

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

*ხელნაწერის უფლებით*

სოფიო სილაგაძე

ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადის ელექტროწიდური გადადნობით მიღების  
პროცესში ელექტრული ველის კვლევა

ინჟინერიის დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარდგენილი  
დისერტაციის

ავტორეფერატი

ქუთაისი 2023 წ.

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: მარლენ შალამბერიძე, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის პროფესორ-ემერიტუსი

რეცენზენტები: ომარ მიქაძე - საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის პროფესორი.

პარმენ ყიფიანი - აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის აკადემიური დოქტორი, პროფესორი.

დისერტაციის დაცვა შედგება 2023 წლის 14 სექტემბერი, 14<sup>00</sup> სთ.

საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს მიერ შექმნილ სადისერტაციო კომისიის სხდომაზე. მისამართი: ქუთაისი, თამარ მეფის ქ. # 59, აუდ. 1114

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში მისამართზე: 4600, ქ. ქუთაისი, თამარ მეფის ქ. #59

ავტორეფერატი დაიგზავნა \_\_\_\_\_  
(თარიღი)

სადისერტაციო საბჭოს  
მდივანი: \_\_\_\_\_ /ნ.სახანბერიძე/  
(თარიღი)

- შენიშვნა: 1. ავტორეფერატის ყდის ბოლო გვერდზე, ფურცლის ბოლოში უნდა მიეთითოს ავტორეფერატის გამოცემის ტირაჟი, გამომცემლობა და მისი მისამართი.  
2. ავტორეფერატის მეორე ყდა კეთდება იმ ენაზე, რომელზედაც შესრულებულია ავტორეფერატის თარგმანი.

## ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

**თემის აქტუალობა.** ტურბოგენერატორი ელექტრული ენერჯის მიღებისათვის გამოყენებულია თბოელექტროენერჯეტიკაში, მათ შორის ატომური ენერჯის პირველად წყაროდ გამოყენებული ე.წ. ატომურ ელექტროსადგურებში. ნომინალურ რეჟიმში მომუშავე ტურბოგენერატორის როტორის ბრუნთა რიცხვი შეადგენს 3000 ბრ/წთ-ში, ამიტომ იგი დამზადებული უნდა იყოს მაღალი სიმტკიცისა და მაღალი ვიბრომედეგობის ფოლადისაგან. ასეთი ფოლადების მიღების თანამედროვე მეთოდს წარმოადგენს, გაუმჯობესებული თვისებების ფოლადების მიღებისათვის ელექტრომეტალურგიაში ფართოდ გავრცელებული ე.წ. ლითონების ელექტროწიღური გადადნობის მეთოდი, სადაც ხდება ჩვეულებრივი კლასიკური მეთოდებით (მარტენის ღუმელში, კონვერტორში) მიღებული ფოლადების ხელმეორედ ელექტროწიღური გადადნობა.

ცნობილია, რომ ჩვეულებრივ ფოლადსადნობ ღუმელებში 1 ტ. ფოლადის გამოსადნობად საჭიროა  $1257 \cdot 10^3$  კჯ სითბო. ამ უკანასკნელის მისაღებად საჭიროა 1 ტონაზე 800 კვტ.სთ ელექტროენერჯია. აღსანიშნავია ისიც, რომ გაუმჯობესებული ხარისხის ფოლადების 1 ტონის ელექტროწიღური გადადნობით მიღებისათვის საჭიროა ორჯერ მეტი ელექტრული ენერჯია. ე.ი. ელექტროწიღური გადადნობით მიღებული გაუმჯობესებული ხარისხის ფოლადების ღირებულება ორჯერაა გაზრდილი და მის ღირებულებას განსაზღვრავს დახარჯული ელექტრული ენერჯის ღირებულება. აღნიშნულიდან გამომდინარე, გაუმჯობესებული ხარისხის ფოლადების თვითღირებულების შემცირება გადასადნობი დანადგარის მ.ქ.კ. გაზრდით დღემდე აქტუალურია.

ელექტროწიღური გადადნობის დანადგარის მ.ქ.კ-ის გაზრდა, როგორც ამას მკვლევარები: ფ.თავაძე, ბ.ქაშაყაშვილი, ნინუა, ბ.პატონი, ბ.მედოვარი, ჯ.ელიოტი და სხვები მიუთითებენ, საჭიროებს თბური დანაკარგების შემცირებით სასარგებლო სითბოს გაზრდას გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის განტოლებაში. ამ მიზნით საჭირო გაანგარიშებისათვის დღეისათვის აუცილებელია რთული ექსპერიმენტების, კვლევის ჩატარება ელექტროწიღური გადადნობით კონკრეტული მარკის გაუმჯობესებული ხარისხის ფოლადის მიღებისათვის.

ჩვენს მიერ შემოთავაზებული ელექტრული ველის კვლევისა და გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშების მეთოდის გამოყენებით გამარტივებულია ლითონების ელექტროწიღური გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის განტოლების და მასში შემავალი ცალკეული შემადგენლების ანალიზი, რაც აუცილებელია დასახული ღონისძიებების თბური დანაკარგების შემცირებისათვის და მ.ქ.კ.-ს გაუმჯობესებისათვის, გაუმჯობესებული ხარისხის კონკრეტული მარკის ფოლადის ელექტროწიღური გადადნობისას.

**კვლევის მიზანი და ამოცანები:** სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადის მიღების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის ელექტრული ველის კვლევა და გადადნობის პროცესისათვის საჭირო დენის გაანგარიშების მეთოდის დამუშავება.

**კვლევის ობიექტი და მეთოდები:** კვლევის ობიექტს წარმოადგენს ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადის მიღების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესი. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის სირთულისა და რეალურ პირობებში დნობების ჩატარებისა და პროცესის კვლევის სირთულის გამო გამოყენებულია მოდელირების მეთოდი, კერძოდ, დამუშავებულია:

- გადადნობის პროცესში ელექტრული ველის კვლევის ფიზიკური მოდელი;
- ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების და ქიმიური შემადგენლობის კვლევებისათვის ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის ფიზიკური მოდელი;
- ელექტროწიდური გადადნობისთვის საჭირო დენის გაანგარიშების ფიზიკური მოდელი (სქემები).

**მიზნის მისაღწევად დისერტაციაში დასმულია და გადაწყვეტილია შემდეგი ამოცანები:**

1. შემუშავებულია სწრაფსვლიანი როტორის ნამზადის მიღების ორი სხვადასხვა სქემა;
2. წინასწარი ექსპერიმენტით და მისი შედეგების ანალიზის საფუძველზე დასაბუთებულია, რომ რეალური ზომის ნამზადის მიღებისათვის კვლევები შეიძლება ჩატარებულ იქნას ელექტროწიდური გადადნობის მცირე სიმძლავრის დანადგარებზე.
3. შემუშავებულია წიდაში გამოყოფილი ე.წ. ჯოულის სითბოს გაანგარიშების ახალი მეთოდი;
4. შემუშავებულია ელექტროწიდური გადადნობისას თბური დანაკარგების განსაზღვრის მეთოდი;
5. ჩატარებული ელექტრული ველის კვლევის საფუძველზე შემუშავებულია თბური პროცესებისა და დენის გაანგარიშებისათვის საჭირო კოეფიციენტები;
6. დამუშავებულია თბური პროცესების და დენის განსაზღვრის ცდომილების განსაზღვრის მეთოდი.

**მეცნიერული სიახლე:**

გადასადნობი ლითონის და გამოყენებული წიდის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების, აგრეთვე ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის

(კრისტალიზატორის) მთავარი პარამეტრების გათვალისწინებით მიღებული მათემატიკური გამოსახულება, ელექტროწიდური გადადნობის თბური პროცესების და გადადნობისათვის საჭირო დენის განსაზღვრისათვის.

**დაცვაზე გამოტანილი დებულებებს** შეადგენს დისერტაციაში დასმული და გადაწყვეტილი თითოეული ამოცანა.

#### **ნაშრომის აპრობაცია და პუბლიკაცია:**

დისერტაციაში განხილული საკითხების და მათი შედეგების შესახებ მოხსენებული იქნა საუნივერსიტეტო და საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციებზე. დასრულებული სახით ნაშრომი განხილული და რეცენზირებული იქნა აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტის „ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციების“ დეპარტამენტის სხდომებზე.

კვლევის შედეგები მოხსენებათა სახით წარმოდგენილი იქნა V საერთაშორისო კონფერენციაზე „ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პესპექტივები.“

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია ექვს სამეცნიერო ნაშრომში.

#### **ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა:**

ნაშრომი შედგება შესავლის, ოთხი თავის, ძირითადი დასკვნებისა და დანართებისაგან. სამუშაო შეიცავს კომპიუტერზე ნაბეჭდ 140 გვერდს, 43 ნახაზს, 15 ცხრილს, 3 დანართს და გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალს.

#### **სადისერტაციო ნაშრომის შინაარსი**

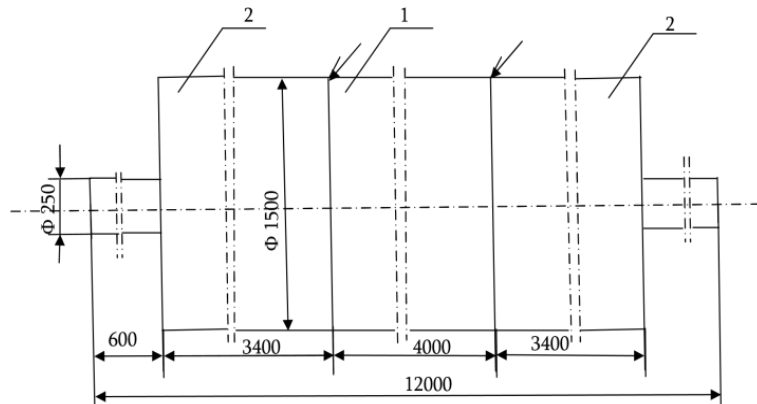
**შესავალში** დასაბუთებულია თემის აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია კვლევის მიზანი და ამოცანები.

**პირველ თავში** განხილულია და გაანალიზებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სქემები, აგრეთვე ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადის ელექტროწიდური გადადნობით მიღებისას წინასწარი კვლევის შედეგები.

ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადი წარმოადგენს ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული სამი ერთნაირი დიამეტრის მქონე და ორი შედარებით მცირე დიამეტრის ცილინდრების ერთმანეთთან ელექტროწიდური შედუღებით მიღებულ სხმულს (ნახ.1) თითოეული ცილინდრი მიღებულია Cr-Ni-Mo-V ქრომ-ნიკელ-მოლიბდენ-ვანადიუმის სისტემის შენადნობის ე.წ. როტორული

ფოლადისაგან დამზადებული დნობადი ელექტროდის ელექტროწიდური გადადნობით.

ელექტროწიდური გადადნობის ყველა განხილული სქემით მიღებული როტორის ნამზადები სიმტკიცეზე აკმაყოფილებენ ტექნიკურ მოთხოვნებს. როგორც წინასწარმა კვლევებმა აჩვენა, შედარებით მაღალი მ.ქ.კ-ით ხასიათდება ჩვენს მიერ შემოთავაზებული ელექტროწიდური გადადნობის ე.წ. არადნობად ელექტროდიანი კრისტალიზატორის სქემით გადადნობის პროცესი. კვლევებს და ანალიზს საჭიროებს ამ პროცესის დროს გამოყოფილი სრული სითბოს და თბური დანაკარგების თანაფარდობის დადგენა, გადადნობისათვის საჭირო დენის მნიშვნელობის განსაზღვრა. მსგავსი კვლევები ჩატარებულია უძრავი სქემით ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორისათვის (ნახ.2). თუმცა იგი საკმაოდ რთულია; ჩვენს მიერ შემოთავაზებულია გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის განტოლებაში შემავალი წევრების და გადადნობისათვის საჭირო დენის განსაზღვრის მეთოდი.

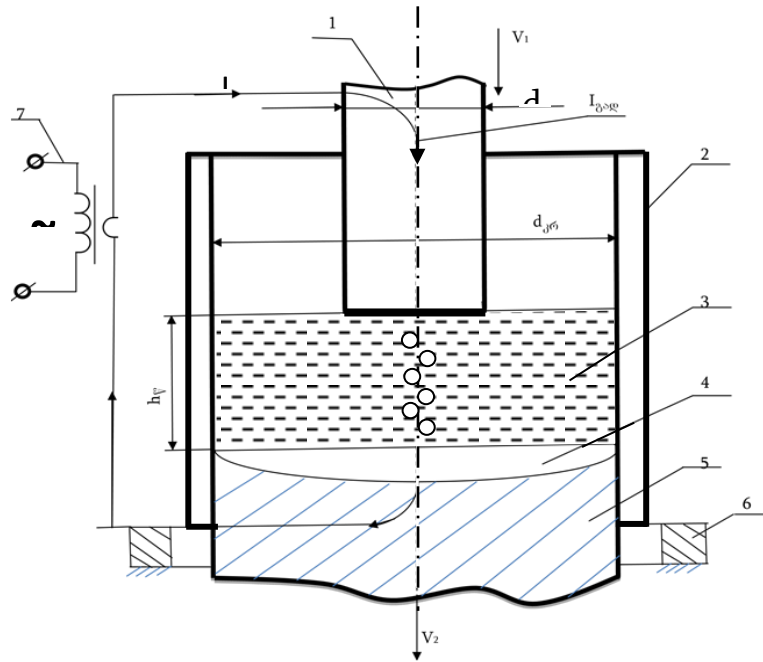


ნახ.1 ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადი.

- 1-როტორის ცენტრალური ცილინდრი;
- 2-როტორის კიდურა ცილინდრები; ნახევარისრით ნაჩვენებია შედუღების ადგილი,
- 3-კიდურა ცილინდრები, რომლებზედაც დასმულია საკისრები (სატაცები)

ამავე თავში განხილულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის მოდელირების საკითხი, კერძოდ ნაჩვენებია, რომ უძრავი კრისტალიზატორის სქემით სამრეწველო ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარით მიღებულ სხმულში არალითონური ჩანართების რაოდენობა და განაწილება, ასევე სხმულის სხვადასხვა ადგილას სიმტკიცის მახასიათებლები, ჩვენი და სხვა მრავალი გამოკვლევების მიხედვით, პრაქტიკულად ემთხვევა ლაბორატორიული დანადგარის კრისტალიზატორში მიღებული შედარებით მცირე ზომის სხმულის შესაბამის მაჩვენებლებს. ე.ი. ელექტროწიდური გადადნობის ლაბორატორიული დანადგარის კრისტალიზატორის პროცესების კვლევისა და გაანგარიშების შედეგები და მეთოდები სამართლიანია სამრეწველო დანადგარის კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესისათვის.

აღნიშნული იძლევა ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის ფიზიკური მოდელირების შესაძლებლობას, შესაბამისად კვლევები და გაანგარიშებები შესრულებული იყო 10-ჯერ შემცირებული რეალური ნამზადის მიღების (ნახ.1) პროცესისათვის.

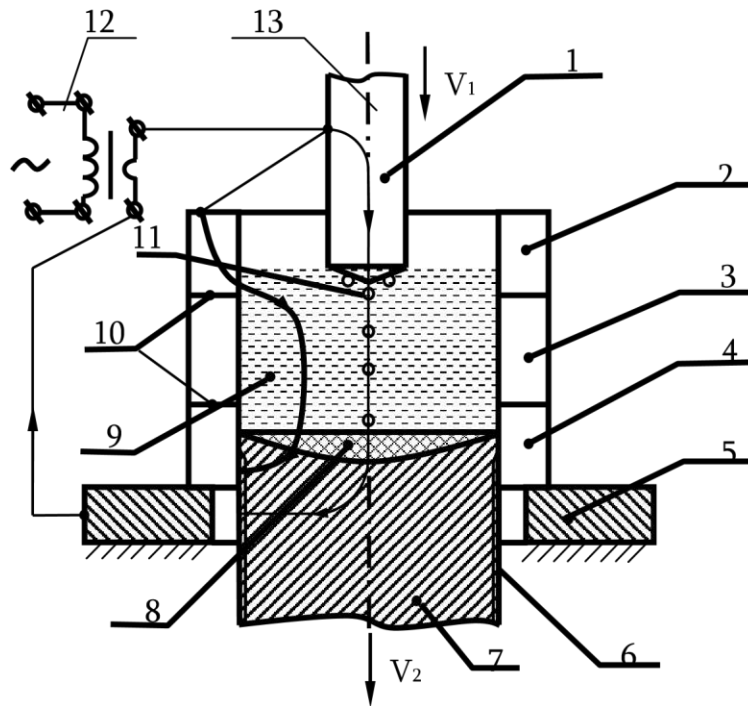


ნახ.2 ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის კლასიკური სქემა.

1-გადასადნობი ლითონის ელექტროდი; 2-კრისტალიზატორი; 3-თხევადი წილის აბაზანა; 4-თხევადი ლითონის აბაზანა; 5-გადამდნარი ლითონის სხმული; 6-კრისტალიზატორის ძირი; 7-დენის წყარო;  $I_{\text{გად}}$ -გადადნობის დენი.  $h_{\text{წილ}}$ -წილის აბაზანის სიმაღლე;  $d_{\text{კრ}}$ -კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი;  $d_{\text{ელ}}$ -გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი.

ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში თბური დანაკარგების და ელექტრული ენერგიის ხარჯის შემცირების მიზნით სწრაფსვლიანი როტორის ნამზადის წარმოებისათვის, ჩვენს მიერ შემოთავაზებულია არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ორიგინალური კონსტრუქცია.

ელექტროწიდური გადადნობისასთვის შემოთავაზებული კრისტალიზატორი ორიგინალური კონსტრუქციით, დნობადი და არადნობადი ელექტროდების შეერთების ახალი ელექტრული სქემით, მნიშვნელოვნად განსხვავდება აქამდე არსებულ სამრეწველო დანიშნულების ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარების შემადგენლობაში შემავალი კრისტალიზატორისაგან (ნახ.3).

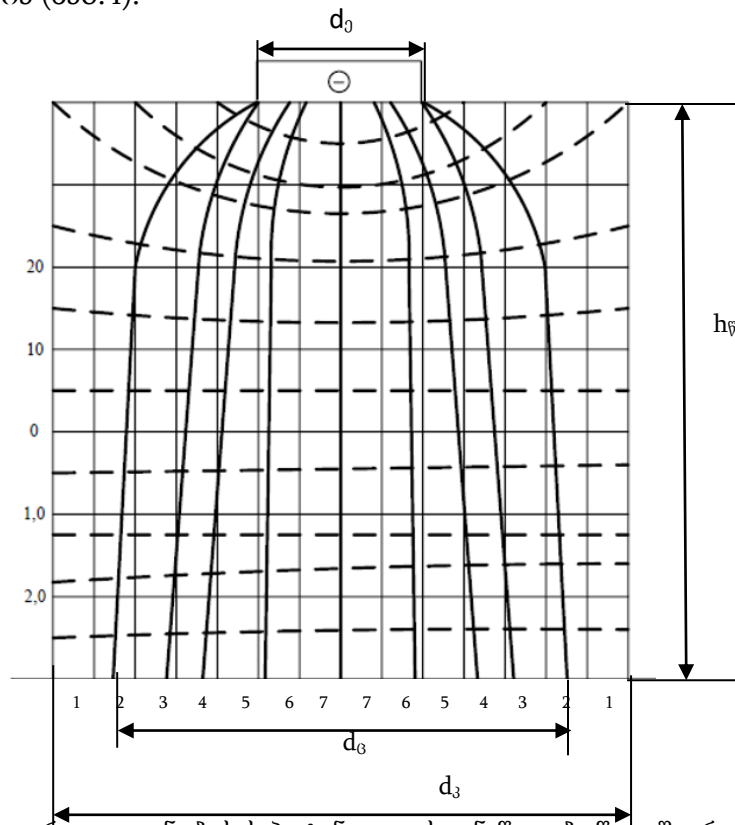


ნახ. 3 ლითონის ელექტროწიდური გადადნობის სექციებიანი კრისტალიზატორი და მისი შეერთების სქემა: 1-გადასადნობი მასალის ელექტროდი; 2-კრისტალიზატორის ზედა სექცია; 3-4-კრისტალიზატორის შუა და ქვედა სექცია; 5-კრისტალიზატორის ძირი; 6-ქერქი სხმულზე; 7-გადამდნარი ლითონის სხმული; 8- გადამდნარი ლითონის აბაზანა; 9-გადამდნარი წიდის აბაზანა; 10-სექციებს შორის საიზოლაციო ფენა; 11-ელექტროდის გადამდნარი ლითონის წვეთები; 12-დენის წყარო; 13-დენის ხაზები.



მეორე თავში მოცემულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის წიდის აბაზანის ელექტრული ველის კვლევისადმი მიძღვნილი საკითხები. კერძოდ, განხილულია ფიზიკური მოდელის დამზადების და პოტენციალის განაწილების კვლევა წიდის აბაზანის ერთ-ერთ  $d_{კრ} = d_{წ}$  ორგანოზომილებიან სიბრტყეში<sup>1</sup>.

იგი წარმოადგენს AISI 321 ლეგირებული ფოლადის 0,1 მმ სისქის ფურცელს, რომლის სიგრძე და სიგანე თანაზომადია საკვლევი წიდის აბაზანის ზომების, ხოლო მასში ატარებენ  $\approx 100$ -ჯერ შემცირებულ გადადნობისათვის საჭირო დენს. თანაც დაცულია პირობა, რომ მასზე პოტენციალის ანათვლების აღებისას, მისი გახურება ე.წ. ჯოულის სითბოს გამოყოფის გამო, არ უნდა ხდებოდეს. წიდის აბაზანის მოდელირებით გამოვლენილია, რომ დნობადი ელექტროდის წიდასთან შეხების მახლობლობაში პოტენციალის განაწილება და შესაბამისად ელექტრული ველი არაერთგვაროვანია (ნახ.4).



ნახ.4. ელექტროწიდური გადადნობისას პოტენციალის განაწილება წიდაში, როცა პოტენციალი დენის წყაროდან მოდებულია დნობად ელექტროდზე (წყვეტილი ხაზი ექვიპოტენციალური ხაზი; მთლიანი ხაზი-დენის ხაზები)

$d_3$  - დენის ხაზების შემომსაზღვრელი ცილინდრის ფუძის დიამეტრი;

1- ეს კვლევები ჩატარებული იყო მაშინ სტუდენტ, ამჟამად აკადემიურ დოქტორ აკაკი კაკაურიძესთან ერთად 2002-2006 წლებში, როცა ამ ნაშრომის ავტორი იყო სამეცნიერო ხარისხის მაძიებელი, პროფესორი მარლენ შალამბერიძის ხელმძღვანელობით.

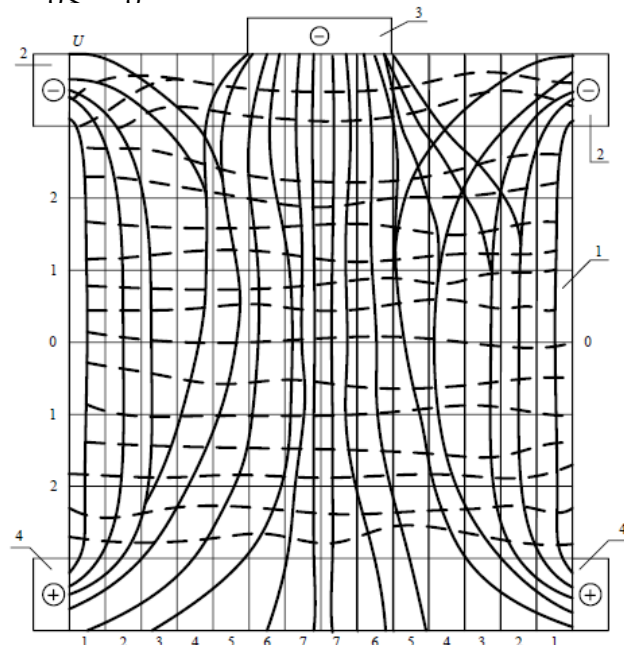
ელექტროდიდან გამომავალი დენის ხაზების გაბნევა შეიმჩნევა წიდის აბაზანაში გადასვლიდან წიდის აბაზანის მთელს სიმაღლეზე. ელექტროდიდან გამოსვლის შემდეგ წიდის აბაზანაში დენის განდინების ეფექტის რაოდენობრივი შეფასებისათვის შემოღებულია ე.წ. განდინების კოეფიციენტი, რომელიც წარმოადგენს

$$K_g = d_g/d_j \quad (1)$$

მისი სიდიდე დამოკიდებულია გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრზე, წიდის შემადგენლობაზე და იცვლება  $K_g \approx 1,3 \div 1,4$ .

დენის განდინების კოეფიციენტი ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ფაქტორია წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს და გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებისათვის.

ელექტროპოტენციალისა და დენის განაწილების განსხვავებული სურათია მიღებული არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობისას, მათი ფიზიკური მოდელით (ნახ.5) კვლევის შედეგად. აქ, დენი გადის დნობად ელექტროდსა და კრისტალიზატორის ძირს, აგრეთვე ზედა და ქვედა (2,4) არადნობად ელექტროდებს შორის. საიდანაც სჩანს, რომ წიდის აბაზანაში გამავალი დენი განაწილებულია კრისტალიზატორის კედლის მახლობლობაში, ცხადია შესაბამისად მოსალოდნელია, რომ გაზრდილი იქნება წიდაში გამოყოფილი სითბო კრისტალიზატორის კედელთან. აქედან გამომდინარე, აუცილებელია გამოკვლეული და განსაზღვრული იქნას არადნობადელექტროდიანი კრისტალიზატორის თბური დანაკარგები და გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდე, იმისათვის, რომ გამოვლენილი იქნას მისი უპირატესობა ან ნაკლი საყოველთაოდ მიღებულ სხვა კრისტალიზატორებთან შედარებით.



ნახ.5. ფიზიკური მოდელის კვლევის მიხედვით წიდაში პოტენციალის განაწილება, როცა პოტენციალი დენის წყაროდან ( $U=1$ ვ) მოდებულია არადნობად და დნობად ელექტროდებზე. 2, 4 - ზედა და ქვედა არადნობადი ელექტროდების მარჯვენა და მარცხენა დენმიმყვანები, 1,3 - მოდელის ფურცელი და დნობადი ელექტროდის დენმიმყვანი.

**მესამე თავში** მოყვანილია ელექტროწიდურ გადადნობაზე მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში, მათ შორის უკრაინაში მეცნიერების მიერ ჩატარებული გამოკვლევების ზოგიერთი შედეგები, რომლებითაც მტკიცდება, რომ ელექტროწიდური გადადნობისას დიდი თბური დანაკარგების გამო მისი მ.ქ.კ. 50%-ზე დაბალია; ახალი კრისტალიზატორის თბური ბალანსის განსაზღვრა რთული კვლევითი სამუშაოების შესრულებას მოითხოვს. ამ უკანასკნელის გამარტივების მიზნით, სამუშაოში შემოთავაზებულია თბური ბალანსის განსაზღვრისა და გადადნობისათვის სჭირო დენის გაანგარიშების სქემა (ნახ.6), სადაც მოცემულია წიდის აბაზანის მთელ სიმაღლეზე და დნობად ელექტროდში ტემპერატურის ცვლილების ხასიათი, იმის გათვალისწინებით, რომ გადადნობის პროცესი ხანგრძლივია და მათი ტემპერატურა დროში პრაქტიკულად ცვლილებას არ განიცდის. ამ სქემაში მოცემულია აგრეთვე წიდის აბაზანის და გაგრილების სისტემის განივი კვეთის ერთ-ერთ სიბრტყეში ტემპერატურის ცვლილება. თუ კრისტალიზატორი წრიული ფორმისაა, ხოლო მასში წიდის აბაზანის სიმაღლეა  $h_{\text{წ}}$ , წიდის აბაზანის სითბოტევადობა  $C_{\text{წ}}$ , ხოლო თხევად მდგომარეობაში წიდის სიმკვრივეა  $\gamma_{\text{წ}}$ , წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი ე.წ.ჯოულის სითბოს განსაზღვრისათვის მიღებულია გამოსახულება.

$$Q_{\text{წ}} = \pi d_{\text{კრ}}^2 / 4 \cdot h_{\text{წ}} \cdot c_{\text{წ}} \cdot \gamma_{\text{წ}} \cdot T_{\text{დწ}}^{\text{წ}} \quad (2)$$

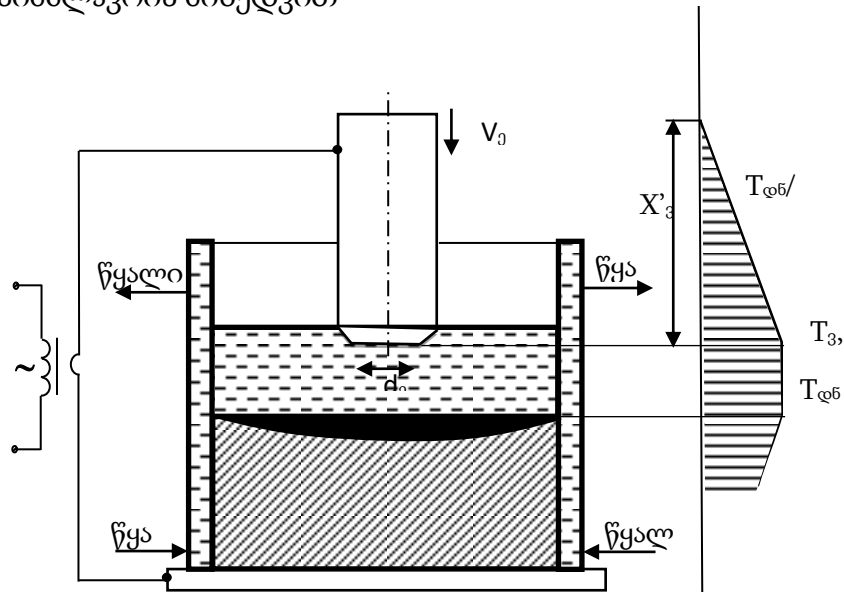
იმის გათვალისწინებით, რომ დნობადი ელექტროდიდან დენის წიდის აბაზანაში გადასვლისას ადგილი აქვს წიდაში დენის ე.წ. განდინებას  $d_{\text{გ}}$  დიამეტრით შემოსაზღვრულ ცილინდრში, აგრეთვე წიდაში გამავალი დენის განდინების დიამეტრი დამოკიდებულია გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრზე ე.წ. მოცემული კრისტალიზატორის შემთხვევაში კრისტალიზატორის ფორმის  $K$  კოეფიციენტზე, (2) გამოსახულება დებულობს სახეს:

$$Q_{1\text{წ}}^{\text{გ}} = \pi [d_{\text{კრ}}(1 - K)]^2 / 4 \cdot h_{\text{წ}} \cdot c_{\text{წ}} \cdot \gamma_{\text{წ}} \cdot T_{\text{დწ}}^{\text{წ}} \quad (3)$$

ამავე თავში განხილულია წყლით გაგრილების სექციებიანი გამაგრილებელი სისტემის მქონე კრისტალიზატორის კედლის მიერ წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს გაანგარიშების თავისებურებანი და მიღებულია მისი განსაზღვრისათვის შემდეგი გამოსახულება:

$$Q_{\text{კკ}} = Q_{\text{წ}} \cdot n \cdot \iota_k \cdot \delta_k \cdot \eta_{\text{წ}} \quad (4)$$

როგორც ნახაზიდან ჩანს, სექციებიანი გაგრილების სისტემის მქონე კრისტალიზატორის კედლიდან წიდის აბაზანის მთელ ზედაპირზე ართმეული სითბოს განსაზღვრისათვის საჭიროა ვიცოდეთ წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გარდა სექციების რაოდენობა  $n$ , მისი ზომები  $l_k, d_k$  და მარგი ქმედების კოეფიციენტი  $\eta_{\text{წ}}$ . ეს უკანასკნელი განისაზღვრება მონოგრამიდან გადადნობის დანადგარის სიმძლავრის მიხედვით



ნახ. 6. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის წიდის აბაზანიდან შეხების ზედაპირით დნობადი ელექტროდით ართმეული სითბოს გაანგარიშების სქემა

მესამე თავში მიღებულია, აგრეთვე თხევად წიდასთან შეხებაში მყოფი დნობადი ელექტროდის მიერ წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს რაოდენობის განსაზღვრის ანალიზური გამოსახულება:

$$Q'_g = k'_2 (\pi d_{\text{გდ}}^2 / 4) X'_3 \cdot C_{\text{გდ}1} \cdot \gamma_{\text{გდ}1} \cdot T_{\text{დნ}} / 30 \quad (5)$$

ამ გამოსახულებაში  $k'_2$  კოეფიციენტი ითვალისწინებს დნობადი ელექტროდის წიდაში ჩაშვებული ნაწილის ფორმას.  $X'_3$  შეესაბამება გაანგარიშებისათვის შემოთავაზებული სქემის მიხედვით გადასადნობი ელექტროდის სიგრძეს.

$C_{\text{გდ}1}, \gamma_{\text{გდ}1}, T_{\text{დნ}}$  - წარმოადგენს შესაბამისად, საელექტროდე მასალის სითბოტევადობას, სიმკვრივეს და დნობის ტემპერატურას.

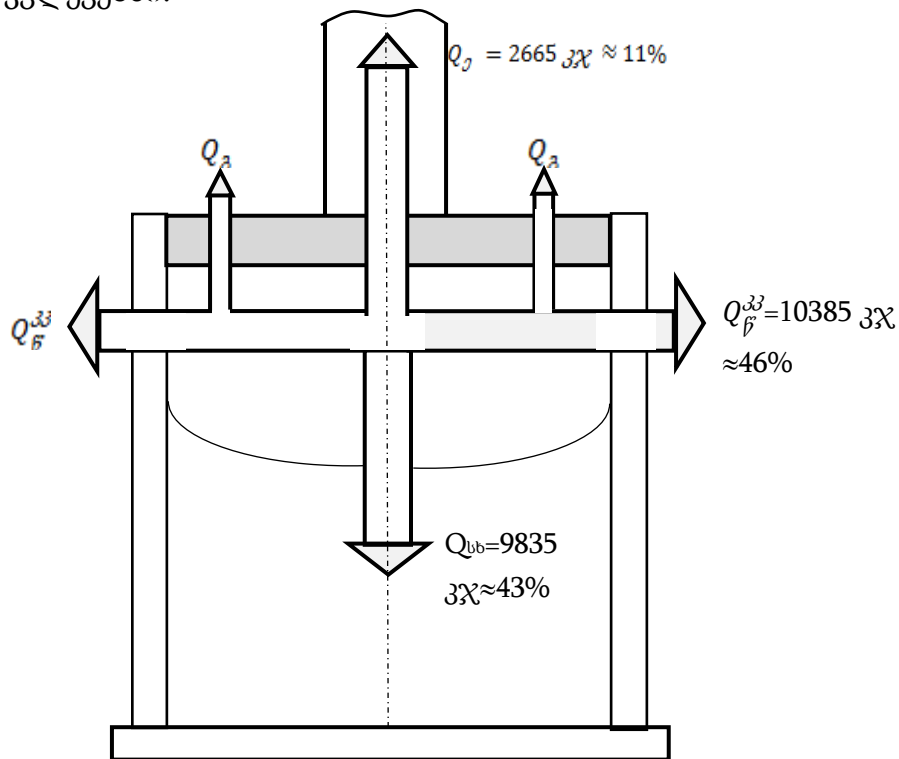
სამუშაოს ამავე თავში მიღებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის განსაზღვრის გამოსახულება:

$$I_x = \sqrt{\frac{\pi(d'_{კრ})^2 / 4 \cdot h_{წ} \cdot c_{წ} \cdot \gamma_{წ} \cdot T_{დწ}^{\prime}}{0,24R_{წ}}}$$

რომლის მიხედვითაც საკმარისია ვიცოდეთ ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანის დენგამტარი ნაწილის მოცულობა, აგრეთვე გამოყენებული თხევადი წიდის სითბოტევადობა, სიმკვრივე, წიდის დნობის ტემპერატურა და თხევად მდგომარეობაში წიდის წინალობა.

**მეოთხე თავში** წარმოდგენილია მესამე თავში შემოთავაზებული გაანგარიშების სქემის მიხედვით, კონკრეტული კრისტალიზატორისათვის, გამოთვლილი წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სრული სითბო, წიდის აბაზანიდან კრისტალიზატორის კედლიდან ართმეული სითბოს, დნობადი ელექტროდით წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს მიხედვით მიღებული თბური ბალანსის განტოლება. რომლის მიხედვითაც თბური დანაკარგები დნობად ელექტროდში შეადგენს 11%-ს, კრისტალიზატორის გაგრილების სისტემაში 46%-ს, ხოლო გადადნობილი ლითონის სხმულზე გადაცემული სითბო შეადგენს 43%. (ნახ.7).

ანალოგიური შედეგია მიღებული სხვადასხვა მკვლევარების მიერ შესრულებულ კვლევებში.



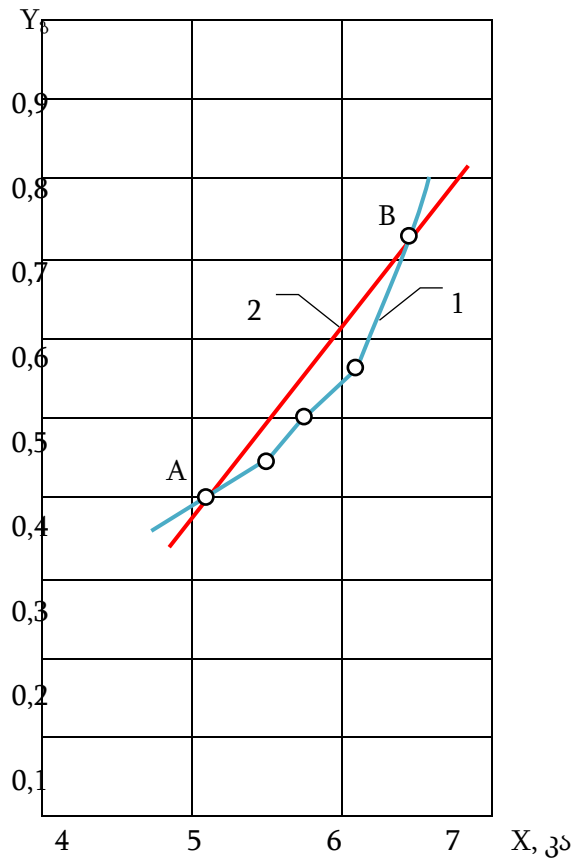
ნახ. 7. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ელექტროწიდური გადადნობის თბური ბალანსის სქემა შედგენილი გაანგარიშების მიხედვით.

განგარიშებულია აგრეთვე კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრისა და განგარიშებული დენის სიდიდეებს შორის კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტის კვლევის შედეგები. იგი დაბალია და შეადგენს 0,75-ს. რაც იმაზე მიუთითებს, რომ ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდე დამოკიდებულია კრისტალიზატორის ზომებთან ერთად მის ფორმაზე. კერძოდ კრისტალიზატორის ცილინდრულ ან პრიზმულ ფორმაზე. ამის გამო შემუშავებულია ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის ე.წ. განმაზოგადებელი პარამეტრი.

$$Y_g = (Y_{1j} + Y_{2j})Y_{3f}$$

სადაც,  $Y_{1j}$ -არის კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი;  $Y_{2j}$ -არის გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი;  $Y_{3f}$ -არის გამყარებული წიდის აბაზანის წონა.

განმაზოგადებელ პარამეტრსა და განგარიშებულ დენის მნიშვნელობას შორის კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტი მაღალია და შეადგენს 0,967-ს.



ნახ.8 დამოკიდებულება განმაზოგადებელ პარამეტრსა და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის

1-ემპირიული დამოკიდებულება

2-თეორიული დამოკიდებულება

$$y_g = (y_{1j} + y_{2j}) \cdot y_{3f}$$

განმაზოგადებელი პარამეტრების გათვალისწინებით გაანგარიშებულია სხვადასხვა ზომის კრისტალიზატორებში (ცხ.1), ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდე, შემოთავაზებული (ჩვენს მიერ მიღებული) მათემატიკური გამოსახულებით და შედარებულია ამავე კრისტალიზატორი ელექტროწიდური გადადნობისას უშუალოდ ექსპერიმენტის დროს გაზომილი დენების მნიშვნელობებთან.

**ცხრილი.1**

ელექტროწიდური გადადნობისათვის გამოყენებული გადასადნობი ელექტროდების კრისტალიზატორის შიდა დიამეტრები, აგრეთვე გადადნობისათვის საჭირო დენების გაანგარიშებული და ექსპერიმენტული მნიშვნელობები.

N	კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი,სმ	გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი,სმ	გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებული მნიშვნელობები, კა	გადადნობისათვის საჭირო დენის ექსპერიმენტული მნიშვნელობები, კა	ელექტროწიდური გადადნობისას, წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო კჯ
1	25,4	12,7	5,625	5,8	22785
2	32	16	6,477	6,5	30206
3	36	18	7,226	7,2	38229
4	48	24	9,715	8,9	67963
5	20x20	11,8x11,8	6,228	6,4	27933*
6	22,5x22,5	16x16	7,800	7,6	43886*

\* პრიზმული ფორმის კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო.

გამოთვლილია საშუალო აბსოლუტური და საშუალო ფარდობითი ცდომილებები. ეს უკანასკნელი არ აღემატება 3%-ს, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ შემოთავაზებული სქემით და მიღებული მათემატიკური გამოსახულებებით გაანგარიშების მეთოდი შეიძლება გამოყენებულ იქნას ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის ახალი ტექნოლოგიების დამუშავებისათვის, კონკრეტული ამოცანების გადასაწყვეტად (ცხ.2).

ცხრილი 2.

შემოთავაზებული სქემით ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო გაანგარიშებული  
დენების ცდომილებები

	$I_i$ , კა	$(I_i)_{საანგარ}$ , კა	$\xi$	$\bar{\xi}$	$\varepsilon_i$	$\bar{\varepsilon}_i$ , %
1	5,625	5,800	0,175	-	0,0311	-
2	6,477	6,500	0,023	-	0,0036	-
3	7,226	7,200	0,026	0,235	0,00408	2,9
4	9,715	8,900	0,815	-	0,0839	-
5	6,228	6,400	0,172	-	0,0276	-
6	7,800	7,60	0,200	-	0,0256	-
$\Sigma$			1,411		0,1759	



## ძირითადი დასკვნები

1. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით სამრეწველო ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარით მიღებულია სხმულში არალითონური ჩანართების რაოდენობა და განაწილება, ასევე სხმულის სხვადასხვა ადგილას სიმტკიცის მახასიათებლები, ჩვენი და სხვა გამოკვლევებით, პრაქტიკულად ემთხვევა ლაბორატორიული დანადგარის კრისტალიზატორში მიღებული მცირე ზომის სხმულის შესაბამის მაჩვენებლებს; ამით დადგენილია, რომ ელექტროწიდური პროცესის და დანადგარის დამუშავებული მოდელის კვლევის და გაანგარიშების როგორც შედეგები ასევე მეთოდები სამართლიანია სამრეწველო დანადგარის კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესებისათვის.
2. კრისტალიზატორის უძრავი სქემით ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში პოტენციალის განაწილების ორგანზომილებიანი მოდელით კვლევამ აჩვენა:
  - დნობადი ელექტროდის წონასთან შეხების მახლობლობაში პოტენციალის განაწილება და შესაბამისად ელექტრული ველი არაერთგვაროვანია;
  - ელექტროდიდან გამომავალი დენის ხაზების გაბნევა შეიმჩნევა მათი წიდის აბაზანაში გადასვლისას და მოიცავს არეს, რომელიც შეიძლება შეფასებული იქნას ე.წ. წიდის აბაზანაში დენის ხაზების გაბნევის კოეფიციენტით  $k = d_g/d_j$
  - დადგენილია,  $k \approx 1,3 \div 1,4$  და იგი ერთ-ერთი განსაზღვრული სიდიდე უნდა იყოს წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოსა და გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებისას.
3. შემოთავაზებულია ელექტროწიდური გადადნობისას გამოყოფილი საერთო სითბოს და თბური დანაკარგების განსაზღვრის მეთოდი, რომელიც ემყარება გადასადნობი ელექტროდის და წიდის აბაზანის ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებლებს.
4. შემუშავებულია წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სრული სითბოს საანგარიშო სქემა და მიღებულია სათანადო მათემატიკური გამოსახულება გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშებისათვის წიდის აბაზანის სიმაღლის, კრისტალიზატორის შიდა კედლის დიამეტრის, თხევად მდგომარეობაში წიდის სითბოტევადობის და სიმკვრივის, აგრეთვე წიდის დნობის ტემპერატურის მიხედვით.
5. მიღებულია უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორის შიგა კედლიდან ართმეული სითბოს საანგარიშო გამოსახულება.
6. მიღებულია მათემატიკური გამოსახულება ელექტროდის გადადნობის პროცესში თბური დანაკარგების გაანგარიშებისათვის ელექტროდის და წიდის აბაზანის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით.

7. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ელექტროწიდური გადადნობის კონკრეტული კრისტალიზატორისათვის, შემოთავაზებული საანგარიშო სქემის გამოყენებით გაანგარიშებული იქნა: დნობად ელექტროდში გამოყოფილი სითბო; წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი ჯოჯის სითბო და წიდის აბაზანიდან გაგრილების სისტემის მიერ ართმეული სითბო. შედეგად მიღებული თბური ბალანსის განტოლებაში წიდის აბაზანაში გამოყოფილი მთლიანი სითბოს პროცენტული განაწილება პრაქტიკულად ემთხვევა სხვა მკვლევარების მიერ მიღებული თბური ბალანსის განაწილების აღიარებულ სურათს, რაც არაპირდაპირ მიუთითებს, რომ სითბოს ცალკეული სახეობის გაანგარიშების შემოთავაზებული სქემა უზრუნველყოფს დამაკმაყოფილებელ სიზუსტეს.

8. კონკრეტული პარამეტრების მქონე კრისტალიზატორებში ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებული მნიშვნელობა პრაქტიკულად ემთხვევა ამ კრისტალიზატორებში გადადნობის პროცესში გაზომილი დენების მნიშვნელობებს. საშუალო ფარდობითი ცდომილება არ აღემატება 3%-ს.

9. შემუშავებულია უძრავ კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის განმაზოგადებელი გამომავალი პარამეტრი:

$$Y_g = (Y_{1g} + Y_{2g}) \cdot Y_{3g}$$

იგი წარმოადგენს კრისტალიზატორის და გადასადნობი ელექტროდების დიამეტრების ჯამს გამრავლებულს წიდის აბაზანის მასაზე.

განმაზოგადებელი პარამეტრის და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტი არაა დამოკიდებული კრისტალიზატორის ფორმაზე და მისი მნიშვნელობა შეადგენს 0,967-ს.

**დისერტაციის ძირითადი შედეგები ასახულია  
შემდეგ ნაშრომებში**

1. ფხაკაძე თ., სილაგაძე ს., ხვადაგიანი ა., შალამბერიძე მ. “გაბარიტული ლითონკონსტრუქციების შედუღების ხარისხის კონტროლის შესაძლებლობების კვლევა”, ქუთაისის სახელმწიფო ტექნიკური უნივერსიტეტის შრომათა კრებული, №1(16).-ქუთაისი: საქართველო, 2005.-გვ.243-247.
2. ა.კაკაურიძე, ლ.ზივზივაძე, ს.სილაგაძე, მ.შალამბერიძე. “საყოფაცხოვრებო მყარი ნარჩენების გადამუშავებისათვის მაღალტემპერატურული ღუმელის 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 წ., გვ.128-131
3. სილაგაძე ს., ზივზივაძე ლ., ცქიფურიშვილი თ., შალამბერიძე მ., “გენერატორის როტორის ნამზადის მიღების ელექტროწიდური ტექნოლოგია” /V საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია; „ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ საქართველო, ქუთაისი, 2018 წ.-გვ.224-226
4. სილაგაძე ს.რ., ზივზივაძე ლ.ბ., ცქიფურიშვილი თ.ზ., აბესაძე შ.ა., “როტორის მაგნიტური ნამზადის მიღების შესაძლებლობა არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობით”, საქართველოს საინჟინრო სიახლენი. საერთაშორისო საინჟინრო აკადემია, თბილისი. 2019, ISSN 1512-0287. გვ.108-113.
5. სილაგაძე ს.რ., ზივზივაძე ლ.ბ., შალამბერიძე მ.შ., “ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ელექტროდის გახურებაზე დახარჯული სითბოს განსაზღვრა”, საქართველოს საინჟინრო სიახლენი. ISSN 1512-0287 , თბილისი 2022. გვ. 60
6. სილაგაძე ს.რ., ზივზივაძე ლ.ბ., შალამბერიძე მ.შ., “უძრავი კრისტალიზატორის სქემით საჭირო დენის გაანგარიშება ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის”, საქართველოს საინჟინრო სიახლენი. ISSN 1512-0287, თბილისი 2023. გვ.57-62.

**Akaki Tsereteli State University**

*Copyrighted manuscript*

**Sofio Silagadze**

**Study of the electric field in the process of obtaining the turbogenerator rotor blank by  
electro-slag re-melting**

**The Author's Abstract**

**of the Doctoral Thesis Nominated for Academic Degree  
of the Doctor of Engineering**

Kutaisi 2023

Akaki Tsereteli State University

Scientific advisor: Marlen Shalamberidze, Professor Emeritus of Akaki Tsereteli State University

Reviewers: Omar Mikadze - Technical University of Georgia  
Professor of the Faculty of Chemical  
Technology and Metallurgy.

Parmen Kipiani - Akaki Tsereteli State University  
Academic doctor, professor.

The Dissertation defense is held on 2023, September 14, 14:00 h.  
( Date and time)

At the meeting of the Dissertation Commission established by the Dissertation Council of the Faculty of Technical Engineering.

Address: Georgia, Kutaisi, Akaki Tsereteli State University, Tamar Mepe st. 59, Room No. 1114,

The thesis is available in the library of Akaki Tsereteli State University at the address: 59 Tamar Mepe Street, 4600, Kutaisi.

The Author's abstract was sent out on \_\_\_\_\_  
(date)

Secretary of Dissertation Council \_\_\_\_\_ /N. Sakhanberidze/  
(signature)

- Note: 1. On the last page of the Author's abstract cover, at the bottom of the page, the circulation of the Author's abstract, the publisher and its address should be indicated.  
2. The second cover of the Author's abstract is made in the target language.

## General description of paper

### Topicality of research.

The turbogenerator is used to generate electricity in heat power engineering, including the so-called primary source of nuclear energy - in nuclear power plants. The number of revolutions of the rotor of the turbogenerator working in the nominal mode is 3000 rpm, therefore it should be made of high strength and high vibration resistant steel. The modern method of obtaining such steels is the so-called method of electro-slag re-melting of steels which is widely used in electrometallurgy for obtaining steels with improved properties, where the steels obtained by conventional classical methods (in a open hearth furnace, converter) are subject to electro-slag re-melting.

It is known that in ordinary steel melting furnaces, melting of per tonne of steel requires  $1257 \cdot 10^3$  kJ of heat. To obtain the latter, 800 kWh of electricity is needed per tonne. It should also be noted that twice more electrical energy is needed to obtain 1 ton of improved quality steels by electroslag melting, that is, the cost of improved quality steels obtained by electroslag smelting is doubled, and its cost is determined by the cost of spent electrical energy. Based on this, the cost reduction of improved quality steels by increasing the efficiency re-melting unit it is still relevant today.

Increasing the efficiency of the electroslag remelting unit, as the researchers (F. Tavadze, B. Kashakashvili, Ninua, B. Paton, B. Medovar, J. Elliott and others) point out, requires increasing the useful heat of the remelting process by reducing heat losses in the heat balance equation. To this end, it is necessary to conduct complex experiments and research to obtain improved quality specific steel grade by electroslag remelting.

By using the method of calculating current required studying the electric field and re-melting that we proposed, the analysis of the thermal balance equation of the electroslag remelting process of metals and the analysis of the individual components included in it is simplified, which is necessary for reducing heat losses of the planned measures and for improving the efficiency of a particular steel grade of improved quality during the electro-slag re-melting of steel.

**Goal and objectives of research.** The purpose of the work is to study the electric field of the electroslag re-melting process of obtaining the turbogenerator rotor blank and develop the method of calculating current required for the re-melting process.

**Research object and methods.** The object of the research is the electroslag re-melting process of producing the turbogenerator rotor. Due to the complexity of the electroslag re-melting process and the difficulty of conducting meltings in real conditions and studying the process, the simulation method has been used, in particular:

- a physical model of the electric field research in the re-melting process;
- a physical model of the electroslag re-melting unit for studying the physical-mechanical characteristics and chemical composition;
- a physical model (schemes) for calculating current required for electrolytic re-melting.

To achieve the above-mentioned goal, the following objectives were set and attained:

7. Two different schemes for obtaining the high-speed rotor blank were developed;
8. On the basis of the preliminary experiment and the analysis of its results, it was justified that studies for obtaining the real-size blank can be conducted on small-capacity electroslag re-melting units.
9. A new method was developed for calculating the so-called Joule heat released in slag;
10. The method for determining thermal losses during electroslag re-melting was developed;
11. Based on the conducted study of the electric field, the necessary coefficients for thermal processes and calculation of current were developed;
12. The method of determining the error of thermal processes and current determination was developed.

#### **Novelty of research**

Mathematical expression obtained taking into account the physical-mechanical characteristics of the metal to be smelted and the slag used, as well as the main parameters of the electroslag re-melting unit (crystallizer), was used for determining the thermal processes of electroslag re-melting and calculating current required for re-melting.

**The provisions brought to the defense** involve each objective that was set and attained in the dissertation.

#### **Approbation of dissertation work and publications.**

The issues discussed in the dissertation and their results were presented at the university and international scientific conferences. The completed paper was discussed and reviewed at the meetings of the Department of Energy and Telecommunications of the Faculty of Technical Engineering of Akaki Tsereteli State University.

The research findings were presented in the form of reports at the 5th international conference “Energy: regional problems and development opportunities”.

The main results of the thesis have been published in six scientific papers.

**The volume and structure of dissertation.** The dissertation consists of an introduction, four chapters and conclusions, comprises 140 computer printing pages and includes 43 drawings, 15 tables, 3 annexes and list of references.

**The introduction** substantiates the topicality of research and formulates the goal and objectives of research.

**The first chapter** discusses and analyzes the schemes of electroslag re-melting of metals, as well as the results of preliminary research on obtaining the the turbogenerator rotor blank by electroslag re-melting.

The turbogenerator rotor blank is a casting made by electroslag welding of three cylinders with the same diameter and two ones with relatively small diameters (Fig. 1). Each cylinder was obtained by electro-slag re-melting of fusible electrode made of the so-called rotor steel of the Cr-Ni-Mo-V chromium-nickel-molybdenum-vanadium system alloy by electroslag re-melting of the fusible electrode.

The strength of the rotor blanks obtained by all the discussed schemes of electroslag re-melting meets the technical requirements. As preliminary studies have shown, the so-called

electroslag re-melting that we proposed by the scheme of the crystallizer with so-called non-fusible electrode is characterized by a relatively high efficiency. Studies and analysis are needed to determine the ratio of total heat and heat losses during this process, to determine the value of current required for melting. Similar studies have been conducted on the electroslag re-melting of a crystallizer by a stationary scheme (Fig. 2). However, it is quite difficult; we have proposed a method for determining the terms included in the heat balance equation of the melting process and calculating current required for melting.

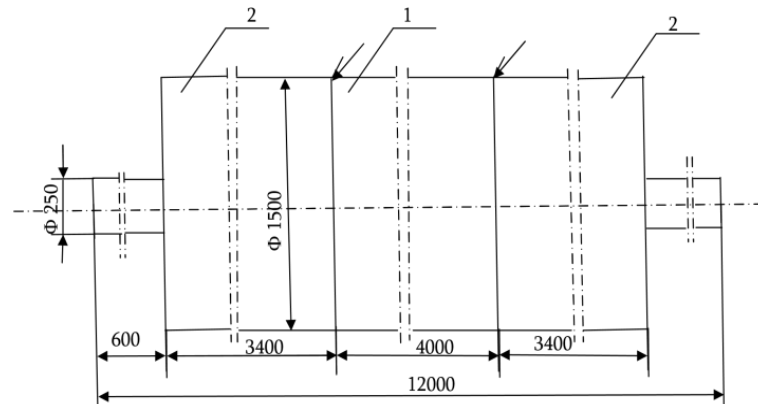


Fig.1. The Turbogenerator rotor blank

- 1- central cylinder of the rotor;
- 2- end of the rotor cylinders; a semi-arrow shows the place of welding,
- 3- end cylinders on which bearings (holding devices) are mounted

The same chapter considers the issue of simulation of electroslag re-melting of metals, in particular, it is shown that the number and distribution of non-metallic inclusions in the casting obtained by the industrial electroslag melting machine with the scheme of a stationary crystallizer, as well as the strength characteristics in different places of the casting, according to our and many other studies, practically coincide with the corresponding indicators of the relatively small-size casting obtained in a crystallizer of the laboratory equipment i.e. the results and methods of studying and calculating the processes of crystalliser in the electro-slag re-melting laboratory units are valid for the process in the industrial unit crystallizer.

This gives the possibility of physical modeling of the process of electro-slag re-melting, therefore studies and calculations were performed for the process of obtaining a real product (Fig. 1) decreased by a factor of 10.



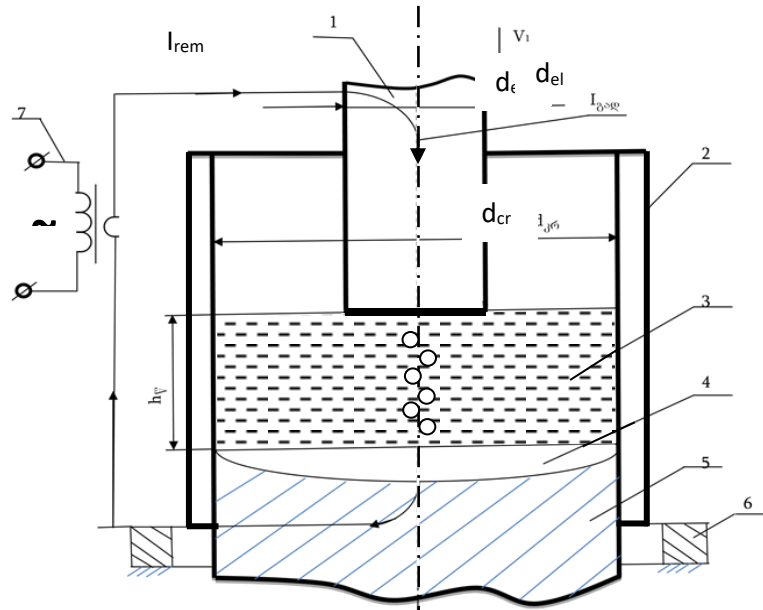


Fig.2. The classical scheme of electro-slag re-melting of metals.

1-Re-melting metal electrode; 2- Crystallizer; 3- Liquid slag bath; 4- Liquid metal bath; 5- Molten metal casting; 6- Crystallizer bottom; 7- Current power source;  $I_{rem}$ - Re-melting current.  $H_{sl}$ - Slag bath height;  $d_{cr}$ - Inner diameter of a crystallizer;  $d_{el}$ - diameter of the re-melting electrode.

In order to reduce heat losses and electricity costs in the process of electroslag re-melting, for producing the high-speed rotor blank, we have proposed an original design of a crystallizer with the non-fusible electrodes.

The proposed crystallizer for electroslag re-melting with its original design, a new electrical connection of the fusible and non-fusible electrodes, is significantly different from crystallizer included in the existing industrial electroslag re-melting equipment (Fig.3).

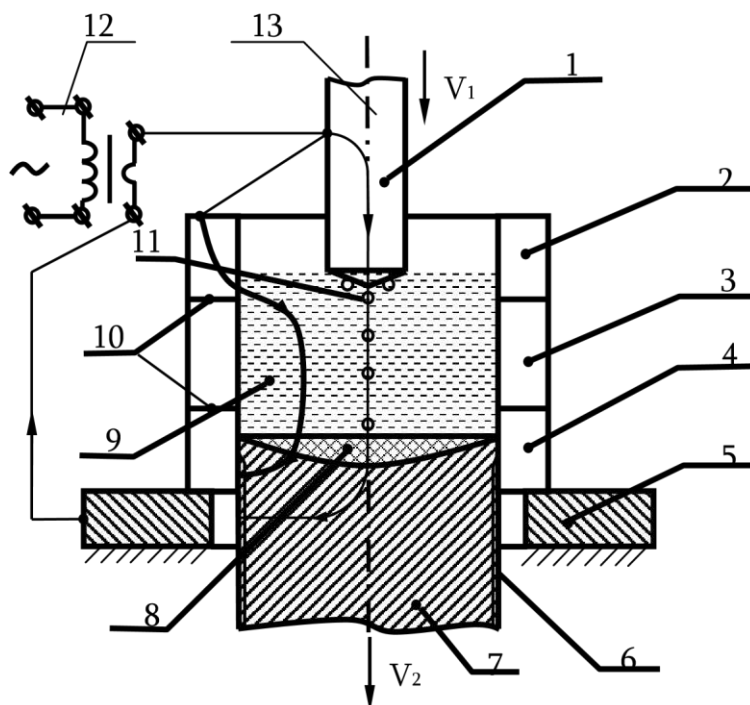


Fig. 3. A section crystallizer of metal electrode re-melting and its connection scheme: 1 - electrode of re-melting material; 2 - the upper section of crystallizer; 3-4 - the middle and lower sections of crystallizer; 5 - crystallizer bottom; 6 – casting skin; 7- cast of re-melted metal; 8- re-melted metal bath; 9 – re-melted slag bath; 10 – intersectional insulating layer; 11 - electrode re-melted metal drops; 12 - current source; 13 - current lines.

**The second chapter** presents the issues related to the study of the electric field of the slag bath of the crystallizer during electroslag re-melting of metals. In particular, the study of a physical model making and potential distribution in one of the two-dimensional planes  $d_{cr} = d_{sl}$  of the slag bath.

It is a 0.1 mm thick sheet of alloy steel AISI 321, the length and width of which are commensurate with the dimensions of the slag bath being under study, and it carries a  $\approx 100$  times reduced current required for remelting. Moreover, the condition is met that when taking measurements of the potential on it, its heating should not occur due to the so-called Joule's heat release. By simulation of the slag bath, it has been revealed that the potential distribution and therefore the electric field near the contact of a fusible electrode with the slag are heterogeneous (Fig. 4).

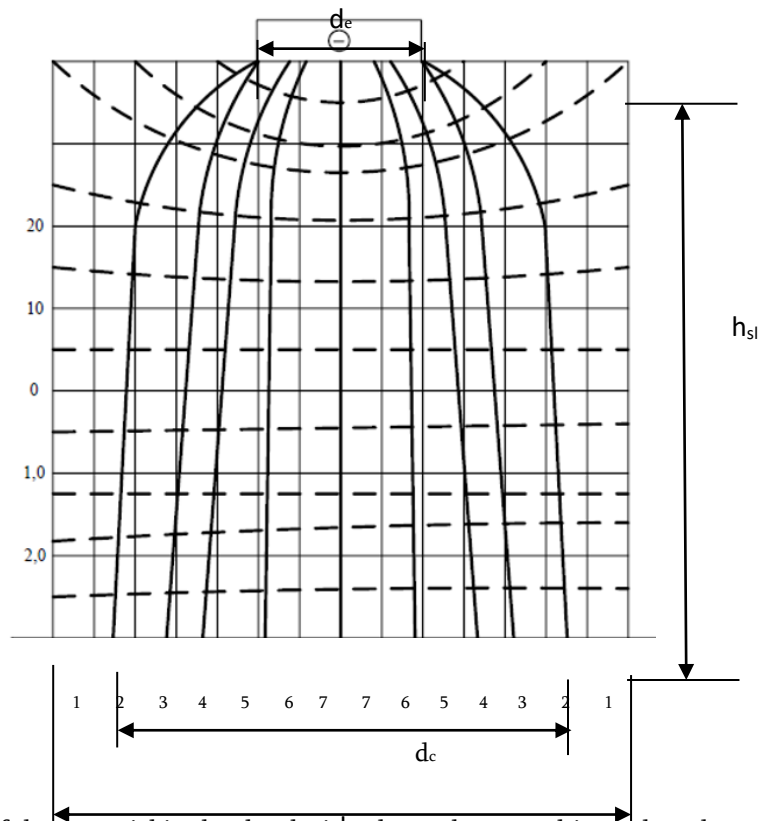


Fig.4. Distribution of the potential in the slag during electroslag re-melting, when the potential is applied to the fusible electrode from the current power source (dashed line, equipotential line; solid line - current lines)  
 $d_c$  - diameter of the base of a cylinder bounding the power lines.

Dispersion of current lines coming from the electrode is observed from the transition to the slag bath along the entire height of the slag bath. For the quantitative assessment of the effect of current flow in the slag bath after leaving the electrode, there has been introduced the so-called flow ratio, which represents

$$K_{fl} = d_c/d_e \quad (1)$$

Its value depends on the diameter of the melting electrode, the composition of the slag, and varies within  $K_{fl} \approx 1,3 \div 1,4$ .

The current flow ratio is one of the important factors for the calculation of the heat released through current in the slag bath and current required for melting.

A different picture of the electric potential and current distribution is obtained during electroslag re-melting by the non-fusible electrode crystallizer, as a result of studying their physical model (Fig. 5). Here, the current flows between the fusible electrode and the bottom of the crystallizer, as well as the upper and lower (2,4) non-fusible electrodes, from which it is seen that the current passing through the slag bath is distributed near the crystallizer wall, it is obviously expected that the heat generated in the slag near the crystallizer wall will be increased. Therefore, it is necessary to investigate and determine thermal losses of non-fusible electrode crystallizer and the amount of current required for melting, in order to identify its advantage or disadvantage compared to other commonly accepted crystallizers.

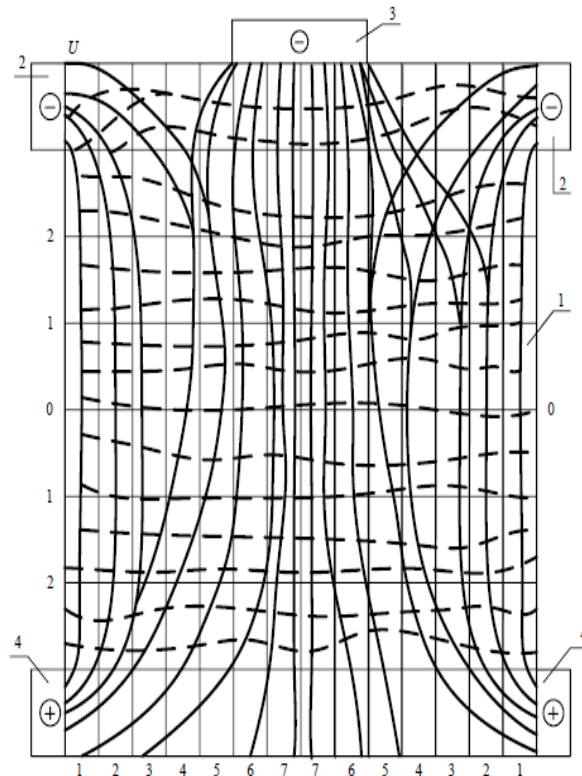


Fig.5. Distribution of the potential in the slag according to the physical model study, when the potential from the current power source ( $U=1V$ ) is applied to the non-fusible and fusible electrodes. 2, 4 - The right and left current leads of the upper and lower non-fusible electrodes, 1, 3 - The model sheet and the current lead of a fusible electrode.

In the third chapter, some results of research conducted by scientists in many countries of the world, including Ukraine, on electroslag re-melting are presented, which prove that due to large heat losses during electroslag re-melting, its efficiency is below 50%; Determining the thermal balance of a new crystallizer requires a lot of research work. In order to simplify the latter, the work proposes a scheme for determining the thermal balance and calculating current required for melting (Fig. 6), which shows the nature of the temperature change in the entire height of the slag bath and fusible electrode, taking into account that the re-melting process is long and their temperature practically does not change with time. This diagram also shows the temperature change in one of the cross-section planes of the slag bath and the cooling system. If the crystallizer is circular in shape, and the height of the slag bath in it is  $h_{sl}$ , the heat capacity of the slag bath is  $C_{sl}$ , while the density of the slag in the liquid state is  $\gamma_{sl}$ , the expression is obtained to determine the so-called Joule heat released through current in the slag bath.

$$Q_{sl} = \pi d_{cr}^2 / 4 \cdot h_{sl} \cdot c_{sl} \cdot \gamma_{sl} \cdot T_{ml}^{sl} \quad (2)$$

Taking into account the fact that when current passes from the fusible electrode to the slag bath, there is the so-called current flow in the cylinder bounded by the diameter  $d_c$ , as well as the diameter of current passing through the slag depends on the diameter of the melting electrode. In the case of a given crystallizer, the  $K$  coefficient of the shape of the crystallizer, the expression (2) takes the form:

$$Q_{sl}^c = \pi [d_{cr}(1 - K)]^2 / 4 \cdot h_{sl} \cdot c_{sl} \cdot \gamma_{sl} \cdot T_{ml}^{sl} \quad (3)$$

The same chapter describes the peculiarities of the calculation of the heat removed from the slag bath by the wall of the crystallizer with a sectioned cooling system of cooling with water and the following expression is obtained for its determination:

$$Q_{crw} = Q_J \cdot n \cdot \iota_k \cdot \delta_k \cdot \eta_{sl} \quad (4)$$

As can be seen from the diagram, in order to determine the heat removed from the wall of the crystallizer with a sectioned cooling system to the entire surface of the slag bath, we need to know the number of sections  $n$ , its dimensions  $\iota_k, \delta_k$  and the efficiency  $\eta_{sl}$ , in addition to the heat released in the slag bath. The latter is determined by the capacity of unit re-melting from the monogram

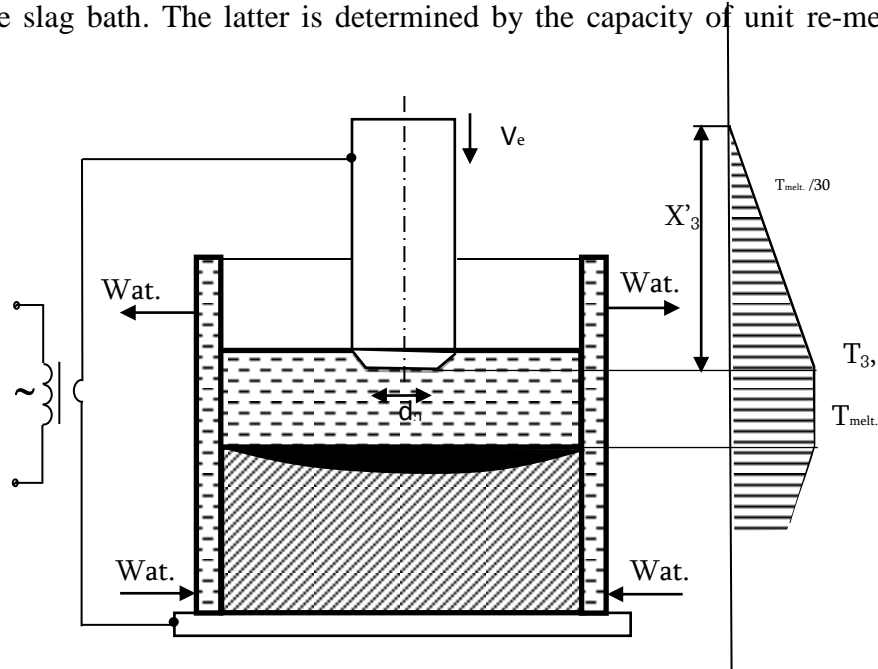


Fig. 6. Calculation scheme of the heat removed from the slag bath of the electroslag re-melting of metals by a fusible electrode of the contact surface

In the third chapter, the analytical expression of determining the amount of heat extracted from the slag bath by the melting electrode in contact with the liquid front is obtained::

$$Q'_j{}^{\beta} = k'_2(\pi d_{j\varrho}^2/4)X'_3 \cdot C_{j\varrho 1} \cdot \gamma_{j\varrho 1} \cdot T_{\varrho 5}/30 \quad (5)$$

In this expression, the coefficient  $k'_2$  takes account of the shape of the part of fusible electrode immersed in the slag.  $X'_3$  corresponds to the length of the melting electrode according to the scheme proposed for calculation.

$C_{ed1}, \gamma_{ed1}, T_{ml}$  are, respectively, the heat capacity, density and melting temperature of the electrode material.

In the same chapter of the work, the expression of determining current required for electro-slag re-melting of metals is obtained:

$$I_j = \sqrt{\frac{\pi(d'_{cr})^2 / 4 \cdot h_{sl} \cdot c_{sl} \cdot \gamma_{sl} \cdot T_{ml}{}^{\beta}}{0,24R_{sl}}},$$

according to which it is enough to know the volume of the conductive part of the slag bath during electroslag re-melting, as well as the heat capacity of the used liquid slag, its density, the melting temperature of the slag and the resistance of the slag in the liquid state.

**The fourth chapter** presents, according to the calculation scheme proposed in the third chapter, for a specific crystallizer, the total heat released in the slag bath passing through current, the thermal balance equation of the heat removed from the slag bath from the wall of the crystallizer, obtained according to the heat removed from the slag bath by fusible electrode. according to which heat loss in fusible electrode is 11%, in the cooling system of the crystallizer - 46%, and the heat transferred to the molten metal casting - 43%. (Fig. 7).

Similar results have been obtained in studies performed by other researchers.

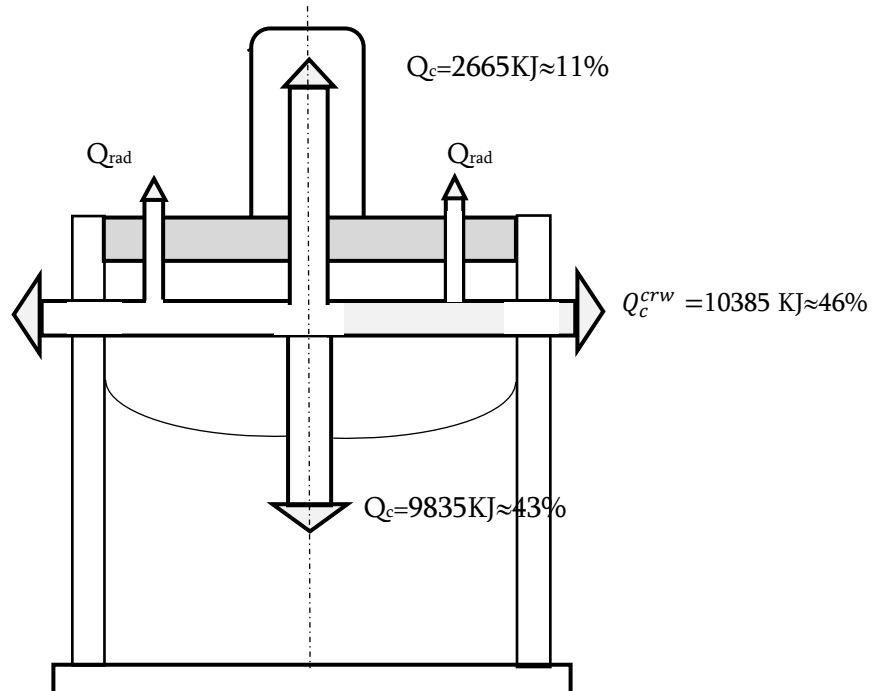


Fig. 7. The heat balance scheme of electro-slag re-melting by the scheme of a fixed crystallizer scheme is made according to the calculation

The results of the study of the coefficient of correlation between the internal diameter of the crystallizer and the calculated current values have also been calculated. It is low and amounts to 0.75, which indicates that the amount of current required for electro-slag re-melting depends on the size of the crystallizer and its shape, in particular, on the cylindrical or prismatic shape of a crystallizer. Because of this, the so-called generalized parameter of the electro-slag re-melting process has been developed..

$$Y_g = (Y_{1cr} + Y_{2e})Y_{3sl},$$

where  $Y_{1cr}$ - is an inner diameter of a crystallizer;  $Y_{2e}$ - diameter of the remelting electrode;  $Y_{3sl}$ - the weight of the solidified slag bath.

The correlation coefficient between the generalized parameter and the calculated current value is high and is 0.967.

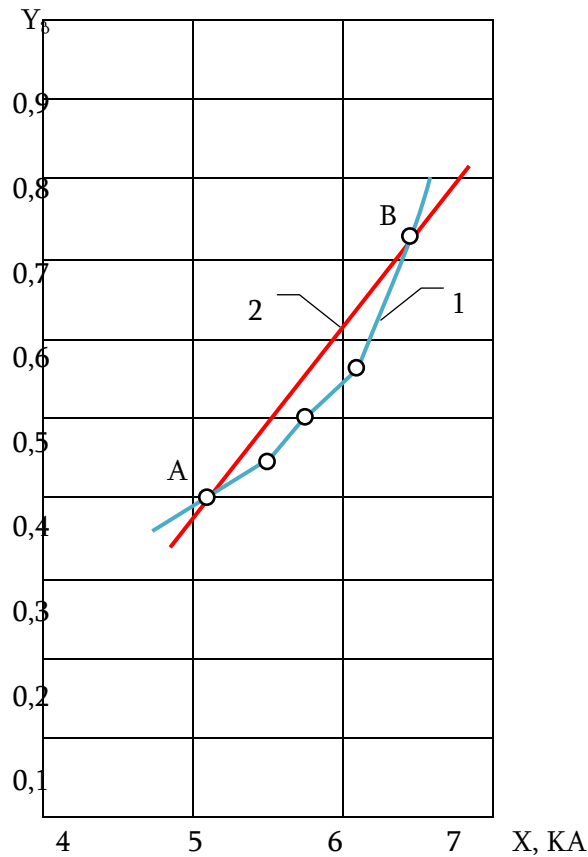


Fig.8. The relationship between the generalization parameter and current required for melting

- 1- Empirical relationship
- 2- Theoretical relationship

$$y_g = (y_{1c} + y_{2e}) \cdot y_{3sl}$$

Taking into account the generalizing parameters, the amount of current required for electro-slag re-melting is calculated in the crystallizers of different sizes (Table 1), with the proposed (the we obtained) mathematical expression and compared with the values of currents measured during electro-slag re-melting in the same crystallizer directly during the experiment.

**Table 1**

The inner diameters of a crystallizer of the re-melting electrodes used for electro-slag re-melting, as well as the calculated and experimental values of currents required for melting.

N	Inner diameter of a crystallizer, cm	Diameter of the melting electrode, cm	Calculated values of current required for melting, KA	Experimenta l values of current required for melting, KA	The heat released in the slag bath during electroslag remelting, KJ
1	25,4	12,7	5,625	5,8	22785
2	32	16	6,477	6,5	30206
3	36	18	7,226	7,2	38229
4	48	24	9,715	8,9	67963
5	20x20	11,8x11,8	6,228	6,4	27933*
6	22,5x22,5	16x16	7,800	7,6	43886*

\* Heat released in the slag bath during electroslag re-melting in a prismatic crystallizer.

Mean absolute and mean relative errors have been calculated. The latter does not exceed 3%, which indicates that the method of calculation by the proposed scheme and obtained mathematical expressions can be used for the development of new technologies for electro-slag re-melting of metals, to solve specific problems (Table 2).

**Table 2.**

Errors of the calculated currents required for electro-slag re-melting by the proposed scheme

	$I_i$ , KA	$(I_i)_{calc.}$ , KA	$\xi$	$\bar{\xi}$	$\varepsilon_i$	$\bar{\varepsilon}_i$ , %
1	5,625	5,800	0,175	-	0,0311	-
2	6,477	6,500	0,023	-	0,0036	-
3	7,226	7,200	0,026	0,235	0,00408	2,9
4	9,715	8,900	0,815	-	0,0839	-
5	6,228	6,400	0,172	-	0,0276	-
6	7,800	7,60	0,200	-	0,0256	-
$\Sigma$			1,411		0,1759	

## Main conclusions

3. The number and distribution of non-metallic inclusions in the casting, as well as the strength characteristics in different places of the casting, according to our and other studies, practically coincide with the corresponding indicators of the small-sized casting obtained in the crystallizer of the laboratory unit; it is hereby established that both the results and methods of the research and calculation of the developed model of the electro-slag process and the plant are valid for the processes occurring in the crystallizer of the industrial plant.
4. A study with a two-dimensional model of the potential distribution in the slag bath during electro-slag re-melting by the scheme of a fixed crystallizer:
  - distribution of the potential near the contact with the weight of fusible electrode and, accordingly, the electric field is heterogeneous;
  - dispersion of the current lines coming from the electrode is observed when they pass into the slag bath and covers an area that can be evaluated by the so-called current lines dispersion ratio in the slag bath  $k = d_c/d_e$
  - it has been established that  $k \approx 1,3 \div 1,4$ , and it should be one of the determining values in the calculation of the heat released in the slag bath and current required for melting.
3. A method for determining the total heat and heat losses during electroslag remelting is proposed, which is based on the physical-mechanical characteristics of the remelting electrode and the slag bath.
4. A calculation scheme for the total heat released through current in the slag bath has been developed and an appropriate mathematical expression for the calculation of the released heat has been obtained according to the height of the slag bath, the diameter of the inner wall of a crystallizer, the heat capacity and density of the slag in a liquid state, as well as the slag melting temperature.
5. The calculation expression of the heat removed from the inner wall of the electro-slag remelting crystallizer by the scheme of a fixed crystallizer scheme has been obtained.
6. A mathematical expression has been obtained for the calculation of heat losses in the process of remelting the electrode, taking into account the physical-mechanical characteristics of the electrode and the slag bath.
7. For a particular crystallizer of electro-slag re-melting by the scheme of a fixed crystallizer, using the proposed calculation scheme, there have been calculated: the heat released in the fusible electrode; Joule heat released through current in the slag bath and heat removed from the slag bath by the cooling system. The percentage distribution of the total heat released in the slag bath in the resulting heat balance equation practically coincides with a recognized picture of the heat balance distribution obtained by other researchers, which indirectly indicates that the proposed scheme for calculating individual types of heat provides satisfactory accuracy.
8. The calculated value of current required for electro-slag re-melting in the crystallizers with specific parameters practically coincides with the values of currents measured during the re-melting process in these crystallizers. The average relative error does not exceed 3%.
9. The generalized output parameter of the electroslag re-melting process in a fixed crystallizer has been developed:

$$Y_g = (Y_{1cr} + Y_{2e})Y_{3sl},$$



It is a sum of the diameters of a crystallizer and the melting electrodes multiplied by weight mass of the slag bath.

### **The main findings of the research are reflected in the following publications**

1. Pkhakadze T., Silagadze S., Khvadagiani A., Shalamberidze M. Study of possibilities of quality control of welding of dimensional metal constructions. /Bulletin of Kutaisi State Technical University, No. 1(16).-Kutaisi: Georgia, 2005.-p.243-247.
2. A. Kakauridze, L. Zivzivadze, S. Silagadze, M. Shalamberidze. The prospect of using a high-temperature furnace for processing of solid household waste. Akaki Tsereteli State University. International scientific conference "Agricultural and transport machinery: development prospects taking into account the modern requirements of standardization and quality control. Kutaisi, 2017, pp. 128-131
3. Silagadze S., Zivzivadze L., Tskipurishvili T., Shalamberidze M., Electro-slag technology of producing the generator rotor blank. /V international scientific conference; "Energy: regional problems and development opportunities" Georgia, Kutaisi, 2018 - pp. 224-226
4. Silagadze S.R., Zivzivadze L.B., Tskipurishvili T.Z., Abesadze S.A., The possibility of obtaining the rotor magnetic blank in a crystallizer with the non-fusible electrodes by electro-slag re-melting of of metals. Georgian Engineering News. International Engineering Academy, Tbilisi. 2019, ISSN 1512-0287. pp. 108-113.
5. Silagadze S.R., Zivzivadze L.B., Shalamberidze M.Sh. Georgian Engineering News. ISSN 1512-0287, Tbilisi 2022, 60 p.
6. Silagadze S.R., Zivzivadze L.B., Shalamberidze M.Sh., Calculation of current required by the scheme of a fixed crystallizer for electro-slag re-melting of metals, ISSN 1512-0287, Tbilisi 2023. p.57-62.