

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
საინჟინრო-ტექნიკური ფაკულტეტი

სოფიო სილაგაძე

ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადის ელექტროწიდური
გადადნობით მიღების პროცესში
ელექტრული ველის კვლევა

ინჟინერიის (0719) დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარმოდგენილი

დისერტაცია

სამეცნიერო ხელმძღვანელი:

ტექნიკის მეცნიერებათა დოქტორი,
პროფესორ -ემერიტუსი მარლენ შალამბერიძე

ქუთაისი, 2023

სარჩევი

შესავალი

თავი 1. კვლევის ობიექტის დასახელება და კვლევის ამოცანები -----	7
1.1 . გენერატორის როტორის ნამზადის და მისი მიღების ელექტროწიდური გადადნობის სქემები-----	7
1.2. დისერტაციაში დასმული და გადაწყვეტილი ამოცანები-----	16
1.3. როტორის ნამზადის ელექტროწიდური გადადნობით მიღების წინასწარი კვლევის შედეგები-----	17
დასკვნა I თავის მიმართ -----	28
თავი 2. ელექტროწიდური გადადნობის წიდის აბაზანის ელექტრული ველის კვლევა -----	29
2.1. ელექტრული ველის გამოკვლევის პრობლემები-----	29
2.2. ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში პოტენციალის განაწილების კვლევისათვის გამოყენებული ფიზიკური მოდელი -----	32
2.3. ელექტროწიდური გადადნობისას ელექტრული ველის კვლევის შედეგები -----	35
დასკვნა II თავის მიმართ -----	44
თავი 3. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას დენის განსაზღვრის მეთოდი -----	46
3.1. ელექტროწიდური გადადნობის თბური ბალანსის სქემა-----	47
3.2. თბური ბალანსის განტოლების ანალიზი-----	51
3.3. კრისტალიზატორიში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის დენის საანგარიშო სქემები-----	60
3.4. ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების დენის განგარიშების სქემა-----	62
3.5. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო-----	69
3.5.1. უძრავ კრისტალიზატორიში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდას აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს საანგარიშო სქემა-----	70

3.5.2. უძრავ კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას გარნისაჟის სისქის σ განსაზღვრა-----	73
3.6. არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშების სქემა -----	76
3.7. წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს მიხედვით ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშება-----	79
3.8. წიდის აბაზანიდან კრისტალიზატორის შიგა კედლით ართმეული სითბო-----	82
3.9. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას დნობადი ელექტროდის გაცხელება-----	88
3.9.1. დნობად ელექტროდში დენის გავლით გამოყოფილი სითბო-----	89
3.9.2. დნობად ელექტროდზე გამდნარი წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებით გადაცემული სითბოს განსაზღვრა-----	92
3.9.3. დნობად ელექტროდზე გადაცემული სითბო წიდის აბაზანასთან შეხებაში მყოფი ზედაპირიდან-----	94
3.10. ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშება-----	98
დასკვნა III თავის მიმართ -----	100
თავი 4. უძრავ კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშების მაგალითები-----	103
4.1. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშება-----	104
4.2. დნობადი ელექტროდის გახურებაზე თბური დანაკარგები-----	105
4.3. უძრავი კრისტალიზატორის შიგა კედლიდან გაგრილებით წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს გაანგარიშების მაგალითი-----	106
4.4. ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშების ცდომილება-----	110
4.5. დენის გაანგარიშების შედეგების რეგრესიული ანალიზი-----	113
4.6. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის განმაზოგადებელი პარამეტრი-----	120

დასკვნა IV თავის მიმართ -----	121
ძირითადი შედეგები და ზოგადი დასკვნები -----	123
გამოყენებული ლიტერატურა -----	125
დანართი 1-----	130
დანართი 2-----	131
დანართი 3-----	138

შესავალი

ლითონების ელექტროწიდურ გადადნობას ფართოდ იყენებენ გაუმჯობესებული თვისებების მქონე ფოლადების მისაღებად გასული საუკუნის 50-იანი წლებიდან მსოფლიოს მრავალ ქვეყანაში, სადაც მეტნაკლებად განვითარებულია მანქანათმშენებლობა, მათ შორის ენერგეტიკული მანქანათმშენებლობა. დღემდე ინტენსიურად მიმდინარეობს ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის სამეცნიერო კვლევები ორი მიმართულებით: ტექნიკური და ეკონომიკური მაჩვენებლების გაუმჯობესების მიმართულებით.

ეკონომიკის თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია უზრუნველყოფილი იქნას ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის მაღალი მარგი ქმედების კოეფიციენტი.

ცნობილია, რომ ჩვეულებრივ ფოლადსა და ნიკელში 1 ტონა ფოლადის გადასადნობად საჭიროა $1257 \cdot 10^3$ კვ სითბო. ამ უკანასკნელის მისაღებად საჭიროა 800 კვტ·სთ/ტ ელექტროენერგია.

აღსანიშნავია ისიც, რომ გაუმჯობესებული ხარისხის ფოლადების 1 ტონის ელექტროწიდური გადადნობით მიღებისათვის საჭიროა ორჯერ მეტი ელექტრული ენერგია ე.ი. ელექტროწიდური გადადნობით გაუმჯობესებული ხარისხის ფოლადების მიღებისას, მის ღირებულებას განსაზღვრავს დახარჯული ელექტრული ენერგიის ღირებულება.

აქედან გამომდინარე, გაუმჯობესებული ხარისხის ფოლადების თვითღირებულების შემცირება, გადასადნობი დანადგარის მარგი ქმედების კოეფიციენტის გაზრდის შედეგად, დღემდე აქტუალურია.

ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის მარგი ქმედების კოეფიციენტის გაზრდა შესაძლებელია პროცესისათვის საჭირო სასარგებლო სითბოს გაზრდით ე.წ. თბური დანაკარგების შემცირების ხარჯზე. გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის ანალიზი, კონკრეტული ლითონის გადადნობის ტექნოლოგიის დამუშავების სტადიაში საჭიროებს ბალანსის განტოლებაში შემავალი ცალკეული თბური კომპონენტების ადვილ და ზუსტ პროგნოზირებას. ასეთი ანალიზის ჩატარება დღეისათვის საჭიროებს კონკრეტულ საკვლევ ობიექტზე, მთელი რიგი კვლევითი სამუშაოების შესრულებას, რაც

მოითხოვს თბური ბალანსის განტოლებაში შემავალი სიდიდეების განსაზღვრისათვის საჭირო დიდ დროს, გაანგარიშების არსებული მეთოდების გამოყენებით.

ამიტომ, წარმოდგენილი ნაშრომის მიზანს შეადგენს ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას მიმდინარე თბური პროცესების გაანგარიშების გამარტივებული მეთოდის შექმნა, რომელიც ამავე დროს უზრუნველყოფს არანაკლებ სიზუსტეს, არსებულ მეთოდთან შედარებით.

ამ მიზნით სამუშაოში განხილულია ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადის ელექტროწიდური გადადნობით მიღების თავისებურებები, ჩატარებულია გადადნობის პროცესისათვის დამახასიათებელი ელექტრული ველის კვლევები და მათ საფუძველზე შემუშავებულია თბური პროცესის გაანგარიშების ახალი მეთოდი. ამ უკანასკნელის მიხედვით შემოთავაზებულია წიდის აბაზანაში გამოყოფილი მთლიანი სითბოს ე.წ. ჯოჯის სითბოს თბური დანაკარგების გაანგარიშებების სქემები. გაანგარიშებების მიხედვით შედგენილია როტორის ნამზადის ელექტროწიდური გადადნობისას თბური ბალანსის განტოლება. შედარებულია იგი ცნობილი მკვლევარების მიერ მიღებულ შედეგებთან. გაანგარიშების ცდომილების განსაზღვრის მიზნით ამავე დროს გაანგარიშებულია თბური დანაკარგების შესაბამისი დენის მნიშვნელობები. სხვადასხვა მკვლევარების მიერ გადადნობის პროცესის მოდელირებით, ან უშუალოდ გადადნობის პროცესში გაზომილი დენების მნიშვნელობების შემოთავაზებული მეთოდით გაანგარიშების შედეგებთან შედარებით, განსაზღვრულია შემოთავაზებული მეთოდით დენის განსაზღვრის ცდომილება.

თავი I. კვლევის ობიექტის დასახელება და კვლევის ამოცანები

1.1. გენერატორის როტორის ნამზადის მიღების ელექტროწიდური გადადნობის სქემები

ლითონებისა და შენადნობების დნობისა და გადამუშავების ახალი პროცესები ძირითადად განვითარდა 1950-იან და 1960-იან წლებში, XX საუკუნე თანამედროვე ტექნოლოგიების მოთხოვნილებების დასაკმაყოფილებლად. ეს მეთოდები გამოიყენება ცეცხლგამძლე ლითონების - ვოლფრამი, მოლიბდენი, ნიობიუმი და მათი შენადნობების მიღებისათვის, ასევე მაღალრეაქტიული ლითონების - ტიტანი, ვანადიუმი, ცირკონიუმი, მათზე დაფუძნებული შენადნობებისათვის. სამრეწველო მასშტაბით, ეს მეთოდი ტიტანის დნობისთვის პირველად გამოიყენა ვ.კროლლ-მა (აშშ) 1940 წელს. ელექტროწიდური დნობის მეთოდი შემუშავდა 50-იან წლებში უკრაინის, ბ.პატონის სახელობის ელექტრო შედუღების ინსტიტუტში. დიდი წვლილი მიუძღვის ამ მხრივ ბორის მედოვარს. ბ.მედოვარის ხელმძღვანელობით, 50-იან წლებში შეიქმნა R-909 ტიპის პირველი ელექტროლუმელი 500 ტონა მასის წრიული კვეთის მისაღებად. 1960-იანი წლების დასაწყისიდან მანვე შეიმუშავა აუსტენიტური ფოლადების მეტალურგიული შედუღების თეორიული საფუძვლები. ის არის ელექტროწიდური შედუღების ტექნოლოგიის ერთ-ერთი თანაავტორი.

პირველად მსოფლიოში ზაპოროჟიის ელექტრომეტალურგიის ქარხანაში დამზადდა ელექტროწიდური ღუმელი. ამ პროცესის ფართოდ გამოყენება დაიწყო ეკონომიურად განვითარებულმა ქვეყნებმა: აშშ, ინგლისი, ავსტრია, გერმანია, იაპონია, ბელგია. ინტერესი ფოლადის ელექტროწიდურ გადადნობაზე სწრაფად იზრდებოდა და დღემდე მნიშვნელოვანია მაღალი ხარისხის ლეგირებული ფოლადის მიღება.

70 იან წლებში რ.კრემიზიოსა და ე.ზაკის (აშშ) მიერ წარმოდგენილი იქნა როგორც უძრავი ასევე მოძრავი კრისტალიზატორის სქემა.

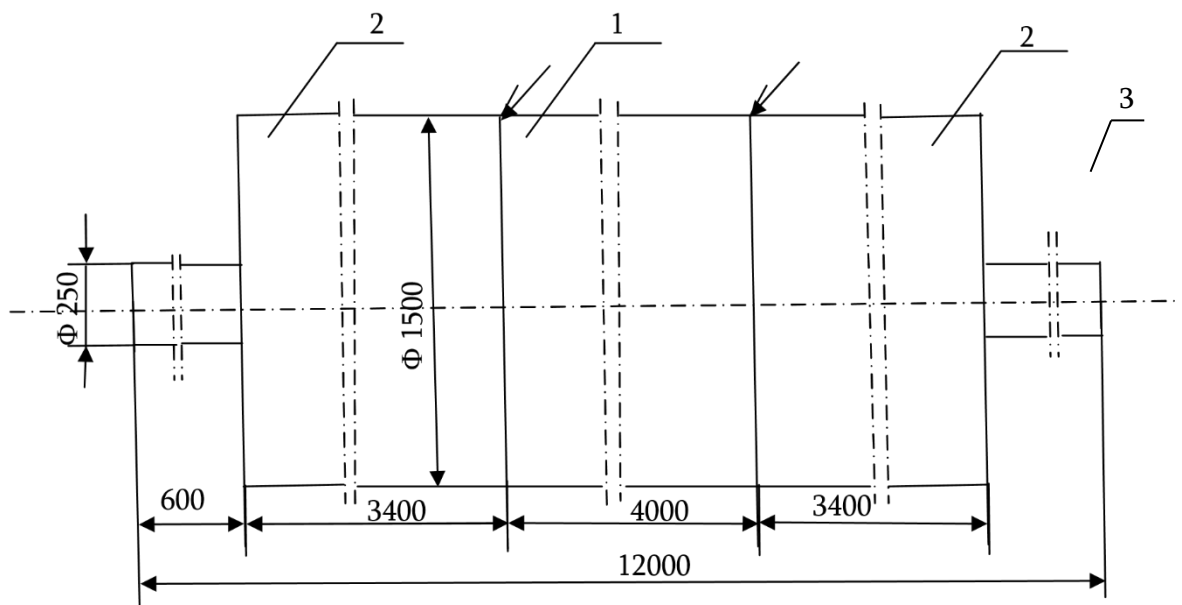
პ.ო.მელბერგის (შვედეთი) მიერ პირველად იქნა გამოყენებული ტემპერატურის პირდაპირი გაზომვის მეთოდი ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში.

მეტალურგიის განვითარების ტენდენციები საქართველოშიც უწყვეტია. სამსხმელო წარმოების მდგომარეობა განსაზღვრავს ქვეყანაში მანქანათმშენებლობის

განვითარების დონეს. საქართველოში სპეცმეტალურგის განვითარებაში დიდი წვლილი მიუძღვის მეტალურგის ინსტიტუტის ერთ-ერთ ხელმძღვანელს ალიომა ტაბიძეს. ასევე ფერდინანდ თავაძის ნაშრომებში დიდი ყურადღება აქვს დათმობილი ახალი, იაფი და ეკონომიურად ლეგირებული ფოლადების შემუშავებას.

როგორც ავღნიშნეთ, ელექტროწიდური პროცესი პირველად გამოყენებული იქნა, გასული საუკუნის 40-იანი წლების დასასრულსა და 50-იანი წლების დასაწყისში, ნაწიბურების გამოყვანის გარეშე პრაქტიკულად ნებისმიერი სისქის (კვეთის) ლითონის დეტალის შედუღებისათვის, კიევის პატონის სახელობის ელექტროშედუღების ინსტიტუტში.

ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადის მიღების ელექტროწიდურ ტექნოლოგიაში იგულისხმება: 1) როტორის ნამზადის ცალკეული შემადგებელი ნაწილების მიღება ლითონების ელექტროწიდური გადადნობით; 2) როტორის ერთი მთლიანი ნამზადის მიღება ცალკეული შემადგენელი ნაწილების ერთმანეთთან ელექტროწიდური შედუღებით. აღნიშნულ ტექნოლოგიურ პროცესს, როგორც შედუღების ასევე გადადნობის პროცესს საფუძვლად უდევს გამდნარ წიდაში დენის გავლით გენერირებული სოთბოს საშუალებით ლითონის გადადნობა.



ნახ.1.1. ტურბოგენერატორის როტორის ნამზადი

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

1-ელ სურათზე მოყვანილია გენერატორის ცილინდრული ფორმის ნამზადი თავისი შემადგენელი ნაწილებით. იგი სამნაირი ცილინდრული ნაწილისაგან შედგება. ამასთან კიდურა ნაწილები გარდამავალი ფორმის ცილინდრული სხეულია. მათგან მცირე დიამეტრის ცილინდრი წარმოადგენს ნამზადის დაბოლოებას ბრუნვის საკისრის განლაგებისათვის [1].

როტორის ნამზადი წარმოადგენს Cr-Ni-Mo-V-ქრომ-ნიკელ-მოლიბდენ-ვანადიუმი სისტემის შენადნობს ე.წ. როტორულ ფოლადს. ელექტროწიდური შედუღებით მიღებული ნაკერის მექანიკური თვისებები უნდა აკმაყოფილებდეს მოთხოვნებს, რომელიც წაყენებული აქვს სწრაფისვლის (3000 ბრ/წთ-მდე) ფოლადებს. ეს თვისებები მიიღწევა შედუღების შემდეგ ნაკერის თერმული დამუშავებით.

თერმულ დამუშავებაში იგულისხმება: ა) შედუღების ადგილის 880°C ტემპერატურამდე ნორმალიზაცია და შემდეგ 620°C-ზე მოშვება; ბ) 880°C ტემპერატურაზე წრთობა და 620°C-ზე მოშვება; გ) წრთობა 880°C-ზე და მოშვება 650°C-ზე. წიდური შედუღებით მიღებული ნაკერის თერმული დამუშავებით უზრუნველყოფილი მექანიკური თვისებები შედარებულია ძირითადი ლითონის მექანიკურ თვისებებთან ცხრილში. 1.1.

მექანიკური თვისებების გაუარესება შედუღების ზონაში ძირითადად ფოლადთან შედარებით დაშვების ფარგლებშია [2,3,4], ამიტომ შეიძლება დავასკვნათ, რომ როტორის ცალკეული შემადგენელი ნაწილების შედუღება არსებული ტექნოლოგიით შეიძლება გამოყენებულ იქნას როტორის ნამზადის მისაღებად და არ საჭიროებს დამატებით კვლევებს. გარდა ამისა, შენადული შეერთების მექანიკური თვისებები, რომლებიც მოყვანილია ცხ.1.1-ში მიუთითებს იმაზე, რომ ძირითადი მახასიათებლები: სიმტკიცის, პლასტიკურობის, შედუღების ადგილის ლითონის სიბლანტე, აგრეთვე შედუღების ზონის მახასიათებლები და ძირითადი ლითონის თერმული დამუშავების თითოეული მითითებული რეჟიმისათვის იმყოფება პრაქტიკულად ერთ დონეზე. ამის გამო შედუღების შემდეგ ნაკერის წრთობა შეიძლება შევცვალოთ ნაკერის ნორმალიზაციით, როგორც თერმული დამუშავების შედარებით მარტივი ტექნოლოგიური პროცესით. გენერატორის როტორის შუა ცილინდრული ნაწილები(ნახ.1.1) შეიძლება დამზადებული იქნას ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის ცნობილი სქემით (ნახ.1.2)

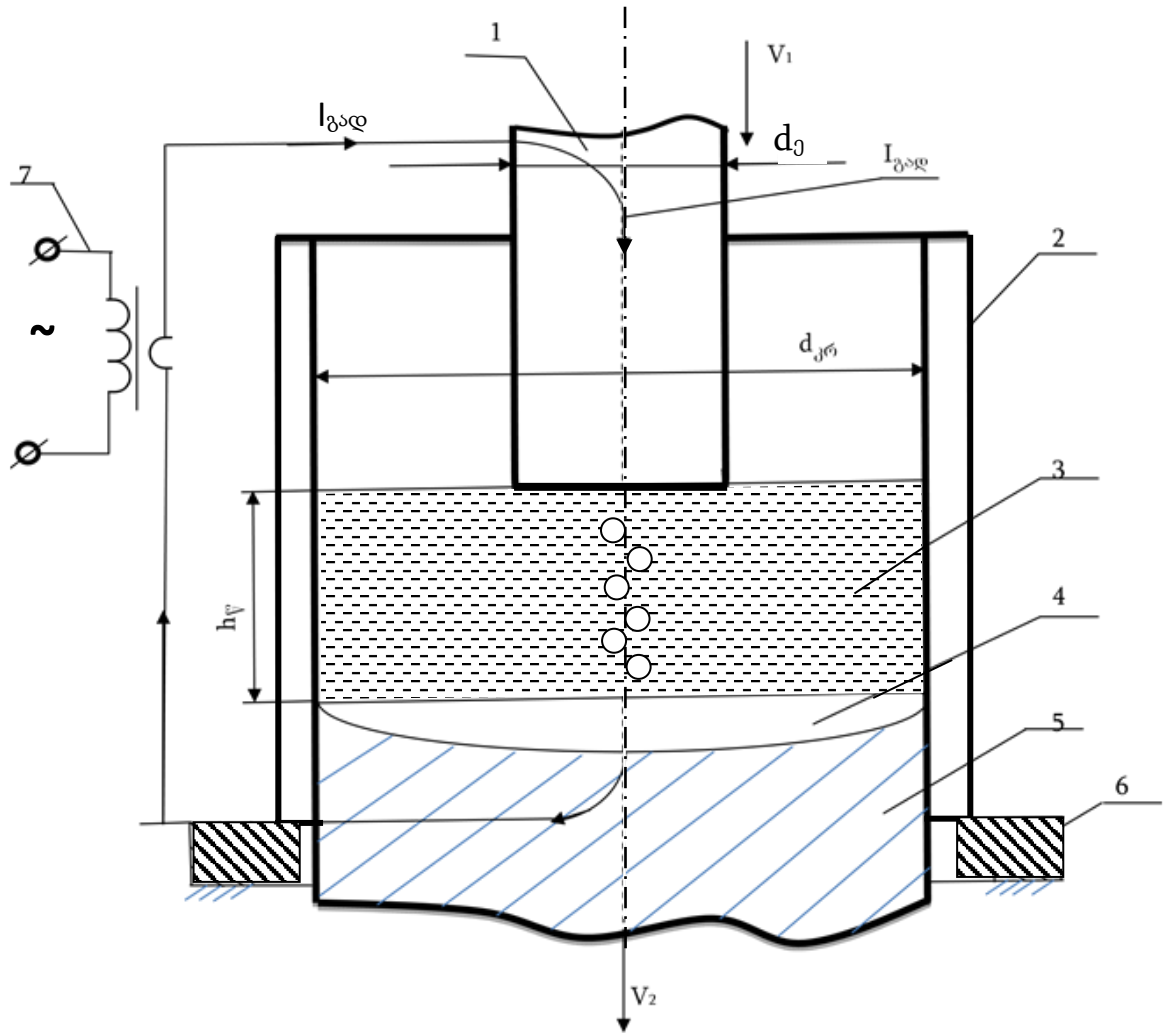
ელექტროწიდური შენადული ნაკერის და ძირითადი ლითონის მექანიკური
მახასიათებლები:

	შენადული შეერთება (ნაკერის ცენტრი)		თერმული დამუშავება			მოთხოვნები სწრაფსვლის როტორის ტექნიკური პირობებიდან
			ნორმალიზაცია 880°C-ზე, მოშვება 620°C- ზე	წრთო- ბა 880°Cზე, მოშვე- ბა 620°Cზე	წრთობა 880°C-ზე, მოშვება 650°C-ზე	
1	სიმტკიცე σ_T	ნაკერში	83	90	86	≥ 72
		ნაკერის მახლობელ ზონაში	85	87	84	
		ძირითად ლითონში	81	89	84	
2	პლასტიკურობა σ_B	ნაკერში	94	97	93	≥ 85
		ნაკერის მახლობელ ზონაში	95	95	95	
		ძირითად ლითონში	92	97	96	
3	სიბლანტე δ	ნაკერში	18	18	19	≥ 15
		თერმული გავლენის ზონაში	18	17	20	
		ძირითად ლითონში	19	18	21	
4	ψ	ნაკერში	53	60	63	≥ 45
		თერმული გავლენის ზონაში	63	65	65	
		ძირითად ლითონში	69	67	67	
5	a_H	ნაკერში	11	13	19	≥ 6
		თერმული გავლენის ზონაში	18	19	20	
		ძირითად ლითონში	17	17	21	

აღნიშნული სქემით სარგებლობისას როტორის ნამზადის მასალის ხარისხი მნიშვნელოვნად უმჯობესდება, მაგრამ მნიშვნელოვნად იზრდება ამავე დროს ამ უკანასკნელის თვითღირებულება. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის წარმოდგენილი სქემა (ნახ.1.2) სხვა სქემებთან შედარებით მარტივია [2,3,4,5,6,7]. მისი საშუალებით შესაძლებელია პროცესის დაწყება ორივე ხერხით: ე.წ. მშრალი დაწყება და წინასწარ გადადნობილი წიდის ჩასხმით კრისტალიზატორში. პირველ შემთხვევაში დნობად ელექტროდსა (1) და კრისტალიზატორის ძირს (6) შორის ათავსებენ მყარ მდგომარეობაში შედარებით დენის გამტარ AH-1 ფლიუსის ნატეხს. დნობადი ელექტროდის დაჭერით მასზე ხდება ელექტრული კონტაქტის ფორმირება და ამის შემდეგ ჩართული დენის წყაროდან მოდებული ძაბვის მოქმედებით (ძაბვის სიდიდე ≈ 40 ვოლტს) წარმოიქმნება დენგამტარი წიდის ფენა. მასში დენის გავლით ვარვარდება და იწყება მის გარშემო მყარი წიდის თანდათანობითი გადნობა. გადნობის პროცესს აგრძელებენ მანამ, სანამ არ მიიღებენ საჭირო სიმაღლის წიდის აბაზანას. წარმოდგენილ სქემას (ნახ.1.2) ხშირად უწოდებენ ლითონების ელექტროწიდურ გადადნობას უძრავ კრისტალიზატორში. გადადნობილი ფოლადის თვითღირებულება ორჯერ მეტია საროტორე Cr-Ni-Mo-V სისტემის ფოლადის თვითღირებულებაზე. გადადნობის შემდეგ ფოლადის თვითღირებულების გაზრდა გამოწვეულია ელექტრული ენერჯის დიდი ხარჯით. ე.ი. ფაქტიურად გენერატორის როტორის მიღებული ნამზადის თვითღირებულებას განსაზღვრავს დახარჯული ელექტრული ენერჯის ღირებულება.

ელექტრული ენერჯის ხარჯის შემცირება შესაძლებელია ე.წ.

კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტის $K = \frac{d_{ელ}}{d_{კრ}}$ გაზრდით.



ნახ.1.2 ლითონების ელექტროქიმიური გადადნობის კლასიკური სქემა.

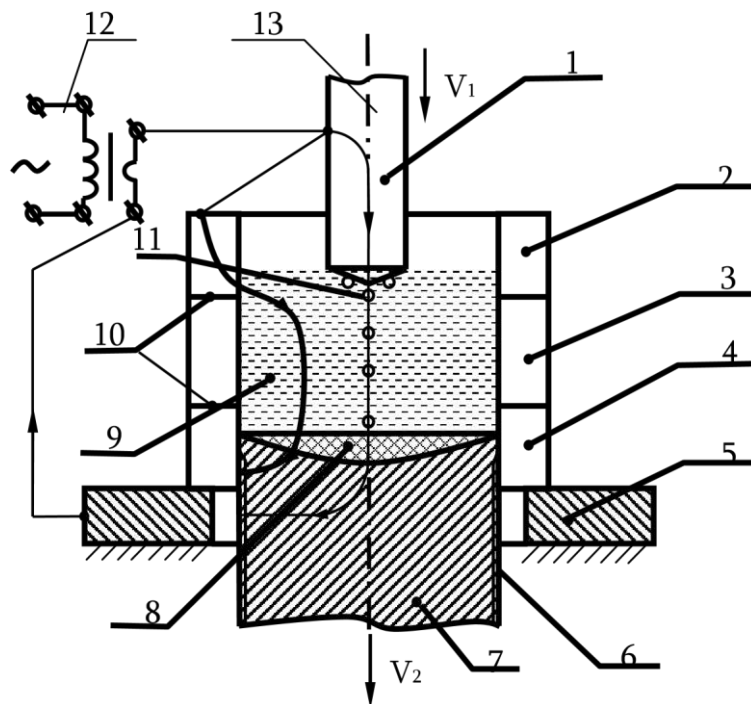
1-გადასადნობი ლითონის ელექტროდი; 2-კრისტალიზატორი; 3-თხევადი წიდის აბაზანა; 4-თხევადი ლითონის აბაზანა; 5-ლითონის სხმული; 6-კრისტალიზატორის ძირი; 7-დენის წყარო; $I_{\text{გად}}$ -გადადნობის დენი. $h_{\text{წიღ}}$ -წიდის აბაზანის სიმაღლე; $d_{\text{კრ}}$ -კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი; $d_{\text{ელ}}$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

ჩვენმა წინასწარმა გამოკვლევებმა აჩვენა, რომ საროტორო ფოლადის გადადნობისას კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტის გაზრდა (თითქმის ერთამდე) შეიძლება ჩვენს მიერ დამუშავებული ახალი კრისტალიზატორის და მისი შეერთების სქემით სარგებლობისას (ნახ.1.3). ამის დასადგენად აუცილებელია შემოთავაზებული ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში კრისტალიზატორის წიდაში ტემპერატურული და ელექტრული ველის კვლევა. ეს შესაძლებლობას მოგვცემს დადგენილი იქნას გადადნობის პროცესისათვის საჭირო დენის დაზოგვის შესაძლებლობა. შემოთავაზებული კრისტალიზატორი შედგება 3 სექციისაგან (ნახ.1.3) მათგან ზედა (2) და ქვედა (4) სექცია, იმავე დროს, წარმოადგენს კრისტალიზატორის არადნობად ელექტროდებს; მათზე მოდებულია ძაბვა დენის წყაროდან (12) ისე, რომ ზედა არადნობად ელექტროდთან მიერთებული დენის წყაროს მომჭერი, ამავე დროს მიერთებულია დნობად ელექტროდთან (1). ეს უკანასკნელი დამზადებულია გადასადნობი საროტორო მასალისაგან. ზედა და ქვედა არადნობადი ელექტროდები შუა სექციისაგან (3) ელექტრულად იზოლირებულია საიზოლაციო მასალით (10). კრისტალიზატორის სამივე სექციას გააჩნია ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელი წყლის გაგრილების სისტემა. გადასადნობი ელექტროდი (1) ჩაშვებულია წინასწარ გამდნარ წიდის აბაზანაში (9). დნობად და არადნობად ელექტროდებში ერთდროულად გამავალი დენით გამოიყოფა წიდის აბაზანაში დნობადი ელექტროდის (1) გადასადნობად საჭირო სითბო. ელექტროდის (1) გადნობით წარმოქმნილი წვეთები (11) გაივლის რა წიდის მოცულობას, განიცდის რაფინირებას, დეგაზაციას და გადადის გამდნარი ლითონის აბაზანაში (8). კრისტალიზატორის გაგრილების შედეგად, ლითონის აბაზანის თანდათანობით გაგრილებით, წარმოიქმნება გადამდნარი ლითონის აბაზანისაგან სხმული (7) რომელიც V_2 სიჩქარით გამოიწელება კრისტალიზატორისაგან, რასაც ხელს უწყობს სხმულსა და კრისტალიზატორს შორის, წიდის გაციებით წამოქმნილი წიდის ქერქი (6).

ლითონის გადადნობის ტექნოლოგიის პარამეტრებით (გადადნობის დენი $I_{\text{ფ}}$, ძაბვა $U_{\text{ფ}}$, წიდის წინაღობა $R_{\text{ფ}}$, გადადნობის სიჩქარე და სხვა) უზრუნველყოფილი დნობადი ელექტროდის დნობის სიჩქარე V_1 განაპირობებს კრისტალიზატორიდან დანადგარის მიერ უზრუნველყოფილ გამოწელების სიჩქარეს (V_2).

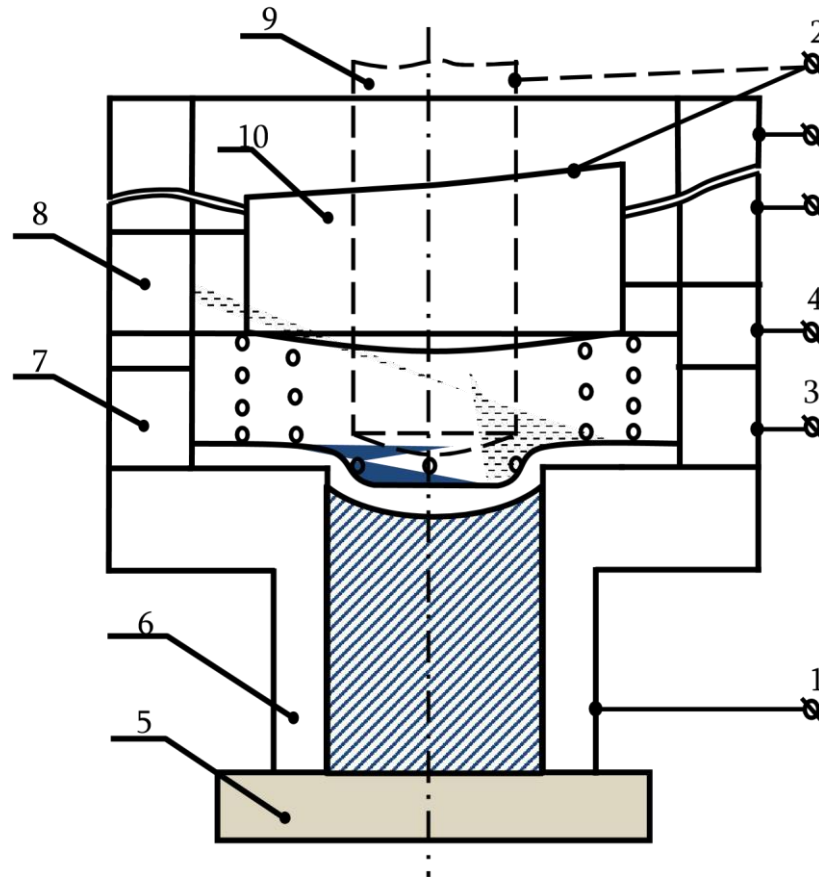
დანადგარის შეერთების ელექტრული სქემის მიხედვით, ზედა არადნობად ელექტროდთან (2) და დნობად ელექტროდთან (1) მიყვანილია ერთი და იგივე პოტენციალი, რაც გამორიცხავს გადადნობის პროცესში არადნობად და დნობად ელექტროდებს შორის მოკლედ შერთვას მათი ერთმანეთთან შეხების შემთვევაშიც კი. ეს საშუალებას იძლევა მაქსიმალურად გაზრდილი იქნას დნობადი ელექტროდის შიგა დიამეტრი, შესაბამისად გაზრდილი იქნას კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი (K). ეს უკანასკნელი დაკავშირებულია გადადნობის პროცესში თბური დანაკარგების შემცირებასთან. ამის დასადგენად საჭირო იქნება კვლევებით დადგინდეს ლითონის გადადნობის დენის დაზოგვის შესაძლებლობა.

საროტორე მასალიდან ელექტროწიდური გადადნობით როტორის ნამზადის ბოლოების (ნახ.1.1) მიღება შესაძლებელია ნახ.1.4.-ზე წარმოდგენილი ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სქემით.



ნახ.1.3 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.

შედარებით კონსტრუქციული სირთულის გამო ნახ.1.4-ზე წარმოდგენილი სქემის ნაცვლად უფრო პრაქტიკულია ნახ. 1.2-ზე და ნახ. 1.3-ზე წარმოდგენილი სქემებით სამი სხვადასხვა დიამეტრის მქონე კრისტალიზატორში ნამზადის სხვადასხვა ნაწილების მიღება. მასში ერთმანეთთან შერწყმულია კლასიკური კრისტალიზატორი (ნახ.1.2) ჩვენს მიერ შექმნილ კრისტალიზატორთან და მის შეერთების სქემასთან (ნახ.1.3).



ნახ.1.4. როტორის ნამზადის კიდურა ნაწილის ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორის სქემა.

ნახ.1.4-ზე წარმოდგენილი კრისტალიზატორის ქვედა სექცია (6) იმეორებს როტორის ნამზადის კიდურა ნაწილის ფორმას და მასში გადადნობის პროცესის მიმდინარეობისას დენის წყაროსთან მიერთებულია იგი და გადასადნობი ელექტროდი (9). როგორც კი წიდის დონე, სხმულის თანდათანობით ზრდისას, მიაღწევს დონეს, როცა წიდა უკვე შეხებაში მოვა შუა სექციასთან (3), მაშინ დენის წყაროს მეორე მომჭერი დნობადი ელექტროდიდან (9) გადაირთვება (3) მომჭერზე. რის შედეგადაც დენი იწყებს გავლას შუა (3) და ქვედა სექციებს (6) შორის წიდის ფენაში და (9) დნობადი ელექტროდის

დარჩენილი ნაწილის ამოღება შეიძლება კრისტალიზატორიდან წილის ფენის გაციების გარეშე; მას დაემატება გადასადნობად წიდა მანამ, სანამ გამდნარი წიდა არ მოიცავს შუა სექციას (8). ამის შემდეგ კრისტალიზატორში ჩაიდგება გაზრდილი დიამეტრის დნობადი ელექტროდი (10). დენის წყარო ავტომატურად გადაირთვება შუა სექციიდან (მომჭერი 3) ზედა სექციაზე (მომჭერი 4) და ერთდროულად დნობად ელექტროდზე (10). შემდეგში, სხმულის სიმაღლის ზრდასთან ერთად ზედა სექციიდან დენი გადაირთვება მომდევნო სექციებზე.

1.2. დისერტაციაში დასმული და გადაწყვეტილი ამოცანები

მიზნის მისაღწევად დისერტაციაში დასმულია და გადაწყვეტილია მთელი რიგი 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 ჩატარებული 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 მეთოდები.

წარმოდგენილი ნაშრომის სამეცნიერო სიახლეს წარმოადგენს მიღებული მათემატიკური გამოსახულებები ელექტროწიდური გადადნობის თბური პროცესების და გადადნობისათვის საჭირო დენის განსაზღვრისათვის, გადასადნობი ლითონის და გამოყენებული წიდის ფიზიკურ-მექანიკური მახასიათებლების, აგრეთვე ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის (კრისტალიზატორის) მთავარი პარამეტრების მიხედვით.

1.3. როტორის ნაშხადის ელექტროწიდური გადადნობით მიღების წინასწარი კვლევის შედეგები

უძრავი კრისტალიზატორის სქემით, ელექტროწიდური გადადნობის 80 მმ-იანი დიამეტრის ლაბორატორიული დანადგარის კრისტალიზატორში გამოდნობილი, სწრაფსვლიანი როტორის მაგნიტური გამტარის ნაშხადის ჩვენს მიერ შესრულებული ლაბორატორიული კვლევის შედეგები ტექნიკურ მოთხოვნებზე, ელემენტების გოგირდის და ფოსფორის, არალითონური ჩანართების შემცველობაზე და სხმულის მოცულობაში განაწილებაზე შედარებულია სწრაფსვლიანი როტორის სამრეწველო დანადგარის კრისტალიზატორში მიღებული ნაშხადის სათანადო კვლევის შედეგებთან, რომელიც მრავალი კვლევებითაა დადასტურებული [3].

ელექტროენერგეტიკის შემდგომი განვითარებისათვის აუცილებელია ელმანქანათმშენებლობის ტექნოლოგიის განვითარება, რაც გულისხმობს გაზრდილი იქნას ენერგოდანადგარების ძირითადი დეტალების ტექნიკური სიმტკიცე და შესაბამისად მათი წარმოებისათვის ნაშხადების მასალის ხარისხისადმი წაყენებული მოთხოვნები. [1]

ელექტრომანქანათმშენებლობაში განსაკუთრებით გაზრდილი მოთხოვნები წაყენება Cr-Ni-Mo-V (ქრომ-ნიკელ-მოლიბდენ-ვანადიუმ) სისტემის ფოლადებს, რომლებიც გამოიყენება სწრაფსვლიანი გენერატორების როტორის წარმოებაში, რომლის ბრუნვის სიჩქარე მაღალია და შეადგენს 3000 ბრ/წთ-ში.

სწრაფსვლიანი როტორის მაგნიტური გამტარის კონსტრუქციული სიმტკიცის კვლევამ აჩვენა, რომ საიმედოობის საჭირო დონე გენერატორის მუშაობისას უზრუნველყოფილია, როცა როტორის ნამზადის მასალა შეიცავს მინარევეებს (S, P) და არალითონურ ჩანართებს შეზღუდული რაოდენობით, თანაც, როცა არალითონური ჩანართები თანაბრად არის განაწილებული როტორის ნამზადის მთელ მოცულობაში.[2]

ცხრილი 1.2.

სწრაფსვლიანი როტორის ნამზადის მასალისადმი წაყენებული ტექნიკური მოთხოვნები [1,2].

მექანიკური თვისებების დახასიათება	სიმტკიცის ზღვარი σ_B , კგძ/მმ ²	ფარდობითი წაგრძელება δ , %	დარტყმითი სიბლანტე α_H ნ.წმ/მ ²	ფარდობითი შევიწროება, ψ , %	სისაღებრინელ-ებში, HB
ტექნიკური პირობების მოთხოვნები მექანიკურ თვისებებზე	≥ 72	≥ 85	≥ 15	≥ 45	≥ 240

ეს შესაძლებელია, როცა სწრაფსვლიანი როტორის წარმოებისათვის გაუმჯობესებული ხარისხის მაგნიტური გამტარის ნამზადის ქრომ-ნიკელ-მოლიბდენ-ვოლფრამ სისტემის ფოლადს ღებულობენ ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის მეთოდით. რისთვისაც ჩვეულებრივი მეტალურგიული წესით ქრომ-ნიკელ-მოლიბდენ-ვოლფრამ სისტემის ფოლადისაგან, წინასწარ ამზადებენ ელექტროდს, რომელსაც გადაადნობენ ჩვეულებრივი წყლით გაგრილების კრისტალიზატორში (ნახ.1.2)

თხევად წიდაში დენის გატარებით გამოყოფილი სითბოს ხარჯზე, მიიღებენ საჭირო მექანიკური თვისებებისა და სტრუქტურის მქონე სხმულს. მისი, როგორც სწრაფსვლიანი როტორის ნამზადის სპეციალურ ლითონმჭრელ ჩარხებზე დამუშავებით (დაიყვანენ

საჭირო დიამეტრამდე, უკეთებენ ღარებს გრაგნილების ჩასაწყობად და სხვა) ღებულობენ როტორის ე. წ. მაგნიტურ გამტარს.

საწარმოო პირობებში მიღებული მძლავრი გენერატორების როტორის მაგნიტური გამტარის ნამზადის კონსტრუქციული სიმტკიცე, მასში მინარევების და არალითონური ჩანართების რაოდენობრივი შემცველობა და მათი განაწილება ნამზადის მთელ მოცულობაში გამოკვლეულია ცნობილი რუსი, უკრაინელი და იაპონელი მეცნიერების მიერ. ნაჩვენებია, რომ მავნე მინარევები (გოგირდი და ფოსფორი) თანაბრადაა განაწილებული ნამზადის მთელ მოცულობაში. მათ შორის გოგირდის შემცველობა მცირდება 5-ჯერ და მეტად, ვიდრე გადასადნობ ელექტროდში. ნამზადის მოცულობაში თანაბრადაა აგრეთვე განაწილებული არალითონური ჩანართები და უმნიშვნელოდ გაზრდილია მათი საერთო რაოდენობა ელექტროდის მასალაში მათ შემცველობასთან შედარებით. ზემოთ აღნიშნულის გამო, კონსტრუქციული სიმტკიცე როტორის მაგნიტური გამტარის ცხრილ.1.3-ში მოყვანილ წაყენებულ მოთხოვნებს სრულად აკმაყოფილებს. მიუხედავად აღნიშნულისა, სწრაფსვლიანი როტორის ნამზადის სამრეწველო პირობებში მიღების დღეისათვის გამოყენებული ელექტროწიდური მეთოდი ხასიათდება მაღალი თვითღირებულებით. რაც გამოწვეულია იმით, რომ ელექტროწიდური პროცესისათვის დამახასიათებელია ელექტრული ენერჯის დიდი ხარჯი, ამოიტომ ორჯერ იზრდება როტორის მაგნიტური გამტარის ღირებულება. (ცხ.1.3).

ცხრილი. 1.3.

ელექტრული ენერჯის, წყლის და წიდის მოხმარება ელექტროწიდური გადადნობისას

სხმულის (როტორის ნამზადის) წონა, ტ.	სხმულის დიამეტრი, მმ	ელექტროენერჯის მოხმარება, კვტ/ტ	წყლის მოხმარება, მ ³ /ტ	წიდის მოხმარება, კგ/ტ
1	350	600	60	30
2	450	750	60	30
5	550	900	62	15
10	750	1100	65	15

50	1300	1456	70	15
100	1800	1600	85	20
150	2200	1680	90	25
200	2500	1720	95	30
300	3000	1800	100	35

ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში თბური დანაკარგების და ელექტრული ენერჯიის ხარჯის შემცირების მიზნით სწრაფსვლიანი როტორის ნამზადის წარმოებისათვის, ჩვენს მიერ, შემოთავაზებულია არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ორიგინალური კონსტრუქცია (ნახ.1.3).

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. კერძოდ, კრისტალიზატორი აწყობილია ერთმანეთისაგან ელექტრულად იზოლირებული სამი სექციისაგან, რომელთაგან ზედა და ქვედა სექცია ასრულებს არადნობადი ელექტროდების ფუნქციებს, ამასთანავე სამივე სექციას გააჩნია წყლით გაგრილების დამოუკიდებელი სისტემა, ეს უკანასკნელი საშუალებას იძლევა ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში, კრისტალიზატორის სხვადასხვა ნაწილში ტემპერატურული სხვაობის გათვალისწინებით, გაგრილების სხვადასხვა ინტენსივობის შერჩევით შემცირებულ იქნას კრისტალიზატორის გაგრილებით გამოწვეული თბური დანაკარგები და, აგრეთვე ისიც მნიშვნელოვანია, რომ შემცირებულ იქნას წყლის ხარჯი ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში. გარდა ამისა, შემოთავაზებული კრისტალიზატორის, კონსტრუქციული თავისებურება შესაძლებელს ხდის დნობადი და არადნობადი ელექტროდი ერთდროულად მიერთებულ იქნას დენის წყაროს ერთი და იგივე მომჭერთან ე. ი. მათზე მოდებულ იქნას ერთი და იგივე პოტენციალი. ეს საშუალებას იძლევა გაზრდილი იქნას გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი, თითქმის კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრამდე. ამით მცირდება მინიმუმამდე გადაადგილების

პროცესში გამდნარი წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებული სითბური ენერჯის დანაკარგები და იგი იხარჯება მთლიანად გადასადნობი ელექტროდის დამატებით გახურებაზე. შემოთავაზებული კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში, თბური ენერჯის ორივე სახის დანახარჯების შემცირება საშუალებას იძლევა შემცირებული იქნას დღემდე არსებული კრისტალიზატორის გადადნობის პროცესისათვის საჭირო ელექტრული ენერჯია, რაც მიზანშეწონილს ხდის ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარში გამოყენებული კრისტალიზატორი შეცვლილი იქნას შემოთავაზებული კრისტალიზატორით.

ელექტროწიდური გადადნობის დღემდე სამრეწველო დნობებისათვის გამოყენებული კრისტალიზატორებში წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებით თბური დანაკარგები შეადგენს დახარჯული სასარგებლო ენერჯის 30-40%-ს [1].

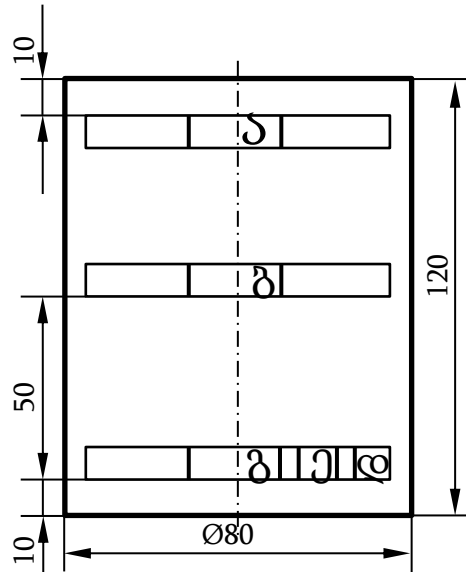
კრისტალიზატორის შემოთავაზებულ კონსტრუქციაში, არადნობადი და დნობად ელექტროდებში დენის ერთდროული გავლა წიდის აბაზანაში, მოქმედებს ელექტროდინამიური ძალების სიდიდეზე და გადანაწილებაზე, შესაბამისად განსხვავებულია შერევის პროცესის და დნობად ელექტროდზე წვეთის წარმოქმნის პირობები. ამის გამო საჭიროა გამოკვლეული იქნას შემოთავაზებული კრისტალიზატორით მიღებულ სხმულში მავნე ელემენტების, არალითონური ჩანართების შემცველობა და მათი სხმულის მოცულობაში გადანაწილება.

ნახ.1.2-ის მიხედვით შემოთავაზებული კრისტალიზატორის და სამრეწველო დანიშნულების დანადგარის დამზადება ჩვენს შესაძლებლობებს აღემატება, ამიტომ ზემოთ აღნიშნული კვლევების ჩასატარებლად, ჩვენს მიერ დამზადებული იქნა სამრეწველო დანადგარის ლაბორატორიული მოდელი. ამ მოდელში კრისტალიზატორის ზომები შემცირებული იქნა 10-ჯერ, ხოლო შეერთების ელექტრული სქემა და დნობისათვის გამოყენებული წიდა შენარჩუნებული იქნა უცვლელად.

კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრის შესაბამისად მიღებულ იქნას სხმული დიამეტრით 80 მმ და სიმაღლით 120 მმ. (ნახ.1.5). გადადნობილი იქნა 75 მმ დიამეტრის ელექტროდი. გადანობისათვის გამოყენებული იყო წიდა შემდეგი შემადგენლობის: $60CaF_2+20Al_2O_3+20SiO_2$.

ნახ.1.5-ზე ნაჩვენებია არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში მიღებულ

სხმულში (როტორის ნამზადის) საკვლევი ნიმუშების აღების ადგილები, ხოლო მასში ელემენტების განაწილება მოცემულია ცხ.1.5-ში.



ნახ.1.5. ელექტროწიდური გადადნობით მიღებულ სხმულში ელემენტების განაწილების კვლევისათვის ნიმუშის აღების ადგილები
 ა, ბ, გ-შესაბამისად სხმულის სინჯის აღების ზედა, შუა და ქვედა ადგილი; დ, ე-ცენტრიდან რადიუსის და 1/3 რადიუსის დაშორებით სინჯის აღების ადგილი.

ცხრილი. 1.4

როტორის ელექტროწიდურ სხმულში და ელექტროდში ელემენტების განაწილება

#	სხმულში სინჯის აღების ადგილი სხმულის სიმაღლეზე	სინჯის აღების ადგილი სხმულის დიამეტრის დასწვრივ	ელემენტების შემცველობა, %			
			C	P	S	Sc
1		ელექტროდში ელემენტების შემცველობა	0,24	0,010	0,014	0,36
2	სხმულის თავში	სხმულის ცენტრში	0,20	0,013	0,005	0,30
3	სხმულის თავში	სხმულის R/2	0,20	0,013	0,005	0,30
3	სხმულის ძირში	სხმულის ზედაპირზე	0,21	0,011	0,005	0,35
4	სხმულის ძირში	სხმულის R/2	0,22	0,011	0,005	0,35
5	სხმულის ძირში	ცენტრში	0,22	0,012	0,005	0,36

ცხ.1.4.-დან ჩანს, რომ გადასადნობი ფოლადის საელექტროდე მასალაში შემავალი

ნახშირბადის (C) შემცველობა 0.27%-დან შემცირებულია თანაბრად 0,22%-მდე სხმულის, თავში და ძირში. რაც გამოწვეულია, წვეთების სახით გამდნარი საელექტროდე მასალის გამდნარ წიდაში გავლისას, მისი ამოწვით. მიღებულ სხმულში ფოსფორის (P) შემცველობა საელექტროდე მასალასთან შედარებით 0,010%-დან გაზრდილია 0,013%-მდე. უნდა ვივარაუდოთ, რომ ამის მიზეზი უნდა იყოს ფოსფორის შედარებით გაზრდილი შემცველობა წიდაში. საიდანაც, ამოწვის გარეშე, იგი გადადის სხმულში. გოგირდის (S) შემცველობა სხმულში თითქმის 3-ჯერაა შემცირებული (0,014%-დან 0,005%-მდე), ამოწვის გამო ელექტროდში მის შემცველობასთან შედარებით ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში მისი ამოწვის ინტენსივობა შეიძლება კიდევ უფრო გაზარდოს წიდაში CaO-ს დამატებით.

სილიციუმის (Si) შემცველობა სხმულის თავში შემცირებულია 0,36%-დან 0,30%-მდე, სხმულის ძირში კი იგი ისევ იზრდება 0,36%-მდე. სხმულის თავში ჟანგბადის შეღწევადობა უფრო ინტენსიურია, ამიტომ როგორც დაჟანგული რკინის აღმდგენი სილიციუმი SiO_2 -ს სახით გადადის წიდაში. სხმულის ძირში ნაკლებად დაჟანგულია რკინის წვეთები და მისი განჟანგვის ინტენსივობა შედარებით დაბალია.

არადნობად ელექტროდებიან კრისტალიზატორში ჩვენს მიერ მიღებული საროტორე ნამზადის სხმულში ელემენტების შემცველობისა და განაწილების კვლევის შედეგი მოყვანილი ცხ. 1.4.-ში, პრაქტიკულად ახლოსაა სამრეწველო პირობებში ჩვეულებრივ დნობად ელექტროდიან სამრეწველო კრისტალიზატორში მიღებული სხმულის კვლევის შედეგებთან [8,9,10].

მითითებული ნიშნის მიხედვით, არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ლითონის ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული სხმულის გამოყენების შესაძლებლობის კვლევის მიზნით, ასევე განსაზღვრული იქნა სხმულის თავში და ბოლოში, მის ცენტრში და ცენტრიდან 1/3-ზე არალითონური ჩანართების განაწილება. კვლევის შედეგები მოყვანილია ცხრ.1. 5-ში.

სხმულში არალითონური ჩანართების განაწილება

სხმულზე სინჯის აღების ადგილი		არალითონური ჩანართები %					
სხმულის რადიუსზე	სხმულის სიმაღლეზე	არალითონური ჩანართების საერთო რაოდენობა	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Feo	MnO	Cr ₂ O ₃
ცენტრი	ზევით	0,0060	18,0	75,4	0,1	5,8	0,8
		0,0060	18,0	75,9	0,1	5,5	0,6
	ქვევით	0,0065	18,7	69,6	0,9	10,0	0,8
		0,0065	15,0	78,0	0,9	6,0	0,5
ცენტრიდან 1/3	ზევით	0,0070	30,0	62,6	0,1	6,6	0,8
		0,0070	28,0	64,6	0,1	6,5	0,9
	ქვევით	0,0060	21,0	65,7	0,9	10,8	1,6
		0,0060	20,0	55,5	0,9	12,0	1,6

არალითონურ ჩანართებში იგულისხმება, სხმულში გადადნობის პროცესში წიდის შემადგენლობიდან ალუმინის, სილიციუმის ჟანგეულების, ასევე პროცესის დროს წარმოქმნილი რკინის (FeO), მანგანუმის (MnO) და ქრომის (Cr₂O₃) ჟანგეულების მოხვედრილი რაოდენობება. მათ სხმულში გადანაწილების კვლევის შედეგები ცხ.1.5.-ში მიუთითებს იმაზე, რომ სხმულში არალითონური ჩანართების როგორც საერთო რაოდენობა, ასევე საერთო რაოდენობაში თითოეული არალითონური ჩანართის პროცენტული შემცველობა პრაქტიკულად ემთხვევა როტორის ნამზადის სამრეწველო სხმულში არალითონური ჩანართების საერთო რაოდენობას და თითოეული არალითონური ჩანართის გადანაწილების მონაცემებს [2,8].

ნახ.1.5-ზე მითითებულ ადგილებში ამოჭრილი ნიმუშების მიხედვით განსაზღვრული იქნა ნამზადის სხმულის მექანიკური თვისებები (ცხ.1.6).

ლითონის ელექტროწიდური გადადნობით მიღებული როტორის სხმულის მექანიკური თვისებები

	სინჯის ალების ადგილი	$\sigma_{0,2}$ კგ/სმ ²	σ_B კგ/მმ ²	δ %	ψ , %	HB
როტორის სხმული	სხმულის ზედა ზედაპირი	74,2	88,5	19,8	51,5	268
	სხმულის 0,5 სიმაღლე	72,2	89,0	20,8	62,3	269
	სხმულის ქვედა ზედაპირი	76,0	89,0	21,6	61,8	267

ცხ-1.5-ს და ცხ.1.2-ს ერთმანეთთან შედარება გვიჩვენებს, რომ არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში მიღებული ნამზადის მექანიკური თვისებები აკმაყოფილებენ სწრაფსვლიანი როტორის ნამზადის მასალისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს.

ამრიგად, ლაბორატორიული კვლევები იძლევა საფუძველს წინასწარ დავასკვნათ, რომ სწრაფსვლიანი როტორის საჭირო ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მქონე მაგნიტური გამტარის ნამზადის მიღება შესაძლებელია როგორც ლაბორატორიულ, ისევე სამრეწველო დანიშნულების არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში.

როგორც აღნიშნული იყო, არადნობადელექტროდიან კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას შესაძლებელია თბური დანაკარგების შემცირება და ამის გამო, როტორის ნამზადის თვითღირებულების შემცირება.

ექსპერიმენტულად არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის მარგი ქმედების კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის საჭიროა განსაზღვრულ იქნას კრისტალიზატორში გადადნობის დროს გამოყოფილი სითბოს საერთო რაოდენობა და თითოეული სახის თბური დანაკარგის რაოდენობა. შედგენილი უნდა იქნას თბური ბალანსის განტოლება და შედარებული უნდა იყოს იგი სამეცნიერი-კვლევით ნაშრომებში გამოქვეყნებულ გადადნობის პროცესის ანალოგიური თბური ბალანსის განტოლებასთან.

მისი ანალიზის მიზნით საჭიროა ამ განტოლების მიხედვით გადადნობისათვის საჭირო დენის განსაზღვრა და მისი შედარება რეალურ გადადნობის პროცესში გაზომილ დენის მნიშვნელობასთან.

სხვადასხვა ქვეყანაში ჩატარებული გამოკვლევების საფუძველზე სხვადასხვა გადადნობის პირობებში ლაბორატორიული დანადგარის კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას გაზომილი დენის მნიშვნელობები მოცემულია მე-3 ნაწილში.

თბური ბალანსის განტოლების შედგენა კონკრეტულ პირობებში ჩატარებული ელექტროწიდური გადადნობის პროცესისათვის დაკავშირებულია დიდი კვლევითი სამუშაოების შესრულებასთან. ჩვენს მიერ მე-3 ნაწილში შემოთავაზებულია კონკრეტულ პირობებში გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის განტოლებაში შემავალი თოთოეული თბური დანაკარგი, ასევე წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სრული სითბოს რაოდენობების განსაზღვრა პროცესზე მოქმედი პარამეტრების და ფაქტორების მნიშვნელობების გათვალისწინებით, შედარებით მარტივი ჩვენს მიერ დამუშავებული გაანგარიშების მეთოდით. ამ მეთოდის საიმედოობა და გაანგარიშების მაგალითები მოყვანილია მე-4 ნაწილში.

იმის გამო, რომ არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის გამოყენებისას მასში მიმდინარე პროცესები, პროცესზე პარამეტრების მოქმედება და ფაქტორები, შემდეგში სრულყოფილ გამოკვლევებს საჭიროებს და ამის შემდეგ იქნება შესაძლებელი ჩვენს მიერ დამუშავებული გაანგარიშების მეთოდით თბური ბალანსის განტოლების მიღება და მისი მ.ქ.კ-ის განსაზღვრა. ამიტომ გაანგარიშების მეთოდი დამუშავებულია უძრავ კრისტალიზატორში (ნახ.1.2) გადადნობის პროცესისათვის.

ისევე როგორც ცხრ.1.7-ში მოყვანილი ექსპერიმენტული მონაცემები, მათ შორის გადადნობისათვის საჭირო დენის მნიშვნელობები, მოცემულია უძრავ კრისტალიზატორში ჩატარებული გამოკვლევების შესაბამისად.

ექსპერიმენტული კვლევის და კრისტალიზატორის პარამეტრების მონაცემები
უძრავ კრისტალიზატორებში ელექტროწიდური გადადნობისას [2, გვ.136, ცხრ.2]

დნობის ნომერი	კრისტალიზატორის ზომები, მმ	ელექტროდის ზომები, მმ	წიდის აბაზანის წონა, კგ	დენი, კა	ძბვა, ვოლტი	წიდის აბაზანის წინაღობა, ომი·10 ³	დნობის სიჩქარე, კგ/წთ	ელექტროენერგიის ხარჯი, კვტ·სთ/კგ	კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი K
1	200x200	118x118	7,4	6,0	35	5,8	1,43	2,55	10,6
2	d=254	d=150	11,9	5,8	35	6,0	1,75	2,17	20,6
3	d=254	d=180	9,4	6,5	30	4,6	1,48	2,53	,13,4
4	200x200	141x141	9,4	5,8	35	6,1	1,76	2,13	22,9
5	225x 225	134x134	9,4	6,3	30	4,7	1,33	2,86	13,9
6	330x 121	196x71	9,4	5,85	34,5	5,9	1,72	2,25	12,6
7	330x 121	233x85	7,4	6,3	32	6,1	1,71	2,17	12,6
8	225x 225	160x160	11,9	6,1	32	5,2	1,49	2,52	18,2
9	200x 200	118x118	9,4	6,4	42	6,7	2,27	2,33	12,9
10	200x 200	141x141	7,4	7,3	40	5,5	2,27	2,19	14,4
11	d=254	d=180	11,9	7,2	36	5,0	3,16	1,75	13,6
12	330x121	196x71	7,4	7,0	39	38	5,4	1,81	12,5
13	225x225	134x134	11,9	7,05	38	5,4	2,58	2,26	15,1
14	225x225	160x160	9,4	7,6	35	4,5	3,16	1,62	11,3
15	330x121	233x85	9,4	7,1	40	5,6	2,60	1,92	15,7

დასკვნა I თავის მიმართ

1. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით სამრეწველო ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარით მიღებულია სხმულის არალითონური ჩანართების რაოდენობა და განაწილება, ასევე სხმულის სხვადასხვა ადგილას სიმტკიცის მახასიათებლები. ჩვენი და სხვა მრავალი გამოკვლევების მიხედვით, ისინი პრაქტიკულად ემთხვევა ლაბორატორიული დანადგარის კრისტალიზატორში მიღებული შედარებით მცირე ზომის სხმულის შესაბამის მაჩვენებელს.
2. ელექტროწიდური გადადნობის ლაბორატორიული დანადგარის კრისტალიზატორის პროცესების კვლევის და გაანგარიშების შედეგები და მეთოდები სამართლიანია სამრეწველო დანადგარის კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესებისათვის.
3. ტურბოგენერატორის როტორის გაუმჯობესებული მექანიკური თვისებების მქონე ნაშაბადი შეიძლება მიღებული იქნას სხვადასხვა დიამეტრის მქონე ცილინდრის სახით ე.წ. უძრავი სქემის შესაბამისი შიგა დიამეტრის მქონე კრისტალიზატორებში, მათი შემდგომი ელექტროწიდური შედუღების გზით.

თავი 2 ელექტროწიდური გადადნობის წიდის აბაზანის ელექტრული ველის კვლევა

2.1. ელექტრული ველის გამოკვლევის პრობლემები

პირველ თავში ნაჩვენებია იყო, რომ სწრაფსვლიანი როტორის ნამზადი დამზადებულია გაუმჯობესებული თვისებების მქონე ფოლადისაგან. კერძოდ, ელექტროწიდური გადადნობის შედეგად მიღებული სამი სახის სხვადასხვა დიამეტრის და ზომების ცილინდრების ელექტროწიდური შედუღებით. აღნიშნული ფოლადი წარმოადგენს ქრომ-ნიკელ-მოლიბდენ-ვოლფრამის სისტემის რთულად ლეგირებულ ფოლადს, ამიტომ განსხვავებულია ცილინდრების სხვადასხვა სივრცითი წერტილების ელექტრული წინაღობები. რაც გამოწვეულია იმით, რომ აღნიშნული სისტემის შენადნობი შედგება განსხვავებული ელემენტების და მათი ჟანგეულების გაუდნობელი ნაწილაკებისაგან და ლითონური მარცვლებისაგან, რომელთაც აქვთ განსხვავებული ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები [3,11,12]. ამის გამო, ერთმანეთისაგან განსხვავებულია მიღებული მასალის სივრცის სხვადასხვა წერტილებში ელექტრული პოტენციალი. შესაბამისად რთული უნდა იყოს პოტენციალის განაწილება წიდის აბაზანაში გადაადგილებული გამდნარი ლითონის მოცულობაში და ამ უკანასკნელით განპირობებული დენის გავლის გზა. იგულისხმება, რომ წიდის აბაზანაში გამდნარ ლითონში გამავალი დენი შედეგია ცალკეული წერტილებს შორის პოტენციალთა სხვაობის და დენის გავლის გზის ელექტრული წინაღობათა ფარდობის.

$$I = (\varphi_n^A - \varphi_{n+1}^B) / R_{AB} \quad (2.1)$$

სადაც φ_n, φ_{n+1} , არის, ელექტრული პოტენციალის მნიშვნელობები სივრცის A და B წერტილში, ხოლო R_{AB} არის დენის გავლის გზის წინაღობა A და B წერტილებს შორის.

იმის გამო, რომ წიდის აბაზანის შემადგენლობა არაერთგვაროვანია, წიდის აბაზანაში გამავალი დენის გაანგარიშების (2.1) გამოსახულება კიდევ უფრო გართულებულია. იგი დამოკიდებულია ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში გამოყენებული წიდის შემადგენლობაზე და შესაბამისად, მასში შემავალი კომპონენტების შემადგენლობაზე. ამ კომპონენტებს ხშირ შემთხვევაში ე.ი. ჟანგეულებს,

აქვთ დნობის მაღალი ტემპერატურა, მაგალითად Al_2O_3 . მისი დნობის ტემპერატურა $2000^{\circ}C$ -ზე მეტია, ამიტომ მისი ნაწილაკები იმყოფებიან მყარ მდგომარეობაში და წარმოადგენენ წილის აბაზანის დენგაუმტარ ნაწილაკებს. აგრეთვე, განსხვავებული ფიზიკური თვისებები აქვს გამდნარ მდგომარეობაში გამდნარი წილის კომპონენტებს, მათ შორის წინაღობა, იმის გამო რომ წიდაში შემავალ გამდნარ კომპონენტებს აქვთ გამყარების სხვადასხვა ტემპერატურა ეს ქმნის დამატებით ფიზიკურ არაერთგვაროვნებას წილის აბაზანის გაგრილების სისტემის მახლობლობაში, კერძოდ კრისტალიზატორის შიდა კედლის მახლობლობაში და მოქმედებს როგორც ელექტრულ, ასევე ტემპერატურულ ველზე.

ელექტრული ველი ელექტროწიდური გადადნობისას წილის აბაზანაში შეიძლება აღწერილი იქნას შემდეგი დიფერენციალური განტოლებით [13,14,15]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (2.2)$$

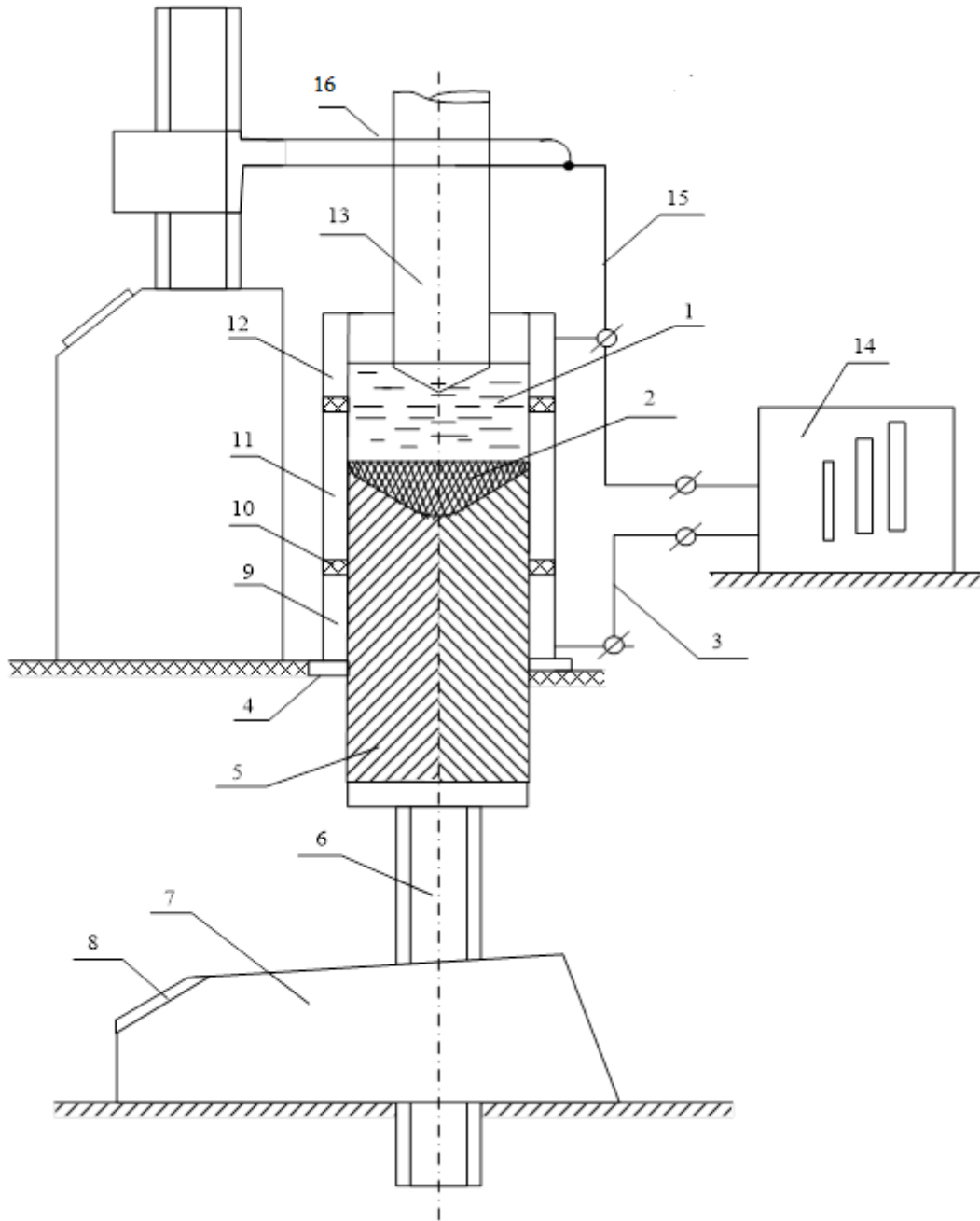
ცნობილია, რომ ელექტრული ველი არის ელექტრული პოტენციალის φ -ს ერთობლიობა დროის სხვადასხვა მომენტში და წილის აბაზანის მოცულობის სხვადასხვა წერტილში. აქედან გამომდინარე ელექტრული ველის მათემატიკური აღწერილობა გაცილებით რთული იქნება ვიდრე (2.2) წარმოდგენილი გამოსახულება. ამ შემთხვევაში გამოსახულებაში წარმოდგენილია ელექტრული ველის ცვლილება r, z ღერძების მიმართ, დროის მოცემულ კონკრეტულ მომენტში. (2.2) განტოლებაში გათვალისწინებულია წილის აბაზანის ცალკეულ წერტილებში წილის აბაზანის ხვედრითი წინაღობის ρ ცვლილება. თუმცა, ამის გათვალისწინება მნიშვნელოვნად ართულებს (2.2) გამოსახულების ამოხსნას, ამიტომ უშვებენ, რომ წილის აბაზანის ცალკეულ წერტილებში წინაღობა უცვლელია $\rho = const$ და განტოლება იღებს სახეს:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \quad (2.3)$$

იგი ითვალისწინებს ელექტრული ველის ცვლილებას წილის აბაზანის ერთ-ერთ კვეთში. მისი ამოხსნა შესაძლებელია, მაგალითად რიცხვით მეთოდით, სასრული ელემენტების მეთოდით გარკვეულ სასაზრდვრო პირობებში.

ჩვენს მიერ, დასახული მიზნიდან გამომდინარე, რაც წარმოადგენს ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის განტოლების განსაზღვრას და გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებას, ელექტრული ველის კვლევა,

ვაწარმოეთ ფიზიკურ მოდელზე, სადაც ელექტრული პოტენციალების განსაზღვრა ხდებოდა ექსპერიმენტული გზით.



ნახ.2.1 ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარის კრისტალიზატორის კონსტრუქცია და შეერთების ელექტრული 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 - ელექტროდის დამჭერები.

2.2. ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში პოტენციალის განაწილების კვლევისათვის გამოყენებული ფიზიკური მოდელი

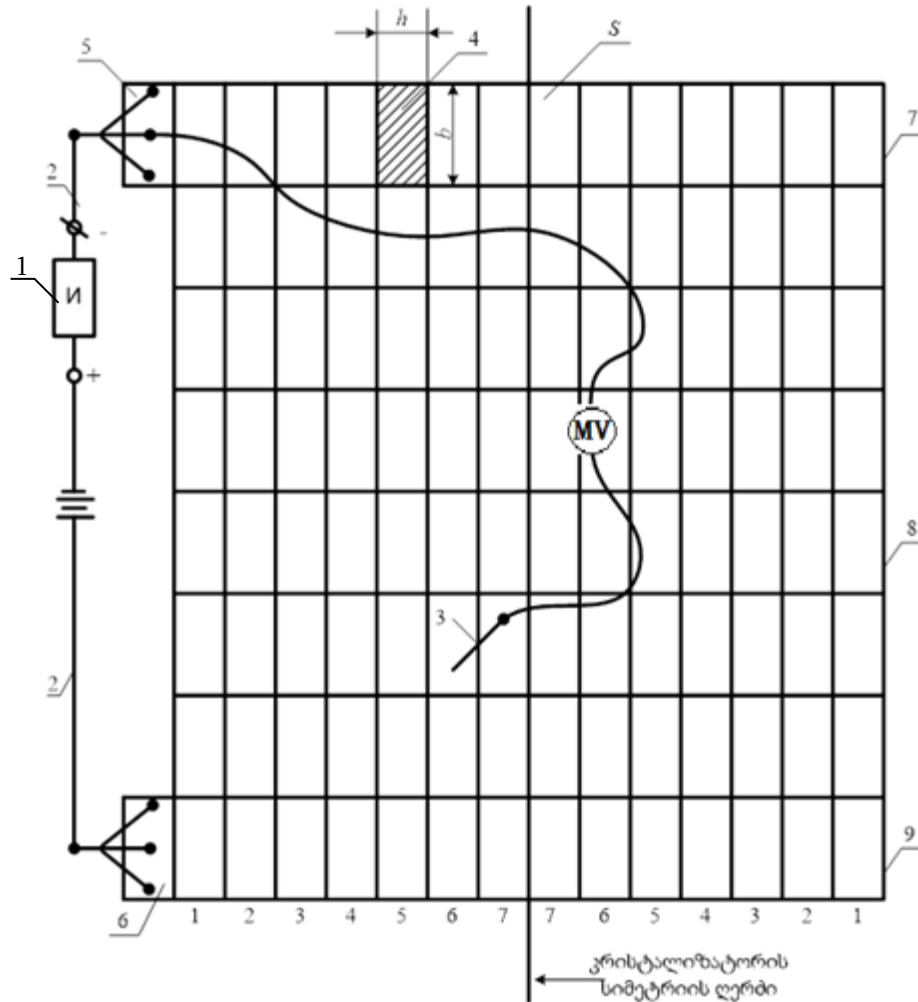
ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სითბოს წყაროს წარმოადგენს წიდის აბაზანაში გამავალი დენის მიერ გამოყოფილი ჯოჯოხის სითბო. მრავალი კვლევები აჩვენებს, აგრეთვე, რომ წიდის აბაზანაში მიმდინარე პროცესები მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული წიდის აბაზანაში გამავალი დენის როგორც სიდიდეზე, ასევე მისი გავლის გზაზე [16,17]. მაგალითად, წიდის აბაზანის სხვადასხვა უბნებზე ტემპერატურის განაწილება, წიდის აბაზანის დნობადი ელექტროდის მიმართ წიდის გადაადგილების სურათი, პროცესის დროს თბური დანაკარგები და სხვა. ამ და სხვა მრავალი პროცესების რაოდენობრივი შეფასებისათვის საჭიროა ვიცოდეთ პოტენციალის განაწილება წიდის აბაზანაში და აქედან გამომდინარე, ტემპერატურა შესაბამის უბნებზე [18,19]. როგორც აღნიშნული იყო ელექტრული დენი გადის თხევადი წიდის იმ ნაწილში სადაც არსებობს ელექტრული ველი ე.ი. გვაქვს პოტენციალთა სხვაობა წიდის მოცემული ნაწილის სხვადასხვა წერტილში. აღნიშნულიდან გამომდინარე ჩვენი მიზანია ფიზიკური მოდელის საშუალებით გამოკვლევულ იქნას პოტენციალის განაწილების ხასიათი კრისტალიზატორში არსებულ თხევად წიდაში¹.

გამოკვლევებმა აჩვენეს, რომ თხევად წიდას აქვს აქტიური წინაღობა. რასაც ნაწილობრივ ამტკიცებს წიდის შესაბამის უბანზე მოდებული ძაბვის და წიდაში გამავალი დენის ოსცილოგრამის ანალიზი. კერძოდ, დენის და ძაბვის ოსცილოგრამები ფაზით ემთხვევა ერთმანეთს. ცილინდრული კრისტალიზატორის შემთხვევაში, თხევად წიდაში პოტენციალი განხილული უნდა იქნას მთელ მოცულობაში, მაგრამ მოდელის საშუალებით შედარებით გაადვილებულია პოტენციალის განაწილების სურათის გამოკვლევა დროის ერთ რომელიმე მომენტში ცილინდრული სივრცის ერთ რომელიმე კვეთში.

როგორც აღნიშნული იყო არაერთგვაროვანი შემადგენლობის გამო, წიდის

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.

ცალკეულ შემადგენელ წერტილებში პოტენციალის სიდიდე დამოკიდებულია არა მარტო მასში გამავალი დენის სიდიდეზე, არამედ ამ წერტილში წილის შემადგენლობაზე და ამ წერტილში დნობადი ელექტროდის წვეთების შემადგენლობაზე.



ნახ.2.2. ელექტროწიდური გადადნობის ფიზიკური მოდელი

1-კვების წყარო; 2 - სადენი; 3 - შუპი; 4 - ელემენტარული უჯრა ($h=5\text{მმ}$, $b=25\text{მმ}$); V - მილივოლტმეტრი; 5 - კრისტალიზატორის ზედა არადნობადი ელექტროდის დენმიმცვანი; 6 - კრისტალიზატორის ქვედა არადნობადი ელექტროდის დენმიმცვანი; 7, 8, 9 - ზედა, ქვედა და შუა სექციები

აღნიშნულიდან გამომდინარე, საჭიროა მოდელის სახით წარმოდგენილი ლითონის თხელი ფურცელი უნდა იყოს გადასადნობი ელექტროდის მასალის მსგავსი (დანართი. 1.).

მოდელის დამზადებისას შერჩეული იქნა უჟანგავი ფოლადის (AISI 321) ფურცელი, სისქით 0,1 მმ. რადგანაც როტორის ნამზადის მისაღებად დნობადი ელექტროდის შემადგენლობის რთულად ლეგირებული Cr-Ni-Mo-V სისტემის ფოლადი ფურცლოვანი სახით არ მზადდება. მალეგირებელი ელემენტების ფურცელში არათანაბარი განაწილება მის სხვადასხვა წერტილში იძლევა იმის საშუალებას, რომ იმიტირებული იქნას მოცემულ სიბრტყეში წიდის ელემენტების არათანაბარი განაწილებით გამოწვეული წინაღობის არათანაბრობა. შერჩეული ლითონის ფურცლის ზომები ემთხვევა კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრს (60 მმ) და წიდის აბაზანის სიმაღლეს ($h=80$ მმ).

ნახ.2.2-ზე ფურცლის ზომები, გადიდებულია ორჯერ (120x160 მმ). სინამდვილეში ზედა 7 და ქვედა 9 არადნობადი ელექტროდები ელექტრულად იზოლირებულია შუა 8 სექციიდან. წარმოდგენილ მოდელში ისინი ერთმანეთისაგან არაა იზოლირებული, რადგანაც იგულისხმება, რომ კრისტალიზატორი შევსებულია დენგამტარი თხევადი წიდიტ (ნახ.1.2).

როგორც ნახ.2.1-იდან ჩანს, რომ ელექტროწიდური გადადნობისას დენის წყაროს (1) მომჭერები მიერთებულია კრისტალიზატორის ზედა არადნობად (5) და ქვედა არადნობად ელექტროდთან. შესაბამისად, ელექტრული ველის კვლევისათვის მოდელზე მუდმივი დენის წყაროს მომჭერები მიერთებულია მოდელის ფურცლის (5) და (6) მომჭერებთან. თანაც დენის წყაროს „უარყოფითი“ პოტენციალი მოდებულია ზედა არადნობად ელექტროდის დენმიმყვანთან (5), ხოლო „დადებითი“ ქვედა ელექტროდის დენმიმყვანთან (6). ექსპერიმენტის დროს (1) დენის წყარო მოდელში უზრუნველყოფს ისეთი სიდიდის დენის გავლას, რომელმაც არ უნდა გამოიწვიოს მოდელის ფურცლის გახურება. რითაც თავიდან იქნება აცილებული ფურცლის გახურებით მისი წინაღობის შეცვლა, რომელიც გავლენას ვერ მოახდენს გამოკვლეულ ველზე. ექსპერიმენტში გათვალისწინებულია ის, რომ მოდელში გამავალი დენის სიდიდე უნდა იყოს რეალურ პირობებში გადადნობის დროს წიდაში გამავალი დენის პროპორციული (მაგალითად, შემცირებული 100-ჯერ).

ლითონის ფირფიტა დაყოფილია უჯრედებად: $h=10$ მმ, $b=5$ მმ. ექსპერიმენტის დროს გათვალისწინებულია თითოეული 10×15 უჯრის ცენტრში პოტენციალის

მნიშვნელობის განსაზღვრა ნემსით (3) წვერითა და გაზომვის წრედში ჩართული მილივოლტმეტრის საშუალებით.

მოდელზე ერთნაირი პოტენციალის მქონე წერტილების ერთმანეთთან შეერთებით მიღებულია ე.წ. ექვიპოტენციალური ხაზები.

2.3. ელექტროწიდური გადადნობისას ელექტრული ველის კვლევის შედეგები

პოტენციალის კვლევის საწყის ეტაპზე განსაზღვრული იქნა მოდელზე მომჭერებიდან დაშორებული იმ მახლობელი წერტილების პოვნა, რომელთა პოტენციალი ნულის ტოლია. მონაცემები წარმოდგენილია ნახ. 2.3-ზე და ცხრილი 2.1-ის საშუალებით.

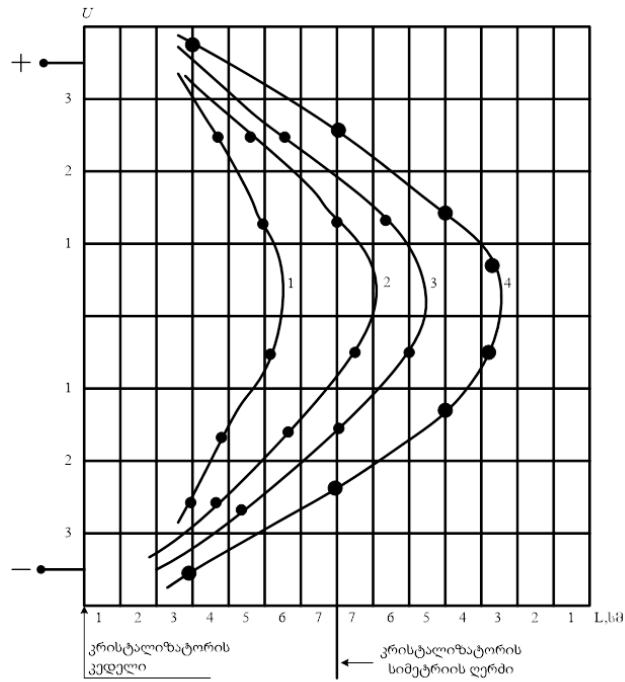
პოტენციალების მნიშვნელობების ასეთი ზღვრული მნიშვნელობები დამოკიდებულია მოდელის მომჭერებზე მოდებული ძაბვის სიდიდეზე. რაც მეტია ძაბვის სიდიდე მოდელის მომჭერებზე, მით უფრო დაშორებულია (მაგ. მრუდი 4) ის წერტილები კრისტალიზატორის კედლიდან, რომელზეც გაზომილი პოტენციალის მნიშვნელობები შეესაბამება ნულს. მოდელის იმ წერტილში, რომელშიც პოტენციალის სიდიდე ნულის ტოლია, ნიშნავს იმას, რომ ამ წერტილში დენი არ გადის. აქედან გამომდინარე, 1, 2, 3, 4 მრუდეებით შემოსაზღვრულია სივრცე, რომლის გარეთ დენი არ გადის. უნდა ვივარაუდოთ, რომ ელექტროწიდური გადადნობის რეალურ პირობებში ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენი გადის მხოლოდ ამ მრუდის ბრუნვით მიღებული გამდნარი წიდის მოცულობაში. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო სითბო მიიღება გამდნარი წიდაში დენის გავლით გამოყოფილი ჯოულ-ლენცის სითბოს ხარჯზე. შესაბამისად, მიღებული მრუდის ბრუნვით მიღებული სხეულის გარეთ მყოფ გამდნარ წიდაში სითბო არ გამოიყოფა და აქ ტემპერატურული ველის უზრუნველყოფა ხდება გამდნარი წიდის თბოგამტარობის შედეგად [16,17].

მიღებული მრუდების სარკისებურ ასახვას წარმოადგენს მიღებული გამოსახულება (ნახ. 2.4), რომელიც შეესაბამება ექსპერიმენტს რეალიზებულს მოდელის საშუალებით, როცა მუდმივი ძაბვა მოდებულია დენის ზედა და ქვედა მარჯვენა

პოტენციალის განაწილება მოდელზე, როცა დენი მიყვანილია მარჯვენა
დენმიმყვანთან

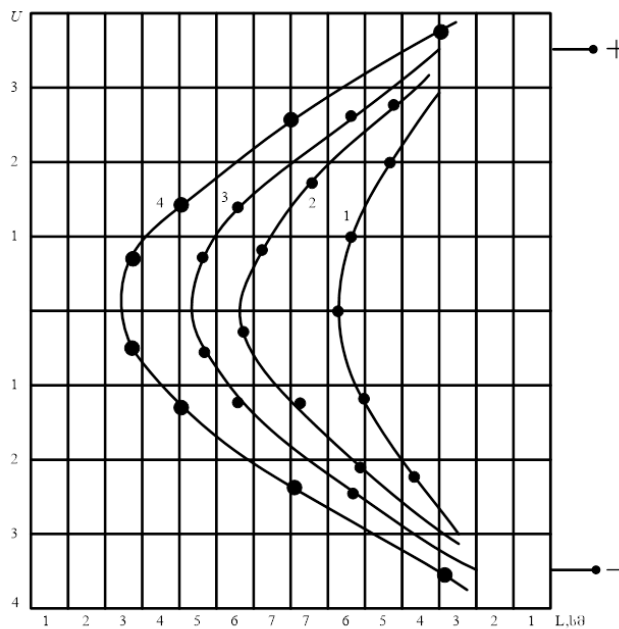
№	უჯრის მდებარეობა კრისტალიზატორის	უჯრის მდებარეობა კრისტალიზატორის ძირის გასწვრივ და მათში პოტენციალის მნიშვნელობები (ვოლტი)											შენიშვნა	
		3	4	5	6	7	7	6	5	4	3	2		1
1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	2	3,5	კრისტალიზატორის შუახაზიდან და ლერძიდან პოტენციალის განაწილება სიმეტრიული
2	3	0	0	0	0	0,7	0,7	1,14	1,1	2	2,4	3	3,4	
3	2	0	0	0,2	0,5	0,6	0,8	1,2	1,2	1,8	2	2	2,5	
4	1	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1	1	1,4	2	2	2,4	
5	1	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1	1	1,4	2	2	2,4	
6	2	0	0	0,1	0,5	0,6	0,8	1,2	1,2	1,8	2	2,1	2,5	
7	3	0	0	0	0	0,6	0,7	1,2	1,7	2	2,6	2,6	3,4	
8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	3,5	

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ამ ზონაში მიეწოდება გადასადნობი ლითონის ელექტროდი. იგი გადადნობისათვის საჭირო სითბოს ღებულობს აღნიშნული თხევადი წიდის არადენგამტარი სივრციდან (მაგ. *abc* - ზონიდან, როცა კრისტალიზატორზე მოდებული ძაბვა 4 ვ-ია). ამის გამო, უფრო დაბალი ხდება ელექტროწიდური გადადნობისას არადენგამტარი სივრცის ტემპერატურა, ვიდრე კრისტალიზატორის კედლის მახლობლობაში, რაც უარყოფითად მოქმედებს მიღებული სხმულის სისუფთავესა და საჭირო სტრუქტურის ფორმირებაზე. სხმულის ხარისხის გაუმჯობესება აღნიშნული დეფექტებისაგან შესაძლებელი იქნება იმ შემთხვევაში, თუ წიდის ტემპერატურა კრისტალიზატორის ცენტრში იქნება არანაკლები, ვიდრე კრისტალიზატორის კედლის მახლობლობაში.



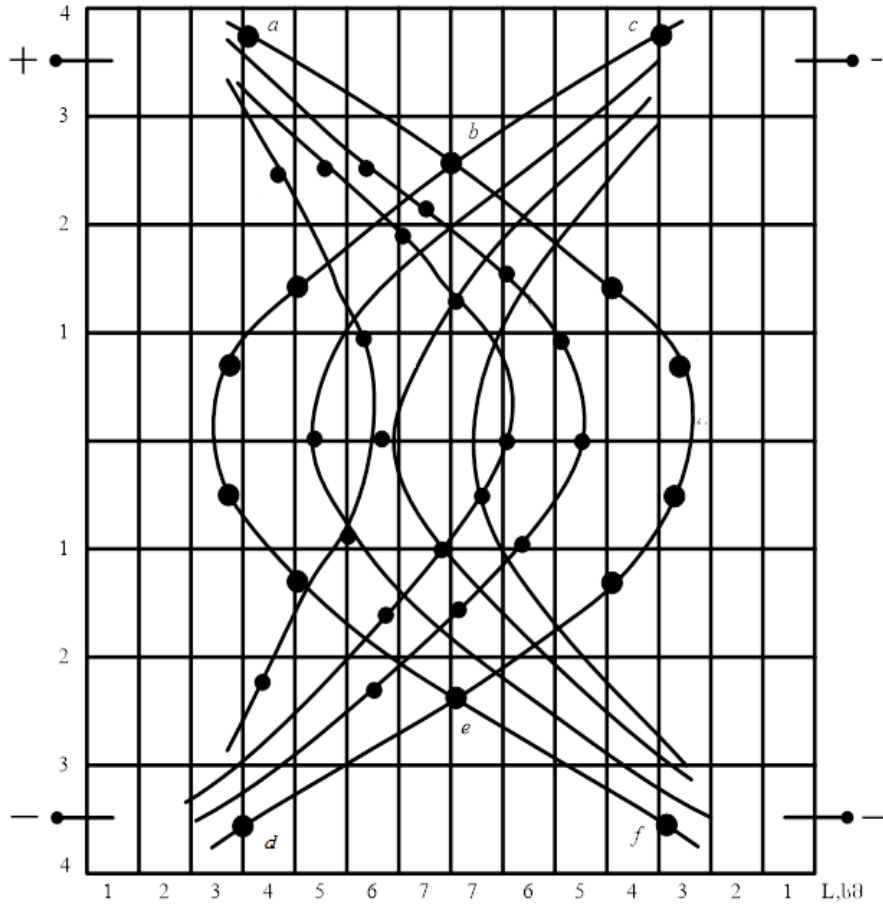
ნახ. 2.3. ექსპერიმენტული მრუდები, რომლებზეც პოტენციალი ნულის ტოლია. მოდელზე დენი მიყვანილია არადნობადი ელექტროდების მარცხენა ზედა და ქვედა დენმიმყვანებთან. შემთხვევა, როცა მოდელის მომჭერებზე მოდებული ძაბვა

1 - $U=4ვ$; 2 - $U=3ვ$; 3 - $U=2ვ$; 4 - $U=1ვ$.



ნახ. 2.4. ექსპერიმენტული მრუდები, რომლებზეც პოტენციალი ნულის ტოლია. მოდელზე დენი მიყვანილია მარჯვენა ზედა და ქვედა დენმიმყვანებთან.

შემთხვევა, როცა მოდელის მომჭერებზე მოდებული ძაბვა
1 - $U=4ვ$; 2 - $U=3ვ$; 3 - $U=2ვ$; 4 - $U=1ვ$.



ნახ. 2.5. ექსპერიმენტული დამოკიდებულებების მრუდები, რომლებზეც პოტენციალი ნულის ტოლია, როცა მოდელზე დენი მიყვანილია ერთდროულად მარჯვენა და მარცხენა მომჭერებთან.

გამოკვლევები აჩვენებს, რომ დნობადი ელექტროდით ელექტროწიდური გადადნობისას პოტენციალის განაწილება წიდაში გვიჩვენებს, რომ მაქსიმალური ტემპერატურა მიიღწევა კრისტალიზატორის ღერძის მახლობლობაში, იგი მცირდება კრისტალიზატორის ცენტრიდან კედლისაკენ [16,17].

არადნობადი ელექტროდებით ელექტროწიდური გადადნობისას ტემპერატურული ველის გათანაბრება წიდაში შესაძლებელია, როცა დნობადი ელექტროდი ამავე დროს არის ელექტრული დენის გამტარი. მოდელის მიხედვით, პოტენციალის კვლევის შედეგები, როცა მოდელზე დენი ერთდროულად მიყვანილია ზედა არადნობად და დნობად ელექტროდზე (იხილ. ნახ. 2.7 და ნახ. 2.8).

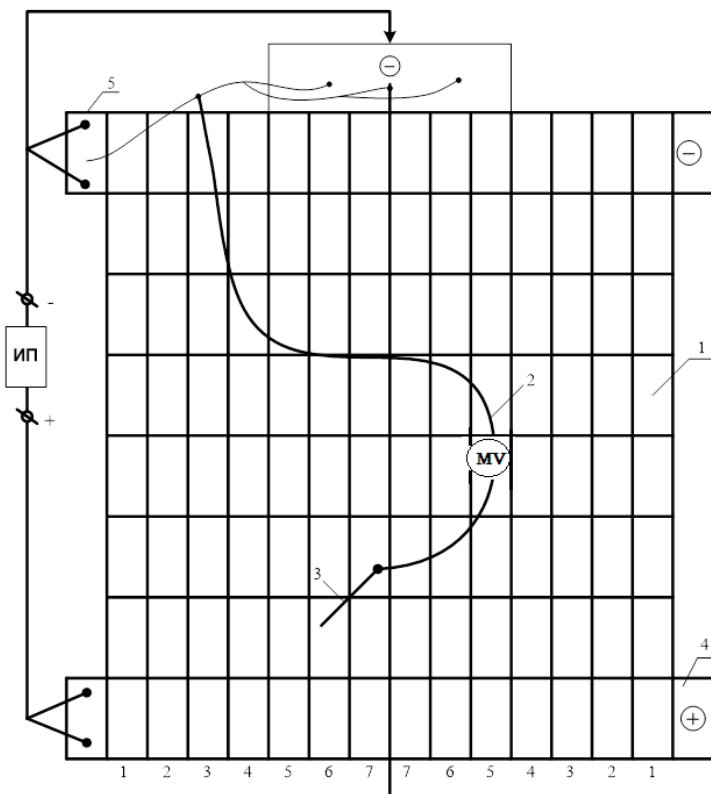
ნახ. 2.6-ზე წარმოდგენილია ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის

ორგანზომილებიანი მოდელი, იმ შემთხვევისათვის, როცა დნობადი ელექტროდი

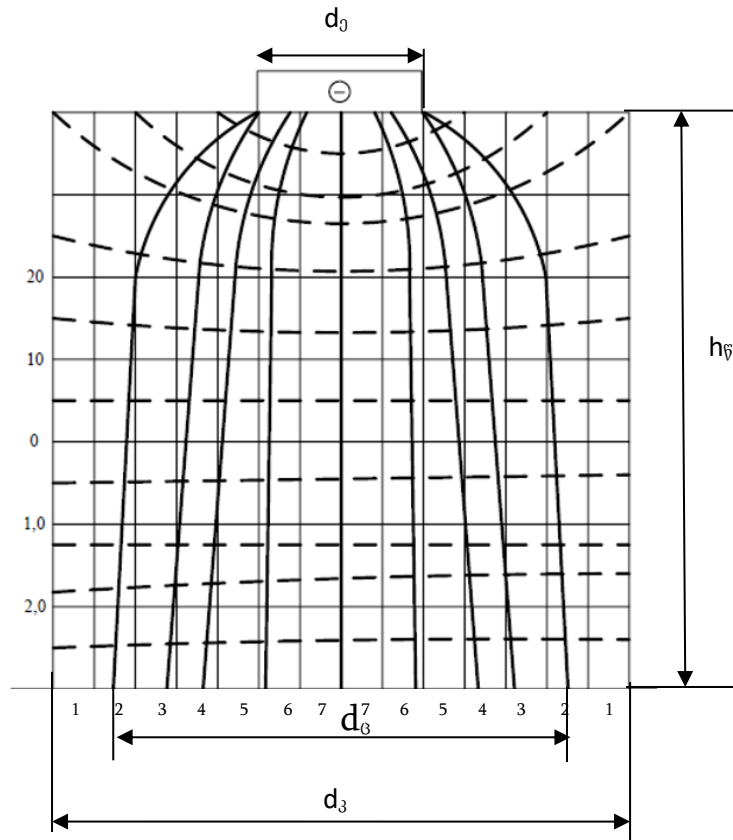
წარმოადგენს ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო სითბოს წყაროს დენგამტარს; მოდელში აღნიშნულის გამო, დნობად ელექტროდზე დენის წყაროს ერთ-ერთი მომჭერია მიერთებული, ხოლო მეორე მომჭერი მიერთებულია ქვედა არადნობად ელექტროდის მარჯვენა და მარცხენა მომჭერებთან. მოდელის მიხედვით, განსაზღვრული ექვიპოტენციალური ხაზები და დენის ხაზები (ნახ. 2.7) მიუთითებს იმაზე, რომ ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქციის მიხედვით, დენის ხაზები ძირითადად გადის კრისტალიზატორის ცენტრში. რაც იმის მანიშნებელია, რომ გადადნობისათვის საჭირო დენით სითბოს ინტენსიობით გამოყოფა ხდება კრისტალიზატორის ცენტრალურ ნაწილში. ხოლო კრისტალიზატორის კედლებთან სითბო გადაეცემა წიდის თბოგამტარობით. თუ გავითვალისწინებთ გამოკვლევების შედეგებს, რომლის ანალიზიც შესაძლებელი გახდა ნახ.2.5-ზე წარმოდგენილი დენის ხაზების მიხედვით, მაშინ, ამკარაა, რომ არადნობად ელექტროდიანი კრისტალიზატორის ახალ კონსტრუქციაში, მიზანშეწონილია ელექტრული ველის წიდის მოცულობაში გათანაბრება, და ამის შესაბამისად ტემპერატურული ველის წიდის მოცულობაში გათანაბრება შესაძლებელი იქნება, თუ ზედა არადნობად და დნობად ელექტროდებზე კვების წყაროდან ერთდროულად მიერთებული იქნება ერთი და იგივე მომჭერი. ხოლო მეორე მომჭერი მიერთებული იქნება ქვედა არადნობად ელექტროდთან. ნახ. 2.6-ზე წარმოდგენილია კრისტალიზატორის შესაბამისი ორგანოზომილებიან ფიზიკური მოდელი, ხოლო მისი კვლევის შედეგები წარმოდგენილია ნახ.2.8-ზე, საიდანაც ჩანს, რომ დენი ელექტროწიდური გადადნობის ახალი არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში თანაბრადაა გადანაწილებული, როგორც კრისტალიზატორის ცენტრში, ასევე კრისტალიზატორის კედლებთან, რაც შესაძლებელს ხდის კრისტალიზატორის აღნიშნულ სივრცეში მოხდეს Ip დენის გავლით სითბოს გამოყოფა და შესაბამისად ტემპერატურული ველის გათანაბრება. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სფეროში გამოკვლევები [16,17,18,19] აჩვენებს, რომ გადამდნარი სხმულის თვისებები და სისუფთავე დამოკიდებულია გამდნარი წიდის ტემპერატურაზე. ამიტომ შემოთავაზებული კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია და მისი დანადგარში შეერთების ელექტრული სქემა საშუალებას იძლევა მიღებული იქნას სხმული

არანაკლები მაღალი თვისებების და სისუფთავის, ვიდრე დნობადი ელექტროდით ელექტროწიდური გადადნობის სხმულია.

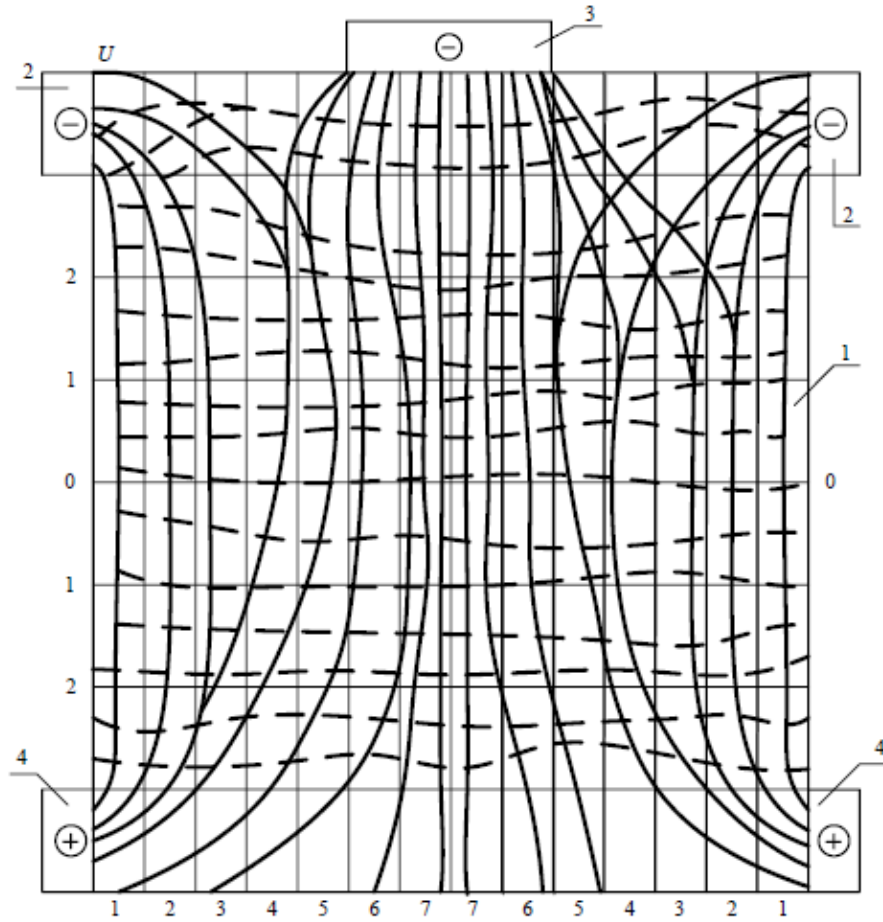
ამრიგად, ორგანოზომილებიანი მოდელით ლითონების, ელექტროწიდური გადადნობის ელექტრული კვლევის შედეგად შემუშავებულია არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ახალი კონსტრუქცია და დანადგართან მისი შეერთების ორიგინალური სქემა.



ნახ.2.6. ელექტროწიდური გადადნობის ფიზიკური მოდელი. 1-ლეგირებული ფოლადის AISI 321 0,5 მილიმეტრი სისქის ფურცელი; 2-დენმიმყვანი სადენები; 3-პოტენციალის გაზომვისათვის ნემსი; 4,5-ქვედა და ზედა დენმიმყვანები; ИП-დენის წყარო; mV-მილივოლტმეტრი.



ნახ.2.7. წიდის აბაზანისათვის მოდელირებით მიღებული ელექტრული ველის სურათი.
 1-დნობადი ელექტროდი; 2-დენის ხაზები; 3-ექვიპოტენციალური ხაზები; $h_{წ}$ -წიდის აბაზანის სიმაღლე;
 $d_კ$ -კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი; $d_გ$ -ელექტროდიდან დენი განდინების ცილინდრის დიამეტრი.



ნახ.2.8. 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 დენმიმცვანები, 1,3 - მოდელის ფურცელი და დნობადი ელექტროდის დენმიმცვანი.

დასკვნა II თავის მიმართ

1. შემუშავებულია წიდის აბაზანაში ელექტრული პოტენციალის კვლევისათვის ფიზიკური მოდელი. იგი წარმოადგენს 0,1 სისქის AISI321 ლეგირებული ფოლადის ფურცელს, რომლის ზომები ორჯერაა გაზრდილი წიდის აბაზანის ზომების (დიამეტრი, სიმაღლე) ხოლო მასში ატარებენ ≈ 100 ჯერ შემცირებულს გადადნობის რეალურ დენს.
2. კრისტალიზატორის უძრავი სქემით, აგრეთვე არადნობად ელექტროდებიან კრისტალიზატორში, ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში პოტენციალის განაწილების ორგანზომილებიანი მოდელით კვლევამ აჩვენა (ნახ.2.7):
 - ა) პოტენციალის განაწილება და შესაბამისად ელექტრული ველი არაერთგვაროვანია დნობადი ელექტროდის წიდასთან შეხების მახლობლობაში.
 - ბ) ელექტროდიდან გამომავალი დენის ხაზების გაბნევა შეიმჩნევა წიდის აბაზანაში გადასვლისას და მოიცავს არეს, რომელიც შეიძლება შეფასებული იქნას ე.წ. წიდის აბაზანაში დენის ხაზების გაბნევის კოეფიციენტით $K' = d_6/d_7$.
 - გ) გაბნევის კოეფიციენტის სიდიდე დამოკიდებულია გადასადნობი ელექტროდის d_7 დიამეტრზე და შეადგენს $K' \approx 1,3 \div 1,4$.
 - დ) დენის გაბნევის კოეფიციენტი K' ერთ-ერთი განმსაზღვრელი სიდიდე უნდა იყოს წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს და გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებისას.
3. არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას კომბინირებული სქემით, როცა ერთნაირი პოტენციალი ერთდროულად მოდებულია დნობად, ზედა არადნობად ელექტროდებზე, და მათგან განსხვავებული პოტენციალი მოდებულია ქვედა არადნობად ელექტროდზე ორი სხვადასხვა დენი პრაქტიკულად ერთნაირი სიმკვრივის, გადის წიდის აბაზანაში კრისტალიზატორის ღერძის და კედლის

მახლობლობაში. ელექტრული ველი განსხვავებულია, ვიდრე უძრავი კრისტალიზატორის სქემით გადადნობილ წიდის აბაზანაში (ნახ. 2.8). შესაბამისად განსხვავებული იქნება თბური პროცესების და დენის გაანგარიშების მეთოდები.

თავი 3

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას დენის განსაზღვრის მეთოდი

ელექტრომეტალურგიის დარგის ცნობილმა მკვლევარებმა: ჯ.ფ.ელიოტი, მოლვო (აშშ), ტ.გამალი, რ.მიულბერგერი (საფრ) ლითონების რელექტროწიდური გადადნობის პროცესის მოდელირებით კვლევის საფუძველზე მიიღეს შედეგები, რომელიც ადასტურებდა, რომ გამდნარ წიდაში ძაბვის მკვეთრი ვარდნის უბანი და დენის მაღალი სიმკვრივე მდებარეობდა გადასადნობი ლითონის ელექტროდის ტორცის ქვეშ [20]. შესაბამისად, ამ ადგილში გამოიყოფოდა ყველაზე დიდი რაოდენობის სითბო. წიდის აბაზანის ცალკეულ უბანზე დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს შედარებით მათ აჩვენეს, რომ იგი ტოლი იყო წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს საერთო რაოდენობის. ანუ ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას გამოყოფილი სითბო არის ე.წ. ჯოულის სითბო:

$$Q_{\mathcal{X}} = I_p \cdot U_{\mathcal{P}} \cdot t \quad (3.1)$$

სადაც I_p - ელექტროწიდური გადადნობის დენია, $U_{\mathcal{P}}$ - ძაბვის ვარდნაა წიდის აბაზანაზე; t - წიდის აბაზანაში დენის გავლის ხანგრძლივობაა.

თუ ცნობილია წიდის აბაზანის წინაღობა $R_{\mathcal{P}}$, მაშინ უფრო მოხერხებულია გამოყოფილი ჯოულის სითბო გაანგარიშებული იქნას:

$$Q_{\mathcal{X}} = KI_p^2 \cdot R_{\mathcal{P}} \cdot t \quad (3.2)$$

K - სიმძლავრის კოეფიციენტი და ემსახურება კვტ-ს გადაყვანას ჯოულებში.

$I_p, U_{\mathcal{P}}, R_{\mathcal{P}}$ პარამეტრები ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის რეჟიმის პარამეტრებია. ისინი განსაზღვრავენ წიდის აბაზანის ტემპერატურას და ცხადია, ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში გამოყოფილ ჯოულის სითბოს. ამ პარამეტრების სიდიდეები ერთმანეთზეა დამოკიდებული. მაგალითად, წიდის აბაზანაზე ძაბვის ვარდნის ($U_{\mathcal{P}}$) ცვლილება იწვევს I_p დენის ცვლას, შესაბამისად დენის აბაზანის ტემპერატურის ცვლას და აქედან გამომდინარე, წიდის აბაზანის წინაღობის ცვლას ($R_{\mathcal{P}}$).

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას საჭირო ჯოულის სითბოს

მისაღებად პრაქტიკულია წიდის აბაზანაზე ძაბვის ვარდნის ცვლილება ან წიდის აბაზანის წინაღობის R_{β} რეგულირება. პირველ მათგანს ახდენენ კვების დენის წყაროს მეშვეობით, ხოლო მეორეს ცვლილებას აღწევენ წიდის შემადგენლობის ცვლით.

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის რეჟიმის ყველა პარამეტრი შეიძლება შეიცვალოს აგრეთვე წიდის აბაზანის სიმძლავის გაზრდით ან შემცირებით, ამიტომ იგი ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის რეჟიმის ერთ-ერთი მთავარი პარამეტრია.

ამ ფორმულებით წიდაში გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშება შესაძლებელია თუ დაუშვებთ, რომ წიდა აქტიური წინაღობის მატარებელია. ამის საფუძველს იძლევა [2] კვლევები, სადაც ნაჩვენებია, რომ წიდაში გამავალი I_p დენი და წიდის აბაზანაზე ძაბვის ვარდნა ფაზით ემთხვევა ერთმანეთს [3].

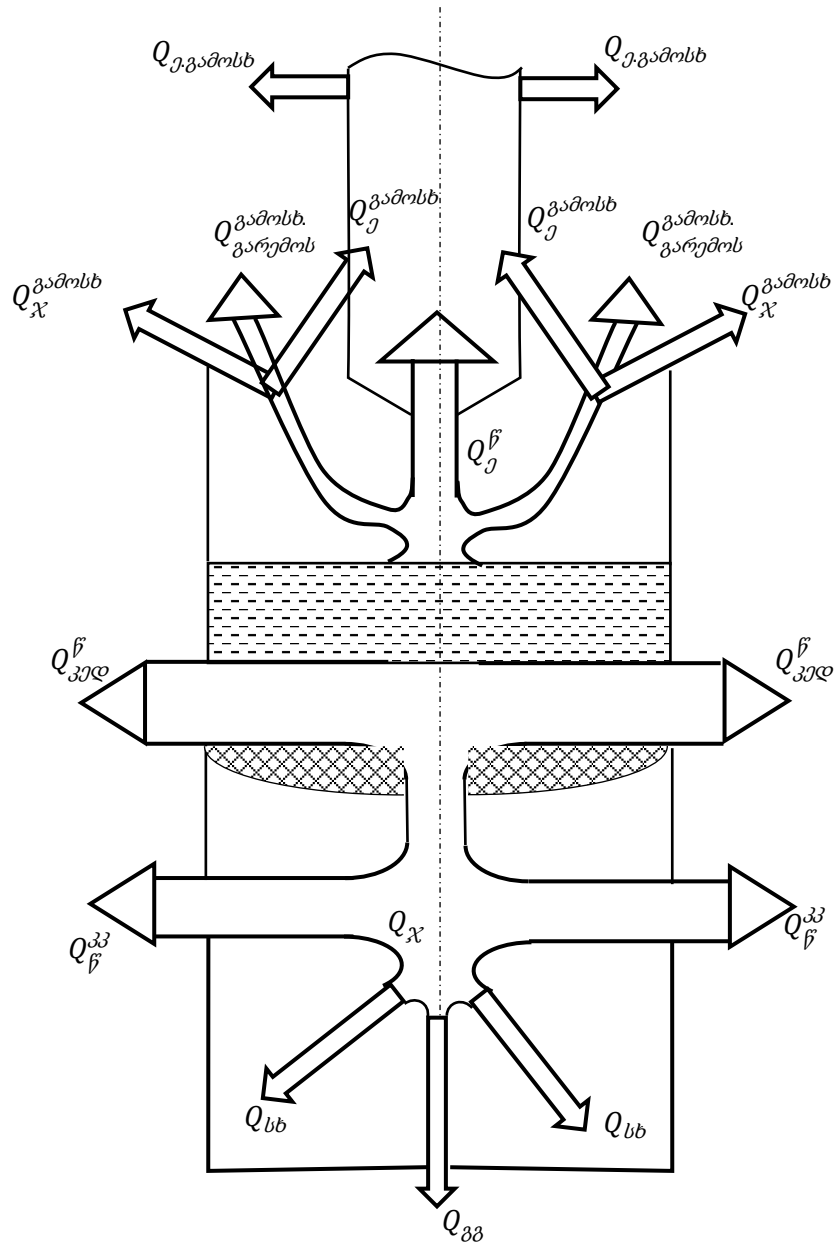
3.1. ელექტროწიდური გადადნობის თბური ბალანსის სქემა

წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო გადაეცემა თბოგამტარობით, კონვექციით ან წიდის აბაზანის შემოფარგლული ზედაპირიდან გამოსხივებით: კრისტალიზატორის კედელს, დნობად ელექტროდს, გადადნობით მიღებულ სხმულს და წიდის აბაზანის ზედაპირის გარემომცველ გარემოს. დნობად ელექტროდსა და კრისტალიზატორის ძირს შორის, ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის თბური ბალანსის შემადგენელი ელემენტების გადანაწილების თვალსაჩინო სურათი მოცემულია ნახ.3.1.

ამ სქემიდან ჩანს, რომ წიდაში გამოყოფილი ჯოჯის სითბო Q_{β} გადაეცემა:

- 1) გამდნარი ლითონის აბაზანით ლითონის გადადნობის სხმულს Q_{sb} აქედან კი სითბო გადაეცემა კრისტალიზატორის კედელს და გარემომცველ გარემოს $Q_{გვ}$;
- 2) დნობად ელექტროდს (Q_{β}^d) და ეს უკანასკნელი გამოსხივებით სითბოს გადაცემს გარემოს $Q_{გამოსხ}$;
- 3) სითბოს დიდი ნაწილი წიდიდან გადაეცემა კრისტალიზატორის კედელს $Q_{კედ}^f$;
- 4) წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებით სითბო გადაეცემა კრისტალიზატორის

კედელს ($Q_{\chi}^{გამოს}$), დნობად ელექტროდს ($Q_{\gamma}^{გამოს}$), და გარემოს ($Q_{გარემოს}^{გამოს}$).



ნახ.3.1. ელექტროწიდური გადადნობის თბური ბალანსის სქემა

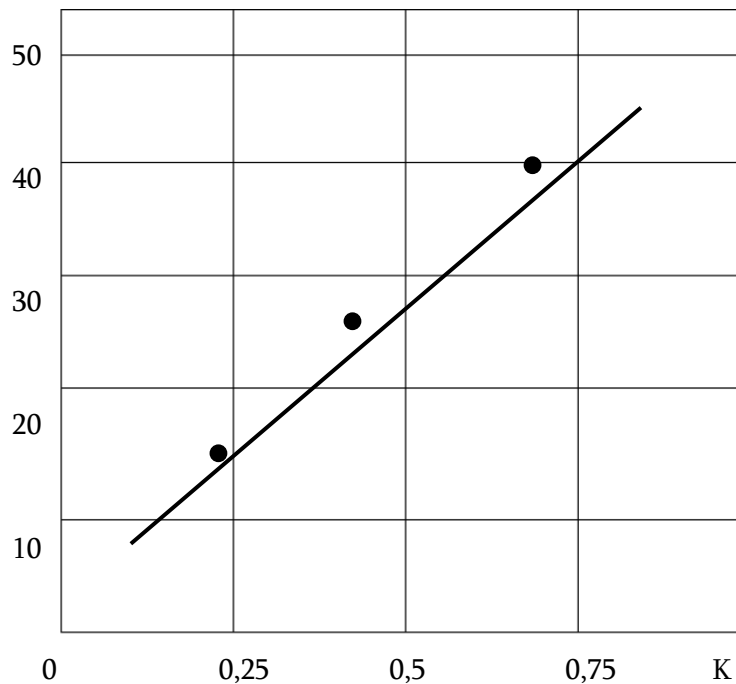
ელექტროწიდური გადადნობისას კვლევები [16,17,18,19] აჩვენებს, რომ წიდის აბაზანაში გამოყოფილი ჯოულის სითბოს (Q_{χ}) დიდი ნაწილის $\approx 40-70\%$ ართმევა ხდება კრისტალიზატორის კედლიდან გამაგრებელი სისტემის მეშვეობით. ართმეული სითბოს რაოდენობა დამოკიდებულია წიდის აბაზანის სიღრმეზე (ე.ი. წიდის აბაზანის კრისტალიზატორის კედელთან შეხების ფართზე) წიდის აბაზანის

ზედაპირიდან გამოსხივებით გაცემული სითბოს რაოდენობა $Q_{\text{გამოსხ}}^{\text{გამოსხ}} \approx 12-28\%$ -ს [3,21]. მისი კონკრეტული მნიშვნელობა დამოკიდებულია გამდნარი წიდის სარკისებური ზედაპირის ფართზე. ეს უკანასკნელი კი დამოკიდებულია კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტზე (K), რაც წარმოადგენს დნობადი ელექტროდის დიამეტრს $d_{\text{ე}}$, შეფარდებული კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრთან

$$K = \frac{d_{\text{ე}}}{d_{\text{კრ}}} \tag{3.3}$$

კრისტალიზატორის შევსების კოეფიციენტზე (K) დამოკიდებულია აგრეთვე წიდიდან დნობად ელექტროდზე გადაცემულ სითბოზე $Q_{\text{ე}}^{\text{წ}}$ [3,4]. ამ მხრივ მითითებული ავტორების შედეგები თანხვედრილია (ნახ.3.2)

$Q_{\text{ე}}^{\text{წ}} \%$



ნახ.3.2 წიდის აბაზანიდან დნობად ელექტროდზე გადაცემული სითბოს ($Q_{\text{ე}}^{\text{წ}}$) დამოკიდებულება კრისტალიზატორის შევსების კოეფიციენტზე (K).

ყოველივე აღნიშნულის საფუძველზე, დნობადი ელექტროდის-ძირი სქემით, უძრავი კრისტალიზატორის სქემით, ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში წიდის აბაზანის თბური ბალანსის განტოლება შეიძლება შემდეგნაირად წარმოვადგინოთ:

$$Q_x^{\text{წ}} = Q_b^{\text{წ}} + Q_j^{\text{წ}} + Q_{\text{კკ}}^{\text{წ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} \quad (3.4)$$

წიდიდან სხმულის მიერ მიღებული სითბოს გადაცემა ხდება კრისტალიზატორის კედელზე, გარემომცველ გარემოზე და კრისტალიზატორის ძირზე:

$$Q_b^{\text{წ}} = Q_b^{\text{კკ}} + Q_{b\text{გ}}^{\text{გარემო}} + Q_{b\text{გ}}^{\text{ძირი}} + Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} \quad (3.5)$$

წილის სარკისებური ზედაპირიდან გამოსხივებული სითბო

$$Q_{\text{გამოსხ}}^{\text{წ}} = Q_{\text{წ}}^{\text{გრ}} + Q_{\text{წ}}^{\text{გ}} + Q_{\text{წგ}}^{\text{გ}} \quad (3.6)$$

გადადნობისათვის საჭირო სითბო დნობად ელექტროდს გადაეცემა, როგორც წილის აბაზანიდან ($Q_j^{\text{წ}}$), ასევე I_x დენის გავლით მასში გამოყოფა ჯოულის სითბოს სახით.

$$Q_x^{\text{წ}} = I_x R_j \quad (3.7)$$

R_j ელექტროდის აქტიური წინაღობა დამოკიდებულია საელექტროდე მასალაზე მის ხვედრით წინაღობაზე ρ და ელექტროდის ზომებზე (სიგრძე l მ, და განივი კვეთი S მმ²)

$$R_j = \rho_j \frac{l_j}{S_j} \quad (3.8)$$

ელექტროდის განივი კვეთი S_j დნობის პროცესში უცვლელია, ხოლო l_j -ს სიდიდე პროცესს მიმდინარეობისას მცირდება, სათანადოდ იზრდება ელექტროდის წინაღობა R_j .

$$Q_j^{\text{წ}} + Q_j^{\text{ჯ}} = Q_j^{\text{წ}} + I_x^2 R_j \quad (3.9)$$

(3.9) გამოსახულებაში $Q_j^{\text{წ}} \gg Q_j^{\text{ჯ}}$ ელექტროწიდური გადადნობის ყველა სტადიაში, განსაკუთრებით l_j -ს შემცირების გამო პროცესის ბოლო სტადიაში მიუხედავად იმისა, რომ გადასადნობი ელექტროდის მასალის ხვედრითი წინაღობა ρ_j მნიშვნელოვნად იზრდება ელექტროდის გახურებასთან ერთად.

საბოლოოდ, ელექტროდში გამოყოფილი ჯოულის სითბოს გათვალისწინებით ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის განტოლებას აქვს სახე:

$$Q_j^{\text{წ}} + Q_j^{\text{ჯ}} = Q_b^{\text{წ}} + Q_j^{\text{წ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{გ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} \quad (3.10)$$

ან გაშლილი სახით

$$Q_j^{\text{წ}} + Q_j^{\text{ჯ}} = Q_b^{\text{გ}} + Q_b^{\text{გრ}} + Q_b^{\text{გ}} + Q_j^{\text{წ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{გ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} + Q_{\text{წგ}}^{\text{გარემო}} + Q_{\text{წგ}}^{\text{გ}} \quad (3.11)$$

(3.11)-ში შემავალი ელემენტებიდან არასასარგებლო სითბოს შეადგენს:

$$Q_b^{\text{გრ}} + Q_b^{\text{გ}} + Q_{\text{წგ}}^{\text{გრ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} \approx 0 \quad (3.12)$$

3.2. თბური ბალანსის განტოლების ანალიზი

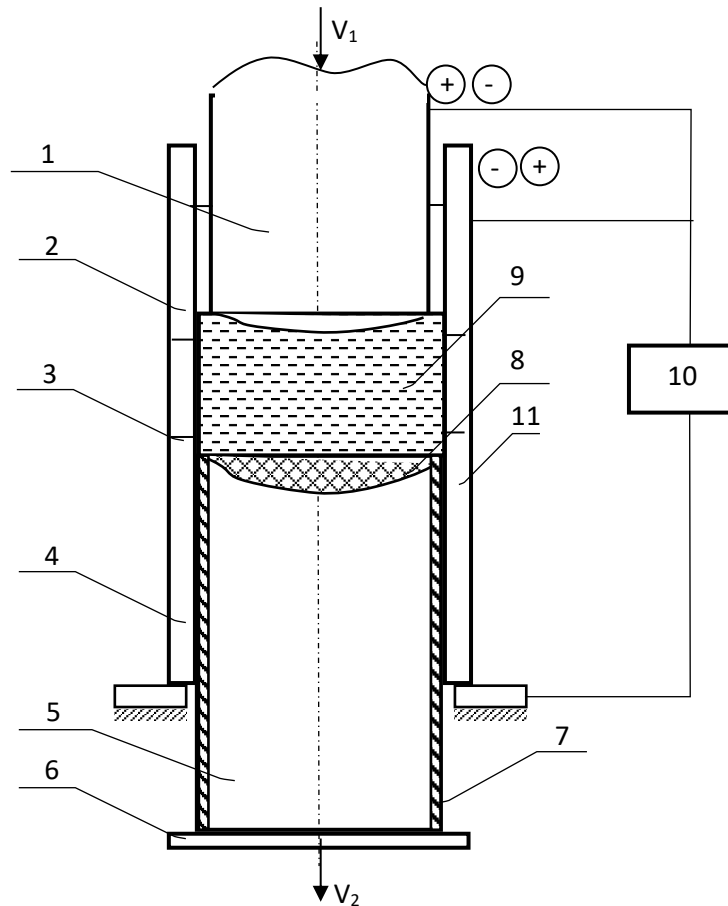
გამოსახულება (3.1) და (3.2) მიღებულია წიდის აბაზანაში მიმდინარე პროცესებისათვის, როცა ლითონების ელექტროწიდური გადადნობა ხორციელდება დნობადი ელექტროდი-ძირი სქემის კრისტალიზატორისათვის (შემდეგში უძრავ კრისტალიზატორად წოდებული). თუმცა, როგორც ჩვენი კვლევები აჩვენებს, არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში (ნახ.3.2) მიმდინარე პროცესები და სათანადოდ თბური ბალანსის განტოლებებს აქვს განსხვავებული სახე. რაც განხილულია სქემით, და ყურადღება გამახვილებულია აღნიშნული სახის კრისტალიზატორში პროცესების თავისებურებებზე და სათანადოდ თბური ბალანსის განტოლების ცალკეული შემადგენელი ელემენტის განსხვავებულობაზე.

წიდის აბაზანაში გამოყოფილი ჯოჯოხის სითბო დამოკიდებულია გადადნობის მუშა დენის სიდიდეზე. ეს ის დენია, რომელიც გადის წიდის აბაზანაში დნობადი ელექტროდის ტორცსა და თხევადი ლითონის აბაზანის ზედაპირს შორის. როგორც ჩვენმა ასევე [3,22,23]. გამოკვლევებმა აჩვენეს წიდის აბაზანაში შეიძლება დენი გადიოდეს დნობად ელექტროდსა და კრისტალიზატორის კედელს შორის წიდის არეში, შემდეგ იგი გაივლის კრისტალიზატორის კედელში. თუ გავითვალისწინებთ, რომ კრისტალიზატორი დამზადებულია სპილენძისაგან, მასში გამავალი დენი კი არ ქმნის სასარგებლო სითბოს, შესაბამისად იგი წარმოადგენს შუნტირებულ დენს $I_{კრ}$. იგი სითბოს გამოყოფს მხოლოდ ელექტროდსა და კრისტალიზატორის კედელს შორის წიდის ფენაში გავლისას, შესაბამისად გამოყოფილი სითბო ძირითადად ხმარდება ე.წ. წიდის აბაზანის ზედაპირიდან გამოსხივების სითბოს Q_g შექმნას, რომელიც დნობადი ელექტროდი-ძირი სქემის კრისტალიზატორისათვის წარმოადგენს თბურ დანაკარგს.

არადნობადელექტროდიანი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობის ღუმელის სქემა მოცემულია ნახ.3.3-ზე.

აღნიშნულ სქემაში არადნობად ელექტროდებთან ერთად ჩართულია დნობადი ელექტოდი (1). იგი წარმოადგენს გადასადნობი ლითონისაგან დამზადებულ ელექტროდს, რომელიც მიღებულია გადასადნობი ლითონის წინასწარი ჩამოსხმით ყალიბებში და შემდეგ ერთმანეთთან შედუღებით. ყალიბის ზომები ისეთნაირადაა

გათვლილი, რომ ჩამოსხმული გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი მხოლოდ 15÷20მმ-ით ნაკლებია კრისტალიზატორის არადნობადი ზედა (2) ელექტროდის შიგა დიამეტრზე. ასეთი მცირე ღრეჩოს გამო დნობადი ელექტროდის ზედა დნობადი ელექტროდის შიგნით (2) უპრობლემო მოძრაობისათვის საჭიროა ელექტროდის და გადაბმის ადგილას შენადული ნაკერი უზრუნველყოფდეს საჭირო მინიმალური სიდიდის გადახრას ზომებში.



ნახ.3.3. არადნობადი ელექტროდებიანი კრისტალიზატორით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის სქემა

1-გადასადნობი ელექტროდი; 2-,3,4-კრისტალიზატორის ზედა, ქვედა და შუა სექციები; 5-სხმული; 6-კრისტალიზატორის ძირი; 7-წიდის ქერქი; 8-ლითონის აბაზანა; 9-წიდის აბაზანა; 10-კვების წყარო; 11-სექციებს შორის საიზოლაციო შრე;

ასეთი მცირე განსხვავება ზომებში დნობადი ელექტროდის დიამეტრსა და კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრს შორის შესაძლებელს ხდის კრისტალიზატორის შევსების კოეფიციენტი მიახლოებული იქნას სიდიდესთან:

$$K_{\text{ავ}} \approx \frac{d_2}{d_3} \approx 0,95$$

მხოლოდ ამ შემთხვევაშია შესაძლებელი, რომ გამდნარი წიდის დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს $Q_x \approx 50\%$ მოხმარდება ელექტროდის გახურებას:

$$0,5Q_x \approx Q_{ელ}$$

იგულისხმება, რომ ელექტროდსა და კრისტალიზატორს შორის სივრცე იმდენად მცირეა, რომ წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებული სითბო პრაქტიკულად ნულია:

$$Q_g^f \approx 0$$

ნახ.3.3-ზე წარმოდგენილია კრისტალიზატორის ზედა არადნობადი ელექტროდის (2) დნობადი ელექტროდის (1) ელექტროწიდური გადადნობის დანადგარში შეერთების განსხვავებული სქემა. დროის ნებისმიერ მომენტში მათზე ერთდროულად მოდებულია ერთი და იგივე ელექტრული პოტენციალი ($\varphi_n + \varphi_n^-$). ამ სქემის მიხედვით, აგრეთვე ერთმანეთისგანაა ელექტრულად იზოლირებული ზედა არადნობადი ელექტროდი (2) კრისტალიზატორის შუა (3) სექციისგან.

დანადგარის შეერთების ელექტრული სქემითაა შესაძლებელი გამოყენებულ იქნას გადასადნობი პროცესი უდიდესი შევსების კოეფიციენტზე ($K_{გვ} \approx 0,95$), რადგანაც მიუხედავად დნობად ელექტროდსა და კრისტალიზატორს შორის მცირე სივრცისა (≈ 10 მმ), გამორიცხულია მათ შორის მოკლედ შერთვის პროცესი.

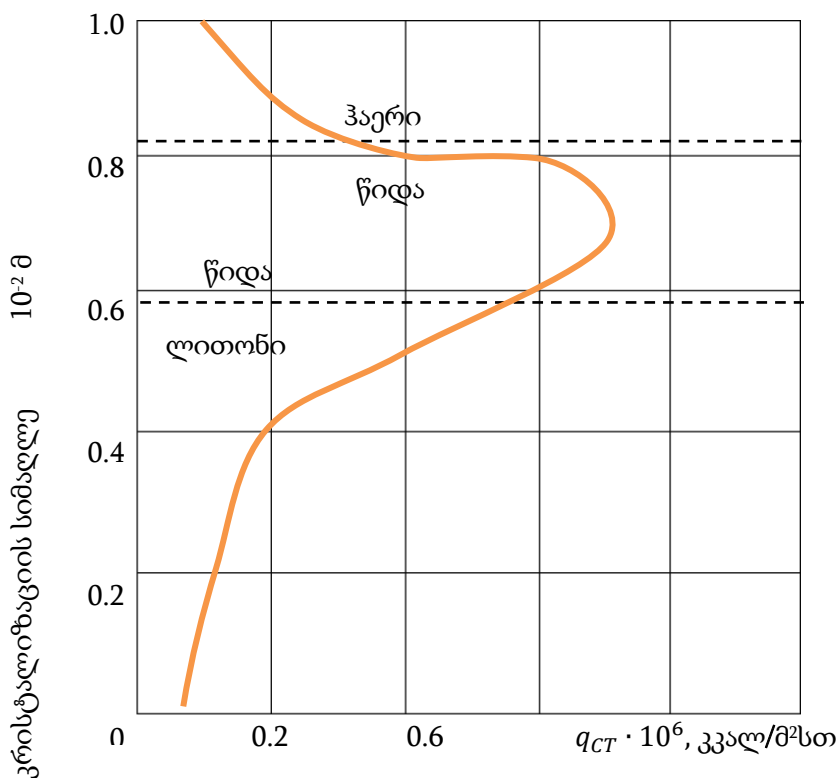
კრისტალიზატორის შიგა კედლის დასაცავად მაღალი ტემპერატურისაგან მიმართავენ მის წყლით გაგრილებას. ჩვეულებრივი კრისტალიზატორები წყლით ერთნაირად გრილდება მის ძირში, შუა და წიდის ზემოთ.

ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორი პროცესის მიმდინარეობისას განიცდის უდიდეს ტემპერატურულ დატვირთვას; იგი აღწევს 1 მლნ.კკალ/მ²სთ სიდიდეს. გაგრილების პირობების დარღვევისას შეიძლება მოჰყვეს კრისტალიზატორის კედლის დეფორმაცია, მწყობრიდან ნაადრევი გამოსვლა და ზოგჯერ შეიძლება გამოიწვიოს აფეთქება (გაგრილების წყლის ჩაღვრისას წიდის აბაზანაში).

ხვედრითი თბური ნაკადი არათანაბრადაა განაწილებული კრისტალიზატორის სიმაღლეებზე (ნახ.3.4). თბური ხვედრითი ნაკადის დიდი ნაწილი მოდის წიდის აბაზანის მოცულობაზე. კრისტალიზატორის 0,8-1,0 მ სიმაღლეზე მოდის თბური ნაკადის შედარებით დაბალი სიდიდეები. ამ უბანზე კრისტალიზატორის შიგა ზედაპირთან განლაგებულია დნობადი ელექტროდი. ამ ელექტროდის და წიდის

ზედაპირებიდან გამოსხივებით მიღებულია აღნიშნული თბური ნაკადი. წილის ქვედა უბანზე თბური ნაკადი განპირობებულია მიღებული სხმულით; სითბო სხმულს გადაეცემა წილის აბაზანიდან თბოგამტარობით. აშკარაა, რომ კრისტალიზატორისათვის საშიში თბური ზონა მოიცავს წილის აბაზანის კრისტალიზატორის კედელთან შეხების ზედაპირს. შესაბამისად კრისტალიზატორის ეს უბანი უნდა გაგრილდეს ინტენსიურად.

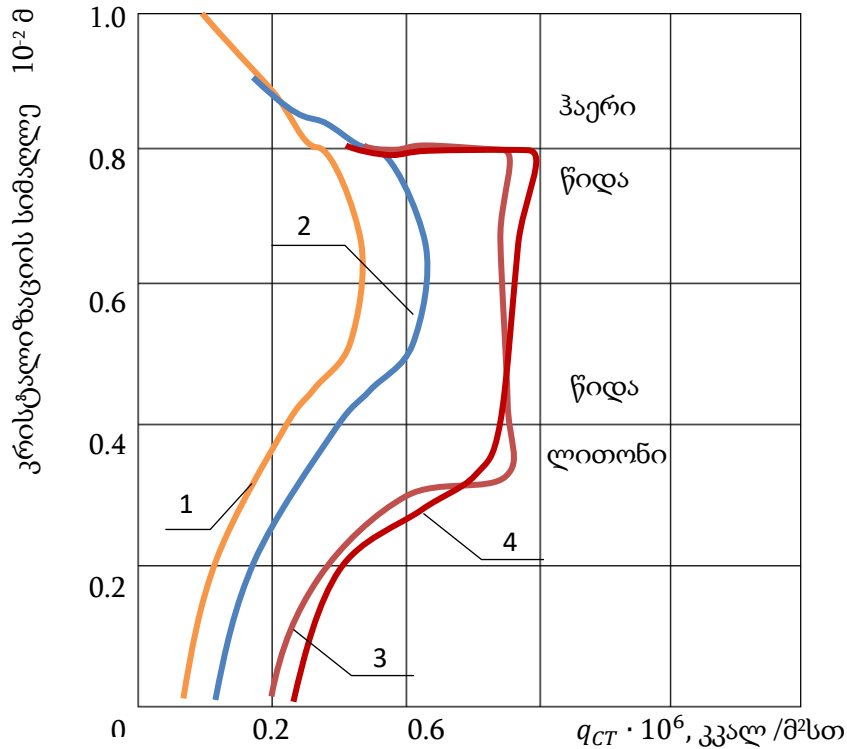
თბური ხვედრით ნაკადის ცვლილების იგივე საერთო კანონზომიერებაა წარმოდგენილი ნახ. 3.5-ზე. თუმცა ცალკეულ უბნებზე თბური ხვედრით ცვლილება დამოკიდებულია გადადნობილი ხსმულის ზომებზე.



ნახ. 3.4. ხვედრითი თბური ნაკადის განაწილება კრისტალიზატორის სიმაღლეზე

ყველა აღწერილ შემთხვევაში მოქმედებს გაგრილების ერთიანი სისტემა კრისტალიზატორის სამივე უბანზე. ის გარემოება, რომ არაა დადნობად ელექტროდიანი კრისტალიზატორი (ნახ.3.3) შედგება სამი ერთმანეთისაგან ელექტრულად იზოლირებული და დამოუკიდებელი კვების მქონე გაგრილების სისტემისაგან, ეს საშუალებას იძლევა, წყლის ნაკადის სხვადასხვა რაოდენობით მიწოდებისას მოხდეს ცალკეული სექციიდან ართმეული სითბოს რაოდენობის რეგულირება. ე.ი. მოვახდინოთ

შიდა სექციიდან დიდი თბური ნაკადის ართმევა წიდიდან და ამით გადავარჩინოთ კრისტალიზატორი თბური დეფორმაციისაგან და მოსალოდნელი აფეთქებისაგან.



ნახ. 3.5. ხვედრითი თბური ნაკადის განაწილება კრისტალიზატორის სიმაღლეზე

1-500x125მმ ზომის სხმულის სპილენძის კრისტალიზატორში;

2-550-900მმ კვეთის სხმულის ფოლადის კრისტალიზატორში;

3-4 მრგვალი სპილენძის კრისტალიზატორი დიამეტრით 200 მმ

ზედა არადნობადი ელექტროდის (2) გაგრილების დაბალი ინტენსივობა ხელს უწყობს თბური დანაკარგების შემცირებას და თბური ნაკადი მიმართული იქნება გადასადნობი ელექტროდის დამატებით გახურებაზე.

ქვედა არადნობადი ელექტროდის (4) გაგრილების ინტენსიობის ცვლით, შესაძლებელია მიღებული სხმულის კრისტალიზატორის პროცესის მართვა. რაც მნიშვნელოვანია, რადგან ელექტროწიდიური გადადნობისას მთავარია არა მარტო გადამდნარი ლითონის რაფინირება და არალითონური ჩანართებისაგან მაქსიმალურად

გათავისუფლება, არამედ ლითონის სასურველი სტრუქტურის მიღება და ამათ ხარჯზე საერთო ხარისხის ამაღლება.

ამრიგად, შეიძლება დავასკვნათ, რომ უძრავი კრისტალიზატორის სქემით დნობადი ელექტროდი-კრისტალიზატორის ძირი, ელექტროწიდური გადადნობისა და არადნობადი სექციებიანი კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობის სქემის შედარება აჩვენებს:

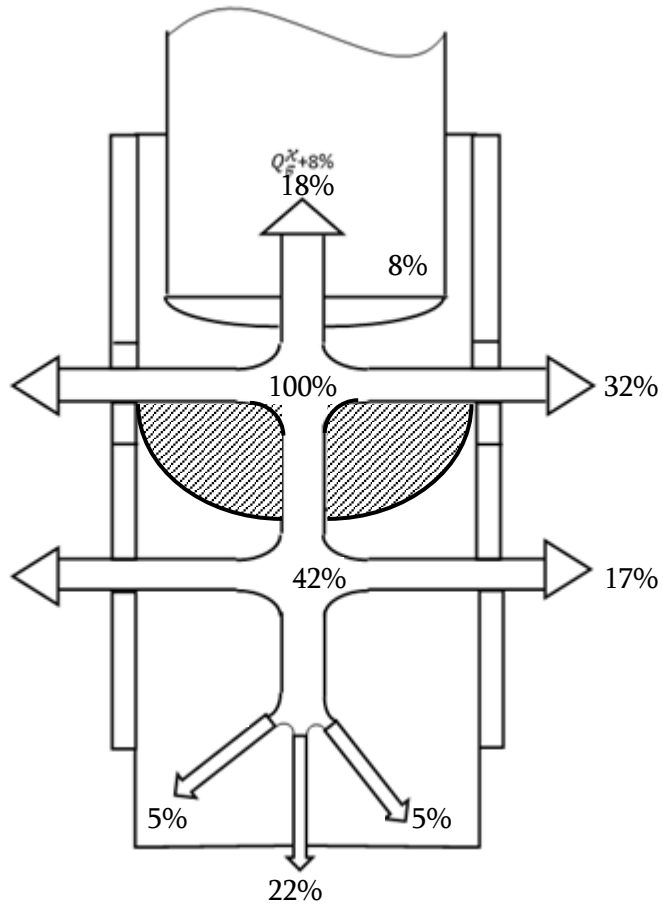
1. გადადნობისას კრისტალიზატორის ფორმის მაღალი კოეფიციენტი საშუალებას იძლევა გაზრდილი იქნას გადამდნარი სხმულის წონა;
2. პრაქტიკულად გამორიცხულია გადადნობის პროცესში მოკლედ ჩართვა;
3. შესაძლებელია კრისტალიზატორით ართმეული სითბოს ნაკადის რეგულირება;
4. შესაძლებელია თბური დანაკარგების შემცირება. კერძოდ, პრაქტიკულად წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებული თბური ნაკადი მინიმუმამდეა შემცირებული და იგი ძირითადად ხმარდება გადასადნობი ელექტროდის გახურებას;
5. შესაძლებელია სხმულის კრისტალიზაციის პროცესის მართვა.

ანალიზის საფუძველზე, არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორისათვის ელექტროწიდური გადადნობის თბური ბალანსის სქემა ღებულობს სახეს, რომელიც წარმოდგენილია ნახ. 3.6-ზე.

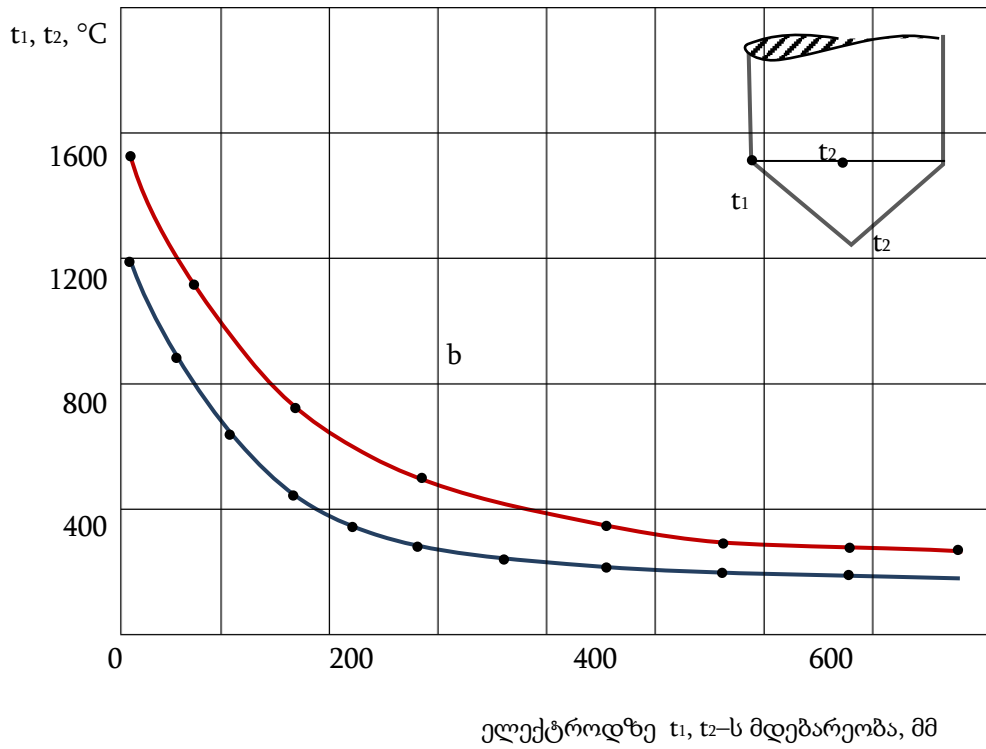
ამ სქემიდან ჩანს, რომ ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის არადნობად ელექტროდებიანი კრისტალიზატორში მიმდინარე პროცესებს განსაზღვრავს:

- ა) წიდის აბაზანაში გამოყოფილი ჯოჯოხის სითბო;
- ბ) ელექტროდის გახურებაზე და გადნობაზე დახარჯული სითბო;
- გ) სხმულის გაგრილებისას გამოყოფილი სითბო;
- დ) ელექტროდიდან და წიდის აბაზანიდან გაცემული სითბო.

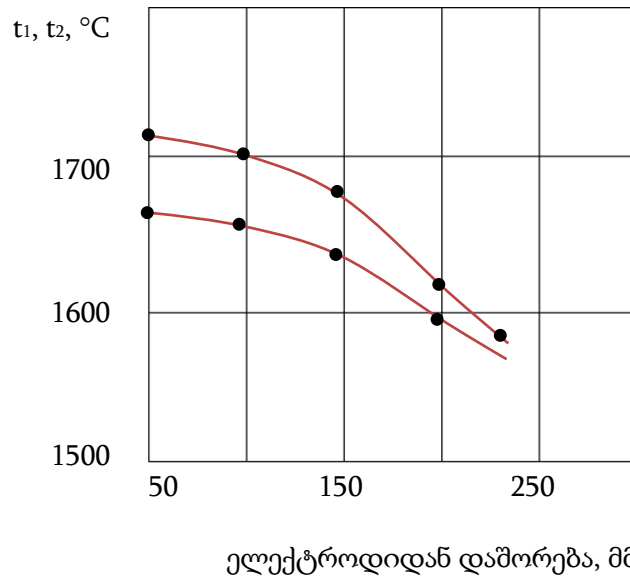
აღნიშნული მიუთითებს იმაზე, რომ სითბოს გამოყოფა ხდება დენის გავლით, პირველ რიგში, წიდის აბაზანაში და ელექტროდში, ხოლო სითბოს გაცემა ხდება წიდის აბაზანიდან, ლითონის სხმულიდან და ელექტროდიდან.



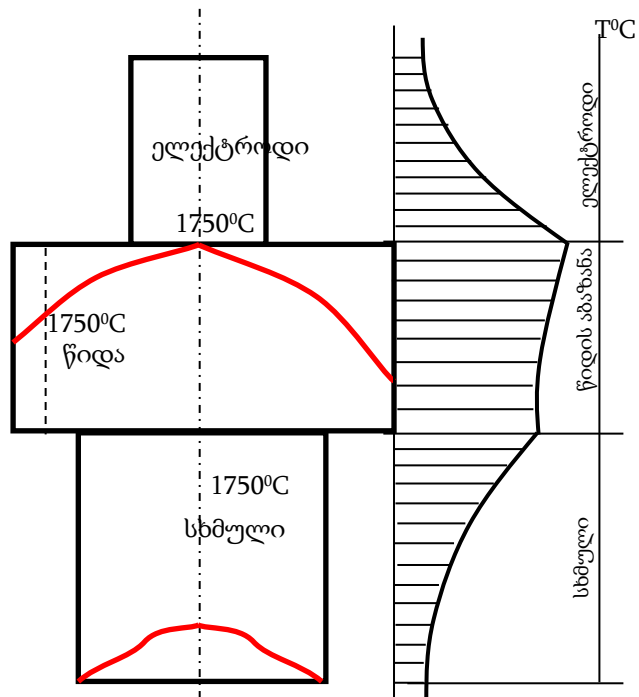
ნახ.3.6. არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროწილური გადადნობის თბური ბალანსის სქემა



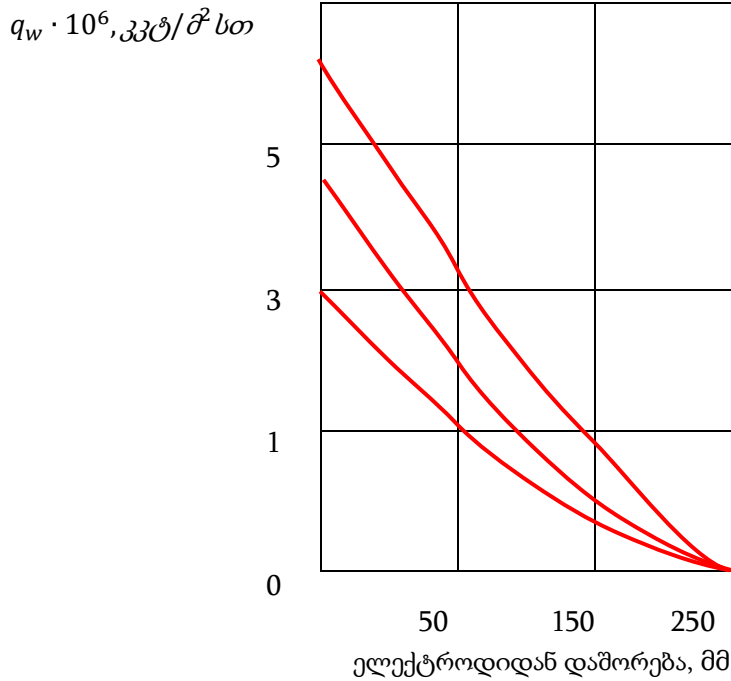
ნახ.3.7. ტემპერატურის ცვლილება t_1 და t_2 ელექტროდის t_1, t_2 წერტილებში (ელექტროდის კვეთი 250 x 250 მმ.)



ნახ.3.8. წიდის აბაზანის ტემპერატურის ცვლილება ელექტროდიდან კრისტალიზატორის კედლის დაშორებისას.



ნახ.3.9. ელექტროწიდური გადადნობისას დენის სიმკვრივის განაწილების სქემა.



ნახ.3.10. წიდის აბაზანის ვერტიკალურ კვეთში თბური ნაკადის ცვლილება სხვადასხვა სიმძლავრეზე (3,2,1), AHΦ წიდაზე.

$I_{კვ}$ დენის სიდიდე დამოკიდებულია წიდის აბაზანის სიმაღლეზე ($h_{წ}$) და ელექტროდსა და კრისტალიზატორის კედელს შორის $l_{გ}$ სიდიდეზე. მის გამოსათვლელად რეკომენდირებულია [20] გამოკვლევებით მიღებული ფორმულა

$$I_{კვ} = 0,34 \frac{t_{გ}}{l_{გ}} I_{კ} \quad (3.13)$$

როგორც შრომებში [59,68] ნაჩვენებია, გარკვეულ პირობებში შესაძლებელია კრისტალიზატორის კედელში გამავალი დენმა $I_{კვ}$ შეადგინოს მუშა დენის $I_{კ}$ 90%.

$$I_{კვ} \approx 0,9 I_{კ} \% \quad (3.14)$$

დნობადი ელექტროდი - კრისტალიზატორის ძირი სქემით ელექტროწიდური გადადნობისას მუშა დენის მნიშვნელობა:

$$I_{კ} = I_{გ} - I_{კვ} \quad (3.15)$$

$I_{გ}$ დნობად ელექტროდში გამავალი დენის (ელექტროწიდური გადადნობის სრული დენი). მისი მნიშვნელობა შეიძლება გაზომილი იქნას დნობად ელექტროდთან დენის წყაროდან ძაბვის მიმყვან სადენში.

(14) გამოსახულების გათვალისწინებით (2) მიიღებს სახეს:

$$Q_x = (I_g - I_{33})^2 R_f \quad (3.16)$$

ეს მიუთითებს იმაზე, რომ იმ შემთხვევაში თუ არ იქნა დაცული პირობები კრისტალიზატორის კედელში დენის შუნტირებისაგან, მაშინ წიდაში გამოყოფილი ჯოულის სითბო Q_x შეიძლება მნიშვნელოვნად შემცირდეს, I_{33} შემადგენლის გაზრდის გამო, ტრადიციული სქემით ელექტროწიდური გადადნობისას (ე.ი. დენის დანაკარგების ხარჯზე).

დნობად ელექტროდებთან კრისტალიზატორში დენის შუნტირება შემოთავაზებული სქემით გამორიცხულია, ამიტომ წიდაში გამოყოფილი ჯოულის სითბო სტაბილურად გამოისახება (3.16) განტოლებიდან.

3.3. ელექტროწიდური გადადნობისას დენის საანგარიშო სქემები

უძრავი და არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში თბური ბალანსის სქემების შედარებით მიღებულია გამოსახულება:

$$Q_x = Q_{ელ} - Q_{sb} \quad (3.17)$$

იგი შეიძლება საფუძვლად დაედოს ლითონის ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებას.

$$I = \frac{(Q_g + Q_b)}{0,24 vt} \quad (3.18)$$

ელექტროდის გახურებაზე და გადადნობისათვის საჭირო სითბოს Q_I ასევე სხმულის გაგრილებისას გაცემული სითბო Q_b გაანგარიშება შესაძლებელია ცნობილი გამოსახულებით [24,15].

$$Q_g = cm(T_2 - T_1) \quad (3.19)$$

სადაც: c - ელექტროდის და სხმულის მასალის სითბოტევადობაა.

m -შესაბამისად მათი მასა;

T_2, T_1 - ელექტროდის და სხმულის საწყისი და საბოლოო ტემპერატურა.

ლითონის ელექტროწიდური გადადნობის პროცესზე დახარჯული სასარგებლო სითბო ზოგადი სახით იანგარიშება შემდეგი ფორმულით:

$$Q_{სს} = (Q_{x}^{\beta} - Q_{j}^{\alpha}) - (Q_{j}^{\beta} + Q_{x}^{\alpha}) \quad (3.20)$$

ლითონის გამდნარ აბაზანას გადაცემული სითბო, რომელიც იწოდება ე.წ. სასარგებლო სითბოდ, ხშირად ავტორები არ აზუსტებენ სასარგებლო სითბოს შემადგენლობას. შესაძლებელია სასარგებლოდ ჩაითვალოს ელექტროდის გადახურებაზე დახარჯული სითბოს ნაწილიც, რომელიც განპირობებულია, მასში I_{x} დენის გავლით; ასევე წიდის გამოსხივებით ელექტროდის ტემპერატურის გაზრდა. ამ შეხედულების საფუძველია ის, რომ რაც მეტია ელექტროდის ტემპერატურა მით ნაკლები სითბოა საჭირო მის გადასადნობად.

(3.20) გამოსახულებაში თბური ბალანსის ანალიზი აჩვენებს, რომ ყველაზე დიდი მნიშვნელობები აქვს Q_{x}^{β} წიდაში გამოყოფილი ჯოულის სითბოს და კრისტალიზატორის კედლით წიდიდან ართმეულ სითბოს Q_{j}^{β} .

როგორც აღნიშნული იყო წიდაში გამოყოფილი ჯოულის სითბო:

$$Q_{x}^{\beta} = 0,24I_p^2 R t$$

სადაც პროპორციულობის კოეფიციენტი 0,24 წარმოადგენს ჯოულის სითბოს კკალორიიდან კილოვატებში გადასაყვან სიდიდეს.

ჯოულის სითბოს გამოსათვლელი გამოსახულებით:

$$Q_{x\beta} = cm(T_2 - T_1)$$

ამ უკანასკნელის საფუძველზე ჩვენს მიერ შემოთავაზებულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის თბური პროცესის შემდეგი მოდელი (ნახ.3.9):

გამდნარი წიდა წარმოდგენილია ცილინდრის სახით. მისი გარე დიამეტრი ტოლია კონკრეტულ შემთხვევაში კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრის d_3 სიმაღლე კი კონკრეტული პროცესისათვის წიდის ფენის სიმაღლის ტოლია (h_{β}).

ე.წ. წიდის ცილინდრთან შეხებაშია გადასადნობი ლითონის ელექტროდი, ისე რომ მათი სიმეტრიის ღერძები ერთმანეთს ემთხვევა.

რაც მეტია თხევადი წიდის სიმაღლე მით მეტია თბური დანაკარგები, [25], თუმცა მეორეს მხრივ მისი მეტისმეტი შემცირება დაკავშირებულია, გადადნობის პროცესში,

რკალური პროცესის განვითარებასთან, რაც თავის მხრივ მოქმედებს პროცესის სტაბილურობაზე. როგორც კვლევები აჩვენებს [24], მისი სიმაღლე უნდა იყოს არანაკლები ელექტროდის დიამეტრის ნახევრის. ელექტროდის დიამეტრი კი, აღნიშნულიდან გამომდინარე, ასევე დენის შუნტირების პროცესი პრაქტიკულად გამორიცხული უნდა იყოს, ამიტომ აიღება

$$R_{\text{e}} \approx \frac{d_{\text{e}}}{2} \approx h_{\text{e}} \quad (3.21)$$

რაც შეესაბამება კრისტალიზატორის შევსების კოეფიციენტის მნიშვნელობას იგი რეკომენდირებულია $0,5 \pm 0,6$

ცილინდრს, რომელიც მოიცავს გამდნარი წიდის მოცულობას, გარს ერტყმის რგოლი, რომლის შიგა დიამეტრი ემთხვევა კრისტალიზატორის შიგა კედლის დიამეტრს, ხოლო რგოლის გარე დიამეტრი დაკავშირებულია წყლით გაგრილების სისტემის გაანგარიშებისას კრისტალიზატორის ჭრილის გარე დიამეტრთან $d_{\text{კრ.გარე}}$; აღნიშნული რგოლის სიმაღლე გამდნარი წიდის ცილინდრის სიმაღლეზე h_{e} მეტია და ემთხვევა სიდიდით კრისტალიზატორის სიმაღლეს $h_{\text{კ}}$.

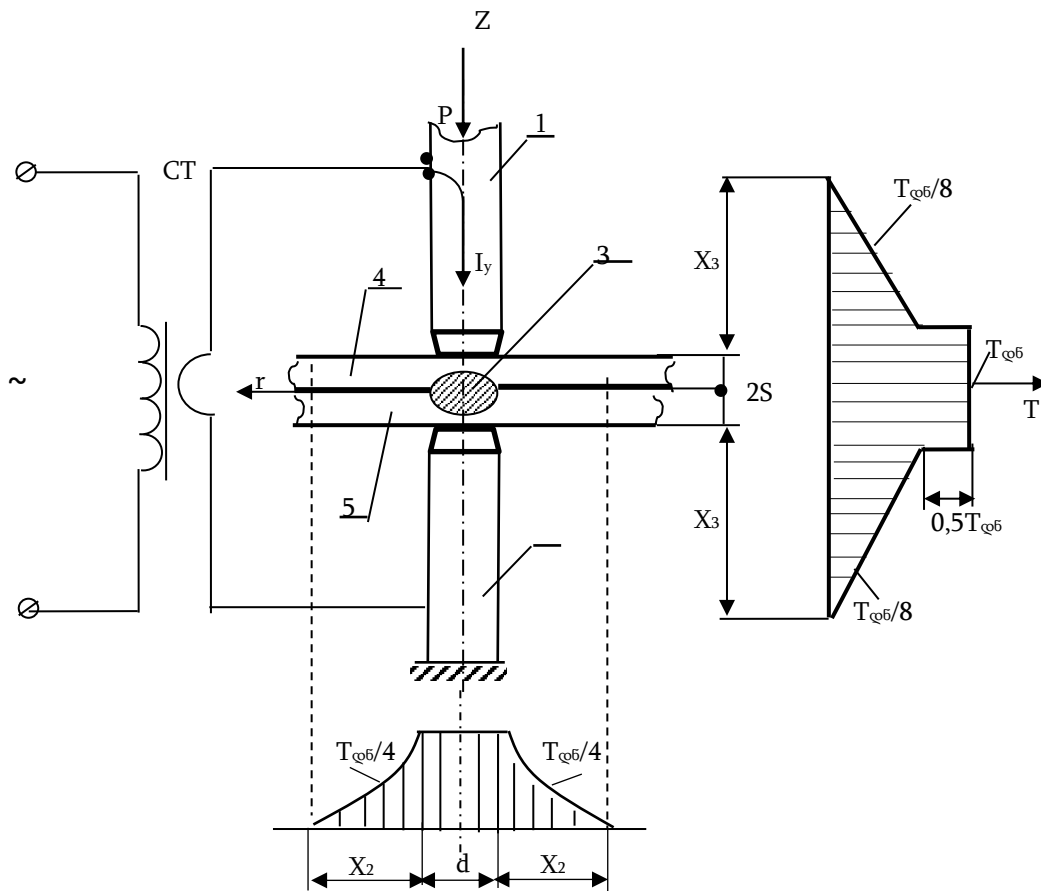
3.4. ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების დენის გაანგარიშების სქემა.

რადგანაც წიდიდან გამოსხივების სითბოს ნაწილი ხმარდება ელექტროდის გაცხელებას, დანარჩენი სითბო აირთმევა კრისტალიზატორის შიგა კედლიდან, ხოლო ნაწილი სითბოს გამოსხივებით გადაეცემა გარემოს. მათ საანგარიშოდ, მოდელში, კრისტალიზატორის კედელსა და ელექტროდს შორის არეში გათვალისწინებულია სამი ცილინდრული რგოლი (ნახ.3.9).

ელექტროწიდური გადადნობისათვის დამახასიათებელი პარამეტრების კვლევის შედეგებით ჩატარებულმა ანალიზმა, აგრეთვე ჩვენმა კვლევებმა, გვიჩვენა

მიზანშეწონილობა, რომ პროცესის წარმართვისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებისათვის შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ახალი სქემა, რომლის მსგავსი (ნახ.3.11) გამოყენებულია ერლექტოწიდური წერტილოვანი შედუღებისას თბური ბალანსის განტოლების ცალკეული წევრების გაანგარიშებებისათვის [26,27,28].

ლითონების ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების დენის ანგარიშის სქემა შემდეგში მდგომარეობს.



3.11. ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისათვის დენის გაანგარიშების და თბური ბალანსის განტოლების გაანგარიშების სქემა.

I- შედუღების დენი;

1,2-შედუღების არადნობადი ელექტროდები; 3,4- შესადუღებელი ფურცლოვანი დეტალები; CT- შედუღების ტრანსფორმატორი; $S, 2S$ -შესაბამისად დეტალის სისქე და ჯამური სისქე; P -ზედა მოძრავ ელექტროდზე მოქმედი ე.წ. დაწნევის ძალა; 5-შედუღების ბირთვი (გამაერთიანებელი ორივე დეტალის კონტაქტის ზედაპირებში).

ზედა მოძრავი 1 და ქვედა უძრავი 2 არადნობად ელექტროდებს შორის მოთავსებულია შესადუღებელი $S+S$ სისქის ფურცლოვანი მასალისგან დამზადებული დეტალები. ზედა მოძრავ ელექტროდზე მოდებულია ე.წ. კუმშვის ძალა, რომლის

მოქმედებით შესადულებელი დეტალების შეხების ზედაპირზე გამოიკვეთება დაახლოებით ელექტროდის დიამეტრის ზომის საკონტაქტო ფართი, ხოლო შესადულებელი დეტალების დანარჩენი ზედაპირები ერთმანეთისაგან გამოიყოფა δ საჰაერო ღრეჩოთი. შესადულებელი დეტალების საერთო კონტექსტში წარმოიქმნება ე.წ. კონტაქტური წინაღობა R_3 . ამ კონტაქტურ წინაღობაში დენის გავლით ხდება შესადულებელი დეტალების კონტაქტის ზონაში ზედაპირების ურთიერთგამდნარი და ე.წ. გამდნარი ლითონის ბირთვის (5) წარმოქმნა. ეს ბირთვი გარშემორტყმულია გაცხელებული, მაგრამ არაგამდნარი ლითონის მოცულობით. მისგან შეიძლება გამოიყოს: ელექტროდებს შორის მოთავსებული, ბირთვის დიამეტრის ტოლი ფუძის მქონე ცილინდრი, ანუ რაც იგივეა, ელექტროდების მუშა ზედაპირების დიამეტრის ტოლი ფუძის მქონე ცილინდრი და ამ ცილინდრს გარშემორტყმული (7) ცილინდრული რგოლი, რომლის სიმაღლე ტოლია შესადულებელი დეტალების ჯამური სისქის $S+S$ ხოლო რგოლის კედლის სისქე ტოლია $X_2(მმ)$.

აღნიშნული დენის გაანგარიშების სქემაში მიღებულია: ბირთვის გაცხელება ხდება შესადულებელი დეტალის მასალის დნობის $T_{დნ}$ ტემპერატურამდე; ელექტროდის გაცხელება x_3 მანძილზეა გათვალისწინებული $T_{დნ}/8$ ტემპერატურამდე, ხოლო ბირთვის გარშემო ლითონის გახურება მხედველობაშია მიღებული x_2 მანძილზე $T_{დნ}/4$ ტემპერატურამდე.

გამდნარი ბირთვის წარმოქმნის თბურ წყაროს წარმოადგენს ელექტროდებს შორის მოთავსებული ელექტროდების მუშა წრიული ზედაპირების დიამეტრის მქონე ცილინდრში დენის I_x გავლით გამოყოფილი სითბო Q_j^1 მისი საანგარიშო ფორმულას აქვს სახე:

$$Q_j^1 = cm(T_2 - T_1) \approx cmT_{დნ} \quad (3.22)$$

c - შესადულებელი ფურცლოვანი დეტალების მასალის სითბოტევადობაა:

$$c = 0,67 \text{ კჯ/კგ } ^\circ\text{K} \quad (3.23)$$

m -ელექტროდების მუშა ზედაპირის დიამეტრის ტოლი ფუძის მქონე ცილინდრის მასაა:

$$m = 2\sigma \frac{d_j^2}{4} S\gamma \quad (3.24)$$

γ - ფოლადის (შესადულებელი დეტალის მასალის) სიმკვრივეა:

$$\gamma = 7800 \text{ კგ/მ}^3 \quad (3.25)$$

$T_{\text{ღვ}}$ შესადუღებელი მასალის ფოლადის დნობის (ლიკვიდურის) ტემპერატურას (3.22) ფორმულაში გარემოს ტემპერატურა T_1 დნობის ტემპერატურასთან შედარებით უმნიშვნელოა, ამიტომ იგი ცილინდრში გამოყოფილი თბური ენერჯის Q_1^1 საანგარიშო ფორმულაში უგულვებელყოფილია.

სინამდვილეში, წერტილოვანი ელექტროკონტაქტური შედუღებისას ბირთვის მოცულობა ნაკლებია ვიდრე ელექტროდებს შორის მოთავსებული ცილინდრის მოცულობა. შესაბამისი თანაფარდობაა მათ მასებს შორის

$$m_{\text{ბ}} < m_{\text{ღ}} \quad (3.26)$$

(3.22) საანგარიშო ფორმულაში დაშვებულია, რომ

$$m_{\text{ბ}} = m_{\text{ღ}} \quad (3.27)$$

რაც გარკვეულ ცდომილებასთანაა დაკავშირებული Q_1^1 -ს გამოთვლისას x_2 -სისქის მქონე ცილინდრული რგოლის მიერ თბოგამტარობით ხდება ბირთვიდან Q_2^1 სითბოს ართმევა, რაც კონტაქტური წერტილოვანი შედუღების პროცესისათვის თბური დანაკარგია. მისი საანგარიშო გამოსახულებაა

$$Q_2^1 = cm(T - T_1) = k_1 \pi x_2 (d_{\text{ღ}} + x_2) 2S\sigma\gamma - T/4 \quad (3.28)$$

რადგან ბირთვის და ცილინდრის მასალა იგივეა რაც შესადუღებელი დეტალების მასალა და წარმოადგენს ფოლადს, მისთვის C წარმოადგენს ფოლადის სითბოტევადობას, γ - არის შესადუღებელი მასალის სიმკვრივე (მაგალითად დაბალნახშირიანი ფოლადის).

რგოლის მასა ტოლია:

$$m = 2S\gamma(d_{\text{ღ}} + x_2)\sigma x_2 \quad (3.29)$$

ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას თბური დანაკარგების Q_2^1 -ს გაანგარიშებისას მიღებულია, რომ $T/4$ საშუალო ტემპერატურა მიღწეულია ცილინდრის ზედაპირიდან x_2 მანძილით დაშორებული რგოლის გარე ზედაპირამდე და ასეთი რგოლით ართმეულ სითბოს ითვალისწინებენ h_2^1 -ს გაანგარიშებისას.

x_2 -ს გასაანგარიშებლად ლიტერატურაში [28] შემოთავაზებულია ემპირიული გამოსახულებები:

დაბალნახშირბადიანი ფოლადისაგან დამზადებული დეტალების წერტილოვანი

ელექტროკონტაქტური შედუღებისას:

$$x_2 = 1,2\sqrt{t_{\vartheta}} \quad (3.30)$$

სპილენძისაგან დამზადებული დეტალების შედუღებისას

$$x_2 = 3,3\sqrt{t_{\vartheta}} \quad (3.31)$$

ალუმინისაგან დამზადებული დეტალების შედუღებისას

$$x_2 = 3,1\sqrt{t_{\vartheta}} \quad (3.32)$$

ზოგადი სახით ამ ემპირიულ დამოკიდებულებას აქვს სახე:

$$x_2 = 4\sqrt{a_m t_{\vartheta}} \quad (3.33)$$

სადაც a_m -შესადუღებელ მასალაში სითბოს გავრცელების აჩქარებაა;

ხოლო t_{ϑ} წარმოადგენს ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების ხანგრძლივობას.

3.30, 3.31, 3.32 ემპირიულ გამოსახულებებში t_{ϑ} შეიძლება აღებული იქნას, დაბალნახშირბადიანი ფოლადის შედუღების შემთხვევაში $t_{\vartheta} = 1$ წმ, სპილენძის შედუღების $-t_{\vartheta} = 1 \cdot 10^{-3}$ წმ., ხოლო ალუმინის შედუღებისას $t_{\vartheta} = 0,1$ წმ.

ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების პროცესში გამდნარი ბირთვიდან ელექტროდების მიერ ართმეული სითბოს გაანგარიშების სქემის მიხედვით მიღებულია დაშვება, რომ თანაბრად ხურდება ელექტროდის შორის არსებული ცილინდრი, რომლის ფუძე წარმოადგენს ელექტროდის მუშა ზედაპირის დიამეტრის მქონე წრის ფართს. აღნიშნული ცილინდრის გახურების ტემპერატურა შეადგენს ბირთვის მასალის გადნობისათვის საჭირო ტემპერატურას $T_{დფ}$. ასეთი დაშვება დიდ ცდომილებასთან არაა დაკავშირებული, რადგანაც შესადუღებელი ფურცლოვანი დეტალის სისქის მიხედვით შეირჩევა (სახელმწიფო სტანდარტით) ბირთვის დიამეტრი. შესაბამისად ბირთვისა და ელექტროდის კონტაქტის ზედაპირებს შორის გაუმდნარი ლითონის უმნიშვნელო ფენაა და შედუღების საწყის ეტაპზე გამდნარი ბირთვის ცენტრში და ელექტროდის კონტაქტის ზედაპირზე ტემპერატურული სხვაობა უმნიშვნელოა. იგი მით უფრო უმნიშვნელოა რაც მეტია შესადუღებელი დეტალის მასალის თბოგამტარობის კოეფიციენტი და ცხადია, დამოკიდებულია შესადუღებელი დეტალის მასალის სახეობაზე. მაგალითად, სპილენძისაგან დამზადებული დეტალების შედუღებისას პროცესის დასაწყისშივე ტემპერატურა ბირთვის ცენტრში და ელექტროდის დეტალთან კონტაქტის ადგილას

პრაქტიკულად ერთნაირია მიუხედავად იმისა, რომ სპილენძის დეტალების ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას, შედუღების დენის იმპულსის ხანგრძლივობა არ აღემატება $t_{\text{შ}} = 1 \cdot 10^{-3}$ წმ-ს, შესაბამისად, შედუღების პროცესის ხანგრძლივობა არ აღემატება $1 \cdot 10^{-3}$ წმ-ს.

ელექტროდები დამზადებულია სპილენძისაგან ან სპილენძისა და ქრომის შენადნობებისაგან, რომლებსაც გააჩნიათ მაღალი თბოგადაცემის კოეფიციენტი და ამავე დროს, გრილდებიან წყლით. ამის გამო შესადუღი დეტალის კონტაქტის ზედაპირიდან დაწყებული ელექტროდის მთელს სიგრძეზე თანდათანობით მცირდება ელექტროდის ტემპერატურა. ექსპერიმენტალურად დადგენილია, რომ ტემპერატურის შემცირება ელექტროდში, მისი სიგრძის ზრდასთან ერთად წარმოადგენს ექსპონენტას [29,30]. ექსპერიმენტულად დადგენილია, აგრეთვე, რომ ელექტროდის x_3 უბანზე საშუალო ტემპერატურის $T_{\text{დნ}}/8$ -სიდიდემდე შემცირების შემდეგ, კონტაქტის ზონიდან ელექტროდის მიერ ართმეული სითბო Q'_3 გაანგარიშებისას შეიძლება უგულვებელყოფილი იქნას. x_3 -ს საანგარიშო ემპირიული გამოსახულება მსგავსია x_2 -ს საანგარიშო გამოსახულების.

$$x_3 = 4\sqrt{a_{m\text{გ}} \cdot t_{\text{შედ}}}$$
 (3.34)

როცა ელექტროდის მასალად გამოყენებულია სპილენძი ან შენადნობი BPX მაშინ მისთვის

$$a_{m\text{გ}} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ მ}^2/\text{წმ}$$
 (3.35)

ხოლო x_3 -ს -ს სიდიდე გამოითვლება გამოსახულებით.

$$x_3 = 4\sqrt{8 \cdot 10^{-5} t_{\text{შედ}}}$$
 (3.36)

სადაც შედუღების ხანგრძლივობა სპილენძისათვის აიღება

$$t_{\text{შედ}} = 0,001 \text{ წმ}$$
 (3.37)

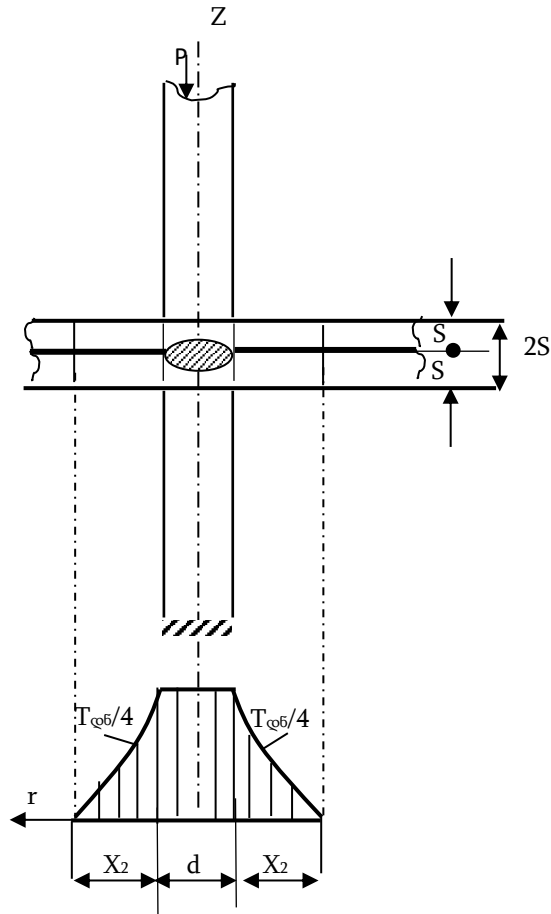
ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას გამდნარი ბირთვიდან ელექტროდებით ართმეული სითბოს რაოდენობა იანგარიშება გამოსახულებით:

$$Q'_3 = 2k_2(\pi d_{\text{გ}}^2/4)X_3 \cdot c_{\text{გ}} \cdot \gamma_{\text{გ}} \cdot T_{\text{დნ}}/8$$
 (3.38)

აქ k_2 კოეფიციენტი ითვალისწინებს თბურ დანაკარგებს, რაც გამოწვეულია იმით, რომ $T_{\text{დნ}}/8$ საშუალო ტემპერატურა შეიძლება იყოს უფრო ნაკლები სინამდვილეში,

რადგან დენის გადანაწილების გამო, ელექტროდის შიგა ზედაპირის ტემპერატურა შეიძლება იყოს უფრო მეტი ვიდრე ელექტროდის ზედაპირზე. ამიტომ აიღება :

$$k_2 \approx 0,8 \tag{3.39}$$



ნახ.3.12. ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას გამდნარი ბირთვიდან მასზე გარშემორტყმული რგოლიდან ართმეული სითბოს საანგარიშო სქემა.

(8.38) გამოსახულებაში $\pi d_j^2/4 X_3$ ზომის ელექტროდის მოცულობაა, ხოლო

$$m = \frac{\pi d_j^2}{4} X_3 \gamma_j \tag{3.40}$$

X_3 სიგრძის ელექტროდის მასაა

$$\gamma_j = 8900 \text{ კგ/მ}^3 \tag{3.41}$$

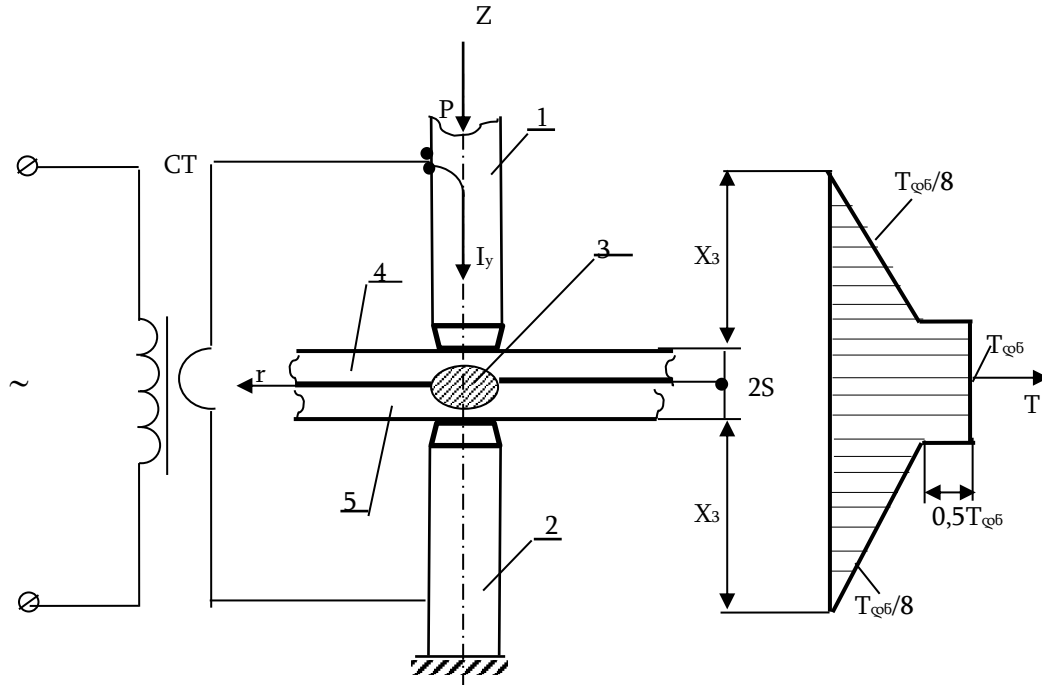
c_j ელექტროდის მასალის სითბოტევადობაა და აიღება

$$c_j = 0,38 \text{ კჯ/კგ } ^\circ\text{K} \tag{3.42}$$

(8.38) გამოსახულებაში კოეფიციენტი 2 მიუთითებს იმაზე, რომ სითბოს ართმევა ხდება ორივე ელექტროდით თანაბარად. მიღებულია, რომ ელექტროდის მუშა

ზედაპირის ფართი და ბირთვის დიამეტრი ერთმანეთის ტოლია.

$$d_e \approx d_b \tag{3.43}$$



ნახ. 3.13. წერტილოვანი ელექტროკონტაქტური შედუღებისას გამდნარი ბირთვიდან ელექტროდების მიერ ართმეული სითოს Q'_3 საანგარიშო სქემა.

1,2 - შესადუღებელი ელექტროდები; 3-შედურების ბირთვი; 4,5-შედადუღებელი დეტალები (ლითნის ფურცლები); P-ელექტროდზე მოქმედი კუმშვის ძალა;

და მისი სიდიდე აიღება სახელმწიფო სტანდარტით (GOST-ით) ცხრილებიდან შესადუღებელი დეტალის სისქის მიხედვით.

3.5. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გასაანგარიშებლად ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღების

შესაბამისი უბნის გაანგარიშების სქემა გამოყენებული იქნება, როგორც უძრავი კრისტალიზატორის, ასევე არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორებით ელექტროწიდური გადადნობის შემთხვევებისათვის.

3.5.1. უძრავ კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშების სქემა

უძრავ კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას როგორც ცნობილია, დენი გადის დნობად ელექტროდში, გამდნარი წიდის აბაზანაში და გადამდნარ სხმულში.

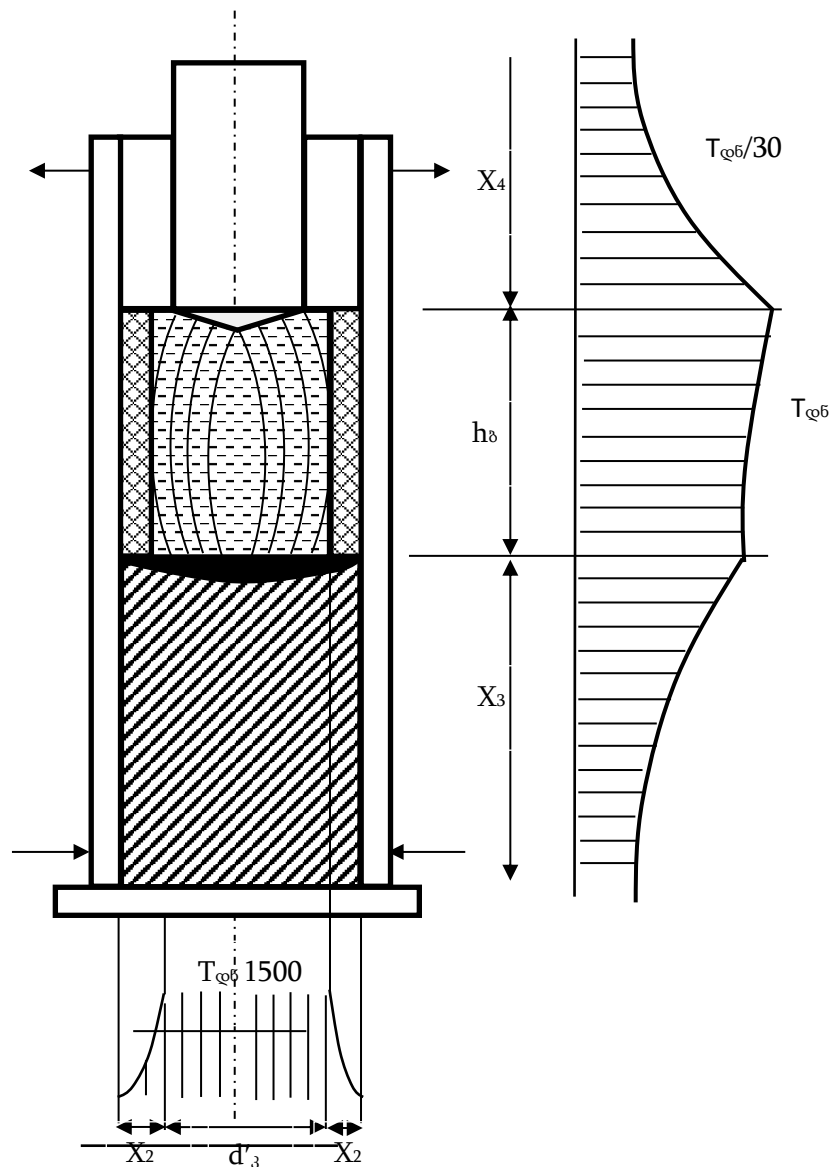
ელექტროწიდური გადადნობისას თბური ენერგიის წყაროს წარმოადგენს წიდაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს ე.წ. ჯოულის სითბო. ითვლება, რომ წიდა გამდნარ მდგომარეობაში წარმოადგენს დენის ცილინდრული გამტარის მქონე თხევად მასას, რადგანაც იგი იმეორებს კრისტალიზატორის შიგა ზედაპირის ფორმას. ამ შემთხვევაში იგულისხმება, რომ კრისტალიზატორის შიგა ზედაპირი ცილინდრული ფორმისაა.

ნახ. 3.14-ზე მოცემულია ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშების სქემა, როცა გადადნობისათვის გამოყენებულია უძრავი კრისტალიზატორი. როგორც ამ სქემიდან ჩანს, კრისტალიზატორში წიდის აბაზანის მიერ დაკავებული ცილინდრის ფუძის ($d'_{კრ}$) დიამტრი $2x_2$ სიდიდით ნაკლებია კრისტალიზატორის შიგა ზედაპირის დიამეტრზე ($d_{კრ}$)

$$d_{კრ} = d'_{კრ} + 2x_2 \quad (3.44)$$

$d'_{კრ}$ - ცილინდრის x_2 კედლის სისქის მქონე ცილინდრული რგოლის არსებობა განპირობებულია იმით, რომ იგი არსებობს კრისტალიზატორის შიგა ზედაპირთან

ახლოს და ვინაიდან კრისტალიზატორის კედელი წყლით გრილდება, მისი ტემპერატურა წილის აბაზანის ცენტრალური ნაწილის ტემპერატურაზე დაბალია. იმის გამო, რომ გამდნარი წილის წინაღობა, სხვა თანაბარ პირობებში, დამოკიდებულია წილის ტემპერატურაზე, ამიტომ გაზრდილი წინაღობის გამო დენი პრაქტიკულად არ გადის აღნიშნულ რგოლში, შესაბამისად მასში სითბო არ გამოიყოფა. ამ რგოლით ხდება სითბოს ართმევა წილის აბაზანისაგან.



ნახ.3.14. უძრავ კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწილური გადადნობისას წილის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშების სქემა.

წილის აბაზანის $d'_{კრ}$ - დიამეტრით შემოსაზღვრული ცილინდრის შიგა მოცულობის ტემპერატურა თანაბარია და ტოლია დნობადი ტემპერატურის $T_{დნ}$. თანაბარია აგრეთვე ცილინდრის სიმაღლეზე წილის ტემპერატურა და ისიც ტოლია დნობის ტემპერატურის.

ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედუღებისას ბირთვში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს საანგარიშო სქემის ანალოგიით, უძრავ კრისტალიზატორის წილის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს საანგარიშო ფორმულას აქვს სახე:

$$Q'_{1წ} = \sigma (d'_{კრ})^2 / 4 \cdot h_{წ} \cdot C_{წ} \cdot \gamma_{წ} \cdot T_{დნ}^{წილ} \quad (3.45)$$

ამ გამოსახულებაში: $d'_{კრ}$ -წილის აბაზანის დენგამტარი ნაწილის შემომსაზღვრელი დიამეტრია

$h_{წ}$ - წარმოადგენს წილის აბაზანის სიმაღლეს, იგი აიღება $h_{წ} = d'_{კრ}/2$

$C_{წ}$ - გამდნარი წილის სითბოტევადობაა;

$\gamma_{წ}$ - გამდნარი წილის სიმკვრივე;

$T_{დნ}^{წილ}$ - წილის დნობის ტემპერატურა კელვინებში, რომელიც დამოკიდებულია წილის შემადგენლობაზე. მაგალითად, რაც მეტია წიდაში CaF_2 -ს შემცველობა, მით დაბალია, სხვა თანაბარ პირობებში გამდნარი წილის დნობის ტემპერატურა. რაც მეტია წილის შემადგენლობაში CaO მით მაღალია მისი დნობის ტემპერატურა.

თუ ელექტროწილური გადადნობისას ძირითადი პარამეტრების სიდიდეებია:

$$d'_{კრ} = 25,4 \text{ სმ} = 25,4 \cdot 10^{-2} \text{ მ} = 0,254 \text{ მ.}$$

$$h_{წ} = 12,7 \text{ სმ} = 12,7 \cdot 10^{-2} \text{ მ} = 0,127 \text{ მ.}$$

$$C_{წ} = 1,72 \text{ კჯ/კგ}\cdot\text{K}$$

$$\gamma_{წ} = 2700 \text{ კგ/მ}^3$$

$$T_{დნ}^{წილ} = 1500^\circ\text{C} + 273^\circ = 1773^\circ\text{K}$$

მაშინ წილის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბო შემოთავაზებული საანგარიშო სქემის მიხედვით

$$Q'_{1წ} = \pi \cdot (0,254)^2 \cdot 0,127 \cdot 1,72 \cdot 2700 \cdot 1775 = 211,835 \text{ კჯ} \quad (3.46)$$

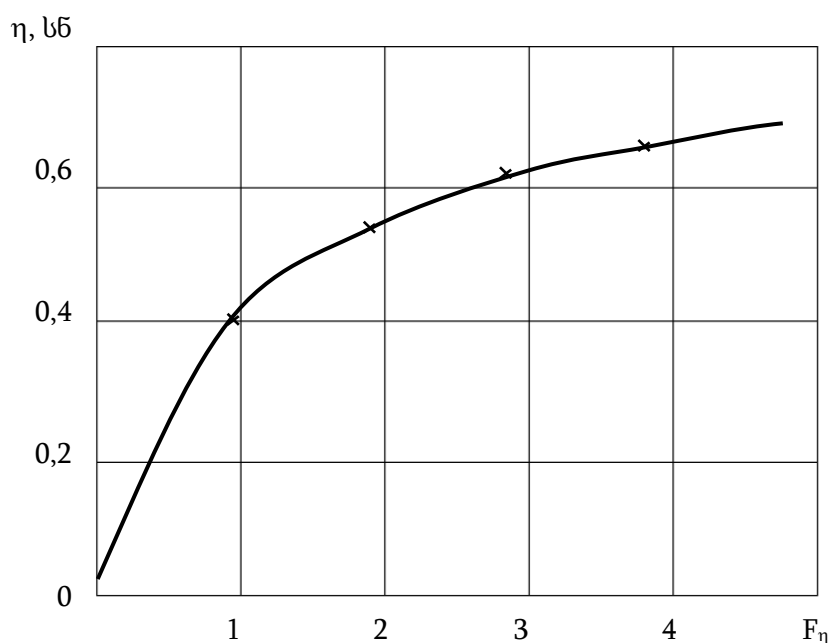
ამ მაგალითში წილის აბაზანაში გამოყოფილი $Q'_{1წ}$ -ს განსაზღვრისას გარნისაჟის

სისქე

$$\delta_g = d_{gr} - d'_{gr} \quad (3.47)$$

აღებულია 2,3 სმ-ის ტოლი $\delta_g = 2,3$ სმ.

როგორც ვხედავთ, გარნისაჟის სისქის დადგენა წარმოდგენილ საანგარიშო სქემაში მნიშვნელოვანია.



ნახ.3.15. წილის აბაზანაში თბური დანაკარგების ფარდობითი სიდიდის დამოკიდებულება F_n სიდიდესთან

3.5.2. უძრავ კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას გარნისაჟის სისქის δ_g განსაზღვრა.

უძრავ კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას გარნისაჟის სისქის δ_g დადგენა, ამავე დროს ნიშნავს განსაზღვრულ იქნას წილის აბაზანის იმ ცილინდრის

დიამეტრი d_{gr} , რომელშიც ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში დენი გადის ე.ი. რომელშიც ხდება ე.წ. ჯოულის სითბოს Q_j გამოყოფა (ფორმულა 3.48).

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს საანგარიშო (3.45) ფორმულიდან შეიძლება განვსაზღვროთ.

$$d'_{gr} = \sqrt{Q'_{1წ} / \sigma / 4 \cdot h_{წ} \cdot C_{წ} \cdot \gamma_{წ} \cdot T_{დნ}^{წიდ}} \quad (3.48)$$

ამ უკანასკნელში, კვადრატულ ფესქვეშ შემავალი ერთადერთი უცნობი სიდიდის $Q'_{1წ}$ -ს ცოდნის შემთხვევაში შესაძლებელია განსაზღვრულ იქნას უძრავი კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში ჯოულის სითბოს შემცველი ცილინდრის დიამეტრი d'_{gr} .

$Q'_{1წ}$ -ს განსაზღვრის მიზნით ვისარგებლოთ ვ.ხოლცგრუბერის მიერ მიღებული დამოკიდებულებით, რომელიც მოცემულია ნახ. 3.19-ზე.

ნახ.3.15 ნახაზზე წარმოდგენილ დამოკიდებულებაში F_η დაკავშირებულია კრისტალიზატორის ფორმასთან და წიდის აბაზანის სიმაღლესთან, ხოლო $\eta_{წ}$ დაკავშირებულია ფარდობით თბურ დანაკარგებთან კრისტალიზატორის გვერდით, შიგა კედელიდან. კერძოდ, რაც მეტია წიდის სიმაღლე, მით მეტია კონტაქტის ფართი კრისტალიზატორის კედელთან და მით მეტია წყლით გაგრილების შემთხვევაში წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბო ე.ი. თბური დანაკარგები

$$F_\eta = \frac{S_{წიდ}^{კრ.კედელი}}{S_{ლით.}} \quad (3.49)$$

ამ გამოსახულებით F_η -ს განსაზღვრით კონკრეტული ფორმის კოეფიციენტის მქონე კრისტალიზატორისათვის, შეიძლება განსაზღვრული იქნას წიდის აბაზანიდან თბური დანაკარგები, ე.ი. დანაკარგები მასთან შეხებაში მყოფი კრისტალიზატორის შიგა კედელიდან $\eta_{წ}$ (ნახ.3.15)

$S_{წიდ}^{კრ.კედელი}$ -არის კრისტალიზატორის შიგა კედელთან წიდის აბაზანის შეხების ფართი.

$S_{ლით.}$ -არის სხმულის თავზე განლაგებული თხევად მსგომარეობაში მყოფი ლითონის ფართი. იგი პრაქტიკულად ტოლია კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრით განსაზღვრული ფართის, რადგანაც კრისტალიზატორის ამ ნაწილში გარნისაჟის სისქე

მინიმალურია.

კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტის კონკრეტულ შემთხვევაში, თუ $K \approx 0,5 \div 0,7$ მაშინ $Q'_{1\beta}$ განსაზღვრისათვის შეიძლება ვისარგებლოთ ფორმულით:

$$Q'_{1\beta} = \frac{Q \cdot c}{1 - (\eta_m + \eta_{გამოსხ.})} \quad (3.50)$$

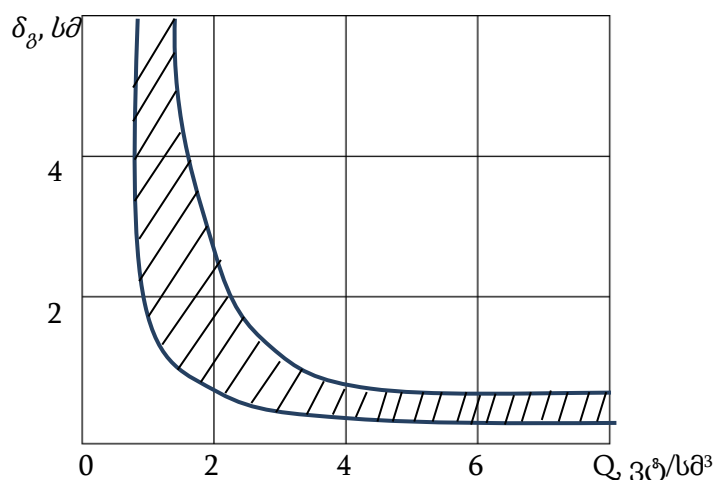
აქ η - შეადგენს წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებით გამოწვეულ ფარდობით თბურ დანაკარგს. სხვადასხვა მკვლევარების მონაცემებით $\eta_{გამოსხ.} = 0,05 \div 0,08$

$Q'_{1\beta}$ სითბოს საანგარიშო გამოსახულებაში (3.50) Q არის სითბო, რომელიც საჭიროა გადასადნობი ელექტროდის შეთბობისათვის, დნობისათვის და გადახურებისათვის.

დნობადი ელექტროდი გადადნობის პროცესში ხურდება, ამიტომ Q -ს სიდიდე ცვალებადია, ხოლო საწყის ეტაპზე ფოლადისათვის აიღება ერთეული მასის გადნობისათვის საჭირო სითბო

$$Q = 290 \text{ კკალ/კგ}$$

გადასადნობი ლითონის ერთეული მასის გადნობისათვის საჭირო Q ვტ/სმ³ სიმძლავრის მიხედვით შესაძლებელია, აგრეთვე გარნისაჟის სისქის δ_g განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ კვლევის შედეგებით, რომელიც მოცემულია ნახ.3.16-ზე. ამისათვის საჭიროა ერთეული მასის გადასადნობად საჭირო სითბოს მნიშვნელობა (3.51) გადავიყვანოთ ვტ/სმ³ ერთეულებში და განვსაზღვროთ შესაბამისად δ_g .



ნახ.3.16. კრისტალიზატორის კედელთან გარნისაჟის სისქის დამოკიდებულება წიდის აბაზანაში გამოყოფილი ხვედრით სითბოს სიმძლავრის სიდიდესთან.

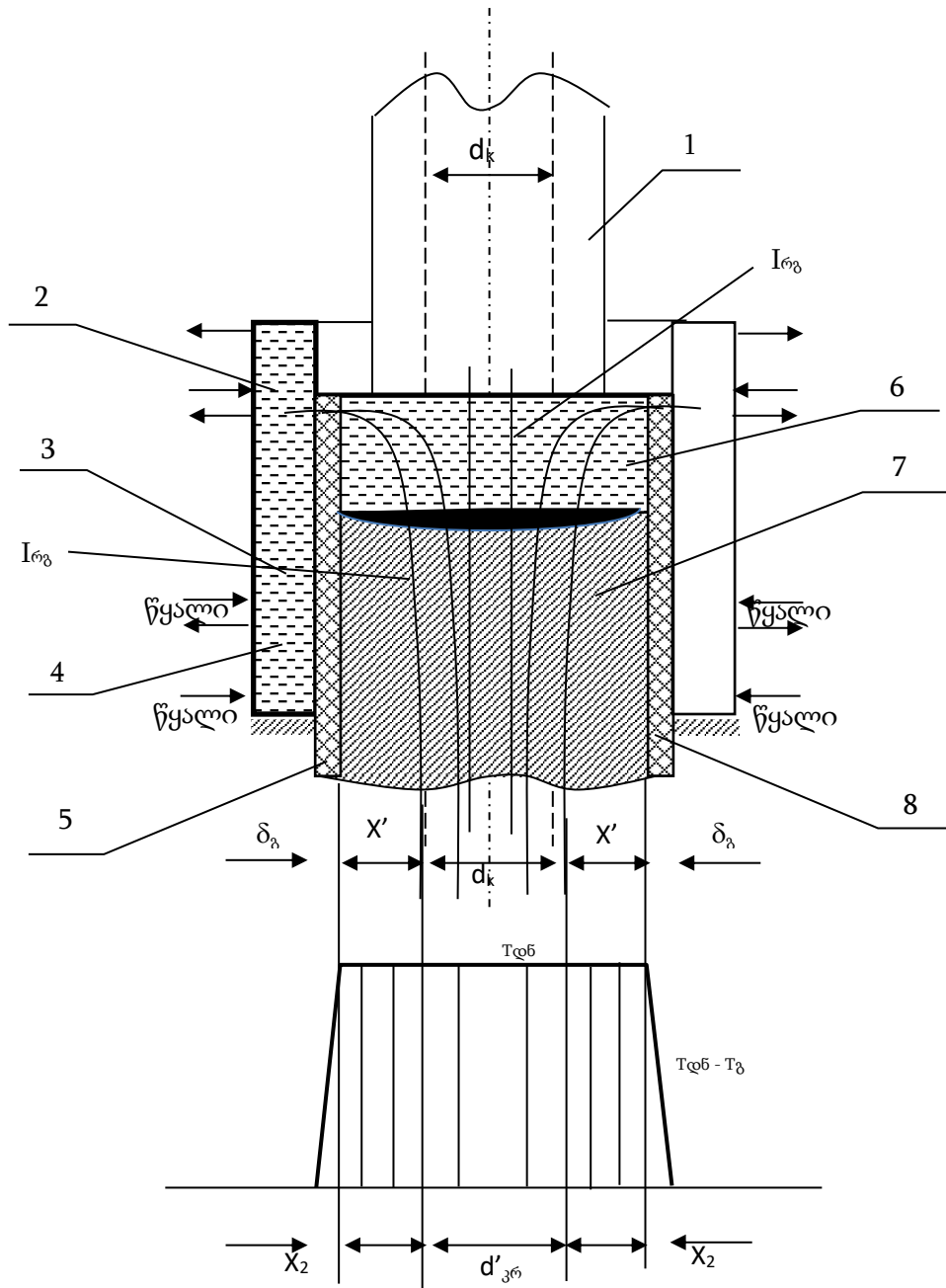
3.6 არადნობად ელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშების სქემა

ლითონების ერთდროულად დნობად და არადნობად ელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას, როგორც ნაჩვენები იყო, გადადნობისათვის საჭირო დენი გადის ერთდროულად დნობად ელექტროდსა და გადამდნარი ლითონის სხმულს შორის, და არადნობად ელექტროდებს შორის ან ზედა არადნობად ელექტროდსა და გადამდნარი ლითონის სხმულს შორის (ნახ.3.17). ყველა შემთხვევაში წიდის აბაზანაში გავლისას თითოეული მათგანი გამოყოფს სითბოს.

უძრავ კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისას, როგორც ნაჩვენები იყო (ნახ.1.2) დენი მიდის მხოლოდ დნობად ელექტროდსა და გადამდნარი ლითონის სხმულს შორის; შესაბამისად განსხვავებულია არადნობად ელექტროდებიანი კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშების სქემა. აქ გაანგარიშების სქემაში წიდის აბაზანა წარმოდგენილია ცილინდრისა და ცილინდრული რგოლის სახით. ეს უკანასკნელი გარნისაჟის თხელ ფენას ქმნის კრისტალიზატორის რეაქციების შიგა ზედაპირზე. გადადნობისათვის საჭირო დენი გამოიანგარიშება როგორც ცილინდრში და ცილინდრულ რგოლში გამავალი დენების ჯამი.

$$I_{\text{გად}} = I_{\text{ც}} + I_{\text{რგ}} \quad (3.51)$$

შესაბამისად ცალ-ცალკე გაიანგარიშება გადადნობის პროცესში ცილინდრში და რგოლში გამოყოფილი სითბო.



ნახ. 3.17. არადნობადელექტროდიანი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობისას წიდაში გამოყოფილი სითბოს საანგარიშო სქემა: 1-გადასადნობი ელექტროდი; 2-ზედა არადნობადი ელექტროდი; 3-შუალედური სექცია; 4-ქვედა არადნობადი ელექტროდი; 5- გადადნობილი ლითონის სხმული; 6-წიდის ცილინდრი; 7-წიდის რგოლი; 8-გარნისაჟის ფენა; $I_{რგ}$ -რგოლში გამავალი დენი; I_{δ} -ცილინდრში გამავალი დენი;

არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში დნობად ელექტროდსა და გადადნობილი ლითონის სხმულს შორის გამავალი დენით, წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო შეიძლება ვიანგარიშოთ ფორმულით.

$$Q'_{1\beta} = \sqrt{[d_{gr}(1-K)]^2 / 4 \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{დნ}^{\beta}} \quad (3.52)$$

ამ გამოსახულებაში d_{gr} -არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის სექციების შიგა დიამეტრია, ხოლო d_K - არის დნობადი ელექტროდის გარე დიამეტრი. იმ შემთხვევისთვის, როცა კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი K , მაშინ წიდის აბაზანაში ცილინდრის ფუძის დიამეტრი ტოლი იქნება:

$$d_{\beta} \approx d'_{gr} = d_{gr}(1-K) \quad (3.53)$$

თუ ცნობილია კონკრეტული გადასადნობი მასალის და სხმულის საჭირო ზომები, მაშინ მათი საშუალებით შეირჩევა კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი d_{gr} , აგრეთვე შერჩეული გადასადნობი კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი K გამოსახულებაში (3.30) იგი აღებულია $K \approx 0,5$.

(3.52) გამოსახულებაში შემავალი დანარჩენი სიდიდეები შეირჩევა ისე, როგორც ეს ნაჩვენებია უძრავი კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს საანგარიშო ფორმულაში (3.45).

როგორც წიდის აბაზანაში ელექტრული ველის კვლევამ აჩვენა, არადნობად ელექტროდებში გამავალი დენი I_{β} იწვევს სითბოს გამოყოფას ძირითადად ელექტროდების შიგა კედლის მახლობლობაში. კრისტალიზატორის ღერძის მახლობლობაში ელექტრული ველის პოტენციალი ნულს უახლოვდება. კვლევების საფუძველზე მიღებული იქნა, რომ ამ ველით განპირობებული დენი სითბოს გამოყოფს ძირითადად d'_{gr} - დიამეტრის მქონე ფუძის ცილინდრსა და კრისტალიზატორის სექციების შიგა დიამეტრს შორის განლაგებულ რგოლში. ამ რგოლის ერთ-ერთი პარამეტრი X' დამოკიდებულია კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტზე

$$X' = d_{gr} - d'_{gr} \quad (3.54)$$

3.54-ის გათვალისწინებით ცილინდრს გარშემორტყმული რგოლის მოცულობაში გამოყოფილი სითბო:

$$Q'_{1\beta} = \pi \cdot X' [d_{gr}(1-K)] h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{დნ}^{\beta} \quad (3.55)$$

განსხვავება იმაში მდგომარეობს, რომ რგოლით მოცული წიდის მოცულობაში ტემპერატურა მაქსიმალურია $T_{დწ}^{\prime}$.

$h_{წ}$ -კრისტალიზატორში წიდის აბაზანის სიმაღლეა;

$C_{წ}$ -წიდის სითბოტევადობაა;

$\gamma_{წ}$ -წიდის სიმკვრივეა;

$T_{დწ}^{\prime}$ -წიდის დნობის ტემპერატურაა;

K-კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტია. რგოლის მოცულობაში წიდის გაანგარიშებისას (3.45) ფორმულაში $K=0,9$.

ამრიგად, არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში დნობადი ელექტროდის ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო განპირობებულია არადნობადელექტროდებში და დნობად ელექტროდსა და გადამდნარი ლითონის სხმულში გამავალი დენებით.

$$Q_{\mathcal{X}} = Q_{1წ}^K + Q_{1წ}^{რგ} \quad (3.56)$$

3.7. წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს მიხედვით ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშება.

როგორც ნაჩვენებია იყო შემოთავაზებული სანგარიშო სქემის მიხედვით (ნახ.3.3) უძრავი კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო შეადგენს:

$$Q'_{1წ} = \pi (d'_{კრ})^2 / 4 \cdot h_{წ} \cdot C_{წ} \cdot \gamma_{წ} \cdot T_{დწ}^{\prime} \quad (3.57)$$

ამავე დროს წიდაში დენის გავლით გამოყოფილი ჯოულის სითბოს განსაზღვრისათვის შემოთავაზებული იყო.

$$Q'_{1წ} = 0,24 I_{წ}^2 \cdot R_{წ} \cdot t \quad (3.58)$$

ე.ი. შეიძლება დავწეროთ

$$0,24 I_p^2 \cdot R_{\beta} \cdot t = \pi (d'_{\beta})^2 / 4 \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დბ}}^{\beta} \quad (3.59)$$

ამ უკანასკნელის მიხედვით, დროის ერთეულში წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს შემთხვევაში, ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენი, უძრავი კრისტალიზატორის გამოყენების შემთხვევაში გამოითვლება:

$$I_{\mathcal{X}} = \sqrt{\frac{\pi (d'_{\beta})^2 / 4 \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დბ}}^{\beta}}{0,24 R_{\beta}}} \quad (3.60)$$

ამ გამოსახულებაში შემავალი წიდის წინაღობა R_{β} წარმოადგენს წიდის დიფერენციალურ წინაღობას, რაც იმას ნიშნავს რომ მისი კონკრეტული სიდიდე დამოკიდებულია: დენის სიდიდეზე, წიდის აბაზანის მოცულობაზე, დენის წყაროდან მიღებული ძაბვის სიდიდეზე და წიდის აბაზანის ტემპერატურაზე.

უძრავ კრისტალიზატორში გადადნობის პროცესის დამყარებულ რეჟიმზე (გადადნობის პროცესის დაწყებიდან 2-5 წთ-ის შემდეგ) დენის სიდიდე პრაქტიკულად უცვლელი (სტაბილური) ხდება. ასევე პრაქტიკულად უცვლელი რჩება წიდის აბაზანის ტემპერატურა. შესაბამისად უცვლელია წიდის აბაზანაზე დენის წყაროდან მოდებული ძაბვა. ამ დროს წიდის აბაზანის წინაღობა მოცემული კონკრეტული შემადგენლობის წიდისათვის შეიძლება ავიღოთ [2].

$$R_{\beta} \approx 200 \div 300 \text{ მკომი} \quad (3.61)$$

არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში დნობადი ელექტროდით ლითონის ელექტროწიდური გადადნობისათვის გვაქვს ორი სახის დენი.

1. დენი, რომელიც გადის დნობად ელექტროდსა და გადადნობილი ლითონის სხმულს შორის $I_{\beta}^{\mathcal{J}}$;

2. დენი, რომელიც გადის არადნობად ელექტროდებს შორის $-I_{\beta}^{\mathcal{J}}$;

$I_{\beta}^{\mathcal{J}}$ -დენის საანგარიშოდ გამოყენებულია წიდის აბაზანის ცილინდრში გამოყოფილი სითბო.

$$Q_{1\beta}^{\mathcal{G}} = \pi \cdot [d_{\beta}(1 - K)]^2 / 4 \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დბ}}^{\beta} \quad (3.62)$$

შესაბამისად $I_{\beta}^{\mathcal{J}}$ დენი იანგარიშება შემდეგი ტოლობიდან:

$$0,24 \left(I_{\beta}^{\mathcal{J}} \right)^2 \cdot R_{\beta} \cdot t = \pi [d_{\beta}(1-K)]^2 / 4 \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta} \quad (3.63)$$

აქედან, დნობად ელექტროდსა და გადადნობილი ლითონის სხმულს შორის დროის ერთეულში გამავალი დენი

$$I_{\beta} = \sqrt{\frac{\pi [d_{\beta}(1-K)]^2 / 4 \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta}}{R_{\beta}}} \quad (3.64)$$

R_{β} -არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში დამყარებული რეჟიმზე წიდის წინააღობაა. $R_{\beta} \approx 200-300$ მკომი [31,32,33,34].

არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორიში გადადნობის პროცესი იწყება მასში გამდნარი და წიდასთან გადახურებული წიდის ჩასხმით, ამიტომ არადნობად ელექტროდებს შორის გამავალი დენი იანგარიშება წიდის აბაზანაში გამოყოფილი ე.წ. რგოლში გამოყოფილი სითბოს მიხედვით:

$$Q_{1\beta}^{\text{რგ}} = \pi X' [d_{\beta}(1-K)] \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta}$$

შემდეგი ტოლობის საფუძველზე

$$0,24 \left(I_{\beta}^{\mathcal{J}} \right)^2 \cdot R_{\beta} \cdot t = \pi [d_{\beta}(1-K)] \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta} \quad (3.65)$$

აქედან არაელექტროდებს შორის გამავალი დენი:

$$I_{\beta}^{\mathcal{J}} = \sqrt{\frac{\pi X' [d_{\beta}(1-K)] \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta}}{R_{\beta}}} \quad (3.66)$$

R_{β} წინააღობა აქაც ელექტროწიდური გადადნობის დამყარებულ პროცესს შეესაბამება და იგივე მნიშვნელობით აიღება, როგორც წინა შემთხვევაში. არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო ჯამური დენი.

$$I_{\beta}^{\Sigma} = I_{\beta}^{\mathcal{J}} + I_{\beta}^{\mathcal{J}} \quad (3.67)$$

უძრავ კრისტალიზატორში და არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისათვის გაანგარიშებული დენები არ ითვალისწინებს ელექტროწიდური გადადნობის დროს გარდაუვალ დანაკარგებს, მათ შორის კრისტალიზატორის წყლით გაგრილებისას თბურ დანაკარგებს. ამის გამო ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენი გაცილებით მეტი იქნება

აღნიშნული დანაკარგების გათვალისწინების შემთხვევაში. ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებისას გასათვალისწინებელია, აგრეთვე დნობადი ელექტროდის წიდის აბაზანასთან შეხებაში მყოფი ადგილით ართმეული სითბო, აგრეთვე დნობად ელექტროდში გამოყოფილი ე.წ. ჯოულის სითბო.

3.8. წიდის აბაზანიდან კრისტალიზატორის შიგა კედლით ართმეული სითბო

წიდის აბაზანის გაცხელებით გამოწვეული კრისტალიზატორის კედელთან ხვედრითი თბური ნაკადი ($q_{\text{კვ}} \cdot 10^6$ -კკალ/მ²) ძირითადად დამოკიდებულია წიდის აბაზანაში გამოყოფილ სიმძლავრეზე ($P_{\text{ბ}} \cdot 10^6$ -კკალ/მ²).

როგორც ნახ. 3.18-დან ჩანს, წიდის აბაზანაში გამოყოფილი ხვედრითი სიმძლავრის ზრდით, იზრდება კრისტალიზატორის კედელზე მოსული ხვედრითი ნაკადი $q_{\text{კვ}}$. მაგრამ მისი $P_{\text{ბ}}=10^4$ კვტ/მ² სიდიდეზე მეტად გაზრდა პრაქტიკულად არ მოქმედებს ხვედრით თბური ნაკადის სიდიდეზე. რაც, დიდი ალბათობით, დამოკიდებულია წიდის ტემპერატურაზე, და გამოწვეულია წიდაში შემავალი ცალკეული კომპონენტების (მაგ. SiO₂, Al₂O₃, CuF₂, CaO და სხვა) დუდილის მდგომარეობაზე მიყვანასთან. რის გამოც სტაბილური ხდება წიდის ტემპერატურა, რადგანაც სიმძლავრის შემდგომი გაზრდით, აორთქლების შედეგად, უცვლელი რჩება წიდის ტემპერატურა.

ნახ.3.19-ზე მოყვანილი კვლევების აღნიშნული შედეგი საშუალებას იძლევა წყლით გაგრილების კრისტალიზატორში წიდის აბაზანასთან შეხებაში მყოფი შიგა კედლით ართმეული სითბო დავაკავშიროთ წიდაში გამოყოფილ ე.წ. ჯოულის სითბოსთან. ცალკე წიდის ტემპერატურის ფაქტორის გამოყოფის გარეშე.

როგორც აღნიშნული იყო, წიდისა და თხევადი ლითონის გამყოფ ზედაპირებს

შორის ადგილი აქვს თბური ნაკადის ლოკალურ გაზრდას. (ნახ. 3.20, მრუდი 4).

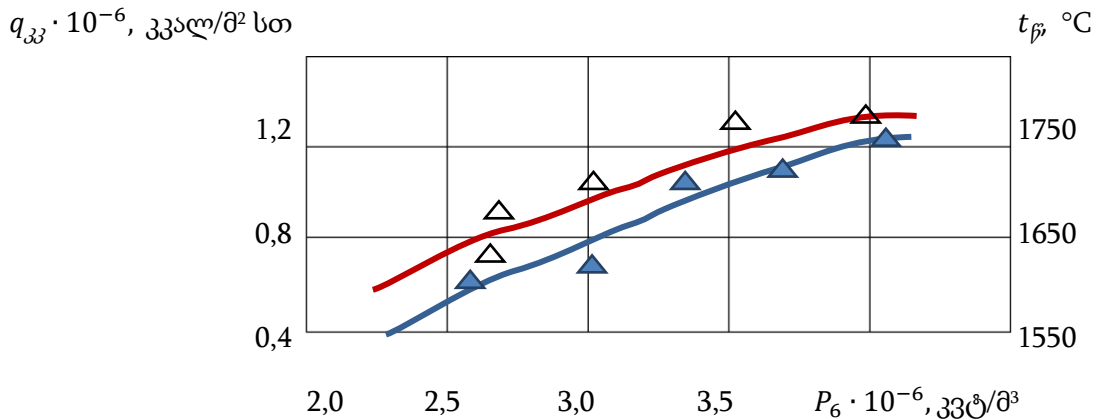
კრისტალიზატორის კედელი გარნისაჟის სისქის გაზრდით თბური ნაკადის ზრდა ხდება უმნიშვნელოდ (იხ.ნახ 3.20, მრუდი 3).

გარნისაჟის სისქის თბური ნაკადის სიდიდეზე გავლენის შეფასებისათვის შემოღებული იქნა შეფარდება

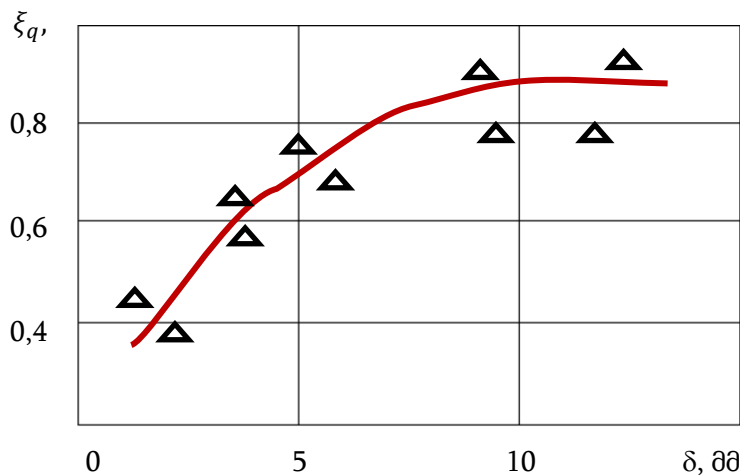
$$\xi_q = q_{33}^{მინ} / q_{33}^{მაქ} \tag{3.68}$$

სადაც $q_{33}^{მინ}$ არის წიდის აბაზანის შუა ნაწილში ხვედრითი თბური ნაკადი;

ხოლო $q_{33}^{მაქ}$ არის ხვედრითი თბური ნაკადი წიდის აბაზანისა და გამდნარი ლითონის აბაზანის გამყოფ ზედაპირზე.



ნახ.3.18. წიდაში გამოყოფილი ხვედრით სიმძლავრის დამოკიდებულება წიდის ტემპერატურაზე და კრისტალიზატორის კედელთან ხვედრით თბურ ნაკადზე (ექსპერიმენტში გამოყენებული იყო წიდა AHΦ-6).



ნახ. 3.19. ξ_q -სიდიდის დამოკიდებულება კრისტალიზატორის კედელზე გარნისაჟის სისქეზე.

$\xi_q = f(\delta_g)$ დამოკიდებულებიდან, რომელიც მოცემულია ნახ.3.19-ზე ჩანს, რომ გარნისაჟის 10-12 მმ სისქის მიღწევისას ξ -ს სიდიდე ახლოსაა ერთთან. რაც იმაზე მიუთითებს, რომ წიდის აბაზანისა და ლითონის აბაზანის გამყოფ ზედაპირში თბური ნაკადის ლოკალური ზრდა არ შეიმჩნევა. აღნიშნული იძლევა საშუალებას იმისა, რომ კრისტალიზატორის გაგრილების სისტემის თბური გაანგარიშებისას მოსახერხებელია ვისარგებლოთ თბური ხვედრითი ნაკადის საშუალო მნიშვნელობით. აღნიშნული კვლევების, აგრეთვე ნახ.3.20-ზე მოყვანილი მონაცემების გათვალისწინებით, საშუალო თბური დატვირთვა კრისტალიზატორის კედლის შეიძლება გათვლილი იქნას ფორმულით:

$$\overline{q_{კკ}} = \frac{Q_{\mathcal{X}} \cdot \eta_{\mathcal{F}}}{F_{\mathcal{F}}^3} \quad (3.69)$$

სადაც $\eta_{\mathcal{F}}$ არის გაგრილებით გამოწვეული თბური დანაკარგები, კრისტალიზატორის კედლიდან სითბოს ართმევის გამო. მისი სიდიდე აიღება ნახ.3.15-ზე წარმოდგენილი კვლევის შედეგების მიხედვით, კერძოდ F_{η} სიდიდის მიხედვით. როგორც ნახაზიდან ჩანს, იგი წარმოადგენს დამოკიდებულებას:

$$\eta_m = f(F_{\eta}) \quad (3.70)$$

F_{η} - განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებიდან:

$$F_{\eta} = \frac{F_{\mathcal{F}}^{კრ}}{F_{\mathcal{L}}} \quad (3.71)$$

სადაც $F_{\mathcal{F}}^{კრ}$ -არის თხევადი წიდის შეხების ფართი კრისტალიზატორის კედელთან. ხოლო $F_{\mathcal{L}}$ არის თხევად წიდასა და სხმულს შორის არსებული გამდნარი ლითონის აბაზანის ზედაპირის ფართი.

კონკრეტული კრისტალიზატორისათვის $F_{\mathcal{L}}$ განისაზღვრება კრისტალიზატორის შიგა ცილინდრის დიამეტრისა და გარნისაჟის სისქის მიხედვით:

$$F_{\mathcal{L}} = \pi(d_{კრ} - 2\delta_g)^2 \quad (3.72)$$

(3.69)-ს მიხედვით შეიძლება განსაზღვრული იქნას კრისტალიზატორის გაგრილებისას შიგა კედლით ართმეული სითბოს რაოდენობა

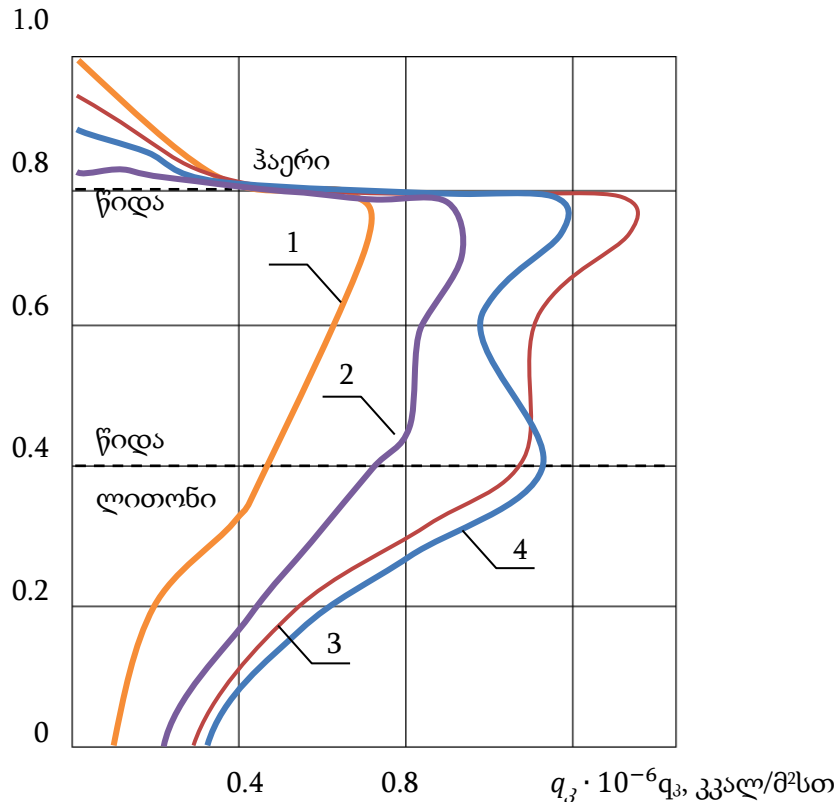
$$\overline{q_{კკ}} = \frac{Q_{\mathcal{X}} \cdot \eta_{\mathcal{F}}}{F_{\mathcal{F}}^3} \quad (3.73)$$

რადგანაც ცნობილია, რომ

$$\frac{\overline{q_{კკ}}}{F_{კ}^3} = Q_{კკ} \quad (3.74)$$

შესაბამისად კრისტალიზატორის კედლიდან წიდის აბაზანაზე ართმეული სითბო ტოლია:

$$Q_{კკ} = Q_{კ} \cdot \eta_{წ} \quad (3.75)$$



ნახ. 3.20. კრისტალიზატორის სიმაღლეზე თბური ნაკადის განაწილება.
 1-სპილენძის კრისტალიზატორი შიგა ზომებით: 500x1250 მმ; 2-რკინის კედლიანი
 კრისტალიზატორი, შიგა ზომებით 550x900 მმ; 3- სპილენძის კრისტალიზატორი, შიგა დიამეტრი 200 მმ;
 4- რკინის კედლებიანი კრისტალიზატორ, შიგა დიამეტრი 300 მმ;

როგორც ამ უკანასკნელი გამოსახულებიდან ჩანს, ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში გაგრილების სისტემის მოქმედებით კრისტალიზატორის თბურ დანაკარგებს განსაზღვრავს კრისტალიზატორის კედლის წიდასთან კონტაქტის ფართი. კონტაქტის ფართი დამოკიდებულია კრისტალიზატორის კონსტრუქციაზე, კერძოდ გაგრილებისათვის წყლის გავლის არხის კონსტრუქციაზე (ნახ. 3.21).

უძრავი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობის შემთხვევაში წიდის აბაზანასთან კრისტალიზატორის კონტაქტის ფართი და კრისტალიზატორის წყლით

გაგრილების ეფექტური ფართი $F_{ეფ}$ ერთმანეთის ტოლია.

$$F_{ფ}^{პპ} = F_{ეფ} \quad (3.76)$$

გაგრილების არხის ზედაპირზე ხვედრითი თბური ნაკადი გამოისახება ფორმულით:

$$q_b = q_{პპ} \frac{F_{ფ}^{პრ}}{F_{ეფ}} \quad (3.77)$$

(3.60) -ის გათვალისწინებით გამდნარი წიდის კედელთან თბური ნაკადი $q_{პპ}$ და ე.წ. ეფექტური ხვედრითი ნაკადი ერთმანეთის ტოლია.

$$q_b = q_{პპ}$$

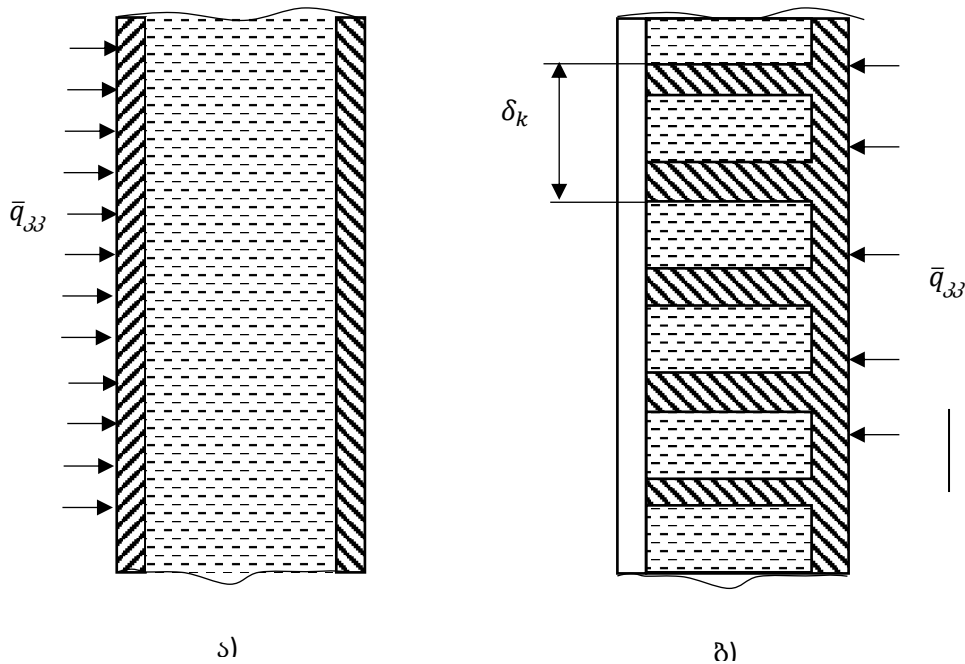
სექციებიანი კრისტალიზატორის შემთხვევაში (ნახ.3.21)

$$F_{ეფ} = n l_K \delta_K \quad (3.78)$$

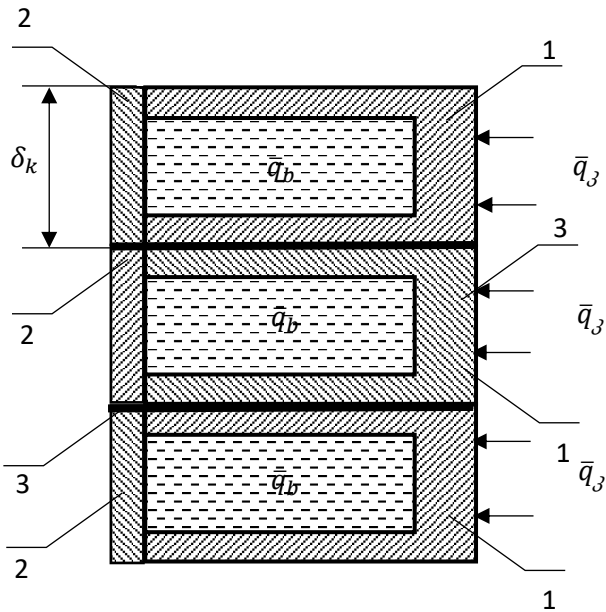
სადაც, n, l_K, δ_K შესაბამისად, გაგრილების არხების რიცხვი, არხის სიგრძე და სიგანეა.

ამ შემთხვევაში ხვედრითი ეფექტური ნაკადის საანგარიშო სიდიდე

$$q_b = q_{პპ} \frac{F_{ფ}^{პრ}}{F_{ეფ}} = q_{პპ} \frac{F_{ფ}^{პრ}}{n l_K \delta_K n_p} \quad (3.79)$$



ნახ.3.21. გაგრილების არხის სხვადასხვა კონსტრუქციები ელექტროწიდური გადადნობის კრისტალიზატორში: ა) უძრავი კრისტალიზატორის გაგრილების არხი; ბ) სექციებიანი კრისტალიზატორის გაგრილების არცი;



ნახ. 3.22. სექციებიანი არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის არხის კონსტრუქციული შესრულება: 1-სექციების სპილენძის კედელი; 2-სექციების ფოლადის კედელი; 3-ელექტროსაიზოლაციო შუასადები;

ხოლო (3.75) გამოსახულებაში თბური დანაკარგები

$$\eta_{\text{წ}} = \frac{F_{\text{წ}}^1}{F_{\text{ლ}}} = \frac{n l_k \delta_k}{F_{\text{ლ}}} \quad (3.80)$$

კრისტალიზატორის კედლიდან ართმეული სითბო (3.92)-ს მიხედვით

$$q_{\text{კკ}} = q_b \frac{n l_k \delta_k}{F_{\text{წ}}^{\text{კრ}}} \eta_{\text{წ}} \quad (3.815)$$

აღნიშნულის გათვალისწინებით, სექციებიანი კრისტალიზატორის შემთხვევაში გაგრილებით ართმეული სითბო კრისტალიზატორის კედლიდან:

$$Q_{\text{კკ}} = Q_{\text{X}} \cdot n l_k \delta_k \cdot \eta_{\text{წ}} \quad (3.82)$$

სექციებიანი არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის გაგრილების არხის კონსტრუქციული შესრულება (ნახ.3.21 ბ) პრაქტიკულად ისეთივეა, როგორც სექციებიანი კრისტალიზატორის გაგრილების არხი (ნახ.3.22). არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის შემთხვევაში სექციები ერთმანეთისაგან ელექტრულად იზოლირებულია, თუმცა ცალკეულ გაგრილების არხით ართმეული სითბო $Q_{\text{კკ}}$ შეიძლება ვიანგარიშოთ იგივე (3.66) გამოსახულებით.

3.9 ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას დნობადი ელექტროდის გაცხელება

ელექტროწიდური გადადნობისას დნობადი ელექტროდი ცხელდება და დნება გარეგანი და შინაგანი თბური წყაროების მოქმედებით.

შინაგან წყაროს წარმოადგენს დნობად ელექტროდში დენის გავლით გამოყოფილი Q_j^x ჯოჯის სითბო. დნობადი ელექტროდის გახურების გარეგან წყაროს წარმოადგენს გამდნარ წიდასთან შეხებაში მყოფი ელექტროდის ზედაპირით ართმეული სითბო და მასში თბოგამტარობით გავრცელებული; აგრეთვე, გარეგან წყაროდ ითვლება გამდნარი წიდის სარკისებური ზედაპირიდან გამოსხივებული სითბოს ზემოქმედება ელექტროდზე. აღნიშნულიდან გამომდინარე, დნობადი ელექტროდის გახურებაზე და გადნობაზე დახარჯული სითბო შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი გამოსახულებით.

$$Q_j = Q_j^x + Q_j^{\text{გამოსხ}} + Q_j^{\text{წიდ}} \quad (3.83)$$

სადაც: $Q_j^{\text{წიდ}}$ - არის გამდნარი წიდიდან ელექტროდის მიერ ართმეული სითბო;

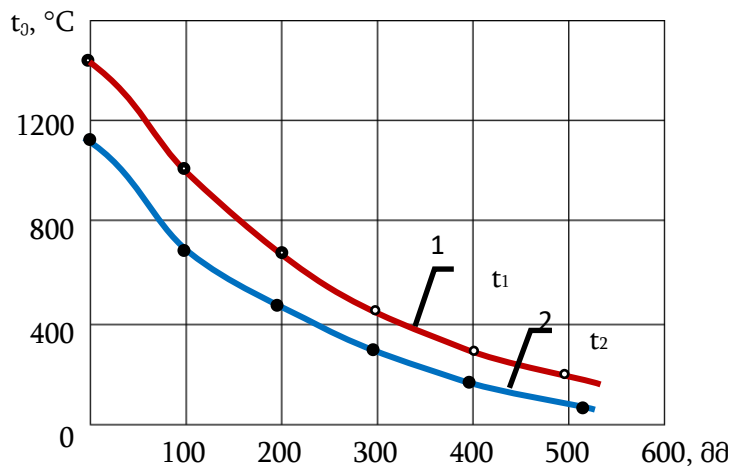
Q_j^x - არის დნობად ელექტროდში დენის გავლით გამოყოფილი სითბო;

$Q_j^{\text{გამოსხ}}$ - არის წიდის სარკისებური ზედაპირიდან არეკლილი სითბო;

დნობადი ელექტროდის გახურებაზე დახარჯული Q_j სითბოს განსაზღვრა აუცილებელია ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის განტოლების შედგენისას, რაც თავის მხრივ საჭიროა ელექტროწიდური გადადნობისასთვის აუცილებელი დენის მნიშვნელობის განსაზღვრისასთვის. ეს უკანასკნელი კი აუცილებელია კონკრეტული დნობადი ელექტროდით ელექტროწიდური გადადნობის ტექნოლოგიის დამუშავებისათვის [35,36,37,38].

3.9.1. ელექტროდში დენის გავლით გამოყოფილი სითბო $Q_{\text{ქ}}$

უნდა აღინიშნოს, რომ ელექტროდში სითბო გამოიყოფა აგრეთვე მასში დენის გავლით. ჩატარებულმა ექსპერიმენტმა, რომლის შედეგები მოცემულია ნახ.3.23-ზე, აჩვენა, რომ ელექტროდის ტემპერატურა წიდის ზედაპირიდან 600 მმ-ს ზემოთ ერთნაირია მისი მოცულობის ნებისმიერ წერტილში. შესაბამისად შესაძლებელია იგი გაიზომოს ელექტროდის ზედაპირზე. აქვე ნაჩვენებია, აგრეთვე, რომ ტემპერატურა ელექტროდის ზედაპირზე პრაქტიკულად არაა დამოკიდებული წიდაში კონტაქტში მყოფი დნობადი ელექტროდის ფორმაზე (ნახ.3.23)



ნახ.3.23. ელექტროდის ტემპერატურის ცვლილება წიდის აბაზანასთან დაშორებისას, როცა აბაზანასთან კონტაქტის ზედაპირის ფორმაა: 1-ცილინდრი; 2-კონუსური;

წიდის აბაზანის და ელექტროდის გამოსხივების საერთო ფართის $H_{\text{ქწ}}$ ზუსტი განსაზღვრა დაკავშირებულია დიდ სირთულეებთან. მიღებულია აღნიშნული ზედაპირისათვის განისაზღვროს ზედა ზღვრული მნიშვნელობა ელექტროდის $R_{\text{ქ}}$ რადიუსის, სიგრძის $l_{\text{ქ}}$ შევსების K კოეფიციენტი და მისი ანალიზის საფუძველზე შეაფასონ გამოსხივების მიერ ელექტროდის გაცხელების შესაძლებლობა.

$$H_{\text{ქწ}} < \frac{\pi R_{\text{ქ}}^2}{\sqrt{K} \sqrt{4 - \frac{R_{\text{ქ}}^2}{n_{\text{ქ}}^2}}} \frac{\arccos \sqrt{K}}{90^\circ} \ln \frac{\sqrt{\frac{K}{1+\sqrt{K}} + 4} + \sqrt{4 - \frac{R_{\text{ქ}}^2}{n_{\text{ქ}}^2}}}{\sqrt{\frac{K}{1+\sqrt{K}} + 4} - \sqrt{4 - \frac{R_{\text{ქ}}^2}{n_{\text{ქ}}^2}}}$$

მუდმივ დენზე ელექტროწიდური გადადნობისას ჯოულის სითბოს გამოყოფა გადასადნობი ელექტროდის მთელ მოცულობაში ხდება თანაბრად, ხოლო გადადნობისათვის ცვლადი დენის გამოყენების შემთხვევაში ჯოულის სითბო გამოიყოფა გადასადნობი ელექტროდის თხელ ზედაპირულ შრეში. ამ უკანასკნელის მიზეზია ის, რომ ელექტროდში ცვლადი დენის გავლისას მასზე მაგნიტური ველის მოქმედებით ხდება დენის გამოდევნა ელექტროდის ზედაპირზე. თანაც დენგამტარი შრის სისქე δ_j დამოკიდებულია ელექტროდის მასალის მაგნიტური მუდმივაზე μ_0 , ხვედრით ელექტროწინაღობაზე σ_j , მაგნიტურ შეღწევადობაზე μ და დენის სიხშირეზე ω .

$$\delta_j = \frac{2}{\sqrt{\mu_0 \mu \sigma_j \omega}} \quad (3.85)$$

ელექტროდში დენის შეღწევადობის სიღრმე მის რადიუსთან შედარებით მცირეა, ამიტომ შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ სამრეწველო სიხშირის ცვლად დენზე ელექტროწიდური გადადნობისას მთელი გამოყოფილი სითბო კონცენტრირდება ელექტროდის ზედაპირზე.

ცნობილია, რომ გამტარის წინაღობა R (ომი) დამოკიდებულია მის გეომეტრიულ პარამეტრებზე, როგორცაა სიგრძე l (მ), დენგამტარი განივი კვეთის ფართი S (მმ²).

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

როგორც აღნიშნული იყო, დენგამტარი შრის სისქე გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე ელექტროდის რადიუსი r . $\delta \ll r$

ამიტომ ელექტროდის რეალური ე.წ. ეფექტური წინაღობა R_{eff} გაცილებით მეტია ვიდრე მისი წინაღობა R_0 მუდმივ დენზე ელექტროწიდური გადადნობის შემთხვევაში

$$R_{eff} \gg R_0 \quad (3.86)$$

ექსპერიმენტულად დაგეგმილია დნობადი ელექტროდის ეფექტური წინაღობის განსაზღვრისათვის ფორმულა

$$R_{eff} = R_0 \cdot \psi(K) \quad (3.87)$$

ამ გამოსახულებაში დენის გამოდენვის კოეფიციენტი K_{eff} დამოკიდებულია გადასადნობი ელექტროდის რადიუსზე და დენგამტარი შრის სისქეზე

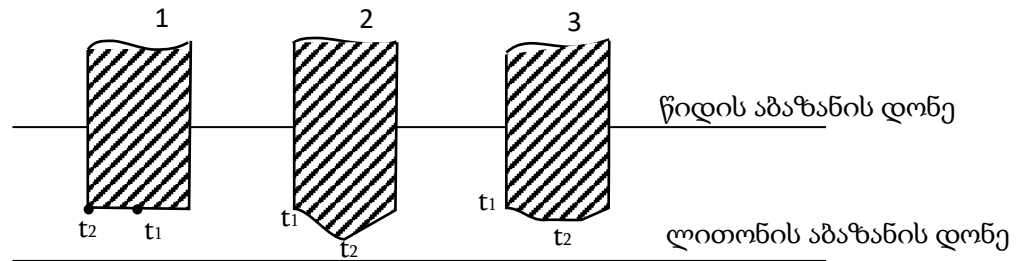
$$K = \frac{R_0}{2\delta_j} \quad (3.88)$$

$\psi(K)$ -ს განსაზღვრისათვის შემოთავაზებულია შემდეგი ემპირიული გამოსახულება [3]:

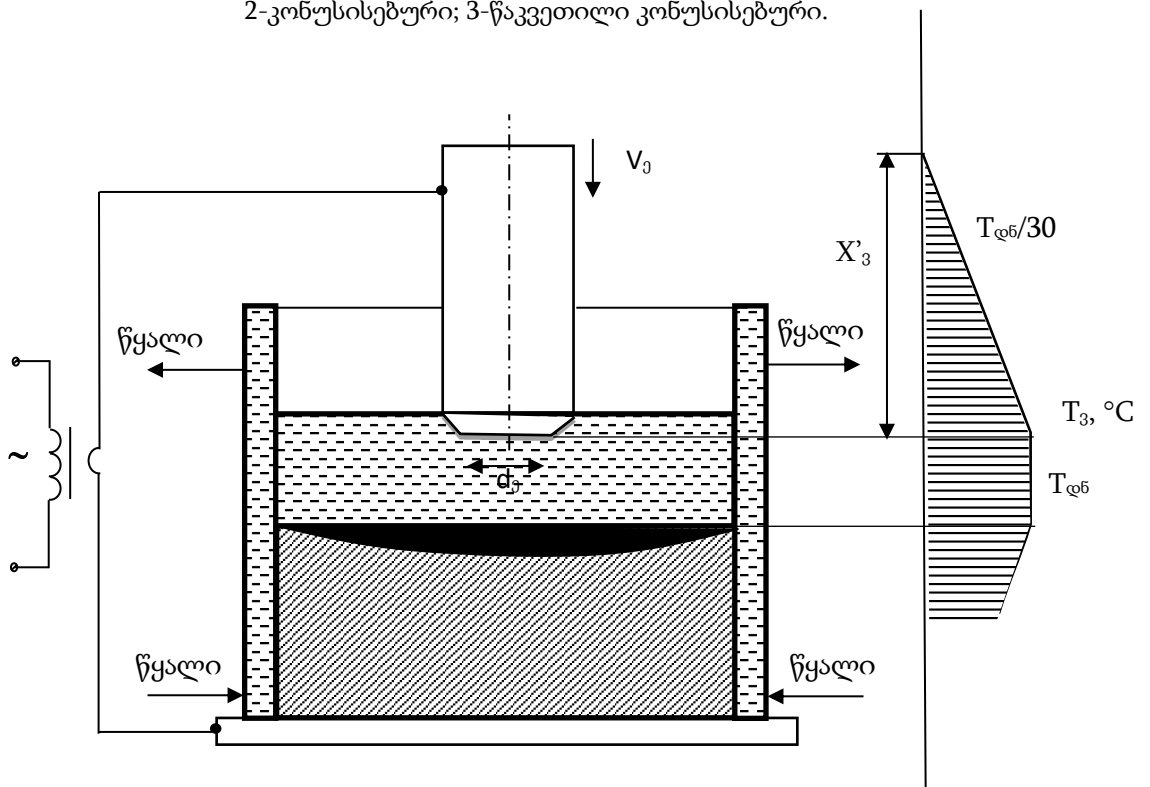
$$\psi(K) = \begin{cases} 0,907K + 0,277 & \text{როცა } 1 < K < 0 \\ K + 0,25 + \frac{3}{64K} & \text{როცა } K > 10 \end{cases} \quad (3.73)$$

ელექტროდში I_p დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა განისაზღვრება ფორმულით:

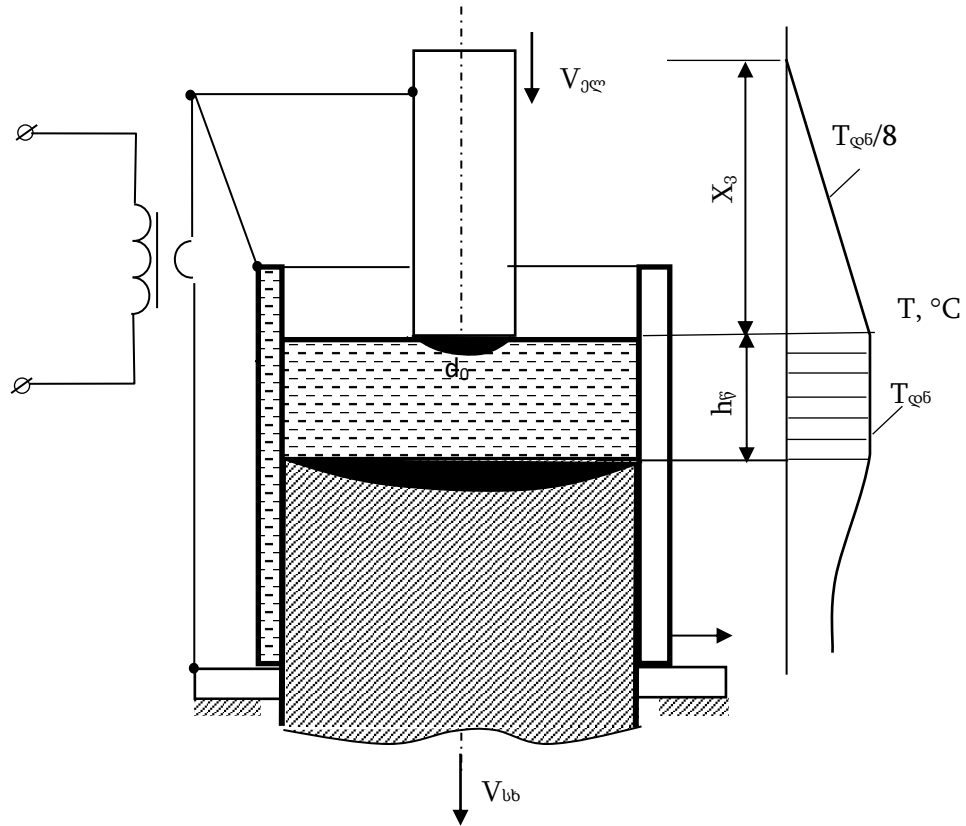
$$Q_j^x = I_p^2 R_{\text{ეფ}} \quad (3.89)$$



ნახ.3.24. გადასადნობი ელექტროდის წილის აბაზანასთან შეხების ადგილის ფორმა 1-ცილინდრული; 2-კონუსისებური; 3-წაკვეთილი კონუსისებური.



ნახ. 3.25. ლითონების ელექტროფილური გადადნობის წილის აბაზანიდან შეხების ზედაპირით დნობადი ელექტროდით ართმეული სითბოს გაანგარიშების სქემა



ნახ.3.26 არადნობადი ელექტროდით ელექტროფიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის კედლით წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს გაანგარიშების სქემა

3.9.2. დნობად ელექტროდზე გამდნარი წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებით გადაცემული სითბოს განსაზღვრა

დნობად ელექტროდზე გამოსხივებით გადაცემული სითბო

$$Q_{\text{გამოსხ}} = \sum_0 \sum_{\text{ელ}} \sum_{\text{წილ}} \left[\left(\frac{T_{\text{წილ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ელ}}}{100} \right)^4 \right] H_{\text{ელ,წილ}} \quad (3.90)$$

სადაც, $\sum_{\text{ელ}} \sum_{\text{წილ}}$ არის შესაბამისად ელექტროდის და წიდის სიშავის ხარისხი; $H_{\text{ელ,წილ}}$ არის ელექტროდის და წიდის აბაზანის გამოსხივებაზე ურთიერთქმედების ფართი.

$T_{\text{წილ}}$ -არის გამოსხივების ზედაპირის, კერძოდ, გამდნარი წიდის სარკისებური ზედაპირის ტემპერატურა; $T_{\text{ელ}}$ დნობადი ელექტროდის ტემპერატურაა, მაგრამ გაურკვეველია ელექტროდის რა ადგილას უნდა გაიზომოს იგი, რადგანაც გამოსხივების

პროცესში ელექტროდი ნაწილობრივ ჩაშვებულია გამდნარ წიდაში. ამის გამო, გამოსხივებასთან ერთად ელექტროდს სითბო გადაეცემა წიდიდან.

ცხრილი. 3.1.

სხვადასხვა მკვლევარების შედეგების ანალიზის საფუძველზე შემოთავაზებულია წიდის და საელექტროდე მასალის სიშავის ხარისხის მნიშვნელობები

	მასალის დასახელება	სიშავის კოეფიციენტის მნიშვნელობა
1	რკინა	0,35
2	ნახშირბადიანი ფოლადი	0,44
3	ქრომიანი და ქრომნიკელიანი ფოლადები	0,7
4	თხევადი წიდა	0,65
5	რკინა ჟანგით დაფარული ზედაპირით	0,95
6	ნახშირბადიანი ფოლადი რკინის ჟანგით დაფარული ზედაპირით	0,8
7	თუჯი	0,37
8	თუჯი ჟანგით დაფარული	0,7
9	ალუმინის ჟანგი	0,3
10	გამომწვარი თიხა (შამოტი)	0,7-0,8

(3.84) გამოსახულების ანალიზი აჩვენებს, რომ სხვა თანაბარ პირობებში, რაც მეტი იქნება $H_{g,წიდა}$ ფართი, მით ნაკლები იქნება გამოსხივებით ელექტროდზე გადაცემული სითბოს რაოდენობა ($Q_g^{გამოსხ}$). ამავე დროს, რაც მეტი იქნება K კოეფიციენტი მით ნაკლები იქნება $H_{g,წიდა}$ და ამის გამო $Q_g^{გამოსხ}$ გამოსხივებით ელექტროდზე გადაცემული სითბო.

კვლევის [39] გამოსახულების ანალიზი აჩვენებს აგრეთვე, რომ როცა $K > 0,6$ მაშინ გამოსხივებით ელექტროდზე გადაცემული სითბო 1%-ზე ნაკლებია, ელექტროდის იმ ნაწილზე, რომელიც წიდის ზედაპირიდან დაშორებულია ელექტროდის დიამეტრის ტოლი მანძილით გამოსხივებით ელექტროდის გახურების ტემპერატურის სხვაობა 7%-მდე ელექტროდის იმ ნაწილზე, რომელიც წიდის აბაზანის სარკისებური ზედაპირიდან

დაშორებულია $0,5 R_j$ -მდე.

ლითონების ელექტროწილური გადადნობისათვის ჩვენს მიერ შემოთავაზებული არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის გამოყენება საშუალებას იძლევა შვესების კოეფიციენტი გაიზარდოს $K > 0,9$ სიდიდეს ზემოთაც. ე.ი. გაზრდილი იქნას გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი ($2 R_j$) ისე, რომ გადადნობის პროცესში არ მოხდეს მოკლედ შერთვა გადასადნობ და არადნობად ელექტროდს შორის; ასევე თავიდან იქნას აცილებული დენის დაშუნტვა კრისტალიზატორის შიგა კედელზე.

შვესების კოეფიციენტის ასეთი მაღალი მნიშვნელობისათვის $K > 0,9$ (3.84) გამოსახულებების ანალიზის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ ელექტროდის გახურებაზე წიდის სარკისებური ზედაპირიდან გამოსხივების სითბოს უგულვებელყოფა შესაძლებელია დნობადი ელექტროდის გახურების სითბოს გაანგარიშებისას, რადგანაც ცდომილებამ შეიძლება შეადგინოს $\approx (1-2)\%$ -ი. აღნიშნულის გათვალისწინებით დნობადი ელექტროდის გახურებაზე დახარჯული სითბო შეიძლება საკმარისი სიზუსტით განვსაზღვროთ შემდეგი გამოსახულებით:

$$Q_j = Q_j^x + Q_j^f \quad (3.91)$$

3.9.3. დნობად ელექტროდზე გადაცემული სითბო წიდის აბაზანასთან შეხებაში მყოფი ზედაპირიდან

ჩვენს მიერ შემოთავაზებულია წიდის აბაზანიდან მასთან კონტექსტში მყოფი ელექტროდის ზედაპირით დნობად ელექტროდზე გადაცემული Q_j^f სითბოს გასაანგარიშებელი სქემები ნახ.3.25, ნახ.3.26, რომელთა საფუძველს შეადგენს წერტილოვანი ელექტროკონტაქტური შედუღებისას შესადუღებელ დეტალებს შორის წარმოქმნილი შესადუღებელი მასალის გადამდნარი ბირთვიდან ელექტროდის მიერ ართმეული სითბოს განსაზღვრისათვის (ნახ.3.13) გამოყენებული სქემა.

შედუღების ბირთვში (2) გამდნარი ლითონი გაცხელებულია შესადუღებელი

მასალის $T_{\text{დნ}}$ დნობის ტემპერატურამდე. შესაბამისი ტემპერატურა გააჩნია შედუღების არადნობად ელექტროდებს შესადუღებელ დეტალებთან (1,2) შეხების ზედაპირზე. გაგრილების და გარემოზე თბოგაცემის გამო, ელექტროდის თბოგამტარობით გადაცემული ტემპერატურა შემცირდებოდა გარემოს ტემპერატურამდე, მაგრამ ჩათვლილია, რომ ელექტროდის X_3 მონაკვეთის ბოლოში ტემპერატურა შეადგენს $T_{\text{დნ}}/8$, ამის შემდეგ ბირთვიდან ართმეული სითბო შეიძლება სიმცირის გამო უგულვებელვყოთ. მიღებულია აგრეთვე, რომ ბირთვის ტემპერატურა აქვს მისი დიამეტრის მქონე ცილინდრს, რომელიც მოთავსებულია ელექტროდების ტორცულ სიბრტყეებს შორის. წარმოდგენილი საანგარიშო სქემის მიხედვით ბირთვიდან ართმეული სითბო შეიძლება გაითვალოს შემდეგი გამოსახულებით:

$$Q_j = 2k_2(\pi d_j^2/4)X_3 C_j \gamma_j T_{\text{დნ}}/8 \quad (3.92)$$

k_2 კოეფიციენტი ითვალისწინებს ელექტროდის შესადუღებელ დეტალებთან კონტაქტში მყოფი ელექტროდის ზედაპირის ფორმას: ცილინდრული ფორმის შემთხვევაში $k_2 = 1$; კონუსური ფორმის შემთხვევაში $k_2 = 1,5$, ხოლო სფერული ფორმის შემთხვევაში $k_2 = 2$.

$C_j \gamma_j$ - შეადგენს შესაბამისად ელექტროდის მასალის თბოტევადობას და სიმკვრივეს. სპილენისათვის $C_j = 0,38$ კჯ/კგ $^{\circ}\text{K}$, $\gamma_j = 8900$ კგ/ მ^3 გაანგარიშებისათვის ერთ-ერთი მთავარი პარამეტრი:

$$X_3 = 4\sqrt{a_j t_{\text{შედ}}} \quad (3.93)$$

სადაც a_j ტემპერატურული გრადიენტია, როცა ელექტროდად გამოყენებულია სპილენძი $a = 8 \cdot 10^{-5}$ გრ/მ. რაც მეტი იქნება X_3 -ის მნიშვნელობა, მით ნაკლები იქნება გაანგარიშებაში თბური დანაკარგები.

X_3 - ის გაანგარიშების ემპირიული გამოსახულებით (1) დაშვებულია, რომ $T_{\text{დნ}}/8$ - ის ნაკლები ტემპერატურის მქონე ელექტროდის უბანი გაანგარიშებაში არ მონაწილეობს.

უძრავი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობისას გამდნარ წიდასთან შეხებაში მყოფი დნობადი ელექტროდით ართმეული სითბოს $Q_j^{\text{წ}}$ შემოთავაზებული სქემით გაანგარიშების ფორმულას აქვს შემდეგი სახე:

$$Q_j^{\text{წ}} = k_2' \left((\pi d_j^2/4) X_3' C_j \gamma_j T_{\text{დნ}}/8 \right) \quad (3.94)$$

ამ გამოსახულებაში k_2' კოეფიციენტი ითვალისწინებს დნობადი ელექტროდის წიდაში

ჩაშვებული ნაწილის ფორმას. იგი დამოკიდებულია წიდის აბაზანის სიღრმეზე, დნობადი ელექტროდის დიამეტრზე ე.ი. ფორმის კოეფიციენტზე. უძრავი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური სქემით გადადნობის შემთხვევაში, როცა ფორმის კოეფიციენტის მნიშვნელობა $K < 0,6$. წიდის აბაზანაში დნობად ელექტროდს აქვს კონუსური ფორმა და ტემპერატურა მის მოცულობაში თანაბრადაა განაწილებული ამ შემთხვევაში შეიძლება აღებულ იქნას (3.91) გამოსახულებაში $k'_2 \approx 1,5$. ამავე გამოსახულებაში ფოლადისათვის აიღება : $\gamma_{\text{ელ}} = 7800 \text{ კგ/მ}^3$. $c_{\text{ელ}} = 0,67 \text{ კჯ/(კგ.კ)}$, ხოლო X'_3 -ს საანგარიშოდ აიღება $a = 9 \cdot 10^{-6} \text{ მ}^2/\text{წმ}$.

დიდი სხმულების (რამდენიმე ტონის) მიღებისას ელექტროწიდური გადადნობის პროცესი რამოდენიმე სთ-ს გრძელდება, ამიტომ ელექტროდზე წიდის აბაზანიდან გადაცემული სითბო ასწრებს თბოგამტარობით გავრცელდეს და როგორც პროცესში ელექტროდის ტემპერატურის პირომეტრით გაზომვებმა აჩვენა, $\frac{T_{\text{დნ}}}{8}$ - ს მნიშვნელობას აღწევს წიდის ზედაპირიდან 1,5 მ-ზე.

კრისტალიზატორის და სხმულის ზომების გათვალისწინებით, $l = 1,5$ მ-მდე ელექტროდის სიგრძის შემცირებისას ხდება მისი გამოცვლა ახალი გადასადნობი ელექტროდით. აღნიშნულის გამო, წიდის აბაზანიდან ელექტროდზე გადაცემული სითბოს გასაანგარიშებლად (12) გამოსახულებაში აიღება:

$$X'_3 = 1,5 \text{ მ} \quad (3.95)$$

არადნობადელექტროდიანი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობისას დნობად ელექტროდზე წიდის აბაზანიდან შეხებაში მყოფი ზედაპირით გადაცემული სითბოს საანგარიშო ფორმულა იგივეა (3.91). განსხვავებულია მასში შემავალი ზოგიერთი ელემენტები: X'_3 და $d_{\text{ელ}}$. სიდიდეები, კერძოდ $d_{\text{ელ}}$. გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი გაზრდილია, ვინაიდან არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში შესაძლებელია ფორმის კოეფიციენტი შერჩეული იქნას $K \approx 0,9$. ამის გამო გაზრდილია, წიდის აბაზანასთან დნობადი ელექტროდის კონტაქტის ფართი და შესაბამისად ამ კონტაქტიდან დნობად ელექტროდზე გადაცემული სითბო $Q_{\text{გ}}^{\text{წ}}$.

გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრის გაზრდა ამავე დროს ნიშნავს წიდის აბაზანის სიმაღლის გაზრდას, რადგანაც ოპტიმალური გადადნობის პროცესის შემთხვევაში წიდის აბაზანის სიმაღლე დნობადი ელექტროდის დიამეტრის ნახევრის

ტოლი აიღება. ეს იწვევს წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს $Q_{\text{წ}}$ გაზრდას. თუმცა ამის ხარჯზე დნობად ელექტროდზე გადაცემული სითბო $Q_{\text{გ}}^{\text{წ}}$ არ იზრდება. რადგანაც აბაზანის სიმაღლის გაზრდით იზრდება კრისტალიზატორის შიგა კედელთან კონტაქტის ფართი და სათანადოდ იზრდება მის მიერ წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს რაოდენობა, რის შედეგადაც საბოლოო ჯამში არ იცვლება წიდის აბაზანის ტემპერატურა. ეს იმაზე მიუთითებს, რომ არადნობადელექტროდიანი კრისტალიზატორით ელექტრონული გადადნობისას დნობადი ელექტროდის მიერ წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს გაანგარიშების სქემაში და სათანადოდ (3.91) გამოსახულებაში ელექტროდის გახურების საშუალო ტემპერატურა შეიძლება აღებული იქნას $T_{\text{დნ}}/8$ -ს ტოლი სიდიდის. ასეთი ტემპერატურა გააჩნია დნობად ელექტროდს კონტაქტის ზედაპირიდან დაშორებით $X'_3 \approx 1,0$ მ, ჩვენს მიერ რეკომენდირებულია ელექტროდის გამოცვლა მოხდეს შესაბამის სიდიდემდე მისი გადადნობისას. ელექტროდის ნარჩენი ნაწილი შეიძლება გადაეხას ახალ გადასადნობ ელექტროდს ელექტროორკალური შედუღებით.

ელექტროწიდური გადადნობისას დნობადი ელექტროდის გახურების საანგარიშო გამოსახულებას საბოლოოდ აქვს შემდეგი სახე:

$$Q_{\text{გ}} = I_{\text{წ}}^2 R_{\text{გწ}} + R'_2 (\pi d_{\text{გწ}}^2 / 4) X'_3 C_{\text{გწ}} \gamma_{\text{გწ}} T_{\text{დნ}} / 8 \quad (3.95)$$

მასში შემავალი წევრების მნიშვნელობები აიღება ან იანგარიშება ზემოთ მითითებული ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის თავისებურებების გათვალისწინებით.

3.10 ელექტროწიდური გადადნობისთვის საჭირო დენის გაანგარიშება

ელექტროწიდური გადადნობისთვის საჭირო სრული დენის ანგარიშისას მხედველობაში უნდა იქნას მიღებული, როგორც წიდაში გამოყოფილი სითბო ე.წ. ჯოულის სითბო, აგრეთვე გამდნარი წიდიდან ართმეული სითბო. მათი სხვაობა წარმოადგენს ე.წ. სასარგებლოდ დახარჯულ სითბოს ე.ი. უშუალოდ გადასასდნობი ლითონის გადადნობაზე დახარჯული სითბო. მას აღნიშნავენ Q_{sb} და მიჩნეულია, რომ სხმულზე გადაცემული სითბო გამდნარი წიდიდან ლითონის აბაზანის და წიდის კონტაქტის ზედაპირიდან, არის სასარგებლოდ დახარჯული სითბო.

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისთვის მიღებული თბური ბალანსის განტოლებიდან შეიძლება დავწეროთ:

$$Q_{sb} = (Q_x - Q_j^x) - (Q_{\text{წ}}^{\text{კკ}} + Q_{\text{წ}}^{\text{გაგ}}) \quad (3.96)$$

სადაც Q_{sb} -სხმულზე გადაცემული სითბოა;

Q_x -წიდაში დენის გავლით გამოყოფილი ჯოულის სითბოა;

Q_j^x -გადასასდნობ ელექტროდში გამოყოფილი ჯოულის სითბოა;

$Q_{\text{წ}}^{\text{კკ}}$ -კრისტალიზატორის კედლით წიდიდან ართმეული სითბოა.

$Q_{\text{წ}}^{\text{გაგ}}$ -წიდიდან გამოსხივებით გაცემული სითბოა;

ჩვენს მიერ ნაჩვენები იყო, რომ გამოსხივებით გაცემული სითბო $-Q_{\text{წ}}^{\text{გაგ}}$ -წიდაში საერთოდ გამოყოფილი სითბოს უმნიშვნელო ნაწილია, კერძოდ იგი არ აღემატება (1÷5)%-ს, ხოლო დიდი სიდიდის კრისტალიზატორის ფორმის შემთხვევაში, როცა $K > 0,6$ -ზე, მაშინ გამოსხივებით წიდის ზედაპირიდან დანაკარგები არ აღემატება (1-2)%-ს. ამის გამო, მისი უგულვებელყოფა წარმოდგენილ გამოსახულებაში არ უნდა იყოს დაკავშირებული, დენის გაანგარიშებისას, მნიშვნელოვან ცდომილებასთან. აღნიშნულის გამო შეიძლება დავწეროთ

$$Q_{sb} = Q_x^{\text{წ}} - Q_j^x - Q_{\text{წ}}^{\text{კკ}} \quad (3.97)$$

აქედან წიდაში გამოყოფილი ჯოულის სითბო

$$Q_x = Q_{sb} + Q_j^x + Q_{\text{წ}}^{\text{კკ}}$$

ჩვენს მიერ შემოთავაზებული მეთოდით განსაზღვრული წიდაში გამოყოფილი და წიდის მიერ გაცემული სითბოს გაანგარიშების მხედველობაში მიღებით გვაქვს შემდეგი გამოსახულება

$$Q_{\mathcal{X}} = Q_{sb} + Q_{\mathcal{X}}\eta_{\mathcal{F}} + Q_{\mathcal{J}}^{\mathcal{X}} \quad (3.98)$$

ამ გამოსახულებიდან წიდური გადადნობისასთვის საჭირო დენი უძრავ კრისტალიზატორისათვის ტოლია:

$$I_P = \frac{1}{\sqrt{0,84R_{\mathcal{F}}}} \left[\frac{\pi(d'_{\mathcal{J}\mathcal{F}})^2}{4} \cdot h_{\mathcal{F}} \cdot C_{\mathcal{F}} \cdot \gamma_{\mathcal{F}} \cdot T_{\mathcal{D}\mathcal{F}}^{\mathcal{F}} \right] + \left[\frac{\pi(d'_{\mathcal{J}\mathcal{F}})^2}{4} \cdot h_{\mathcal{F}} \cdot C_{\mathcal{F}} \cdot \gamma_{\mathcal{F}} \cdot T_{\mathcal{D}\mathcal{F}}^{\mathcal{F}} \cdot \eta_{\mathcal{F}} \right] + R'_2 \left[\frac{\pi d_{\mathcal{J}\mathcal{D}1}^2}{4} \cdot X'_3 \cdot C_{\mathcal{J}\mathcal{D}1} \cdot \gamma_{\mathcal{J}\mathcal{D}1} \cdot T_{\mathcal{D}\mathcal{F}}/8 \right] \quad (3.99)$$

არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორის ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის დენი განსხვავებული იქნება იმის გათვალისწინებით, რომ კრისტალიზატორის კედლით წიდიდან ართმეული სითბო განსხვავებულია სიდიდით.

ამიტომ არადნობადი ელექტროდით ელექტროწიდური გადადნობისას დენი

$$I_P = \frac{1}{\sqrt{0,32R_{\mathcal{F}}}} \left[\frac{\pi(d'_{\mathcal{J}\mathcal{F}})^2}{4} \cdot h_{\mathcal{F}} \cdot C_{\mathcal{F}} \cdot \gamma_{\mathcal{F}} \cdot T_{\mathcal{D}\mathcal{F}}^{\mathcal{F}} \right] + \left[\frac{\pi(d'_{\mathcal{J}\mathcal{F}})^2}{4} \cdot h_{\mathcal{F}} \cdot C_{\mathcal{F}} \cdot \gamma_{\mathcal{F}} \cdot T_{\mathcal{D}\mathcal{F}}^{\mathcal{F}} \cdot \eta_{\mathcal{F}} \right] + \left[R'_2 \frac{\pi d_{\mathcal{J}\mathcal{D}1}^2}{4} \cdot X'_3 \cdot C_{\mathcal{J}\mathcal{D}1} \cdot \gamma_{\mathcal{J}\mathcal{D}1} \cdot T_{\mathcal{D}\mathcal{F}}/8 \right] \quad (3.100)$$

არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორში არალითონური მასალების გადადნობისას, გადადნობის პროცესი მიმდინარეობს დნობადი ელექტროდის გარეშე, ამიტომ (3.98) გამოსახულება ამ შემთხვევისათვის დაიწერება შემდეგნაირად:

$$Q_{\mathcal{X}} = Q_{sb} + Q_{\mathcal{J}} \cdot \eta_{\mathcal{F}} \quad (3.101)$$

შესაბამისად გადადნობისათვის საჭირო დენი არალითონური მასალების ელექტროწიდური გადადნობისას:

$$I_P^{\mathcal{J}\mathcal{L}} = \frac{1}{\sqrt{0,32R_{\mathcal{F}}}} \left[\frac{\pi(d'_{\mathcal{J}\mathcal{F}})^2}{4} \cdot h_{\mathcal{F}} \cdot C_{\mathcal{F}} \cdot \gamma_{\mathcal{F}} \cdot T_{\mathcal{D}\mathcal{F}} \right] + \left[\frac{\pi(d'_{\mathcal{J}\mathcal{F}})^2}{4} \cdot h_{\mathcal{F}} \cdot C_{\mathcal{F}} \cdot \gamma_{\mathcal{F}} \cdot T_{\mathcal{D}\mathcal{F}} \cdot \eta_{\mathcal{F}} \right] \quad (3.102)$$

დამუშავებული მეთოდით დენის გაანგარიშების მაგალითები ლითონის ელექტროწიდური გადადნობისას უძრავ კრისტალიზატორისათვის მოცემულია დანართ 1-ში.

დასკვნა III თავის მიმართ

1. ელექტროწიდური გადადნობისას თბური პროცესების ანალიზის საფუძველზე დადგენილია, რომ სასარგებლოდ დახარჯული სითბო $Q_{სსს}$, რაც იგივეა ელექტროდის გადადნობით მიღებული სხმულის გადაცემული სითბო Q_b -საგან გაანგარიშებისათვის საჭიროა ვიცოდეთ წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო $Q_{x'}^f$, ელექტოდის გახურებაზე დახარჯული სითბო Q_j^x წიდის აბაზანიდან კრისტალიზატორის მიერ ართმეული სითბო Q_j^f და წიდის აბაზანის სარკისებული ზედაპირიდან გამოსხივებული სითბო

$$Q_b = (Q_{x'}^f - Q_j^x) - (Q_j^f - Q_f^b)$$

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის განსაზღვრისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ თბური ბალანსის წარმოდგენილ გამოსახულებაში შემავალი თითოეული წევრის მნიშვნელობა.

2. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის თბური ბალანსის განტოლებაში შემავალი $Q_{x'}^f, Q_j^x, Q_j^f, Q_f^b$ სითბოს სახეობების მნიშვნელობების განსაზღვრისათვის შემოთავაზებულია ელექტროდის, წიდის საერთო მასის (m), სითბოტევადობის c და მათი ტემპერატურის მიხედვით განსაზღვრის მეთოდი. მსგავსი მოდელი გამოყენებულია ელექტროკონაქტური წერტილოვანი შედულების თბური ბალანსის განტოლების წევრების საანგარიშოდ.
3. შემუშავებულია წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს $Q_{x'}^f$ და $Q_{x'}^f$ -საანგარიშო სქემა და მიღებულია სათანადო მათემატიკური გამოსახულება, წიდაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშებისათვის წიდის, აბაზანის სიმაღლის, კრისტალიზატორის შიგა კედლის დიამეტრის $d_{კრ}$, წიდის სითბოტევადობის c_f , წიდის სიმკვრივის γ_f და ამ უკანასკნელის დნობის ტემპერატურის $T_{დნ}^f$ მიხედვით.
4. დამუშავებულია არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს საანგარიშო სქემა, და შექმნილია აღნიშნული სითბოს საანგარიშო ანალიზური გამოსახულება

$$Q_{x'} = Q_{1f}^g + Q_{1f}^{რგ}$$

რომელიც შედგება დნობადი ელექტროდის ქვეშ წიდის მოცულობაში წარმოდგენილი ელექტროდის დიამეტრის ფუძის და წიდის აბაზანის სიმაღლის მქონე ცილინდრში გამოყოფილი $Q_{1\beta}^{\beta}$ სითბოსა და აგრეთვე ამ ცილინდრის გარშემორტყმული რგოლით, რომელიც გრძელდება კრისტალიზატორის შიგა კედლამდე, წიდაში გამოყოფილი $Q_{1\beta}^{\beta}$ სითბოს ჯამისაგან.

თითოეული მათგანის საანგარიშო მათემატიკურ გამოსახულებაში $h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta}$ წიდის მახასიათებელი პარამეტრების გარდა შედის კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი:

$$Q_{1\beta}^{\beta} = \sqrt{\frac{\pi (d'_{\beta})^2 / 4 h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta}}{0,24 R_{\beta}}}$$

5. მიღებულია უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის საანგარიშო გამოსახულება:

$$I_{\beta} = \sqrt{\frac{\pi [d_{\beta}(1-K)]^2 / 4 \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta}}{0,24 R_{\beta}}}$$

6. მიღებულია არადნობადელექტროდიან კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის დნობად ელექტროდსა და წიდის აბაზანაში გამავალი დენის საანგარიშო გამოსახულება, მიღებულია აგრეთვე არადნობადელექტროდებს შორის გამავალი დენის საანგარიშო გამოსახულება

$$I_{\beta}^{\beta} = \sqrt{\frac{\pi X' [d_{\beta}(1-K)] \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{\text{დნ}}^{\beta}}{0,24 R_{\beta}}}$$

მათი საშუალებით გამოითვლება არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის ჯამური მნიშვნელობა:

$$I_{\beta}^{\Sigma} = I_{\beta}^{\beta} + I_{\beta}^{\beta}$$

7. მიღებულია უძრავი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის შიგა კედლიდან ართმეული სითბოს საანგარიშო გამოსახულება: $Q_{\beta\beta}^{\beta} = Q_{\beta} \eta_{\beta}$

8. მიღებულია არადნობადელექტროდებიანი კრისტალიზატორით ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის კედლიდან ართმეული სითოს საანგარიშო გამოსახულება $Q_{კვ}^{\circ} = Q_{x} \cdot n l_K \delta_K \eta_{\beta}$
9. ელექტროწიდური გადადნობისას დნობადი ელექტროდის გახურება გამოწვეულია მასში დენის გავლით და წიდიდან აბაზანასთან შეხებაში მყოფი ელექტროდის მიერ ართმეული სითბოს ხარჯზე. მასში შედარებით უმნიშვნელო გავლენას ახდენს წიდის ზედაპირიდან გამოსხივებით მიღებული სითბო.
10. ელექტროწიდური გადადნობისას დნობად ელექტროდზე წიდის აბაზანასთან კონტაქტში მყოფი ზედაპირიდან გადაცემული სითბოს საანგარიშო სქემის მიხედვით მხედველობაშია მიღებული დნობადი ელექტროდის წიდასთან შეხებაში მყოფი კონტაქტიდან დაშორებული ნაწილი, სადაც მიღწეულია საშუალო ტემპერატურა $T_{დწ}$. წიდის აბაზანის სიმაღლეს და დნობადი ელექტროდის წიდის აბაზანასთან კონტაქტში მყოფი ზედაპირის ფორმის გავლენა პრაქტიკული გაანგარიშებისას შეიძლება უგულვებელყოფილ იქნას.
11. უძრავ კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის გაანგარიშების შემოთავაზებული სქემების გამოყენებით მიღებულია თბური პროცესისათვის გამოსახულება $Q_x = Q_{sb} + Q_x \eta_{\beta} + Q_j^x$ და შესაბამისად გადადნობისათვის საჭირო დენის საანგარიშო მათემატიკური გამოსახულება:

$$I_P = \frac{1}{\sqrt{0,24R_{\beta}}} \left[\frac{\pi(d'_{კრ})^2}{4} \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{დწ}^{\beta} \right] + \left[\frac{\pi(d'_{კრ})^2}{4} \cdot h_{\beta} \cdot C_{\beta} \cdot \gamma_{\beta} \cdot T_{დწ}^{\beta} \cdot \eta_{\beta} \right] + \left[R'_2 \frac{\pi d_{კვ}^2}{4} \cdot X'_3 \cdot C_{კვ} \cdot \gamma_{კვ} \cdot T_{დწ} / 8 \right]$$

12. მიღებულია არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას საჭირო დენის საანგარიშო გამოსახულება. შემოთავაზებული საანგარიშო სქემის გამოყენებით შემუშავებულია არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში არალითონური მასალების გადადნობისათვის საჭირო დენის საანგარიშო მათემატიკური გამოსახულება. ამ შემთხვევაში ელექტროდში თბური დანაკარგების შემცირების გამო შემცირებულია გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდე.

თავი 4

4. უძრავ კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშების მაგალითები

უძრავ კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისათვის განსაზღვრული იყო სასარგებლოდ დახარჯული სითბოს საანგარიშო გამოსახულება (3.99)

$$Q_{sb} = Q_{\mathcal{X}}^{\mathcal{F}} - Q_{\mathcal{J}}^{\mathcal{X}} - Q_{\mathcal{F}}^{\mathcal{X}\mathcal{J}} \quad (4.1)$$

წიდის აბაზანაში I დენის გავლით გამოყოფილი ჯოულის სითბოს საანგარიშოდ მიღებული იყო გამოსახულება:

$$Q_{\mathcal{X}}^{\mathcal{F}} = \sigma(d'_{\mathcal{J}\mathcal{R}})^2 / 4 \cdot h_{\mathcal{F}} \cdot C_{\mathcal{F}} \cdot \gamma_{\mathcal{F}} \cdot T_{\mathcal{დნ}}^{\mathcal{წიდ}} \quad (4.2)$$

უძრავ კრისტალიზატორში გადასადნობი ელექტროდის გაცხელებაზე დახარჯული სითბო (წიდის აბაზანიდან და ელექტროდში დენის გავლით გამოყოფილი სითბო)

$$Q_{\mathcal{J}}^{\mathcal{X}} = R'_2 (\sigma d_{\mathcal{J}\mathcal{დ1}}^2 / 4) X'_3 \cdot C_{\mathcal{J}\mathcal{დ1}} \cdot \gamma_{\mathcal{J}\mathcal{დ1}} \cdot T_{\mathcal{დნ}} / 8 \quad (4.3)$$

უძრავი კრისტალიზატორის კედლიდან გაგრილებით წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბო საანგარიშოდ მიღებული იყო გამოსახულება:

$$Q_{\mathcal{X}}^{\mathcal{F}} = \pi(d'_{\mathcal{J}\mathcal{R}})^2 / 4 \cdot h_{\mathcal{F}} \cdot C_{\mathcal{F}} \cdot \gamma_{\mathcal{F}} \cdot T_{\mathcal{დნ}}^{\mathcal{წიდ}} \cdot \eta_{\mathcal{F}} \quad (4.4)$$

(4.1)-ში შემავალი (4.2), (4.3) და (4.4) გამოსახულებით $Q_{\mathcal{X}}^{\mathcal{F}}, Q_{\mathcal{J}}^{\mathcal{X}}, Q_{\mathcal{F}}^{\mathcal{X}\mathcal{J}}$ - ცალკეული სითბოს სიდიდის განსაზღვრა აუცილებელია ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებისათვის შემოთავაზებული სქემით. მათი გაანგარიშება მოვახდინეთ კონკრეტული კრისტალიზატორისათვის, რომლებზეც ჩატარებული იქნა დნობები და პროცესში გაზომილი იყო დენის სიდიდეები [3,40,41,42,45]. შემოთავაზებული სქემებით გაანგარიშებული დენების შედარება მათ ექსპერიმენტულ მნიშვნელობასთან საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ დენის გაანგარიშების ცდომილებები. გარდა ამისა შემოთავაზებული სქემით გაანგარიშებული ცალკეული სითბოს პროცენტული შემადგენლობის საერთო წიდაში გამოყოფილ სითბოსთან შედარებით ცნობილ თბურ ბალანსის განტოლებასთან შესაძლებელი იქნება პირდაპირ ვიმსჯელოთ გაანგარიშების შემოთავაზებული მეთოდის შესახებ [44,45,46,47].

4.1. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშება $d_{კრ}=25,4$ სმ, $d_{გ}=12,7$ სმ.

შემოთავაზებული გაანგარიშების სქემის გამოყენებით მიღებულ ფორმულაში მნიშვნელობების ჩარჩოს შემდეგ ვლებულობთ წიდის აბაზანაში გამოყოფილ სითბოს:

$$Q_{გ} = k\pi(d'_{კრ})^2 \cdot 4 \cdot h_{გ} \cdot C_{გ} \cdot \gamma_{გ} \cdot T_{დნ}^{წ} = 0,6\pi(0,1776)^2 \cdot 4 \cdot 0,18 \cdot 1,78 \cdot 2700 \cdot 1773 \approx 22785,33$$

საანგარიშო გამოსახულებაში შემავალი წევრების კონკრეტული სიდიდეებია: კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი $k=0,6$.

კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრის საანგარიშო სიდიდე:

$$d'_{კრ} = \frac{d_{კრ}}{2} \cdot 1,4 = 0,127 \cdot 1,4 = 0,127 \cdot 1,4 = 0,1778 \text{ მ}$$

$$d_{გ} = \frac{d_{კრ}}{2} = 0,127 \text{ მ}$$

კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი: $d_{კრ}=0,254$ მ

წიდის აბაზანის სიმაღლე: $h_{გ}=0,18$ მ

წიდის სითბოტევადობის კოეფიციენტი: $C_{გ} = 1,78$ კჯ/(კგ·°K)

გამდნარი წიდის სიმკვრივე: $\gamma_{გ}=2700$ კმ/მ³

წიდის დნობის ტემპერატურა $T_{დნ}^{წ}=1773^{\circ}$ K

კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრის საანგარიშო სიდიდის დადგენისას გათვალისწინებული დნობადი ელექტროდიდან წიდაში გადადნობისას დენის ხაზების გაშლას აქვს ადგილი. კერძოდ, როგორც ჩატარებულმა ექსპერიმენტებმა აჩვენეს, ელექტრული ველის კვლევის შედეგად დადგენილია რომ წიდაში გამავალი დენით გამოყოფილი სითბოს მიერ მიღებული ცილინდრის ფუძის დიამეტრი $\approx 1,4$ -ჯერ მეტია დნობადი ელექტროდის დიამეტრზე.

$$d'_{კრ} = d_{გდ1} \cdot 1,4 = 0,127 \cdot 1,4 = 0,1778 \text{ მ}$$

მიღებულია, რომ $d_{გდ1} = 0,5d_{კრ}$ სიდიდეს.

4.2 დნობადი ელექტროდის გახურებაზე თბური დანაკარგები

შემოთავაზებული საანგარიშო სქემის მიხედვით დნობადი ელექტროდის გახურებაზე თბური დანაკარგების განსაზღვრისათვის მიღებული იყო დამოკიდებულება

$$Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} = m_1 m_2 (\sigma d_{\text{გდ1}}^2): 4 \cdot X'_3 \cdot C_{\text{გდ1}} \cdot \gamma_{\text{გდ1}} \cdot T'_{\text{დნ}}$$

დნობადი ელექტროდის გახურებაზე თბური დანაკარგები იანგარიშება კრისტალიზატორისათვის: რომლის შიგა დიამეტრი შეადგენდა:

$$d'_{\text{კრ}} = 0,254 \text{ მ-ს.}$$

კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი იყო: $k=0,5$

ამ შემთხვევაში დნობადი ელექტროდის დიამეტრი არის: $d_{\text{გდ1}} = 0,5 \cdot 0,254 \text{ მ} = 0,127 \text{ მ.}$

აღნიშნული პარამეტრების მქონე კრისტალიზატორში რეკომენდირებულია გადასადნობი ელექტროდის სიგრძე იყოს $l \approx 2 \text{ მ.}$ შესაბამისად შერჩეული საანგარიშო სქემის მიხედვით $x'_3 \approx 2$

გადასადნობი ელექტროდის მასალა წარმოადგენს ლეგირებულ ფოლადს, ამიტომ მისთვის დამახასიათებელი ფიზიკური პარამეტრებია:

$$\text{სითბოტევადობა: } c_{\text{გდ1}} = 0,67 \text{ კჯ/(კგ. } ^\circ\text{K)}$$

$$\text{სიმკვრივე } \gamma_{\text{გდ1}} = 7800 \text{ კგ/მ}^3$$

ელექტროწიდური გადადნობის პროცესი ხანგრძლივია, ამიტომ ტემპერატურა ელექტროდის მთელ სიგრძეზე ერთნაირია და შეადგენს 50°C ე.ი.

$$T = 50 + 273 = 323^\circ \text{ K}$$

გადასადნობ ელექტროდში დენის ზედაპირზე გამოდევნის ეფექტი ელექტროდის გახურებაზე მოქმედებს, რომელიც გათვალისწინებულია შემდეგი კოეფიციენტით, რომლის სიდიდე გაანგარიშებისას აიღება:

$$m_1 = 0,3$$

იგი დამოკიდებულია ელექტროდის დიამეტრზე, მის ზედაპირზე დენის გავლის შრის სისქეზე ($\delta_{\text{გ}}$).

ელექტროდში გამოყოფილი სითბო, როგორც ჩვენმა კვლევებმა აჩვენა,

დამოკიდებულია ელექტროდის და წიდის აქტიურ წინაღობაზე. მისი გავლენის გათვალისწინება შესაძლებელია ე.წ. წინააღმდეგობათა თანაფარდობის კოეფიციენტით:

$$m_2=0,2 \quad Q_{\rho}^{\lambda} = 0,3 \cdot 0,2 \cdot 0,127^2 \cdot \pi/2 \cdot 2 \cdot 0,67 \cdot 323 \cdot 7800 \approx 2565 \text{ კჯ}$$

4.3. უძრავი კრისტალიზატორის შიგა კედლიდან, გაგრილებით, წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს გაანგარიშების მაგალითი

შემოთავაზებული სანგარიშო სქემის მიხედვით კრისტალიზატორის შიგა კედლით წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბოს, მიღებული სანგარიშო ფორმულაში სათანადო სიდიდეების ჩასმით ვღებულობთ:

$$Q_{\rho}^{\lambda} = m_{\rho} \pi x_2 (d_{\rho} + x_2) h_{\rho} \cdot C_{cu} \cdot m_{\gamma} \cdot \gamma_{\rho} \cdot T_{\rho} = 0,4\pi \cdot 0,2(0,1524 + 0,2) \cdot 0,18 \cdot 0,38 \cdot 2835 \cdot 573 \approx 9835 \text{ კჯ}$$

დნობადი ელექტროდის დიამეტრის სიდიდედ მიღებულია კრისტალიზატორის დიამეტრის d_{ρ} ნახევრის ტოლად.

$$d_{\rho} = d_{\rho} \cdot K = 0,254 \cdot 0,6 = 0,1524 \text{ მ}$$

$$\text{წიდის აბაზანის სიმაღლე კრისტალიზატორში შეადგენს: } h_{\rho} = 0,18 \text{ მ.}$$

$$\text{სიმკვრივე } \gamma_{\rho} = 2700 \text{ კმ/მ}^3 \quad \gamma_{\rho} = 1,05\gamma = 2835 \text{ კმ/მ}^3$$

კრისტალიზატორის კედლის დასაშვები საშუალო ტემპერატურა:

$$T_{\rho} = 300 + 273 = 573 \text{ K}$$

$$\text{კრისტალიზატორის კედლის მასალის სითბოტევადობა: } C_{\rho} = 0,38 \text{ კჯ/კგ } ^{\circ}\text{K}$$

როგორც წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს სანგარიშო ფორმულაში იყო აღებული, წიდის აბაზანის მოცულობა ე.წ. ცილინდრის ფუძის დიამეტრი მეტია ვიდრე დნობადი ელექტროდის დიამეტრი. შესაბამისად შემცირებულია გაგრილების რგოლის სისქე x_2 , რასაც ითვალისწინებს. კოეფიციენტი $m_3=0,4$, $m_{\gamma} = 1,05$ არაერთგვაროვნების

კოეფიციენტი, იგულისხმება, რომ $Q_{\text{წ}}^{\text{პპ}}$ სითბოს ართმევის x_2 -ს არეში შედის გამდნარი წიდა, გაგრილების წყალი და კრისტალიზატორის კედელი.

$m_{\gamma} = 1,05$ სიდიდის შესაბამისი x_2 არის საშუალო ტემპერატურა შეადგენს 573°K . იგულისხმება, რომ კრისტალიზატორი დამზადებულია სპილენძისაგან. ამავე დროს, მიღებულია დაშვება, რომ კრისტალიზატორის კედლის ფურცლის გახურება დასაშვებია ტემპერატურამდე, რომელზედაც სპილენძის კედელზე მოქმედი მექანიკური და ელექტრომაგნიტური ძალებით გამოწვეული დატვირთვამ არ უნდა გამოიწვიოს მისი დეფორმაცია.

$$\text{ყოველივე ზემოთ აღნიშნულის გათვალისწინებით შერჩეული იქნა } m_{\gamma} \approx \frac{T_{\text{დწ}}^{\text{Cu}}}{T_{\text{კკ}}} \approx 1,05$$

სადაც $T_{\text{დწ}}^{\text{Cu}}$ - სპილენძის დნობის ტემპერატურაა;

$T_{\text{კკ}}$ - კრისტალიზატორის კედლის ტემპერატურაა;

რომელზედაც პრაქტიკულად გამორიცხებულია კრისტალიზატორის კედლის დეფორმაცია.

კრისტალიზატორის შიგა კედლის სხვა მასალისაგან დამზადების შემთხვევაში წილის აბაზანიდან ართმეული სითბოს გასაანგარიშებლად m_{γ} -ს სიდიდე შეირჩევა, შესაბამისად წაყენებული მოთხოვნებისა, ექსპერიმენტულად.

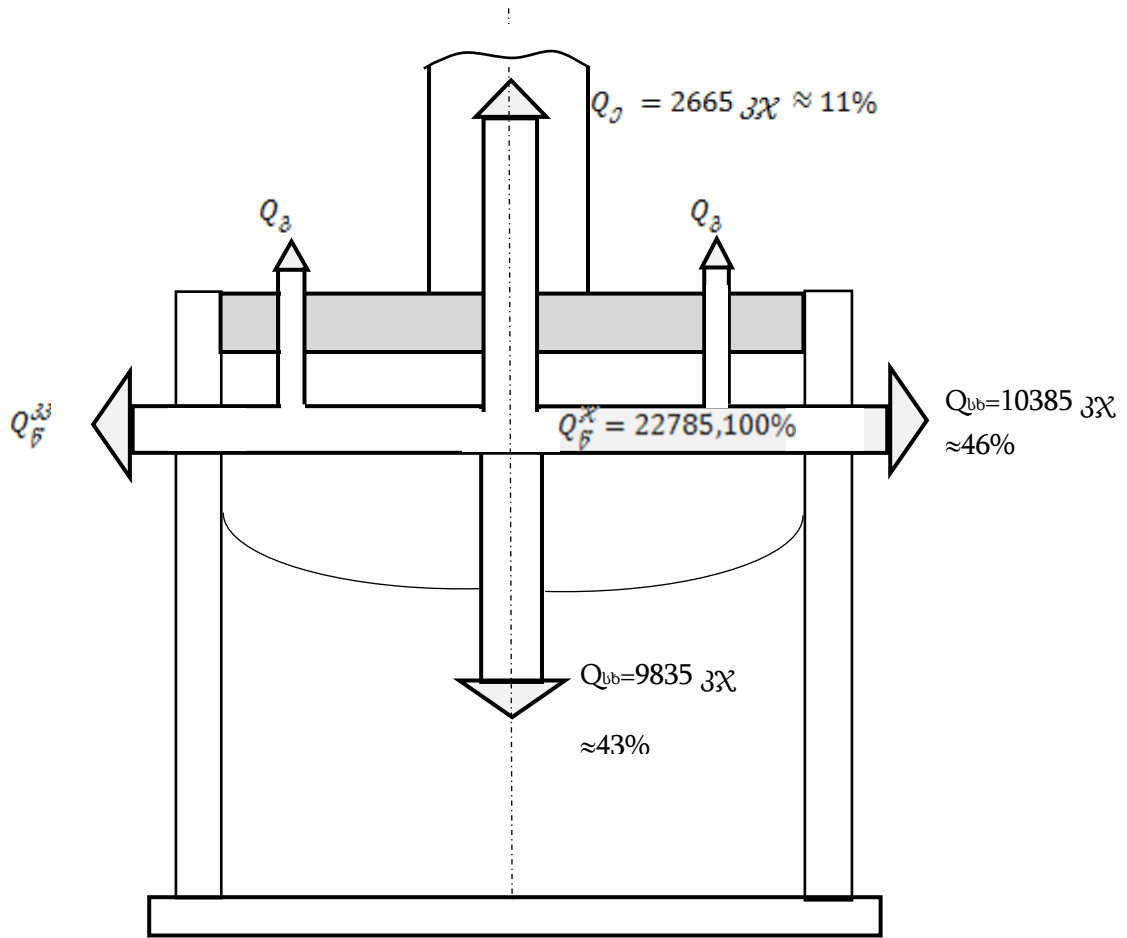
ელექტროწიდური გადადნობის თბური ბალანსის განტოლებაში შემავალი ცალკეული წევრების $Q_{\text{კ}}, Q_{\text{წ}}^{\text{პპ}}, Q_{\text{წ}}^{\text{კ}}$ მნიშვნელობების განსაზღვრის შემდეგ შესაძლებელია წილის აბაზანიდან სხმულზე გადაცემული სითბო

$$Q_{16} = Q_{\text{წ}}^{\text{კ}} - Q_{\text{წ}}^{\text{კ}} - Q_{\text{წ}}^{\text{პპ}} = 22785 - 9835 - 2565 \approx 10385 \text{ კჯ}$$

მოყვანილი გაანგარიშებების საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ 25,4 სმ. შიგა დიამეტრის მქონე კრისტალიზატორში ლითონების ელექტროწიდური გადაადგილებისას დენის გავლით წილის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო $Q_{\text{წ}}^{\text{კ}} = 22785$ კჯ-ს, კრისტალიზატორის შიგა კედლიდან გაგრილების სისტემის მოქმედების შედეგად ართმეული სითბოს რაოდენობა

$$Q_{\text{წ}}^{\text{პპ}} = 9835 \text{ კჯ}$$

$$\text{დნობადი ელექტროდის მიერ გაცემული სითბო კი - } Q_{\text{წ}}^{\text{კ}} = 2565 \text{ კჯ}$$



ნახ. 4.1. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ელექტროწიდური გადადნობის თბური ბალანსის სქემა შედგენილი გაანგარიშების მიხედვით.

ხოლო გადადნობის შემდეგ სხმულზე გადაცემული სითბო - $Q_{16}=10385$ კჯ
 თბური ბალანსის განტოლებით გაანგარიშებული სიდიდეები შემოთავაზებული
 საანგარიშო სქემების მიხედვით წარმოდგენილია ნახ.4.1-ზე.

ნახ.4.1-ს, ნახ.3.5-ს და ნახ.3.6-ს შედარებიდან ჩანს, რომ სასარგებლო სითბოს,
 თბური დანაკარგების და წიდაში გამოყოფილი სითბოთა პროცენტული სიდიდეები
 პრაქტიკულად ისეთივეა, როგორც მრავალი კვლევების ანალიზის საფუძველზეა
 წარმოდგენილი ნახ.3.6-ზე. აღნიშნული საშუალებას იძლევა დავასკვნათ, რომ
 გაანგარიშების შემოთავაზებული სქემებით მიღებული გამოსახულებით შეიძლება
 გათვლილი იქნას თბური პროცესები ელექტროწიდური გადადნობისას.

იგივე გაანგარიშებები შესულებული იქნა სხვადასხვა ზომის
 კრისტალიზატორებისათვისაც (მონაცემები მოყვანილია დანართ 2-ში). გაანგარიშების

საფუძველზე წიდის აბაზანაში გამოყოფილი ჯოჯის სითბოსთვის გვექნება:

$$Q_{\text{წ}}^{\text{წ}} = Q_{\text{დნ}} + Q_{\text{გ}}^{\text{წ}} - Q_{\text{წ}}^{\text{წ}} = 9835 + 2565 + 10385 = 22785 \text{ კჯ}$$

წიდის აბაზანაში გამოყოფილი $Q_{\text{წ}}^{\text{წ}}$ სითბო მასში გამავალი დენის კვადრატის პროპორციულია: $Q_{\text{წ}}^{\text{წ}} = 0,24I^2 R_{\text{წ}} t$

იგი დამოკიდებულია, აგრეთვე წიდის წინააღმდეგ და წიდის აბაზანაში დენის გავლის ხანგრძლივობაზე, ე.ი.

$$0,24I^2 R_{\text{წ}} t = 22785 \text{ კჯ}$$

გამდნარი წიდის აბაზანის წინააღმდეგ $R_{\text{წ}}$ დამოკიდებულია წიდის შემადგენლობაზე და ტემპერატურაზე.

$50CaF_2 + 20CaO + 30Al_2O_3$ შემადგენლობის გამდნარი წიდის წინააღმდეგ 1773°K ტემპერატურაზე ე.ი. როცა გადასადნობია აღნიშნული დნობის ტემპერატურის მქონე ფოლადის გადასადნობი ელექტროდი აიღება:

$$R_{\text{წ}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ ომი}$$

მაშინ დროის ერთეულში ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში გამოყოფილი სითბო

$$0,24I^2 R_{\text{წ}} t = 22785 \text{ კჯ}$$

აქედან გადადნობისათვის საჭირო დენი

$$I = \sqrt{\frac{22785}{0,24 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} \approx 5,625 \text{ კა}$$

ამრიგად, უძრავი სქემით გადადნობისას სპილენძის შიგა კედლის და 25,4 სმ შიგა დიამეტრის მქონე კრისტალიზატორიში პროცესის სტაბილურ პირობებში წარმართვისათვის საჭიროა 5,625 კა დენი.

4.4. ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშების ცდომილება

შემოთავაზებული დენით გაანგარიშებული იყო ელექტროდური გადადნობისათვის საჭირო დენისათვის ექვსი სხვადასხვა მაგალითი. სხვადასხვა დიამეტრისა და ფორმის კრისტალიზატორისათვის (დანართი 1). გაანგარიშების შედეგები მოცემულია ცხრილში 4.1, ასევე ცხრილში მოყვანილია ელექტროწიდური გადადნობის რეალურ ექსპერიმენტებში შესაბამისი ზომის მქონე კრისტალიზატორებში წიდის აბაზანაში გამავალი გაზომილი დენის მნიშვნელობები. ამ მონაცემების მიხედვით გამოთვლილი იქნა დენის გაანგარიშების აბსოლუტური ცდომილება, საშუალო აბსოლუტური ცდომილება, ფარდობითი და საშუალო ფარდობით ცდომილებები. გაანგარიშების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 4.2-ში.

ცხრილი.4.1

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

N	კრისტალიზატორის შიდა დიამეტრი, სმ	გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი, სმ	გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებული მნიშვნელობები,	გადადნობისათვის საჭირო დენის ექსპერიმენტული მნიშვნელობები,	ელექტროწიდური გადადნობისას, წიდის აბაზანაში გამოყოფილი
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 კრისტალიზატორიში ელექტროწიდური გადადნობისას წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო.

ცხრილი 4.2-დან ჩანს, რომ შემოთავაზებული სქემით ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებული სიდიდეების საშუალო ფარდობითი ცდომილება არ აღემატება 2,9%-ს, რაც იმაზე მიუთითებს, რომ დენის გაანგარიშების შემოთავაზებული სქემა შეიძლება გამოყენებული იქნას ელექტროწიდური გადადნობის კონკრეტული ტექნოლოგიის დამუშავებისას გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებისათვის:

ცხრილი 4.2.

შემოთავაზებული სქემით ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო გაანგარიშებული დენების ცდომილებები

	I_i , კა	$(I_i)_{საანგარო}$, კა	ξ	$\bar{\xi}$	ε_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	-
Σ			1,411		0,1759	

ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის ჩვენს მიერ შემოთავაზებული სქემის მიხედვით გაანგარიშებული გადადნობისათვის საჭირო დენის მნიშვნელობების შედარებისათვის სხვადასხვა ავტორების [45,46,47,48] მიერ ექსპერიმენტულად, გადადნობის რეალურ პირობებში გაზომილი ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის შედარებისათვის (ცხრილი 4.2) განსაზღვრული იქნა:

-აბსოლუტური ცდომილება:

$$\xi = [I_i - (I_i)_{საანგარიშო}]$$

-საშუალო აბსოლიტური ცდომილება:

$$\bar{\xi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [I_i - (I_i)_{\text{საანგარიშო}}]$$

-ფარდობითი ცდომილება:

$$\varepsilon_i = \frac{I_i - (I_i)_{\text{საანგარიშო}}}{I_i} \cdot 100\%$$

-საშუალო ფარდობითი ცდომილება:

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{I_i - (I_i)_{\text{საანგარიშო}}}{I_i} \cdot 100\%$$

სადაც: I_i გადადნობისათვის საჭირო დენის მნიშვნელობებია გაზომილი ელექტროწიდური გადადნობის რეალურ პირობებში;

$(I_i)_{\text{საანგარიშო}}$ შემოთავაზებული გაანგარიშების მეთოდით განსაზღვრული დენების მნიშვნელობა;

i - ექსპერიმენტის რიცხვია $i = 1; 2, \dots, n$ ($n = 6$)

გაზომვის და გაანგარიშების შედეგები მოცემულია ცხრილში 4.2-ში, სადაც ექსპერიმენტებში გაზომილი დენები მიჩნეულია დენის რეალურ მნიშვნელობად.

ასეთ დაბალი ცდომილება გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშებისა იმაზე მიუთითებს, რომ მის საანგარიშო სქემაში აქედან გამომდინარე მიღებული დენის საანგარიშო მათემატიკური გამოსახულებაში შემავალი წევრები გამოირჩევიან მაღალი ინფორმაციულობით დენის შესახებ. მაგალითად, ასეთი პარამეტრები შეიძლება იყოს კრისტალიზატორის დიამეტრი, წიდის აბაზანის სიმაღლე, წიდის აბაზანის მოცულობა და სხვა. ამ პარამეტრების გადადნობის დენტან დაკავშირებული მათემატიკური გამოსახულება, მაღალი კოორელაციური კავშირის შემთხვევაში, შეიძლება გამოყენებული იქნას წინასწარ ცნობილი ტექნოლოგიური პარამეტრის ან პარამეტრების მიხედვით, ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდის შესარჩევად.

ამ მიზნით ჩვენს მიერ ჩატარებული იქნა რეგრესიული ანალიზი [48,49,50] კერძოდ, გამოკვლეული იქნა კოორელაციური კავშირი კრისტალიზატორის ზოგიერთ პარამეტრსა და ამ კრისტალიზატორში მიმდინარე ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის. გამოკვლეული იქნა კოორელაციური კავშირი კრისტალიზატორის შიდა დიამეტრსა და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის. აღნიშნულ პარამეტრებს შორის კოორელაციური კავშირის არსებობის საფუძველს

იძლევა ის, რომ კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი განსაზღვრავს წიდის აბაზანის ზომებს და პროცესის მიმდინარეობისას თბური დანაკარგებს, რაც პირდაპირ დაკავშირებულია წიდის აბაზანაში გამოყოფილ ე.წ. ჯოულის სითბოსთან.

4.5. დენის გაანგარიშების შედეგების რეგრესიული ანალიზი

კრისტალიზატორის შიდა დიამეტრსა და წიდაში გამოყოფილ ჯოულის სითბოს წყაროს დენს შორის კოორელაციური კავშირის კვლევის მონაცემები და გაანგარიშებები მოცემულია ცხრილში 4.3-ში.

ამ ცხრილის მონაცემების მიხედვით განისაზღვრება:

$$\beta = \frac{m \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{m \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (4.1)$$

კოორელაციის კოეფიციენტი

$$r = \beta \sqrt{\frac{m \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{m \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (4.2)$$

რეგრესიის თავისუფალი წევრი

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \beta \sum_{i=1}^n x_i}{m} \quad (4.3)$$

გამოთვლილი β კოეფიციენტის და α თავისუფალი წევრის გათვალისწინებით რეგრესიის განტოლება საკვლევ სიდიდეებს შორის მიიღებს სახეს:

$$y = \alpha + \beta x \quad (4.4)$$

ცხრილ 4.3-ს სიდიდეების ჩასმით მივიღებთ რეგრესიის კოეფიციენტს:

$$\beta = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{6 \cdot 14,0632 - 43 \cdot 1,89}{6 \cdot 318,82 - 43^2} = \frac{84,3792 - 81,27}{1912,92 - 1849} = \frac{3,1092}{63,92} = 0,048642$$

კოორელაციის კავშირის კოეფიციენტი

$$\begin{aligned} r &= \beta \sqrt{\frac{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{m \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} = \beta \sqrt{\frac{6 \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{6 \cdot 0,640492 - 1,89^2}} = \beta \sqrt{\frac{63,92}{3,842952 - 3,5721}} = \beta \sqrt{\frac{63,92}{0,270852}} \\ &= \beta \sqrt{235,99604} = 0,048642 \cdot 15,362162 = 0,75 \end{aligned}$$

რეგრესიის თავისუფალი წევრი

$$\alpha = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{m} = \frac{1,89 - 0,048642}{6} = \frac{1,89 - 2,091606}{6} = \frac{0,201606}{6} = -0,033601$$

კრისტალიზატორის შიდა კედლის დიამეტრსა და გადადნობის დენს შორის კავშირის ამსახველი რეგრესიის განტოლებას აქვს სახე:

$$y = 0,0336 + 0,0486x \quad (4.5)$$

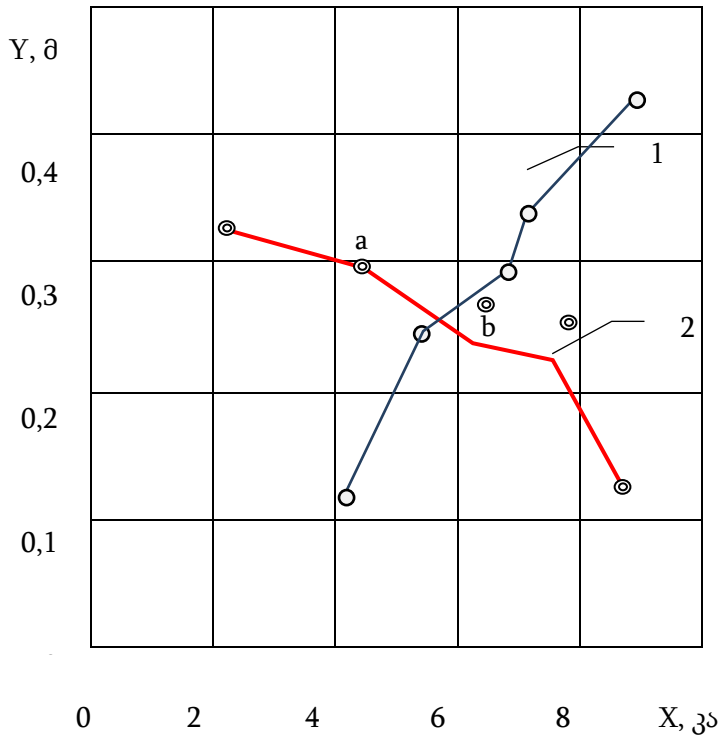
ცხრილი 4.3

მონაცემები და გაანგარიშებები კრისტალიზატორის შიდა დიამეტრსა და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის დამოკიდებულების ასაგებად.

y -არის კრისტალიზატორის დიამეტრი

x -არის გადადნობის დენი $y = f(x)$

	x	y	xy	x^2	y^2	შენიშვნები
1	5,6	0,254	1,4224	31,36	0,064516	წრიული ფორმის კრისტალიზატორი
2	6,5	0,320	2,0800	42,25	0,1024	
3	7,2	0,360	2,5920	51,84	0,1296	
4	9,7	0,480	4,656	94,06	0,2304	
5	6,2	0,250	1,5500	38,44	0,0625	პრიზმის ფორმის კრისტალიზატორი
6	7,8	0,226	1,7628	60,84	0,051076	
Σ	43	1,89	14,0632	318,82	0,640492	



ნახ. 4.2 ემპირიული დამოკიდებულება კრისტალიზატორის დიამეტრსა (y) და გადადნობისათვის საჭირო დენს (x) შორის

ცხრილი 4.3-ს მონაცემებით კრისტალიზატორის შიდა დიამეტრსა და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის დამოკიდებულების ანალიზი აჩვენებს, რომ მათ შორის კოორელაციური კავშირი არსებობს, მაგრამ იგი არ აღემატება $r = 0,75$ -ს. შედარებით დაბალი კოორელაციური კავშირი დაკავშირებულია კრისტალიზატორის სხვადასხვა ფორმასთან. წრიული ფორმის კრისტალიზატორებში (ნახ.4.2, მრუდი 1), როგორც ემპირიული დამოკიდებულებიდან (ტეხილი ხაზი 1) ჩანს აღნიშნული კოორელაციური კავშირი, მოსალოდნელია იქნება მაღალი თუ ემპირიული დამოკიდებულების აგებისას გამოვრიცხავთ a, b წერტილების მონაცემებს (როგორც ეს ნახ. 4.2-ზეა ნაჩვენები). თანაც მოსალოდნელია, რომ შესაბამისი თეორიული დამოკიდებულების დახრის კუთხე მნიშვნელოვნად განსხვავებული იქნება ერთმანეთისაგან. აღნიშნული ვარაუდი დასტურდება შემდეგ კვლევებში.

ცხრილი 4.4.-ში მოყვანილი მონაცემებითა და გაანგარიშებებით გამოვლენილია

მაღალი კორელაციური კავშირი ($r = 0,968$) ერთი და იმავე შიდა დიამეტრის (0,25 სმ) მქონე წრიული კრისტალიზატორისათვის გადადნობისათვის საჭირო დენსა და წიდის აბაზანის გამყარებული მასის წონას შორის (გამყარების შემდეგ ე.წ. წიდის ქუდის წონას შორის).

ცხრილი 4.4.

მონაცემები და გაანგარიშებები ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის განზოგადებულ პარამეტრებსა და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის.

N	y_1 , კგ	y_2 , კგ	y , გ	x' კა	xy	x^2	y^2
1	0,254	12,99	3,3	4,1	13,53	16,81	10,89
2	0,254	11,81	3,0	5,8	17,4	33,64	9,00
3	0,254	11,02	2,8	6,5	18,2	42,25	7,84
4	0,254	9,4	2,4	7,9	18,96	62,41	5,76
5	0,254	6,7	1,7	11,9	20,23	141,61	2,89
Σ	-	-	13,2	36,2	88,32	296,72	36,38

$$y_3 = y_{13} \cdot y_{2f}$$

y_{13} - კრისტალიზატორის შიდა დიამეტრი

y_{2f} - წიდის აბაზანის გამყარებული მასის წონა

ცხრილი 4.4- ის მიხედვით გამოთვლილია:

რეგრესიის კოეფიციენტი

$$\beta = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{5 \cdot 88,32 - 36,2 \cdot 13,2}{5 \cdot 296,72 - 36,2^2} = \frac{441,6 - 477,84}{1483 - 1310,44} = \frac{-36,24}{172,56} = -0,204$$

კორელაციური კავშირის კოეფიციენტი

$$r = \beta \sqrt{\frac{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{m \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} = \beta \sqrt{\frac{172,56}{5 \cdot 36,38 - 13,2^2}} = \beta \sqrt{\frac{172,56}{181,9 - 174,24}} = 0,204 \sqrt{\frac{172,56}{7,66}} = 0,968$$

რეგრესიის თავისუფალი წევრი

$$\alpha = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{m} = \frac{13,2 - 0,204 \cdot 36,2}{5} = \frac{13,2 + 7,3848}{5} = 4,11696$$

მიღებული რეგრესიის განტოლებას აქვს სახე:

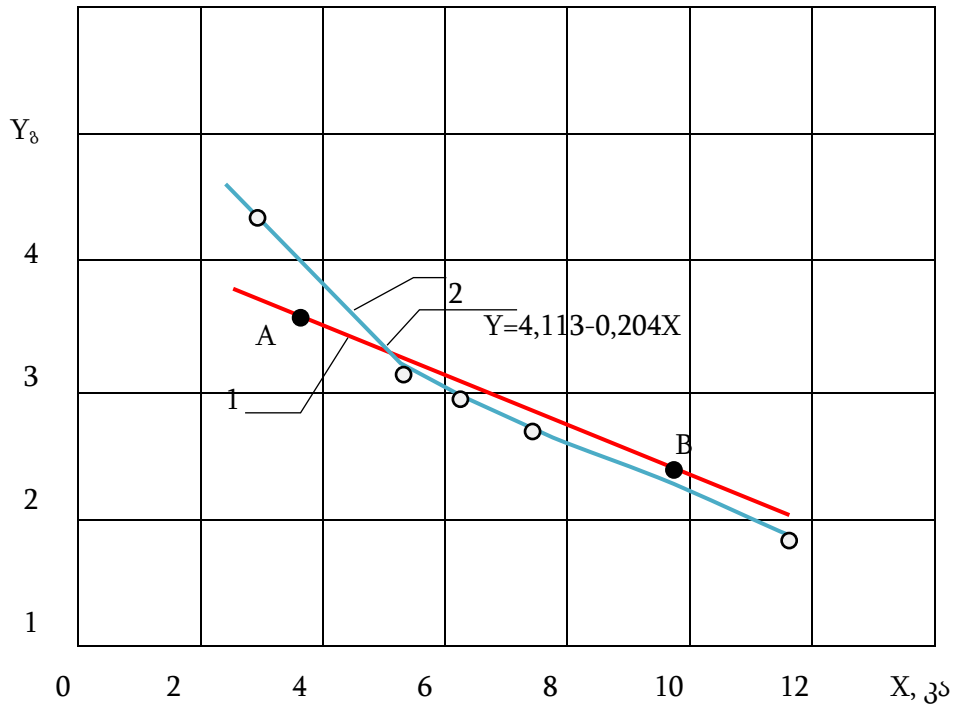
$$y = 4,11696 - 0,204x$$

x - გადადნობისათვის საჭირო დენი.

იგი აღებულია $A(3; 3,4)$ და $B(3,3; 4)$ წერტილების მიხედვით:

$$y_A = 4,11696 - 0,816 = 3,3 \quad A(3; 3,4)$$

$$y_B = 4,11696 - 2,04 = 2,08 \quad B(3,3; 4)$$



ნახ.4.3. დამოკიდებულება ელექტროწილური გადადნობის პროცესის განმაზოგადებელ პარამეტრსა და გადადნობის პროცესისათვის საჭირო დენს შორის, წრიული ფორმის კრისტალიზატორისათვის:

1-ემპირიული დამოკიდებულება.

2-თეორიული დამოკიდებულება.

x – გადადნობისათვის საჭირო დენი;

y_1 – კრისტალიზატორის შიდა დიამეტრი;

y_2 – წილის ქუდის წონა; $y_გ = y_1 \cdot y_2$

ცხრილი 4.5

პრიზმული კრისტალიზატორისათვის განმაზოგადებელ პარამეტრსა და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის კოორელაციური კავშირის კვლევის მონაცემები

N	y_{1j}	x_{2j}	y_{3j}	y_j	x	xy	x^2	y^2
1	0,04	0,0139	7,4	0,4	6	2,4	36	0,16
2	0,0399	0,0198	7,4	0,44	6,3	2,772	39,69	0,1936
3	0,04	0,0139	9,4	0,51	6,4	3,264	40,96	0,2601
4	0,0506	0,0256	9,4	0,72	7,6	5,472	57,76	0,5184
5	0,0399	0,0202	9,4	0,56	7,1	3,976	50,41	0,3136
Σ	-	-	-	2,63	33,4	17,884	224,82	1,4457

ცხრილ 4.5-ის მონაცემების მიხედვით ჩატარებული გაანგარიშებები: რეგრესიის განტოლების კოეფიციენტი

$$\beta = \frac{m \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{5 \cdot 17,884 - 33,4 \cdot 2,63}{5 \cdot 224,82 - 33,4^2} = \frac{89,42 - 87,842}{1124,1 - 1115,56} = \frac{1,578}{8,54} = 0,1847775$$

კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტი:

$$r = \beta \sqrt{\frac{m \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{m \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} = \beta \sqrt{\frac{8,54}{5 \cdot 1,4457 - 2,63^2}} = \beta \sqrt{\frac{8,54}{7,2285 - 6,9169}} = \beta \sqrt{\frac{8,54}{0,3116}} = 0,967$$

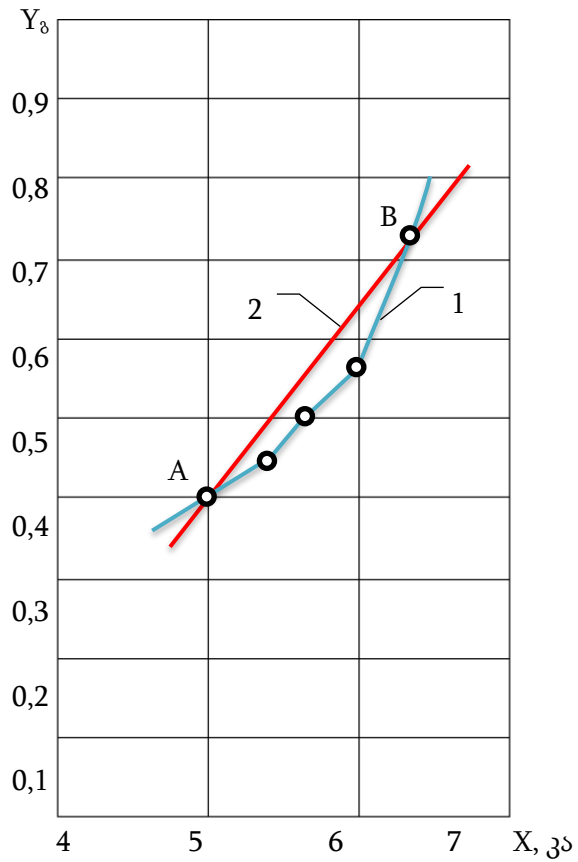
რეგრესიის თავისუფალი წევრი:

$$\alpha = \frac{\sum y_i - \beta \sum x_i}{m} = \frac{2,63 - 33,4 \cdot 0,1847775}{5} = \frac{2,63 - 6,17}{5} = -0,708$$

რეგრესიის 5 მიღებული განტოლება

$$y_j = -0,708 + 0,185x_i \quad r = 0,967$$

რეგრესიის განტოლება აგებულია A და B წერტილების მიხედვით A(4; 0,4) , B(7,5; 0,75)



ნახ.4.4 დამოკიდებულება განმაზოგადებელ პარამეტრსა და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის

1-ემპირიული დამოკიდებულება

2-თეორიული დამოკიდებულება

$$y_{\beta} = (y_{1\beta} + y_{2\beta}) \cdot y_{3\beta}$$

$$x = I_{კა} \quad y_{\beta} = f(I_{კა})$$

4.6. ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის განმაზოგადებელი პარამეტრი

ცხრილი 4.3-ს მონაცემებმა და მის მიხედვით აგებულმა ემპირიულმა დამოკიდებულებამ კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრსა და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის აჩვენა, რომ აღნიშნულ სიდიდეებს შორის კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტი მოსალოდნელია იყოს დაბალი. კერძოდ გაანგარიშებამ აჩვენა, რომ კრისტალიზატორის დიამეტრსა, როგორც ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის გამომავალი პარამეტრისა და გადადნობის დენს შორის კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტმა შეადგინა 0,75.

ნახ.4.3-ზე a, b წერტილების შესაბამისი ექსპერიმენტული მონაცემებს მკვეთრად განსხვავებული მდებარეობა უკავია აგებულ ექსპერიმენტული მონაცემების ველში. რაც იმაზე მიუთითებს, რომ პრიზმული და წრიული ფორმის კრისტალიზატორისათვის არ შეიძლება პროცესის გამომავალი პარამეტრი იყოს კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ პრიზმული ფორმის კრისტალიზატორისათვის, შიგა დიამეტრი წარმოადგენდა მისი ფუძის ფართის შესაბამისი წრის დიამეტრს.

ცხრილ 4.4-ის და ნახ. 4.2-ის ანალიზი აჩვენებს, რომ ერთდროულად ორი პარამეტრის ნამრავლის სახით თუ იქნება წარამოდგენილი ე.წ. პროცესის განმაზოგადებელი პარამეტრი:

$$y_3 = y_1 \cdot y_2$$

მაშინ, კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტი პროცესის განმაზოგადებელ პარამეტრსა და გადასადნობ დენს შორის მაღალია და შეადგენს:

$$k = 0,968$$

(4.5) გამოსახულებაში y_1 არის კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი, ხოლო y_2 არის წიდის აბაზანის გამყარებული წიდის მასა. ჩვენმა კვლევებმა აჩვენეს აგრეთვე, რომ ახალი ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის განმაზოგადებელი პარამეტრი

$$y_3 = (y_{1j} + y_{2j}) \cdot y_{3f}$$

იმყოფება მაღალ მაღალკორელიურ კავშირში გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდესთან. კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტი შეადგენს $r = 0,967$ -ს. აღნიშნულ

სიდიდეებს შორის დამოკიდებულება წარმოდგენილია შემდეგი სახით:

$$y_g = -0,708 + 0,185x$$

რეგრესიის განტოლება აგებულია A და B წერტილების მიხედვით: A(6; 0,4), B(7,5; 0,75)

სადაც: y_{1g} - კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრია ან მისი ეფექტური სიდიდე პრიზმული ფორმის კრისტალიზატორისათვის;

y_{2g} - წარმოდგენს გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრს ან მისი ეფექტური სიდიდე პრიზმული ფორმის კრისტალიზატორისათვის;

y_{3g} - არის წიდის აბაზანის მასა გამყარების შემდეგ.

კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტის სიდიდე პრაქტიკულად არაა დამოკიდებული კრისტალიზატორის ფორმაზე.

ამრიგად, კრისტალიზატორის და გადადნობის პროცესის პარამეტრების საშუალებით მიღებული (ნახ.4.4) დამოკიდებულებით, შესაძლებელია გამარტივებულად განსაზღვრულ იქნას საჭირო დენის სიდიდე, როგორც ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის ერთ-ერთი ძირითადი პარამეტრი.

დასკვნა IV თავის მიმართ

1. უძრავი სქემით ელექტროწიდური გადადნობის კონკრეტული კრისტალიზატორისათვის შემოთავაზებული საანგარიშო სქემის გამოყენებით, გაანგარიშებული იქნა: დნობად ელექტროდში გამოყოფილი სითბო $Q_{\text{გ}}^{\text{X}}$, წიდის აბაზანაში დენის გავლით გამოყოფილი ჯოჯის სითბო $Q_{\text{წ}}^{\text{X}}$, და წიდის აბაზანიდან გაგრილების სისტემის მიერ ართმეული სითბო $Q_{\text{წ}}^{\text{პპ}}$. შედეგად მიღებული თბური ბალანსის განტოლებაში წიდაში გამოყოფილი მთლიანი სითბოს პროცენტული გადანაწილების სურათი პრაქტიკულად ემთხვევა სხვადასხვა მკვლევარების მიერ მიღებული თბური ბალანსის განაწილების აღიარებულ სურათს $Q_{\text{გ}}^{\text{X}}=11\%$; $Q_{\text{წ}}^{\text{პპ}}=46\%$; $Q_{16}=43\%$. რაც პირდაპირ

მიუთითებს, რომ სითბოს ცალკეული შემადგენელი ნაწილების გაანგარიშების შემოთავაზებული სქემა უზრუნველყოფს დამაკმაყოფილებელ სიზუსტეს.

2. კონკრეტული პარამეტრების მქონე კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის განგარიშებული მნიშვნელობა პრაქტიკულად ემთხვევა ამ კრისტალიზატორებში გადადნობის პროცესში გაზომილი დენის მნიშვნელობებს. საშუალო ფარდობითი ცდომილება შეადგენს 2,9%-ს.

3. შემუშავებული იქნა უძრავ კრისტალიზატორში ელექტროწიდური გადადნობის პროცესში განმაზოგადებელი გამომავალი პარამეტრი:

$$y_3 = (y_{1,3} + y_{2,3}) \cdot y_{3,3}$$

იგი წარმოადგენს კრისტალიზატორის და გადასადნობი ელექტროდების დიამეტრების ჯამი გამრავლებული წიდის აბაზანის მასაზე, რომელიც მიიღება აბაზანის გაგრილების შემდეგ. განმაზოგადებელი პარამეტრის და გადადნობისათვის საჭირო დენს შორის კოორელაციური კავშირის კოეფიციენტი, კრისტალიზატორის ფორმაზე არაა დამოკიდებული და შეადგენს 0,967-ს.

მიღებულია შესაბამისი მათემატიკური გამოსახულება, რომელიც საშუალებას იძლევა კრისტალიზატორის ცნობილი პარამეტრების მიხედვით განსაზღვრული იქნას გადადნობისათვის საჭირო დენის მნიშვნელობა.

ძირითადი შედეგები და ზოგადი 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 ორგანოზომილებიანი მოდელით კვლევამ აჩვენა:
 - დნობადი ელექტროდის წიდასთან 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 გაგრძელების 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 გამყარებული წიდის აბაზანის მასაზე.

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

გამოყენებული ლიტერატურა

1. 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
2. Б.И. Медовар, В.Л.Шевцов, Г.С.Маринский и др. Тепловые процессы при электролаковом переплаве/Под.ред. Б.И.Медовара-Киев: Наукова думка.1978-308 с.
3. Электрошлаковый переплав. Материалы IV международного симпозиума по процессам ЭСП (г.Токио, Япония), изд-во наук «Думка», Киев – 1975-372с.
4. Абдулах В.М., Демченко В.Ф., Стеренбоген Ю.А. Некоторые закономерности квазиравновесной теории кристаллизации.-В кн.: Математические методы в исследовании процессов специальной электрометаллургии. Л., 1976, с.155-160.
5. Авдонин Н.А., Волохонский Л.А., Иванова Г.Ф. и др. Расчет температурного поля при затвердевании в водоохлаждаемом кристаллизаторе.-Инж.физ.журн., 1970, 18, №1, с. 73-85.
6. Mendrykowski K., Poveromo J.J., Szerely J., Mitchell A. Heat transfer and the melting process in electroslag remilting: P. 1. The behavior of small eleqctrodes.-Metallurgical Trans., 1972, 3, p. 1761-1768.
7. Mitchell A., Joshi S., Cameron J. Electrode temperature gradients in the electroslag process.-Metallurgical Trans., 1971, 2, p. 561-567.
8. სილაგაძე ს.რ., ზივზივაძე ლ.ბ., ცქიფურიშვილი თ.ზ., აბესაძე შ.ა., როტორის მაგნიტური ნამზადის მიღების შესაძლებლობა არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორიში ლითონების ელექტროწიდური გადადნობით. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი. საერთაშორისო საინჟინრო აკადემია, თბილისი. 2019, ISSN 1512-0287. გვ.108-113.
9. Loscher B. Beeinflussung der Erstarrungsstruktur beim Elektroschlackeumschmelzen durch Sekundarkulung.-Neue Hutte, 1976, 2, S. 112-113.
10. Патон Б.Е., Медовар Б.И. Способ электрошлакового переплава расходуемых электродов и установка для осуществления способаю Пат.СССР во Франции

- №7218476.
11. Мелберг Н.О. Распределение температуры в шкале и металле при электрошлаковом переплаве шарикоподшипниковой стали.-электрошлаковый переплав, 1975б вып. 3,ю с.38-46.
 12. Bungart R. Diderich unda andere. Beitrag zur rechnerischen Abschätzung der Schmelzbadgeometrie beim Elektro-Schlackeumschmelzverfahren in Abhängigkeit von der Warmetn-und Abfuhrbedingungen.-DEW Techn.Ber., 1972,12,Н.3, S.157-173.
 13. Дж.Ф.Эллиот; М.Мольво Моделирование ЭШП Массачусетский Технический институт, Массачусетс,США,1975 с.89-100
 14. J.Yavomsky. Trans., AFS 1969; p.447
 15. Б.Д.Орлов, А.А.Чакалев и др. Технология и оборудование контактов, сварки, М., Машиностроение 1986,350 с.
 16. აკაკაურიძე, ლ.ზივზივაძე, თ.ცქიფურიშვილი, მ.შალამბერიძე. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორში გამავალი დენების განსაზღვრა და მათ სიდიდეებზე მოქმედი ფაქტორების კვლევა. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „მოამბე“. N3 ქუთაისი. 2014. გვ.82-86
 17. აკაკაურიძე, თ.ცქიფურიშვილი, მ.შალამბერიძე. ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას ელექტრული ველის კვლევა. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი. მესამე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია.“ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“. ქუთაისი.,2015წ., გვ.273-277
 18. 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.
 19. აკაკაურიძე, ნ.მარდალეიშვილი. ლ.ზივზივაძე, მ. შალამბერიძე., ელექტრული ველის კვლევა მათემატიკური მოდელით. Georgian Engineering News №2 (vol.82) 2017.გვ.25-29
 20. М.М.Клюев, В.Ш.Шпицберг. производство стали, изд-во «Сталь» Киев 1969, 68 с.

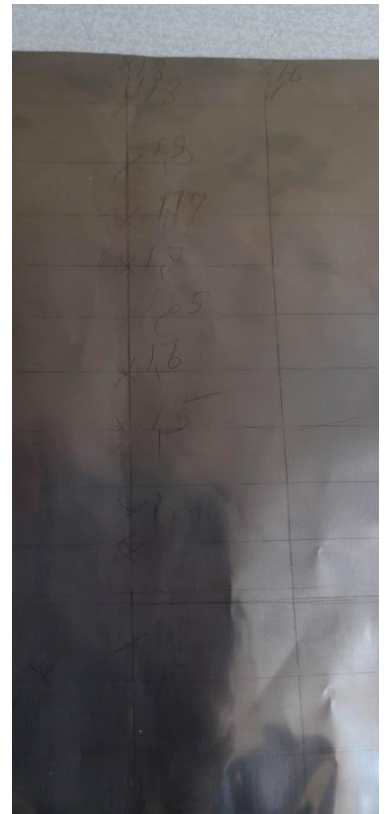
21. Дубко Д.А. Особенности капельного переноса металла электрода большого сечения.-Автомат. Сварка,1959. № 5.с.28-33.
22. Голиков И.Н. Дендритная ликвация в стали. М., Metallurgizdat, 1958. 270с.
23. Жмойдин Г.И. Кинетика рафинирования электродного металла шлаком.- В.кн.: Восстановление и рафинирование железа. М.,1968, 105-118.
24. Латашь Ю.В., Медовар Б.И. Электрошлаковый переплав. М., «Металлургия»,1970. 240 с.
25. Латашь Ю.В., Тягун-Белоус Г.С. Влияние состава шлака на плавление электрода большого сечения при электрошлаковом процессе.-Автомат. Сварка, 1958, №12, с.17-27.
26. Гельман А.С. Технология и оборудование контактов сварки. М.:Машиностроение, 1960. 368 с.
27. Глебов Л.В., Пескарев М.А. Расчет и конструирование машин контактной сварки. Л.: Энергоиздат, 1981. 423 с.
28. Львов Н.С., Гладков Э.А. Автоматика и автоматизация сварочных процессов. М.: Машиностроение, 1982. 301 с.
29. Патон Б.Е., Дебедев В.К. Электрооборудование для контактной сварки. М.: Машиностроение,1969, 440с.
30. В.В.Фролов теоретические основы сварки. М.: Высшая школа, 1970, 592 с.
31. Макара А.М., Мосендз Н.А., Тарасевич Н.И. и др. Определение интенсивности источников тепла при ведении электрошлакового процесса неплавящимся электродом.-Пробл. Спец. Электрометаллургии, 1975, вып. 2, с. 6-10.
32. Макарова А.К. Новые измерительные устройства и датчики для измерения температуры жидкого металла и твердых поверхностей.-Центр. НИИ информации черн. Metallurgiya, 1974, №22, с. 27-34.
33. Миронов Ю.М., Тарасов В.А., Аналитический расчет сопротивления и электрического поля электрошлаковых печей.- В кн.: Математические методы в исследовании процессов спецэлектрометаллургии., К., 1976, с. 63-72.
34. Никитин Ю.П., Сафоников А. Н. Поверхностные свойства сварочных флюсов.-Ер.

- Урал. Политехн. Ин-та, 1969, №126, с.43-47.
35. 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
 36. Максимович Б.И. Условия возникновения постоянной составляющей тока при электрошлаковом переплаве с водоохлаждаемых изложницах. – Автомат. Сварка, 1961, №4, с.13-15.
 37. Куделькин В.П., Филиппов С.Н., Ключев М.М. и др. Воздействие ультразвуковых колебаний на капельный перенос металла при ЭШП.-Изв. Вузов. Чер. Metallургия, 1969, №3, с.76-83.
 38. Иванова Г.Ф. Расчет температурных и электрических полей слитков большого диаметра при непременном режиме электрошлаковой плавки. Инж.-физ. Журн., 1972, 22, №4, с. 706-710.
 39. Кутателадзе С.С., «Теплопередача при конденсации и кипении», Машгиз. 1949 г. 320 стр.
 40. W.E.Duckworth & G.Hoyle. Electroslag Refining, Chapman & Hall. London. 1969.
 41. M.A.Maulvault & J.F.Elliott. Elec. Fur Conf. Proc. AIME, 1970,28,13.
 42. Jiang Z H. Electroslag metallurgy. Beijing: Science Press, 2015
 43. Медовар, Л.Б. Новое в технологии ЭШП крупных полых слитков / Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко, Б.Б. Федоровский // Электromеталлургия. – 2013. – № 1. – С. 24–30
 44. H.J.klein. Elec. Fur. Conf.Proc. AIME, 1970. 28, 21.
 45. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. Электронно-лучевая плавка. — Киев: Наук. думка, 2008. — 311 с.
 46. Xi-min ZANG, Tian-yu QIU, Wan-ming LI, Xin DENG, Zhou-hua JIANG, Hua SONG· Effect of directional solidification in electroslag remelting on the microstructure and cleanliness of an austenitic hot-work die steel. Journal of Iron and Steel Research, International, April 2016, Pages 297-304.
 47. Wan-ming Li, Zhou-hua Jiang, Xi-min Zang, Xin Deng. Modeling of flow and temperature distribution in electroslag remelting withdrawal process for fabricating large-scale slab ingots. Journal of Iron and Steel Research, International, June 2017, Pages 569-578

48. X.M.Zang, Xin DENG, Zhou-hua JIANG, Hua SONG, Electroslag Remelting Withdrawing Technology for Offshore Jack-up Platform Rack Steel Manufacturing Process. /Journal of Iron and steel Research, 2016, p.297-304
49. ე. ნადარაია, რ. აბსავა, მ. ფაცაცია. ალბათობის თეორია. თბილისის უნივერსიტეტის გამომცემლობა, 2009.
50. ი.სხირტლაძე, თ.ტულუში, ა.ოსიძე, ა.ციმაძე, მ.ნადარეიშვილი; „ალბათობის თეორია და მათემატიკური სტატისტიკა“; გამომცემლობა „განათლება“, თბილისი - 1990 წ. გვ.272.
51. ო. კიკვიძე, “ექსპერიმენტის დაგეგმვა და ანალიზი”. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის გამომცემლობა. ქუთაისი 2017 წ.

დანართი 1

მოდელის საშუალებით პოტენციალის განაწილების სურათის გამოკვლევა დროის ერთ რომელიმე მომენტში ცილინდრული სივრცის ერთ რომელიმე კვეთში



მაგალითი II

უძრავი კრისტალიზატორის საჭირო დენის გაანგარიშება, როცა კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი $d_{კრ}=32$ სმ, დნობადი ელექტროდის დიამეტრი $d_ე=16$ სმ.

1. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ელექტროწიდური გადადნობისას წიდაში გამოყოფილი სითბო

$$Q_{წ}^x = 0,5\sigma(0,224)^2: 4 \cdot 0,18 \cdot 1,78 \cdot 2700 \cdot 1773 \approx 30206 \text{ კჯ.}$$

ამ მაგალითში:

ელექტროდის დიამეტრი:

$$d_ე=16 \text{ სმ}=0,16 \text{ მ}$$

კრისტალიზატორის შიგა კედლის დიამეტრი:

$$d_{კრ}=32 \text{ სმ}=0,32 \text{ მ}$$

კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი:

$$k=0,5$$

კრისტალიზატორის შიგა კედლის დიამეტრის ეფექტური მნიშვნელობა:

$$d_{კრ}'=0,16 \cdot 1,4=0,224 \text{ მ} \quad d_ე' = d_ე \cdot 1,4$$

წიდის აბაზანის სიმაღლე:

$$h_წ=0,18 \text{ მ.}$$

წიდის სითბოტევადობა:

$$C=1,78 \text{ კჯ}/(\text{კგ} \cdot \text{°K})$$

გამდნარი წიდის სიმკვრივე:

$$\gamma_წ=2700 \text{ კგ}/\text{მ}^3$$

წიდის დნობის ტემპერატურა:

$$T_{დნ}=1500+273=1773 \text{ °K}$$

2. დნობადი ელექტროდის გახურებაზე თბური დანახარჯები:

$$Q_ე^x = 0,3 \cdot 0,2 \cdot (0,16)^2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 0,67 \cdot 232 \cdot 7800 \approx 4073 \text{ კჯ}$$

ამ მაგალითში აღებულია შემდეგი პარამეტრები: გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი:

$$d_{ედ1}=0,16 \text{ მ}$$

კოეფიციენტი:

$$n_1=0,3 \quad m_1=0,2$$

გადასადნობი ელექტროდის სიგრძე:

$$x'_3=2\text{მ}$$

სითბოტევადობა $c_{\text{გდ1}}=0,67 \text{ კჯ}/(\text{კგ}\cdot^{\circ}\text{K})$

გადასადნობი მასალის სიმკვრივე:

$$\gamma_{\text{გდ1}}=7800 \text{ კგ}/\text{მ}^3$$

ელექტროდის გახურების საშუალო ტემპერატურა:

$$T=50+273=323^{\circ}\text{K}$$

3. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის შიგა კედლით წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბო

ძირითადი აბაზანიდან ართმეული სითბო

ძირითადი საანგარიშო პარამეტრებია:

სიმკვრივის კორექტირების კოეფიციენტი:

$$m_{\gamma}=1,05$$

რგოლის სიგანე:

$$x_2=0,2 \text{ მ}$$

რგოლის შიგა დიამეტრი:

$$d_{\text{გ}} = d_{\text{გრ}} \cdot k=32\cdot 0,5=0,16 \text{ მ}$$

წიდის აბაზანის სიმაღლე:

$$h_{\text{წ}}=0,18 \text{ მ}$$

სიმკვრივე:

$$\gamma = \gamma_{\text{წ}} \cdot 1,05=2835 \text{ კგ}/\text{მ}^3$$

კრისტალიზატორის კედლის დასაშვები ტემპერატურა:

$$T_{\text{კკ}} = 300+273=573^{\circ}\text{K}$$

რგოლის სითბოტევადობა:

$$C=0,38 \text{ კჯ}/(\text{კგ}\cdot^{\circ}\text{K})$$

სიმკვრივის არაერთგაროვნების კოეფიციენტი:

$$m_{\gamma}=1,05$$

ელექტროდის დიამეტრის კორექტირების კოეფიციენტი:

$$m_3=0,4$$

$$Q_{\text{წ}}^{\text{პ}}=0,4 \cdot \pi \cdot 0,2(0,16+0,2)0,18 \cdot 0,38 \cdot 2835 \cdot 573=10048 \text{ კჯ}$$

4. წიდის აბაზანიდან გადადნობილი ლითონის სხმულს გადადებული სითბო:

$$Q_{\text{სბ}} = Q_{\text{წ}}^{\text{წ}} - Q_{\text{წ}}^{\text{პ}} - Q_{\text{გ}}^{\text{წ}}=30206-10048-4073=16085 \text{ კჯ}$$

$$\text{ამრიგად } Q_{\text{წ}}^{\text{წ}}=30206 \quad \approx 100\%$$

$$Q_{\text{სბ}}=16085 \quad \approx 53\%$$

$$Q_{\text{წ}}^{\text{პ}}=10048 \quad \approx 33\%$$

$$Q_{\text{გ}}^{\text{წ}}=4073 \quad \approx 13\%$$

წიდის აბაზანიდან გამოსხივებაზე დანაკარგების სიმცირის გამო

$$Q_{\text{წ}}^{\text{ბ}} \approx (1-2)\%$$

არ იყო გაანგარიშებული.

უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ელექტროწიდური გადადნობისას კრისტალიზატორის $d_{\text{გ}}=16$ სმ; $d_{\text{კრ}}=32$ სმ. თბური დანაკარგები მიახლოებით ისეთივე სიდიდისაა როგორც სამეცნიერო-კვლევით ლიტერატურაში მითითებული.

5. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდე:

$$I = \sqrt{\frac{30206}{0,24 \cdot 3 \cdot 10 \cdot 3}} = 6,477 \text{ კა}$$

მაგალითი III

უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშება, როცა კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი $d_{\text{კრ}}=36$ სმ, ხოლო გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი $d_{\text{გ}}=18$ სმ.

1. ელექტროწიდური გადადნობისას წიდაში გამოყოფილი სითბო:

$$Q_{\text{წ}}^{\text{წ}}=0,5 \pi (0,252)^2 \cdot 4 \cdot 0,18 \cdot 1,78 \cdot 2700 \cdot 1773 \approx 38229 \text{ კჯ}$$

$$d_{\text{გ}}=18 \text{ სმ}=0,18 \text{ მ}$$

$$d_{კრ} = 36 \text{ სმ} = 0,36 \text{ მ}$$

$$k = 0,5$$

$$d'_{კრ} = 0,18 \cdot 1,4 = 0,252 \text{ მ.}$$

$$h_{წ} = 0,18 \text{ მ}$$

$$c = 1,78 \text{ კჯ/(კგ} \cdot \text{°K)}$$

$$\gamma_{წ} = 2700 \text{ კგ/მ}^3$$

$$T_{დწ} = 1500 + 273 = 1773 \text{ °K}$$

2. დნობადი ელექტროდის გახურებაზე თბური დანაკარგები:

$$Q_{გ}^{X} = 0,3 \cdot 0,2 \cdot (0,18)^2 \cdot \pi : 4 \cdot 2 \cdot 0,67 \cdot 323 \cdot 7800 \approx 5152 \text{ კჯ}$$

$$d_{გ} = 0,18 \text{ მ.}$$

3. კრისტალიზატორის შიგა კედლით წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბო:

$$Q_{წ}^{პ} = 0,4 \cdot \pi \cdot 0,2 \cdot (0,18 + 0,2) \cdot 0,18 \cdot 0,38 \cdot 2835 \cdot 573 \approx 10606 \text{ კჯ}$$

$$d_{გ} = 0,18 \text{ მ}$$

4. წიდის აბაზანიდან გადადნობილი ლითონის სხმულის გადაცემული სითბო:

$$Q_{სწ} = 38299 - 10606 - 5152 = 22471 \text{ კჯ}$$

$$\text{ამგვარად } Q_{წ}^{X} = 38229 \text{ კჯ} \quad \approx 100\%$$

$$Q_{სწ} = 22471 \text{ კჯ} \quad \approx 59\%$$

$$Q_{წ}^{პ} = 10606 \text{ კჯ} \quad \approx 27\%$$

$$Q_{გ}^{X} = 5152 \text{ კჯ} \quad \approx 13,5 \%$$

5. გაანგარიშების შემოთავაზებული სქემის მიხედვით ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდე.

$$I = \sqrt{\frac{38229}{0,24 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} = 7,286 \text{ კა}$$

მაგალითი IV

უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშება, როცა კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი $d_{კრ} = 48$ სმ, ხოლო გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი $d_{გ} = 24$ სმ.

1. ელექტროწიდური გადადნობისას წიდაში გამოყოფილი სითბო

$$Q_{წ}^{X}=0,5 \pi (0,336)^2:4 \cdot 0,18 \cdot 1,78 \cdot 2700 \cdot 1773 \approx 67963 \text{ კჯ}$$

$$d_{წ}=24\text{სმ}=0,24\text{მ}$$

$$d_{კრ}=36\text{სმ}=0,36\text{მ}$$

$$K=d_{წ}/d_{კრ}=0,5$$

კრისტალიზატორის ეფექტური დიამეტრი

$$d'_{კრ}=0,24 \cdot 1,4=0,336 \text{ მ.}$$

$$h_{წ}=0,18 \text{ მ}$$

$$c=1,78 \text{ კჯ}/(\text{კგ}\cdot^{\circ}\text{K})$$

$$\gamma_{წ}=2700 \text{ კგ/მ}^3$$

$$T_{დბ}=1500+273=1773 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

2. დნობადი ელექტროდის გახურებაზე თბური დანაკარგები:

$$Q_{წ}^{X}=0,3 \cdot 0,2 (0,24)^2 \cdot \pi :4 \cdot 2,0 \cdot 0,67 \cdot 323 \cdot 7800 \approx 9158 \text{ კჯ}$$

$$d_{წ}=0,24 \text{ მ.}$$

3. კრისტალიზატორის შიგა კედლით წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბო:

$$Q_{წ}^{X}=0,4 \cdot \pi \cdot 0,2 (0,24+0,2) \cdot 0,18 \cdot 0,38 \cdot 2835 \cdot 573 \approx 12281 \text{ კჯ}$$

$$d_{წ}=0,24 \text{ მ}$$

4. წიდის აბაზანიდან გადადნობილი ლითონის სხმულს გადაცემული სითბო:

$$Q_{სბ}=67963-12281-9158=46524 \text{ კჯ}$$

$$\text{ამგვარად: } Q_{წ}^{X}=67963 \text{ კჯ} \quad \approx 100\%$$

$$Q_{სბ}=46524 \text{ კჯ} \quad \approx 68\%$$

$$Q_{წ}^{X}=12281 \text{ კჯ} \quad \approx 18\%$$

$$Q_{წ}^{X}=9158 \text{ კჯ} \quad \approx 13,5 \%$$

5. გაანგარიშების შემოთავაზებული სქემის მიხედვით ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის სიდიდე:

$$I = \sqrt{\frac{67963}{0,24 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} \approx 9,715 \text{ კა}$$

მაგალითი V

უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშება, როცა კრისტალიზატორის შიგა ზომებია (20x20) სმ² ხოლო ელექტროდის ზომებია (11,8 x11,8) სმ².

1. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისას წიდაში გამოყოფილი სითბო. (20x20) სმ² კვადრატული ფორმის მქონე კრისტალიზატორი.

კრისტალიზატორის პრიზმის ფუძის ფართობი:

$$S_{\text{კრ}} = 0,2^2 = 0,4 \text{ მ}^2$$

წრიული ფორმის კრისტალიზატორის რადიუსი:

$$r_{\text{კრ}} = \sqrt{\frac{400}{\pi}} = 11,29 \text{ სმ} \approx 0,1129 \text{ მ}$$

კრისტალიზატორის დიამეტრი

$$d_{\text{კრ}} = 22,6 \text{ სმ} = 0,226 \text{ მ}$$

გადასადნობი ელექტროდის განივი კვეთის ფართი:

$$S_{\text{ე}} = (11,8)^2 = 139,24 \text{ სმ}^2$$

139,24 სმ² ფართი ელექტროდის დიამეტრი:

$$d_{\text{ე}} = 2r_{\text{ე}} = 2 \sqrt{\frac{139,24}{\pi}} = 13,3 \text{ სმ} \approx 0,133 \text{ მ}$$

კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი:

$$k = 0,133 : 0,226 = 0,58 \approx 0,6$$

კრისტალიზატორის ეფექტური დიამეტრი:

$$d'_{\text{კრ}} = 0,226 \cdot 0,9 \approx 0,2 \text{ მ}$$

$$Q_{\text{წ}}^{\text{კ}} = 0,58 \cdot \pi \cdot (0,2)^2 \cdot 4 \cdot 0,18 \cdot 1,78 \cdot 2700 \cdot 1773 = 27932 \text{ კჯ}$$

2. არაწრიული ფორმის კრისტალიზატორში (20x20) სმ² შიგა ზომებით და ელექტროდით (11,8x11,8) სმ² ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშება შემოთავაზებულია ახალი სქემით.

$$I = \sqrt{\frac{Q_{\text{წ}}^{\text{კ}}}{0,24 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{\frac{27932}{0,24 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} \approx 6,2 \text{ კა}$$

მაგალითი VI

უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენის გაანგარიშება, როცა კრისტალიზატორის შიგა ზომებია $(22,5 \times 22,5)$ სმ², ხოლო ელექტროდის ზომებია (16×16) სმ².

1. უძრავი კრისტალიზატორის სქემით ლითონების ელექტროწიდური გადადნობის წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბოს გაანგარიშება. $(22,5 \times 22,5)$ სმ² კვადრატული ფორმის მქონე კრისტალიზატორის ფუძის ფართობი.

$$S_3 = (22,5 \times 22,5) \text{ სმ}^2 = 0,050625 \text{ მ}^2$$

შესაბამისი ფართის მქონე წრიული კრისტალიზატორის ფუძის რადიუსი:

$$r_{კრ} = \sqrt{\frac{506,25}{\pi}} = 12,69 \text{ სმ} \approx 0,1269 \text{ მ}$$

კრისტალიზატორის დიამეტრი: $d_{კრ} = 0,25 \text{ მ}$.

გადასადნობი ელექტროდის განივი კვეთის ფართი:

$$S_7 = 16^2 = 256 \text{ სმ}^2 = 0,256 \text{ მ}^2$$

წრიული ეფექტური ფართის დიამეტრი:

$$d_7 = 2r_7 = 2 \sqrt{\frac{256}{3,14}} = 9,03 \text{ სმ} \cdot 2 = 18,05 \text{ სმ} \approx 0,18 \text{ მ}$$

კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი:

$$K = 0,18 : 0,25 = 0,72$$

კრისტალიზატორის ეფექტური დიამეტრი:

$$d'_{კრ} = 0,25 \cdot 0,9 = 0,225 \text{ მ}$$

არაწრიული კრისტალიზატორის შემთხვევაში დენის გავლის ფორმის ე.წ. პინჩ ეფექტის გათვალისწინების კოეფიციენტი აღებულია 0,9-ს ტოლად.

წრიულ კრისტალიზატორზე დაყვანის შემდეგ წიდის აბაზანაში გამოყოფილი სითბო:

$$Q_{წ}^x = 0,72 \cdot \pi (0,225)^2 : 4 \cdot 0,18 \cdot 1,78 \cdot 2700 \cdot 1773 = 43886 \text{ კჯ}$$

2. კვადრატული ფორმის კრისტალიზატორში $(22,5 \times 22,5)$ სმ² შიგა ზომით და ელექტროდით (16×16) სმ² ელექტროწიდური გადადნობისათვის საჭირო დენი:

$$I = \sqrt{\frac{43886}{0,24 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}} \approx 7,8 \text{ კა}$$

დანართი 3

უცხოურ, სამეცნიერო სტატიებში წარმოდგენილ თბურ პროცესებში აღნიშვნები ხშირ შემთხვევაში არაა ერთნაირი. მითუმეტეს არაა ერთიანი აღნიშვნები ქართულ ენაზე წარმოდგენილ სტატიებში. ჩვენს მიერ წინამდებარე ნაშრომში გამოყენებული იქნება შემდეგი აღნიშვნები.

N	აღნიშვნის დასახელება	აღნიშვნა რუსულ ლიტერატურაში	აღნიშვნა
1	2	3	4
1	ელექტროწიდური გადადნობისას წიდური აბაზანაში გამოყოფილი სითბო	$Q_{\text{ЭШ}}$	$Q_{\text{X}}^{\text{წ}}, Q_{\text{წ}}^{\text{წ}}$
2	ელექტროწიდურ სხმულზე გადაცემული სითბო, სასარგებლო სითბო	$Q_{\text{СЛ}}$	$Q_{\text{ს}}, Q_{\text{სას}}$
3	კრისტალიზატორის კედლის მიერ წიდის აბაზანიდან ართმეული სითბო	$Q_{\text{СТШ}}$	$Q_{\text{კვ}}^{\text{წ}}$
4	სხმულიდან კრისტალიზატორის კედელს გადაცემული სითბო	$Q_{\text{СТСЛ}}$	$Q_{\text{წ}}^{\text{კვ}}$
5	კრისტალიზატორის ფორმის კოეფიციენტი	K	K
6	წიდის აბაზანიდან დნობადი ელექტროდის კონტაქტით ერთმეული სითბო	$Q_{\text{ЭШ}}^{\text{წ}}$	$Q_{\text{წ}}^{\text{წ}}$
7	წიდაში გამავალი ჯამური დენი	$I_{\text{р}}$	I_{X}
8	წიდის აბაზანიდან დნობად ელექტროდზე გადაცემული სითბო	$Q_{\text{ЭШ}}^{\text{წ}}$	$Q_{\text{წ}}^{\text{წ}}$
9	კრისტალიზატორის შიგა დიამეტრი	$d_{\text{кр}}$	$d_{\text{კ}}$
10	წიდის აბაზანის სიმაღლე	$h_{\text{ЭШ}}$	$h_{\text{წ}}$
11	კრისტალიზატორის სიმაღლე	$h_{\text{кр}}$	$h_{\text{კ}}$
12	შესადურებელი დეტალის სისქე	S	S
13	ელექტროკონტაქტური შედუღებისას მოქმედი კუმშვის ძალა	P_{oc}	$P_{\text{კ}}$

1	2	3	4
14	დენის წყარო	CT	CT
15	დნობის ტემპერატურა	$T_{\text{пл}}$	$T_{\text{дб}}$
16	ბირთვში ლითონის გადნობისათვის სითბო	Q'_1	Q'_1
17	შედულების დრო	$T_{\text{св}}$	$T_{\text{ш}}$
18	გარდნისაჟის სისქე	δ_r	$\delta_{\text{б}}$
19	დნობადი ელექტროდი ქვეშ ცილინდრში გამოყოფილი სითბო	-	$Q_{1\text{წ}}^{\text{б}}$
20	არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორის წიდის აბაზანაში გამავალი დენი	-	$I_{\text{წ}}^{\text{ა}}$
21	არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში გამავალი ჯამური დენი	-	$I_{\text{წ}}^{\Sigma \text{ა}}$
22	დნობადი ელექტროდის ეფექტური წინაღობა	$R_{\text{эф}}$	$R_{\text{ეფ}}$
23	წინაღობის ეფექტურობის კოეფიციენტი	$K_{\text{эф}}$	$K_{\text{ეფ}}$
24	ელექტროკონტაქტური წერტილოვანი შედულებისას ელექტროდის მიერ გამდნარი ბირთვიდან ართმეული სითბო	-	$Q_{\text{ე}}$
25	არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროდის ქვეშ ცილინდრში გამოყოფილი სითბო	-	$Q_{1\text{წ}}^{\text{б}}$
26	არადნობადელექტროდებიან კრისტალიზატორში ელექტროდის ქვეშ ცილინდრის გარემომცველ რგოლში გამოყოფილი სითბო	-	$Q_{1\text{წ}}^{\text{რგ}}$
27	წიდაში გამოყოფილი სითბოს დანაკარგები	$\eta_{\text{ш}}$	$\eta_{\text{წ}}$
28	გაგრილების სისტემის სექციების სიგანე	δ_k	δ_k
29	გაგრილების სისტემის სექციის სიგრძე	l_k	l_k
30	გაგრილების სისტემაში სექციების რაოდენობა	n	n

1	2	3	4
31	გადასადნობი ელექტროდის დიამეტრი	$d_{\text{ჰII}}$	$d_{\text{ედI}}$
32	დნობადი ელექტროდის ფორმის კოეფიციენტი	-	R'_2
33	დნობადი ელექტროდის სითბოტევადობა	-	$C_{\text{ედI}}$
34	ელექტროწიდური გადადნობის პროცესის განმაზოგადებელი გამომავალი პარამეტრები	-	$\gamma_{\text{გ}}$

ინდექსებად გამოყენებული შემოკლებები.

შემოკლებული აღნიშვნები: წ-წიდა; გ-გამოსხივება; ე-ელექტროდი; ძ-ძირი; ს-სხმული; კ-კედელი; კკ-კრისტალიზატორის კედელი; გრ-გარემო; წგ-წიდიდან გამოსხივებული; ჯამ-ჯამური; ჯ-ჯოული; ც-ცილინდი;