

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultāte
Vispārīgās ķīmijas tehnoloģijas institūts

Madars Reimanis

Doktora studiju programmas „Ķīmijas Tehnoloģija” doktorants

**ŪDENS ELEKTROĶĪMISKĀ DEZINFEKCIJA, IZMANTOJOT
TITĀNA OKSĪDA KERAMIKAS ELEKTRODUS**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. sc. ing., profesors
Jurijs OZOLIŅŠ

Rīga 2013

UDK 54
Re 331

Reimanis M. Ūdens elektroķīmiskā dezinfekcija, izmantojot
titāna oksīda keramikas elektrodus.

Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2013.- 31 lpp.

Iespiests saskaņā ar VĶT institūta 2013. gada 14. februāra
lēmumu, protokols Nr. 11-12/13



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

Promocijas darbs izstrādāts:



Rīgas Tehniskās universitātes Vispārīgās ķīmijas tehnoloģijas institūtā

ISBN 978-9934-507-25-0

**PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU ĶĪMIJAS TEHNOLOĢIJAS
DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI RĪGAS
TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013. g. plkst. .. Rīgas Tehniskās universitātes Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas fakultātē, Āzenes ielā 14/24, 272. auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr.habil.chem. Valdis Kaļķis
Latvijas Universitāte

Profesore, Dr. chem. Svetlana Čornaja
Rīgas Tehniskā universitāte

Vadošā pētniece, Dr. biol. Olga Mutere
Latvijas Universitāte

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Madars Reimanis.....(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts latviešu valodā, satur ievadu, literatūras apskatu (6 nodaļas), eksperimentālo daļu (6 nodaļas), rezultātus un to izvērtējumu (9 nodaļas), secinājumus, literatūras sarakstu, 75 attēlus, 13 tabulas, 6 pielikumus, kopā 124 lappuses. Literatūras sarakstā ir 135 nosaukumi.

PATEICĪBA

Izsaku pateicību promocijas darba zinātniskajam vadītājam profesoram, *dr. sc. ing.* Jurijam Ozoliņam par aktuālo tēmu, darba vadīšanu un vērtīgiem padomiem, sapratni, atbalstu un uzticību.

Liels paldies RTU Materiālzinātnes un lietišķās ķīmijas Vispārīgās ķīmijas tehnoloģijas institūta direktorei, profesorei, *dr. sc. ing.* Līgai Bērziņai-Cimdiņai par uzticēšanos, sapratni, atbalstu, infrastruktūras nodrošināšanu un doto iespēju strādāt un veikt nepieciešamos pētījumus.

Liels paldies visiem Vispārīgās ķīmijas tehnoloģijas institūta kolēģiem, kas mani ļoti atbalstīja disertācijas izstrādes laikā, un sniedza vērtīgus padomus un ieteikumus.

Vissirsnīgākais paldies manai ģimenei – sievai, meitiņai, vecākiem, brāļiem un māsām, un draugiem par nenovērtējamo atbalstu, iedvesmu un pacietību.

Madars Reimanis

SATURS

PROBLĒMAS BŪTĪBA UN AKTUALITĀTE	6
LITERATŪRAS APSKATA ĪSS SATURS.....	10
EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA.....	11
REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS.....	13
Titāna oksīda keramikas struktūra un fizikālās īpašības.....	13
Titāna oksīda keramikas elektrodu izgatavošanas tehnoloģijas izstrāde	14
Ūdens elektrolīze, izmantojot titāna oksīda keramikas elektrodus	15
Dzelzs jonu ietekme uz ūdens elektrolīzes procesu	16
Ūdens cietības ietekme uz elektrolīzes procesu	17
Ūdenī esošo anjonu ietekme uz elektrolīzes procesu.....	20
Elektrolīzes ietekme uz ūdens mikrobioloģisko piesārņojumu	20
Tehnoloģisko parametru ietekme uz ūdens apstrādi ar elektrolīzes procesu	24
dinamiskā režīmā	24
Matemātiskā modeļa izstrāde elektroķīmiskās dezinfekcijas efektivitātes prognozēšanai.....	26
Ūdens dezinfekcijas iekārtas principiālā shēma un tās tehniski-ekonomiskais izvērtējums	27
SECINĀJUMI.....	30
LITERATŪRAS SARAĶSTS.....	31

PROBLĒMAS BŪTĪBA UN AKTUALITĀTE

Tēmas aktualitāti nosaka nepieciešamība dezinficēt dzeramo ūdeni, lai ierobežotu mikroorganismu vairošanos ūdensapgādes inženiersistēmās un novērstu iespēju cilvēkiem inficēties, kas izraisa būtiskus ekonomiskus zaudējumus un pasliktina sabiedrības veselību un darbaspējas.

Šī problēma attīstītajās valstīs ir aktuāla galvenokārt individuālo aku un lokālo ūdensapgādes sistēmu lietotājiem. Epidemioloģiskie pētījumi liecina, ka saslimstību skaits, lietojot uzturā nekvalitatīvu dzeramo ūdeni no individuālajām akām, ir vairākas reizes lielāks, nekā lietojot ūdeni no centralizētām ūdens apgādes sistēmām.

Ūdens dezinficēšanas nepieciešamība var rasties arī dabas katastrofu, tai skaitā, plūdu laikā, pastāvot terorisma draudiem, militāru konfliktu laikā, kā arī specifisku sadzīves apstākļu dēļ.

Liela daļa Latvijas iedzīvotāju dzeramo ūdeni ņem no individuālajām akām, un centralizētās ūdensapgādes pakalpojumi tiem nav pieejami.

Uzlabojot dzeramā ūdens mikrobioloģisko kvalitāti iedzīvotājiem ar decentralizētiem ūdensapgādes pakalpojumiem, tiks būtiski samazināta šo iedzīvotāju saslimstība sliktas ūdens kvalitātes dēļ.

Promocijas darba mērķis: izmantojot titāna oksīda (TiO_{2-x}) keramikas elektrodus, izstrādāt efektīvu bezreaģentu ūdens elektroķīmiskās dezinfekcijas metodi, kas ir pielietojama lokālās ūdens ņemšanas vietās, ārkārtas situācijās, un ūdens sagatavošanai speciālām vajadzībām.

Promocijas darba izstrādei un izvirzītā mērķa sasniegšanai ir uzdoti šādi uzdevumi:

- 1) analizēt zinātniskās literatūras datus par promocijas darba tematiku;
- 2) noteikt galvenās fizikālās, ķīmiskās un elektroķīmiskās īpašības elektrovadošai TiO_{2-x} keramikai. Izvērtēt no šī materiāla izgatavotu elektrodu piemērotību ūdens dezinfekcijai ar elektrolīzes metodi;
- 3) noskaidrot dažādu ūdenī izšķīdušo vielu jonu ietekmi uz ūdens elektrolīzes procesu;
- 4) noteikt ūdens elektrolīzes ietekmi uz dažādiem ūdenī sastopamiem mikroorganismiem;
- 5) noteikt tehnoloģisko parametru ietekmi uz ūdens elektrolīzes efektivitāti;
- 6) pamatojoties uz veikto eksperimentu bāzes, izveidot ūdens elektrolīzes procesu aprakstošu matemātisko modeli;
- 7) izstrādāt nepārtrauktas darbības ūdens dezinfekcijas iekārtas principiālo shēmu.

Darba zinātniskā un praktiskā nozīme:

- 1) konstatēts, ka izmantojot TiO_{2-x} elektrodus, jau nelielas hlorīda jonu koncentrācijas (7 – 9 mg/L) ūdenī elektrolīzes procesā var nodrošināt pietiekami augstu ūdens dezinfekcijas efektivitāti ar paliekošu iedarbību;
- 2) pētīta dažādu tehnoloģisko faktoru ietekme uz elektrolīzes procesu un paliekošo dezinficējošo efektu, izmantojot TiO_{2-x} keramikas elektrodus. Pamatojoties uz eksperimentu rezultātiem, izstrādāts matemātiskais modelis, kas ļauj prognozēt dezinfekcijas efektivitāti;
- 3) pamatojoties uz eksperimentālajiem datiem, izstrādāta nepārtrauktas darbības ūdens dezinfekcijas iekārtas principiālā shēma;
- 4) darba rezultāti ir izmantojami par pamatu komerciālu ūdens dezinfekcijas iekārtu projektēšanā un izgatavošanā.

Darba zinātniskā novitāte – Pirmo reizi tika iegūti dziļā vakuumā pie augstām temperatūrām aktivizētas TiO_{2-x} keramikas elektrodi. Pētījuma rezultāti dod iespēju noskaidrot, kā titāna oksīda keramikas elektrodi elektrolīzes procesā jau pie nelielām hlorīdu jonu koncentrācijām neietekmē ūdens kvalitāti un var nodrošināt pilnīgu galveno ūdens mikrobioloģiskā piesārņojuma indikatororganismu inaktivēšanu. Izstrādāts matemātiskais modelis, kas ļauj vadīt ūdens dezinfekcijas procesu.

Aizstāvamās tēzes:

- 1) vakuumā aktivētu TiO_{2-x} keramiku kā elektrodu materiālu var izmantot ūdens elektrolīzes iekārtās;
- 2) izmantojot TiO_{2-x} keramikas elektrodus ūdens, kurā ir nelielas hlorīda jonu koncentrācijas (7 – 9 mg/L), apstrādei, ar elektrolīzi var nodrošināt pilnīgu galveno ūdens mikrobioloģiskā piesārņojuma indikatororganismu inaktivēšanu.

Darba aprobācija

Promocijas darba galvenie zinātniskie sasniegumi un rezultāti ir prezentēti 20 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs.

Par promocijas darba tematu ir publicēti 11 pilna teksta drukāti darbi un 12 zinātniskās konferenču tēzes.

Galvenie pētījumu rezultāti atspoguļoti 11 publikācijās un pilna teksta konferenču tēžu krājumos

1. Rubenis K., Ozolins J., Pura A., Locs J., **Reimanis M.**, Narkevica I., Berzina-Cimdina L. The influence of the thermal treatment on the properties of TiO_2 ceramics obtained by extrusion. RTU zinātniskie raksti, Materiālzinātne un lietišķā ķīmija, 25. sējums, 2012, p.p. 71-75.
2. **Reimanis M.**, Ozoliņš J., Mālers J., Ēce L. Cietības ietekme uz ūdens elektrolīzi izmantojot titāna oksīda keramikas elektrodus. RTU zinātniskie raksti, Materiālzinātne un lietišķā ķīmija, 25. sējums, 2012, p.p. 66-70.
3. **Reimanis M.**, Ozolins J., Malers J., Locs J. and Juhna T. Water disinfection using $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ electrodes. 2011 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications. International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering, 2011, 17, p.p. 265-270, IACSIT Press, Singapore.
4. **Reimanis M.**, Malers J., Ozolins J. $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ saturoša keramikas elektroda izmantošana ūdens elektroķīmiskajā apstrādē. Latvijas ķīmijas žurnāls, 2010, 3, p.p. 254.-260.
5. **Reimanis M.**, Mezule L., Malers J., Ozolins J., Juhna T. Model water disinfection with electrolysis using $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ containing ceramic electrodes. Environmental Biotechnology, 2011, 7 (1), p.p. 34-40.
6. **Reimanis M.**, Malers J., Ozolins J. Preparation of water using electrochemical proceses. International Journal of Chemical and Environmental Engineering, World Academy of research and publication Press, 2010, 1 (1) p.p. 35-39.
7. **Reimanis M.**, Ozolins J., Malers J., Nikolajeva V. Influence of various physical - chemical treatment methods on microbial growth in water. In: 7th International Conference "Environment. Technology. Resources", Conference. Rezekne, Latvija, June 25-27, 2009. Proceeding. Rezekne, Rezekne Higher Education Institution Press, 2, 2009, 71-77.
8. Mezule L., **Reimanis M.**, Malers J., Ozolins J., Juhna T. Application of electrolysis with $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ ceramic electrodes for disinfection of drinking water. The Scientific Proceedings of Riga Technical University, Material science and applied chemistry, 2009, 20, p.p. 123-131.

9. **Reimanis M.**, Ozoliņš J., Mālers J. Ūdens bioloģiskā piesārņojuma samazināšana pielietojot elektrolīzes procesā TiOx saturošu keramikas elektrodus. RTU zinātniskie raksti, Materiālzinātne un lietišķā ķīmija, 18. sējums, 2008, p.p. 90.-96.
10. **Reimanis M.**, Mezule L., Malers J., Berzina-Cimdina L., Juhna T., Ozolins J. Preperation of water with electrolysis method using ceramic electrodes. In: IWA Specialist Conference "Water and Wastewater Treatment Plants in Towns and Communities of the XXI Century: Technologies, Design and Operation". Conference. Moscow, Russia, June 2-4, 2010. Proceeding [electronic resource]. Moscow, SIBICO International Ltd., 2010, p.p. 1-8.
11. **Reimanis M.**, Malers J., Ozolins J. Water preparation using electrochemical process. Conference on Emerging Technologies in Environmental Science and Engineering, [electronic resource], 2009, October, India, Aligarh: Department of Civil Engineering, A.M.U., 2009, p.p. 207.-214.

Galvenie pētījumu rezultāti atspoguļoti 12 starptautiskās konferenču tēzēs

1. **Reimanis M.**, Mezule L., Ozolins J., Malers J., Juhna T. Drinking water disinfection with electrolysis methods. International conference "ECOBALT 2012": Book of Abstracts, Unversity of Latvia, Riga, Latvia, October 18-19, 2012, p.p. 67.
2. **Reimanis M.**, Ozolins J., Vindedze-Jonisenoka E., Sirsnina S., Malers J. The impact of individual technological parameters on the water electrolysis process. Riga Technical University 53rd International Scientific Conference dedicated to the 150th anniversary and The 1st Congress of World Engineers and Riga Polytechnical Institute / RTU Alumni : Book of Abstracts, Riga, Latvija, October 11-12, RTU Publishing House, 2012, p.p. 82.
3. **Reimanis M.**, Ozoliņš J., Mālers J., Ēce L. The effect of water hardness on the water electrolysis process using Ti_nO_{2n-1} ceramic electrodes. The 52th International Scientific Conference of Riga Technical University: Book of Abstracts, Latvija, Rīga, 13-15 October, 2011, p.p. 101.
4. **Reimanis M.**, Malers J., Ozolins J. Water preparation using Ti_nO_{2n-1} electrodes. EMEC 11 - The 11th European Meeting on Environmental Chemistry PORTOROŽ, Slovenia, 8-11 december 2010, p.p. 98.
5. **Reimanis M.**, Pavlova A., Locs J., Freimanis I., Berzina-Cimdina L., Ozolins J. Dense titanium oxide ceramics for water preparation with electrolysis. In: XIX-th International Baltic Conference "Materials Enigineering&Balttrib *2010". Conference. Riga, Latvia, October 28-29, 2010. Proceeding, Riga, Latvia, Institute of Inorganic Chemistry, 2010, p.p. 36.
6. **Reimanis M.**, Malers J., Ozolins J. Water preparation using Ti_nO_{2n-1} electrodes. In: XIX-th International Baltic Conference "Materials Enigineering&Balttrib *2010". Conference. Riga, Latvia, October 28-29, 2010. Proceeding, Riga, Latvia, Institute of Inorganic Chemistry, 2010, p.p. 18.
7. **Reimanis M.**, Pavlova A., Malers J., Berzina-Cimdina L., Ozolins J. Electrical conductive Ti_nO_{2n-1} ceramic extraction and use for water treatment with electrolysis. ELECTROCERAMICS XII, abstract book [electronic resource], Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway 13th June - 16th June 2010, p.p. 151.

8. **Reimanis M.**, Mezule L, Malers J, Berzina-Cimdina L, Juhna T, Ozolins J. Preparation of water with electrolysis method using ceramic electrodes. IWA Specialist Conference “Water and Wastewater Treatment Plants in Towns and Communities of the XXI Century: Technologies, Design and Operation”, abstract book [electronic resource], Moscow, Russia on 2-4 June 2010, p.p. 1-2.
9. **Reimanis M.**, Malers J., Ozolins J. Water preparation using electrochemical process. International Conference on Emerging Technologies in Environmental Science and Engineering, 2009, October, India, Aligarh: Department of Civil Engineering, A.M.U., 2009, p.p. 63.-64.
10. Reimanis M., Mezule L., Malers J., Ozolins J., Juhna T. Water disinfection with electrolysis using $\text{Ti}_n\text{O}_{2n-1}$ containing ceramic electrodes. Second International Environmental Best Practices Conference and AGFES Educational Workshop, 2009, September, Poland, Krakow: abstract book, September 2009, p.p. 26.
11. Pavlova A., **Reimanis M.**, Berzina-Cimdina L., Ozolins J., Barloti T., Teters V. Fabrication of a conductive ceramic and its use in water treatment technology. International Baltic Sea Region conference „Functional materials and nanotechnologies”, 2009, march – April, abstract book, Latvia, Riga: Institute of Solid State Physics University of Latvia, 2009, p.p. 196.
12. **Reimanis M.**, Berzina-Cimdina L., Ozolins J., Malers J. Influence of electrolysis process on propagation of microorganisms in water. 49th Annual Conference International symposium on Microbial biotechnology: diversity, genomics and metagenomics, 2008, November, India, Delhi: Association of Microbiologists of India, 2008, p.p. 138-139.

LITERATŪRAS APSKATA ĪSS SATURS

Pirmajā nodaļā „Ūdens kvalitāte un galvenie faktori, kas to ietekmē” ir vispārīgi raksturota ūdens kvalitāte un apskatīti galvenie to ietekmējošie faktori. Apskatīta pamatinformācija par bakterioloģisko piesārņojumu ūdenī [1, 2].

Otrajā nodaļā „Ūdens piesārņojums un tā veidošanās” aprakstīts ūdens piesārņojuma raksturojums un piesārņojuma veidošanās mehānismi. Šajā nodaļā uzskaitīti un sīkāk analizēti dažādi piesārņojuma veidi.

Trešajā nodaļā „Mikrobioloģiskais piesārņojums” sīkāk apskatīts ūdens mikrobioloģiskais piesārņojums, ko rada patogēnās baktērijas. Šīs baktērijas ūdens apgādes sistēmās atrodas bioplēvē, kas tās pasargā no dezinfekcijas iedarbības. Problēma ir aktuāla individuālajās akās un lokālajās ūdens apgādes sistēmās [3]. Lai noteiktu mikrobioloģisko piesārņojumu ūdenī, izmanto indikatormikroorganismus [4].

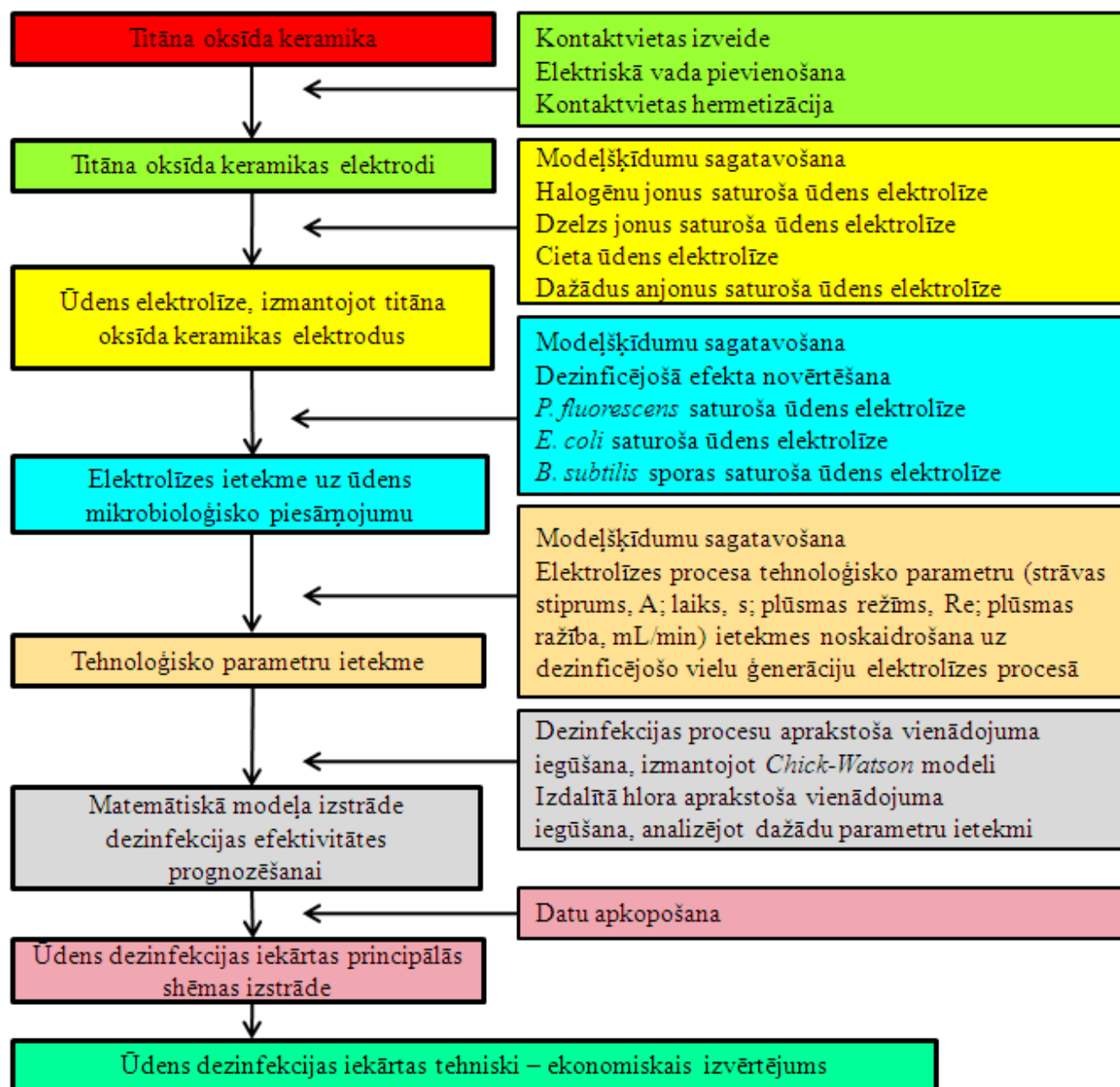
Ceturtajā nodaļā „Ūdens attīrīšanas un dezinfekcijas metodes” aplūkotas un salīdzinātas populārākās ūdens attīrīšanas un dezinfekcijas metodes, kas iedalās ķīmiskajās (ūdens hlorēšana, ozonēšana) un fizikālajās (apstrāde ar ultraskaņu, ultrafiltrācija, ultravioletā apstarošana un elektrolīze).

Piektajā nodaļā „Titāna oksīda keramika elektrodu materiāla izgatavošanai” apskatītas titāna dioksīda vispārīgās īpašības, titāna oksīda keramika un tās elektriskās īpašības.

Pamatojoties uz literatūras apskata analīzi, secināts, ka titāna oksīds ir pietiekami efektīvs materiāls elektrodu izgatavošanai, un šī materiāla elektrodi ir izmantojami ūdens elektroķīmiskai dezinfekcijai elektrolīzes ceļā.

EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

Darba gaitas shematisks attēlojums

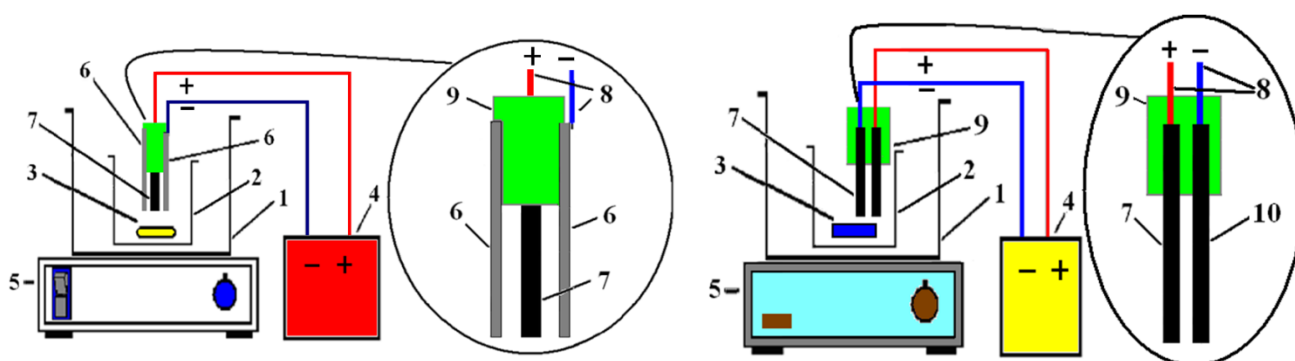


Veiktās analīzes un pētīšanas metodes

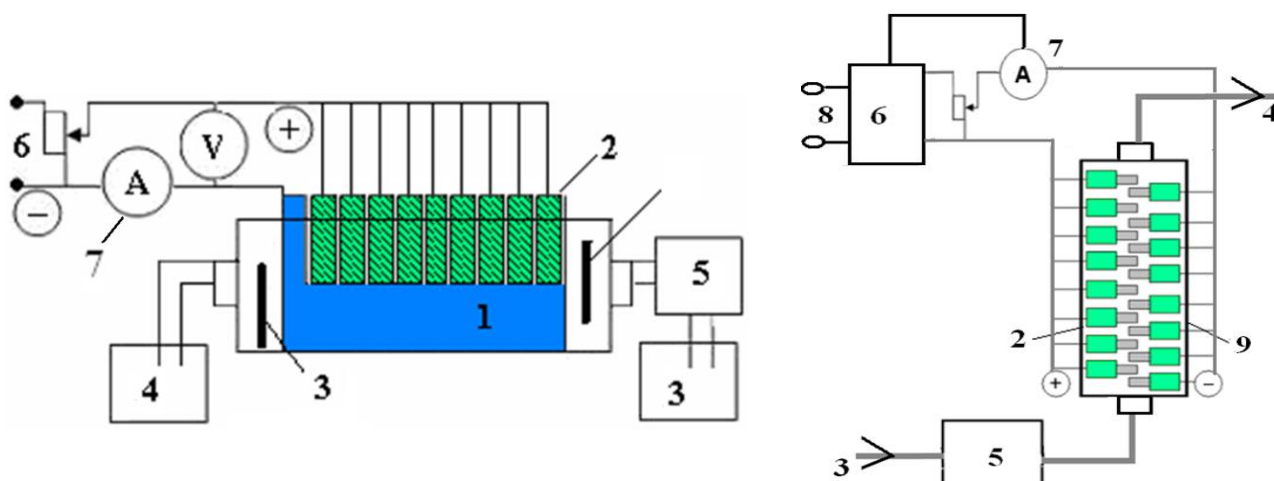
1. Mikrofotogrāfiju uzņemšana ar stereomikroskopu *Leica MZ16 A*.
2. Mikrofotogrāfiju uzņemšana ar skenējošo elektronu mikroskopu (SEM) *MIRA/TESCAN*.
3. Elektrodu potenciālu noteikšana un voltamperogrammu uzņemšana ar radiometra „*VoltaLab*” PGZ 301 palīdzību.
4. Uzņemto voltamperogrammu līkņu apstrāde ar programmatūru *Radiometer Analytical SAS, VolaMaster*, version 5.6.0.
5. Parauga kristālisko fāžu analīze ar rentgenstaru difraktometru (XRD) *Pananalytical X'pert PRO* ar Cu katodlampas starojumu 2θ diapazonā no 10° līdz 70° .
6. Elementārsastāva analīze ar elektronu mikroskopu (SEM) *MIRA/TESCAN*.
7. Kalcija un magnija satura noteikšana pēc standarta LVS ISO 6059:1984.

8. Dzelzs satura noteikšana pēc standarta LVS ISO 6332:2000.
9. Permanganāta indeksa noteikšana pēc standarta LVS EN ISO 8467:2000 L/A.
10. Hlora noteikšana pēc standartiem LVS EN ISO 7393-3:2000 un LVS EN ISO 7393-1:2001.
11. Sārmainības noteikšana pēc standarta LVS EN ISO 9963-1995.
12. Eksperimentālo datu apstrāde un matemātisko sakarību iegūšana, izmantojot programmu *Systat Software Inc. TableCurve 3D*, versiju 4.0.
13. Kolonijas veidoespējīgo baktēriju skaita noteikšana.
14. Metaboliski aktīvo – elpojošo baktēriju skaita noteikšana ar iekrāsošanu un *FISH*.
15. Šūnu spēju dalīties noteica ar modificēto *DVC* metodi un *FISH*.
16. Šūnu pētījumus veica ar epifluorescences mikroskopu *Leica DM, LB*.
17. Mikroorganismu attēlus epifluorescences mikroskopā ieguva ar kameru *CoolSNAP Pro*, *Media Cybernetics*.
18. Iegūtos mikroorganismu attēlus apstrādāja ar *Image Pro Plus v. 4.5.1*. datorprogrammatūru.

Izveidotās iekārtas ūdens apstrādei ar elektrolīzi



1. att. Eksperimentālas elektrolīzes iekārtas shēma statiskā režīmā: 1 – termostats, 2 – elektrolīzes šūna, 3 – magnēts, 4 – līdzstrāvas avots ar kontrolējamu spriegumu un strāvas stiprumu, 5 – magnētiskais maisītājs, 6 – augsti leģēts nerūsējošā tērauda katods (AISI 304), 7 – TiO_{2-x} saturošas keramikas anods, 8 – elektrības vadi, 9 – epoksīda sveķi, 10 – TiO_{2-x} saturošas keramikas katods

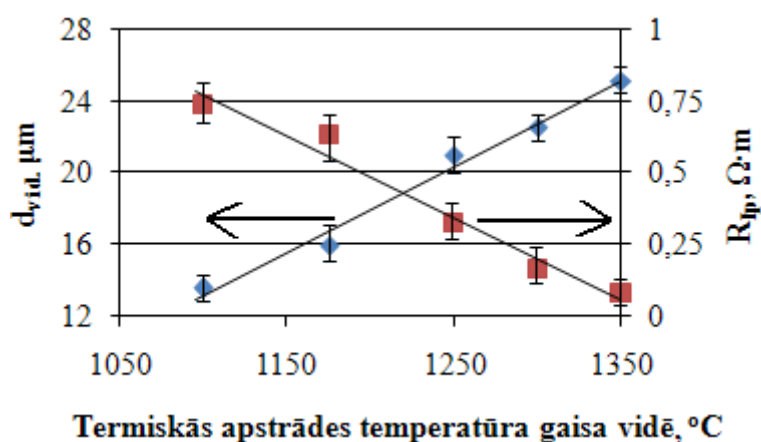


2. att. Eksperimentālas elektrolīzes iekārtu shēmas dinamiskajā režīmā: 1 – nerūsējošā tērauda katods, 2 – TiO_{2-x} saturošas keramikas elektrodi, 3 – pētāmais šķīdums, 4 – apstrādātais šķīdums, 5 – sūkņi, 6 – līdzstrāvas avots, 7 – ampērmetrs, 8 – tīkla spriegums, 9 – organiskā stikla korpusa

REZULTĀTI UN TO IZVĒRTĒJUMS

Titāna oksīda keramikas struktūra un fizikālās īpašības

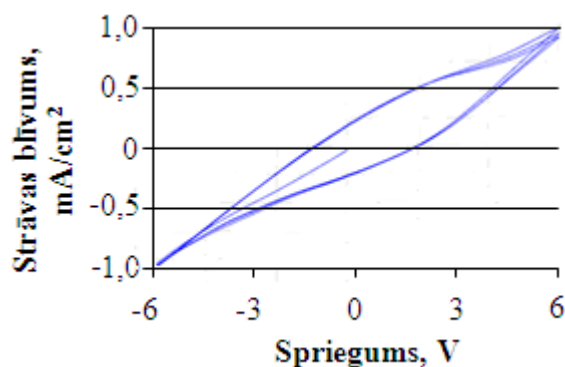
Paraugu termiskā apstrāde dziļā vakuuma apstākļos izsauc krasu īpatnējās elektriskās pretestības vērtību samazināšanos (3. att.). Pretestības samazināšanās var tikt saistīta ar skābekļa vakanču veidošanos un elektronu atbrīvošanos TiO_2 kristālrežģī [5]. Skābekļa vakanču veidošanās augsta vakuuma apstākļos, līdzīgi kā TiO_2 termiskā apstrāde reducējošā vidē, būtiski palielina tā elektrovadītspēju [6]. Ir novērojama zināma sakarība starp materiālu raksturojošajiem parametriem un tā elektrisko pretestību. Līdz ar keramisko paraugu blīvuma palielināšanos, pieaugot termiskās apstrādes temperatūrai un graudu vidējam diametram, samazinās paraugu īpatnējā elektriskā pretestība: vidēji no $0,76 \Omega \cdot \text{m}$ paraugam, kurš gaisa vidē pirms termiskās apstrādes augsta vakuuma apstākļos termiski apstrādāts 1100°C temperatūrā, līdz $0,1 \Omega \cdot \text{m}$ paraugam, kurš gaisa vidē pirms termiskās apstrādes augsta vakuuma apstākļos termiski apstrādāts 1350°C temperatūrā.



3. att. Vidējais graudu diametrs, $\diamond$ – d_{vid} , un paraugu īpatnējā elektriskā pretestība $\blacksquare$ – R_{ip} , atkarībā no termiskās apstrādes temperatūras gaisa vidē un sekojošas termiskās apstrādes dziļā vakuuma apstākļos 1075°C temperatūrā

Kā noskaidrojām, keramisko paraugu termiskā apstrāde dziļā vakuuma apstākļos izraisa keramikas elektriskās pretestības samazināšanos, kas ļauj iegūto titāna oksīda keramiku izmantot kā elektrodu materiālu elektrolīzes iekārtās.

Eksperimentāli tika uzņemtas voltamperogrammas TiO_{2-x} elektrodiem $1 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ un 1 mmol/L KCl šķīdumos, palielinot spriegumu par 100 mV/s (4. att.).



4. att. TiO_{2-x} elektroda voltamperogramma $1 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ šķīdumā, spriegumu palielinot par 100 mV/s

TiO_{2-x} elektrodiem uzņemtais voltamperogrammās novērojamas histerezes cilpu veidošanās, pie tam, nākošie histerēzes cikli sakrīt ar iepriekšējiem, kas izskaidrojami ar TiO_{2-x} elektrodu virsmas nelielu oksidāciju, kas ir atgriezeniska, un to, ka uz elektroda virsmas neveidojas paliekoša oksīda kārtā.

Līdzīgas voltamperogrammas tika iegūtas paraugiem gan 1 mol/L H₂SO₄, gan 1 mmol/L KCl šķīdumos.

Lai veiktu elektrodu materiālu salīdzinājumu, nepieciešams novērtēt to hlora izdalīšanas efektivitāti elektrolīzes procesā, izslēdzot iekārtas konstrukcijas ietekmi. Salīdzināšanai izmanto parametru, kas izsaka, cik mg Cl₂ veidojas no vienu ampērstundu liela lādiņa (mg Cl₂/A·h), kas izplūst caur anoda elektrodu. Elektrodu materiāla efektivitāte var mainīties atkarībā no hlorīda jonu koncentrācijas pētāmajā šķīdumā, sasniedzot lielākas vērtības pie lielākām hlorīda jonu koncentrācijas vērtībām. TiO_{2-x} keramikas elektrodiem hlora izdalīšanas efektivitāti pēc caurplūstošā lādiņa noteica pie dažādām hlorīda jonu koncentrācijām, kas atļautas dzeramajā ūdenī.

Salīdzinot eksperimentāli iegūtos hlora iznākumus ar literatūrā minētajiem [7], tika konstatēts, ka uz TiO_{2-x} keramikas anoda var veidoties elektroķīmiski ģenerētais hlors, kura iznākums ir salīdzināms ar literatūrā atzītiem par ļoti labiem iznākumiem uz IrO₂ un IrO₂/RuO₂ elektroda materiāliem [7] (skat. 1. tabulu).

1. tabula

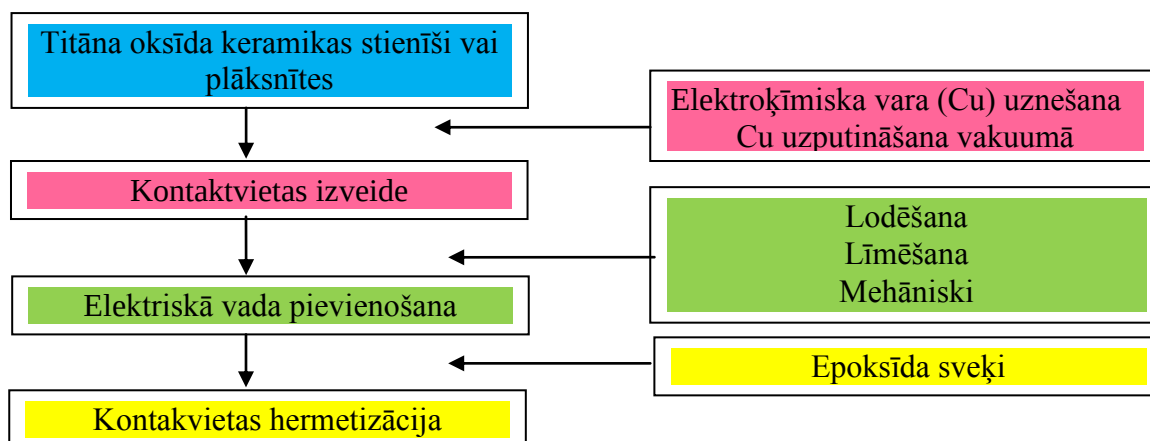
Aktīvā hlora izdalīšanās iznākums uz vienu A·h					
Cl ⁻ , mg/L	mg Cl ₂ /Ah				
	Pt*	BDD*	IrO ₂ *	IrO ₂ /RuO ₂ *	TiO _{2-x}
0	0	0	0	0	0
20	0,5	1	20	24	20
60	1	3	50	64	50
120	5	12	102	87	82
180	12	15	126	100	94

Krafts [7] pētījumos konstatējis, ka IrO₂ un IrO₂/RuO₂ izdala hloru vairāk nekā 10 reizes labāk, nekā Pt un BDD elektrodi, un ir perspektīvi elektrodu materiāli hlora elektroķīmiskai ģenerēšanai no ūdens. Mēs eksperimentāli konstatējām, ka TiO_{2-x} keramikas elektrodi elektrolīzes procesā pie mazām hlorīda jonu koncentrācijām (mazākām par 60 mg/L) izdala elektroķīmiski ģenerēto hloru tādā pašā apjomā, kā IrO₂/RuO₂ elektrods, un tikai nedaudz atpaliek no IrO₂ elektroda. Tā kā TiO_{2-x} keramikas elektrodu izgatavošanā izmantotā TiO₂ anatāza pulvera izmaksas ir daudz mazākas par IrO₂ elektroda izgatavošanā izmantotā materiāla izmaksām, var uzskatīt, ka TiO_{2-x} keramika ir perspektīva elektrodu izgatavošanai un ūdens dezinfekcijas procesu realizācijai ar elektrolīzes metodi.

Titāna oksīda keramikas elektrodu izgatavošanas tehnoloģijas izstrāde

Lai izmantotu titāna oksīda keramiku kā elektrodu, pie tās ir jāpievieno strāvu labi vadošs materiāls, kas parasti prasa papildus pētījumus, jo savienojumu nav iespējams iegūt tiešas lodēšanas ceļā, un arī mehāniska saspiešana ne vienmēr garantē labu kontaktu.

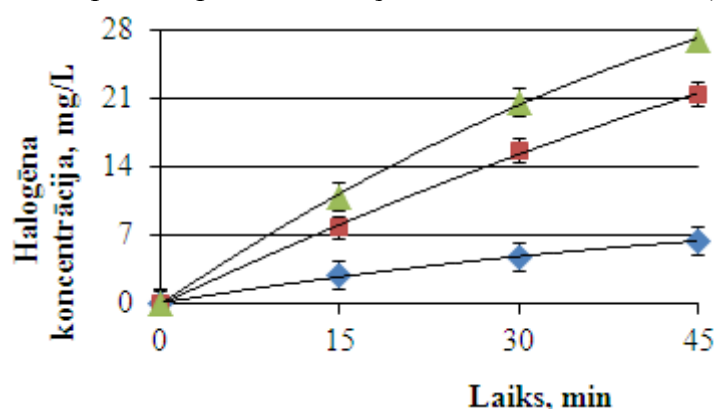
Elektrodu izgatavoja no ekstrudētajiem un vakuumā termiski apstrādātiem titāna oksīda stienīšiem, tiem vienā galā pievienojot un nohermetizējot elektrības vadu atbilstoši shēmai (sk. 5. att.).



5. att. Elektrodu izgatavošanas shēma: a – titāna oksīda stienīšiem tiek uzests varš, uzputinot vakuumā vai elektrolīzes ceļā; b – ar varu pārklātajiem stienīšiem vadu pielīmē, pielodē vai mehāniski pieskrūvē; c – kontakta vietu izolē

Ūdens elektrolīze, izmantojot titāna oksīda keramikas elektrodus

Lai noskaidrotu dažādu halogēnu jonu ietekmi uz elektrolīzes procesu, tika elektrolizēti dažādus halogēnu jonus (Cl^- , Br^- , I^-) saturoši modeļšķīdumi (6. att.). Jonu sākotnējā koncentrācija bija 1 mmol/L pie vienādiem procesa parametriem ($j = 8,1 \text{ mA/cm}^2$, $t^\circ = 25^\circ \text{C}$), intensīvi maisot.



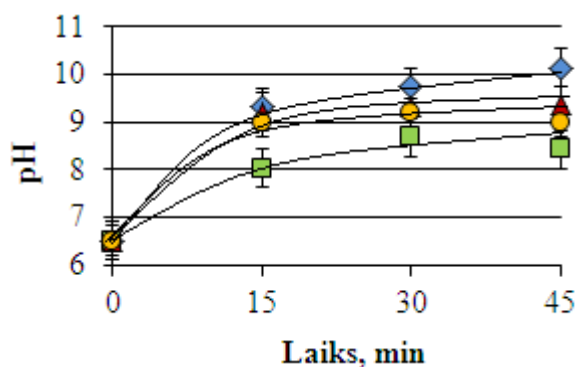
6. att. Izdalītā kopējā halogēna daudzuma izmaiņas atkarībā no elektrolīzes laika dažādu halogēnu jonus saturošiem šķīdumiem: $\blacklozenge$ – Cl^- ; $\blacksquare$ – Br^- ; $\blacktriangle$ – I^- . Halogēnu jonu sākotnējā koncentrācija 1 mmol/L

Kā izriet no 6. att. rezultātiem, izdalītā halogēna daudzums pieaug, palielinoties elektrolīzes laikam.

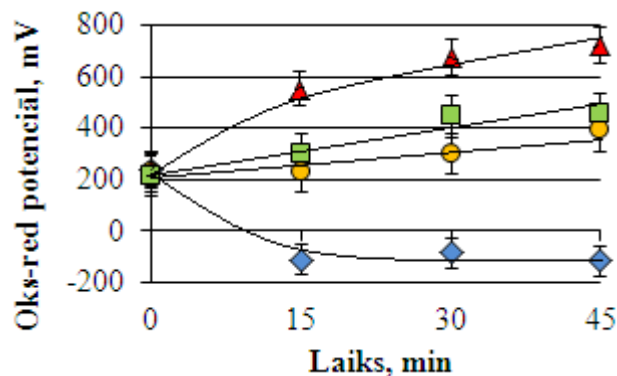
Lai varētu salīdzināt iegūtos rezultātus halogēnu jonu gadījumā ar rezultātiem, kas iegūti, ja šķīdumā atrodas joni, kas ir inerti elektrolīzes procesā, tika izvēlēts sulfātions (iešķīdinot K_2SO_4)

Pētamajiem šķīdumiem elektrolīzes laikā strauji pieaug pH, sasniedzot pH vērtības no 8 līdz 9,5 pirmajās 15 procesa minūtēs, ko varētu pamatot ar intensīvu H_2 izdalīšanos elektrolīzes laikā (7. att.). Šķīduma oksidēšanās-reducēšanās potenciālam arī ir tendence pieaugt. Elektrolīzes laikā, izdaloties no šķīdumiem attiecīgajam halogēnam (Cl_2 , Br_2 , I_2) novērojama šķīduma oksidēšanās-reducēšanās potenciāla palielināšanās (8. att.), kas var pārsniegt 700 mV. Oksidēšanās-reducēšanās potenciāla pieaugumu var izskaidrot ar halogēna jona oksidēšanos līdz brīvam halogēnam. Jāatzīmē, ka neapstrādātam dzeramajam ūdenim raksturīgā vidējā oksidēšanās reducēšanās potenciāla vērtība ir 200-300 mV. Straujāks oksidēšanās reducēšanās potenciāla vērtību pieaugums novērojams Br^- jonus saturoša šķīduma gadījumā. Pretējs efekts novērojams šķīdumiem, kas satur SO_4^{2-} jonus,

oksidēšanās-reducēšanās potenciāla vērtības samazinās un sasniedz gandrīz -200 mV. Veicot elektrolīzi šķīdumam, kas satur Cl^- jonus, novērojams pietiekami vienmērīgs oksidēšanās reducēšanās potenciāla vērtību pieaugums atkarībā no elektrolīzes laika. Noskaidrojot sakarību starp oksidēšanās reducēšanās potenciāla vērtību izmaiņu un elektrolīzes laikā izdalītā halogēna, tai skaitā Cl_2 , daudzumu, oksidēšanās-reducēšanās potenciāls var tikt izmantots procesa kontrolei un vadībai.



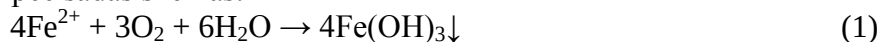
7. att. Šķīduma pH izmaiņas elektrolīzes procesa laikā. Šķīdums satur jonus: ♦ – SO_4^{2-} ; ■ – Cl^- ; ▲ – Br^- ; ● – I^- . Sākuma koncentrācija 1 mmol/L, strāvas stiprums 0,1 A



8. att. Šķīduma oksidēšanās-reducēšanās (oks-red) potenciāla izmaiņas elektrolīzes laikā. Šķīdums satur anjonus: ♦ – SO_4^{2-} ; ■ – Cl^- ; ▲ – Br^- ; ● – I^- . Sākuma koncentrācija 1 mmol/L, strāvas stiprums 0,1 A

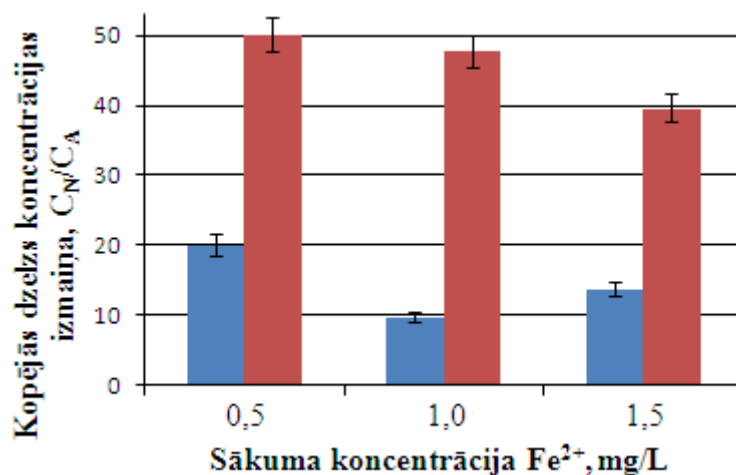
Dzelzs jonu ietekme uz ūdens elektrolīzes procesu

Ūdenī dzelzs joni oksidējoties var patērēt elektroķīmiski ģenerēto hloru un skābekli [8], kas galvenokārt pamatojas uz Fe^{2+} oksidēšanos oksidētāja klātbūtnē un radušos nešķīstošo Fe^{3+} savienojumu veidošanos ūdenī pēc šādas shēmas:



Fe^{2+} jonu oksidēšanos varētu intensificēt ūdens elektrolīze. Ūdenī esošie divvērtīgie joni varētu reaģēt ar elektrolīzes procesā ģenerēto hloru un samazināt izdalītā hlora daudzumu. Skābeklis, kas izdalās pie anoda ūdens elektrolīzes procesā, var darboties pēc līdzīga mehānisma, kā minēts iepriekš (skat. 1. vienādojumu). Veicot šķīduma, kas satur 35 mg/L hlorīda jonu un 0,5 mg/L Fe^{2+} jonus, elektrolīzi, netika novērota jūtama dzelzs jonu ietekme uz izdalītā hlora daudzumu. Taču tika konstatēts, ka šķīduma elektrolīze ar tai sekojošu filtrāciju caur kvarca smiltīm būtiski samazina kopējo dzelzs jonu daudzumu pētāmajos šķīdumu paraugos 9. att.), un var tikt izmantota ūdens atdzelzošanai.

Kā redzams no 9. att., filtrēšana caur kvarca smiltīm samazina dzelzs jonu daudzumu līdz 20 reizēm, bet šķīduma elektrolīze ar tai sekojošu filtrēšanu caur kvarca smilšu slānim kopējo dzelzs jonu koncentrāciju samazina 40–50 reizes. Tas izskaidrojams ar elektrolīzes procesā notiekošo ūdens piesātināšanos ar skābekli, no kura tikai daļa tiek izmantota uzreiz dzelzs jonu oksidācijā. Pēc tam, šķīdumam filtrējoties caur smilšu slāni, paaugstinātā skābekļa koncentrācija veicina Fe^{2+} jonu oksidāciju. Pieaugot kopējai dzelzs jonu koncentrācijai apstrādājamā šķīdumā, to koncentrācijas izmaiņa elektrolīzes procesā samazinās.



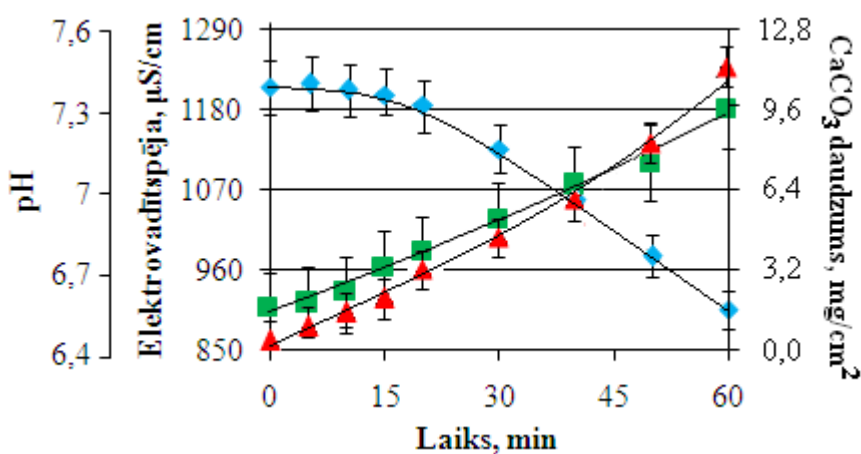
9. att. Kopējā dzelzs jonu koncentrācijas izmaiņa pētāmajos šķīdumos: ■ – filtrējot caur kvarca smiltīm; ■ – elektrolizējot ar sekojošu filtrēšanu caur kvarca smiltīm. C_N, C_A – dzelzs kopējā koncentrācija neapstrādātā un attiecīgi apstrādātā šķīdumā, mg/L, C_N = 0,5; 1,0; 1,5. Apstrādi ar elektrolīzi veic pie strāvas stipruma 0,09 A un plūsmas ātruma 0,01 m/s 10 min

Ūdens cietības ietekme uz elektrolīzes procesu

Cieta ūdens elektrolīzes gadījumā ir novērojama nogulšņu veidošanās uz katoda elektroda [9]. Darbā tika pētīts, kā cietību veidojošie (Ca²⁺ un Mg²⁺) joni un plūsmas raksturs iespaido elektroda apaugšanu, un kā šis process var ietekmēt dezinficējošo vielu veidošanās intensitāti.

Nogulšņu veidošanos uz elektroda modelēja, elektrolizējot Ca(HCO₃)₂ un MgSO₄ šķīdumus.

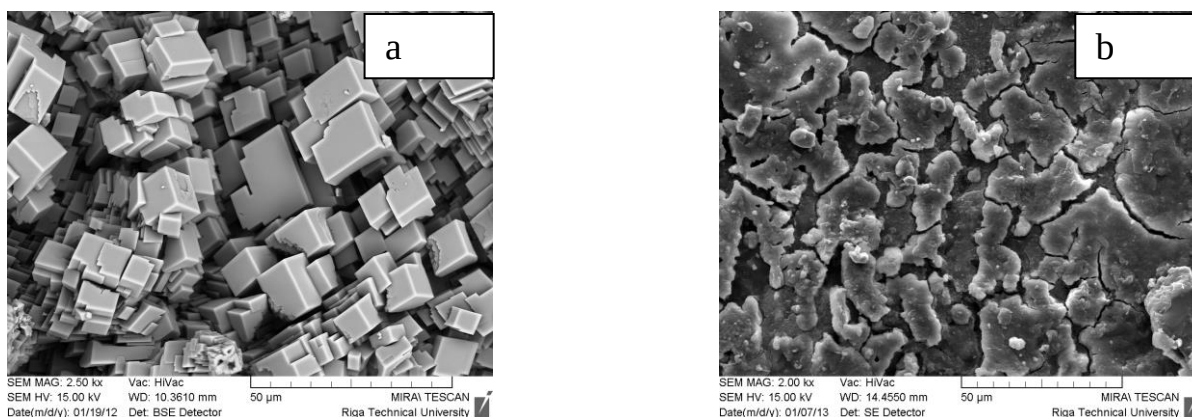
Veidojoties CaCO₃ nogulsniem uz elektroda, elektrolizējamā šķīdumā samazinās Ca²⁺ un HCO₃⁻ jonu koncentrācija, kas izsauc šķīduma elektrovadītspējas samazināšanos. Pieaugot elektrolīzes laikam, šķīduma elektrovadītspēja samazinās, izteiktāks samazinājums ir novērojams, elektrolizējot šķīdumu ilgāk (10. att.) par 15 min. Acīmredzot, palielinoties elektrolīzes laikam, pieaug caurplūdušās strāvas lādiņš un tā izraisītās reakcijas uz elektrodu virsmas intensificējas. Elektrolīzes laikā pie elektrodiem izdalījušās gāzes (H₂, O₂) var samazināt CO₂ šķīdību ūdenī, kas izsauc Ca(HCO₃)₂ pāreju nešķīstošā CaCO₃ formā. Pie katoda izdalītais ūdeņradis samazina H⁺ jonu koncentrāciju, pieaug šķīduma bāziskums (skat.10.att.), kas arī veicina nešķīstoša CaCO₃ veidošanos uz elektroda pietiekami blīvu nogulšņu veidā (10. un 11. att.).



10. att. Elektrolizējamā šķīduma elektrovadītspējas (◆), CaCO₃ nogulšņu daudzuma (▲) uz katoda elektroda virsmas un šķīduma pH (■) izmaiņas atkarībā no elektrolīzes laika. Ca(HCO₃)₂ šķīduma sākotnējā koncentrācija – 4,5 mmol/L, strāvas stipruma 0,1 A, Re_c = 18 000

Veidojoties $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nogulsņēm MgSO_4 šķīduma elektrolīzes gadījumā, procesa sākumā novērojams šķīduma elektrovadītspējas pieaugums, kas ir pretējs, salīdzinot ar $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ šķīduma elektrolīzi. Elektrolizējamā šķīduma pH strauji samazinās, kas skaidrojams ar $\text{Mg}(\text{OH})_2$ izgulsnēšanos (skat. 12. att.).

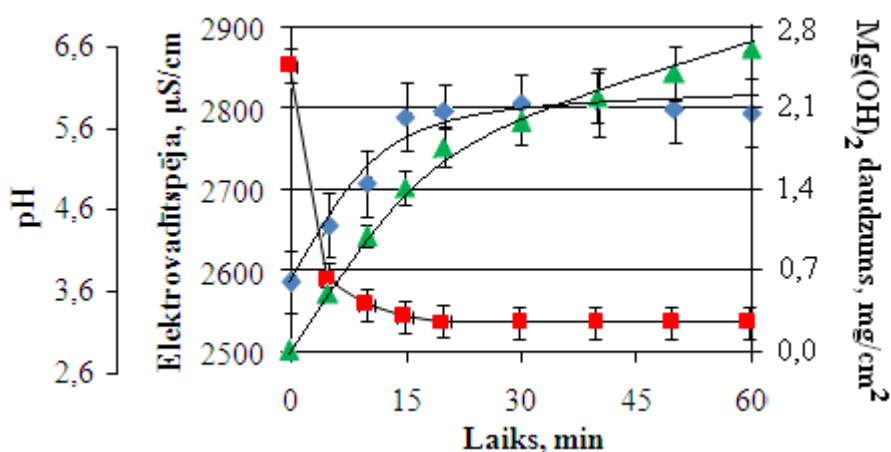
Pie katoda izgulsnētā $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nogulšņu daudzums pieaug, palielinoties elektrolīzes laikam līdzīgi, kā $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ šķīduma elektrolīzes gadījumā, un skaidrojams ar caurplūdušā lādiņa un tā izraisīto reakciju intensitātes pieaugumu.



11. att. Uz elektroda virsmas elektrolīzes laikā radušos nogulšņu SEM mikrofotogrāfijas: a – CaCO_3 , b – $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Apstrādi veic 1 h ar strāvas stiprumu 0,1 A, $Re_c = 18\,000$

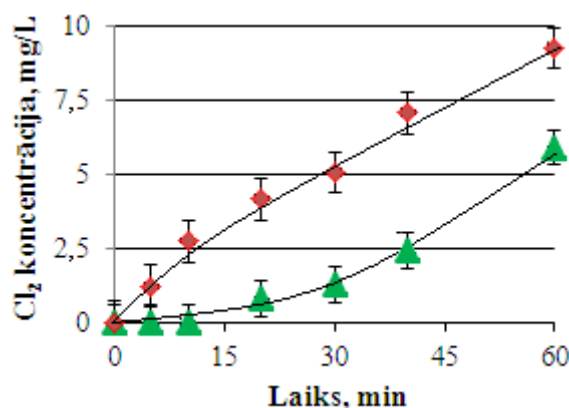
Uz elektroda radušos nogulšņu struktūru un virsmas morfoloģiju analizēja, izmantojot rentgenstruktūranalīzi un skenējošo elektronu mikroskopu. Kalcija hidroģēnkarbonāta un magnija sulfāta elektrolīzes procesā izveidojušās CaCO_3 un $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nogulsnes apstiprina paraugu XRD difraktogrammās novērojamie CaCO_3 kalcīta kristāliskajai modifikācijai raksturīgie maksimumi un $\text{Mg}(\text{OH})_2$ brucīta kristāliskajai modifikācijai raksturīgie difrakcijas maksimumi.

SEM mikrofotogrāfijās redzami izteikti CaCO_3 kalcīta kristāliskajai modifikācijai raksturīgie veidojumi, kā arī $\text{Mg}(\text{OH})_2$ brucīta kristāliskā modifikācija (skat. 11. att.).



12. att. Elektrolizējamā šķīduma elektrovadītspējas (◆), $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nogulšņu daudzuma (▲) uz katoda elektroda virsmas un šķīduma pH (■) izmaiņas atkarībā no elektrolīzes laika. MgSO_4 šķīduma sākotnējā koncentrācija – 15 mmol/L, strāvas stiprums 0,1 A, $Re_c = 18\,000$

Nogulšņu veidošanās uz elektroda elektrolīzes procesā var ietekmēt izdalītā hlora daudzumu un līdz ar to arī dezinfekcijas efektivitāti. Ūdens cietības ietekme uz izdalītā hlora daudzumu elektrolīzes procesā novērtēta, pievienojot kalcija hidroģēnkarbonāta modeļšķīdumam 1 mmol/L KCl (13. att.).

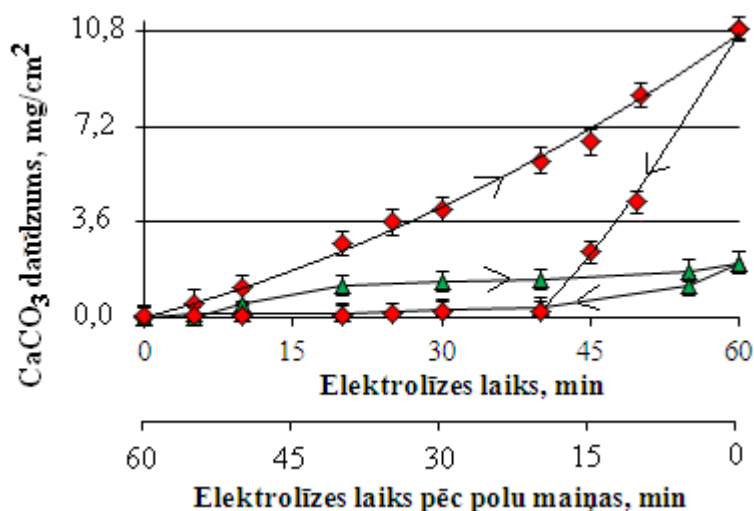


13. att. Hlora izdalīšanās šķīdumā atkarībā no elektrolīzes laika un Ca²⁺ jonu sākuma koncentrācijas:
 ◆ – 0 mmol/L; ▲ – 4,5 mmol/L. Strāvas stiprums 0,1 A, Re_c = 18 000

Kā redzams, hlora izdalīšanās kinētika elektrolīzes procesā no šķīduma, kas nesatur kalcija jonus, un šķīduma, kas satur 4,5 mmol/L Ca²⁺ (atbilst ļoti cietam ūdenim), būtiski atšķiras. Cieta ūdens gadījumā hlora izdalīšanos var konstatēt tikai pēc pirmajām desmit procesa minūtēm. Tas ir izskaidrojams ar dažādām blakusreakcijām uz elektroda virsmas, kurās var tikt iesaistīts arī elektrolīzes procesā producētais hlors, piemēram:



Viens no paņēmieniem elektrodu attīrīšanai no elektrolīzes laikā izgulsnētajām nogulsņiem ir elektrodiem pieliktās strāvas polu maiņa. Šai sakarā Ca(HCO₃)₂ saturošu šķīdumu elektrolizēja 1 stundu, kuras laikā, kā atzīmēts iepriekš, uz katoda elektroda elektrolīzes šūnā izveidojās CaCO₃ nogulsnes, par ko liecina Ca²⁺ jonu koncentrācijas pieaugums šķīdumā, kas iegūts, izšķīdinot nogulsnes skābē. Pēc vienas stundas elektrolīzes veic elektrodiem pieliktās strāvas polu maiņu (14. att.). Pēc polu maiņas katods, kurš atrodas bāziskā vidē, kļūst par anodu, kurš atrodas skābā vidē.



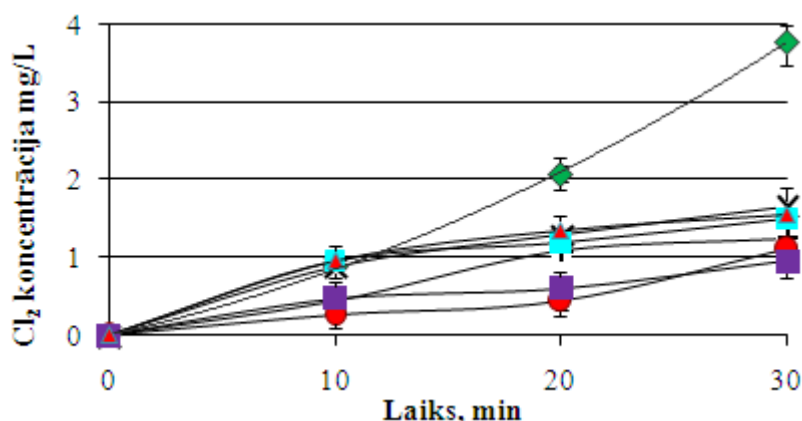
14. att. CaCO₃ nogulšņu daudzuma izmaiņas uz elektroda virsmas pirms un pēc strāvas polu maiņas atkarībā no elektrolīzes laika un plūsmas režīma: ▲ – Re_c = 0; ◆ – Re_c = 18 000. Strāvas stiprumu 0,1 A

Nogulsnes labi šķīst skābā vidē un viegli atdalās no elektroda jau pirmajās 10 – 15 min pēc strāvas polu maiņas. Elektrolizējamā šķīduma intensīva turbulence veicina gan nogulšņu veidošanos, gan elektrodu attīrīšanos no tām pēc polu maiņas. Palielinoties elektrolīzes laikam, nogulšņu daudzums uz katoda pieaug, ūdens cietībai samazinoties. Acīmredzot, intensīva elektrolizējamā

šķīduma sajaukšanās veicina aprakstīto reakciju norisi. Atšķirībā no Ca^{2+} jonu ietekmes uz hlora izdalīšanos, Cl^- jonu klātbūtne CaCO_3 un Mg(OH)_2 izgulsnēšanās kinētiku neietekmē. Līdzīgi, kā CaCO_3 nogulšņu gadījumā, arī Mg(OH)_2 nogulšņu gadījumā elektrods no nosēdumiem attīrās 10-15 min laikā pēc strāvas polu maiņas.

Ūdenī esošo anjonu ietekme uz elektrolīzes procesu

Dažādu jonu klātbūtne ūdenī izmaina ne tikai tā elektrovadītspēju, bet var ietekmēt arī hlora izdalīšanos elektrolīzes procesā.



15. att. Izdalītais hlora daudzums atkarībā no elektrolīzes laika un citu jonu klātbūtnes šķīdumā, $I = 0,1\text{A}$, izmantoto jonu koncentrācijas 1 mmol/L šķīdumā:

◆ - Cl^- ; ✕ - HPO_4^{2-} ; X - NO_3^- ; ■ - H_2PO_4^- ; ▲ - SO_4^{2-} ; ● - PO_4^{3-} ; ■ – visi joni.

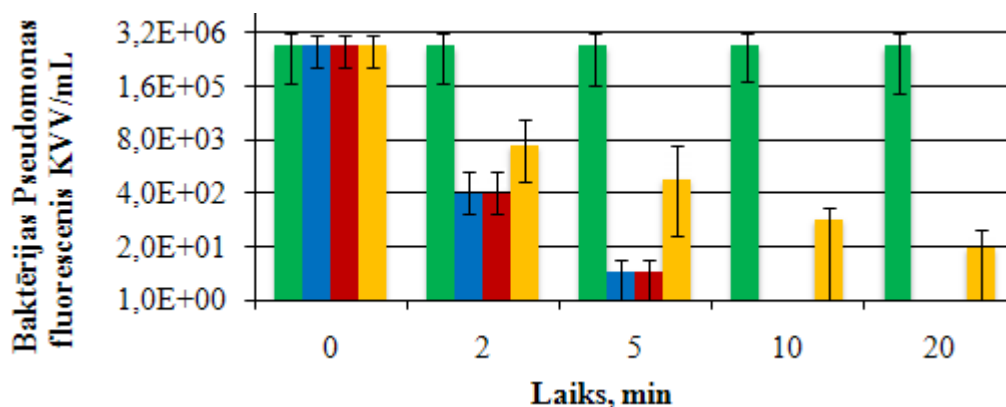
Veicot ūdens šķīduma elektrolīzi, kas bez Cl^- joniem satur dažādus citus jonus (15. att.), konstatējām, ka visos gadījumos izdalītā hlora daudzums samazinās. Pie tam, atsevišķu izmantoto anjonu ietekme uz hlora izdalīšanos ir līdzīga. Acīmredzot, dažādu anjonu klātbūtne šķīdumā, līdzīgi kā cieta ūdens gadījumā, veicina blakusreakciju norisi uz anoda, kas samazina aktīvā hlora veidošanos.

Elektrolīzes ietekme uz ūdens mikrobioloģisko piesārņojumu

Darbā eksperimentāli pētīta ūdens elektrolīzes parametru ietekme uz konkrētu mikroorganismu šūnām, to metabolisko aktivitāti, kultivējamību un spēju dalīties.

Kā pirmo izvēlējamies baktēriju *Pseudomonas fluorescens* (*P. fluorescens*), kas ir pietiekami plaši izplatīta ūdens apgādes sistēmās un samērā viegli pakļaujas dezinfekcijai ar klasiskiem ūdens dezinfekcijas paņēmieniem.

Šķīdumos, kas satur Cl^- vai Br^- jonus, ir novērojams būtisks baktēriju koloniju veidojošo vienību skaita (KVV) samazinājums. Šķīdumos, kas satur SO_4^{2-} jonus, elektrolīzes dezinficējošais efekts praktiski nav novērojams, kas ļauj secināt, ka dezinfekcijas efekts ir atkarīgs no elektrolīzes laikā ģenerēto halogēnu savienojumu produktiem ūdenī, nevis no strāvas, kas plūst caur šķīdumu (skat. 16. att.).



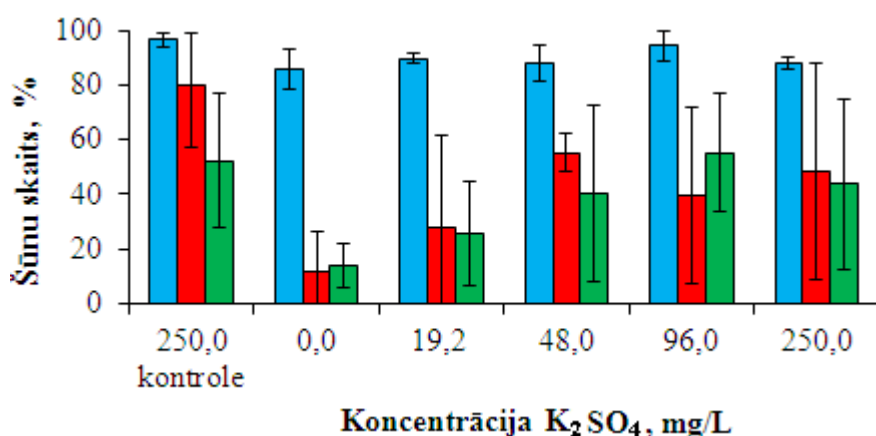
16. att. Kultivējamo *P. fluorescens* KVV skaita izmaiņas atkarībā no elektrolīzes laika, šķīdumos, kas satur ■ – SO₄²⁻, ■ – Cl⁻, ■ – Br⁻, ■ – I⁻ jonus ar sākuma koncentrāciju 1 mmol/L. Strāvas stiprums 0,1 A

Kā redzams no 16. att., elektrolizējot ūdeni, kas satur Cl⁻ un Br⁻ jonus, *P. fluorescens* KVV skaits pirmajās dezinfekcijas minūtēs samazinās vairāk nekā par 99,9%; pēc 10 minūšu dezinfekcijas *P. fluorescens* KVV vairs netiek konstatētas.

Tā kā jodīda jonus saturošu šķīdumu elektrolīze uzrāda mazākas dezinfekcijas īpašības, nekā hlorīda un bromīda jonus saturošu, un bromīda joni ir mazāk sastopami dabas ūdeņos, turpmākajos eksperimentos izmantoti ūdens šķīdumi, kas satur tikai Cl⁻ jonus.

Kā ūdens piesārņojuma novērtēšanas testa modeļorganismu izmantoja *Escherichia coli*, kas tiek izmantota arī kā higiēniskās kvalitātes indikators dzeramajā ūdenī. Darbā pētīja elektroķīmiskās dezinfekcijas ietekmi uz *E. coli*, metabolisko aktivitāti, kultivējamību un spēju dalīties.

Lai noskaidrotu, kā elektriskā strāva ietekmē *E. coli* dzīvotspēju, un vai strāvas ietekmē var rasties arī citi ķīmiskie savienojumi ar dezinficējošām īpašībām, *E. coli* izmaiņas tika mērītas, destilētam ūdenim pievienojot *E. coli* šūnas un sulfātjonus (SO₄²⁻) dažādās koncentrācijās. Visi paraugi tika apstrādāti ar elektrolīzi 15 minūtes pie maziem strāvas stipriem (j – 8,1 mA/cm², pH 7±0,2, t° = 23±2°C).



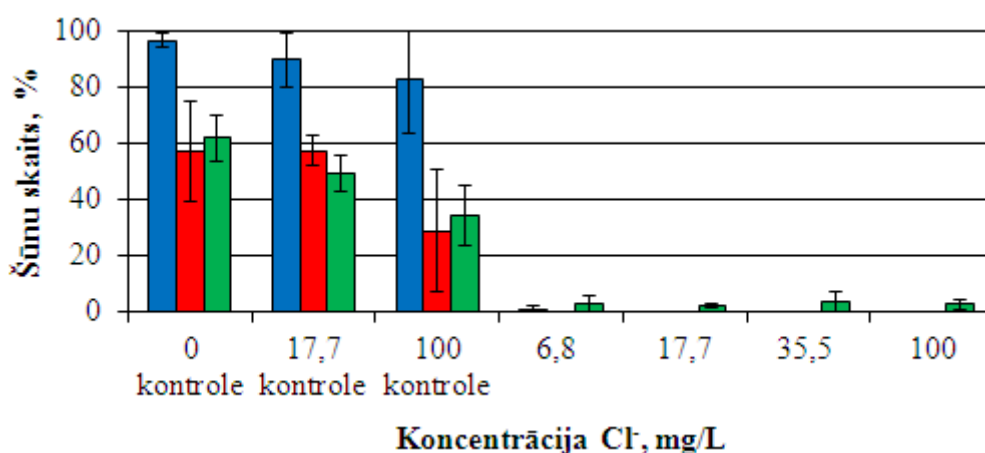
17. att. *E. coli* šūnu skaits, %: metaboliski aktīvas – elpojošas (■), kultivējamas (■) un DVC pozitīvas – ar spēju dalīties (■). Apstrādi veic 15 min ar strāvas stiprumu 0,1 A

Iegūtie rezultāti pierāda, ka SO₄²⁻ jonu klātbūtne elektrolizējamā šķīdumā nenodrošina būtisku *E. coli* baktēriju skaita samazinājumu (skat. 17. att.).

Pētāmajam ūdenim, kas satur *E. coli* baktērijas, pievienoja KCl, izveidojot dažādas koncentrācijas (no 6,8 līdz 100 mg/L Cl⁻) modeļšķīdumus. Izvēlētās KCl koncentrācijas bija

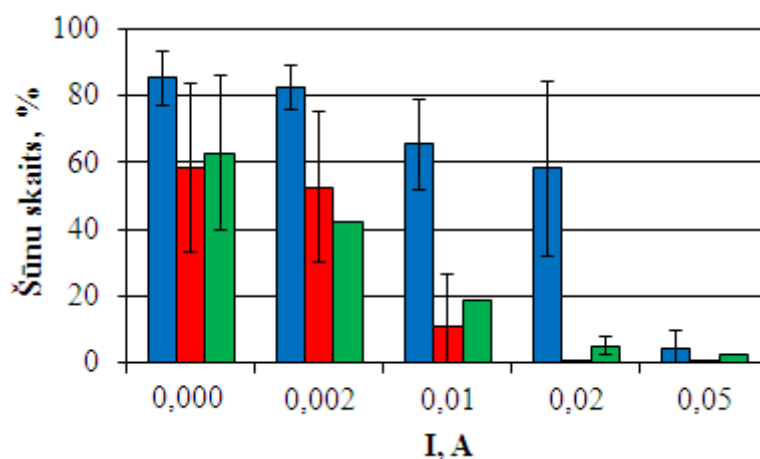
atbilstošas reālam ūdenim, kurā maksimāli pieļaujamā hlorīda jonu koncentrācija nedrīkst pārsniegt 250 mg/L.

Iegūtie rezultāti apstiprina, ka dezinfekcijas efektivitāte ir hlora radīto oksidētspējīgo savienojumu rašanās rezultāts, nevis pieliktās elektroenerģijas ietekme uz radikāļu veidošanos ūdenī. Hlorīda jonu koncentrācijas ietekme uz dezinfekcijas efektivitāti elektrolīzes procesā, pētot *E. coli* šūnas, parādīta 18. att. Skaidri redzams, ka jau pie koncentrācijas ap 7 mg/L Cl^- elektrolīze pasivē *E. coli*, tās vairs nav kultivējamas un neuzrāda spēju dalīties, un neelpo, t.i., tās nav dzīvotspējīgas. Hlorīda jonu koncentrācija šķīdumā atbilst koncentrācijai, kāda raksturīga virszemes un pazemes ūdeņiem.



18. att. Hlorīda jonu koncentrācijas ietekme uz dezinfekcijas efektivitāti, pētot *E. coli* šūnas, %: metaboliski aktīvas – elpojošas (■), kultivējamas (■) un DVC pozitīvas – ar spēju dalīties (■). Apstrādi veic 15 min ar strāvas stiprumu 0,1 A

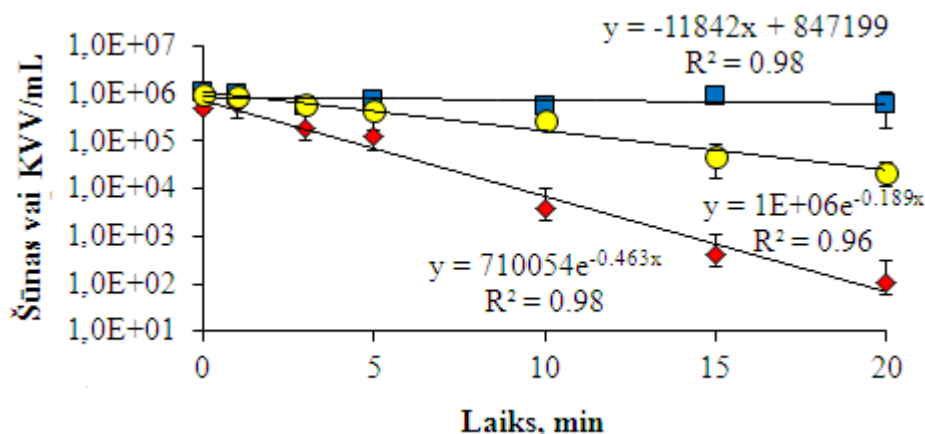
Strāvas stipruma ietekme uz *E. coli* šūnām pētīta, tās apstrādājot 15 minūtes pie hlorīdu jonu koncentrācijas 6,8 mg/L (19. att.). Izvērtējot iegūtos rezultātus var redzēt, ka, palielinot strāvas stiprumu virs 0,02 A, tas ir pietiekams, lai inaktivētu visas *E. coli* šūnas. Jāatzīmē, ka vispirms zūd baktēriju kultivēšanas spējas, pēc tam šūnas zaudē spēju dalīties, un vēl pēc tam zaudē arī spēju elpot (zaudē dzīvotspēju).



19. att. Strāvas stipruma ietekme uz dezinfekcijas efektivitāti, pētot *E. coli* šūnas, %: metaboliski aktīvas – elpojošas (■), kultivējamas (■) un DVC pozitīvas – ar spēju dalīties (■). Hlorīda jonu sākotnējā koncentrācija 6,8 mg/L

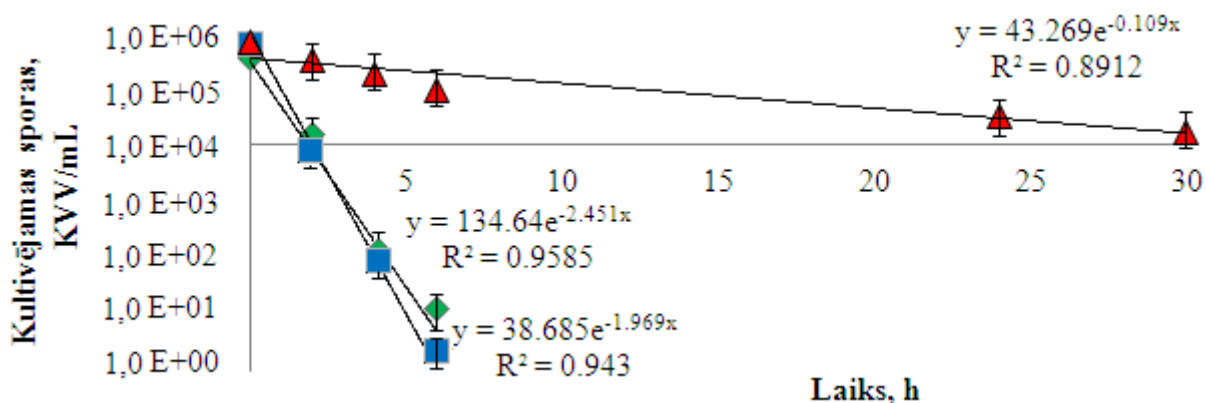
Ūdens dezinfekcijas kinētiku pētīja paraugos ar hlorīda jonu koncentrāciju 6,8 mg/L, kurus apstrādāja ar 0,02 A. Iepriekšējie eksperimenti parādīja, ka izdalītā hlora koncentrācija ir aptuveni

0,5 mg Cl₂/L. Pēc tam, kad paraugā tika sasniegta šī koncentrācija, *E. coli* koncentrācija eksponenciāli samazinājās. Proporcija, pēc kādas notika *E. coli* koncentrācijas samazinājums, bija līdzīga gan kultivējamām, gan dalīties spējīgām šūnām. Pēc 15 minūtēm paraugos netika konstatēta neviena no abu veidu pieminētajām *E. coli* šūnām. Tomēr elpotspējīgo šūnu koncentrācija samazinājās pēc citas tendences: straujāk sākumā, un gandrīz apstājās pēc 3 minūtēm laikā no eksperimenta sākuma (20. att.).



20. att. Dezinfekcijas efektivitāte atkarībā no laika (hlorīda jonu sākotnējā koncentrācija 6,8 mg/L, strāvas stiprums 0,02 A, pH $7 \pm 0,2$, $t^0 = 23 \pm 2^0$ C). *Escherichia coli*: elpotspēja (■), dalīšanās spēja (●), kultivējamība (◆)

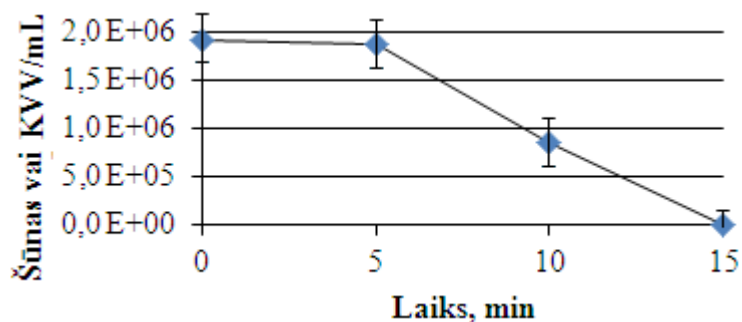
Darbā pētījām arī *Bacillus subtilis* sporu dzīvotspēju pēc apstrādes ar elektrolīzi ūdenī ar zemu hlorīda jonu koncentrāciju. *B. subtilis* sporas tika izvēlētas, jo tiek uzskatīts, ka tās ir vienas no izturīgākajām pret dezinfekciju. Turklāt *B. subtilis* piemīt līdzīgas īpašības kā *Bacillus anthracis*, kas ir cilvēka patogēns un var izraisīt Sibīrijas mēri, kā arī iefiltrēties dzeramajā ūdenī kā bioterorisma aģents.



21. att. Šķīduma pH ietekme uz elektrolīzes procesa dezinfekcijas efektivitāti, pētot *Bacillus subtilis* baktēriju koloniju veidojošo vienību skaitu: pH 6 (■), pH 7 (◆) un pH 8 (▲). Strāvas stiprums 0,1 A

Elektrolīzi veica pie dažādām šķīduma pH. Pie pH 8 tika novērota vismazākā efektivitāte (samazinājums ir ievērojami mazāks nekā 99%), kultivējamās sporas (21. att.) novēroja vēl pēc 30 stundām, kas varētu būt saistīts ar hipohlorīdskābes disociāciju pie augstākām pH vērtībām [10]. Elektrizējot šķīdumus pie pH 7 un pH 6 *B. subtilis* sporu kultivējamības samazinājums par 99% tika iegūts jau pēc 1 h.

Reāla ūdens gadījumā šķīdumā kopā ar hlorīda joniem var būt dažādi citi joni, kā bija parādīts iepriekš, kas var piedalīties blakusreakcijās uz elektrodiem, samazinot izdalītā hlora daudzumu un dezinfekcijas efektivitāti elektrolīzes procesā.



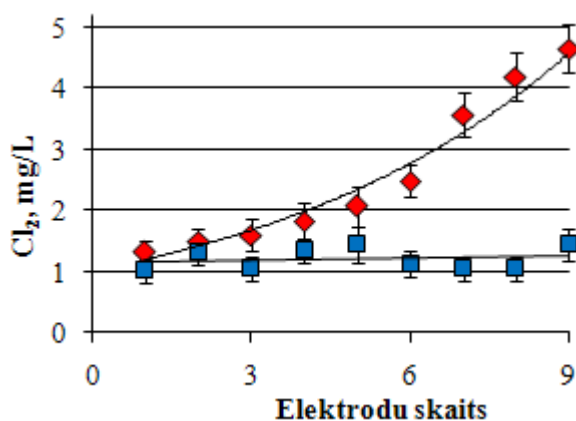
22. att. Akas ūdens dezinfekcijas efektivitāte atkarībā no laika (hlorīda jonu koncentrācija 9 mg/L, strāvas stiprums 0,1 A, pH $7 \pm 0,2$, $t^0 = 20 \pm 2^\circ \text{C}$).

Veicot privātas akas ūdens apstrādi, kurā ir 9 mg/L Cl^- jonu un dzeramajam ūdenim raksturīgie citi joni, apstrādi ar elektrolīzi, ūdenī veidojas dezinfekcijai nepieciešamais hlora daudzums. No 22. attēla redzams, ka *E. coli* baktēriju kultivējamība 15 minūtēs samazinās par vairāk nekā 6 log, pilnībā dezinficējot ūdeni. Iegūtie rezultāti ļauj apgalvot, ka dabas ūdens, kurš satur hlorīda jonus pat mazās koncentrācijās, var tikt dezinficēts ar elektrolīzes metodi.

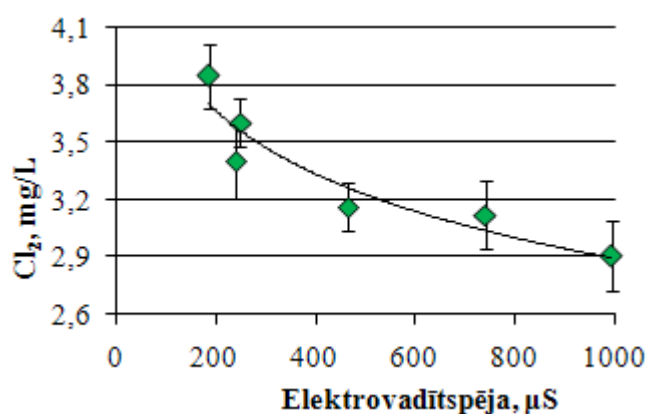
Kopumā dzeramā ūdens elektroķīmiskā dezinfekcija ar TiO_{2-x} elektrodiem pie zemas hlorīdu jonu koncentrācijas ir visefektīvākā pie pH 6, ko novēro arī tradicionālās hlorēšanas gadījumā. Šajā pētījumā tika apstiprināts, ka elektroķīmiskā dezinfekcija ir efektīvāka baktēriju sporu neitralizēšanai – visizturīgākajām mikroorganismu formām, tomēr, lai metodi lietotu plašā mērogā, būtu jāizpēta iespējamo blakusproduktu rašanās un jānovērtē dezinfekcijas efektivitāte biofilmu veidojošo baktēriju deaktivēšanai, jo šīs baktērijas ir liels drauds dzeramā ūdens kvalitātei.

Tehnoloģisko parametru ietekme uz ūdens apstrādi ar elektrolīzes procesu dinamiskā režīmā

Viens no faktoriem, kas var ietekmēt elektrolīzes procesā izdalītā hlora daudzumu, ir elektrodu virsmas laukums. Elektrolizējot šķīdumu ar hlorīdu jonu koncentrāciju 1 mmol/L, redzams, ka pie nemainīga strāvas stipruma elektrodu skaits (laukums) izdalītā hlora daudzumu praktiski neietekmē (23. att.).



23. att. Izdalītā hlora koncentrācija atkarībā no pieslēgto elektrodu skaita: $\blacklozenge$ – pie nemainīga strāvas blīvuma $8,1 \text{ mA/cm}^2$; $\blacksquare$ – pie nemainīga strāvas stipruma 0,1 A. Hlorīda jonu koncentrācija 1 mmol/L, plūsmas ātrums 0,01 m/s

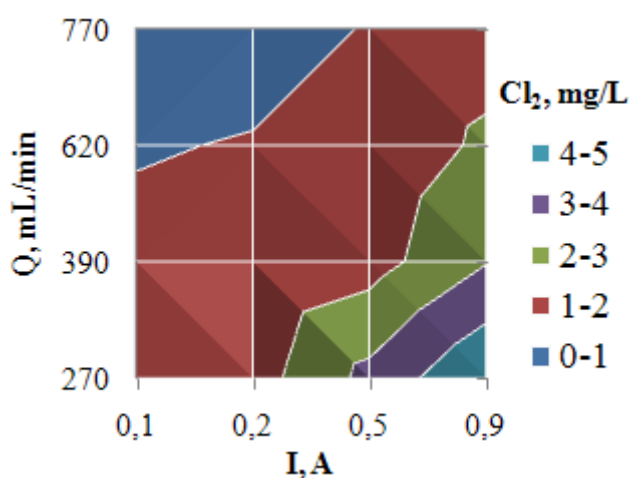


24. att. Izdalītais hlora daudzums atkarībā no šķīduma elektrovadītspējas, pie konstanta strāvas blīvuma $8,1 \text{ mA/cm}^2$. Hlorīda jonu koncentrācija 1 mmol/L, plūsmas ātrums 0,01 m/s

Savukārt, veicot elektrolīzi tādos pašos apstākļos pie nemainīga strāvas blīvuma, izdalītā hlora daudzums palielinās, palielinoties elektrodu virsmas laukumam. Elektrodu virsmas laukumam palielinoties 9 reizes, izdalītā hlora daudzums pieaug 3,5 reizes no 1,4 mg/L līdz gandrīz 4,5 mg/L.

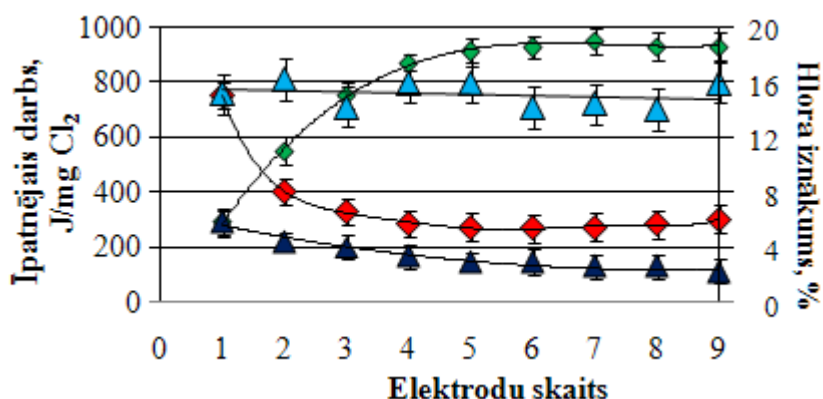
Pieaugot šķīduma elektrovadītspējai, kas tieši saistīta ar citu jonu klātbūtni šķīdumā, izdalītais hlora daudzums ievērojami samazinās (24. att.). Ūdens elektrovadītspējas palielināšanās 6 reizes samazina hlora iznākumu 1,25 reizes. Citu jonu klātbūtne veicina blakus reakcijas uz anoda, samazinot aktīvā hlora veidošanos.

Dezinficējošo vielu ģenerēšanas intensitāte un līdz ar to elektrolīzes procesa efektivitāte ūdens inženiersistēmās var mainīties, mainoties ūdens patēriņam un strāvas parametriem. Ūdens plūsmas ātrums nosaka elektriskās strāvas iedarbības laiku. Variējot plūsmas ātrumu un elektriskās strāvas stiprumu, iespējams nodrošināt noteiktu dezinficējošo vielu koncentrāciju šķīdumā. Kā redzams no 25. att., elektrolīzes procesā izdalītā Cl_2 daudzums pieaug, samazinot noteiktās robežās ūdens patēriņu Q un palielinot pieliktās strāvas stiprumu. Iegūtās sakarības ļauj prognozēt efektīvas dezinfekcijas nodrošināšanai nepieciešamo Cl_2 koncentrāciju, mainot elektrolīzes parametrus.



25. att. Elektrolīzes procesā izdalītā Cl_2 daudzuma izolauki atkarībā no plūsmas režīma Q (mL/min) un strāvas stipruma (A). Hlorīda jonu koncentrācija 1 mmol/L

Elektrolīzes šūnas efektivitāti raksturo elektrolīzes procesā izdalītā hlora daudzums no teorētiski iespējamā un patērētais īpatnējais strāvas darbs procesa realizācijai.



26. att. Īpatnējā elektrolīzes procesa darba un izdalītā hlora iznākums (no teorētiski iespējamā pēc strāvas) no elektrodu skaita: $\blacklozenge$ – īpatnējā elektrolīzes procesa darbs un $\blacklozenge$ – izdalītā hlora iznākums pie nemainīga strāvas blīvuma $8,1 \text{ mA/cm}^2$; $\blacktriangle$ – īpatnējā elektrolīzes procesa darbs un $\blacktriangle$ – izdalītā hlora iznākums pie nemainīga strāvas stipruma 0,1 A. Hlorīda jonu sākuma koncentrācija 1 mmol/L

Elektrolīzes laikā pie konstanta strāvas stipruma (0,1 A), palielinot elektrodu skaitu (laukumu), izdalītā hlora daudzums praktiski neizmainās, bet elektriskās strāvas īpatnējais darbs hlora izdalīšanai samazinās 2,7 reizes (26. att.). Strāvas paveiktā īpatnējā darba samazinājums ir saistīts ar elektrolīzes šūnas kopējās pretestības samazināšanos. Realizējot elektrolīzi pie konstanta strāvas blīvuma un palielinot elektrodu skaitu, izdalītā hlora iznākums samazinās, bet elektriskās strāvas veiktais īpatnējais darbs hlora izdalīšanai palielinās. Veicot elektrolīzes procesu pie konstanta strāvas blīvuma, palielinoties elektrodu laukumam, pieaug strāvas stiprums, kas palielina elektroenerģijas patēriņu elektrolīzes procesa veikšanai.

Matemātiskā modeļa izstrāde elektroķīmiskās dezinfekcijas efektivitātes prognozēšanai

Pamatojoties uz eksperimentāli iegūtiem datiem un izmantojot *Chick – Watson* dezinfekcijas modeli [11], tika iegūts vienādojums, kas apraksta ūdens elektroķīmiskās dezinfekcijas efektivitāti elektrolīzes šūnā, izmantojot TiO_{2-x} keramikas elektrodus. Tika noteikts korelācijas koeficients 0,66, kas ļauj aprakstīt dezinfekcijas procesu ar minēto vienādojumu:

$$N = N_0 e^{(-0.66Ct)}, \text{ kur} \quad (3)$$

N – *E. coli* koncentrācija pēc dezinfekcijas, KVV/mL;

N_0 – sākuma *E. coli* koncentrācija pirms dezinfekcijas, KVV/mL;

C – kopējā hlora koncentrācija ūdens paraugā, mg/L;

t – kontakta laiks, min;

0,66 – korelācijas koeficients.

Eksperimentālos datus apstrādājot ar programmu *Systat Software Inc. TableCurve 3D*, versija 4.0, ieguvām vienādojumu, kas apraksta kopējo iegūtā hlora daudzumu.

Pieņemot sākuma nosacījumu, ka ūdens plūsmas ražība ir 0,055 L/min, tika iegūts pamata vienādojums (4), kurā izdalītā hlora daudzums ir atkarīgs no pieliktās strāvas stipruma un hlorīdu jonu koncentrācijas šķīdumā.

$$C_{\text{Cl}_2} = (0,173 - 3,463 \cdot I + 0,0126 \cdot C_{\text{Cl}^-} + 18,75 \cdot I^2 - 0,000067 \cdot (C_{\text{Cl}^-})^2 + 0,785 \cdot I \cdot C_{\text{Cl}^-}), \text{ kur} \quad (4)$$

C_{Cl_2} – izdalītā hlora daudzums, mg/L;

I – pieliktās strāvas stiprums, A;

C_{Cl^-} – hlorīdjonu koncentrācija šķīdumā, mg/L.

Izdalītā hlora daudzumu ietekmē arī plūsmas ražība. Vienādojums, kas apraksta plūsmas režīma ietekmi uz izdalītā hlora daudzumu, tika iegūts, ievēdot vienādojumā koeficientu k_1 , kas mainās atkarībā no ražības. Koeficients tika aprēķināts atsevišķi pie visām hlorīdjonu koncentrācijām ūdenī un pieliktajiem strāvas stipriem, un tika konstatēts, ka k_1 mainās tikai atkarībā no plūsmas ražības. Ertākai koeficienta noteikšanai tika konstruētas k_1 vērtības izmaiņas atkarībā no ražības (27. att.), tādējādi iespējams vienkāršā veidā atrast piemērotu koeficientu atkarībā no vēlamās plūsmas dinamikas. Ieviešot papildus koeficientu vienādojumā 4, tika iegūts vienādojums:

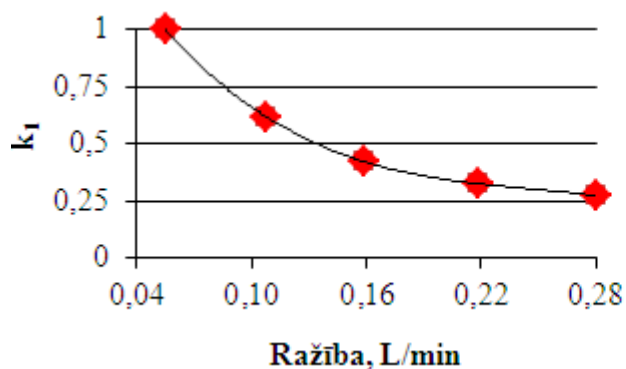
$$C_{\text{Cl}_2} = (0,173 - 3,463 \cdot I + 0,0126 \cdot C_{\text{Cl}^-} + 18,75 \cdot I^2 - 0,000067 \cdot (C_{\text{Cl}^-})^2 + 0,785 \cdot I \cdot C_{\text{Cl}^-}) \cdot k_1, \text{ kur} \quad (5)$$

k_1 – empīriski iegūts koeficients.

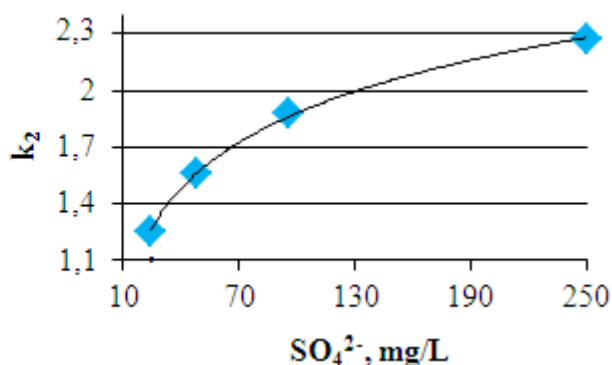
Vienādojums, kas aprakstītu arī citu jonu (pētīts, izmantojot sulfāta jonus) ietekmi uz izdalītā hlora daudzumu, tika iegūts, ievēdot vienādojumā koeficientu k_2 , kas mainās atkarībā no sulfāta jonu koncentrācijas ūdenī. Koeficients tika aprēķināts atkarībā no sulfāta jonu koncentrācijas ūdenī (28. att.). Pievienojot vienādojumam 5 jauniegūto koeficientu k_2 , tika iegūts vienādojums 6:

$$C_{\text{Cl}_2} = (0,173 - 3,463 \cdot I + 0,0126 \cdot C_{\text{Cl}^-} + 18,75 \cdot I^2 - 0,000067 \cdot (C_{\text{Cl}^-})^2 + 0,785 \cdot I \cdot C_{\text{Cl}^-}) \cdot k_1 / k_2, \text{ kur} \quad (6)$$

k_2 – empīriski iegūts koeficients



27. att. Koeficienta vērtība atkarībā no ūdens plūsmas ražības



28. att. Koeficienta vērtība atkarībā no sulfātu jonu koncentrācijas

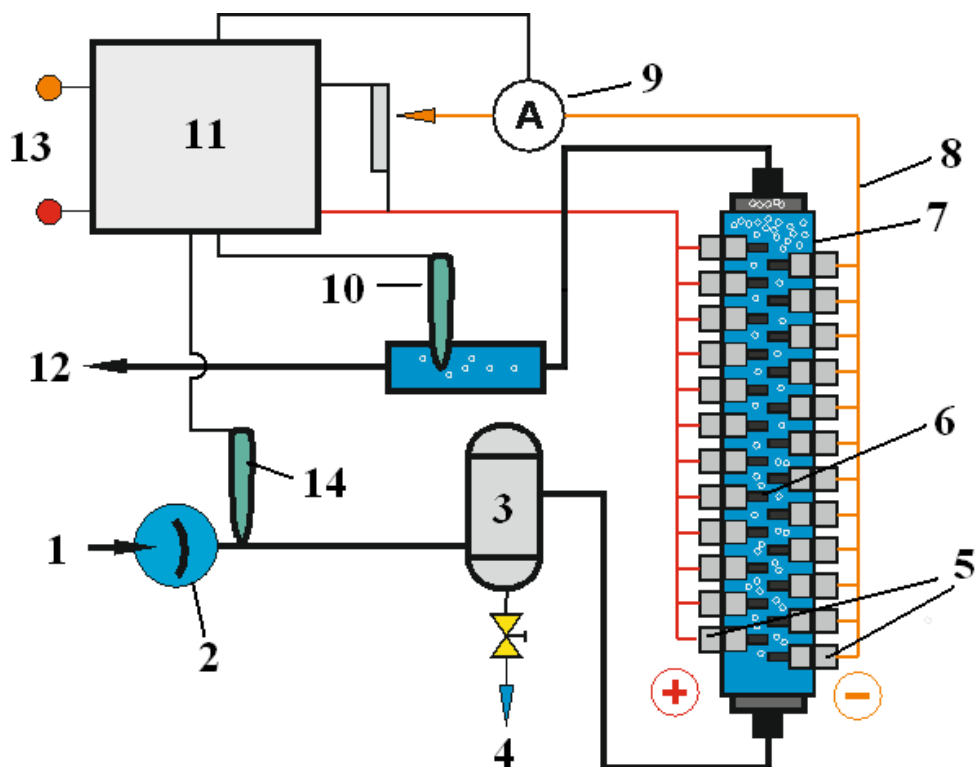
Izmantojot vienādojumus 3. un 6., var prognozēt un vadīt ūdens dezinfekcijas procesu. Iegūtais 6. vienādojums darbojas noteiktajās izvēlēto parametru robežās (pieliktās strāvas stiprums 0,1 – 0,4 A, hlorīdu jonu koncentrācija 0~250 mg/L, ražība var variēt no 0,055 L/min līdz 0,280 L/min, un sulfātu jonu koncentrācija ir 24 – 250 mg/L).

Ūdens dezinfekcijas iekārtas principiālā shēma un tās tehniski-ekonomiskais izvērtējums

Pamatojoties uz darbā iegūtajiem eksperimentālajiem datiem, tika izstrādāta ūdens dezinfekcijas iekārtas principiālā shēma (29. att.), un veikts tās tehniski-ekonomiskais izvērtējums.

Apstrādājama ūdens uz iekārtu tiek padots ieplūdes ceļā (1), kurai seko sūknis (2) gadījumā, ja elektrolīzes iekārta nav pieslēgta ūdensvadam. Apstrādājamo ūdeni pirms elektrolīzes šūnas filtrē, izmantojot kārtidžu tipa mehānisko filtru (3). Elektrolīzes šūna (7) sastāv no virknē saslēgtiem keramiskiem katoda un anoda elektrodiem (5), kas novietoti viens otram pretī, un kuru skaits var mainīties no 20 līdz 30. Elektrodi izgatavoti no TiO_{2-x} keramikas (6). Šūnai pievadītās strāvas stiprumu kontrolē ampērmetrs (9). Lai nodrošinātu iekārtas ilglaicīgu darbību, strāvas stiprums uz vienu elektrodu pāri nevar pārsniegt 0,1 A, strādājot ar maksimālo jaudu, šūnai pievadītais spriegums nedrīkst pārsniegt 24 V. Elektrolīzes process tiek automātiski vadīts, izmantojot sakarību starp procesā izdalīto hlora daudzumu un elektrolizētā šķīduma ORP, kas tiek noteikts, izmantojot speciālu ORP sensoru (10). Elektrolīzes šūnai pielikto strāvas stiprumu (A) un sensora ORP (mV), kā arī plūsmas detektora signālus analizē un kontrolē vadības pults (11), kas pieslēgta pie līdzstrāvas avota (maiņstrāvas pārveidotājs, akumulators) (13). Analizējot hlora daudzumu izplūdes ūdeņos, attiecīgi tiek samazināts vai palielināts šūnai pieliktais strāvas stiprums. Plūsmas detektors (14) kontrolē šķīduma plūsmu caur elektrolīzes šūnu, lai gadījumā, kad caur to neplūst šķīdums, vadības pults automātiski atslēgtu strāvu elektrolīzes iekārtai, - tas nepieļauj nekontrolētu gāzu veidošanos slēgtā sistēmā uz elektrodu virsmas elektrolīzes procesā.

Izstrādātā ūdens dezinfekcijas iekārta ir pielietojama lokālās ūdens ņemšanas vietās, ārkārtas situācijās un ūdens sagatavošanai speciālām vajadzībām.



29. att. Ūdens dezinfekcijas iekārtas tehnoloģiskā shēma: 1 – dezinficējamais ūdens; 2 – sūknis; 3 – mehāniskais filtrs; 4 – izvads uz kanalizāciju; 5 – elektrodi; 6 – TiO_{2-x} keramika; 7 – elektrolīzes šūna; 8 – elektrības vadi; 9 – ampērmetrs; 10 – oksidēšanās-reducēšanās potenciāla sensors; 11 – vadības pulsts; 12 – dezinficēts ūdens; 13 – līdzstrāvas avots; 14 – plūsmas detektors.

Darbā veicām ūdens elektroķīmiskās dezinfekcijas metodes sociāleconomisko analīzi attiecībā pret situāciju, kad netiek veikti nekādi ūdens attīrīšanas pasākumi – nulles alternatīvu. Nulles alternatīva ir tipiskākā situācija Latvijas iedzīvotāju individuālajās ūdens apgādes sistēmās.

Iekārtas pašizmaksu novērtē ar 150,0 LVL gabalā (bez pievienotā vērtības nodokļa), tās kalpošanas laiks ir 15 gadi, un tiek pieņemts, ka visas iekārtas pārdos pirmajos 5 gados. Par bāzes gadu tiek izmantots 2012. gads. Dati iegūti no Finanšu ministrijas mājas lapā [12] atrodamajiem galvenajiem makroekonomiskajiem rādītājiem un ekonomiskajām prognozēm. Valstī pieņemta sociālā diskonta likme nākamajiem 15 gadiem 5,5 procentu apmērā. Skaitlisko lielumu prognozei tiek izmantots IKP pieaugums [12] salīdzināmās cenās. Iekārtas izstrādes izmaksas pieņemtas. Kā redzams no 2. tabulas, elektrolīzes iekārtu uzstādīšana dod 492868,- LVL naudas ieguvumu valstij no produktivitātes pieauguma un 40317191,- LVL iekārtas pārdošanas ieņēmumus. Iekārtu ražošanas izmaksas ir 32253753,- LVL. Dalot iekārtu pārdošanas ieņēmumus ar ražošanas izmaksām, iegūstam pozitīvu 1,26 lielu ieguvumu un izdevumu samēru. Iekārtu uzstādīšana decentralizētajām mājāsaimniecībām valstij 15 gadu griezumā dotu gan ieguvumu no produktivitātes pieauguma, gan peļņu firmai, kas šīs iekārtas ražotu.

2. tabula

Galvenie ekonomiskie ieguvumi un izmaksas

Ekonomiskais ieguvums*	Kopējā vērtība (lati, diskontēta)	Procenti no ieņēmumu kopsummas
1. Ieguvumi no tautsaimniecības nozares eksporta īpatsvara palielināšanās	0	0
3. Ieguvumi no produktivitātes pieauguma	492 868	1
4. Ieguvumi no materiālu un enerģijas patēriņa uz vienu saražoto vienību samazināšanās	0	0
4. Ieguvumi no kaitējuma apkārtējai videi samazināšanās	0	0
5. Produkta pārdošanas ieņēmumi	40 317 191	99
Izmaksas	Kopējā vērtība (lati, diskontēta)	Procenti no izmaksu kopsummas
1. Produkta izstrādes izmaksas	300 000	1
2. Produkta ražošanas izmaksas	32 253 753	99

* pret nulles alternatīvu – produkts, tehnoloģija netiek ieviesta, t.i., projekts netiek īstenots.

SECINĀJUMI

1. Ūdens dezinfekcijai ar elektrolīzi var izmantot dziļā vakuumā termiski apstrādāta TiO_{2-x} keramiku. Tā ir strāvu vadoša, un to var izmantot elektrodu materiālu izgatavošanai. Eksperimentāli uzņemtās TiO_{2-x} keramikas elektrodu voltamperogrammas un izmērītie potenciāli rāda, ka elektrodi elektrolīzes apstākļos, kas nodrošina ūdens dezinfekciju, ir stabili.
2. TiO_{2-x} keramikas elektrodu darbības efektivitāte, izdalot hloru pie nelielām hlorīda jonu koncentrācijām ūdenī, ir salīdzināma ar zinātniskajā literatūrā par perspektīviem atzītiem cēlmetālu elektrodu materiāliem. Izdalītā Cl_2 daudzums palielinās, pieaugot hlorīda jonu koncentrācijai šķīdumā un palielinoties elektriskās strāvas intensitātei un elektrolīzes laikam.
3. Elektrolīzes procesā caur šķīdumu plūstošais lādiņš ietekmē šķīduma pH un oksidēšanās-reducēšanās potenciālu. Oksidēšanās-reducēšanās potenciāls jūkami palielinās elektrolīzes laikā, ja izmantotais šķīdums satur halogēna jonus. Zinot ūdens ķīmisko sastāvu, hlora koncentrācijas mērīšanai pēc elektrolīzes var izmantot šķīduma oksidēšanās reducēšanās potenciāla mērītāju.
4. Ūdenī sastopamie dominējošie joni samazina elektrolīzes procesā ģenerētā hlora daudzumu. Ūdens cietību veidojošo jonu (Ca^{2+} , Mg^{2+}) un HCO_3^- daudzuma pieaugums ūdenī veicina nogulšņu (CaCO_3 un $\text{Mg}(\text{OH})_2$) veidošanos uz katoda elektroda un samazina kopējo elektroķīmiski ģenerētā hlora daudzumu elektrolīzes procesā.
5. Elektrolīzes procesā, izmantojot TiO_{2-x} elektrodus, ja šķīdumā ir hlorīda joni ar koncentrāciju, kāda ir sastopama dabas ūdeņos (7 – 250 mg/L), var veidoties pietiekams daudzums aktīvā hlora, lai šķīdumā 15 minūšu laikā nogalinātu vairāk kā 99% *Escherichia coli* un *Pseudomonas fluorescens* baktēriju. Tika konstatēts, ka elektrolīzes metodi var izmantot arī *Bacillus subtilis* sporu dezaktivēšanai ūdenī. Pētījums rāda, ka elektrolizētam hlorīda jonus saturošam ūdenim piemīt paliekošs dezinficējošs efekts, kas saglabājas vairākas dienas.
6. Energoefektīvāk ir palielināt elektrodu skaitu elektrolīzes šūnā, jo tādējādi samazinās šūnas kopējā pretestība, bet izdalītā Cl_2 daudzums praktiski nemainās, savukārt strāvas īpatnējais darbs 1 mg Cl_2 izdalīšanai samazinās.
7. Pamatojoties uz eksperimentāli iegūtiem datiem un izmantojot *Chick – Watson* dezinfekcijas modeli izstrādāts matemātiskais vienādojums, kas ļauj prognozēt elektroķīmiskās dezinfekcijas efektivitāti.

LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Feng, C.; Suzuki, K.; Zhao, S.; Sugiura, N.; Shimada, S.; Maekawa, T. Water disinfection by electrochemical treatment. *Bioresource Technology* **2004**, *94*, 21–25.
2. Watts, R. J.; Wyeth, M. S.; Finn, D. D.; Teel, A. L. Optimization of Ti/SnO₂–Sb₂O₅ anode preparation for electrochemical oxidation of organic contaminants in water and wastewater. *J. Appl. Electrochem.* **2008**, *38*, 31–37.
3. Kraft, A.; Stadelmann, M.; Blaschke, M. Anodic oxidation with doped diamond electrodes: a new advanced oxidation process. *Journal of Hazardous Materials*, **2003**, *B103*, 247–261.
4. Zhu, X.; Ni, J.; Lai, P. Advanced treatment of biologically pretreated coking wastewater by electrochemical oxidation using boron-doped diamond electrodes. *Water research*, **2009**, *43*, 4347 – 4355.
5. Diebold, U. The surface science of titanium dioxide. *Surface Science reports* **2003**, *48*, 53-229.
6. Song, S. H.; Wang, X.; Xiao, P. Effect of microstructural features on the electrical properties of TiO₂. *Materials Science and Engineering* **2002**, *B94*, 40 – 47.
7. Kraft, A. Electrochemical water disinfection: a short review. *Platinum Metals Rev.*, 2008, *52*, (3), 177-185.
8. Das, B.; Hazarika, P.; Saikia, G.; Kalita, H.; Goswami, D. C.; Das, H. B.; Dube, S. N.; Dutta, R. K. Removal of iron from groundwater by ash: A systematic study of a traditional method. *Journal of Hazardous Materials* **2007**, *141*, 834-841.
9. Kraft, A.; Stadelmann, M.; Blaschke, M.; Kreysig, B.; Sandt, F.; Schroder, J.; Rennau, J. Electrochemical water disinfection Part I: Hypochlorite production from very dilute chloride solutions. *J. Appl Electrochemistry*. **1999**, *29*, 861-868.
10. White, G. C. Handbook of chlorination and alternative disinfectants, 4th ed. *John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto* **1999**, 1569.
11. Hoff, J. C. Inactivation of microbial agents by chemical disinfectants, EPA/600/2- 86/067. *U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio* **1986**.
12. – <http://www.fm.gov.lv/> – Resurss apraksts 2013. g. 8. janvārī.