

საქართველოს განათლებისა და მეცნიერების სამინისტრო

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

*ხელნაწერის უფლებით*

## აკაკი კაკაურიძე

ელექტროწიდური გადადნობის ლუმელის  
არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის  
კონსტრუქციის დამუშავება და კვლევა საშემდუღებლო  
საელექტროდე მასალების მიღების მიზნით

0408 - მექანიკის ინჟინერია და ტექნოლოგია

ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის

მოსაპოვებლად წარდგენილი

## ავტორეფერატი

ქუთაისი

2017

## აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

სამეცნიერო ხელმძღვანელები:

- ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი, ემერიტუსი მარლენ შალამბერიძე
- აკადემიური დოქტორი, პროფესორი პარმენ ყიფიანი

ოფიციალური რეცენზენტები:

- აკადემიური დოქტორი, პროფესორი ომარ ზივზივაძე;
- აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი სვეტლანა მინდაძე.

დაცვა შედგება \_ 26. 12.\_ 2017 წ. 14 სთ. საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის

სადისერტაციო საბჭოს მიერ შექმნილი სადისერტაციო კომისიის სხდომაზე.

მისამართი: 4600 ქ.ქუთაისი, თამარ მეფის ქ. №59, I კორპუსი, აუდ. № 1114

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში. მისამართი: ქ.ქუთაისი, თამარ მეფის ქ. №59

ავტორეფერატი დაგზავნილია «\_24\_» \_\_\_11\_\_\_2017 წ.

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,

ასოცირებული პროფესორი

/ნ. სახანბერიძე/

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

**თემის აქტუალობა.** მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში: აშშ, იაპონია, ჩინეთი, ინგლისი, უკრაინა და სხვა ფართოდაა გავრცელებული ელექტრომეტალურგის ისეთი დარგი, როგორცაა ლითონების ელექტროწიდური გადადნობა. მისი დანიშნულებაა ჩვეულებრივი მეტალურგიული მეთოდებით მიღებული ფოლადების ხელმეორედ გადამუშავება მათი სტრუქტურის, მექანიკური და ფიზიკური თვისებების გაუმჯობესების მიზნით. დიდი რაოდენობით ელექტრული ენერჯის მოხმარების გამო ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული ფოლადის ღირებულება მაღალია (ორჯერ მეტი, ვიდრე მეტალურგიული მეთოდებით მიღებული ფოლადებისა). ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას თბური დანაკარგების შემცირება შესაძლებელია შემოთავაზებული არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის და პროცესის ახალი სქემის გამოყენებით, რაც მნიშვნელოვნად შეამცირებს ელექტროწიდური გადადნობის ფოლადის თვითღირებულებას. შემოთავაზებული კრისტალიზატორის კონსტრუქციის დამუშავება და კვლევა წარმოადგენს შემოთავაზებული სადისერტაციო ნაშრომის მიზანს, ამიტომ იგი აქტუალურია.

**კვლევის მიზანი.** დამუშავებული იქნას ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორი და ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ახალი სქემა; შემცირებულ იქნას დენის დაშუნტვა გადადნობის პროცესში; გაზრდილი იქნას წიდის აბაზანის ფორმის კოეფიციენტი პროცესის თბური დანაკარგების შემცირების მიზნით.

**კვლევის საგანი.** ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია, ტექნოლოგია და გადადნობის ახალი სქემა.

### კვლევის ამოცანები:

1. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სქემების და კრისტალიზატორის კონსტრუქციების ანალიზი.
2. არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის კვლევისათვის მოდელის შექმნა.
3. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას დანადგარის კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენის სიდიდეზე მოქმედი ფაქტორების კვლევა.

4. არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში ელექტრული ველის კვლევა.

5. ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული ლითონის კვლევა მისი რკალური შედუღებისათვის საელექტროდე მასალად გამოყენების მიზნით.

#### **სამეცნიერო სიახლე:**

1. დამუშავებულია არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია და შემოთავაზებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ახალი სქემა.

2. შექმნილია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ფიზიკური მოდელი და მისი საშუალებით გამოკვლეულია წიდის აბაზანაში ელექტრული ველი.

დადგენილია, რომ არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში ელექტრული ველის პოტენციალის მაღალი კონცენტრაცია კრისტალიზატორის კედლის მახლობლად, ხოლო კრისტალიზატორის ღერძის გასწვრივ სივრცეში ელექტრული ველის კონცენტრაცია დაბალია.

3. დადგენილია, რომ არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის წიდის აბაზანის შიდა მოცულობაში ელექტრული ველის გათანაბრება შეიძლება ელექტროწიდური გადადნობის ახალი სქემის შემთხვევაში: როცა დნობის პროცესში ერთდროულად ზედა არადნობად და დნობად ელექტროდებზე მოდებულია კვების წყაროდან ერთი და იგივე პოტენციალი.

4. დადგენილია, რომ ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორისა და ახალი სქემით ლითონის ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანის ფორმის კოეფიციენტი მიახლოებულია ერთთან, რაც იწვევს კრისტალიზატორის წარმადობის ზრდას და თბური დანაკარგების შემცირებას.

5. დამუშავებულია ელექტროწიდური გადადნობის მათემატიკური მოდელი, რომლის მიხედვითაც სასრული სხვაობის მეთოდის გამოყენებით ნაჩვენებია, რომ ელექტრული ველის ცვლილების სურათი იდენტურია ფიზიკური მოდელის მიხედვით კვლევის შედეგისა. რაც საშუალებას იძლევა მომავალში არადნობადელექტროდებიანი

კრისტალიზატორით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ელექტრული ველი (ტემპერატურული ველის) გამოვიკვლიოთ მათემატიკური მოდელის მიხედვით.

6. კვლევებმა აჩვენეს, რომ ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული ლითონის ნავთობგაზსადენების მილების შედუღებისათვის საელექტროდუე მასალად გამოყენების შემთხვევაში პრაქტიკულად ბზარების წარმოქმნის ალბათობა ნულის ტოლია.

**კვლევის მეთოდები.** დასმული ამოცანების გადასაწყვეტად გამოყენებული იქნა კვლევის კომპლექსური მეთოდები, რომლებიც მოიცავს:

- ელექტროწიდური გადადნობის ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორის და პროცესის სქემის ექსპერიმენტულ გამოყენებას;
- სასრული სხვაობების მეთოდის გამოყენებას მათემატიკური და ფიზიკური მოდელირების გამოყენებით;
- დენის ძალისა და ტემპერატურის გამზომ თანამედროვე საშუალებებს.

**სამუშაოს პრაქტიკული მნიშვნელობა:**

- ფიზიკური მოდელით ელექტრული ველის კვლევის შედეგების მიხედვით გაზრდილი დიამეტრის მქონე არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ტექნოლოგიის დამუშავებისას წიდის აბაზანაში ელექტრული ველის გათანაბრების მიზნით შესაძლებელია განსაზღვრული იქნას კვების წყაროდან მიწოდებული ძაბვის სიდიდე;
- კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია და პროცესის ახალი სქემა შესაძლებელია გამოყენებული იქნას როგორც ლითონური ფხვნილოვანი, (ბურბუშელისებური), ასევე არალითონური მასალების ელექტროწიდური გადადნობისათვის;
- ელექტროწიდური გადადნობის ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორის პრაქტიკული გამოყენებისა და შემდგომი სრულყოფისათვის აუცილებელია ელექტრული და ტემპერატურული ველების კვლევა, რაც შეიძლება შესრულდეს სასრული სხვაობების მეთოდით და მათემატიკური მოდელის გამოყენებით.

### **დაცვაზე გამოტანილი დებულებები:**

1. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია.
2. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ახალი სქემა.
3. არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ფიზიკური მოდელი და მისი კვლევის მიხედვით მიღებული შედეგები.
4. ნავთობგაზსადენების მილების ელექტრორკალური შედუღებისათვის ლითონის ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული ფოლადის საელექტროდე მასალა.

### **სამუშაოს შედეგების დანერგვა:**

1. დამუშავებული კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია და ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ახალი სქემა გამოყენებული იქნება: საპასუხისმგებლო ნაკეთობების დეტალების დამზადებისათვის და ხარისხიანი ფოლადის გამოსადნობად.
2. სარემონტო სამუშაოებისათვის მანქანათმშენებლობაში და ლეგირებული ფოლადის წარმოებაში;
3. მაღალტემპერატურული ღუმელის გამოყენება მყარი ნარჩენების გადამუშავებისათვის გარემოს დაცვის მიზნით;
4. გამოდნობილი ხარისხიანი ფოლადი გამოყენებული იქნება საპასუხისმგებლო ნაკეთობების შედუღებისათვის საელექტროდე მასალად.

**სამუშაოს აპრობაცია:** სადისერტაციო კვლევის ძირითადი დებულებები და შედეგები წარმოდგენილი იყო სამეცნიერო მოხსენებებში: აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის ყოველწლიურ სამეცნიერო-ტექნიკურ სემინარებზე; II , III და IV საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციებზე „ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ (ქუთაისი, 2010წ., 2013წ., 2015წ. 2016წ.); საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკულ ინტერნეტ-კონფერენციაზე „ინოვაციური პრობლემები და ტექნოლოგიები“ (ქუთაისი, 2011წ.); საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკულ კონფერენციაზე „თანამედროვე საინჟინრო ტექნოლოგიები და გარემოს დაცვა“ (ქუთაისი, 2016წ.).

**პუბლიკაციები:** დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 10 სამეცნიერო ნაშრომი, მათ შორის სამი პუბლიკაცია რეცენზირებად გამოცემებში, რომლებიც შესულია სადისერტაციო საბჭოს მიერ დამტკიცებულ ჩამონათვალში.

**დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა:** დისერტაცია შედგება ოთხი თავისაგან, ზოგადი დასკვნებისაგან და 78 ლიტერატურის ჩამონათვალისაგან. სამუშაო წარმოდგენილია ძირითადი ტექსტის 114 გვერდზე, შედგება 44 ნახაზის, 12 ცხრილისაგან.

### სადისერტაციო ნაშრომის შინაარსი

**შესავალში** დასაბუთებულია თემის აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია კვლევის მიზანი და ამოცანები.

**პირველ თავში** განხილულია და გაანალიზებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სქემები და კრისტალიზატორის კონსტრუქციები. დაწვრილებითაა გადმოცემული კრისტალიზატორის გაგრილების თავისებურებანი და პრობლემები. განხილულია აგრეთვე ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მოდელირების საკითხები. კერძოდ, განხილულია დნობად კრისტალიზატორში წიდის აბაზანის ტემპერატურული ველის მათემატიკური მოდელი, რადგანაც ასეთი კონსტრუქციის კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში მიმდინარე პროცესები შედარებით ახლოს უნდა იყოს ჩვენს მიერ შემოთავაზებული არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში მიმდინარე პროცესებთან. აღნიშნულ მათემატიკურ მოდელში ტემპერატურულ ველს აქვს სახე:

$$\frac{\partial}{\partial t} [C\rho T + \mu\rho h(T, T_s, T_\infty)] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \left( \frac{\partial T}{\partial Z} \lambda \frac{\partial T}{\partial Z} \right), \quad (1)$$

სადაც  $0 < r < R_Z$ , როცა  $0 < Z < S(t)$ ;  $R_1 < r < R_2$ , როცა  $S(t) < Z < H_2$ ;

$T(r, Z, T_\infty)$  – ტემპერატურა,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\lambda, C, \rho$  – თბოგამტარობის, სითბოტევადობის და სხმულის სიმკვრივის კოეფიციენტებია;

$R_1$  და  $R_2$  – დნობადი კრისტალიზატორის კედლის შიგა და გარე რადიუსებია;

$S(t)$  – კრისტალიზატორში თხევადი ლითონის დონეა;

$H$  – კრისტალიზატორში სხმულის სიმაღლეა.

$$\eta(T, T_3, T_\infty) = \begin{cases} 1, & T > T_\infty \\ e(T), & T_3 \leq T \leq T_\infty; e(T) = \frac{T - T_s}{T_\infty - T_s} \end{cases} \quad (2)$$

მათემატიკური მოდელის შესაბამისი მათემატიკური გამოსახულების ამოხსნისას სასაზღვრო პირობები ასახავენ შესაბამის უბანზე თბომიმოცვლის თავისებურებებს და აქვს სახე:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad (3)$$

სხმულის ტემპერატურული ველის ღერძის მიმართ სიმეტრიულობის სასაზღვრო პირობაა:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = \alpha_\infty (T - T_{cp}) + \varepsilon \sigma T^4(R_r, Z, t); \quad (4)$$

სხმულის კედლის გარემომცველ გარემოსთან თბომიმოცვლის პირობა;

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \alpha_1(Z, t), \quad S(t) < Z < h(t); \quad (5)$$

სადაც  $\alpha_1$  – თბოგადაცემის კოეფიციენტი;

$T$  – სხმულის ზედაპირის ტემპერატურა, °K,

$T_{cp}$  – სხმულის გარემომცველი გარემოს ტემპერატურა, °K;

$h(t)$  – წიდის დონე კრისტალიზატორში.

წიდიდან კრისტალიზატორის კედლისაკენ მიმართული სითბოს ნაკადის განმსაზღვრელი სასაზღვრო პირობაა:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \psi \varepsilon \sigma [T^4(R, Z, t) - T_4^4] \quad h(t) < Z < H; \quad (6)$$



კრისტალიზატორის შიგა კედლის გახურების პირობა აბაზანიდან გამოსხივების გზით:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{Z=0} = a_n (T - T_B). \quad (7)$$

მიუხედავად წიდის აბაზანაში მოქმედი მრავალი ფაქტორისა, მისი წინაღობა დიდი მიახლოებით შეიძლება ჩავთვალოთ როგორც აქტიური წინაღობა (ეს მტკიცდება დენის და ძაბვის ფაზით თანხვედრით). ამ პირობის გათვალისწინებით მე-3 განყოფილებაში ამოხსნილია მათემატიკური მოდელი წიდის აბაზანის ელექტრული ველის გამოკვლევის მიზნით.

პირველ თავში განხილული საკითხების საფუძველზე დადგენილია:

- თუ ელექტროწიდურ გადადნობას ვაწარმოებთ გადამეტებულ დიდ ან მცირე სიმძლავრეებზე, ვიდრე იგი საჭიროა მოცემული წარმადობისათვის, მაშინ მიიღება სხმული ზედაპირული და სტრუქტურული დეფექტებით;
- ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში დაცული უნდა იქნას საჭირო თანაფარდობა წიდის აბაზანაში გამოყოფილ სითბოსა და კრისტალიზატორიდან ართმეულ სითბოს შორის კრისტალიზატორის სწორი კონსტრუირებისა და ექსპლუატაციის შედეგად;
- თუ კრისტალიზატორს ექნებოდა არადნობადი ზედა და ქვედა ელექტროდები დამოუკიდებელი სექციებით, თითოეულ მათგანს ექნებოდა გაგრილების დამოუკიდებელი სისტემა, მაშინ გაადვილებული იქნება გამოყოფილ და ართმეულ სითბოს შორის საჭირო თანაფარდობის დამყარება.

**მეორე თავში** გაანალიზებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამდნარი ლითონის გადატანის პროცესი. მასზე მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული დესულფურაციის და დეგაზაციის პირობები.

გამოვლენილია ფაქტორები, რომლებიც მოქმედებს ლითონების გადადნობისას ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კიდევ უფრო გაუმჯობესებაზე, რომლებიც მოქმედებს წვეთის ზომებზე, წიდის აბაზანის ფორმის კოეფიციენტის გაზრდაზე. ამავე განყოფილებაში ნაჩვენებია, რომ ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას თბური

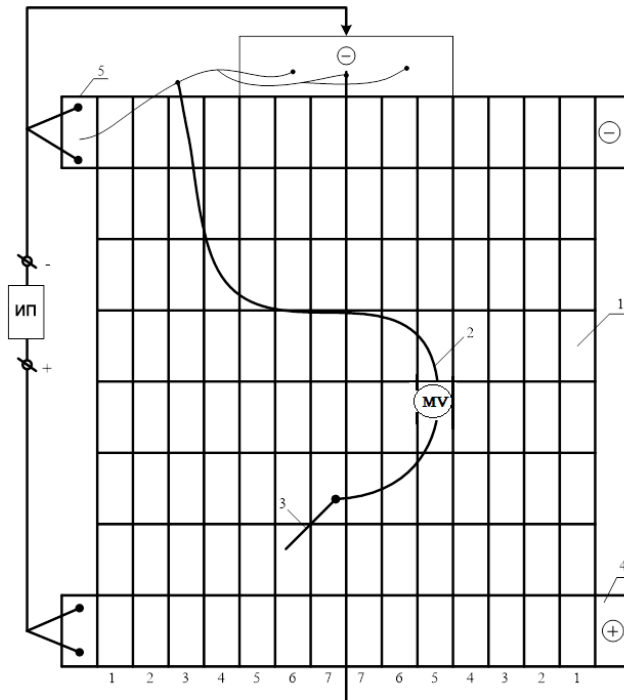
დანაკარგების შემცირება შესაძლებელია წიდის აბაზანის ფორმის კოეფიციენტის გაზრდით.

მესამე თავში მოყვანილია და გაანალიზებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში ელექტრული ველის კვლევის შედეგები.

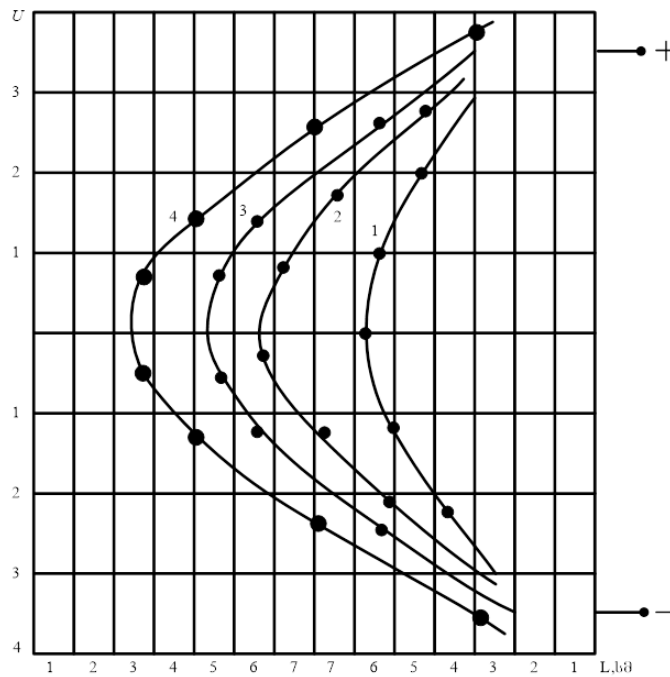
დაწვრილებითაა განხილული ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესების კვლევისათვის გამოყენებული მოდელები. მათ შორის წიდის აბაზანაში ელექტრული ველის კვლევისათვის დამუშავებულია ე.წ. ორგანზომილებიანი ფიზიკური მოდელი (სურ.1). იგი წარმოადგენს აბაზანის თანაზომად უქანგავი ფოლადის X18H9T ერთი მილიმეტრი სისქის ფურცელს, რომელზედაც გამოკვეთილია არადნობადი და დნობადი ელექტროდების დენმიმყვანები. დენმიმყვანები წინასწარ შეერთებულია დენის წყაროსთან. მილივოლტმეტრისა და საცეცის საშუალებით იზომება მოდელის ცალკეული წერტილების ელექტრული ველის პოტენციალი.

მოდელის მიხედვით გამოვლენილი იქნა, რომ წიდის აბაზანაში ელექტრული ველი არათანაბარია. კერძოდ, არადნობადი ელექტროდის კედლიდან კრისტალიზატორის ცენტრისაკენ პოტენციალის სიდიდე მცირდება. გამოვლენილი იქნა ზონა, რომელშიც პოტენციალი ნულის ტოლია. ნულოვანი პოტენციალის მდებარეობა დამოკიდებულია დენის წყაროდან მოდებული ძაბვის სიდიდეზე (სურ. 2).

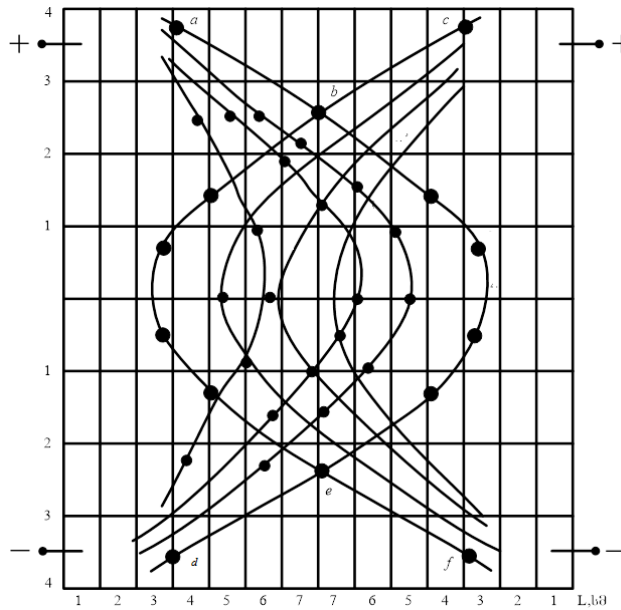
როგორც სურ.3-დან ჩანს, როცა კვების წყაროზე ძაბვა  $U=1$ ვ-ს, მაშინ კრისტალიზატორის ცენტრალურ ნაწილში, რომელიც შემოფარგლულია ფიგურით  $a b c$  და  $d e f$  დენი არ გაივლის. ე. ი. წიდის აბაზანის ამ ნაწილში სითბო არ გამოიყოფა, აქ ტემპერატურას განაპირობებს წიდის თბოგამტარობა.



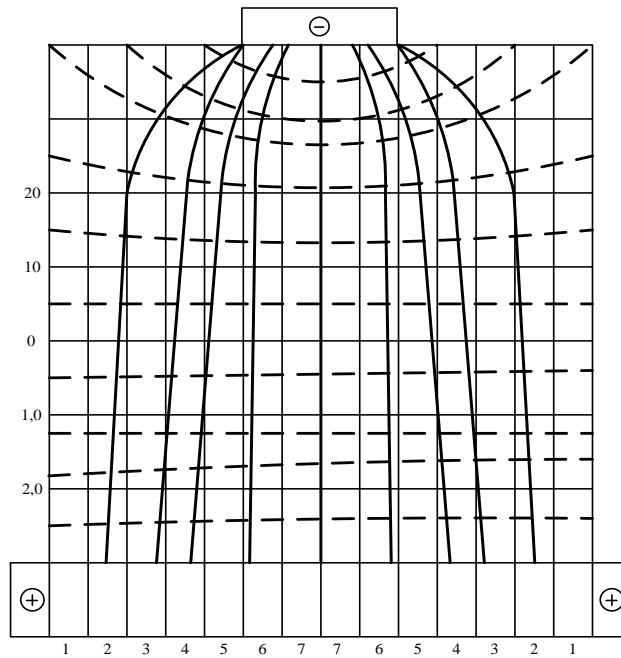
სურ. 1 წიდის აბაზანის ორგანოზომილებიანი ფიზიკური მოდელი:  
 1 - კვების წყარო, 2- სადენები, 3-შუპი, 4-ელემენტარული უჯრა ( $H=5\text{მმ}$ ,  $B=25\text{მმ}$ )  
 მასშტაბი  $M 1:2$ ;  $mv$  - მილივოლტმეტრი



სურ. 2 ექსპერიმენტული მრუდები, რომლებზეც პოტენციალი ნულის ტოლია:  
 1- $U=4$  ვ; 2- $U=3$  ვ; 3- $U=2$  ვ; 4- $U=1$  ვ



სურ. 3 ექსპერიმენტული დამოკიდებულებების მრუდები, რომლებზეც პოტენციალი ნულის ტოლია, როცა დენის წყარო მოდელთან მიერთებულია არადნობადი ელექტროდების ყველა მომჭერთან



სურ. 4 ელექტროწიდური გადადნობისას პოტენციალის განაწილება წიდაში, როცა დენის წყარო მიერთებულია დნობად ელექტროდზე და კრისტალიზატორის ძირთან (წყვეტილი ხაზი - ექვიპოტენციალური ხაზი; მთლიანი ხაზი - დენის ხაზები) არადნობად ელექტროდებიან კრისტალიზატორში ლითონის ელექტროწიდური

გადადნობისას, როცა დენის წყარო მიერთებულია მხოლოდ დნობად ელექტროდთან და კრისტალიზატორის ძირთან, როგორც ორგანოზომილებიანი ფიზიკური მოდელის კვლევები გვიჩვენებს (სურ. 4), წიდაში პოტენციალი თანაბრადაა განაწილებული.

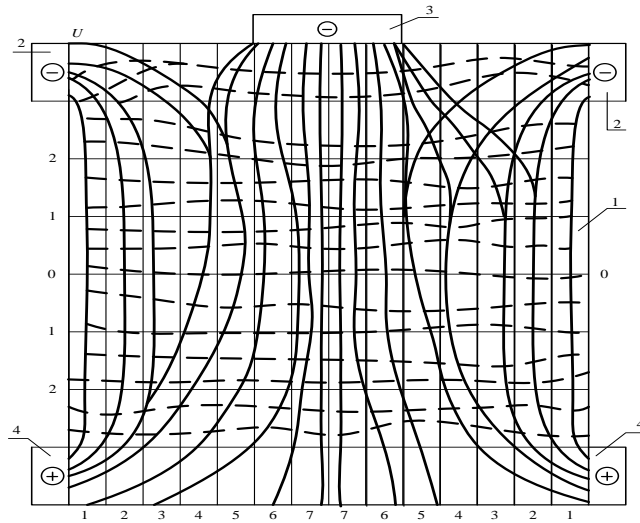
გამოკვლევებმა, რომელთა შედეგები წარმოდგენილია სურ.2, სურ.3. სურ.4-ზე მოგვცა ვარაუდის შესაძლებლობა, რომ ელექტროწიდური გადადნობის პროცესი წარიმართება, როცა ერთდროულად დენი გადის არადნობად ელექტროდებსა და დნობად ელექტროდს და კრისტალიზატორის ძირს შორის. აღნიშნულის გათვალისწინებით წიდის აბაზანაში ელექტრული ველის კვლევამ აჩვენა (სურ. 4), რომ ელექტრული ველი კრისტალიზატორის ცენტრში და კრისტალიზატორის კედლის მახლობლობაში შედარებით თანაბრადაა განაწილებული.

წიდის აბაზანაში ელექტრული ველის კვლევის საფუძველზე შეთავაზებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ახალი სქემა: ერთდროულად დენგამტარი უნდა იყოს არადნობადი ელექტროდები, აგრეთვე დნობადი ელექტროდისა და კრისტალიზატორის ძირს შორის სივრცე, თანაც არადნობად ზედა ელექტროდსა და დნობად ელექტროდზე მოდებული იქნას პოტენციალი დენის წყაროს ერთი და იმავე მომჭერიდან (სურ. 5).

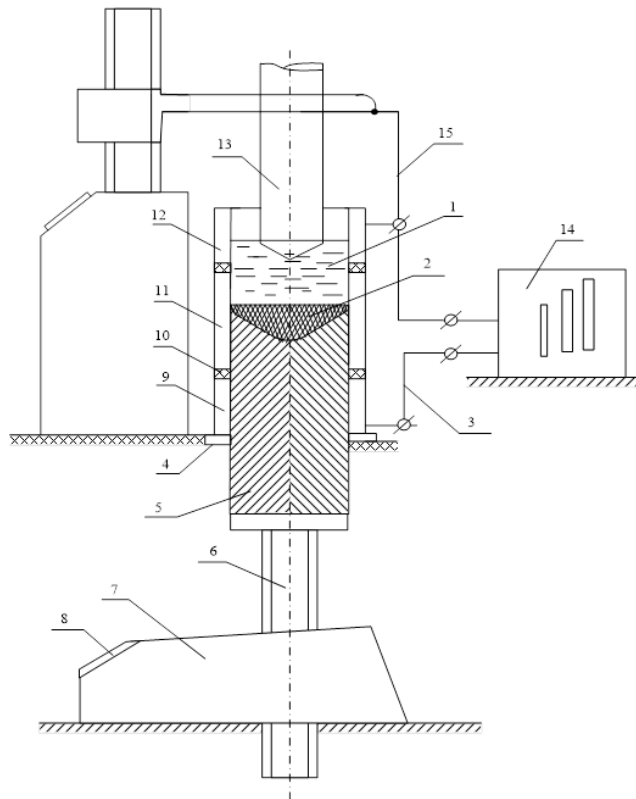
ასეთი სქემით (სურ.6) ლითონების ელექტროწიდური გადადნობა საშუალებას იძლევა: თავიდან ავიცილოთ გადადნობის პროცესში მოკლედშერთვა დნობად და ზედა არადნობადელექტროდს შორის; თბური დანაკარგების შემცირების გამო გავზარდოთ პროცესის მარგი ქმედების კოეფიციენტი.

ამავე განყოფილებაში გამოკვლეულია ელექტრული ველი წიდის აბაზანაში მათემატიკური მოდელის გამოყენებით. საკვლევ მათემატიკურ მოდელს აქვს სახე:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{p} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{p} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{p} \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (8)$$



**სურ. 5** ელექტრული ველის კვლევის სურათი, როცა გადადნობის პროცესი მიმდინარეობს ერთდროულად არადნობადი და დნობადი ელექტროდების მონაწილეობით



**სურ. 6** ლითონების ელექტროქიმიური გადადნობის ახალი სქემა:

1 - წიდის აბაზანა; 2 - ლითონის აბაზანა; 3 - კვების წყაროს კრისტალიზატორის ქვედა არადნობად ელექტროდთან დენმიმცვანი; 4 - კრისტალიზატორის ძირი; 5 - სხმული; 6 - გამოწელების მექანიზმის ხრახნი; 7 - გამოწელების მექანიზმი; 8 - მართვის პულტი; 9 - ქვედა არადნობადი ელექტროდი; 10 - საიზოლაციო ფენა; 11 - შუა სექცია; 12 - ზედა არადნობადი ელექტროდი; 13 - გამოსადნობი ელექტროდი; 14 - კვების წყარო; 15 - დენმიმცვანი; 16 - მიმწოდი

მათემატიკური მოდელი ამოხსნილია  $\rho = \text{const}$  პირობის გათვალისწინებით:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, \quad (9)$$

(9) განტოლება სასრულ სხვაობითი სახით:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{h^2}, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = \frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{h^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}}{2h}. \quad (11)$$

გამოსახულებაში (8) კერძო წარმოებულნი დიფერენციალური განტოლება იღებს სახეს:

$$4\varphi_{i,j} = \varphi_{i,j+1} + \left(1 + \frac{1}{2i}\right) \varphi_{i+1,j} + \left(1 - \frac{1}{2i}\right) \varphi_{i-1,j} + \varphi_{i,j-1} \quad (12)$$

გაშლილი სახით:

$$\left\{ \begin{array}{l} 4\varphi_{1,1} = \varphi_{1,2} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,1} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,1} + \varphi_{1,0} \\ 4\varphi_{1,2} = \varphi_{1,3} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,2} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,2} + \varphi_{1,1} \\ 4\varphi_{1,3} = \varphi_{1,3} + \left(1 + \frac{1}{2}\right) \varphi_{2,3} + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \varphi_{0,3} + \varphi_{1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ 4\varphi_{m,n} = \varphi_{m,n+1} + \left(1 + \frac{1}{2m}\right) \varphi_{m+1,n} + \left(1 - \frac{1}{2m}\right) \varphi_{m-1,n} + \varphi_{m,n-1} \end{array} \right. \quad (13)$$

სასაზღვრო პირობების გათვალისწინებით:

$i = 0 \dots 6$ ,  $\varphi_{i,0} = 4z$ ,  $j = 0 \dots 6$ ,  $\varphi_{4,j} = 2z$ . საზღვრის დანარჩენ ნაწილზე გვაქვს:

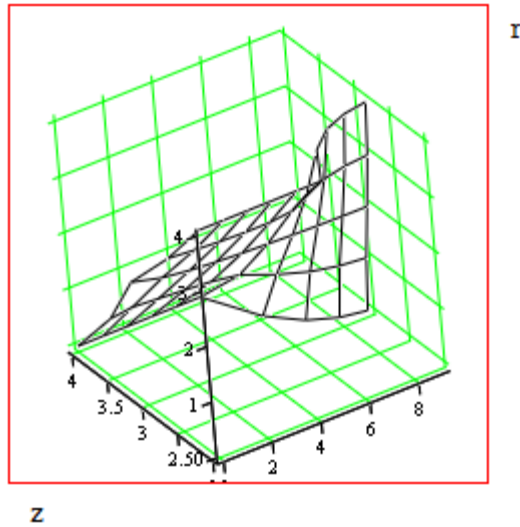
$i = 7 \dots 10$ ,  $\varphi_{i,0} = \varphi'_{i,0}$ ,  $j = 7 \dots 10$ ,  $\varphi_{4,j} = \varphi'_{4,j}$ .

$z$  ღერძის მიმართ სიმეტრიის გამო, გვაქვს:  $\varphi_{i,0} = \varphi'_{i,0}$ ,  $\varphi_{i,10} = \varphi''_{i,10}$ ,  $i = 1 \dots 4$ .

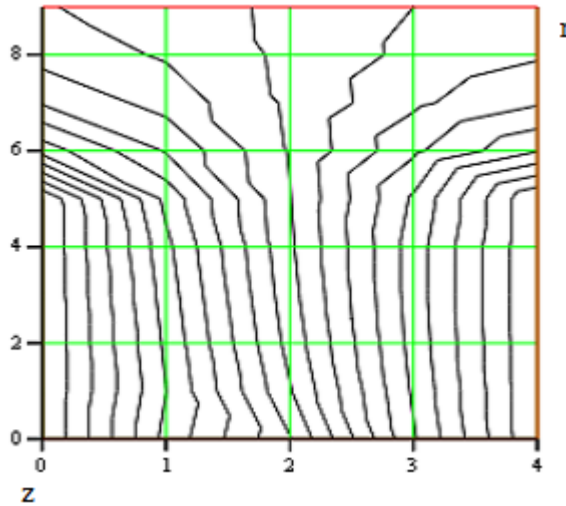
მათემატიკური მოდელით გაანგარიშების შედეგები მოცემულია ცხრ.1-ში, სურ.7-ზე და სურ.8-ზე. ისინი გვიჩვენებენ, რომ ფიზიკური და მათემატიკური მოდელებით მიღებული ელექტრული ველის სურათები ანალოგიურია, რაც საშუალებას იძლევა გავაკეთოთ დასკვნა: ელექტროწიდური გადადნობისას თხევადი წიდის ელექტრული ველის შემდგომ კვლევებში შეიძლება ვისარგებლოთ წარმოდგენილი მათემატიკური მოდელით.

ცხრილი 1. მათემატიკური მოდელით გაანგარიშების შედეგები

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Phi =$	4	4	4	4	4	4	3.457	3.191	3.061	3.007
1	3.469	3.503	3.48	3.455	3.428	3.371	3.192	3.062	2.989	2.956
2	3.108	3.01	2.965	2.938	2.918	2.905	2.893	2.884	2.878	2.875
3	2.512	2.484	2.463	2.451	2.452	2.483	2.619	2.719	2.775	2.8
4	2	2	2	2	2	2	2.406	2.611	2.713	2.755



სურ: 7 პოტენციალის განაწილების გრაფიკი (ზედაპირი)



სურ.8 პოტენციალის კონტურული გრაფიკი



**მეოთხე თავში** გამოკვლეულია, რომ ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული გაუმჯობესებული თვისებების მქონე ფოლადი შეიძლება გამოყენებული იქნას სხვადასხვა საპასუხისმგებლო კონსტრუქციის, მათ შორის ნავთობგაზსადენების ელექტრორკალური შედუღებისათვის საელექტროდე მასალად. ამ მიზნით დამუშავებულია მეთოდთა ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული საელექტროდე მასალის შედუღებულ კონსტრუქციებში ცხელი ბზარების წარმოქმნის კვლევისათვის. მოყვანილია მასალების მეტალოგრაფიული და ექსპერიმენტული კვლევის შედეგი:

1. მნიშვნელოვანია საშემდუღებლო მასალების (მავთულის) სისუფთავის გავლენა შენადული შეერთების ხარისხზე;
2. მნიშვნელოვანია გოგირდისა და ფოსფორის შემცველობის გავლენა შენადულ ნაკერში კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის პროცესზე, განსაკუთრებით მაღალნახშირბადოვანი ფოლადების შედუღებისას;
3. საშემდუღებლო მავთულში გოგირდისა და ფოსფორის რაოდენობის შემცირებასთან ერთად იზრდება შესადუღებელი მასალების წინააღმდეგობა კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის მიმართ, როგორც ერთგავლიანი, ისე მრავალგავლიანი შედუღებისას;
4. გოგირდისა და ფოსფორის რაოდენობის შემცირება საშემდუღებლო მავთულში 0,01%-ით უზრუნველყოფს უდეფექტო (კრისტალიზაციური ბზარების გარეშე) შენადული შეერთების მიღებას.

## პირითადი დასკვნები

1. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის არსებული სქემების ანალიზი აჩვენებს, რომ ყველა შემთხვევაში კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესები განსაზღვრავენ გადადნობით მიღებული სხმულის საჭირო სტრუქტურას, შემადგენლობას და ხარისხს. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას სხმულის საჭირო შემადგენლობის, სტრუქტურის, ხარისხთან ერთად წარმადობის, დაბალი თვითღირებულების უზრუნველყოფა შესაძლებელია, თუ გადადნობის პროცესში დაცული იქნება საჭირო თანაფარდობა წიდის აბაზანაში გამოყოფილ სითბოსა და გადადნობის პროცესის დროს ართმეული სითბოს შორის.
2. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილ სითბოსა და გადადნობის პროცესის დროს ართმეულ სითბოს შორის თანაფარდობის რეგულირება შესაძლებელია შემოთავაზებული არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორით და არადნობადიელექტროდების კვების წყაროსთან მიერთება იძლევა საშუალებას გამდნარი წიდის არსებობა არ იყოს დამოკიდებული დნობად ელექტროდზე. ეს შესაძლებელს ხდის დნობადი ელექტროდის შეცვლისას შენარჩუნებული იქნას წიდა თხევად მდგომარეობაში. აღნიშნული კრისტალიზატორით შესაძლებელია არალითონური მასალების და ფხვნილოვანი მასალების გადადნობა. დნობადი ელექტროდის და ზედა არადნობადი ელექტროდის ერთდროულად მიერთება დენის წყაროს ერთი და იმავე მომჭერთან (პოტენციალზე) იძლევა საშუალებას მაქსიმალურად მიახლოებული იქნას ფორმის კოეფიციენტი 1-თან, ამით მნიშვნელოვნად შეიძლება გავლენის მოხდენა წიდის აბაზანის თბურ მდგომარეობაზე.
3. ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორში თბური პროცესების მართვის პირობების გაუმჯობესება საშუალებას იძლევა ხელი შეუწყოს წიდის ქერქსა და

კრისტალიზატორს შორის თხევადი წიდის არსებობას. ამით გაუმჯობესდება ლითონის სხმულის ხარისხი.

4. დამუშავებულ ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორში არსებობს თბური პროცესების მართვის გაზრდილი შესაძლებლობა და ამით დნობადი ლითონის დნობის პროცესის მართვა, სხმულის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების კიდევ უფრო გაუმჯობესებით, არსებული კრისტალიზატორით მიღებული სხმულის თვისებებთან შედარებით.
5. ახალი სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ფორმის კოეფიციენტის გაზრდის გამო, კრისტალიზატორში თბური დანაკარგები მცირდება და იზრდება ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მარგი ქმედების კოეფიციენტი.
6. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მიმდინარეობას განსაზღვრავს თხევადი წიდის ელექტრული ველი, რომლის კვლევა არადნობადელექტროდებიანი ახალი კონსტრუქციის კრისტალიზატორისათვის შესაძლებელია ფიზიკური მოდელის მიხედვით.
7. არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის კვლევის ორგანზომილებიანი ფიზიკური მოდელი წარმოადგენს უქანგავი X18H9T ფოლადისაგან დამზადებულ თხელ ფურცელს (1 მმ-მდე სისქის), რომელსაც გააჩნია დენმიმცვანები არადნობად და დნობად ელექტროდებთან. ფოლადის ფურცლის ზომები ტოლია არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის შიგა სივრცის ღერძის გასწვრივ კვეთის ზომებისა. მასში გადის გადადნობის დენის თანაზომადი დენი. პოტენციალს ცალკეულ წერტილებში საზღვრავენ საცეცის და მილივოლტმეტრის საშუალებით.
8. არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ელექტრული ველის ფიზიკური მოდელით კვლევამ აჩვენა, რომ კრისტალიზატორის ღერძის მახლობელ სივრცეში პოტენციალი დაბალია. აქ ტემპერატურა განპირობებულია წიდის თბოგამტარობით. ამ სივრცის მოცულობა დამოკიდებულია არადნობადელექტროდებზე მოდებულ ძაბვაზე.

9. ფიზიკური მოდელის მიხედვით ელექტრული ველის კვლევამ აჩვენა, აგრეთვე, რომ ახალი სქემით ელექტროწიდური გადადნობისას, როცა კვების წყაროს ერთი და იგივე მომჭერი მიერთებულია ერთდროულად ზედა არადნობად და დნობად ელექტროდზე, წიდაში ელექტრული ველის განაწილება კრისტალიზატორის კედელთან და ცენტრში პრაქტიკულად ერთნაირია.
10. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მათემატიკური მოდელირების შედეგების შედარება, ფიზიკური მოდელის მიხედვით ელექტრული ველის კვლევის შედეგებთან გვიჩვენებს, რომ მათემატიკური მოდელირება შეიძლება წარმატებით გამოყენებული იქნას ელექტროწიდური პროცესის ელექტრული ველის კვლევისათვის.
11. ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული ფოლადის ნავთობგაზსადენების მიღების ელექტრორკალური შედუღებისას საელექტროდე მასალად გამოყენების შემთხვევაში, შენადული ნაკერის ზონაში მნიშვნელოვნადაა შემცირებული ბზარების წარმოქმნის ალბათობა.

**ძირითადი ნაშრომების ჩამონათვალი, რომლებშიც გამოქვეყნებულია დისერტაციის  
შედეგები**

1. ფხაკაძე თ., კაკაურიძე ა., შალამბერიძე მ., გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების ელექტროკონტაქტური შედუღების ხარისხის კონტროლის კომპიუტერული სისტემა, საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ენერგეტიკა: „რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ქუთაისი, 2010 წელი, გვ. 212-215.
2. კაკაურიძე ა., ფხაკაძე თ., შალამბერიძე მ., ხვადაგიანი ა., ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის საკითხები, საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული ინტერნეტ-კონფერენცია: „ინოვაციური პრობლემები და ტექნოლოგიები“, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ქუთაისი, 2011 წელი. გვ. 44-46.
3. შალამბერიძე მ., კაკაურიძე ა., ფხაკაძე თ., სულამანიძე ა., ელექტრული ველი ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას, მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ენერგეტიკა: „რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ქუთაისი, 2013 წელი, გვ. 188-193.
4. კაკაურიძე ა., ზივზივაძე ლ., ცქიფურიშვილი თ., შალამბერიძე მ., ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორში გამავალი დენების განსაზღვრა და მათ სიდიდეზე მოქმედი ფაქტორების კვლევა, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „მოამბე“, №3, ქუთაისი, 2014 წელი. გვ. 82-86.
5. კაკაურიძე ა., ცქიფურიშვილი თ., შალამბერიძე მ., ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ელექტრული ველის კვლევა, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, მესამე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ენერგეტიკა: „რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“, ქუთაისი, 2015 წელი, გვ. 273-277.
6. შალამბერიძე მ., კაკაურიძე ა., ცქიფურიშვილი თ., ფხაკაძე თ., გეგუჩაძე ა., ელექტროწიდური გადადნობის ღუმელი ტექნოლოგიური და საყოფაცხოვრებო

ნარჩენების წვისა და გადადნობისათვის, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია „თანამედროვე საინჟინრო ტექნოლოგიები და გარემოს დაცვა“, ქუთაისი, 2016 წელი, გვ. 59-61.

7. ყიფიანი პ., გერაძე პ., კაკურიძე ა., ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული საელექტროდო ლითონის გავლენა კრისტალიზაციური ბზარების წარმოქმნის პროცესზე, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „მომამბე“, №9, ქუთაისი, 2017 წელი, გვ. 243-254. .
8. კაკურიძე ა., მარდალეიშვილი ნ., ზივზივაძე ლ., შალამბერიძე მ., ელექტრული ველის კვლევა მათემატიკური მოდელით. Georgian Engineering News №2 (vol. 82) 2017 წელი, გვ. 25-29.
9. კაკურიძე ა., ზივზივაძე ლ., ცქიფურიშვილი თ., შალამბერიძე მ., ელექტროწიდური გადადნობისას სხმულის ფორმირების პირობები, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, მეოთხე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, ენერგეტიკა: „რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“, ქუთაისი, 2016 წელი, გვ 270-273.
10. კაკურიძე ა., ზივზივაძე ლ., სილაგაძე ს., შალამბერიძე შ., საყოფაცხოვრებო მყარი ნარჩენების გადამუშავებისათვის მაღალტემპერატურული ლუმელის გამოყენების პერსპექტივა, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია: „სასოფლო-სამეურნეო და სატრანსპორტო მანქანები: განვითარების პერსპექტივები სტანდარტიზაციის და ხარისხის მართვის თანამედროვე მოთხოვნების გათვალისწინებით“, ქუთაისი, 2017 წელი, გვ. 128-131.