kā funkcija no sprieguma ir parādīta fig.5. Redzams, ka temperatūra 2200 – 2500<sup>0</sup>K robežās var būt pieļaujama. Toties, gadījumā ja elektroda strāva ir 40V, temperatūra ir pārāk augsta un tā var novest pie sistēmas pārkaršanas. Lai izvairītos no šādas situācijas kā viens no iespējamajiem risinājumiem varētu būt elektroda diametra palielināšana.

Veiktie aprēķini rāda, ka elektroenerģijas jaudas optimis ir ap ~ 20 kW, kas atbilst spriegumam ~ 35 [V].

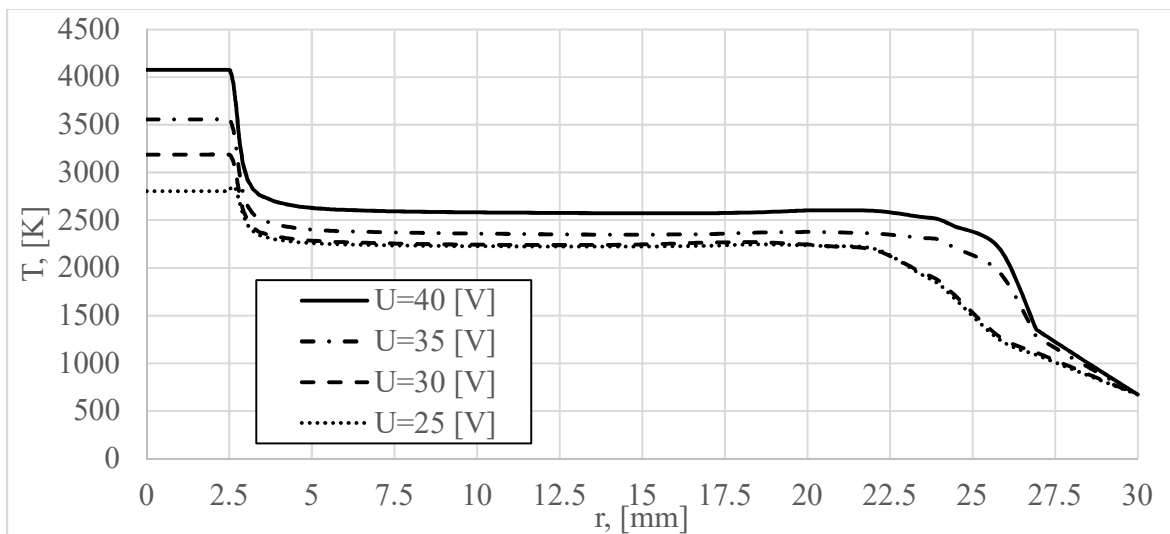


Fig. 3.5. Temperatūras sadalījums pa reaktora rādiusu 1 cm virs elektroda gala.

2. tabula: Aprēķinātie ierīces elektriskie un raksturīgie parametri

<b>U, [V]</b>	<b>I, [A]</b>	<b>P, [W]</b>	<b>d<sub>skull</sub>, [mm]</b>	<b>Sufficient power</b>
25	403.5	10088	~ 5	No
30	501.2	15036	~ 4	No
35	606.9	21241	~ 3.5	Yes
40	715.4	28614	~ 3	Overheating

Aprēķinu rezultātā izstrādāts multifizikālais elektrosārņu kausēšanas skaitliskais modelis, kas ļauj izvērtēt temperatūras atkarību no sārņu fizikālajām īpašībām, modelēt fāzu maiņu un cietu sārņu slāņa veidošanos uz dzesējamām reaktora sienām. Pētījums parādīja, ka ~ 20 kW elektriskā jauda ir nepieciešama, lai izvairītos no sārņu virskārtas pārkaršanas vai sacietēšanas, kas ir svarīgi kombinētajam Krola procesam. Pētījumā tika izziņāta arī nozīmīga poloidāla šķidro sārņu plūsma ar raksturīgo ātrumu:  $v = 0,02 \dots 0,03$  m/s reaktorā, kas nosaka siltuma pārnese procesu.