

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ალექსანდრე გორგოშიძე

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ფიზიკური  
მოდელის დამუშავება

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა - საინჟინრო ფიზიკა  
შიფრი 0404

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
ივლისი, 2019 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

„ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტი“

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი, ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ალექსანდრე გორგოშიძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ფიზიკური მოდელის დამუშავება“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის „ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის“ საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ივლისი 2019 წ.

ხელმძღვანელი: პროფესორი ზურაბ ჩაჩხიანი  
ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორი

რეცენზენტი: .....

რეცენზენტი: .....

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
2019 წ.

ავტორი: ალექსანდრე გორგოშიძე  
დასახელება: ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის  
ფიზიკური მოდელის დამუშავება  
სადოქტორო პროგრამა: საინჟინრო ფიზიკა  
ხარისხი: დოქტორი  
სხდომა ჩატარდა: 2019 წ.

ინდივიდუალური პროცნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემომოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

---

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა(გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

უკანასკნელ ხანებში სასარგებლო წიაღისეულის გამდიდრების მეთოდებს შორის დიდი გავრცელება ჰპოვა ძლიერი ელექტრული ველის გამოყენებამ ტექნოლოგიურ პროცესებში, ელექტრონულ-იონურმა ტექნოლოგიამ (ეიტ).

ეიტ-ის პროცესები ფართოდ გამოიყენება ელექტროსეპარატორებში, სადაც მიმდინარეობს ნაწილაკების განცალკევება (სეპარაცია) მათი ელექტროგამტარობის მიხედვით, რომელიც ხორციელდება გვირგვინული განმუხტვის დოლურ და დახრილ ფირფიტოვან ელექტროსტატიკურ ელექტროსეპარატორებში. ამ მოწყობილობებში მინერალური ნაწილაკების სელექციური დამუხტვის პროცესი მიმდინარეობს ინდუქციური (კონტაქტური) დამუხტვის გზით.

ელექტრული სეპარაციის ფართო გამოყენებას ხელს უშლის ნაწილაკების დამუხტვის პროცესების არასაკმარისი შესწავლა. ამის გამო ელექტროსეპარატორების კონსტრუირება ხდება ემპირულ საფუძველზე, ტექნოლოგიური გამოცდილების გათვალისწინებით და არა ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ფიზიკური საფუძვლების სიღრმისეული კვლევისა და ანალიზის მიხედვით. ამის გამო წარმოიქმნება სიძნელეები, რომლებიც დაკავშირებულია ელექტროსეპარაციის გამოყენებასთან ახალი და ახალი საბადოების მიმართ, რისთვისაც გვიხდება ჩავატაროთ ლაბორატორიული და ნახევრად სამრეწველო ტიპის ფართო მოცულობის კვლევები.

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ლიტერატურული წყაროების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ისინი წარმოადგენენ დამუხტვის პროცესის მხოლოდ ნაწყვეტ-ნაწყვეტ მონაცემებს, რომლებიც არ ექვემდებარებიან განზოგადოებას.

იმისათვის, რომ შევიმუშაოთ ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური კვლევა, სადაც გათვალისწინებული იქნება სხვადასხვა ტექნოლოგიური ფაქტორების, განსაცალკევებელი მინერალური ნაწილაკების ფიზიკური და ელექტრული თვისებების და ელექტროსეპარატორის პარამეტრების გავლენა ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე, აუცილებელი ხდება შეიქმნას ექსპერიმენტული დანადგარი და კვლევის ჩატარების მეთოდიკა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს იმ რეკომენდაციების შემუშავებას, რომლებიც უზრუნველყოფენ ელექტროსეპარაციის პროცესის ოპტიმალური გზით წარმართვას.

ამ ამოცანის გადასაწყვეტად შეიქმნა ექსპერიმენტული დანადგარი, რომლის მუშა ნაწილს წარმოადგენს ბრტყელი ცილინდრული კონდენსატორი. ბრტყელი კონდენსატორი წარმოადგენს იდეალიზირებულ ელექტროსეპარატორს, რომელშიც შესაძლებელია შესწავლილი იქნას ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვისა და მათი ელექტროდზე ქცევის ის თავისებურებები, რომლებიც წარმოადგენენ რეალურ ელექტროსეპარატორში მიმდინარე ძირითად პროცესებს. მეორეს მხრივ, ასეთი იდეალიზაცია გვიადვილებს ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ძირითადი კანონზომიერებების შესწავლას, რომელიც შესაძლებელია განზოგადოებული იქნას რეალური ელექტროსეპარატორებისათვის.

ექსპერიმენტული დანადგარი შედგება ელექტრული და ოპტიკური ნაწილისაგან. ელექტრული ნაწილი უზრუნველყოფს ნაწილაკების დამუხტვას და დამუხტვის დაწყების მომენტის ფიქსაციას ოსცილოგრაფის საშუალებით, ხოლო ოპტიკური ნაწილი, ნაწილაკების დამუხტვის დამთავრების ფიქსირებას. დამუხტული ნაწილაკი მოწყდება ელექტროდს და გადაკვეთს მის ზედა ზედაპირთან გამავალ ლაზერის სხივს. ამ დროს ის თავისი ზედაპირიდან

აირეკლავს ამ სხივის ნაწილს, რომელიც ხვდება ფოტოელექტრული გამამრავლებლის ეკრანზე, საიდანაც მიღებული ელექტრული სიგნალი ოსცილოგრაფის ეკრანზე აფიქსირებს ნაწილაკის დამუხტვის დამთავრების დროს.

ექსპერიმენტულ დანადგარზე გათვალისწინებული იყო სხვადასხვა პარამეტრების ცვლილებისა და მათი გაზომვის შესაძლებლობები. განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო როგორც ცალკეული ნაწილაკების, ასევე ნაწილაკთა ჯგუფის მუხტისა და დამუხტვის დროის შესწავლას. გარდა ამისა, ერთ-ერთ მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენდა არაგამტარი ნაწილაკების ზღვრული მუხტის განსაზღვრა. ნაშრომში მოცემულია მისი განსაზღვრის ახალი ექსპერიმენტული მეთოდი, რომელიც დაფუძნებულია ადგეზიის ძალისა და სარკისებური ანარეკლი მუხტების ურთიერთქმედების ძალების კომპენსაციაზე (დადასტურებულია გამოგონების საავტორო უფლებით).

ნაწილაკების მუხტების გაზომვის ამ მეთოდის მართებულობა შემოწმებული იქნა სფერული მეტალური ნაწილაკების საშუალებით, რომლებიც დამუხტავი ელექტროდიდან წყდებათ თავისი ზღვრული მუხტით. ზღვრული მუხტის თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების თანხვედრამ დაადასტურა ნაწილაკების მუხტების გაზომვის გამოყენებული მეთოდის სამართლიანობა.

დამუხტავ ელექტროდზე ნაწილაკის ქცევის ანალიზისათვის განხილულია ყველა ის ძალა, რომელიც დამუხტვის პროცესში მოქმედებს ნაწილაკზე. ამ ძალებს მიეკუთვნება სიმძიმის ძალა, ცენტრისკენული ძალა, ადგეზიის ძალა, პონდერომოტორული ძალა და ელექტრული (კულონური) ძალა.

ნაწილაკის ელექტროდზე ქცევის ანალიზისათვის ყველაზე რთულ საკითხს წარმოადგენს ადგეზიის ძალის განსაზღვრა. მისი თეორიული შეფასებები გვაძლევს მისი მნიშვნელობების ძალზე დიდ გაზრდას და ზოგიერთ შემთხვევაში სხვადასხვა პარამეტრების მიხედვით ურთიერთსაწინააღმდეგო დამოკიდებულებებს. ეს გამოწვეულია ერთის მხრივ ადგეზიის ძალაზე ძალიან ბევრი ფაქტორების გავლენით და მეორეს მხრივ გაზომვის სირთულეებით. ამის გამო მისი განსაზღვრის ძირითად მეთოდად რჩება ექსპერიმენტული შეფასებები. გარდა ამისა, სხვადასხვა ფაქტორების ძლიერი გავლენა ადგეზიის ძალაზე მას აქცევს როგორც ალბათურ სიდიდეს, ამიტომ ის უნდა დახასიათდეს მისი განაწილების ფუნქციით.

ადგეზიის ძალის მეორე მახასიათებელ სიდიდედ შემოგვაქვს ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა, რომელიც გარკვეულ პირობებში განისაზღვრება როგორც ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების რაოდენობის ფარდობა ნაწილაკების მთლიან რაოდენობასთან, რომლებიც ელექტროდზე განიცდიან დამუხტვას. ეს პარამეტრი ასევე უშუალოდ არის დაკავშირებული ელექტროსეპარატორში ნაწილაკების განცალკევების ეფექტურობასთან

ინდუქციური დამუხტვის პროცესის წარმოდგენისათვის საჭიროა მისი მიმდინარეობის აღწერა. დამუხტვის საწყის მომენტში ელექტრული ველის მოქმედების შედეგად ნაწილაკი პოლარიზდება და ჭარბი (თავისუფალი) მუხტი ჯერ კიდევ ნულის ტოლია. ამ დროს ნაწილაკზე მოქმედი ელექტრული ძალა განპირობებულია პოლარიზებული მუხტებით და ის წარმოადგენს ნაწილაკზე მოქმედ დაწოლის ძალას და მიმართულია ელექტროდისაკენ. პოლარიზაციის შედეგად წარმოქმნილი შიგა ველი განაპირობებს თავისუფალი მუხტების ნაკადს, რომლის ზრდასთან ერთად პოლარიზებული მუხტების რაოდენობა მცირდება. ამასთან ერთად იზრდება ჭარბ მუხტებსა და ელექტრულ ველს შორის ურთიერთქმედების ძალა და დამუხტვის პროცესის ბოლოს ის ხდება ნაწილაკის

ელექტროდიდან მოწყვეტის მიმართულებით. ამ დროს ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტისათვის საჭიროა შესრულდეს შემდეგი პირობა

$$F_{ელ} \geq F_g + F_{ადგ}$$

ნაშრომში განხილულია მონომინერალური ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე ტექნოლოგიური და კონსტრუქციული პარამეტრების გავლენა. განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულებას დამუხტავი ელექტროდის მასალაზე და დადგენილი იქნა, რომ ამ პროცესზე განსაკუთრებულ გავლენას ახდენს მეტალურ ელექტროდებზე წარმოქმნილი ჟანგეულის ფენა. გრაფიტის შემცველ ელექტროდებზე ჩატარებულმა ექსპერიმენტულმა კვლევებმა დაადასტურა ამ დებულების სამართლიანობა. ნაშრომში ჩამოყალიბებული ეს შედეგები დანერგილი იქნა სანკტ-პეტერბურგის საპროექტო და კვლევითი სამეცნიერო ინსტიტუტის (“Механика”) მიერ დაპროექტებულ ელექტროსეპარატორებში (რაზედაც გაცემულია შესაბამისი აქტი).

მიღებული შედეგების საფუძველზე აგებული იქნა ინდუქციური დამუხტვის პროცესში ნაწილაკზე მოქმედი ყველა ძალის დიაგრამა.

განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო მუხტის ცვლილების კინეტიკას ინდუქციური დამუხტვის პროცესში და მის დამოკიდებულებას ტექნოლოგიურ პარამეტრებზე. გამოთვლილი იქნა ნაწილაკების დამუხტვის დროის მუდმივა და დადგენილი იქნა, რომ ნაწილაკზე რეალურად მიმდინარე დამუხტვის კინეტიკა არ ატარებს ექსპონენციალურ ხასიათს, როგორც ეს თეორიულ შრომებში არის ნაჩვენები. ამის მიზეზია ნაწილაკის ქცევა ელექტროდზე ელექტრულ ველში და ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობა.

ნაწილაკების ექვივალენტური ელექტროგამტარობა შესაძლებელია განისაზღვროს ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრებით და მისი უშუალო გაზომვის გზით. ელექტროგამტარობის უშუალო გაზომვები ჩატარებულ იქნა სხვადასხვა ფრაქციის ნაწილაკების მასალის ფხვნილების სინჯებზე და შედარებულ იქნა ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრებით მიღებულ შედეგებთან, რომლებიც კარგად ეთანხმებოდა ერთმანეთს.

ნაშრომში ჩამოყალიბებულია ადგეზიის ძალის გაანგარიშების მეთოდიკა და დადასტურებულია გამოგონების საავტორო უფლებით.

კომპლექსური ექსპერიმენტული კვლევების საფუძველზე ჩამოყალიბებულია ინდუქციური დამუხტვის პროცესის დაზუსტებული ფიზიკური სურათი და მიღებული შედეგების საფუძველზე მოცემულია ელექტროსეპარატორებში ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ორგანიზაციის პრაქტიკული რეკომენდაციები.

## Resume

### **Development of physical model for particles' induction charging**

Recently, use of a strong electric field in the technological process has become widely spread among the minerals enrichment methods. Electron-ion technology is widely used in electric separators, where particles are separated according to their electric conductivity, that is carried out in crowned discharge and inclined plate electrostatic separator. In this device selective charging process of mineral particles is carried out by inductive (contact) charging method.

Insufficient study of particle charging processes prevents widespread use of electric separation. Due to this, constructing the electrical separation is based on the empirical evidence, taking into account the technological experience, and not according to the in-depth research and analysis of the physical basis of induction charging process. Due to this, difficulties arise relating to the use of electric separation in new fields, for which we conduct experimental-laboratory and semi-industrial types of wide-ranging studies.

Study of literature sources of particle induction process has shown us, that they are data fragments of charging process, which are not subject to generalize.

To accomplish this task, an experimental device was created, the work part of which is a flat cylindrical capacitor. Flat Capacitor is an idealized electroseparator where it can be studied the particle charging processes (particle charging, its behavior on the electrodes, break-out from the electrode and motion in the electric field), which are the main processes in the real electric separator. On the other hand, such idealization simplifies the study of the major regularities of the induction process, which can be generalized for real electric separators.

The experimental device consists of two parts: electrical and optical part. The electric part ensures the charging of particles and fixing of the starting moment of charging by means of the oscillograph, while the optical part provides the fixing of completion of particles charging, that is implemented at the moment of starting the particle motion in the electric field. At this time the particle cross laser beam outgoing through the upper surface and part of this beam reflected from its surface falls on the photoelectric multiplier screen, from which electronic signal fixes finishing time of particle charging on the oscilloscope display.

The experimental equipment provided measurement capabilities of different parameters. Particular attention was paid to the study of the particles charges and charging time. In addition, one of the important issues was the determination of the charge limit of nonconducting particles. Present work deals with new experimental method for its determination, that is based on the compensation of adhesion force and interaction forces between reflected charges and the invention is confirmed by copyright.

Measurement correctness of particles charges was tested by spherical metallic particles, which break away from charging electrode with charge limit. Matching of theoretical and experimental results of charge limit confirms the fairness of the measuring method of particle charging.

For analysis of the particle behavior of the electrode all forces are considered, which act in the process of recharging the particle. These forces include gravity force, centripetal force, adhesion force, ponderomotive and electric force.

The most difficult issue for analysis of behavior of the particle on the electrodes is to define adhesion force. Its theoretical assumptions give us some contradictory attitudes in different parameters. This is stipulated on the one hand by the influence of the many factors on the adhesion force and on the other hand by measuring difficulties. Due to this the experimental assessments remain the main method of its determination. In addition, the strong impact of various factors on the adhesion force makes it the probability value, so it should be characterized by its distribution function.

The second characteristic of the adhesion force is the probability of breaking away the particle, which in certain conditions, is determined as the ration of amount of particles broken away from the electrode to the total number of particles, that are charged on the electrode. This parameter is directly related to the efficiency of the particle separation in the electric separator.

The work deals with the impact of technological and constructive parameters on the probability of breaking-away of monomineral particles. Particular attention was paid to the dependence of the probability of the breaking away on charging electrode materials and it was established, that this process is affected by oxide layer formed on the metallic electrode. Experimental studies on graphite-containing electrodes confirmed the fairness of this provision.

Special attention was paid to the kinetics of charge change in inductive charging process and its dependence on technological parameters. Constant value of charging time was calculated and it was established, that actually current particle charging kinetics does not have an exponential character as it is shown in the theoretical works. Reason of this is behavior of particle on the electrode in electric field and contact resistance between particle and electrode.

Based on complex experimental researches, the adjusted physical picture of the induction charging process is established and the practical recommendations for the organizing induction charging processes in electroseparators are given.



## შინაარსი

შესავალი .....	11
I თავი_ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში ნაწილაკთა ინდუქციური დამუხტვა. ლიტერატურის მიმოხილვა. კვლევითი სამუშაოების დაგეგმვა.....	21
1.1. გამტარობის მიხედვით ინდუქციური დამუხტვის როლი და მნიშვნელობა ელექტროსტატიკური სეპარაციის პროცესებში.....	21
1.2. ელექტრული მუხტების როლი იმ ძალების წარმოქმნაში, რომლებიც მოქმედებენ ელექტროსეპარატორებში არსებულ ნაწილაკებზე .....	26
1.3. ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის თეორიული კანონზომიერებანი.....	30
1.4. ადგეზიის ძალის თეორიული წარმოდგენის შეზღუდულობა.....	34
1.5. ინდუქციური დამუხტვის თეორიული მოდელი, რომელიც დაფუძნებულია თანამედროვე წარმოდგენებზე.....	38
1.6. ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ექსპერიმენტული გამოკვლევა.....	41
1.7. კვლევის ამოცანები .....	54
II თავი_ექსპერიმენტული დანადგარი და მინერალური ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრების გაზომვების ჩატარების მეთოდიკა.....	55
2.1. ექსპერიმენტული დანადგარის აღწერა და ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდიკა .....	55
2.2. ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ელექტროფიზიკური პარამეტრების გაზომვის მეთოდიკა.....	66
2.3. მუხტის გაზომვა ინდუქციური დამუხტვის პროცესის შესწავლის დროს .....	71
2.3.1. მუხტების გაზომვის უშუალო მეთოდი .....	72
2.3.2. მუხტზე მოქმედი ძალების ბალანსზე დაფუძნებული მუხტის გაზომვის მეთოდი.....	76
2.3.3. არასფერული გამტარი და დიელექტრიკული ნაწილაკების ზღვრული მუხტის გაზომვა .....	79
2.4. ნაწილაკის დამუხტვის დროის მუდმივას განსაზღვრა .....	82
2.5. ადგეზიის ძალის შეფასება.....	82
2.6. ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა .....	84
2.7. გამოსაკვლევი ნაწილაკები .....	87
II თავის დასკვნები:.....	89
III თავი_ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა, როგორც ინდუქციური დამუხტვის პროცესის გარე ინტეგრალური მახასიათებელი.....	90
3.1. ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკების დამუხტვის ტექნოლოგიური რეჟიმის ზეგავლენა მათი ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობაზე.....	91
3.1.1. ექსპერიმენტის ზოგადი აღწერა .....	92
3.1.2. მეტალური ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის გამოკვლევა .....	94
3.1.3. ჰაერის ტენიანობის გავლენა ნაწილაკთა მოწყვეტის ალბათობაზე.....	99

3.1.4. ჰაერის მაღალი ტემპერატურის გავლენა ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე.....	102
3.1.5. ელექტროდის ვიბრაციის გავლენა მოწყვეტის ალბათობაზე .....	103
3.1.6. ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე.....	105
3.1.7. ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება მათ ზომებზე.....	106
3.2. სეპარატორის კონსტრუქციული პარამეტრების გავლენა ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობაზე.....	108
3.2.1. ნაწილაკის ელექტრულ ველში ყოფნის ხანგრძლივობის ზეგავლენა მისი მოწყვეტის ალბათობაზე .....	108
3.2.2. დამუხტავი ელექტროდის მასალის გავლენა ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე.....	111
3.3. ნაწილაკთა ელექტროდიდან მოწყვეტის დიაგრამა.....	114
III თავის დასკვნები.....	117
IV თავი_ინდუქციური დამუხტვის პროცესის პარამეტრების ექსპერიმენტული გამოკვლევა.....	119
4.1 ნაწილაკების დამუხტვის კინეტიკა.....	119
4.1.1. ნაწილაკების მოწყვეტის დროისა და მუხტის მინიმალური და საშუალო მნიშვნელობები.....	119
4.1.2. ნაწილაკების მოწყვეტის დროის საშუალო.....	126
მნიშვნელობები.....	126
4.1.3. ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტთა დამოკიდებულება მათი დამუხტვის დროზე.....	137
4.2. ელექტროდთან ნაწილაკების ადგეზიის ძალების შეფასებები .....	146
4.2.1. ადგეზიის ძალის ალბათური მახასიათებელი .....	146
4.3. მეოთხე თავის დასკვნები:.....	151
V თავი_ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის რეალური ფაქტორების გათვალისწინება.....	152
5.1. ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ფიზიკური სურათის საერთო დახასიათება .....	152
5.2. ელექტროსეპარატორში ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ორგანიზაციის პრაქტიკული რეკომენდაციები .....	157
5.3. მეხუთე თავის დასკვნები .....	160
დასკვნები.....	162
გამოყენებული ლიტერატურა.....	164

## ცხრილების ნუსხა

ცხრილი 1	.....	46
ცხრილი 2	.....	51
ცხრილი 3	დამმუხტავი ელექტროდიდან მეტალური სფერული ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა.....	86
ცხრილი 4	ტიტანო-ციკონიუმის კონცენტრატის შემადგენელი მინერალები და მათი ძირითადი მახასიათებლები .....	88
ცხრილი 5	λ მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება ნაწილაკის a ზომებზე, როდესაც $E=10$ კვ/სმ, $T=20^{\circ}\text{C}$ , $f=20-60\%$ ; ელექტროდი ქრომირებულია, ნიკელის ნაწილაკები, $\gamma_{\text{წილ}} = 8,25 \cdot 10^3$ კგ/მ <sup>3</sup> .....	98
ცხრილი 6	λ მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება a ნაწილაკის ზომებზე, როცა $E=10$ კვ/სმ, $f=20-60\%$ ; ელექტროდი ქრომირებულია, $T=20^{\circ}\text{C}$ , ალუმინის ნაწილაკები, $\gamma_{\text{წილ}} = 2,70 \cdot 10^3$ კგ/მ <sup>3</sup> .....	98
ცხრილი 7	λ მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება a ნაწილაკის ზომებზე, როცა $E=10$ კვ/სმ, $T=20^{\circ}\text{C}$ , $f=20-60\%$ ; ელექტროდი ქრომირებულია, $\gamma_{\text{წილ}} = 8,25 \cdot 10^3$ კგ/მ <sup>3</sup> ნაწილაკები გარეცხილია ნიშადურის სპირტით .....	99
ცხრილი 8	რუტილის ნაწილაკების გარეცხვის ზეგავლენა მათი ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობაზე, როცა $f=40-60\%$ და $E=10$ კვ/სმ .....	102
ცხრილი 9	λ-ს მნიშვნელობები ნიკელის ნაწილაკებისათვის, როდესაც ხდებოდა მათი დამუხტვა მეტალურ ელექტროდებზე, $t_{\text{წილ}} = 90$ წმ .....	112
ცხრილი 10	λ-ს მნიშვნელობები ნიკელის ნაწილაკებისათვის, როდესაც ხდებოდა მათი დამუხტვა გრაფიტის შემცველ ელექტროდზე, $t_{\text{დამ}} = 90$ წმ .....	113
ცხრილი 11	მინერალური ნაწილაკების ხვედრითი მოცულობითი გამტარობა, $(\text{ომ}\cdot\text{მ})^{-1}$ .....	145
ცხრილი 12	ნაწილაკების ეკვივალენტური გამტარობის მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები .....	150

## ნახაზების ნუსხა

ნახ. 1. ელექტროსეპარატორები .....	22
ნახ. 2. ნაწილაკი ბრტყელ კონდენსატორში .....	30
ნახ. 3. ნახევრადელიპსური ნაწილაკი ელექტროდზე .....	31
ნახ. 4. დანადგარის ფუნქციონალური სქემა .....	56
ნახ. 5. დანადგარის პრინციპული ელექტრული სქემა .....	58
ნახ. 6. დანადგარის ოპტიკური სქემა .....	60
ნახ. 7 მუშა კონდენსატრის კონსტრუქცია .....	64
ნახ. 8. იმპულსის ფორმა .....	67
ნახ. 9. ოსცილოგრაფზე მინიმალური დროის ფიქსაციის დამოკიდებულება რუტილის ნაწილაკების ზომებზე .....	70
ნახ. 10. რუტილის ნაწილაკების ფრენის მაქსიმალური დროის დამოკიდებულება მათ ზომებზე .....	70
ნახ. 11. მოწყვეტის მუხტის ექსპერიმენტული დამოკიდებულება ნიკელის სფერული ნაწილაკების ზომებზე .....	75
ნახ. 12. სფერული ნაწილაკების ზღურბლური დაძაბულობის ექსპერიმენტული დამოკიდებულება მათ ზომებზე .....	78
ნახ. 13. რუტილის ნაწილაკების ზღვრული მუხტის დამოკიდებულება ეკვივალენტური სფეროს რადიუსზე .....	80
ნახ. 14. ნიკელის ადგეზიის ძალის დამოკიდებულება ნიკელის ნაწილაკების ზომებზე .....	83
ნახ. 15. ჯამური მოწყვეტის ძალის $F_{\Sigma}$ დამოკიდებულება ნაწილაკის ზომებზე .....	95
ნახ. 16. ჯამური მოწყვეტის ძალის $F_{\Sigma}$ და ჰიპოტეტიური ადგეზიის ძალის $F_{\text{ადგეზიის}}$ დამოკიდებულება ნიკელის ნაწილაკის ზომებზე .....	96
ნახ. 17. მოწყვეტის ალბათობის $\lambda$ დამოკიდებულება ჰაერის ფარდობით ტენიანობაზე $f$ .....	100
ნახ. 18. მოწყვეტის ალბათობის $\lambda$ დამოკიდებულება ჰაერის ტემპერატურაზე $T$ .....	102
ნახ. 19. მოწყვეტის ალბათობის $\lambda$ დამოკიდებულება ელექტროდის ვიბრაციაზე .....	104
ნახ. 20. მოწყვეტის ალბათობის $\lambda$ დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე $E$ .....	105

ნახ. 21. სხვადასხვა ზომის ნაწილაკებისათვის მოწყვეტის ალბათობის $\lambda$ დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე $E$ ....	107
ნახ. 22. მოწყვეტის ალბათობის $\lambda$ დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე $E$ , $t_{დაბ} = 2$ წმ .....	109
ნახ. 23. მოწყვეტის ალბათობის $\lambda$ დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე $E$ .....	110
ნახ. 24. მოწყვეტის ალბათობის $\lambda$ დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე $E$ .....	111
ნახ. 25. ძალთა დიაგრამის აგებისათვის .....	116
ნახ. 26 ინდუქციური დამუხტვის პროცესში ნაწილაკზე მოქმედი ძალთა დიაგრამა .....	116
ნახ. 27. რუტილის ნაწილაკების მოწყვეტის მინიმალური მუხტის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე .....	121
ნახ. 28. ქრომირებული ელექტროდი, $T=150^{\circ}C$ რუტილის მოწყვეტილი ნაწილაკების საშუალო მუხტის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე .....	122
ნახ. 29 რუტილის ნაწილაკების ქრომირებული ელექტრო-დიდან მოწყვეტის მუხტის საშუალოკვადრატული გადახრის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე .....	123
ნახ. 30. რუტილის ნაწილაკების მოწყვეტის საშუალო მუხტის დამოკიდებულება გარემოს სინესტეზე და ქრომირებული ელექტროდის ტემპერატურაზე, როდესაც $f = 20\%$ , $E = \frac{10_{კვ}}{სმ}$ , $a = 98$ მკმ .....	124
ნახ. 31. რუტილის ნაწილაკების მოწყვეტის მუხტის საშუალო კვადრატული გადახრის დამოკიდებულება გარემოს ნესტიანობაზე და ქრომირებული ელექტროდის ტემპერატურაზე .....	125
ნახ. 32. ნაწილაკების მინიმალური მოწყვეტის მუხტის დამოკიდებულებები, როდესაც ისინი ორიენტირებული არიან თავისი მცირე ნახევარდერძით ელექტრული ველის ვექტორის გასწვრივ .....	126
ნახ. 33. რუტილის ნაწილაკების ქრომირებული ელექტროდიდან მოწყვეტის ორმოცდაათპროცენტიანი დროის (ა) და მისი საშუალო კვადრატული გადახრის (ბ), დამოკიდებულება გარემოს სინესტეზე	129
ნახ. 34. რუტილის ნაწილების ქრომირებული ელექტროდიდან მოწყვეტის ორმოცდაათპროცენტიანი დროის (ა) და მისი საშუალო კვადრატული გადახრის (ბ) დამოკიდებულება გახურების ტემპერატურაზე .....	130

ნახ. 35. რუტილის ნაწილაკზე მოქმედი საწყისი დაწოლისძალის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე. ნაწილაკი ორიენტირებულია მცირე ნახევარდერძის ელექტრული ველის ვექტორის გასწვრივ .....	133
ნახ. 36. რუტილის ნაწილაკების ქრომირებული ელექტრო-დიდან მოწყვეტის 50%-იანი დროის (ა) და მისი საშუალო კვადრატული გადახრის (ბ) დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე .....	134
ნახ. 37. რუტილის ნაწილაკების ქრომირებული ელექტრო-დიდან მოწყვეტის დროის მუდმივას ორმოცდაათ-პროცენტიანი გადახრის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე .....	135
ნახ. 38. გრაფიტის საფენზე სხვადასხვა მინერალების დამუხტვის დროის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე .....	137
ნახ. 39. რუტილის ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე .....	138
ნახ. 40. რუტილის ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე .....	138
ნახ. 41. ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე .....	139
ნახ. 42. ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე .....	139
ნახ. 43. ნარჩენი მუხტის დამოკიდებულება განმუხტვის დროზე .....	141
ნახ. 44. გამზომი ჭიქის კონსტრუქცია .....	142
ნახ. 45. გამზომი კონდენსატორის ელექტრული სქემა დამცავ რგოლთან ერთად .....	143
ნახ. 46. მუხტის განაწილების ფუნქცია. გრაფიტის შემცველი საფენი	148
ნახ. 47. ელექტროდზე მდებარე ნაწილაკის ორიენტაცია ელექტრულ ველში .....	155

## მადლიერება

განსაკუთრებული პატივისცემა და მადლიერება მინდა გამოვხატო სამეცნიერო ხელმძღვანელის ფიზიკა-მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორის, პროფესორ ზურაბ ჩაჩხიანიასადმი, რომლის თანამოაზრობისა და თანადგომის გარეშე დოქტორანტურაში განსწავლა ჩემთვის ვერ იქნებოდა წარმატებული.

## შესავალი

ერთ-ერთ მნიშვნელოვან დარგს როგორც მსოფლიოში, ისე საქართველოში წარმოადგენს სასარგებლო წიაღისეულის მოპოვებისა და მისი გადამუშავების მრეწველობა. სულ უფრო და უფრო მეტი ახალი საბადოები საჭიროებს მოპოვებული წიაღისეულის გამდიდრებისა და მათი განცალკევების ახალი, უფრო დახვეწილი მეთოდების გამოყენებას.

ქვეყანაში დასმული ამოცანების წარმატებით გადაწყვეტა დიდად არის დამოკიდებული მომპოვებელი მრეწველობის წარმატებაზე. მადნეული წიაღისეულის ახალი საბადოების წარმოებაში ჩართვა ხშირად დაკავშირებულია მოპოვებული მინერალური ნედლეულის ხარისხის მკვეთრ გაუარესებასთან. ამასთან დაკავშირებით მადნეულის გამდიდრების პრობლემა ხდება ერთ-ერთი უმთავრესი ამოცანა. უკანასკნელ ხანებში გამდიდრების ტრადიციულ მეთოდებთან ერთად ინტენსიურად ვითარდება სეპარაციის ელექტრული მეთოდები [1-4].

არსებობს ელექტრული სეპარაციის მრავალი მეთოდი [2-4]. მათ შორის ყველაზე დიდი გავრცელება ჰპოვა მინერალური ნაწილაკების განცალკევებამ ელექტროგამტარობის მიხედვით. ამ პროცესის საფუძველს წარმოადგენს მინერალური ნედლეულის სხვადასხვა გამტარობის მქონე ნაწილაკებზე ისეთი მუხტის მიღება, რომლებიც ერთმანეთისგან განსხვავდებიან ან სიდიდით ან ნიშნით და შემდგომ მათი განცალკევება ელექტრულ ველში. ეს პროცესი მიმდინარეობს ჰაერის შემცველ გარემოში. ამ ტიპის სეპარატორებს, რომლებიც იყენებენ ზემოთაღწერილ პროცესს, წარმოადგენენ დახრილ ფირფიტოვანი და დოლური გვირგვინული ელექტროსტატიკური სეპარატორები.

მრეწველობაში ელექტრული სეპარაციის ფართო გამოყენების შესაძლებლობა ფერხდება ფიზიკური პროცესების და პირველ რიგში ნაწილაკების დამუხტვის პროცესების არასაკმარისი ცოდნით.



გამტარობის მიხედვით ელექტრულ სეპარატორებში ნაწილაკების დამუხტვა ხორციელდება ნაწილაკის დამუხტავ ელექტროდთან უშუალო კონტაქტის შედეგად. ამ პროცესს ეწოდება ინდუქციური დამუხტვა [1,3].

ნაწილაკების ელექტროდზე ქცევის ანალიზი გვიჩვენებს, რომ შესაძლებელია ნაწილაკის ელექტროდზე მდებარეობის ორი მდგომარეობა. ნაწილაკი შესაძლებელია ელექტროდზე იმყოფებოდეს უძრავ, მოსვენებულ მდგომარეობაში ან ელექტროდის მიმართ გადაადგილდებოდეს, რომლის დროსაც ის მუდმივ კონტაქტშია მასთან (მაგ. ნაწილაკის რხევა ელექტროდზე ან კიდევ ნახტომისებური გორვა მასზე, რომლის დროსაც ის პერიოდულად არის კონტაქტში ელექტროდთან). წინამდებარე სამუშაოში განიხილება ნაწილაკის ელექტროდზე მდებარეობის პირველი შემთხვევა (ამ შემთხვევის მნიშვნელობა საერთოა ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტის ყველა დანარჩენი შემთხვევისათვის). მეორეს მხრივ, მას აქვს უშუალოდ პრაქტიკული მნიშვნელობა დოლური სეპარატორებისათვის, რომელშიაც ნაწილაკების გადატანა ელექტრული ველის ზემოქმედების არეში ხდება დოლის მიერ.

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ლიტერატურული წყაროების ანალიზიდან ჩვენ შეიძლება გამოვყოთ სამი ძირითადი საკითხი: მისი თეორიული ანალიზი [1,3,9-31], ექსპერიმენტული მონაცემების აღწერა [32-44] და კვლევის მეთოდოლოგია [1,3,15-20,32,44,45].

მუხტის ცვლილება დროში წარმოადგენს ნაწილაკის დამუხტვის კინეტიკის მახასიათებელს. ნაწილაკის ინდუქციური დამუხტვის პროცესში მუხტის სიდიდის ცვლილების განხილვის დროს აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ აგრეთვე ის ძალები, რომლებიც დამუხტვის დროს მოქმედებენ ნაწილაკზე. ძირითად ძალებს წარმოადგენს სიმძიმის ძალა, ელექტრული ძალა (მისი სარკისებური ანარეკლის ძალასთან ერთად) და ნაწილაკის ელექტროდთან ურთიერთქმედების ძალა [6,7].

ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე გავლენას ახდენს მრავალი ფაქტორი, რომელთა შორის მნიშვნელოვანია თვით ნაწილაკის

მახასიათებლები (ზომა, ფორმა, სიმკვრივე, ელექტროფიზიკური პარამეტრები) და დამუხტვის ტექნოლოგიური პირობები (ელექტრული ველის დამაბულობა, გარემომცველი ჰაერის მახასიათებლები, ელექტროდის მასალა და სხვა).

თეორიულ წყაროებში ნაწილაკის ელექტროდზე დამუხტვის ანალიზის დროს მიღებულია დაშვება [24,25], რომ ნაწილაკს აქვს სწორი გეომეტრიული ფორმა(სფერული ან ნახევრადელიპსოიდური) და დამუხტვის პროცესში ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის საკონტაქტო წინაღობა წარმოადგენს მკაცრად მოცემულ სასრულ მნიშვნელობას (ხშირად იდეალიზირებულს). ამოცანა გადაწყვეტილია ამ კონტაქტური წინაღობის უსასრულოდ დიდი [24] და მისი სასრული მნიშვნელობისათვის [25]. მიღებული შედეგები საშუალებას გვაძლევენ აღვწეროთ დამუხტვის პროცესი, რომლის დროსაც შესაძლებელია წარმოვადგინოთ პროცესის ძირითადი კანონზომიერებები. მაგრამ, მიუხედავად ამისა, ლიტერატურულ წყაროებში არ არსებობს ის მონაცემები, რომლებიც საშუალებას მოგვცემდა გავეთვალისწინებინა ტექნოლოგიური ფაქტორების გავლენა ნაწილაკის დამუხტვაზე, ამიტომაც მათი გამოყენება პრაქტიკული მიზნებისათვის არის გამწვანებული. აქედან გამომდინარე, დიდი ყურადღება დაეთმო ამ პროცესის ექსპერიმენტული მეთოდებით კვლევას.

ლიტერატურული წყაროების მიხედვით ნაწილაკების დამუხტვის ექსპერიმენტული კვლევა ძირითადად სრულდებოდა სფერული ან მასთან მიახლოებული ფორმის ნაწილაკებზე. ეს მონაცემები ძალიან მწირია და საშუალებას არ გვაძლევენ გავითვალისწინოთ ის მრავალი ფაქტორები, რაზედაც დამოკიდებულია დამუხტვის პროცესი. ამ მონაცემების ძირითადი ნაკლოვანებები მდგომარეობს მასში, რომ ისინი ახასიათებენ ამ პროცესის რომელიმე ერთ მხარეს(ან მუხტს, ან მოწყვეტის დამაბულობას, ან ადგეზიის ძალას) და არ განიხილება ამ ფაქტორების გავლენების პრიორიტეტები მათი ერთდროული ზემოქმედების დროს. აქედან

გამომდინარეობს ის, რომ აქამდე არ არსებობდა საკმარისად სარწმუნო მონაცემები იმის შესახებ, თუ რამდენად შესაბამისობაშია დამუხტვის პროცესის თეორიული წარმოდგენები მათ ექსპერიმენტულად მიღებულ დამოკიდებულებებთან.

დამუხტვის პროცესის შესახებ ასეთი მონაცემების არარსებობის ერთ-ერთ ძირითად მიზეზს წარმოადგენდა ის, რომ გამოყენებული კვლევის ექსპერიმენტული მეთოდიკა საშუალებას არ იძლეოდა ჩატარებულიყო ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური სახის კვლევა. ასეთი მეთოდიკის შემუშავება საშუალებას მოგვცემს ჩავატაროთ ძირითადი პარამეტრების კვლევა, რომლებიც ახასიათებენ ინდუქციური დამუხტვის პროცესს (მუხტი, დამუხტვის დრო, ადგეზიის ძალა, მოწყვეტის ალბათობა), დავუკავშიროთ ისინი ნაწილაკების ფიზიკურ მახასიათებლებს და ტექნოლოგიურ პარამეტრებს.

ამრიგად, სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის კანონზომიერებების ექსპერიმენტული კვლევა და იმ რეკომენდაციების შემუშავება, რომლებიც უზრუნველყოფს გამტარობის მიხედვით ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების გაყოფის მაქსიმალურ ეფექტურობას.

ამ ამოცანის გადაწყვეტისათვის საჭიროა გადავჭრათ შემდეგი ამოცანები:

- ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდიკის შემუშავება;
- ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის თეორიული წარმოდგენების შესაბამისობის შემოწმება ექსპერიმენტულად მიღებულ დამოკიდებულებებთან;
- ინდუქციური დამუხტვისას ნაწილაკის მიერ მუხტის შეძენის პროცესში მისი ელექტროდთან კონტაქტის პირობების როლის ანალიზი;

- გამტარობის მიხედვით ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების დამუხტვის პროცესის რაციონალური ორგანიზაციის რეკომენდაციების ჩამოყალიბება;

სამუშაოში გამოყენებულია ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური კვლევის მეთოდი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გამოვავლინოთ ის პარამეტრები, რომლებიც გავლენას ახდენს ამ პროცესის მიმდინარეობაზე. ფართო ექსპერიმენტული კვლევის ჩატარების დროს გამოყენებული იყო ყველა ის ხელსაწყო, რომელიც საშუალებას გვაძლევდა ყოველმხრივი ანალიზის ჩატარებას და მიღებული მონაცემების შედარებას ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ცნობილ თეორიულ წარმოდგენებთან.

ჩატარებული კვლევის საფუძველზე ჩამოყალიბებული იქნა მეცნიერული სიახლე და პრაქტიკული რეკომენდაციები.

## I თავი

### ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში ნაწილაკთა ინდუქციური დამუხტვა. ლიტერატურის მიმოხილვა. კვლევითი სამუშაოების დაგეგმვა

#### 1.1. გამტარობის მიხედვით ინდუქციური დამუხტვის როლი და მნიშვნელობა ელექტროსტატიკური სეპარაციის პროცესებში

სასარგებლო წიაღისეულის გამდიდრების საქმეში ამჟამად ფართოდ გამოიყენება ელექტროსეპარაცია. ამ მიზნისათვის იყენებენ სხვადასხვა სახის ელექტროსეპარატორებს, რომელთა შორისაც შექმნილია მისი მრავალნაირი კონსტრუქციული სახესხვაობები.

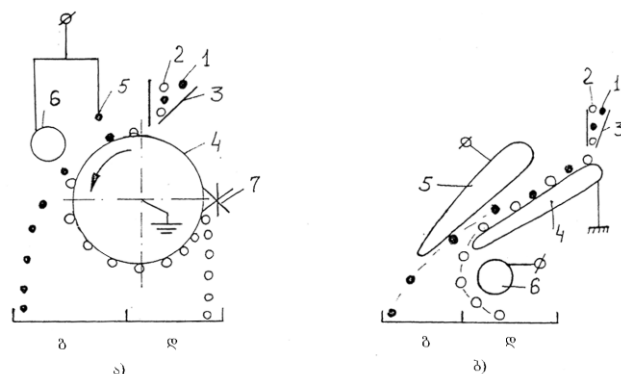
მიუხედავად ელექტროსეპარაციის მრავალი სახის მეთოდებისა, მათი მუშაობის პრინციპები დამყარებულია ზოგად საერთო სტადიებზე [1.5]. ეს საერთო სტადიებია ნაწილაკთა წინასწარი დამუხტვა, გადამუხტვა ან მათი სელექციური დამუხტვა, მოძრაობა ელექტრულ ველში და მათი განცალკევების შედეგად საბოლოო პროდუქტის მიღება.

ელექტრული სეპარაციის მეთოდები დაფუძნებულია მინერალების დამუხტულ ნაწილაკებზე ძლიერი ელექტრული ველის ზემოქმედებაზე. ამიტომაც გადამწყვეტი მნიშვნელობა ამ პროცესში ენიჭება იმას, თუ რამდენად ეფექტურად იქნება განხორციელებული ნაწილაკთა სელექციური დამუხტვა. სელექციური დამუხტვის პროცესი უმრავლეს შემთხვევაში ხორციელდება ნაწილაკთა ელექტროდთან კონტაქტის, ანუ ინდუქციური დამუხტვის შედეგად.

დამუხტვის ეს პრინციპი საფუძვლად უდევს პრაქტიკაში ფართოდ გავრცელებულ, როგორც გვირგვინულ ელექტროსტატიკურ დოლურ, ასევე დახრილ ფირფიტოვან ელექტროსტატიკურ სეპარატორებს.

დოლური სეპარატორის მოქმედების პრინციპი მდგომარეობს შემდეგში (იხ. ნახ. 1ა). მინერალთა ნაწილაკები, რომლებიც შედგებიან გამტარი 1 და არაგამტარი 2 ნაწილაკებისაგან, ბუნკერისაგან 3 მიეწოდებიან მბრუნავი დამიწებული დოლის ზედაპირს 4. მბრუნავი დოლი მის ზედაპირზე მოხვედრილ ნაწილაკებს გადაადგილებს ელექტრული ველის

ზემოქმედების არეში. გვირგვინული განმუხტვის მოქმედების არეში მოხვედრისას, რომელიც განხორციელებულია გვირგვინული მაღალი ძაბვის ელექტროდსა 5 და დამიწებულ დოლს 4 შორის, ნაწილაკები იძენენ ერთნაირი ნიშნის მუხტს, რომელიც შეესაბამება გვირგვინული განმუხტვის მაღალი ძაბვის ელექტროდის პოტენციალის ნიშანს. ამის შემდეგ ნაწილაკები გადაადგილდებიან მბრუნავი დოლის საშუალებით და მოხვდებიან ელექტროსტატიკური ველის ზემოქმედების არეში, რომელიც წარმოიქმნება ელექტროსტატიკური მაღალი ძაბვის ელექტროდსა 6 და დამიწებულ დოლს შორის. ამ არეში ნაწილაკები იწყებენ გადამუხტვას და იძენენ საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტს, ანუ ელექტროსტატიკური ელექტროდის პოტენციალის საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტს, ე.ი. გვირგვინულ ველში მიღებული მუხტის საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტს. ნაწილაკთა გადამუხტვის პროცესი ხორციელდება მათი ინდუქციური დამუხტვის შედეგად, რომელიც დამოკიდებულია თვით ამ ნაწილაკების გამტარობაზე. ნაწილაკები, რომლებიც ხასიათდებიან დიდი გამტარობით (გამტარები), სწრაფად გადამუხტებიან, მოწყდებიან დოლს და მოხვდებიან გამტარების მიმღებ გ ბუნკერში. ნაწილაკები, რომლებიც ხასიათდებიან ნაკლები გამტარობით (დიელექტრიკული ნაწილაკები), ვერ ასწრებენ გადამუხტვას, ეჭიდებიან დოლს და ჯაგრისის საშუალებით 7, სცილდებიან დოლს და ხვდებიან დიელექტრიკების მიმღებ ბუნკერში დ.



**ნახ. 1. ელექტროსეპარატორები**

ა - დოლური გვირგვინულ-ელექტროსტატიკური;

ბ - დახრილი ბრტყელი ელექტროსტატიკური;

• - გამტარი ნაწილაკები; ° - დიელექტრიკული ნაწილაკები

ანალოგიურია დახრილფირფიტოვანი ბრტყელი სეპარატორების მოქმედების პრინციპი (იხ. ნახ. 1ბ). სხვადასხვა გამტარობის მქონე ნაწილაკები 1, 2, ბუნკერიდან 3 ხვდებიან დამმუხტველ დამიწებულ ელექტროდზე 4. ამ ნაწილაკთა წინასწარი დამუხტვა ხორციელდება ამავე ელექტროდზე მათი სრიალის დროს ხახუნის პროცესში მოძრაობის დროს. ხახუნის შედეგად წინასწარ დამუხტული ნაწილაკები ხვდებიან ელექტროსტატიკური ველის ზემოქმედების არეში, რომელიც განხორციელებულია 5 მაღალი ძაბვის ელექტროდით და დამიწებული ელექტროდით 4.

ნაწილაკები 1 და 2 გადამუხტებიან ინდუქციური დამუხტვის პროცესის შედეგად. ნაწილაკები, რომლებიც ხასიათდებიან დიდი გამტარობით, სწრაფად გადამუხტებიან, მოწყდებიან ელექტროდს 4 და მოხვდებიან გამტარი ნაწილაკების მიმღებ ბუნკერში გ, ხოლო ის ნაწილაკები, რომლებიც ხასიათდებიან ნაკლები გამტარობით, ვერ ასწრებენ გადამუხტვას და მოხვდებიან დიელექტრიკული ნაწილაკების მიმღებ ბუნკერში დ.

ამრიგად, როგორც დოლურ, ასევე დახრილ სიბრტყით სეპარატორებში გამტარი ნაწილაკების დამუხტვისა და მათი ელექტროდიდან მოწყვეტის პროცესები, ხოლო არაგამტარი ნაწილაკების ელექტროდზე მიკვრის პროცესები და შესაბამისად ამ ნაწილაკთა განცალკევების მთლიანი პროცესი განისაზღვრება ინდუქციური დამუხტვით. ამის გამო ორგანიზებული განმუხტვის პროცესზე იქნება დამოკიდებული მინერალთა გაყოფის ხარისხი და შესაბამისად ელექტროსტატიკური სეპარაცია.

ელექტრულ სეპარატორებში ინდუქციური დამუხტვა ერთდორულად სხვა მოვლენებთან ერთად მიმდინარეობს. ეს მოვლენებია: ნაწილაკთა მოძრაობა სივრცეში, მათი მოძრაობის პროცესში მათზე ელექტრული ველის ზემოქმედება, ნაწილაკებსა და ელექტროდს შორის კონტაქტის ცვლილება, სხვა ნაწილაკების არსებობის გავლენა და სხვა. ამას ყველაფერს მივყავართ იქამდე, რომ გამოვავლინოთ თითოეული მათგანის გავლენა ამ პირობებში

და მათი ზეგავლენის პრიორიტეტების გამორკვევა, რაც ძალიან რთულ ამოცანას წარმოადგენს. ამის გამო, ამ მოვლენის უკეთესი წარმოდგენისათვის მიზანშეწონილია თითოეული ამ ზეგავლენის ცალ-ცალკე განხილვა.

ინდუქციური დამუხტვის პროცესი გაცილებით მარტივად მიმდინარეობს ჰორიზონტალურ ბრტყელ კონდენსატორში. ჰორიზონტალური ბრტყელი კონდენსატორი თავისი არსით წარმოადგენს იდეალიზირებულ ელექტროსეპარატორს, რომელშიც ზემოთ აღნიშნული მოვლენებიდან, რომლებიც მიმდინარეობენ რეალურ ელექტროსეპარატორში, რჩება მხოლოდ ნაწილაკთა დამუხტვა, მათი მოწყვეტა ელექტროდიდან და მოძრაობა ვერტიკალურად ზევით. მიუხედავად ამისა, ეს სრულებითაც არ ამცირებს ბრტყელი კონდენსატორის მნიშვნელობას ამ კვლევებისთვის, რადგანაც ნაწილაკთა დამუხტვა და მათი მოწყვეტა ელექტროდიდან გაყოფის პროცესის ძირითად საფუძველს შეადგენს.

ის, რომ ბრტყელ კონდენსატორში ადგილი აქვს მხოლოდ ნაწილაკთა დამუხტვას და ელექტროდიდან მათ მოწყვეტას, აადვილებს ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ანალიზს, ხოლო მისი კანონზომიერებების ცოდნა საშუალებას გვაძლევს გავითვალისწინოთ სხვა პროცესების ზეგავლენაც, რომელსაც ადგილი აქვს რეალურ ელექტროსეპარატორებში.

ინდუქტიური დამუხტვა, რომელიც გამოყენებულია სხვადასხვა მინერალთა ნაწილაკებზე სელექციური მუხტების მიღების საფუძველად, იმის საშუალებას იძლევა, რომ გამტარებლობის მიხედვით სეპარაციის ელექტრული მეთოდები ფართოდ იქნეს გამოყენებული სხვადასხვა სახის ელექტროსეპარატორებში. პრაქტიკულად ყველა მინერალი, რომელთა კუთრი გამტარებლობები განსხვავდებიან რამდენიმე რიგით, შესაძლებელია გაყოფილი იქნეს ელექტრული მეთოდებით. ასე მაგალითად, ამ მეთოდების საშუალებით ახორციელებენ გაყოფას [48] ისეთ ძნელადგამსაღიდერებელ მინერალთა კომპლექსებში, რომლებშიც შედიან



ტიტანო-ციროკონიუმის, ტყვია-ვოლფრამის, ტანტალ-ნიობიუმის, ციროკონიუმის და სხვა შემადგენლობათა კონცენტრატები. მსოფლიოს სხვადასხვა ქვეყანაში ეს პროცესები განხორციელებულია მრავალ სამრეწველო ტიპის დანადგარებში. მინერალთა გაყოფა მათი გამტარებლობის მიხედვით ელექტროსეპარატორების საშუალებით უფრო წარმატებით ხორციელდება ტიტანოშემცველ კონცენტრატებზე.

მიუხედავად ზემოთქმულისა, გამტარობის მიხედვით ელექტრული სეპარაციის შესაძლებლობები სრულებითაც არ არის ამოწურული. არ არსებობს იმის რწმენა, რომ ეს პროცესები მიმდინარეობს ოპტიმალური სახით. სირთულეები განსაკუთრებით მაშინ წარმოიქმნება, როდესაც წარმოიშობა ახალი საბადოების გამდიდრების აუცილებლობა ელექტროსეპარატორების საშუალებით. ამ დროს აუცილებელი ხდება ჩატარდეს დიდი მოცულობის ექსპერიმენტული, ლაბორატორიული და ნახევრადსამრეწველო სახის გამოკვლევები. ამ სიძნელეებისგან შესაძლებელია თავის დაღწევა, როდესაც ვიცით თუ როგორ მიმდინარეობს გაყოფის პროცესი და უპირველეს ყოვლისა ინდუქციური დამუხტვის პროცესი. მართლაც, ნაწილაკთა მოძრაობა ელექტრულ ველში შესწავლილია საკმარისად კარგად [1, 3, 47], ელექტრული ველის გაანგარიშებანი შესაძლებელია ჩატარდეს საკმარისი სიზუსტით [3, 48]. ელექტროსეპარაციის პროცესის განვითარებას აფერხებს დამუხტვის კანონების მრავალ ფაქტორებზე დამოკიდებულების არასაკმარისი ცოდნა. ამიტომ, პირველ რიგში აუცილებელია მიმოვიხილოთ ინდუქციური დამუხტვის შესახებ არსებული ლიტერატურული მონაცემები და შევაფასოთ, საკმარისია თუ არა ის ნაწილაკთა რაციონალური დამუხტვისათვის.

## 1.2. ელექტრული მუხტების როლი იმ ძალების წარმოქმნაში, რომლებიც მოქმედებენ ელექტროსეპარატორებში არსებულ ნაწილაკებზე

ელექტრული სეპარაცია, ისე როგორც ყველა პროცესი, რომლებიც მიმდინარეობს ელექტრონულ-იონურ ტექნოლოგიაში, დაფუძნებულია დამუხტულ ნაწილაკებზე ძლიერი ელექტრული ველის ზემოქმედებაზე. ამიტომაც ინდუქციური დამუხტვის განხილვისას აუცილებელია ამ პროცესის დროს წარმოშობილი ელექტრული ძალების გაანალიზება. ამ დროს მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული ის, რომ ელექტრული ძალები მოქმედებენ ერთდოულად მექანიკურ ძალებთან ერთად და ზოგადად ნაწილაკზე მოქმედი რეზულტატური ძალა განისაზღვრება როგორც ამ ძალების ჯამი. ის განსაზღვრავს ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობას და მის შემდგომ მოძრაობას, ე.ი.

$$\sum F_{მოწ.ი} \geq \sum F_{მიკ.ი} ,$$

სადაც  $F_{მოწ.ი}$  - არის ის ძალა, რომელიც ცდილობს ნაწილაკის მოწყვეტას ელექტროდიდან;

$F_{მიკ.ი}$  - არის ის ძალა, რომელიც ცდილობს ნაწილაკის მიკვრას ელექტროდთან.

ეს წარმოქმნილი ძალები განსაზღვრავენ ნაწილაკის შემდგომ მოძრაობას ელექტრულ ველში და მათ დაყოფას ფრაქციებად, რაც გამოიხატება მოძრაობის განტოლებით

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}$$

სადაც  $m$  - არის ნაწილაკის მასა;  $\vec{v}$  - არის ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარის ვექტორი;  $\sum \vec{F}$  - ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ვექტორული ჯამი, რომელიც მოქმედებს მასზე ელექტროდიდან მოწყვეტის შემდეგ.

განვიხილოთ, თუ რა ძალები მოქმედებენ ნაწილაკზე დამუხტვის პროცესში და მისი მოძრაობის დროს.

1. ეს არის სიმძიმის ძალა  $F_g$ , რომელიც განისაზღვრება შემდეგნაირად

$$F_g = mg \sin \alpha$$

სადაც  $g$  - არის თავისუფალი ვარდნის აჩქარება;  $\alpha$  - ზედაპირის დახრის კუთხე, რომელზეც იმყოფება ნაწილაკი, მაგალითად დოლის მობრუნების კუთხე.

სფერული ფორმის ნაწილაკისთვის გვექნება

$$F_g = \frac{4}{3} \pi a^3 \gamma_n g \sin \alpha ,$$

სადაც  $a$  - არის სფეროს რადიუსი,  $\gamma_n$  - ნაწილაკის სიმკვრივე.

$\alpha$  კუთხის ცვლილებებზე და მოკიდებული სიმძიმის ძალის მდგენელი, რომელიც ნაწილაკს მიაკრავს ელექტროდთან (დოლთან) ან მოწყვეტს მისგან. დახრილ ბრტყელ სეპარატორებში ეს ძალა ყოველთვის მიაკრავს ნაწილაკს ელექტროდთან.

2. ცენტრისკენული ძალა ნაწილაკზე მოქმედებს მხოლოდ მაშინ, როდესაც ის იმყოფება მბრუნავ ელექტროდზე

$$F_G = \frac{2mW_{\text{კლ}}^2}{D_{\text{კლ}}}$$

სადაც  $W_{\text{კლ}}$  - არის ელექტროდის კუთხური სიჩქარე;  $D_{\text{კლ}}$  - არის წრეწირის დიამეტრი რომლის გარშემო მოძრაობს ნაწილაკი მისი ბრუნვისას.

თუ ნაწილაკი არ ბრუნავს ელექტროდზე ელექტროდთან ერთად, მაშინ ეს ძალა ნულის ტოლია.

ადგეზიის ძალა (ანუ ნაწილაკის ელექტროდთან მიწებების ძალა)  $F_{\text{ადგ}}$  [6,7]. ეს ძალა განისაზღვრება როგორც ნაწილაკისა და ელექტროდის თვისებებით, ასევე იმ გარემოს მდგომარეობით, რომელშიც მიმდინარეობს ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტი.

3. ელექტროსეპარაციის პროცესზე ადგეზიის ძალების განსაკუთრებულ როლზე მიუთითებენ ელექტროსეპარაციის პუბლიკაციის მრავალი ავტორები [2-4]. ისინი აღნიშნავენ, რომ ადგეზიის ძალები განაპირობებენ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის სხვადასხვა პირობებს და ამით შესაბამისად აუარესებენ გაყოფის პროცესს, ანუ ის წარმოადგენს ხელისშემშლელ ფაქტორს. მიუხედავად ამისა, ცნობილია

ტრიზოდგეზიური სეპარაციის მეთოდი [2,8], სადაც ადგეზიის ძალა წარმოდგენს ძირითად მოქმედ ძალას, რომელიც განაპირობებს ნაწილაკთა გაყოფას.

მიუხედავად ამისა, ელექტროსეპარაციის შესახებ შრომებში ადგეზიის ძალების კვლევა არ ხდება, ხოლო ის ინფორმაცია, რომელიც არსებობს ლიტერატურაში, დაფუძნებულია სეპარაციისა და პირობების საბოლოო შედეგების ფიქსაციაზე, რომლის დროსაც მიმდინარეობს ნაწილაკების გაყოფა. ამავე დროს სეპარაციის ოპტიმალური პროცესის წარმართვისათვის ძალიან მნიშვნელოვანია ვიცოდეთ ადგეზიის ძალების ხარისხობრივი და რაოდენობრივი მახასიათებლები. ამიტომ პირველ რიგში საჭიროა განვიხილოთ ადგეზიის ძალების შესახებ ლიტერატურული მონაცემები [6,7]. ეს მონაცემები წარმოდგენილია ქვემო თავში.

4. ძალა, რომელიც განაპირობებულია ელექტრული ველის განაწილების არაერთგვაროვნებით (ანუ პონდერომოტორული ძალა)  $F_E$ . ჰაერში მისი განაგარიშებისათვის გამოიყენება შემდეგი გამოსახულება:

$$F_E = 4\pi\epsilon_0 a^3 \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} E \text{ grad } E,$$

სადაც  $\epsilon_0$  - დიელექტრიკული მუდმივაა;  $\epsilon$  - ნაწილაკის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა;  $E$  - ელექტრული ველის დამაბულობა.

ეს ძალა განისაზღვრება [3] ელექტრული ველის დამაბულობის არაერთგვაროვნების ხარისხით და ნაწილაკის ზომებით. ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ეს ძალა ნულის ტოლია.

5. ძირითად განმსაზღვრელ ძალას, რომელიც მოქმედებს ელექტრულ სეპარატორებში, წარმოდგენს ელექტრული ველის ზემოქმედების ძალა დამუხტულ ნაწილაკზე, ანუ კულონური ძალა. პირველი მიახლოებით ის შეგვიძლია ჩავწეროთ როგორც

$$E_j = E \cdot q$$

სადაც  $q$  - არის ნაწილაკის მუხტი.

ამ მუხტის ანალიზისას, როდესაც ნაწილაკი მდებარეობს ელექტროდზე, ან მის მახლობლობაში, აუცილებელია სარკისებური ასახვის ძალის  $F_{s.a.}$

გათვალისწინება, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე ელექტროდის მიმართულებით.

იმ ძალებისაგან, რომლებიც მოქმედებენ ელექტროსეპარატორში, ყველაზე უფრო ძნელად განსასაზღვრია ადგეზიისა და კულონური ძალები. ელექტრული ძალების გაანგარიშებები დაკავშირებულია ნაწილაკის ელექტროდზე დამუხტვის კინეტიკასთან.

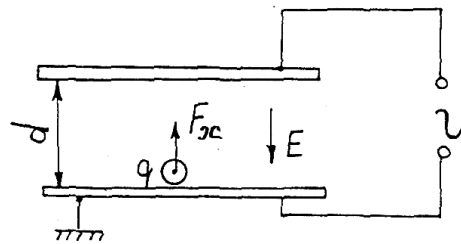
ელექტროსეპარატორში მუხტებისა და ძალების წარმოშობა მნიშვნელოვნად განისაზღვრება იმ პირობებით, რომელშიდაც იმყოფება ნაწილაკი და პირველ რიგში თუ როგორია ელექტრული ველის განაწილება, რომელიც განისაზღვრება ელექტროდების სისტემით და ძაბვის დონით. მიუხედავად ამისა, ამ პროცესის ანალიზის სიმარტივისათვის შესაძლებელია განხილულ იქნას პროცესის მიმდინარეობა ერთგვაროვან ელექტრულ ველში. ამის დასაბუთებას შეიძლება წარმოადგენდეს ის, რომ ნაწილაკს გააჩნია მცირე ზომები და მისი ზომების ცვლილების ფარგლებში ელექტროსეპარატორის ელექტრული ველი, რომელიც ზოგადად მცირედ იცვლება, შეიძლება ჩავთვალოთ ერთგვაროვანად. ერთგვაროვან ელექტრულ ველში კი ექსპერიმენტების წარმოება მნიშვნელოვნად ადვილდება. ეს კი საშუალებას გვაძლევს შევიმუშაოთ ძირითადი კანონზომიერებანი, რომლის საფუძველზე შესაძლებელია ჩავატაროთ ნაწილაკების ქცევის ანალიზი უკვე ელექტრული სეპარატორების სხვადასხვა ელექტრული ველებისათვის. ამ მდგომარეობის გათვალისწინებით, წინამდებარე ნაშრომში, ძირითადი ყურადღება დათმობილი აქვს ნაწილაკის ქცევის ანალიზს ბრტყელი კონდენსატორის ელექტრულ ველში.

ელექტრულ სეპარატორებში, რომელშიც წარმოებს ნაწილაკების განცალკევება გამტარობის მიხედვით, როგორც წესი, გამოიყენება მუდმივი ელექტრული ველი, რომელიც სეპარატორის მუშაობის პროცესში არ იცვლება. ამის გამო, ელექტრული ძალების ყველა ცვლილება და მინერალთა ნაწილაკების ქცევის მართვის შესაძლებლობები დაკავშირებულია ნაწილაკის მუხტის ცვლილებასთან. ამის გამო, ამ

ექსპერიმენტებში ძირითადი ყურადღება დათმობილი უნდა ექნეს ნაწილაკის ელექტროდზე დამუხტვის ანალიზს.

### 1.3. ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის თეორიული კანონზომიერებანი

ნაწილაკის ელექტროსტატიკური ინდუქციის (ინდუქციური დამუხტვა) საშუალებით დამუხტვის არსი მდგომარეობს შემდეგში: თუ ნაწილაკს მოვათავსებთ მრტყელი კონდენსატორის ერთ-ერთ ელექტროდზე (ჩვენს შემთხვევაში ქვედა ელექტროდზე ნახ. 2), რომელზედაც მოდებულია პოტენციალთა სხვაობა  $U$ , მაშინ ელექტროდის მხრიდან დაიწყება მუხტების გადასვლა ნაწილაკებზე. ამის შედეგად ნაწილაკი ღებულობს ელექტროდის პოტენციალს და ამ პოტენციალის შესაბამის  $q$  მუხტს.



ნახ. 2. ნაწილაკი ბრტყელ კონდენსატორში

გარეშე ველი  $E = \frac{U}{d}$ , სადაც  $d$  - არის მანძილი ელექტროდებს შორის,

რომელიც ცდილობს ნაწილაკი მოწყვიტოს ელექტროდიდან. თუ ეს ძალა გადააჭარბებს იმ ძალას, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე და აწვება მას ელექტროდისკენ, მაშინ ნაწილაკი მოწყდება ელექტროდს და გაფრინდება საწინააღმდეგო ელექტროდისკენ, რომლის დროსაც მას გააჩნია ელექტროდიდან მოწყვეტის მომენტის შესაბამისი  $q$  მუხტი.

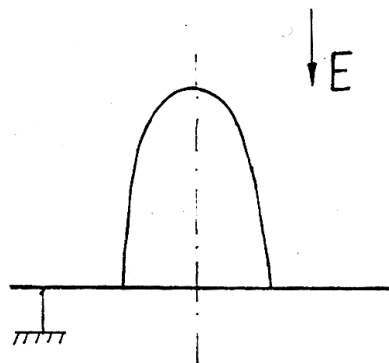
ერთგვაროვან ელექტრულ ველში დამუხტვის შედეგად ნაწილაკის მიერ მიღებული მუხტისა და მასზე მოქმედი ძალის ანგარიში განხილული იყო მრავალი ავტორის მიერ [9-33].

ამ გაანგარიშებისას განხორციელდა ზოგიერთი დაშვებები. ნაწილაკს აქვს სწორი ფორმა: სფეროსებური, ნახევრადსფეროსებური და ნახევრადელიფსური. ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტი მუდმივია და დამუხტვის პროცესის დროს არ იცვლება: ის ან იმდენად მცირეა, რომ შეიძლება მისი უგულებელყოფა, ან ნაწილაკის ზედაპირულ და მოცულობით წინაღობასთან შედარებით უსასრულოდ დიდია. ამ პირობების გათვალისწინებით მიღებულია მუხტის ცვლილების სიჩქარისა და იმ ელექტრული ძალის გამოსახულება, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე. ყველაზე უფრო დაწვრილებით ეს ამოცანა გადაწყვეტილია შრომებში [29-30], რომლებიც ამავედროულად განაზოგადებენ ყველა ცნობილ შედეგებს. ეს შრომებია აღებული მუხტისა და ელექტრული ძალის საანგარიშო გამოსახულების საფუძვლად, რომელიც გამოყენებულია შემდგომი ანალიზისთვის.

ნახევრად ელიფსოიდალური ნაწილაკის დამუხტვის კინეტიკისთვის (იხ. ნახ.3), რომელთა ნახევარღერძების შეფარდებაა  $a \geq b \geq c$ , დიელექტრიკული შეღწევადობაა  $\epsilon_1$ , ხოლო მოცულობითი გამტარებლობა  $\gamma_1$ ,  $E$  დაძაბულობის ელექტრულ ველში სამართლიანია შემდეგი გამოსახულება

$$q = q_{\text{ზღ}} - (q_{\text{ზღ}} - q_0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

სადაც  $q_0$  - ნაწილაკის საწყისი (წინასწარი) მუხტია;  $q_{\text{ზღ}}$  - ნაწილაკის ზღვრული მუხტია;  $\tau$  - ნაწილაკის დამუხტვის დროის მუდმივია,  $t$  - მიმდინარე დროა.



ნახ. 3. ნახევრადელიფსური ნაწილაკი ელექტროდზე

ნაწილაკის ზღვრული მუხტის მნიშვნელობა ელექტროსტატიკურ ველში ასე განისაზღვრება:

$$q_{\text{ზღ}} = -\frac{\pi \varepsilon_0 b c E}{d_a}, \quad (2)$$

სადაც  $d_a$  - ნაწილაკის დეპოლარიზაციის კოეფიციენტი [1];  $E$  - ელექტრული ველის დამაბულობაა, რომლის ვექტორი მიმართულია  $a$  ნახევარდერძის პარალელურად დამუხტველი ელექტროდისადმი.

დამუხტვის პროცესის დროის მუდმივა განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებით

$$\tau = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 d_a + 1 - d_a}{\gamma_1 d_a} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1}{\gamma_1} + \frac{\varepsilon_0 (1 - d_a)}{\gamma_1 d_a} \quad (3)$$

უმრავლეს პრაქტიკულ შემთხვევებში, რომლებიც დამახასიათებელია იმ ნაწილაკებისათვის, რომელთა გაყოფა ხდება ელექტროსეპარატორებში შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1}{\gamma_1} \quad (3, a)$$

[30]-ში მოცემულია გამოსახულება, რომელიც გამოხატავს ნაწილაკის მუხტს ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტური წინაღობის გათვალისწინებით, როცა  $q_0=0$

$$q = q_{\text{ზღ}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) + q_{\text{ზღ}} \frac{1 - d_a}{k} \cdot \frac{1}{\frac{\tau_k}{\tau} - 1} \left( e^{-\frac{t}{\tau}} - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \quad (4)$$

სადაც  $\tau_k$  - დროის მუდმივაა, რომელიც განპირობებულია კონტაქტური წინაღობით;

ამ შემთხვევისათვის მოცემულია გამოსახულება, რომელიც გამოხატავს ნაწილაკზე მოქმედ ძალას

$$\frac{F_k}{\pi b c \varepsilon_0 E^2} = 0,5 \alpha^2 (S^2 - I) + \alpha (1 - I - \varepsilon_1 S + \varepsilon_1 I) \left( \frac{E_1}{E} \right) + 0,5 (\varepsilon_1 - 1)^2 (1 - I) \left( \frac{E_1}{E} \right)^2, \quad (5)$$



სადაც  $\frac{E_1}{E} = (1 + \alpha d_a) / K$  ,  $K = 1 + d_a(\epsilon_1 - 1)$ ,  $\alpha = \frac{q_1}{\pi bc \epsilon_0 E_k}$  ,  $q_1 = \frac{q}{1 - S}$  ,

$I = \frac{1 - l^2}{e^2} \left( \frac{2 \ln a/b}{e^2} - 1 \right)$  - ეს არის ამობურცული ბრუნვის ელიფსოიდისათვის

$a > b = c$  ექსცენტრისიტეტით  $e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$  .

$I = \frac{1}{e^2} \left[ 1 - 2 \frac{1 - e^2}{e^2} \ln \frac{b}{a} \right]$  - ეს არის გაბრტყელებული ბრუნვის

ელიფსოიდისათვის  $a < b = c$  ექსცენტრისისიტეტით  $e = \sqrt{1 - \frac{a^2}{b^2}}$  .

სიდიდე  $S$  ახასიათებს მუხტის გაჟონვის ხარისხს კონტაქტური წინაღობის გავლით და ის იცვლება ნულიდან ერთამდე. როდესაც  $S = 0$ , მაშინ ადგილი აქვს სუფთა ინდუქციურ დამუხტვას, ხოლო როდესაც  $S = 1$ , მაშინ ადგილი აქვს ნაწილაკის ბიპოლარულ დამუხტვას.

გამოსახულებაში (5) გათვალისწინებულია სარკისებრი ასახვის წარმოშობის ძალა  $F_{ს.ს.}$  (5)-ში მუხტის მნიშვნელობის (1) ჩასმის შედეგად მივიღებთ იმ ძალის მნიშვნელობას, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე დროის ნებისმიერ მომენტში.

გამტარი სფეროსათვის [10]-ში მიღებული იქნა ზღვრული მუხტის გამოსახულება

$$q_{ზღ} = 4\pi\epsilon_0 \frac{\pi^2}{6} Er^2, \tag{6}$$

სადაც  $r$  - არის სფეროს რადიუსი.

აქვე მოცემულია გამოსახულება, რომლითაც განისაზღვრება ის ძალა, რომელიც მოქმედებს ზღვრულ მუხტამდე დამუხტულ ნაწილაკზე

$$F_{ელ} = 0,83Eq_{ზღ} \tag{7}$$

რიცხვითი მნიშვნელობა 0,83 ითვალისწინებს ნაწილაკის ზღვრული მუხტის სარკისებური ასახვის შესაბამისი ძალის ზეგავლენას ამავე ნაწილაკზე.

#### 1.4. ადგეზიის ძალის თეორიული წარმოდგენის შეზღუდულობა

ნაწილაკის ელექტროდთან ადგეზიის ძალა (მიწებების ძალა) განპირობებულია ნაწილაკისა და ელექტროდის ერთმანეთთან კონტაქტური ურთიერთქმედებით, ან კიდევ მისი მიახლოებისას ელექტროდთან ძალიან მცირე მანძილზე. ეს ძალა წარმოიშობა სხვადასხვა მექანიზმების შედეგად. ესენი არიან - მოლეკულური ურთიერთქმედება, ელექტრული ძალები და კაპილარული ძალები.

ნაწილაკსა და ელექტროდის ბრტყელ ზედაპირს შორის წარმოშობილი მოლეკულური ურთიერთქმედება წარმოადგენს მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების იმ ძალას, რომელიც თავს იჩენს მხოლოდ ნაწილაკის დიამეტრის ერთიდან რამოდენიმე ასეულამდე მანძილზე. ადგეზიის ძალის ამ შემადგენლის მნიშვნელობების შეფასება, რომელიც მოყვანილია [7]-ში ადასტურებენ მის მნიშვნელოვან როლზე ადგეზიის ძალის ჩამოყალიბებაში.

მაკროსხეულებისათვის მოყვანილი მოლეკულური ურთიერთქმედების თეორია, რომელიც შექმნილია კვანტური ელექტროდინამიკის საფუძველზე, გვაძლევს [6, 7] გამოსახულებას. ამ ძალისათვის, რომელიც სამართლიანია სფერული ფორმის ნაწილაკის ურთიერთქმედებისთვის ბრტყელ ზედაპირზე:

$$F_{\text{მოლ.}} = \pi a \frac{A}{H^n}$$

სადაც  $A$  - ურთიერთქმედების მუდმივაა;  $H$  - მანძილი (ღრეჩო) ნაწილაკსა და ზედაპირს შორის;  $n$  - ხარისხის მაჩვენებელი, რომელიც იმისდამიხედვით, თუ რა სიდიდისაა სხეულებს შორის საკონტაქტო მანძილი იცვლება 2-დან 3-მდე.

ზოგადად, მოლეკულური ურთიერთქმედების ძალა დამოკიდებულია ღრეჩოს ზომეზე, საკონტაქტო ფართობსა და კონტაქტში არსებულ სხეულთა ბუნებაზე. რეალური ნაწილაკებისათვის ეს მონაცემები სრული მოცულობით უცნობია. ამის გამო ძალის ამ შემადგენელი ნაწილის

განგარიშება ვერ ხერხდება. ექსპერიმენტალური გზით  $A$  და  $n$  პარამეტრების მცდელობების განსაზღვრას მივყავართ მიღებული მონაცემების ძალიან დიდ ფარგლებში ცვლილებამდე. ასე მაგალითად, სხვადასხვა პირობებში  $A$  მუდმივას მნიშვნელობა იცვლება საზღვრებში  $0,1 \cdot 10^{-12}$  ერგი-დან  $32 \cdot 10^{-12}$  ერგ-მდე. ( $0,1 \cdot 10^{-19} \div 32 \cdot 10^{-19}$  ჯ). ეს დაკავშირებულია გაზომვების სირთულეებზე და ადგეზიის ძალის მრავალრიცხოვანი ფაქტორების დამოკიდებულებაზე. ადგეზიის ძალის მოლეკულური შემდგენი დამოკიდებულია ნაწილაკის ფორმაზე, მისი ზედაპირის მდგომარეობაზე, განსაკუთრებით კი მისი ზედაპირის დასველებადობაზე, სიბრტყის ზედაპირის უსწორმასწორობის ხარისხზე და ნაწილაკის ზომეებზე. ნაწილაკის ზომეების გაზრდასთან ერთად იზრდება მისი კონტაქტის ფართობი ზედაპირთან, ამიტომაც ადგეზიის ძალის მოლეკულური მდგენელი პროპორციულია ნაწილაკის რადიუსის.

ადგეზიის ძალის მეორე მდგენელს წარმოადგენს კაპილარული ძალა. ეს ძალა წარმოიშობა მაშინ, როდესაც ნაწილაკსა და ზედაპირის ღრეჩოს შორის წარმოიქმნება თხევადი გარემო. თხევადი ფენა წარმოიქმნება ორთქლის კონდენსაციის შედეგად, ამის გამო ადგეზიის ძალის კაპილარული მდგენელი თავს იჩენს მაშინ როდესაც ფარდობითი ტენიანობა აღემატება 65%-ს. ღრეჩოში კონდენსირებული სითხის წარმოქმნას სჭირდება გარკვეული დრო, ამიტომ ეს მდგენელი თავს იჩენს მხოლოდ კონტაქტის წარმოშობიდან გარკვეული დროის შემდეგ. ამ ფენის დიდი სისქის წარმოშობის შემთხვევაში მან შეიძლება შეასრულოს ნაწილაკის ზედაპირიდან განცალკევების როლი, რასაც შეიძლება მოჰყვეს ადგეზიის ძალის შემცირება. ამ ფენის მცირე სისქის შემთხვევაში კაპილარული მდგენელი ემატება მოლეკულურ მდგენელს. მეორე შემთხვევა შედარებით ძლიერია და ტენიანობის გაზრდასას ვაკვირდებით, რომ იზრდება ადგეზიის ძალა. ადგეზიის ძალის კაპილარული მდგენელისათვის გამოიყენება გამოსახულება [7].

$$F_{კაპ.} = 4\pi\sigma a \cos \theta$$

სადაც  $a$  - სფერული ნაწილაკის რადიუსია;  $\sigma$  - წყლის ზედაპირული გაჭიმულობის კოეფიციენტი;  $\theta$  - დასველებადობის გვერდითი კუთხე. ადგეზიის ძალის კაპილარული მდგენელის გაანგარიშებანი დამაკმაყოფილებლად ეთანხმება ექსპერიმენტალურ მონაცემებს, თუმცა ამ უკანასკნელში შეინიშნება ერთიდაიგივე ზომის ნაწილაკებისათვის ამ ძალის მნიშვნელოვანი გაზრდა. ადგეზიის ძალის კაპილარული მდგენელი ნაწილაკის ზომების პროპორციულია.

ადგეზიის ძალის ელექტრული მდგენელი წარმოიშობა კონტაქტურ პოტენციალთა სხვაობის წარმოქმნის შედეგად, რომელიც განისაზღვრება კონტაქტში მყოფი სხეულების ელექტრონების გამოსვლის მუშაობის სხვადასხვაობასთან. ეს ძალა შესაძლებელია განსაზღვრულ იქნას შემდეგი ფორმულის საშუალებით:

$$F_{\text{el}} = \frac{\sigma^2 \cdot S}{2\varepsilon_0}$$

სადაც  $\sigma$  - არის ორმაგი ელექტრული ფენის მუხტების სიმკვრივე,  $S$  - ნაწილაკის ზედაპირთან კონტაქტის ფართობი;  $\varepsilon_0$  - ელექტრული მუდმივა.

ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის ღრეჩოში სითხის წარმოშობის შემთხვევაში კონტაქტურ პოტენციალთა სხვაობა მცირდება, ამიტომ გარემომცველ გარემოს დიდი ტენიანობის შემთხვევაში ადგეზიის ძალის ელექტრული მდგენელი შეიძლება უგულვებელყოფილი იქნას.

ნაწილაკებზე, რომლებიც დამუხტვის პროცესში იძენენ ჭარბ მუხტს, მოქმედებენ სარკისებური ასახვის ელექტრული ძალები, კულონური ურთიერთქმედების ძალა და ძალა, რომელიც გამოწვეულია ნაწილაკის პოლარიზაციით. ეს ძალები ადგეზიის ძალების რიცხვში არ განიხილება და ისინი გათვალისწინებულია ცალკე.

ამრიგად, მოყვანილი მონაცემები ადასტურებენ, რომ ადგეზიის ძალის გაანგარიშება ვერ ხერხდება, თუმცა ეს მონაცემები საშუალებას გვაძლევს გამოვაკლინოთ ის ძირითადი ფაქტორები, რომლებიც განსაზღვრავენ ადგეზიის ძალას. მათ მიეკუთვნება გარემოს მახასიათებლები - ჰაერის ტემპერატურა და ტენიანობა, ნაწილაკისა და ელექტროდის ზედაპირის

მდგომარეობა, ნაწილაკის ელექტროდზე დაწოლის ძალა. ადგეზიის ძალაზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ნაწილაკის ზომები. თუმცა, არსებული მონაცემები არ იძლევიან საშუალებას ერთმნიშვნელოვნად განვსაზღვროთ ეს დამოკიდებულება. ზოგიერთ გამოკვლევებში ადგეზიის ძალა ზომების პროპორციულია, ზოგიერთში კი უკუპროპორციული. ალბათ ჰიპოტეტურ დამოკიდებულებად შეიძლება მივიჩნიოთ, რომ ნაწილაკის ზომების ზრდასთან ერთად ადგეზიის ძალა თავდაპირველად მცირდება, შემდეგ კი გაივლის რა მინიმუმს იწყებს ზრდას.

რეალურ პირობებში, ნაწილაკის ყოველი გარკვეული კონტაქტისას ელექტროდთან, კონტაქტის ჩამოყალიბების პროცესი შეიძლება განხორციელდეს სხვადასხვანაირად, შესაბამისად, ჯამური ადგეზიის ძალის შექმნის პროცესში შესაძლებელია მისმა მდგენელმა ძალებმა სხვადასხვა მნიშვნელობები მიიღოს, ამიტომაც არის რომ ადგეზიის ძალის მნიშვნელობები ხასიათდება დიდი გაბნევით. ელექტროსეპარაციის თვალსაზრისით ადგეზიის ძალის დასახასიათებლად ყველაზე უფრო მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ ნაწიკალის ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა, რომელიც შესაძლებელია განისაზღვროს როგორც ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების რიცხვის ფარდობა საწყისი რაოდენობის ნაწილაკებთან, რომლებიც განიცდიან დამუხტვას ელექტროდზე. წინამდებარე ნაშრომში გამოყენებულია ზუსტად ეს მახასიათებელი.

თუმცა ადგეზიის ძალის ასეთი მახასიათებელი არ წარმოადგენს სრულს. სხვადასხვა ფაქტორების ადგეზიის ძალაზე ძლიერ გავლენას მივყავართ იქამდე, რომ ადგეზიის ძალა წარმოადგენს ალბათურ სიდიდეს. ამის გამო მისი უფრო სრული მახასიათებელი იქნება ადგეზიის ძალის განაწილების ფუნქცია, მისი მნიშვნელობების მიხედვით  $F(F_{ადგ})$ , რომელიც განსაზღვრავს კონტაქტის პროცესში იმ ძალის წარმოშობის ალბათობას, რომლის მნიშვნელობა იქნება უფრო ნაკლები, ვიდრე ეს მნიშვნელობა.

[7]-ში მითითებულია, რომ ასეთი ფუნქცია შესაძლებელია აღწერილი იქნას ნორმალური ლოგარითმული განაწილებით:

$$F = \int_{F_{\min}}^{F_{\max}} f(F_{\text{აღვ}}) dF_{\text{აღვ}} = \int_{F_{\min}}^{F_{\max}} \frac{1}{F_{\text{აღვ}} \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\lg F_{\text{აღვ}} - \lg F_{50})^2}{2\sigma^2}\right] dF_{\text{აღვ}}$$

ამ დამოკიდებულებას, რომელიც აგებულია ლოგარითმულ-ალბათურ კოორდინატებში, აქვს წრფივი ხასიათი. ის ხასიათდება მედიანით, ანუ ყველაზე ალბათური მნიშვნელობით, რომელიც ტოლია 50%-ის და საშუალოკვადრატული გადახრით, რომელიც ტოლია  $\sigma = \ln F_{50} - \ln F_{15.9}$ , სადაც  $F_{15.9}$  არის ადგეზიის ძალა, რომლის ალბათობა ტოლია 15,9%-ის.

### 1.5. ინდუქციური დამუხტვის თეორიული მოდელი, რომელიც დაფუძნებულია თანამედროვე წარმოდგენებზე

არსებული ლიტერატურული მონაცემები საშუალებას იძლევა წარმოვადგინოთ თუ როგორ მიმდინარეობს ინდუქციური დამუხტვის პროცესი და ამ პროცესის მიმდინარეობა აღწეროთ შესაბამისი გამოსახულებებით, რაც მისი გაანგარიშების საშუალებას იძლევა.

ნაწილაკი იმყოფება ელექტროდზე მისი მუდმივი კონტაქტური წინაღობით. ელექტრული ველის ჩართვისას ნაწილაკი საწყის მომენტში განიცდის პოლარიზაციას. მის ბოლოებზე ჩნდება ბმული მუხტები. ისინი ქმნიან ელექტრულ ველს ნაწილაკის შიგნით. გარეშე ელექტრული ველი იწვევს თავისუფალი მუხტების ნაკადს. ამის შემდეგ ელექტრული ველი ნაწილაკის შიგნით თანდათან მცირდება და ბოლოს დამუხტვა წყდება. ამ ჭარბი მუხტების მატების ინტეგრალური (ჯამური) პროცესი აღიწერება ექსპონენციალური დამოკიდებულებით (1).

მუხტის გადამტანების გადატანის დრო განისაზღვრება ნაწილაკის  $\gamma$  გამტარობით და მისი დიელექტრიკული შეღწევადობით  $\epsilon$ . თავისუფალ მუხტების გადატანა მიმდინარეობს ნაწილაკისა და ელექტროდის ზედაპირული კონტაქტის საშუალებით. ამის გამო დამუხტვის პროცესისათვის განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება კონტაქტური

წინააღმდეგობის სიდიდეს  $R_j$ . დამუხტვის კინეტიკა კონტაქტური წინააღმდეგობის გათვალისწინებით შესაძლებელია გაანგარიშებულ იქნას (4)-ის საშუალებით. ამასთან ერთად, როგორც თეორიული ანალიზიდან ჩანს (4), თუ კონტაქტური წინააღმდეგობა ნაწილაკის წინააღმდეგობასთან შედარებით მცირეა, მაშინ პროცესი განისაზღვრება ნაწილაკის გამტარობით და დროის მუდმივა განისაზღვრება (3) გამოსახულებით. თუ კონტაქტური წინააღმდეგობა  $R_j$  დიდია ნაწილაკის წინააღმდეგობასთან შედარებით, მაშინ დამუხტვის პროცესი არ არის დამოკიდებული ნაწილაკის გამტარობაზე. მაგრამ, როგორც წესი კონტაქტური წინააღმდეგობის კონკრეტული მნიშვნელობა უცნობია, მაგრამ ლიტერატურულ წყაროებში ის მიიჩნევა მუდმივ სიდიდედ და როგორც წესი ნულის ტოლად.

ნაწილაკის მუხტის ცვლილებასთან ერთად იცვლება ნაწილაკზე მოქმედი ელექტრული ძალა. მისი მნიშვნელობა შეიძლება გაანგარიშებული იქნას (5)-ის საშუალებით. საწყის მომენტში, როდესაც ნაწილაკი პოლარიზებულია, ხოლო ჭარბი მუხტი ნულის ტოლია, ელექტრული ძალა, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე უმთავრესად განპირობებულია პოლარიზებული მუხტების ურთიერთქმედებით მისი სარკისებური ასახვის მუხტებთან. ამის გამო, ამ მომენტისათვის ნაწილაკზე მოქმედი ძალა არის დაწოლის ძალა და მიმართულია ელექტროდისაკენ. ამ ძალის გაანგარიშება შესაძლებელია (5)-ის საშუალებით, თუ ჩავთვლით, რომ  $q_0=0$ . ჭარბი მუხტის ზრდასთან ერთად, პოლარიზებული მუხტები მცირდება და ამავდროულად იზრდება ის ძალა, რომელიც მოქმედებს ჭარბ მუხტსა და ელექტრულ ველს შორის და დამუხტვის პროცესის ბოლოს ის ხდება უმთავრესი. ეს ძალა მიმართულია ელექტროდიდან და წარმოადგენს ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის ძალას. აქედან ჩანს, რომ დროის რომელიმე მომენტში ჯამური ელექტრული ძალა ნულის ტოლია (ამ მომენტს შეესაბამება გარკვეული მუხტი).

ელექტრულმა ძალამ უნდა გადააჭარბოს სიმძიმის ძალას და ადგეზიის ძალას, რომლებიც წარმოადგენენ ნაწილაკის ელექტროდზე დაწოლის

ძალას. იმის გამო, რომ ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტის პირობები მუდმივია, ამიტომაც სრულდება ძალთა ბალანსი

$$F_{ელ} \geq mg + F_{აღ}$$

და ნაწილაკი აუცილებლად მოწყდება ელექტროდს. ამ მომენტისათვის მისი მუხტი იქნება რაიმე განსაზღვრული სიდიდის, რომელიც განისაზღვრება ამ ბალანსის პირობით. მაგრამ ადგეზიის ძალა  $F_{აღ}$  არ ემორჩილება გაანგარიშებას, ამიტომაც შესაძლებელია გაანგარიშებული იქნას მხოლოდ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის მინიმალური მუხტი, რომლის დროსაც  $F_{აღ} = 0$ .

ცნობილია, რომ არასფერული ნაწილაკი ელექტრულ ველის მიმართულების მიმართ შესაძლებელია ორიენტირებული იქნას სხვადასხვაგვარად. თეორიულ მოდელში განიხილება მხოლოდ ნაწილაკის რაიმე განსაზღვრული უცვლელი მდგომარეობა. ამ დროს ნაწილაკი შეიძლება შევცვალოთ მისი ეკვივალენტური ნახევარელიპსოიდით.

ამრიგად, ინდუქციური დამუხტვის თეორიული მოდელი შესაძლებლობას გვაძლევს ნაწილაკის ცნობილი ელექტროფიზიკური მახასიათებლებისას ( $\gamma, \varepsilon, a, b, c, R_j$ ) გამოვთვალოთ, მოცემული ელექტრული ველისათვის, ნაწილაკზე მოქმედი ძალა, დრო და მოწყვეტის პირობა. ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრებს წარმოადგენს: ნაწილაკის ზღვრული მუხტი  $q_{ზღ}$ , დამუხტვის დროის მუდმივა  $\tau_{ღამ}$ , დამუხტვის დრო (ან მოწყვეტის დრო)  $t_{ღამ}$  და მუხტის მიმდინარე მნიშვნელობა ან ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის მუხტი.

ნაწილაკის გამტარობა (მოცულობითი და ზედაპირული), დიელექტრიკული შეღწევადობა და კონტაქტური წინაღობა განისაზღვრება გარემომცველი გარემოს ტემპერატურით  $T$  და ტენიანობით  $f$ , ნაწილაკის ელექტროდზე დაწოლის ძალით, ნაწილაკის ზომებით, ფორმითა და მისი სიმკვრივით. ელექტროსეპარაციის რეალურ პირობებში მისი მნიშვნელობები იცვლება ფართო დიაპაზონში. ლიტერატურულ წყაროებში ასეთი ცნობები, თუ რამდენად მნიშვნელოვანია ეს ფაქტორები



ელექტროსეპარატორში დამუხტვის პროცესის მიმდინარეობის დროს არ არის წარმოდგენილი. ამიტომ, პრაქტიკული მიზნებისათვის მნიშვნელოვან როლს იძენს ექსპერიმენტული შეფასებები. ამასთან ერთად, ერთ-ერთ ცენტრალურ საკითხს წარმოადგენს ის, თუ როგორ ეთანხმება ეს შეფასებები თეორიულ წარმოდგენებს. ასეთი ანალიზი წარმოადგენს წინამდებარე სამუშაოს ძირითად მიზანს.

### 1.6. ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ექსპერიმენტული გამოკვლევა

ლიტერატურაში წარმოდგენილია ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ექსპერიმენტულ კვლევის მრავალრიცხოვანი შედეგები. განვიხილოთ ეს ნამუშევრები ისე, რომ ყურადღება გავამახვილოთ ექსპერიმენტული შედეგების შესაბამისობაზე მის თეორიულ წარმოდგენებთან.

[33]-ში აღწერილია განსაზღვრული მოცემული მნიშვნელობის მუხტების მიღების მეთოდი. მუხტები წარმოიქმნება ფოლადის ბურთულეებზე, რომლებიც მოთავსებულია ალუმინისაგან დამზადებულ ბრტყელი კონდენსატორის ქვედა ელექტროდზე და ის იმუხტება კონტაქტის საშუალებით. ექსპერიმენტალურად დასაბუთებულია ლებედევ-სკალსკაიას [1] ფორმულის სამართლიანობა

$$q = 4\pi\epsilon_0 \frac{\pi^2}{6} Er^2,$$

სადაც  $r$  - არის ნაწილაკის რადიუსი,  $E$  - ელექტრული ველის სამაბულობა ელექტროდის ზედაპირზე.

ამავე დროს [8]-ში აღნიშნულია, რომ ნაწილაკზე დამატებით წარმოიქმნება მუხტები, რომლებიც განპირობებულია კონტაქტურ პოტენციალთა სხვაობით. აღნიშნულია, რომ ოქროს ან ქრომირებული ელექტროდები შეამცირებდნენ ამ დამატებით მუხტებს. თუმცა ასეთი ცდების შედეგები [33]-ში მოცემული არ არის.

ექსპერიმენტული კვლევების ყველაზე უფრო სრული მიმოხილვა, რომელიც მიძღვნილია სფეროსებრი გამტარი ნაწილაკების ინდუქციური მეთოდით დამუხტვის შედეგებისადმი, მოცემულია [29]-ში. ნაჩვენებია, რომ ლებედევ-სკალსკაიას ფორმულა სრულდება საკმარისად კარგი სიზუსტით.

[33]-ში გაზომვები ჩატარდა ნახევარსფერულ ნაწილაკებზე ფოლადისაგან. შენიშნულია, რომ მიღებული მუხტების მნიშვნელობები ძალიან განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. ავტორი ამ განსხვავებებს ხსნის იმით, რომ დამუხტვის პროცესში მიმდინარეობს ნახევარსფეროს მობრუნება გარკვეული მცირე კუთხით და კონტაქტურ პოტენციალთა სხვაობით, რომელიც წარმოიშობა დამუხტულ ელექტროდსა და მასთან უშუალოდ მიმდებარე ნახევარსფეროს ბრტყელ ზედაპირს შორის.

[33]-ში დაკვირვებულ ნახევარსფეროს მობრუნებას, რომელიც მიმდინარეობს დამუხტვის პროცესში ეწინააღმდეგება თეორიული მოდელის ერთ-ერთ ძირითად დებულებას, რომლის თანახმადაც მიღებულია დაშვება ნაწილაკის ელექტროდის მიმართ მდებარეობისა და კონტაქტის მუდმივობის შესახებ. მიუხედავად ამისა [33]-ში მოყვანილი ფაქტის მნიშვნელობის შეფასება შეუძლებელია, რადგან ავტორს არ მოყავს რიცხვითი მონაცემები არც მუხტების, არც ელექტრული ველის მახასიათებლების, არც გარემოს და არც ნაწილაკის შესახებ.

[21-27]-ში აღწერილია ბამბის ბოჭკოებზე ინდუქციური მუხტების გაზომვების შესახებ, რომლებიც გარემომცველი გარემოს ტენიანობის სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს შესაძლებელია წარმოადგენდეს როგორც გამტარ, ასევე დიელექტრიკულ ნაწილაკს. დამუხტვა მიმდინარეობდა ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროდზე. გამოკვლევა წარმოებდა ერთი და იგივე ფორმისა და ზომის ნაწილაკებზე. წარმოებდა როგორც გასაშუალებული მასის მუხტის გაზომვები, ასევე ცალკეული ნაწილაკის მუხტის გაზომვები. ექსპერიმენტული მონაცემებისათვის დამახასიათებელია მონაცემთა გაბნევა, ასე მაგალითად, გაზომილი

მუხტების საშუალო და მაქსიმალური მონაცემები ერთმანეთს ეწინააღმდეგება. ტენიანობის გაზრდისას საშუალო მასის მუხტი იზრდება, ხოლო ცალკეული ნაწილაკების მუხტი მცირდება. შესაძლებელია, რომ ეს წინააღმდეგობა გამოწვეულია გაზომვის სხვადასხვა მეთოდებით: საშუალო მასის მუხტი განისაზღვრებოდა პირდაპირი მეთოდით - ფარადეის გალიის გამოყენების მეთოდით, ხოლო ცალკეული ნაწილაკების მუხტი განისაზღვრებოდა ნაწილაკის მოძრაობის ტრაექტორიის მიხედვით. მიღებული ექსპერიმენტული შედეგების შედარებისას საანგარიშო თეორიულ მნიშვნელობებთან ხდებოდა ბოჭკოს ფორმის აპროქსიმაცია ამობურცული ბრუნვის ელიფსოიდთან, რომლის წვეროს ზედაპირის სიმრუდის რადიუსი ტოლია ბოჭკოს განივი კვეთის რადიუსის. ბოჭკოს ასეთი აპროქსიმაციის დროს ჭარბი მუხტების თეორიული მნიშვნელობები ეთანხმებიან ექსპერიმენტულ კვლევის მონაცემებს., თუმცა, საჭიროა ყურადღება მივაქციოთ იმას, რომ ამგვარი აპროქსიმაციის დროს ირღვევა ნაწილაკის მასის მიხედვით ეკვივალენტობა. ამის გამო საშუალო მასის მუხტის მიხედვით ასეთი აპროქსიმაცია არასამართლიანია.

ამრიგად, მიუხედავად იმისა, რომ [21-27]-ში წარმოდგენილ შრომებში არსებობს მონაცემები მუხტების მიხედვით, როდესაც გარემოს ტენიანობა დიდ ფარგლებში იცვლება, მათ საფუძველზე რაიმე კანონზომიერების დადგენა პრაქტიკულად შეუძლებელია.

[15-20]-ში განხილულია ელექტროდზე მდებარე ნაწილაკების, როგორც დამუხტვა გვირგვინული განმუხტვის ველში, ასევე მათი განმუხტვის პროცესი, როდესაც გამორთულია მაღალი ძაბვა. ნაჩვენებია, რომ დამუხტვის პროცესზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს როგორც ნაწილაკის გამტარობა, ასევე ნაწილაკი-ელექტროდის კონტაქტი. ნაწილაკის გამტარობა დაკავშირებულია ნაწილაკის ზედაპირის მდგომარეობასთან. მოყვანილია მონაცემები თუ როგორ იცვლება მუხტი ნაწილაკის რეაგენტული დამუშავების შედეგად. ნაჩვენებია, რომ ნაწილაკის გამტარობაზე ძლიერ ზეგავლენას ახდენს მის ზედაპირზე ტენის არსებობა. ეს მტკიცდება იმით,

რომ მისი მუხტი მნიშვნელოვნად იცვლება ტემპერატურის მომატებისას (100°C-მდე და ზევით).

თუმცა ავტორებს არ მოყავთ შედარებები გაანგარიშებების შედეგებთან. იმის გამო, რომ შრომებში [15-20] არ არის მონაცემები ელექტრული ველის დამაბულობის შესახებ, შეუძლებელია ასეთი შედარებების ჩატარება და დასკვნების გაკეთება თეორიული და ექსპერიმენტული მონაცემების შესაბამისობის შესახებ.

ამას გარდა, ის მწირი მონაცემები, რომელიც წარმოდგენილია ნაწილაკთა მახასიათებლების შესახებ, ექსპერიმენტის მონაცემების პირობების შესახებ და გარდა ამისა საკვლევ პარამეტრების ვიწრო დიაპაზონი, საშუალებას არ გვაძლევს გავაკეთოთ გაზომვის შედეგების რაიმე განზოგადება.

[34]-ში მოყვანილია ექსპერიმენტის აღწერა, სადაც მიმდინარეობს ნაწილაკთა და ელექტროდის შორის კონტაქტურ პოტენციალთა სხვაობის წარმოქმნა, როდესაც მასზე მოდებულია გარეშე ელექტრული ველი. ნაწილაკების დამუხტვა წარმოებდა ბრტყელი კონდენსატორის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში, შემდეგ კი ელექტროდის დახრის შედეგად ეს დამუხტული ნაწილაკები ცვივოდნენ ფარადის გალიაში. თუმცა მუხტების გაზომვების შედეგები მოტანილი არ არის.

[15]-ში მოცემულია კვარცის ნაწილაკების ელექტრული მუხტის ექსპერიმენტული დამოკიდებულება მის ზომებზე. მუხტების მიღებული მნიშვნელობები შესაძლებელია აპროქსიმირებული იქნას შემდეგი დამოკიდებულებით

$$\frac{q}{m} = Ar^{-\frac{1}{2}}$$

სადაც A - მუდმივაა.

დამუხტვის პროცესის თეორიული ანალიზიდან გამომდინარეობს, რომ ნაწილაკის ზღვრული მუხტი რადიუსის პირველი ხარისხის უკუპროპორციულია, ანუ

$$\frac{q}{m} = r^{-1}$$

ამრიგად, ექსპერიმენტული მონაცემები არ ეთანხმება თეორიულ დამოკიდებულებას. გარდა ამისა, ასეთი შეუთანხმებლობის მიზეზის დადგენა ამ მონაცემებზე დაყრდნობით შეუძლებელია.

[20]-ში მოცემული გაზომილი მუხტების შედეგების მიხედვით შესაძლებელია შევავსოთ ნაწილაკების გამტარობა (ნახ. ცხრ. 1).

**ცხრილი 1**

მინერალები	მინერალების გამტარობა (ომ.მ) <sup>-1</sup>		
	[20]-ის მიხედვით		[35]-ის მიხედვით
	გარემოს ტემპერატურა, °C		
	140	20	
ცირკონი	$0,77 \cdot 10^{-11}$	$1,28 \cdot 10^{-11}$	$10^{-8} - 10^{-12}$
რუტილი	$1,26 \cdot 10^{-10}$	$1,54 \cdot 10^{-10}$	$10^{-1} - 10^{-3}$

ცხრილში 1 შედარებისათვის მოყვანილია მონაცემები ცნობარიდან [35]. მოყვანილი მონაცემებიდან ჩანს, რომ მინერალ რუტილის გამტარობა მნიშვნელოვნად განსხვავდება ცხრილიდან მოყვანილი მნიშვნელობისაგან. მიზეზი ასეთი დიდი განსხვავებისა [20]-ში განმარტებული არ არის და გარდა ამისა, არ არის ანალიზი მიღებული მონაცემებისათვის.

ტემპერატურის გავლენის შეფასება გამტარობაზე [20]-ის მიხედვით შეუძლებელია, რადგანაც ისინი მოყვანილია ტემპერატურის მხოლოდ ორი მნიშვნელობისათვის, რაც სავსებით არასაკმარისია.

[36]-ში აღწერილია ბოროსილიკატური მინის სფეროსებრი ნაწილაკების მუხტების გაზომვა, რომლებიც ჩამოგორდებოდნენ ნიკელისგან დამზადებული ბრტყელი ფირფიტის ზედაპირიდან. ექსპერიმენტულად ნაჩვენებია, რომ 60%-მდე ტენიანობის დროს ინდუქციური მუხტი პრაქტიკულად მუდმივია. ცდები ტარდებოდა ელექტრული ველის დამაბულობისას 1,2 კვ/სმ. გაზომვის მონაცემები 60%-ზე ზევით მოყვანილი არ არის. ავტორის მიერ აღნიშნულია იმ დიდი მნიშვნელობის შესახებ, რომელიც შეეხება რელაქსაციის დროისა და ჩამოგორების დროის (ანუ

დამუხტვის დროს) შესაბამისობას. მოცემული ექსპერიმენტები ჩატარებული იქნა, როდესაც რელაქსაციის დრო დიდი იყო.

ელექტრული ველის დიაპაზონის, ტენიანობისა და დამუხტვის დროის შეზღუდულობა საშუალებას არ გვაძლევს გამოვავლინოთ ამ პარამეტრების გავლენა ინდუქციური დამუხტვის პირობებზე, ასევე არ გვაძლევს პროცესის კინეტიკის ხასიათის გამოვლენის საშუალებას.

ზოგიერთ წყაროში მოყვანილია ირიბი მონაცემები იმ მუხტისა, რომლის შესაბამისი ელექტრული ველის დამაბულობის დროს, ნაწილაკები წყდება ელექტროდიდან.

[37]-ში განხილულია ნაწილაკების მოწყვეტა ელექტროდიდან ერთგვაროვან ელექტრულ ველში, რომელიც იქმნება ბადესა და სიბრტყეს შორის. ბადე შექმნილია მავთულების რიგების მიხედვით, რომელთა შორის მანძილია  $a$ . როდესაც მანძილი სიბრტყესა და ბადეს შორის  $h$  მეტია ვიდრე  $a$ , მაშინ დამაბულობა სიბრტყის ზედაპირზე მუდმივია: როცა  $h/a=3$  სიზუსტე არანაკლებ 10%-ია. ეს ადასტურებს იმ ანალოგიური პირობის სამართლიანობას, რომელსაც ადგილი აქვს ელექტროსეპარატორებშიც ერთგვაროვანი ელექტრული ველის დროსაც.

ავტორები [37]-ში ნაწილაკზე მოქმედი რეზულტატური (ტოლქმედი) ძალის განხილვისას, ითვალისწინებენ კულონურ ძალას, სარკისებური ასახვის ძალას და სიმძიმის ძალას. პონდერომოტორულ ძალას მიიჩნევენ ნულის ტოლად. ადგეზიის ძალას არ განიხილავენ.

ნაწილაკზე მოქმედი ძალების წონასწორული მდგომარეობა ჩაიწერება შემდეგნაირად:

$$qE - \frac{q}{16\pi\epsilon_0 r^2} - mg = 0$$

საიდანაც მიიღება ელექტრული ველის დამაბულობის წონასწორული მნიშვნელობა (ანუ მოწყვეტის დამაბულობა).

ჭარბი მუხტი  $q$  განიხილება როგორც ზღვრული მუხტი, მაგრამ თვით მუხტის შეფასება არ ხდება და შემოაქვთ მუხტის საშუალო სიმკვრივე  $\sigma = \frac{q}{4\pi^2}$ . ნაწილაკთა დამუხტვის დრო არ განიხილება.

მიუთითებენ, რომ ნაწილაკის მოწყვეტის დაძაბულობაზე გავლენას ახდენს ნაწილაკის ზედაპირის მდგომარეობა (დაჭუჭყიანება) და გარემოს ტენიანობა, თუმცა არც რაოდენობითი და არც ხარისხობრივი დამოკიდებულებები მოყვანილი არ არის.

[37]-ში მოყვანილი წონასწორობის პირობა ჩაწერილია კულონური ძალისა და მისი სარკისებური ასახვის ძალის მოქმედება დიდი ცდომილებით [29,30]. გარდა ამისა, ადგეზიის ძალის გაუთვალისწინებლობას მივყავართ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის ელექტრული ველის დაძაბულობის მხოლოდ მინიმალურ მნიშვნელობამდე.

[39]-ში ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა ჩაწერილია უტოლობის სახით ადგეზიის ძალის გათვალისწინებით:

$$mg + F_{\text{ადგ}} < F_{\text{ელ}}$$

აქედან განსაზღვრულია მოწყვეტის დაძაბულობა

$$E_{\text{მოწ.}} = \frac{mg + F_{\text{ადგ}}(r, \eta)}{q(r, E)}$$

მიუთითებულა, რომ ადგეზიის ძალა  $F_{\text{ადგ}}(r, \eta)$  დამოკიდებულია ნაწილაკის ზომებზე  $r$ , ზედაპირის მდგომარეობაზე  $\eta$  და სხვა ფაქტორებზე. მაგრამ მათი სახე უცნობია. ავტორები [39]-ში ნაწილაკის დიდი ზომების შემთხვევაში ადგეზიის ძალას უგულებელყოფენ. ეს ზომებია ასეულობით მიკრომეტრი. ნაწილაკის მცირე ზომების შემთხვევაში (ერთეული მკმ) ისინი უგულებელყოფენ ნაწილაკის სიმძიმის ძალას, ხოლო ადგეზიის ძალისათვის  $F_{\text{ადგ}}$  მიღებული აქვთ რადიუსის მიხედვით ხარისხოვანი დამოკიდებულება, სადაც ხარისხის მაჩვენებელი ერთეულზე რამდენადმე მეტია, მაგრამ მისი კონკრეტული მნიშვნელობა მოყვანილი არ არის.

გამოკვლევები ჩატარდა სპილენძისა და ქვშის ნაწილაკებზე. ქვშის ნაწილაკებზე ჩატარებულმა კვლევებმა აჩვენა მოწყვეტის ველის დაძაბულობის  $E_{მოწყ}$  დამოკიდებულება ველის მიმართულებაზე, ხოლო სპილენძის ნაწილაკებისათვის ასეთი დამოკიდებულება შემჩნეული არ ყოფილა. მიზეზი ასეთი დამოკიდებულებისა არ ყოფილა განხილული. ორივე ტიპის ნაწილაკებისათვის შემჩნეულ იქნა დამოკიდებულება  $E_{მოწყ}$ -სა ელექტროდის ზედაპირის დამუშავების კლასის მიმართ, რომელსაც გააჩნია დამრეცი მინიმუმი. მაგრამ ეს დამოკიდებულება მოცემულია ხარისხობრივად და არ იძლევა საშუალებას გამოვავლინოთ ნაწილაკების რაიმე სახის განსაკუთრებული ქცევა.

შრომებში [40-43] ინდუქციური დამუხტვის შესწავლა წარმოებდა მეტალური ნაწილაკების შეჯახების პროცესში ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროდებთან. აღნიშნულია, რომ ექსპერიმენტულ მონაცემებს გააჩნია რიგი განსხვავებები გაანგარიშების შედეგებთან. მუხტის საანგარიშო ფორმულად აღებულია ლებედევ-სკადსკაიას ფორმულა [10]. ექსპერიმენტებში შემჩნეულია მუხტის შემცირება გაანგარიშებულთან შედარებით, საერთოდ გადამუხტვის არსებობა და მუხტების ანომალური თანაფარდობა ერთი და იგივე ზომის მუხტებისათვის, კერძოდ  $q_1 < q_2 < q_3$ , როდესაც  $E_1 > E_2 > E_3$ . ასეთი განსხვავების მიზეზად [41]-ში მიჩნეულია მუხტის შექმნის შემთხვევითი ხასიათი ელექტროდთან დარტყმის დროს.

[42]-ში ნათქვამია, რომ წარმოებდა ნაწილაკზე მოქმედი ძალის შედარება ადგეზიის ძალებთან, თუმცა შედარების შედეგები მოყვანილი არ არის.

[43]-ში ჩატარებული წინასწარი ლიტერატურული მონაცემების მიმოხილვის დროს აღნიშნულია, რომ მეტალური ნაწილაკების მუხტზე გავლენას ახდენს ნახევარგამტარული ფენა, რომელიც წარმოიშობა მეტალის ზედაპირზე. ეს გავლენა დაკავშირებულია ამ ფენის სისქესთან და მის წინაღობასთან. მაგრამ, თუ ეს გავლენა როგორ მოქმედებს ნაწილაკის მიერ მიღებული მუხტის სიდიდეზე მოყვანილი არ არის. ერთადერთი



აღნიშნულია, რომ ნაწილაკის ელექტროდზე ხანგრძლივი კონტაქტის დროს ნაწილაკის მიერ მიღებული მუხტი პრაქტიკულად განისაზღვრება ლებედევ-სკალსკაიას ფორმულით. მითითებულია აგრეთვე ნაწილაკის მიერ შეძენილი მუხტის დროზე დამოკიდებულების ექსპონენციალური ხასიათი, ოღონდ ექსპერიმენტული შემოწმება ასეთი დამოკიდებულებისა ნაჩვენები არ არის.

რიგ შრომებში ინდუქციური დამუხტვის პროცესის შეფასებები მოცემულია ნაწილაკის ბრტყელ კონდენსატორში ავტორხვეითი მოძრაობის აღწერისას. [44]-ში გამოყენებულია პირობა  $E_q=mg$ , რომლის დროსაც გამოითვლება ველის დამაბულობა რხვეითი მოძრაობის დაწყებიდან, ანუ ნაწილაკის მოწყვეტის შესაბამისი დამაბულობის მნიშვნელობა. მითითებულია, რომ ადგეზიის ძალები თავს იჩენს მხოლოდ სუბმიკრონული ზომის ნაწილაკებისათვის, ამის გამო  $E_{მოწყ.} = 1,062 \cdot 10^4 \sqrt{\gamma_{ნაწ.} \cdot 2r}$  ნაწილაკის მუხტი მიღებულია როგორც ზღვრული და ისინი განიხილება როგორც გამტარი ნაწილაკები. ამ ნაშრომში, ისე როგორც [37]-ში ელექტრული ველის დამაბულობა გაანგარიშებულია ცდომილებით.

[45]-ში განხილულია სფერული გამტარი ნაწილაკების ავტორხვეითი მოძრაობა (ანუ ფსევდოგათხევადებული მოძრაობა) ბრტყელი კონდენსატორის ელექტრულ ველში. ელექტრული ძალა გაანგარიშებული იყო ლებედევ-სკალსკაიას ფორმულით [10]. განხილულია ფსევდოგათხევადების პირობა  $F_{ელ.} = mg + F_{ადგ.}$ . მითითებულია, რომ იმ ნაწილაკებისათვის, რომელთა ზომები აღემატება  $r=20$  მკმ, ადგეზიის ძალები შესაძლებელია უგულებელვყოთ.

უფრო ნაკლები ზომის ნაწილაკებისათვის, რომელთა ზომები მერყეობს საზღვრებში (1-18 მკმ) მოცემულია საანგარიშო და ექსპერიმენტული დამოკიდებულება  $E_{მოწყ.}$ -თვის. ნაჩვენებია, რომ  $E_{მოწყ.} \propto r^{-1}$  ელექტროდის ზედაპირის მოცემული დამუშავების სისუფთავისათვის. ზედაპირის დამუშავების სისუფთავის ზრდით  $\nabla 7$ -დან  $\nabla 12$ -მდე  $E_{მოწყ.}$  მცირდება.

რაოდენობრივად მოცემულია მხოლოდ ელექტროდის მასალის გავლენა ერთი და იმავე კლასის დამუშავების სისუფთავისათვის (ცხრილი 2)

ნაწილაკის მოწყვეტის ელექტრული ველის დამაბულობისათვის, მიღებული იყო, რომ ადგეზიის ძალა გამოწვეულია მოლეკულური მდგენელით

$$F_{\text{აღ.}} = \frac{Br}{(6H)^2},$$

სადაც B - არის მუდმივა; H - მანძილი ნაწილაკსა და ელექტროდის ზედაპირს შორის.

ცხრილი 2

ნაწილაკის ზომა r, 10 <sup>-6</sup> მ	მოწყვეტის დამაბულობა, 10 <sup>6</sup> ვ/მ, ელექტროდის მასალა		
	ალუმინი	თითბერი	სპილენძი
6	0,91	0,81	0,98
3	1,31	1,18	1,40
1	1,76	1,76	2,02

მაშინ

$$F_{\text{აღ.}} \geq \frac{1}{1,83\pi H} \sqrt{\frac{B}{\pi\epsilon_0\epsilon r}},$$

სადაც B=3·10<sup>-19</sup>ჯ, H=10<sup>8</sup> მ.

მუხტის გაანგარიშებისთვის რეკომენდებულია გამოსახულება

$$q=q_{\text{მაქს}} [1-\exp(-c\cdot r)],$$

სადაც c - არის მუდმივა, რომელიც განისაზღვრება ექსპერიმენტულად ყოველი საკონტაქტო წყვილისათვის ნაწილაკი-ელექტროდი.

ამრიგად, გაანგარიშებულთან შედარებაც კი განპირობებულია H, B სიდიდეების შერჩევით და C-ს განსაზღვრით, რაც არ გვამღევს საშუალებას შევაფასოთ ექსპერიმენტული და გაანგარიშებული სიდიდეების შესაბამისობა.

გარდა აღნიშნული სიდიდეებისა, ნაშრომში არ არის მოყვანილი ექსპერიმენტის ჩატარების პირობები, ისეთების, როგორცაა გარემოს

ტენიანობა და ტემპერატურა. არ არის მოყვანილი არაგამტარი ნაწილაკების ანალიზი.

[44]-ში გამოკვლეული იყო ტიტანის, ვოლფრამის, მოლიბდენის და ალუმინის ნაწილაკების ავტორხევითი მოძრაობა. ელექტროდი დამზადებული იყო უჟანგავი ფოლადისგან, ფოლადი 3-გან, ალუმინისგან, სპილენძისგან და თითბერისგან. მიღებული იქნა, რომ ნაწილაკების მუხტები იცვლებიან ფართო დიაპაზონში და 10-100-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე ლებედევ-სკალსკაიას ფორმულით გაანგარიშებული მნიშვნელობისგან [10]. ნაწილი ნაწილაკებისა არც კი განიცდიდნენ გადამუხტვას საწინააღმდეგო ელექტროდთან კონტაქტისას. რაიმე სახის განსაკუთრებული დამოკიდებულება ნაწილაკების მასალისაგან ან ელექტროდის მასალისაგან არ იქნა შენიშნული. ეს მონაცემები ეწინააღმდეგებიან მომდევნო ლიტერატურულ მონაცემებს [45], სადაც აღნიშნულია მუხტების დამოკიდებულება ელექტროდის მასალისაგან და [39] ნაშრომის მონაცემებს, სადაც აღნიშნულია მუხტების დამოკიდებულება ნაწილაკის მასალისაგან. ისინი ეწინააღმდეგებიან აგრეთვე სხვა კვლევებსაც (ნახ.მაგალითად, [33]), სადაც ასევე განსხვავებაა ლებედევ-სკალსკაიას ფორმულისაგან. აღნიშნული განსხვავების ახსნა შეუძლებელია, რადგანაც [43]-ში არ არის მოყვანილი ექსპერიმენტის ჩატარების პირობები.

ჩატარებული ლიტერატურული მონაცემების მიმოხილვა საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

არსებული კვლევები იძლევა ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის მუხტისა და მისი ელექტროდიდან მოწყვეტის ელექტრული ველის დამაბულობის სიდიდეების მხოლოდ ნაწყვეტ-ნაწყვეტ მონაცემებს, რომლებიც არ ექვემდებარებიან განზოგადობას.

ამავე დროს ლიტერატურული მონაცემებისაგან შეიძლება გამოვავლინოთ ის ძირითადი ფაქტორები და პარამეტრები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე. ეს პირველ რიგში არის ნაწილაკების ზომა და ფორმა, მასალა, რისგანაც შედგება ნაწილაკები

და მათი მახასიათებლები (სიმკვრივე, გამტარებლობა, დიელექტრიკული შეღწევადობა). ინდუქციური მუხტის წარმოქმნაზე მნიშვნელოვან როლს თამაშობს ის პირობები, რომლებშიაც მიმდინარეობს ეს პროცესი, კერძოდ გარემოს ტემპერატურა და ტენიანობა.

ლიტერატურული მონაცემებიდან შეიძლება გამოვყოთ ის ფიზიკური მოვლენები, რომლებიც არ არიან გათვალისწინებული მის მათემატიკურ მოდელში. ექსპერიმენტში შემჩნეული იქნა, რომ დამუხტვის პროცესში ნაწილაკმა შეიძლება შეიცვალოს მდგომარეობა და შესაბამისად დამუხტავი ელექტროდის მიმართ კონტაქტური წინააღმდეგობა. ასევე მნიშვნელოვანია ისიც, რომ მიუხედავად იმისა, რომ ნაწილაკებზე დამუხტვის პროცესში შესრულებულია ელექტროდიდან მათი მოწყვეტის პირობა ყველა მათგანი მაინც არ მოწყდება ელექტროდს. ამ მონაცემებიდან და ადგეზიის ძალის ანალიზიდან, რომელიც წარმოადგენს ალბათურ სიდიდეს, გამომდინარეობს, რომ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტა უნდა დახასიათდეს ალბათური დამოკიდებულებით. ლიტერატურული მონაცემებიდან აგრეთვე არ არის ნათელი, ატარებს თუ არა მუხტის ცვლილება დროში ექსპონენციალურ ხასიათს.

ამრიგად, ლიტერატურული მონაცემები საშუალებას არ იძლევიან ჩავატაროთ ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე სხვადასხვა ფაქტორის გავლენის არა თუ რაოდენობრივი შეფასებები, არამედ ხშირად ხარისხობრივი შეფასებებიც. ასეთი კვლევების ჩატარებისათვის აუცილებელია შევარჩიოთ გაზომვების ჩატარების მეთოდიკა. ლიტერატურაში ასეთი მეთოდიკა არ არსებობს.

[37]-ში ტარდებოდა ნაწილაკების მოწყვეტის შესაბამისი ელექტრული ველის დაძაბულობის გაზომვები. გაზომვების სიზუსტე იყო  $\pm 5\%$ . ელექტროდი დაფარული იყო 5 მკმ-ის სისქის ოქროთი. ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტა ფიქსირდებოდა ნაწილაკიდან არეკლილი სხივის საშუალებით, როცა ნაწილაკები დასხივებული იყო სპეციალური ფოტონათურით. დაკვირვებები წარმოებდა შეუიარაღებელი თვალით ან

კიდევ ტელესკოპური მილის საშუალებით, რომელიც დამაგრებული იყო შუქის შთანთქმელი ეკრანის წინ. განისაზღვრებოდა ელექტროდიდან მოწყვეტილი და მასზე დარჩენილი ნაწილაკების რიცხვი. დაკვირვების დრო არ ფიქსირდებოდა და არ არის მითითებული თუ რა დროის განმავლობაში მიმდინარეობდა აღნიშნული ექსპერიმენტი.

[39]-შიც განისაზღვრებოდა ნაწილაკის მოწყვეტის დამაბულობა და ამისათვის გამოიყენებოდა ოპტიკური და ელექტრული ინდიკატორები.  $E_{\text{მოწყ}}$ -ის ექსპერიმენტული მონაცემების გაზნევა დევს  $\pm 2\%$ -ის ფარგლებში.

მუხტების გაზომვებისათვის გამოიყენებოდა უშუალო მეთოდი, რომელიც მდგომარეობს ნაწილაკების მოთავსება ფარადეის გალიაში [1, 2, 15-21, 33, 34] და ნაწილაკების მოძრაობის ტრაექტორიის ფოტოგრაფირების მეთოდი [1, 3, 21, 39, 40, 46]. უკანასკნელ შემთხვევაში მუხტის გაზომვასთან ერთად განისაზღვრებოდა ნაწილაკის ზომებიც. სხვა შემთხვევებში ნაწილაკის ზომები განისაზღვრებოდა მიკროსკოპის საშუალებით.

ამ ცნობილი მეთოდიკის ნაკლს წარმოადგენს ის, რომ არ იძლევა ინდუქციური დამუხტვის სრულ კომპლექსურ ინფორმაციას, რაც თავის მხრივ, გამორიცხავს რიცხობრივი დამოკიდებულების მიღების შესაძლებლობას, რომელიც აღწერს ინდუქციური დამუხტვის პროცესს და პროცესის თეორიული მოდელთან შედარების შესაძლებლობას.

ამრიგად, იმ პარამეტრების გავლენის გარკვევისათვის, რომლებიც განსაზღვრავენ ნაწილაკის ქცევას მისი ინდუქციური დამუხტვის პროცესში, აუცილებელია დავამუშაოთ ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდიკა, რომელიც საშუალებას მოგვცემდა ჩაგვეტარებინა სიდიდეთა კომპლექსური გაზომვები, რომლებიც დამახასიათებელია ინდუქციური დამუხტვის პროცესისთვის, კერძოდ, მუხტის, დამუხტვის დროის, ნაწილაკის მოწყვეტის ალბათობის, ადგეზიის ძალის, ინდუქციური დამუხტვის დროის მუდმივას, როდესაც ნაწილაკების პარამეტრები, ელექტრული ველის დამაბულობა და გარემო პირობები (ტენიანობა, ტემპერატურა) იცვლება ფართო დიაპაზონში.

## 1.7. კვლევის ამოცანები

ჩატარებული ლიტერატურული მონაცემების ანალიზიდან შეიძლება ჩამოვყალიბოთ წინამდებარე სამუშაოს მიზნები. ეს არის - ნაწილაკის ინდუქციური დამუხტვის კანონზომიერებების ექსპერიმენტული კვლევა და მისი მაქსიმალური ეფექტურობის უზრუნველყოფის რეკომენდაციების შემუშავება, როდესაც წარმოებს ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების გაყოფა მათი ელექტროგამტარობის მიხედვით.

ამ ამოცანის გადაწყვეტისათვის საჭიროა გადავჭრათ შემდეგი საკითხები.

1. შევქმნათ დანადგარი და შევიმუშაოთ ნაწილაკის ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდიკა, რომლის მიზანი იქნება შემდეგი პროცესების შესახებ სრული კომპლექსური ინფორმაციის მიღება: ზღვრული მუხტის შესახებ, მიმდინარე მუხტის შესახებ, დამუხტვის დროის მუდმივას შესახებ, ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის შესახებ, დამუხტვის დროის შესახებ და ნაწილაკის ელექტროდთან ადგეზიის ძალის შესახებ.

2. შემუშავებული მეთოდიკის საფუძველზე ინდუქციური დამუხტვის კანონზომიერებების ექსპერიმენტული კვლევების ჩატარება.

3. ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ცნობილი თეორიული წარმოდგენების მის ექსპერიმენტულ დამოკიდებულებასთან შესაბამისობის გამოკვლევა.

4. დამუხტვის პროცესზე ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტის პირობების პოტენციურად დიდი გავლენა, რომლის დროსაც ნაწილაკი - ელექტროდის გარდამავალი კონტაქტური წინაღობა, დიდ დიაპაზონში იცვლება. გამოვავლინოთ ამ პირობების კონკრეტული როლი, რომელსაც ადგილი აქვს პრაქტიკაში, გარემომცველი გარემოს ჩვეულებრივი პირობების დროს.

## II თავი

### ექსპერიმენტული დანადგარი და მინერალური ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრების გაზომვების ჩატარების მეთოდика

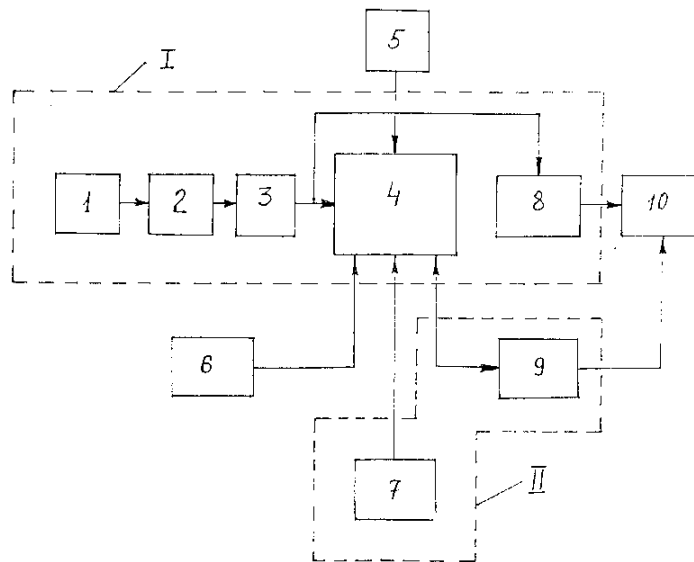
პირველ თავში ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვის დროს გამოვლინდა ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური გამოკვლევის აუცილებლობა, რომელიც თავისთავში უნდა შეიცავდეს, ნაწილაკების დამუხტვის პარამეტრების გაზომვებს როგორცაა, ზღვრული მუხტი, ელექტროდიდან მოწყვეტამდე მათ მიერ შეძენილი მუხტი, დამუხტვის დრო, მოწყვეტის ალბათობა. ის ითვალისწინებს იმ პირობების ერთდროულ ფიქსაციას (ელექტრული ველის დამაბულობა, გარემომცველი გარემოს ტემპერატურა და ნესტიანობა), რომლის დროსაც, წარმოებდა გაზომვები და ასევე ნაწილაკების მახასიათებლების განსაზღვრა (ზომა, ფორმა, სიმკვრივე, კუთრი გამტარობა).

არც მეთოდика და არც დანადგარები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ამ სახის გაზომვებს, ლიტერატურულ წყაროებში აღწერილი არ არის. ამიტომ ამ ნაშრომში დიდი ყურადღება დაეთმო სწორედ ასეთი დანადგარის შემუშავების ამოცანას.

#### 2.1. ექსპერიმენტული დანადგარის აღწერა და ექსპერიმენტის ჩატარების მეთოდика

ექსპერიმენტული დანადგარის დანიშნულებას გამოსაკვლევ მიწერალური მასალების ელექტროფიზიკური პარამენტრების განსაზღვრა და მათი ქცევის შესწავლა ინდუქციური დამუხტვის პროცესში. დანადგარის ფუნციონალური სქემა წარმოდგენილია ნახ. 4-ზე. ის შედგება ელექტრული (I) და ოპტიკური (II) ნაწილებისაგან, რომელთა პრინციპული სქემები მოყვანილია შესაბამისად ნახ. 5 და 6-ზე.

დანადგარის ელექტრული ნაწილის დანიშნულებაა ნაწილაკების უშუალოდ დამუხტვა და იმ სიგნალის გამომუშავება, რომელიც აფიქსირებს დამუხტვის დაწყების მომენტს (მაღალი ძაბვის მიწოდების მომენტს). ის შედგება BC-23 ტიპის მაღალი ძაბვის წყაროსაგან, დამცავი წინაღობისაგან  $R_{\text{დ}}$ , მუხტის დამაგროვებელი კონდენსატორისაგან  $C_{\text{დ}}$ , BB-20 ტიპის მაღალი ძაბვის ვაკუუმური კომუტატორისაგან, იმპულსური (დარტყმითი) დენის შემზღვეველი წინაღობისაგან  $R_{\text{გა}}$ , მუშა კონდენსატორისაგან  $C_{\text{მ}}$ , რომლის ქვედა ფირფიტაზე (ელექტროდზე) ხდება გამოსაკვლევი ნაწილაკის დამუხტვა და ომურ-ტევადური ძაბვის დამყოფებისაგან  $R_1C_1$ ,  $R_2C_2$ .



**ნახ. 4. დანადგარის ფუნქციონალური სქემა**

1 – მაღალი ძაბვის წყარო, 2 – დამაგროვებელი კონდენსატორი, 3 – ვაკუუმური ამომრთველი, 4 – მუშა კონდენსატორი, 5 – მუშა კონდენსატორის ქვედა ფირფიტის გამახურებელი, 6 – მუშა კონდენსატორის ქვედა ფირფიტის ვიბრატორი, 7 – ქვანტური გენერატორი, 8 – ძაბვის დამყოფი, 9 – ფოტოელექტრონული გამამრავლებელი, 10 – დამახსოვრების ოსცილოგრაფი

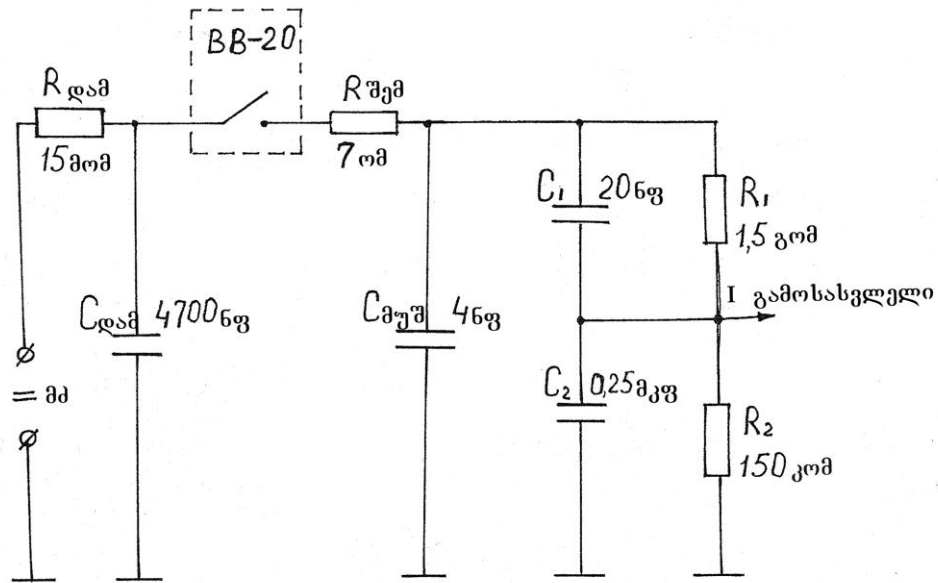
დანადგარის ოპტიკური ნაწილის დანიშნულებაა მოახდინოს ნაწილაკის დამუხტვის დამთავრების მომენტის რეგისტრაცია ანუ მისი ელექტროდიდან მოწყვეტის მომენტის ფიქსირება. ის შედგება ПП-75 ტიპის გენერატორისაგან 1, ამოზნექილი ლინზისაგან 2, რომელიც ახდენს



ლაზერის სხივის გაშლას, ფოტობიექტივისაგან 5, ღრეჩოს დიაფრაგმისაგან 6 და Φ3Y-38 ტიპის ფოტოელექტრონი გამამრავლებლისაგან.

ნაწილაკის დამუხტვის მომენტის რეგისტრაცია ხორციელდება შემდეგნაირად: ვაკუუმური კომპუტატორის ჩართვის შემდეგ მუხტის დამაგროვებელი კონდესატორიდან ძაბვა ერთდროულად მიეწოდება მუშა კონდესატორს და ომურ-ტევადურ ძაბვის დამყოფს. ის სიგნალი, რომელიც მოიხსნება ძაბვის დამყოფის ქვედა მხრისაგან, მიეწოდება C8-9A ტიპის ოსცილოგრაფს, რომელიც მუშაობს სხივის გაშლის მომლოდინე რეჟიმში. სიგნალის მისვლის შემდეგ ოსცილოგრაფის სხივი გაიშვება რითაც ფიქსირდება ნაწილაკის დამუხტვის დაწყების მომენტი.

ნაწილაკის დამუხტვის დამთავრების მომენტის ფიქსაციის რეგისტრაცია ხორციელდება შემდეგნაირად (ნახ. 6). ნაწილაკი, რომელიც უკვე დაიმუხტება რაღაც მნიშვნელობამდე, რაც საკმარისია მისი ელექტროდიდან მოწყვეტისათვის, წყდება მუშა კონდესატორის ქვედა ელექტოდიდან, რომლის დროსაც ზედა ელექტროდისკენ მოძრაობის დროს, ის გადაკვეთს ლაზერის სხივს. სხივის გადაკვეთის დროს ის თავისი ზედაპირიდან აირეკლავს ამ სხივის ნაწილს, რომელიც ფოტობიექტივის 5 და ღრეჩოს დიაფრაგმის 6-ის გავლით, რომლებიც მოთავსებულნი არიან ფოკალურ სიბრტყეში, ხვდება ფოტოელექტრონული გამამრავლებლის 7 ეკრანზე. ფოტოელექტრონული გამამრავლებლის მიერ გამომუშავებული ელექტრონი სიგნალი ხვდება ოსცილოგრაფის სხივის ვერტიკალური გადამხრელი ფირფიტების შესასვლელს, რითაც ის ახდენს ნაწილაკის დამუხტვის დამთავრების მომენტის ფიქსირებას. შესაბამისად, ის დრო, რომელიც ოსცილოგრაფის ეკრანზე ჩანს, სხივის გაშვებიდან იმპულსის წინა ფრონტის წარმოქმნამდე, შეესაბამება ნაწილაკის დამუხტვის დროს.



ნახ. 5. დანადგარის პრინციპული ელექტრული სქემა

ვაკუუმური კომუტატორის ჩართვის შემდეგ მუშა კონდენსატორზე ძაბვის მიწოდება და გამოსაკვლევ ნაწილაკის დამუხტვა იწყება ერთდროულად. იმისთვის, რომ მუშა კონდენსატორის დამუხტვის დრო არ მოახდინოს გავლენა გამოსაკვლევ ნაწილაკის დამუხტვის კინეტიკაზე, უნდა სრულდებიდეს შემდეგი პირობა:

$$t_{ღამ} \cdot C_{\theta} \ll t_{ღამ. ნაწ} \quad (8)$$

სადაც,  $t_{ღამ} \cdot C_{\theta}$  – მუშა კონდენსატორის დამუხტვის დრო, მის მაქსიმალურ მნიშვნელობამდე, ხოლო  $t_{ღამ. ნაწ}$  – ნაწილაკის დამუხტვის დრო.

მუშა კონდენსატორის დამუხტვის დრო  $t_{ღამ} \cdot C_{\theta}$  შედგება ვაკუუმური გამთიშველის კონტაქტებს შორის განმუხტვის დროისაგან  $t_{გაკ}$  და მუშა კონდენსატორის საკუთარი დამუხტვის დროისაგან

$$t_{ღამ} \cdot C_{\theta} = t_{გაკ} + t'_{ღამ} \cdot C_{\theta}$$

თავის მხრივ,  $t'_{ღამ} \cdot C_{\theta}$  განისაზღვრება მუშა კონდენსატორის დამუხტვის წრედის დროის მუდმივათი  $\tau_{\theta}$

$$\tau_{\theta} = R_{მუშ} \cdot C_{მუშ}$$

სადაც,  $C_{მუშ}$  არის  $C_{\theta}$ ,  $C_1$  და  $C_2$  ტევადობების ექვივალენტური ტევადობა.

$$C_{\text{კვ}} = C_{\theta} + \frac{C_1(C_2 + C_{\text{შეს.ოსც}})}{C_1 + (C_2 + C_{\text{შეს.ოსც}})} \approx C_{\theta} + C_1$$

პრაქტიკული გაანგარიშებისათვის შეიძლება დავუშვათ, რომ  $t_{\text{დაბ}} \cdot C_{\theta} \approx 5\tau_{\theta}$ . ამ დროის განმავლობაში ძაბვა მუშა კონდენსატორზე აღწევს კვების წყაროს ძაბვის მნიშვნელობის  $U_{\text{კვ}}(U_{\theta} = 0,993U_{\text{კვ}})$  0.993 ნაწილს.

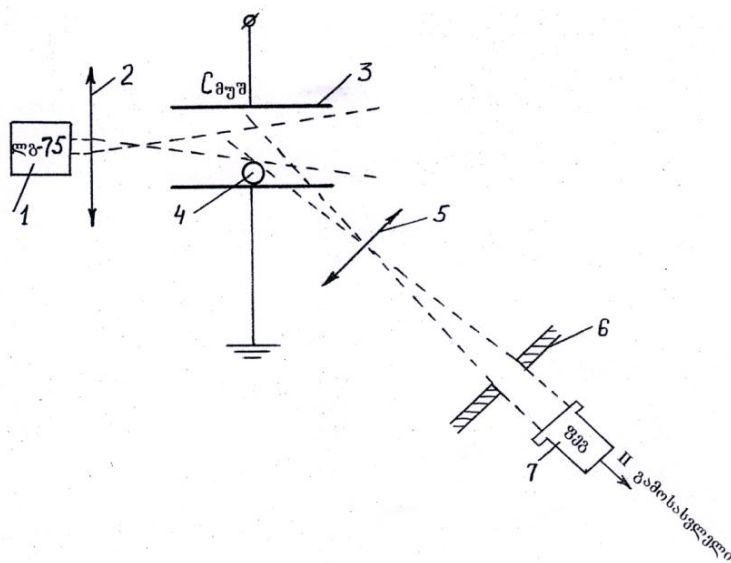
ამრიგად, მუშა კონდენსატორის საკუთარი დამუხტვის დრო ტოლია  $t_{\text{დაბ}} \cdot C_{\theta} \approx 0,8 \cdot 10^{-6}$  წმ. ვაკუუმური გამთიშველის კონტაქტებს შორის განმუხტვის დრო შეადგენს  $t_{\text{კვ}} = 10^{-6} \div 10^{-7}$  წმ [43]. როგორც ქვემოთ იქნება ნაჩვენები, გამოსაკვლევ მიწერალური ნაწილაკების მინიმალური დამუხტვის დრო, რომელთა ზომები  $2r \geq 120 \cdot 10^{-6}$  მ, ელექტრული ველის დამაბულობის დროს  $E \leq 10$  კვ/სმ, შეადგენს  $\approx 2 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-3}$  წმ-ს.

ამრიგად, ზემოთ ნაჩვენები პირობა (8) სრულდება და შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ მუშა კონდენსატორის ელექტროდებზე ძაბვა მიეწოდება მყისიერად. ექსპერიმენტული დანადგარის ელექტრული ნაწილის სხვა ელემენტების დანიშნულება შემდეგია: რეზისტორი  $R_{\text{დაბ}}$  ამცირებს მოკლედ შერთვის დენს, რომელიც შეიძლება წარმოიქმნას მუშა კონდენსატორის ელექტროდებს შორის გარღვევის შედეგად. რეზისტორი  $R_{\text{შემ}}$  ზღუდავს დამაგროვებელი კონდენსატორის დამუხტვის დენის პიკურ მნიშვნელობას, რომელსაც შეუძლია გავლენა მოახდინოს გამზომი ხელსაწყოების მუშაობაზე. ძაბვის დამყოფის ომური წინააღმდეგობის სიდიდეები  $R_1$  და  $R_2$  და რეზისტორები  $R_{\text{დაბ}}$  და  $R_{\text{შემ}}$  შეირჩევა იმის მიხედვით, რომ განსხვავებამ  $U_0$ -სა და  $U_1$ -ს შორის არ გადააჭარბოს 1%-ს, სადაც  $U_0$  და  $U_1$  არის შესაბამისად ძაბვები მუშა კონდენსატორზე კომუტაციის მომენტში და მუშაობის სტაციონარულ რეჟიმში, ე.ი. უნდა სრულდებოდეს შემდეგი პირობა

$$\frac{R_{\text{დაბ}} + R_{\text{შემ}}}{R_1 + R_2 + R_{\text{დაბ}} + R_{\text{შემ}}} \leq 0,01$$

ომურ-ტევადობის ძაბვის დამყოფი ამცირებს იმ ძაბვის სიდიდეს, რომელიც შედის ოსცილოგრაფის შესასვლელზე. ძაბვის დამყოფის კოეფიციენტი  $10^3$ -ია.

განვიხილოთ ექსპერიმენტული დანადგარის ოპტიკური ნაწილის დანიშნულება (ნახ. 6).



ნახ. 6. დანადგარის ოპტიკური სქემა

- 1 – ქვანტური გენერატორი, 2 – ამოხნეილი ლინზა, 3 – მუშა კონდენსატორი,
- 4 – გამოსაკლვლელი ნაწილაკი, 5 – ფოტობიექტივი, 6 – ღრეჩოს დიაფრაგმა,
- 7 – ფოტოელექტრონული გამამრავებელი

ღრეჩოს დიაფრაგმა 6 ემსახურება დამუხტული ნაწილაკის 4 მოძრაობის დაწყების მომენტის ფიქსაციას, რომელიც შეესაბამება ნაწილაკის დამუხტვის დამთავრებას. ლაზერის სხივის გასწორება უძრავი ნაწილაკის მიმართ ხორციელდება შემდეგნაირად: სხივის გამშლელი ლინზის ვერტიკალური მიმართულებით გადაადგილების დროს, რომელიც წარმოებს ლაზერის სხივისადმი პერპენდიკულარულ სიბრტყეში, ჩვენ ვპოულობთ მის ისეთ მდებარეობას, რომლის დროსაც ფოტოგამამრავლებლის ეკრანზე ხვდება ნაწილაკის გამოსახულების მინიმალური ნაწილი. ეს ხდება მხოლოდ მაშინ, როდესაც ლაზერის სხივი ანათებს ნაწილაკის მხოლოდ ზედა ნაწილს. ნაწილაკის მინიმალური ნაწილის ლაზერის სხივში მოხვედრაზე მოწმობს ის, რომ ოსცილოგრაფის სხივის გადახრა ნულოვანი გაშლის ჰორიზონტალური წრფისაგან ხდება შესამჩნევი და ეს მინიმალური გადახრა ტოლია  $d_0 = 2\text{მმ}$ -ის. ღრეჩოს დიაფრაგმის 6 სიგანეს ვირჩევთ ისეთი სიდიდის, რომ მის სიბრტყეში მთლიანად მოთავსდეს ნაწილაკის

გამოსახულება 4. ამ პირობის დაკმაყოფილების შემთხვევაში ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტისა და მისი ფრენისას ლაზერის სხივში ოსცილოგრაფის ეკრანზე მივიღებთ იმპულსს, რომელსაც ექნება მუდმივი ხანგრძლივობა  $t_a$ .

ფოტოელექტრონული გამამრავლებლის ნომინალური კვება ტოლია 1,8 კვ-ის. კვების ძაბვის მასზე მეტი სიდიდით მიწოდება იწვევს ოსცილოგრაფის ეკრანზე ხმაურის სიგნალის წარმოშობას, რაც ართულებს ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის დროის რეგისტრაციას. ხმაურის ჩახშობის მიზნით, რომელიც გამოწვეულია სინათლის გარეშე წყაროებით, ფოტოელექტრონული გამამრავლებლის ეკრანი დაფარულია შუქ-ფილტრით. ის ატარებს მხოლოდ გარკვეული ტალღის სიგრძის სხივს, რომელიც შეესაბამება ზემოთ აღნიშნული კვანტური გენერატორის ტიპს ( $\lambda = 0,62 \text{ მკმ}$ ).

ლაზერის ЛП-75 გამოსხივებული სხივის სიმძლავრე ტოლია 25 მვტ-ის, რაც საკმარისია გამოსაკვლევი მინერალური ნაწილაკების მოძრაობის დაწყების რეგისტრაციისთვის, რომელთა ზომები (რადიუსი)  $r_{საშ} \geq 60 \cdot 10^{-6} \text{ მ}$ .

ფოტობიექტივი 5 ემსახურება ნაწილაკისაგან არეკვლილი სხივის ფოკუსირებას, რაც აადვილებს ფოტოელექტრონული გამამრავლებლით 7 სიგნალის რეგისტრაციას.

აღწერილი ექსპერიმენტული დანადგარის საშუალებით გამოკვლევები შეიძლება ჩავატაროთ როგორც ერთეულოვან ნაწილაკებზე, ასევე ნაწილაკთა ჯგუფებზე ერთდროულად. ნაწილაკის რაოდენობა, რომლებიც შესაძლებელია ერთდროულად იქნას გამოკვლეული განისაზღვრება ცალკეული ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის დროის ხანგრძლივობით  $t_{გაზ}$ , ოსცილოგრაფის სხივის გაშლის ხანგრძლივობით (სისწრაფით)  $t_{გაშ}$  და იმპულსის ხანგრძლივობით  $t_{იმპ}$  ნაწილაკების მიახლოებითი რაოდენობა, რომლებიც ერთდროულად შეიძლება იქნას გამოკვლეული, განისაზღვრება შემდეგი პირობიდან

$$n < \frac{t_{გაშ}}{t_{გაზ} + t_{იმპ}}$$

მეორეს მხრივ, ნაწილაკთა ჯგუფების ერთროული გამოკვლევა შემოსაზღვრულია  $t_{გაზ}$ -ის და  $t_{ობ}$ -ის თანაფარდობით. თუ  $t_{გაზ} \approx t_{ობ}$ , მაშინ ცალკეული ნაწილაკის იმპულსებმა შესაძლებელია ერთმანეთი გადაფაროს. თუ  $t_{გაზ} \gg t_{ობ}$ , მაშინ ოსცილოგრაფის ეკრანზე გამოსახება სხვადასხვა იმპულსები, რაც გვაძლევს ცალკეული ნაწილაკის დამუხტვის დროის ფიქსაციის საშუალებას. იმპულსის ხანგრძლივობა  $t_{ობ}$  განისაზღვრება ნაწილაკის ზომებით, ხოლო დამუხტვის დროის ხანგრძლივობა მისი გამტარობით. აქედან გამომდინარე, ის ნაწილაკები, რომლებიც ხასიათდებიან დამუხტვის მცირე დროით, (შესაბამისად, ელექტროდიდან მოწყვეტის მცირე დროით) ანუ ის ნაწილაკები, რომელთა თვისებები ახლოსაა გამტარი ნაწილაკების თვისებებთან, ითხოვს გაზომვების ჩატარებას ერთეულოვან ნაწილაკებთან. ასეთი ნაწილაკებისათვის ნაწილაკთა ჯგუფების ერთდროული გამოკვლევების ჩატარება გაძნელებულია.

ყველა მინერალური ნაწილაკი, რომლებიც გამოკვლეული იქნა წინამდებარე სამუშაოში, საშუალებას გვაძლევდა ექსპერიმენტები ჩატარებულიყო ნაწილაკთა ჯგუფებისათვის. ექსპერიმენტის ჩატარების დროს, ოსცილოგრაფის სხივის გაშლის სიჩქარე აირჩეოდა იმის გათვალისწინებით, რომ მომხდარიყო მთელი ჯგუფიდან მაქსიმალური ნაწილაკების რაოდენობის ელექტროდიდან მოწყვეტის დროის ფიქსირება (რეგისტრაცია). დანარჩენი ნაწილაკების მოწყვეტის დროის ფიქსირება ხდებოდა სიხშირემზომით 43 – 33 ან წამმზომის გამოყენებით. წამმზომის ჩართვა ხდებოდა ერთდროულად, მაღალი ძაბვის მიწოდებასთან ერთად.

ნაწილაკები დამუხტავ ელექტროდზე თავსდებოდნენ მისი ცენტრალური ნაწილის მიდამოში, ერთმანეთისაგან ცალცალკე, ისე, რომ გაანაპირა ნაწილაკები არ გამოსულიყვნენ განათებულობის ზონიდან.

ნახ. 7-ზე ნაჩვენებია მუშა კონდენსატორის მოწყობილობა. ის შედგება ზედა და ქვედა ფირფიტისაგან, რომელთა დიამეტრი ტოლია  $d = 75$  მმ-ის. ფირფიტებს შორის მანძილი ფიქსირდებოდა ზუსტად 10 მმ-ის ტოლ სიმაღლეზე. ფირფიტების ზუსტად დამაგრებისათვის გამოიყენებოდა

მცირე ზომის ცილინდრული ფორმის, 10 მმ-ის ტოლი სიმაღლის ეტალონური შაბლონი. მას ვათავსებდით ქვედა ფირფიტის შუა ნაწილში, ხოლო შემდეგ ზედა ფირფიტის დაშვებისა და დამაგრების შედეგად ზუსტად ვაფიქსირებდით ფირფიტებს შორის მანძილს. მუშა კონდენსატორის ასეთი გეომეტრიის დროს, მის ცენტრალურ ნაწილში, რომლის რადიუსი  $R \leq 20$  მმ-ზე, ელექტრული ველის დამაბულობა ფირფიტებს შორის მუდმივია და ის ტოლია  $E = u/d$ .

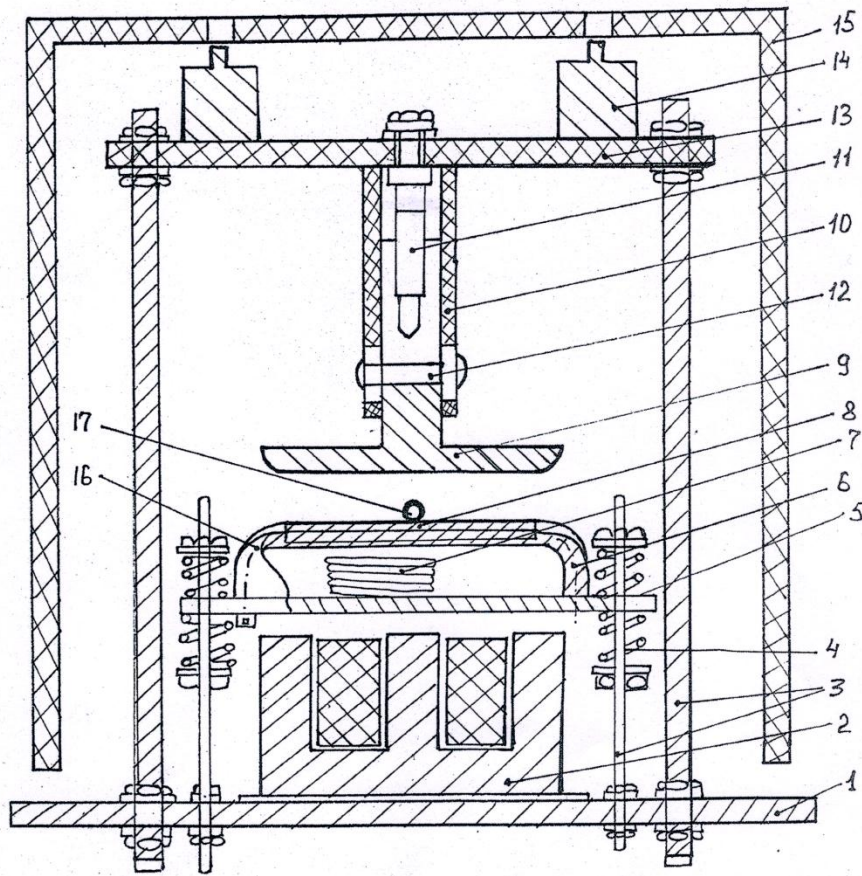
დამუხტული ნაწილაკები, რომლებიც მოწყდნენ დამმუხტველ ელექტროდს და მიკრულები იყვნენ ზედა იზოლირებულ ელექტროდს, ადვილად მოიხსნებოდნენ იზოლირებული ნემსაკის საშუალებით.

მოხსნილი ნაწილაკების მუხტის გაზომვის შემდეგ, ექსპერიმენტის განმეორების მიზნით, იგივე ნაწილაკები ისევ თავსდებოდნენ ქვედა დამმუხტველი ელექტროდის ცენტრალურ ნაწილში და შემდეგ შაბლონის საშუალებით ისევ ვამაგრებდით ზედა ელექტროდს ზუსტად 10 მმ-ის სიმაღლეზე. ეს პროცედურები საშუალებას გვაძლევდა ჩაგვეტარებინა ექსპერიმენტების სერია ერთსა და იმავე ნაწილაკებზე.

მუშა კონდენსატორის ქვედა ფირფიტა დამზადებულია ღრუ ცილინდრული ფორმის დისკის სახით. მისი კონსტრუქციული შესრულება საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ სხვადასხვა მასალის ზედაპირის ზეგავლენა ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე. ამისათვის მასში გათვალისწინებულია სხვადასხვა მასალისაგან დამზადებული ცილინდრული ფორმის ფირფიტების დამაგრება მუშა კონდენსატორის ქვედა ელექტროდის ზედაპირზე.

მუშა კონდენსატორის ზედა ელექტროდი დაფარულია ПЕП-177 მარკის საიზოლაციო ეპოქსიდური საღებავით. დაფარული მასალის სისქე არ აღემატებოდა 100 მკმ-ს. ეს საშუალებას გვაძლევდა ზედა ელექტროდზე შეგვეჩერებინა და დაგვეჭირა ის ნაწილაკები, რომლებიც დამუხტვის შედეგად წყდებოდნენ ქვედა ელექტროდს და აგრძელებდნენ მოძრაობას ელექტრულ ველში ზედა ელექტროდისაკენ. მათი შეჩერება და დაჭერა

ერთის მხრივ თავიდან გვაშორებდა ზედა ელექტროდზე მათი ხელმეორედ გადამუხტვისაგან, რაც გამოიწვევდა მათ მოძრაობას ქვედა ელექტროდისაკენ, და ა.შ. ეს კი გამოიწვევდა ოსცილოგრაფის ეკრანზე ერთი ნაწილაკის მიერ მრავალჯერადი იმპულსების წარმოქმნას. ეს მოვლენა განსაკუთრებით შესამჩნევი ხდებოდა, როდესაც ვაწარმოებდით რამდენიმე ნაწილაკის ერთდროულ გამოკვლევას.



**ნახ. 7 მუშა კონდენსატრის კონსტრუქცია**

- 1 – საფუძველი, 2 – ელექტრომაგნიტური აღმგზნები, 3 – ქვედა და ზედა ფირფიტების სადგარები, 4 – ზამბარა, 5 – ელექტრომაგნიტური ლუზა, 6 – ქვედა ფირფიტა, 7 – გამახურებელი, 8 – გამოსაკვლევი საფენი, 9 – ზედა ფირფიტა, 10 – საცობი, მიმმართველი ღარით, 11 – ტრანსპორტირების ხრახნი, 12 – წკირი, 13 – ზედა ფირფიტა, 14 – ბლოკირების მოწყობილობა, 15 – დამცავი ხუფი, 16 – თერმოწყვილი, 17 – გამოსაკვლევი ნაწილაკი



გარდა ამისა, დამუხტული ნაწილაკების ზედა ელექტროდზე დაჭერა, საშუალებას გვაძლევდა მაღალი ძაბვის გამორთვის შემდეგ ეს ნაწილაკები იზოლირებული ნემსაკის საშუალებით მოგვეხსნა ზედა ელექტროდიდან ისე, რომ შეგვენარჩუნებინა მასზე არსებული მუხტი და შემდგომ ისინი ჩაგვეშვა ელექტრომეტრის მუხტის გამზომ მოწყობილობაში.

მუშა კონდენსატორის ქვედა ელექტროდის სიღრუეში მოთავსებულია გამათბობელი სპირალი. ქვედა ელექტროდის ტემპერატურა შეიძლება ვარეგულიროთ ოთახის ტემპერატურიდან 300°C-მდე. ტემპერატურის გაზომვას ვაწარმოებდით ქრომელ-კოპელის თერმოწყვილის საშუალებით. მუშა კონდენსატორში გათვალისწინებულია ინდუქციური დამუხტვის პროცესში მისი ქვედა ელექტროდის ვიბრაცია. ამისათვის მუშა კონდენსატორის ქვედა ელექტროდი დამაგრებულია ფოლადის ღეროზე, რომელიც წარმოადგენს ელექტრომაგნიტის ღუზას. ქვედა ფირფიტის მასა მთლიანი კონდენსატორის მასასთან შედარებით არის უმნიშვნელო. ამის გამო ქვედა ფირფიტის რხევა არ გადაეცემა კონდენსატორის სხვა ნაწილებს. რხევის ამპლიტუდის რეგულირება ხდება ელექტრომაგნიტის ამგზნები გრაგნილის კვების ძაბვის საშუალებით. გარემომცველი გარემოს ტენიანობის ცვლილება წარმოებდა მუშა კონდენსატორის გარშემო მცირე მოცულობის არეში წყლის აორთქლების გზით. ტენიანობის გაზომვას ვახდენდით ფსიქრომეტრის საშუალებით.

ექსპერიმენტული კვლევები წარმოებდა მონომინერალურ ნაწილაკებზე, რომელთა ზომები იზომებოდა МБИ-6 ოპტიკური მიკროსკოპის საშუალებით, რომლის გამოყენებით ხდებოდა ნაწილაკების ზომების 54-ჯერ გადიდება. ზომები იზომებოდა სამი ურთიერთპერპენდიკულარული მიმართულებით: მათ შორის, ორი მათგანი გამოსახულების სიბრტყეზე, ხოლო მესამე ამ სიბრტყის პერპენდიკულარული მიმართულებით. ამ ზომის გაზომვას ვახდენდით ფოკუსური მანძილების სხვაობის მიხედვით, რომელიც მიიღებოდა ნაწილაკების სიმაღლის ბოლო წერტილის ფოკუსსა და ელექტროდის ზედაპირის ფოკუსს შორის, რომელზედაც მდებარეობდა

ნაწილაკი. ნაწილაკების ზომების გაზომვის სიდიდე დამოკიდებულია გამოსახულების სიმკვეთრის სიღრმეზე და გადიდების მასშტაბზე. ჩვენს მიერ გამოყენებული ოპტიკისათვის ის შეადგენდა 2 მკმ-ს. რაც 80 მკმ ნაწილაკებისათვის ის გვაძლევს  $\frac{2}{80} \cdot 100 = 2.5\%$  – ს, ხოლო 400 მკმ ნაწილაკისათვის 0.5%-ს.

ყოველი ნაწილაკის საშუალო ზომა (ნაწილაკის რადიუსი) განისაზღვრებოდა გამოსახულებიდან  $a_{საშ} = \sqrt[3]{abc}$ , სადაც  $a, b, c$  არის ნახევარღერძები მისი სამი ურთიერთპერპენდიკულარული მიმართულებებით; აქედან გამომდინარე,  $a_{საშ}$  არის ნაწილაკის შესაბამისი მოცულობითი ექვივალენტური სფეროს რადიუსი.

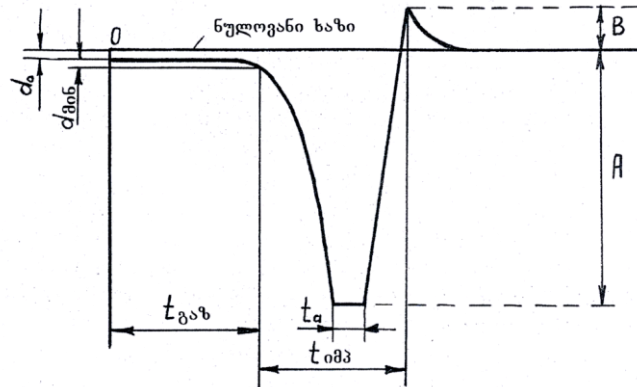
ყოველი მინერალური ფრაქციიდან ხდებოდა სამი სხვადასხვა ჯგუფის ნაწილაკების არჩევა, რომელთა ზომები იყო დაახლოებით ერთნაირი  $(a_{საშ})_{მინ}$ ,  $(a_{საშ})_{საშ}$  და  $(a_{საშ})_{მაქ}$  თითოეულ ჯგუფში ცალკეული ნაწილაკის ზომების განსხვავება მისი გასაშუალოებული მნიშვნელობიდან არ აღემატებოდა  $\pm 7\%$ -ს. გამოსაკვლევი ნაწილაკების ღერძების (ნახევარღერძების) თანაფარდობა შეადგენდა  $b/a = 0,80$ ;  $c/a = 0,66$ .

ზემოაღწერილი ექსპერიმენტული დანადგარი საშუალებას გვაძლევს გავზომოთ ყველა ის სიდიდე, რომლებიც საჭიროა ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ანალიზისათვის, კერძოდ, დამუხტვის პარამეტრები და ის პირობები, რომლებიც განსაზღვრავენ მის მნიშვნელობებს. განვიხილოთ ასეთი გაზომვების ზღვრული შესაძლებლობები.

## 2.2. ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ელექტროფიზიკური პარამეტრების გაზომვის მეთოდოლოგია

დასაწყისში განვიხილოთ ნაწილაკების დამუხტვის დრო. გაზომილი დრო წარმოადგენს ჯამს თვით ნაწილაკის საკუთარი დამუხტვის დროისა  $t_{დაშ}$ , რომელიც საჭიროა ნაწილაკის ლაზერის სხივამდე მიღწევამდე (ანუ, ნაწილაკის გამოსახულების ღრეჩოს კიდემდე მისვლამდე საჭირო დრო)  $t_{ფრ}$

და იმ დროისა რომელიც საჭიროა ოსცილოგრაფის იმპულსის დაწყების ფიქსაციისათვის  $t_{ოსც}$  (ნახ. 8).



ნახ. 8. იმპულსის ფორმა

$d_0$  – სიგნალის საწყისი დონე, რომელიც შეესაბამება ფოტოელექტრონული გამამრავლებლის საწყის განათებულობას ( $d_0=2მმ$ ),  $d_{მინ}$  – სიგნალის მინიმალური დონე ( $d_{მინ}=2მმ$ ),  $A$  – სიგნალის ამპლიტუდა,  $B$  – სიგნალის უკუ ამოვარდნა,  $t_{გაზ}$  – ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტამდე გავლილი დრო,  $t_{იმპ}$  – იმპულსის ხანგრძლიობა,  $t_a$  – იმპულსის ბრტყელი ნაწილის ხანგრძლიობა

ამრიგად,

$$t_{დამ. გაზ} = t_{დამ} + t_{გრ} + t_{ოსც} \quad (9)$$

გაზომვები გვიჩვენებს, რომ ერთეული სფერული ფორმის ნაწილაკებისათვის  $t_{გრ} = 0$ . მეტალური ნაწილაკებისათვის  $t_{დამ} = 0$ , ამიტომ,  $t_{დამ. გაზ} = t_{ოსც}$ .

ამ სიდიდით შემოიფარგლება ნაწილაკის დამუხტვის დროის გაზომვის შესაძლებლობები.

დროის მდგენელი  $t_{ოსც}$  წარმოადგენს იმ დროს, რომელიც აუცილებელია იმისათვის, რომ ოსცილოგრაფის ეკრანზე სხივის გადახრა საწყისი  $d_0$  დონიდან (რომელიც შეესაბამება ფოტოელექტრონული გამამრავლებლის ეკრანზე ნაწილაკის გამოსახულების საწყის განათებულებას) მოხდეს იმ დონემდე, რომ ვიზუალურად შესაძლებელი იყოს მისი დაფიქსირება, როგორც ნაწილაკის დამუხტვის დაწყების დრო. შესასვლელი სიგნალის მინიმალური დრო, რომელიც აუცილებელია ოსცილოგრაფზე სხივის

ნულოვანი დონიდან გადახრის ფიქსაციისათვის, შეადგენს  $d_{\text{გონ}} = 2\delta\delta$ . ეს მანძილი გადაანგარიშებულია ნაწილაკის იმ მინიმალური ზომისათვის, რომელიც შედის ლაზერის სხივის განათებულობის არეში, და რომლის დაფიქსირება შესაძლებელია უკვე ოსცილოგრაფზე. ის შეადგენს

$$\Delta a = \frac{2a \cdot d_{\text{გონ}}}{A} \quad (10)$$

სადაც,  $A$  სიგნალის ამპლიტუდაა, რომელიც პროპორციულია ნაწილაკის დიამეტრისა  $2a$  და განისაზღვრება ოსცილოგრაფის მგრძნობიარობით. ასევე განისაზღვრება  $\Delta a$ .

დრო, რომელიც აუცილებელია იმპულსის დაწყების ფიქსირებისათვის განისაზღვრება როგორც დრო, რომლის განმავლობაშიც ნაწილაკი ელექტროდიდან მოწყვეტის მომენტიდან გადის  $\Delta a$  მანძილს.

ნაწილაკის გადაადგილების დროზე დამოკიდებულების განსაზღვრისათვის გამოვიყენოთ ნაწილაკზე მოქმედი მუდმივი ძალის გამოსახულება.

ამ შემთხვევაში ნაწილაკზე მოქმედებს ძალა

$$F = KEq - mg$$

სადაც,  $K$  კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ნაწილაკზე მოქმედი მუხტის სარკისებური ანასახის ძალას, რომელიც ტოლია 0.83; ამიტომ

$$\Delta a = V_{\text{დაბ}} \left\{ t_{\text{მსვ}} + \frac{\tau_{\text{მომ}}}{K_c} \left[ -\exp\left(\frac{K_c \cdot t_{\text{მსვ}}}{\tau_{\text{მომ}}}\right) \right] \right\},$$

სადაც,  $V_{\text{დაბ}} = (KEq - mg) \frac{\tau_{\text{მომ}}}{m \cdot K_c}$  - წარმოადგენს ნაწილაკის მოძრაობის დამყარებულ სიჩქარეს;  $\tau_{\text{მომ}}$  - ნაწილაკის მოძრაობის დროის მუდმივას, რომელიც ტოლია  $\tau_{\text{მომ}} = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \gamma_{\text{ნაწ}}}{\mu}$ ;  $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5} \frac{\text{ნწმ}}{\text{ბ}^2}$  - ჰაერის სიბლანტის დინამიური კოეფიციენტი;  $K_c$  - არის გარემოს წინააღმდეგობის ძალის აპროქსიმაციის კოეფიციენტი, ხოლო  $\gamma_{\text{ნაწ}}$  - ნაწილაკის სიმკვრივე.

დროის საწყისი მომენტისათვის, ექსპონენტას მწკრივებად დაშლის შემდეგ და მწკრივის პირველი წევრის გათვალისწინებით, მივიღებთ

$$t_{\text{მსვ}} = \frac{a \cdot d_{\text{გონ}}}{A \cdot \left( K \frac{Eq}{m} - g \right)} \cdot \frac{K_c}{\tau_{\text{მომ}}} \quad (11)$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ ერთეულოვანი ნაწილაკის მინიმალური დამუხტვის დრო, რომლის გარჩევა შესაძლებელია ოსცილოგრამაზე, დამოკიდებულია ელექტრული ველის დაძაბულობაზე, ნაწილაკის ზომასა და ნაწილაკის სიმკვრივეზე, გამოყენებული ოსცილოგრაფის მგრძნობიარობის გაძლიერების კოეფიციენტის პირობებში. ნახ. 9-ზე მოყვანილია რუტილის ნაწილაკების  $t_{ოსვ}$ -ის დამუხტვის დროის რაოდენობივი შეფასებები, რომლის სიმკვრივე შეადგენს  $4,25 \cdot 10^3$  კგ/მ<sup>3</sup>-ს. უნდა აღინიშნოს, რომ სამუშაოში სხვა მინერალებზე მიღებული მონაცემები ახლოსაა აღნიშნულ მონაცემებთან.

ნაწილაკთა ჯგუფების გამოკვლევის დროს ღრეჩოს დიაფრაგმის მდებარეობის განსაზღვრა ხდება ყველაზე დიდი ნაწილაკის მიხედვით. ამ დროს აუცილებელია მხედველობაში იქნას მიღებული ნაწილაკის სხივამდე მიღწევის დრო  $t_{გრ}$ . ნაწილაკების ზომების ჯგუფურად შერჩევის დროს მხედველობაში მიღებული იყო მისი საშუალო არითმეტიკულიდან  $\pm 7\%$ -ით გადახრა. ამიტომ ნაწილაკების ზომებს შორის მაქსიმალური გადახრა და შესაბამისად მაქსიმალური მანძილი, რომელიც საჭიროა ნაწილაკის ლაზერის სხივში მოხვედრამდე შეადგენს

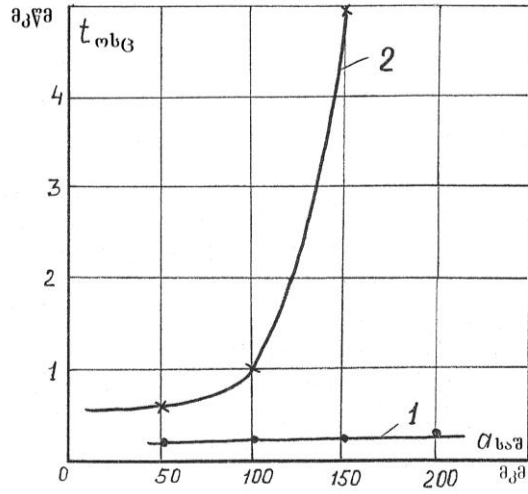
$$\Delta d_{მავ} \leq 0,14 \cdot d_{საშ}$$

სადაც,  $d_{საშ}$  – ნაწილაკის საშუალო დიამეტრია.

ფრენის დრო შეიძლება გამოვთვალოთ (2.4)-ის მსგავსად.

$$t_{გრ} = \frac{0,28 \cdot a_{საშ}}{2 \cdot \left( K \frac{Eq}{m} - g \right)} \cdot \frac{K_c}{\tau_{მომ}} \quad (12)$$

საიდანაც ჩანს, რომ  $t_{გრ}$  დამოკიდებულია იმავე სიდედეებზე, რაც  $t_{ოსვ}$ . გამოთვლები გვიჩვენებს, რომ (ნახ. 10), ამ შემთხვევაში  $t_{გრ} \gg t_{ოსვ}$ . აქ გათვალისწინებულია ის, რომ ამ შემთხვევაში ნაწილაკი ლაზერის სხივს გაივლის გაცილებით სწრაფად, რასაც მივყავართ  $t_{ოსვ}$ -ის შემცირებისკენ.

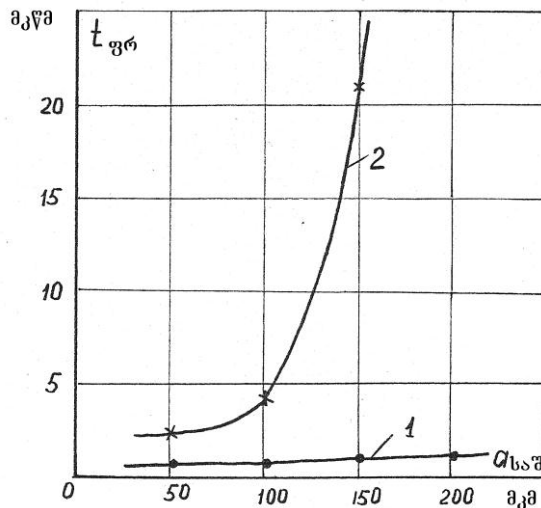


ნახ. 9. ოსცილოგრაფზე მინიმალური დროის ფიქსაციის დამოკიდებულება რუტილის ნაწილაკების ზომებზე

$$(\gamma_{\text{ნაწ}} = 4,25 \cdot 10^3 \text{ კგ/მ}^3).$$

$$1 - E = 10 \cdot 10^5 \text{ ვ/მ}, 2 - E = 5 \cdot 10^5 \text{ ვ/მ}.$$

ამრიგად, ნაწილაკთა ჯგუფების გამოკლვევის დროს, დამუხტვის დროის გაზომვა ხდება უფრო დიდი ცდომილებით ვიდრე ერთეულოვანი ნაწილაკების გაზომვის დროს. მიუხედავად ამისა ორივე შემთხვევაში შესაძლებელია ორივე დრო  $t_{\text{გრ}}$  და  $t_{\text{ოსც}}$  უგულებელვყოთ. მაშინ ვღებულობთ, რომ  $t_{\text{დამ}} = t_{\text{გაზ}}$ .



ნახ. 10. რუტილის ნაწილაკების ფრენის მაქსიმალური დროის დამოკიდებულება მათ ზომებზე

$$1 - E = 10 \cdot 10^5 \text{ ვ/მ}, 2 - E = 5 \cdot 10^5 \text{ ვ/მ}.$$

### 2.3. მუხტის გაზომვა ინდუქციური დამუხტვის პროცესის შესწავლის დროს

ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრებად ვიღებთ (თავი I): ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტი  $q$  და ნაწილაკების ზღვრული მუხტი  $q_{ზღვ}$ . იმის გამო, რომ მეტალური (გამტარი) ნაწილაკებისათვის დამუხტვის დროის მუდმივა პრაქტიკულად უსასრულოდ მცირე სიდიდისაა, მუხტის ეს ორივე მნიშვნელობა ერთმანეთს ემთხვევა. დიელექტრიკული ნაწილაკებს, რომლებიც ხასიათდებიან კუთრი გამტარობის გარკვეული მნიშვნელობით, ყოველთვის არ შეუძლიათ მიიღონ თავისი ზღვრული მუხტი. მართლაც, ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა შეიძლება ჩავწეროთ შემდეგნაირად

$$KEq - mg - F_{ადგ} \geq 0 \quad (13)$$

ნაწილაკის მუხტი  $E$  დამაბულობის ელექტრულ ველში იცვლება შემდეგი კანონის მიხედვით

$$q = q_{ზღვ} \left( 1 - e^{-\frac{t_{დაბ}}{\tau_{დაბ}}} \right),$$

მაშინ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა (13) ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$KEq_{ზღვ} \left( 1 - e^{-\frac{t_{დაბ}}{\tau_{დაბ}}} \right) - mg - F_{ადგ} \geq 0$$

აქედან გამომდინარე, მეტალური (გამტარი) ნაწილაკებისათვის ( $\tau_{დაბ} = 0$ ) გვექნება

$$KEq_{ზღვ} - mg - F_{ადგ} \geq 0$$

ანუ ნაწილაკის მოწყვეტისას  $q = q_{ზღვ}$ .

დიელექტრიკული ნაწილაკებისათვის (გამტარებლობის სასრულო მნიშვნელობის დროს)  $\tau_{დაბ} \neq 0$ , ამიტომ პირობა (13) კმაყოფილდება როდესაც  $q < q_{ზღვ}$ .

მუხტების გაზომვის ცნობილი მეთოდების ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვიდან (თავი I) გამომდინარეობს, რომ ინდუქციური დამუხტვის კვლევისას, ყველაზე უფრო მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ მუხტების გაზომვის უშუალო მეთოდი. ამ მეთოდით შესაძლებელია ნაწილაკების მუხტების გაზომვა ელექტრული ველის დაძაბულობის ნებისმიერი მნიშვნელობის დროს, რომლის დროსაც ხდება ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტა. მაგრამ ამ მეთოდით დიელექტრიკული ნაწილაკების ზღვრული მუხტის განსაზღვრა ძალიან გაძნელებულია. ამიტომ წინამდებარე ნაშრომში შემოთავაზებულია მუხტების გაზომვის ახალი მეთოდი, რომელიც დამყარებულია ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ბალანსის ანალიზზე. აღნიშნული მეთოდი განმტკიცებულია საავტორო უფლებით [50]. განვიხილოთ აღნიშნული კვლევებისათვის გამოყენებული ამ მეთოდების შესაძლებლობები.

### 2.3.1. მუხტების გაზომვის უშუალო მეთოდი

ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტების გაზომვა ხდება BK2-16 ტიპის ელექტრომეტრის საშუალებით. ამისათვის დამუხტულ ნაწილაკს, რომელიც მიკრული იყო ზედა იზოლაციით დაფარულ ელექტროდზე, ვხსნიდით იზოლირებული ნემსაკის საშუალებით და მას უშვებდით ელექტრომეტრის გამზომ მოწყობილობაში.

ნაწილაკის მუხტი იზომებოდა ცნობილ ტევადობაზე წარმოქმნილი ძაბვის საშუალებით [1, 3], როგორც  $q = CU$ , სადაც  $C$  არის ელექტრომეტრის შესავალი ტევადობა, ხოლო  $U$  – ტევადობაზე წარმოქმნილი  $q$  მუხტით გამოწვეული ძაბვა.

დამუხტული ნაწილაკი, რომელიც იმყოფება მუშა კონდესატორის ზედა ელექტროდზე, იწყებს მუხტების გაჟონვას ამ ელექტროდის საიზოლაციო წინაღობაზე. გარდა ამისა, ნაწილაკის კონტაქტმა საიზოლაციო ფენასთან შეიძლება გამოიწვიოს მასზე ტრიბომუხტის წარმოქმნა. ყველა ეს



ფაქტორები აწესებენ გარკვეულ შეზღუდვებს ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტების გაზომვის შესაძლებლობებზე.

აღნიშნული მარკის ეპოქსიდური ფენის კონტაქტი ნაწილაკთან არ იძლეოდა ტრიბომუხტს. ეს ფაქტი შემოწმებული იყო მრავალჯერ, როდესაც გაზომილი იქნა ნაწილაკების მუხტების მნიშვნელობები მათი კონტაქტის შემდეგ ეპოქსიდურ ფენასთან ელექტრული ველის არარსებობის პირობებში. როდესაც ელექტროდს ვფარავდით ფტოროპლასტით, მაშინ ნაწილაკის კონტაქტს ამ მასალასთან მივყავდით მნიშვნელოვანი სიდიდის ტრიბომუხტის წარმოქმნასთან, რომლის სიდიდე აღწევდა შესაბამისი ინდუქციური ზღვრული მუხტის ათჯერად მნიშვნელობას.

ტემპერატურის მომატებისას 423K-ზე ზევით ან გარემომცველი გარემოს ტენიანობის 80%-ზე მეტი მნიშვნელობის დროს ზედა ელექტროდის დაფარული საიზოლაციო მასალის ელექტრული წინაღობა, მცირდება, რასაც მივყავდით ნაწილაკის მუხტის მნიშვნელოვან შემცირებასთან, ზოგჯერ კი საწინააღმდეგო ნიშნის მუხტის მიღებასთან.

ტემპერატურისა და ნესტიანობის ქვემოთ ნაჩვენები მნიშვნელობების დროს ასეთ მოვლენებს ადგილი არ ჰქონდა. გაზომვებისას ვღებულობდით მუხტების სტაბილურ მნიშვნელობებს. იზოლაციაზე მუხტების გაჟონვის ცდომილებები იყო უმნიშვნელო ინსტრუმენტალურ ცდომილებებთან შედარებით.

განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობოდა მუშა კონდენსატორის ზედა ელექტროდის საიზოლაციო ფენის, იზოლირებული ნემსაკის, ელექტრომეტრის გამზომი მოწყობილობისა და ძაბრის დიელექტრიკულის ზედაპირის ფენის სისუფთავეს, რომ თავიდან აგვეცილებინა ზედაპირული მუხტის გაჟონვა.

მუხტის გაზომვის სიზუსტეზე განსაკუთრებულ ზეგავლენას ახდენდა ჰაერში არსებული მტვერი. სამუშაო გამოცდილებამ გვიჩვენა, რომ მუშა კონდენსატორის ელექტროდების მტვრის გაჭუჭყიანებისაგან დასაცავად საჭიროა გაზომვების დაწყების წინ 10-15 წთ-ის განმავლობაში ელექტრო-

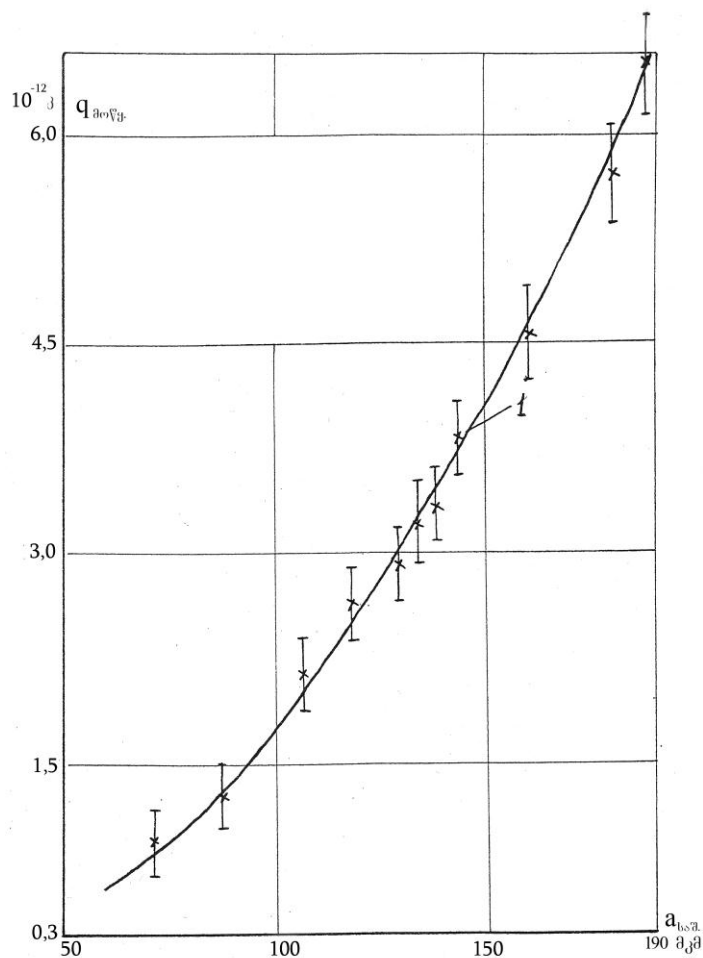
დებს მივაწოდოთ მაქსიმალური ძაბვა. ამის შემდეგ აუცილებელია ზედა ელექტროდი გავწმინდოთ სუფთა სპირტით. როდესაც ცდებს ვატარებდით ნახშირბადის შემცველი (გრაფიტის) დამმუხტავი ელექტროდით, მაშინ საჭირო ხდებოდა ყოველი ორსაათიანი შეუსვენებელი მუშაობის შემდეგ გაწმენდა ჩაგვეტარებინა ერთხელ, ხოლო მეტალური ელექტროდებისათვის ყოველი 4-5 სთ-იანი მუშაობის შემდეგ. იზოლირებული ნემსაკი, ძაბრი და გამზომი მოწყობილობის იზოლატორი საკმარისი იყო გავვეწმინდა კვირაში ერთხელ.

ზემოჩამოთვლილი პირობების დაცვის შემთხვევაში მუხტის გაზომვის სიზუსტე განისაზღვრება ელექტრომეტრის შესავალი ტევადობის გაზომვის სიზუსტით და მასზე არსებული ძაბვის ვარდნით. ელექტრომეტრის შესავალი ტევადობა მის მიძღებ უჯრედთან ერთად გაზომილი იყო E2-12 ტიპის ხელსაწყოთი  $\pm 0,5\%$ -ის სიზუსტით. ელექტრომეტრზე ძაბვის ვარდნა იზომებოდა  $\pm 5,5\%$ -ის სიზუსტით. ამგვარად, ნაწილაკების მუხტები იზომებოდა  $\pm 5,5\%$ -ის სიზუსტით.

ნაწილაკების დამუხტვის ხასიათზე შეიძლება გავლენა იქონიოს ნაწილაკზე წარმოშობილმა გვირგვინულმა განმუხტვამ, რომლის ინიცირება იწყება ელექტრული ველის დამაბულობის გარკვეული მნიშვნელობის დროს. ნაწილაკების მაქსიმალური დიამეტრი, რომლებზედაც ჩატარებული იყო ერსპერიმენტები არ აღემატებოდა 400 მკმ-ს. მათთვის გვირგვინული განმუხტვის დაწყების ელექტრული ველის დამაბულობა შეადგენს 18 კვ/სმ [51] და ნაწილაკის ზომების შემცირებასთან ერთად ის იზრდება. ჩვენს მიერ ჩატარებულ გაზომვებში ელექტრული ველის დამაბულობა არ აღემატებოდა 10 კვ/სმ-ზე, შესაბამისად, გვირგვინულ განმუხტვას ადგილი არ ჰქონია.

ნაწილაკების მუხტების გაზომვის სიზუსტე შემოწმებული უნდა იქნას პირველ რიგში სფერული მეტალური ნაწილაკებისათვის, რომელთათვისაც მუხტების თეორიული გაანგარიშებანი და მათი ექსპერიმენტალური შესაბამისობა ყველაზე მეტად არის დადასტურებული (თავი I).

ასეთი გაზომვები ჩატარებული იქნა ზოგიერთ მეტალური სფერული ფორმის ნაწილაკებზე (ნახ. 11), რომელთა რადიუსი იცვლებოდა 70 მკმ-დან 190 მკმ-მდე დიაპაზონში, ხოლო ელექტრული ველის დამაბულობა შეადგენდა 10კვ/სმ-ზე. გაზომილი მუხტების შედარება მის თეორიულ მნიშვნელობებთან გვიჩვენებს, რომ მეტალური სფერული ფორმის ნაწილაკები ინდუქციური დამუხტვის პროცესში დებულობენ თავის ზღვრულ მუხტს. ეს ეთანხმება ლიტერატურულ მონაცემებს (თავი I) და ამტკიცებს მუხტების ჩატარებული გაზომვების სისწორეს [68].



ნახ. 11. მოწყვეტის მუხტის ექსპერიმენტული დამოკიდებულება ნიკელის სფერული ნაწილაკების ზომებზე

$E=10\text{კვ/სმ}$  1 – (6) ფორმულით გამოთვლილი ზღვრული მუხტი,  
 $x$  – ექსპერიმენტული მნიშვნელობები,  $I$  – სანდო ინტერვალი

### 2.3.2. მუხტზე მოქმედი ძალების ბალანსზე დაფუძნებული მუხტის გაზომვის მეთოდი

აღნიშნული მეთოდი საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტი ელექტროული ველის დაძაბულობის კონკრეტული მნიშვნელობის დროს. მუხტის გაზომვის დროს აუცილებელია შეიქმნას ისეთი პირობა, რომლის დროსაც გამოირიცხება ნაწილაკზე მოქმედი ადგილობრივი ძალებისა და მუხტის სარკისებური ანასახის ძალების ზემოქმედება. ჩვენს დანადგარში ეს განხორციელებული იქნა მუშა კონდენსატორის ქვედა ელექტროდის ვიბრაციის შედეგად. ამასთან ერთად შერჩეული იყო ვიბრაციის ისეთი ამპლიტუდა, რომელიც უზრუნველყოფდა ნაწილაკების ელექტროდიდან ისეთ მანძილზე აწევას, რომელიც თანაზომადია ნაწილაკის ზომებთან. ამ დროს ნაწილაკები ჰაერში არსებობენ კვაზისტატიკურ მდგომარეობაში (ვიზუალურად შეიმჩნეოდა ჰაერში ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების უმცირეს მანძილზე ლივლივი, დუღილი), რაც განაპირობებდა ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტის გაწყვეტას, რითაც გამოირიცხებოდა ნაწილაკზე ზემოთ ნახსენები ძალების ზემოქმედება. ასე, რომ თუ  $h/a = 1$ , სადაც  $h$  არის მანძილი სფერული ნაწილაკის ცენტრიდან ელექტროდის სიბრტყემდე, ხოლო  $a$  სფერული ნაწილაკის რადიუსი, მაშინ სარკისებური ანასახის ძალის წილი მთელი კულონური ძალის ზემოქმედებაში შეადგენს 16,8%-ს, ხოლო როდესაც  $h/a = 2$ , მაშინ ის შეადგენს 5%-ს, რაც იმყოფება ექსპერიმენტის ცდომილების ფარგლებში.

გამტარი ნაწილაკებისათვის ნაწილაკების მიერ მიღებული მუხტი ყოველთვის არის ზღვრული მუხტი. ნაწილაკის მიერ მისი ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობის შესრულებას კი ( $F_{ელ} \geq mg$ ) მივყავართ იქამდე, რომ ყველა ნაწილაკი არ მოწყდება ელექტროდს (რაც შეიმჩნევა კიდევ ექსპერიმენტში), ხოლო მოწყვეტილი ნაწილაკის მუხტი ყველა შემთხვევაში არის ზღვრული.

ექსპერიმენტულად ელექტრული ველის დამაბულობის ზღურბლურ-რი მნიშვნელობა არის მისი ის მინიმალური მნიშვნელობა, რომლის დროსაც ნაწილაკი უკვე ახერხებს ზედა ელექტროდისაკენ მოძრაობას ვიბრაციის არსებობის პირობებში. იმისათვის, რომ ნაწილაკმა მიიღოს თავისი შესაძლებლობების მაქსიმალური მუხტი, ანუ ზღვრული მუხტი, საჭიროა გავითვალისწინოთ დამუხტვის დრო. ეს მიიღწეოდა იმით, რომ ჯერ ჩაირთვებოდა ვიბრაცია, ხოლო შემდეგ ელექტროდებზე მიეწოდებოდა ძაბვა. ძაბვისა და ვიბრაციის ამპლიტუდის თანდათანობითი გაზრდით მიიღწეოდა ელექტრული ველის დამაბულობის ის მინიმალური მნიშვნელობა, რომლის დროსაც ნაწილაკი ახერხებდა მოძრაობას ზედა ელექტროდისაკენ.

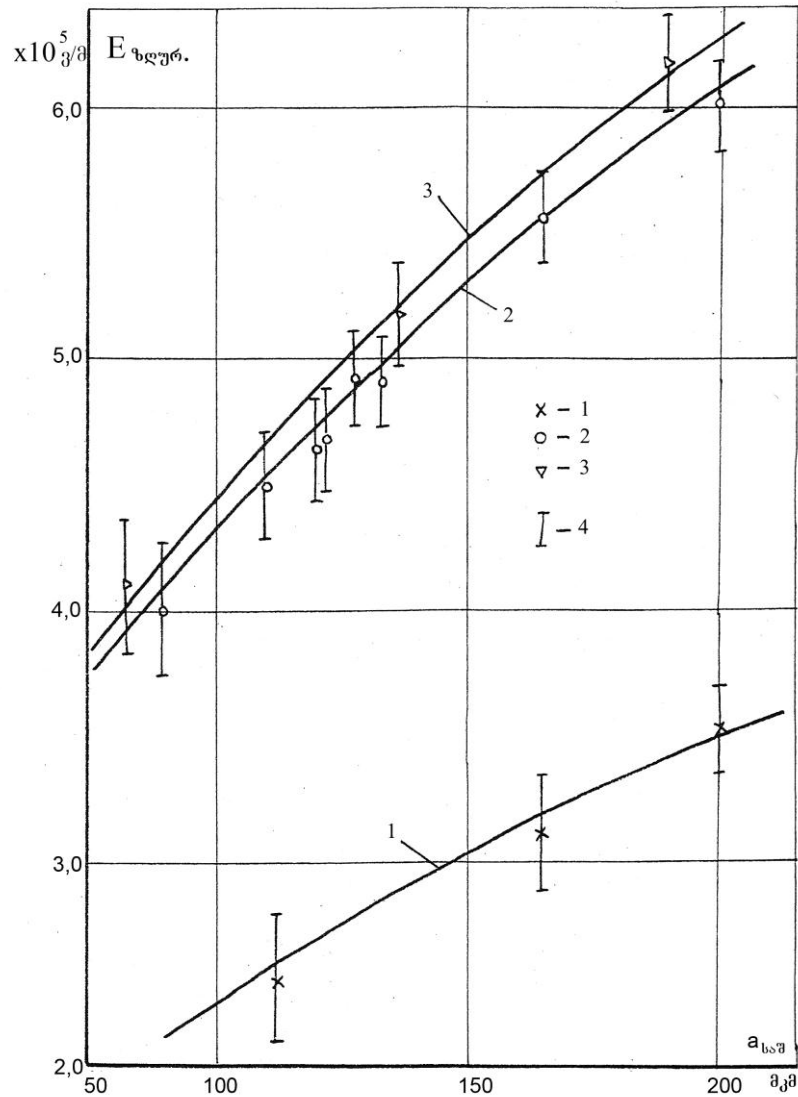
ასეთი ექსპერიმენტები პირველ რიგში ჩატარებული იქნა ალუმინის, ნიკელის და ბრინჯაოს სხვადასხვა რადიუსის მქონე სფერულ ნაწილაკებზე, რომელთათვისაც ცნობილია ზღვრული მუხტის თეორიული მნიშვნელობები. ზღურბლური ძაბვის თეორიული მნიშვნელობები სფერული მეტალური ნაწილაკებისათვის შესაძლებელია განსაზღვრული იქნას (13)-სა და ლებედევ-სკალსკაიას (6) გამოსახულებების გამოყენებით, სადაც,  $K = 1$  და  $F_{ადგ} = 0$ .

$$E_{ზღურ} = \frac{mg}{q_{ზღვ}} = 0,474 \cdot 10^6 \sqrt{\gamma_{ნაწ} \cdot r_{საშ}} \text{ ვ/მ} \quad (14)$$

სხვადასხვა სიმკვრივის მქონე სფერული ფორმის მეტალური ნაწილაკებისათვის ექსპერიმენტალური მონაცემებისა და თეორიული მნიშვნელობების კარგი დამთხვევა (ნახ. 12) მიუთითებს იმაზე, რომ სფერული მეტალური ნაწილაკები ინდუქციური დამუხტვის პროცესში გარკვეული მინიმალური (ზღურბლური) მნიშვნელობის ელექტრულ ველში ღებულობენ თავიანთი ზღვრული მნიშვნელობის მუხტს, რომლის დროსაც ისინი ახერხებენ გააგრძელონ მოძრაობა ზედა ელექტროდისაკენ.

ამრიგად, სფერული ფორმის მეტალურ ნაწილაკებზე მეორე მეთოდით ჩატარებული ექსპერიმენტალური კვლევები საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნა: თუ დამუხტავ ელექტროდზე ვიბრაციის ან სხვა მეთოდის საშუალებით მოვახერხებთ ადგეზიის

ძალებისა და მუხტის სარკისებური ანსახის მიერ წარმოქმნილი ძალების ზემოქმედების ნულამდე შემცირებას, მაშინ ელექტრული ველის დაძაბულობის ზღურბლური მნიშვნელობის საშუალებით შესაძლებელია განსაზღვრული იქნას დიელექტრიკული ან მონომინერალური ნაწილაკების ზღურული მუხტი [50].



ნახ. 12. სფერული ნაწილაკების ზღურბლური დაძაბულობის ექსპერიმენტული დამოკიდებულება მათ ზომებზე

ხაზები – გაანგარიშება (14)-ით, წერტილები – ექსპერიმენტი; 1 – ალუმინის ნაწილაკები ( $\gamma_{ნაწ} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ კგ/მ}^3$ ), 2 – ნიკელის ნაწილაკები ( $\gamma_{ნაწ} = 8,35 \cdot 10^3 \text{ კგ/მ}^3$ ), 3 – ბრინჯაოს ნაწილაკები ( $\gamma_{ნაწ} = 8,80 \cdot 10^3 \text{ კგ/მ}^3$ ), 4 – სანდო ინტერვალი

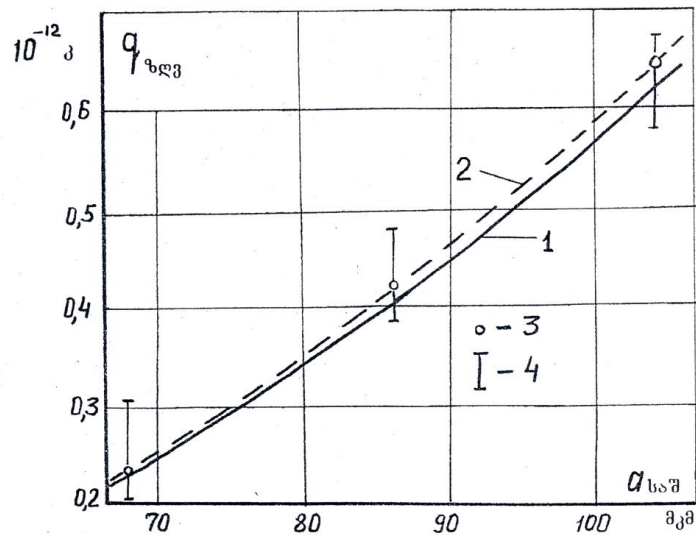
### 2.3.3. არასფერული გამტარი და დიელექტრიკული ნაწილაკების ზღვრული მუხტის გაზომვა

მრავალ შემთხვევებში (ინდუქციური დამუხტვის დროის მუდმივა, ადგეზიის ძალა) განსაზღვრისათვის აუცილებელი ხდება არასფერული როგორც გამტარი ასევე დიელექტრიკული თვისებების მქონე ნაწილაკებისათვის განვსაზღვროთ მათი ზღვრული მუხტი. პირველი მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში ნაწილაკები ელექტროდიდან შესაძლებელია მოწყდნენ ნაკლები მუხტით. გარდა ამისა, არასფერული ნაწილაკების ზღვრული მუხტი დამოკიდებულია მათ ორიენტაციაზე ელექტრული ველის ძალწირების მიმართულების მიმართ. შესაბამისად ამისა, არასფერული ნაწილაკის ზღვრული მუხტი, როცა ის იმყოფება ელექტროდზე უძრავ მდგომარეობაში, დამოკიდებულია ელექტრულ ველში მის საწყის ორიენტაციაზე. აქედან გამომდინარე, ნებისმიერი გამტარობის არასფერული ნაწილაკის ზღვრული მუხტი განისაზღვრება მეორე მეთოდით. ამ მეთოდით სარგებლობის დროს, ვიზუალურად შემჩნეული იყო, რომ ნაწილაკი დამუხტვის პროცესში ელექტროდიდან მოწყვეტამდე ჯერ შემობრუნდებოდა ელექტროდზე თავისი უდიდესი ნახევარღერძით ელექტრული ველის ძალწირების მიმართულებით და მხოლოდ ამის შემდეგ მოწყდებოდა ელექტროდიდან.

არასფერული ნაწილაკებისათვის, ზღვრული მუხტის ექსპერიმენტული გაზომვის შესაძლებლობა ჩატარებული იქნა დნეპროპეტროვსკის ოლქის, ქალაქ ვოლნოგორსკთან ახლომდებარე სამატკანსკის საბადოს ერთ-ერთი ფრაქციის – რუტილის ნაწილაკებზე, რომლის სიმკვრივე  $\gamma_{ნაწ} = 4,25 \text{ კგ/მ}^3$ , ხოლო მათი მოცულობის მიხედვით გასაშუალოებული რადიუსი შეადგენდა  $\gamma_{ნაწ} = 104,8 \text{ მკმ}$ ,  $86,4 \text{ მკმ}$  და  $68 \text{ მკმ}$ -ს. ნახევარღერძების თანაფარდობა იყო არაუმეტეს  $\beta = \frac{b}{a_{ნაწ}} = \frac{1}{2,5}$  და  $\gamma = \frac{c}{a_{ნაწ}} = \frac{1}{3}$ , ხოლო დეპოლიარიზაციის კოეფიციენტი  $d_a = 0.12$ .

ზღვრული მუხტის ექსპერიმენტული მნიშვნელობები, რომელიც განსაზღვრული იქნა ზღურბლური ძაბვის მიხედვით მოყვანილია ნაზ. 12-

ზე. თეორიული გაანარიშებები, რომლებიც ტარდებოდა მოცულობის მიხედვით ექვივალენტული სფეროს მიხედვით, წარმოებდა (15)-ის გამოყენებით. თეორიული მონაცემები შედარებული იქნა მათ ექსპერიმენტულ მნიშვნელობებს, რომელიც იზომებოდა ელექტრომეტრის საშუალებით (წერტილები ნახ. 13-ზე).



ნახ. 13. რუტილის ნაწილაკების ზღვრული მუხტის დამოკიდებულება ექვივალენტური სფეროს რადიუსზე

1 – გაანგარიშება (6)-ით, 2 – გაანგარიშება (15)-ით, 3 – ექსპერიმენტული მნიშვნელობები, 4 – სანდო ინტერვალი

ნებისმიერი ფორმის ნაწილაკისათვის ზღვრული მუხტის საანგარიშო გამოსახულების მიღება შეუძლებელია. მიუხედავად ამისა რეალური ნაწილაკი უმრავლეს შემთხვევაში შესაძლებელია შეცვლილი იქნას ექვივალენტური ნახევარელიფსოიდით, რომლის ზღვრული მუხტი შესაძლებელია გავიანგარიშოთ თეორიულად (თავი I).

გამოთვლებში რეალური ნაწილაკის შეცვლა ექვივალენტური ნახევარელიფსოიდით განხორციელებულია მათი მოცულობების ტოლობიდან გამომდინარე:  $a_{ნაწ} = 2a_{ელ}$

$$b_{ნაწ} = b, c_{ელ} = c,$$



სადაც,  $a_{ნაწ}$ ,  $b_{ნაწ}$ ,  $c_{ნაწ}$  არის ნაწილაკის ნახევარღერძები  $a_{ელ}$ ,  $b_{ელ}$ ,  $c_{ელ}$  არის მოცულობის მიხედვით ექვივალენტური ელიფსოიდის ნახევარღერძები.

ნაწილაკის ორიენტაციისას თავისი უდიდესი ნახევარღერძით ელექტრული ველის დამაბულობის გასწვრივ ( $a_{ნაწ}$ ) ზღვრული მუხტის გამოსახულებას აქვს შემდეგი სახე

$$q_{ზღვ.ა} = \pi \varepsilon_0 E a_{ნაწ}^2 \cdot \frac{\gamma \beta}{d_a} \quad (15)$$

სადაც,

$$\beta = \frac{b_{ნაწ}}{a_{ნაწ}}, \quad \gamma = \frac{c_{ნაწ}}{a_{ნაწ}}$$

ექვივალენტური ელიფსოიდის მუხტის ფარდობას ექვივალენტური სფეროს მუხტთან ექნება შემდეგი სახე

$$K = \frac{q_{ნაწ.ა}}{q_{ნაწ.ა.სფ}} = \frac{3}{\sqrt[3]{2} \pi^2} \cdot \frac{\sqrt[3]{\beta \gamma}}{d_a} \quad (16)$$

გამოსაკვლევი რუტილის ნაწილაკებისათვის  $K=1,026$ , ე.ი. რუტილის ნაწილაკები შეიძლება ჩავთვალოთ სფერული ფორმის. ის ნაწილაკები, რომლებიც ხასიათდებიან ნახევარღერძების მეტი თანაფარდობით, ინდუქციური ზღვრული მუხტის გაანგარიშებისათვის უნდა გავითვალისწინოთ (16)-ის შესწორება.

ამრიგად, ჩატარებული გაზომვები საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ დასკვნა იმის შესახებ, რომ შესაძლებელია განსაზღვრული იქნას ნებისმიერი გამტარობისა და ფორმის (არასწორი ფორმის) ნაწილაკის ზღვრული მუხტი, რომლის ფორმა ახლოსაა ელიფსოიდთან.

წინამდებარე ნაშრომში გამოყენებული ნაწილაკთა ზომების თანაფარდობა, რომლებიც გამოყენებული იქნა ინდუქციური დამუხტვის პროცესის გამოკვლევისათვის, არ აღემატებოდა სამჯერად მნიშვნელობას. რადგანაც ასეთი ნაწილაკებისათვის ზღვრული მუხტის მნიშვნელობა ახლოსაა იმ მნიშვნელობასთან, რომელიც განისაზღვრება (15)-ის გამოსახულებით, შემდგომი ანალიზისათვის ზღვრული მუხტი განისაზღვრებოდა გაანგარიშების საშუალებით, რომელიც შეესაბამებოდა ნაწილაკის ორიენტაციას

უდიდესი ნახევარღერძით ელექტრული ველის დამაბულობის ვექტორის გასწრივ.

## 2.4. ნაწილაკის დამუხტვის დროის მუდმივას განსაზღვრა

ნაწილაკის ინდუქციური დამუხტვის დროის მუდმივა შესაძლებელია განსაზღვრული იქნას თუ გვეცოდინებოდა ნაწილაკის დამუხტვის დროის მნიშვნელობა (გაზომილი დრო  $t_{\text{დამ}}$ , მუხტი  $q_{\text{გაზ}}$ , რომელიც ნაწილაკმა შეიძინა ამ დროში და მისი ზღვრული მუხტი  $q_{\text{ზღვრ}}$ ). ამ შემთხვევაში დამუხტვის დროის მუდმივა განისაზღვრება შემდეგნაირად:

$$\tau_{\text{დამ}} = - \frac{t_{\text{დამ}}}{\ln(1 - q_{\text{გაზ}}/q_{\text{ზღვრ}})} \quad (17)$$

ამ გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ დამუხტვის დროის მუდმივას განსაზღვრის სიზუსტე უფრო მეტი ხარისხითაა დამოკიდებული დამუხტვის დროის გაზომვის სიდიდეზე ვიდრე მუხტის სიდიდეზე (რადგანაც მუხტი შედის ლოგარითმის ნიშნის ქვეშ).

## 2.5. ადგეზიის ძალის შეფასება

მოცემული გაზომვებისათვის ადგეზიის ძალის შეფასება ხდება ნაწილაკზე მოქმედ ძალთა ბალანსის საფუძველზე, კერძოდ, მოცემულ მომენტში ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის დროს ნაწილაკის მიერ შეძენილი მუხტის მიხედვით.

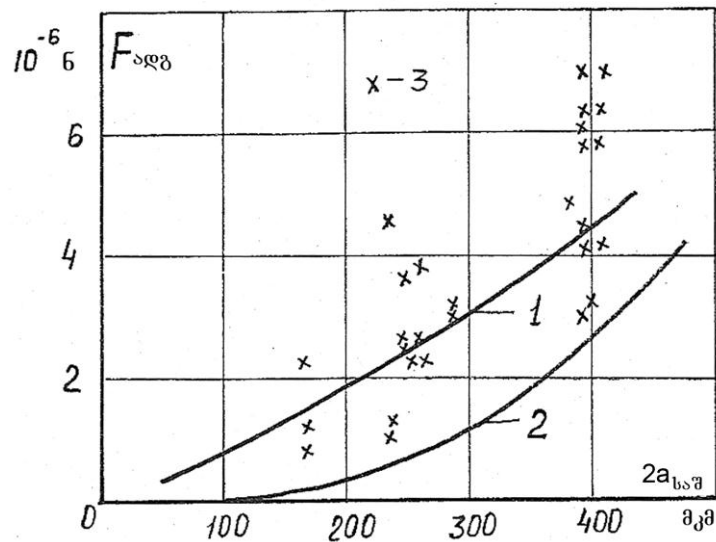
$$F_{\text{ადგ}} = F_{\text{ელ}} - mg \quad (18)$$

გამტარი სფერული ნაწილაკები ელექტროდიდან მოწყვეტის მომენტში ლებულობენ თავიანთ ზღვრულ მუხტს. ამიტომ (18) პირობა შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგნაირად

$$F_{\text{ადგ}} = K4\pi\epsilon_0 \frac{\pi^2}{6} \cdot E^2 \cdot a^2 - mg \quad (19)$$

ამიტომაც, ასეთი ნაწილაკებისათვის, საკმარისია გავზომოთ მხოლოდ ელექტრული ველის დაძაბულობის ის მნიშვნელობა, რომლის დროსაც ისინი მოწყდებიან ელექტროდიდან.

ადგეზიის ძალის გაზომვის სიზუსტე დამოკიდებულია ელექტრული ველის გაზომვის სიზუსტეზე  $E_{ძოწ}$  და განისაზღვრება ელექტრული ძალისა და სიმძიმის ძალის თანაფარდობით. გარდა ამისა, ადგეზიის ძალის გაზომვის სირთულე მდგომარეობს იმაშიც, რომ ის თავისი ბუნებით არის ძალიან არასტაბილური და შეიძლება მერყეობდეს ძალიან დიდ ფარგლებში. ამას მოწმობს მაგ., ნახ.14-ის შესაბამისი გრაფიკი, რომელშიც ნაჩვენებია ნიკელის სფეროსებრი ნაწილაკების ადგეზიის ძალის დამოკიდებულება მის ზომებთან. მიუხედავად იმისა, რომ ასეთი გამტარი სფეროს ფორმის მქონე ნაწილაკებისათვის მათ მიერ შექმნილი ზღვრული მუხტი და ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა მკაცრად განსაზღვრულია, ადგეზიის ძალის მნიშვნელობები  $F_{აღ}$  გაზნეულია ძალიან დიდ ფარგლებში.



ნახ. 14. ნიკელის ადგეზიის ძალის დამოკიდებულება ნიკელის ნაწილაკების ზომებზე

- 1 - ადგეზიის ძალის საშუალო მნიშვნელობა, 2 - სიმძიმის ძალა, 3 - ადგეზიის ძალის ექსპერიმენტული მნიშვნელობები

არაგამტარი ნაწილაკებისათვის (18) პირობიდან გამომდინარე, ადგეზიის ძალების განსაზღვრისათვის აუცილებელია გაიზომოს ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ელექტრული ველის დამაბულობა და ამ დამაბულობის დროს ნაწილაკის მიერ მიღებული მუხტი. ამ დროს ნაწილაკის მიერ მიღებული მუხტი არ იქნება ზღვრული მუხტის ტოლი.

## 2.6. ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა

ლიტერატურული წყაროების ანალიზმა გვიჩვენა, რომ ინდუქციური დამუხტვის პროცესში ყველა ნაწილაკი ელექტროდიდან არ წყდებიან. ამ მოვლენის მიზეზები ბოლომდე არ იყო ნათელი. ინდუქციური დამუხტვის ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდის დამუშავების საწყისმა ეტაპებმა დაამტკიცა, რომ მართლაც, იმ პირობებშიც კი, როდესაც თეორიული შეფასებების თანახმად ნაწილაკები აუცილებლად უნდა მოწყვეტილიყვნენ ელექტროდიდან, მხოლოდ დამუხტული ნაწილაკების ნაწილი წყდებოდნენ ელექტროდიდან. ეს მოვლენა ყველაზე თვალსაჩინოდ შესამჩნევი იყო სფერული მეტალური ნაწილაკებისათვის, რომელთათვისაც მიღებული მუხტი აღწევდა თავის მაქსიმალურ ზღვრულ მნიშვნელობას და მათზე მოქმედი ელექტრული ძალები ათეულჯერ აღემატებოდა ნაწილაკის სიმძიმის ძალას.

ამრიგად, შეიძლება დასაბუთებულად მივიჩნიოთ ის ფაქტი, რომ ინდუქციური დამუხტვის პროცესში მიუხედავად იმისა, რომ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა სრულდება, ყველა ნაწილაკი მაინც არ წყდება ელექტროდიდან. ამის ერთადერთ მიზეზად შეგვიძლია მივიჩნიოთ, მხოლოდ ადგეზიის ძალის დიდი მნიშვნელობა, რომელიც ცდების განმეორებების პირობებშიც კი სხვადასხვაგვარად გამოვლინდება. ეს მოვლენა ატარებს ალბათურ ხასიათს. ამის გამო ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა უნდა იქნას აღწერილი ალბათური მახასიათებლებით.

ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტა ხდება ყველა იმ ფაქტორის ჯამური ზემოქმედების შედეგად, რომლებიც ახასიათებენ ინდუქციური დამუხტვის პროცესს, კერძოდ კი, ელექტრული ველის ზემოქმედება, გარემომომცველი გარემოს მახასიათებლების გავლენა, ნაწილაკების გამტარობა და სხვა, რომლებითაც ხასიათდებიან თვით ნაწილაკები და ა.შ. ყველა ამ ფაქტორების ზემოქმედების შესაფასებლად შემოვიტანეთ გარეშე ინტეგრალური მახასიათებელი - ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა, რომელიც განისაზღვრება, როგორც ფარდობა ელექტროდიდან მოწყვეტილი  $N$  ნაწილაკების რაოდენობისა, ელექტროდზე მყოფ ნაწილაკების მთლიან რაოდენობასთან  $N_0$ .

შესაბამისად,

$$\lambda = \frac{N}{N_0} \cdot 100\% \quad (20)$$

რადგანაც  $\lambda$  არის ალბათური მახასიათებელი ამიტომ მისი ექსპერიმენტული განსაზღვრისათვის აუცილებელი ხდებოდა გაზომვები ჩაგვეტარებინა ნაწილაკების დიდ რიცხვთან. გაზომვები ტარდებოდა შემდეგნაირად: ელექტროდზე ვათავსებდით  $N_0$  რაოდენობის ნაწილაკს, ვახდენდით მის დამუხტვას და შემდეგ ვთვლიდით ელექტროდიდან მოწყვეტილ იმ ნაწილაკებს, რომლებიც მიეკვრებოდნენ იზოლაციით დაფარულ ზედა ელექტროდს. ექსპერიმენტი უმეტესად ტარდებოდა ათი ნაწილაკისაგან შემდგარ ჯგუფზე, რომელსაც ვიმეორებდით ხუთ სერიად. ამგვარად გაზომვის თითოეული რეჟიმი შედგებოდა ორმოცდაათი ერთეულისაგან  $N_0 = 50$ . გაზომვების რეჟიმის შემდგომი ზრდა პრაქტიკულად უკვე აღარ ცვლიდა ალბათობის მნიშვნელობას, ხოლო ექსპერიმენტის ჩატარების ხანგრძლივობა და შრომითი დანახარჯები შესამჩნევად იზრდებოდა. გაზომვების 50-ზე ნაკლები რიცხვის შემთხვევაში მივყავდით ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის ცდომილების შესამჩნევ გაზრდამდე.

ცხრ. 3-ში მაგალითის სახით მოყვანილია გამტარი სფეროს ფორმის ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის მნიშვნელობები,

რომლებიც ადასტურებენ, რომ  $\lambda$  სიდიდე ვერ აღწევს თავის 100%-იან მნიშვნელობას. ეს მოვლენა ეწინააღმდეგება მის თეორიულ მოსაზრებებს.

ცხრილი 3

დამუხტავი ელექტროდიდან მეტალური სფერული ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა.  $E=10$  კვ/სმ

ნაწილაკის ზომები $a_{სფ}, 10^{-6} მ$	ნაწილაკების ქრომირებული ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის მნიშვნელობები, $\lambda$	
	ნიკელის	ალუმინის
85	22	-
95	-	52
105	-	55
120	45	-
125	-	75
135	-	87
162	51	-

ელექტრული სეპარაციის თვალთახედვით ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა  $\gamma$  განსაზღვრავს მინერალების განცალკევების ხარისხს. ის რომ  $\gamma < 100\%$ -ზე ნიშნავს იმას, რომ ნაწილაკების განცალკევება მიმდინარეობს არა მხოლოდ გამტარობის შესაბამისად, არამედ ადგეზიის ძალების მნიშვნელობების შესაბამისადაც. ამ ფაქტორის არსებობა შესამჩნევად ამწელებს სეპარაციის პროცესს. ამიტომაც მნიშვნელოვანია მივისწრაფვოდეთ იქითკენ, რომ ალბათობა  $\gamma$  გახდეს ასპროცენტიანი- $\gamma=100\%$ . ეს შესაძლებლობა საშუალებას მოგვცემდა, რომ მინერალების განცალკევების პროცესი წარგვემართა უფრო დახვეწილად.

ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა ინდუქციური დამუხტვის თანამედროვე თეორიულ მოდელში აღწერილი არ არის. ამავე დროს ეს მოვლენა წარმოადგენს ინდუქციური დამუხტვის მნიშვნელოვან ფაქტორს. ამიტომაც, პირველ რიგში საჭიროა ჩატარებული იქნას ნაწილაკე-

ბის ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის კვლევები. ამ კვლევების პირველ რიგში ჩატარების აუცილებლობას ადასტურებს ისიც რომ, ამ ინტეგრალური მახასიათებლის დამოკიდებულების მნიშვნელობები საშუალებას მოგვცემს სწორად მოვახდინოთ ნაწილაკების დამუხტვის პარამეტრების დამოკიდებულების ინტერპრეტაცია დამუხტვის სხვადასხვა პირობებზე.

## 2.7. გამოსაკვლევი ნაწილაკები

გამოსაკვლევი ნაწილაკების სახით შერჩეული იქნა ტიტანის შემცველი ერთ-ერთი საბადოს მინერალები, რომლებიც ცნობილია როგორც ტიტანო-ციროკონიუმის კონცენტრატი. მასში შემავალი მინერალების შემადგენლობა და მათი ძირითადი მახასიათებლები მოყვანილია ცხრ. 4-ში, რომლებიც შედგენილია ამ კონცენტრატების გადამამუშავებელი სამთო-გამამდიდრებელი კომბინატისა და ლიტერატურული წყაროების მიხედვით. პირობითად ყველა მინერალები შეიძლება დაიყოს გამტარებად და არაგამტარებად (დიელექტრიკებად). ელექტრულ სეპარაციაში ასეთი დაყოფა დაფუძნებულია [2] მასზე, რომ დამუხტავ ელექტროდზე ამ კონცენტრატებში შემავალი ერთ-ერთი ჯგუფის მინერალები იმუხტებიან და მოწყდებიან მისგან უფრო ადრე ვიდრე დანარჩენები. ამის გამო ამ მინერალების დაყოფა გამტარ და არაგამტარ ფრაქციებად ატარებს პირობით ხასიათს. ამის შესაბამისად, ყოველი კონკრეტული საბადოს შემადგენელი კონცენტრატი შეიძლება დაიყოს გამტარ და არაგამტარ ფრაქციებად. ჩვენს მიერ შერჩეულ კონცენტრატისათვის გამტარ ფრაქციას წარმოადგენს რუტილისა და ილმენიტის შემცველი მინერალები, ხოლო არაგამტარ (დიელექტრიკულ) ფრაქციას-სტავროლიტი, დისტენი, ციროკონი და კვარცი. ასეთი დაყოფა პრაქტიკულად შესაძლებელია ყველა საბადოს ცნობილი კონცენტრატებისათვის.

## ტიტანო-ცირკონიუმის კონცენტრატის შემადგენელი მინერალები და მათი ძირითადი მახასიათებლები

მინერალები	სიმკვრივე $\gamma_{\text{მკვ}} 10^3 \text{ კგ/მ}^3$	ელექტრო გამტარებლობა $\gamma$ (ომ.მ) <sup>-1</sup>	დიელექტრიკული შეღწევადობა $\epsilon$	მარცვლის საშუალო დიამეტრი $2a_{\text{საშ}} 10^{-6} \text{ მ}$
რუტილი (რ)	4,2 – 4,5	$10^{-1} - 10^{-3}$	31 – 173	137
ილმენიტი (ი)	4,7	$10^{-2} - 10^{-4}$	34 – 81	143
სტავროლიტი (ს)	3,6 – 3,8	$10^{-7} - 10^{-9}$	6,8	175
დისტენი (დ)	3,6 – 3,7	$10^{-8} - 10^{-10}$	5,6 – 7,2	182
ცირკონი (ც)	4,6 – 4,7	$10^{-8} - 10^{-12}$	3,6 – 12	121
კვარცი (კ)	2,5 – 2,8	$10^{-8} - 10^{-14}$	4,5 – 6,0	252

ექსპერიმენტული კვლევისათვის ერთი ასეთი კონკრეტული საბადოს კონცენტრაციის შემცველი მინერალების შერჩევა არ შეიძლება წარმოადგენდეს მიღებული შედეგების მნიშვნელობის შეზღუდვას. ეს დაკავშირებულია პირველ რიგში იმასთან რომ, ტიტანის შემცველი მინერალების საბადოები შედიან იმ საბადოების ჯგუფში, რომელთა შესწავლა და დამუშავება წარმოადგენს ერთ-ერთ დიდმნიშვნელოვან ამოცანას. ამიტომ ელექტრული სეპარაციის საშუალებით ტიტანის შემცველი მადნის შავი კონცენტრატების გადამუშავებისათვის რეკომენდაციების შემუშავება წარმოადგენს მეტად აქტუალურ ამოცანას.

მეორეს მხრივ, გამოსაკვლევი მინერალები წარმოადგენენ გამტარი და არაგამტარი ფრაქციების ტიპიურ წარმომადგენლებს. ამიტომ მათი გამოკვლევა საშუალებას მოგვცემს ჩამოვაყალიბოთ საერთო დასკვნები და რეკომენდაციები, რომლებიც გამოდგებიან სხვა საბადოებში შემცველი მადნის მინერალებისათვის.



## II თავის დასკვნები:

1. შექმნილი იქნა ნაწილაკთა ინდუქციური დამუხტვის პროცესის შემსწავლელი ექსპერიმენტული დანადგარი და მათი კვლევის მეთოდოლოგია, რომელიც საშუალებას გვაძლევს შევისწავლოთ ეს პროცესი ნაწილაკების თვისებებისა და მათი დამუხტვის პირობების ფართო დიაპაზონში ცვლილების დროს.
2. ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური კვლევის მეთოდოლოგია თავისთავში შეიცავს ისეთ ერთდროულ გაზომვებს როგორცაა:
  - დამუხტვის პროცესის პარამეტრები, რომლებშიც შედიან: ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის ზღვრული მუხტი და მიმდინარე მუხტი, ნაწილაკების დამუხტვის დრო, რომლებიც წარმოადგენენ ნაწილაკების დამუხტვის კინეტიკის მთავ არ პარამეტრებს. ამასთან ერთად განისაზღვრება ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა.
  - დამუხტვის პროცესის წარმოების პირობები, რომელიც ხასიათდება ელექტრული ველის დამაბულობით, გარემოს ტემპერატურითა და ფარდობითი ტენიანობით და დამმუხტავი ელექტროდის მასალით.
3. შემუშავებული მეთოდოლოგია საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ: ნაწილაკების დამუხტვის დროის მუდმივა, ნაწილაკების გამტარობა კონტაქტური წინაღობის გათვალისწინებით და ადგეზიის ძალა.
4. შემუშავებულია ელიფსოიდთან ახლო ნებისმიერი ფორმის გამტარი და დიელექტრიკული ნაწილაკების ზღვრული მუხტის განსაზღვრის მეთოდოლოგია. (დასაბუთებულია გამოგონების საავტორო უფლებებით).
5. შექმნილი დანადგარისა და ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდოლოგიის მიზანია გამოვავლინოთ ამ პროცესის რეალური მიმდინარეობის ხასიათი, რომელიც მნიშვნელოვნად განსხვავდება მისი თეორიული მოდელისაგან. მათი შედარების საფუძველზე ჩამოვყალიბოთ ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ფიზიკური სურათის დაზუსტებული ხასიათი.

### III თავი

## ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა, როგორც ინდუქციური დამუხტვის პროცესის გარე ინტეგრალური მახასიათებელი

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის თანამედროვე თეორიული წარმოდგენებისა და მასთან ექსპერიმენტული მონაცემების შესაბამისობის მიმოხილვის დროს, აღნიშნული იყო, რომ ყველა გამტარი ნაწილაკი ელექტროდიდან არ წყდება იმ პირობებშიც კი, როდესაც ამას თეორია წინასწარმეტყველებს. აქედან გამომდინარეობს ის, რომ შეუძლებელია განვავითაროთ ინდუქციური დამუხტვის თეორია, თუკი მისი ერთ-ერთი ყველაზე ელემენტარული დასკვნა არ სრულდება. რა თქმა უნდა, კიდევ უფრო რთულადაა საქმე დიელექტრიკული ნაწილაკებისათვის.

აღმოჩნდა, რომ ნაწილაკთა კოლექტივისათვის ინდუქციური დამუხტვის თეორიული და ექსპერიმენტული შედეგების შესადარებლად უფრო მოსახერხებელია ვისარგებლოთ დამუხტავი ელექტროდიდან ნაწილაკთა მოწყვეტის ალბათობის ცნებით. ამ მახასიათებლის გამოყენების მიზანშეწონილობა, ერთის მხრივ, ნაკარნახევია იმით, რომ ის ინტეგრალურად განსაზღვრავს ნაწილაკის დამუხტვისა და ელექტროდიდან მოწყვეტის პროცესს, რაც ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკთა განცალკევების ანალიზის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანეს პირობაა. მეორეს მხრივ, მოწყვეტის ალბათობა შესაძლებლობას მოგვცემს, სწორად ავხსნათ ინდუქციური დამუხტვის ყველა პარამეტრების ცვლილება სეპარატორების მუშაობის სხვადასხვა პირობებში.

ბრტყელ კონდენსატორში ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის დროს წარმოქმნილი ყველა ფაქტორი, რომლებიც გავლენას ახდენს მათი ელექტროდიდან მოწყვეტაზე, მიზანშეწონილია დავყოთ ორ დიდ ჯგუფად: ფაქტორები, რომლებიც განსაზღვრავენ ტექნოლოგიურ რეჟიმს და სეპარატორის კონსტრუქციული ფაქტორები. წინამდებარე სამუშაოში

ამათგან განვიხილავთ მხოლოდ მათ, რომლებიც უშუალო ზეგავლენას ახდენენ ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე. ტექნოლოგიურ ფაქტორებს მიეკუთვნება გარემოს მახასიათებლები, ელექტრული ველის დაძაბულობა, რომელიც რეგულირდება მოდებული ძაბვით და განსაცალკევებელი ნაწილაკების მახასიათებლები. კონსტრუქციულ ფაქტორებს მიეკუთვნება ნაწილაკების დამუხტავ ელექტროდზე ყოფნის ხანგრძლიობა და დამუხტავი ელექტროდის მასალა.

განვიხილოთ აღნიშნული ფაქტორების ზეგავლენა ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე.

### **3.1. ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკების დამუხტვის ტექნოლოგიური რეჟიმის ზეგავლენა მათი ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობაზე**

ინდუქციური დამუხტვის პროცესში ნაწილაკების მუდმივი კონტაქტი ელექტროდთან საფუძვლად უდევს ისეთი სეპარატორების მუშაობას, როგორებიცაა დოლური და დახრილ ფირფიტოვანი სეპარატორები. ელექტროსეპარატორების გარკვეული კონსტრუქციული შესრულების დროს მინერალთა ნარევის გაყოფის ხარისხზე გავლენას ახდენს ის პირობები, რომელშიც მიმდინარეობს სეპარაციის პროცესი. ამ პირობებს მიეკუთვნება, პირველ რიგში გარემოს (ჰაერის) ისეთი მახასიათებლები როგორიცაა ტემპერატურა და ტენიანობა. მათი რეგულირების საშუალებით შესაძლებელია მივაღწიოთ გაყოფის მაქსიმალურ შესაძლებლობას. გაყოფის პროცესის ცვლილება შესაძლებელია აგრეთვე ელექტროდებზე მიწოდებული ძაბვის რეგულირებით, რასაც მივყავართ ელექტროსეპარატორის მოცემული კონსტრუქციის ელექტრული სისტემის ელექტრული ველის დაძაბულობის ცვლილებამდე. ამიტომ, შეიძლება გამოვიკვლიოთ, თუ როგორ იქცევიან ნაწილაკები ელექტრული ველის დაძაბულობის ცვლილების შედეგად. ნაწილაკების განცალკევების დროს, მოცემული ტექნოლოგიური სქემის მუშაობის პროცესში, შესაძლებელია შეიცვალოს ნარევის

საწყისი მახასიათებლები. ამათ, უწინარეს ყოვლისა, მიეკუთვნება ნაწილაკების ზომები. ისინი განისაზღვრება ან საბადოს თვისებებით, ან მისი წინასწარი დამუშავებით.

### 3.1.1 ექსპერიმენტის ზოგადი აღწერა

ექსპერიმენტული გამოკვლევა ჩატარდა იმ დანადგართა და იმ მეთოდებით, რომელიც აღწერილი იყო მეორე თავში. გამოსაკვლევ ნაწილაკები თავსდებოდნენ კონდენსატორის ქვედა ელექტროდზე, კონდენსატორის ფირფიტებს განსაზღვრული დროის განმავლობაში მიეწოდებოდა გარკვეული სიდიდის მაღალი ძაბვა და წარმოებდა ნაწილაკებზე დაკვირვება. ამ დროის გასვლის შემდეგ ვთიშავდით მაღალ ძაბვას და ვითვლიდით ელექტროდიდან მოწყვეტილ ნაწილაკებს და (20) ფორმულის საშუალებით ვანგარიშობდით მოწყვეტის ალბათობას.

ნაწილაკების მოწყვეტაზე დაკვირვების დრო ეკვივალენტურია ერთ-ერთი კონსტრუქციული ფაქტორის - სეპარატორის ელექტრულ ველში ნაწილაკების ყოფნის ხანგრძლიობის. ტექნოლოგიური ფაქტორის ანალიზის დროს ეს პარამეტრი უნდა იყოს მუდმივი, უცვლელი სიდიდის. რუტილის ნაწილაკებისათვის ეს დრო შეადგენდა 90 წმ, ხოლო მეტალური ნაწილაკებისათვის - 2 წმ.

დამმუხტავ ელექტროდად გამოყენებული იყო მეტალის ქრომით დაფარული ელექტროდი. ასეთმა ელექტროდებმა ფართო გამოყენება ჰპოვა დოლური ტიპის სეპარატორის კონსტრუქციებში [2,3]. ამიტომაც ჩატარებულ ექსპერიმენტებში დიდი ყურადღება დაეთმო ასეთ ელექტროდზე ჩატარებულ კვლევებს.

მეორე ტიპის ელექტროდი, რომელზედაც ჩატარდა აღნიშნული ექსპერიმენტები, იყო გრაფიტოპლასტის ATM-1 ტიპის. ამ ტიპის ელექტროდები გამოყენებულია ფირფიტოვანი ტიპის ელექტროსეპარატორებში [21]. მათი გამოყენება სხვა სახის მასალებთან შედარებით

საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ ტიტანის შემცველი მინერალების გაყოფის ყველაზე უკეთესი შედეგები.

გაზომვების დროს განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობოდა ექსპერიმენტის ჩატარების ისეთ პირობებს, რომლებიც უზრუნველყოფდნენ მიღებული შედეგების მაქსიმალურ სტაბილურობას. ამ მიზნით ყოველი გაზომვის წინ ხდებოდა დამუხტავი ელექტროდის გაწმენდა. გამოკვლევით სათვის შერჩეული ნაწილაკები ინახებოდა ექსიკატორში. ნაწილაკების ელექტროდზე მოთავსების შემდეგ ხდებოდა მათი დაყოვნება დაახლოებით 30 წთ-ის განმავლობაში, რათა მათ მიეღოთ ჯეროვანი მახასიათებლები, რომლებიც შეესაბამებოდა ექსპერიმენტის შესაბამის პირობებს (ტემპერატურა და ტენიანობა). ასე ხდებოდა კონტაქტის („ნაწილაკი-ელექტროდი“) გარკვეული უცვლელი პირობების შექმნა.

მინერალების ძირითად მახასიათებელს წარმოადგენს მათი გამტარუნარიანობა, რაც კიდევაც განსაზღვრავს გარკვეული ელექტრული ველის დაძაბულობის დროს ნაწილაკების ქცევას ელექტროდზე და ეს არის ელექტროსეპარატორებში მათი გაყოფის ძირითადი საფუძველი. ამიტომ გამოკვლევის ძირითადი ნაწილი რუტილისა და ილმენიტის ნაწილაკებს დაეთმო და დამუხტვის ძირითადი დასკვნები ამ გაზომვების საფუძველზე ჩამოყალიბდა, ხოლო სხვა მინერალებზე ჩატარებული გაზომვები მიღებული დასკვნების დამატებითი დადსტურებაა.

გამოსაკვლავი მინერალური ნაწილაკების ზომები იცვლებოდა 74-დან 250 მკმ-მდე. უმთავრესად გაიზომა ისეთ ნაწილაკები, რომელთა ზომები ახლოს იყო მათ საშუალო მნიშვნელობებთან. ამისათვის მიკროსკოპის ქვეშ ვირჩევდით ერთი და იმავე ზომის ნაწილაკებს. შერჩეული ნაწილაკების ზომების განსხვავება არ აღემატებოდა  $\pm 7\%$ .

შედარების მიზნით იგივე ცდები ჩატარებული იქნა ალუმინისა და ნიკელის მეტალურ ნაწილაკებზე. ეს საშუალებას გვაძლევდა გამოგვერიცხა ნაწილაკების ფორმისა და გამტარუნარიანობის გავლენა მიღებულ შედეგებზე.

გაზომვის სიზუსტის შეფასებები მოყვანილი იყო მეორე თავში აღწერილ მეთოდში.

### 3.1.2. მეტალური ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის გამოკვლევა

გაზომვები ჩატარებული იქნა ნიკელისა და ალუმინის სხვადასხვა ზომის მეტალურ ნაწილაკებზე. ნაწილაკებს ჰქონდათ სფერული ფორმა. მათ აქვთ პრაქტიკულად ნულის ტოლი დამუხტვის დროის მუდმივა და ელექტროდიდან მოწყვეტისას იძენდნენ თავიანთი მაქსიმალური მუხტის მნიშვნელობას (ნახ. 12).

განვიხილოთ იმ ძალთა ბალანსი, რომლებიც მოქმედებენ E დამაბულობის ელექტრულ ველში ელექტროდზე მყოფ გამტარ სფერულ ნაწილაკზე მოწყვეტის მომენტში

$$F_{ელ} - mg - F_{ადგ} \geq 0 \quad (21)$$

სადაც,  $F_{ელ}$  - ელექტრული ძალაა, რომელიც განისაზღვრება ლებედევსკალსკაიას ფორმულით [10].

$$F_{ელ} = K \cdot 4\pi\epsilon_0 \cdot \frac{\pi^2}{6} \cdot a^2 \cdot E^2$$

K არის კოეფიციენტი, რომელიც ტოლია 0,83; a-ნაწილაკის რადიუსია; mg- სიმძიმის ძალა, რომელიც ტოლია:

$$mg = \frac{4}{3} \pi a^3 \gamma_{ნაწ} \cdot g$$

$\gamma_{ნაწ}$  - ნაწილაკის სიმკრივეა; g-თავისუფალი ვარდნის აჩქარება; m-ნაწილაკის მასა;  $F_{ადგ}$ - არის ნაწილაკის ელექტროდთან ადგეზიის (მიწებების) ძალა.

(21)-დან შესაძლებელია განვსაზღვროთ დამაბულობის ზღურბლური მნიშვნელობა, როდესაც  $F_{ადგ}=0$

$$E \geq E_{ზღურ} = \sqrt{\frac{\gamma_{ნაწ} \cdot g}{K\epsilon_0\pi^2}} \cdot 2a \quad (22)$$

(21) და (22) პირობიდან გამომდინარეობს, რომ ელექტროდიდან ნაწილაკის მოწყვეტისათვის აუცილებელია, რომ სრულდებოდეს პირობა

$$E \geq E_{ზღურ}$$

(22) პირობა შეიძლება ჩამოვყალიბოთ ცოტათი შეცვლილი სახით: მოცემული დაძაბულობის ელექტრულ ველში წყდებიან მხოლოდ ის ნაწილაკები, რომელთა რადიუსი არ აღემატება რაღაც ზღვრულ მნიშვნელობას  $a_{ზღვრ}$  ე. ი.

$$a \leq a_{ზღვრ} = \frac{1}{2} \cdot \frac{K \epsilon_0 \pi^2}{\gamma_{ნაწ} \cdot g} E^2$$

რაც უფრო მეტია ელექტრული ველის დაძაბულობა, მით უფრო მსხვილი ნაწილაკები წყდებიან ელექტროდს. დამუხტვის პროცესში ნაწილაკზე მოქმედებს ელექტროდიდან მომწყვეტი ჯამური ძალა

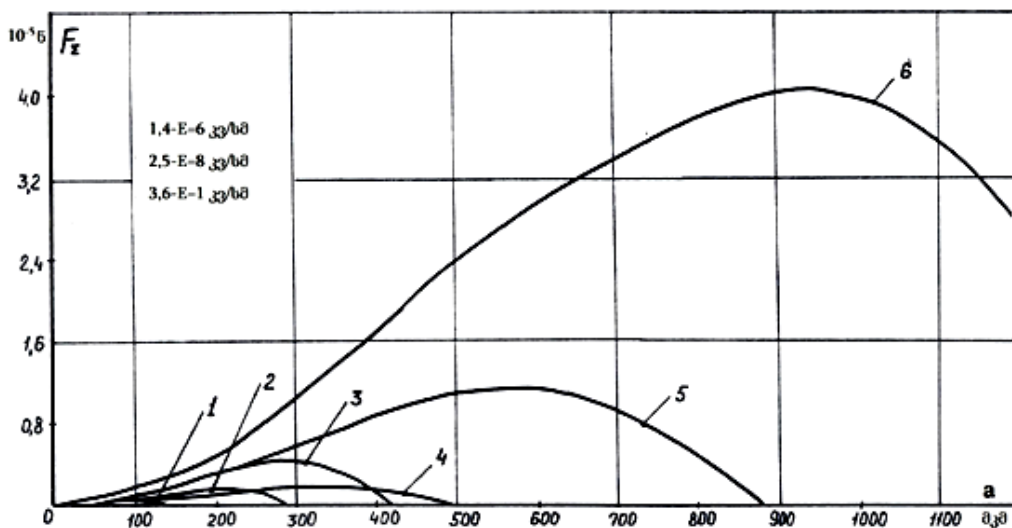
$$F_{\Sigma} = F_{ელ} - mg$$

ამ ძალას ნაწილაკის ზომების მიმართ აქვს თავისი მაქსიმუმი (ნახ. 15). განვსაზღვროთ ნაწილაკის ზომის ის მნიშვნელობა  $a_{ობტ}$ , რომელიც შეესაბამება ამ ძალის მაქსიმალურ მნიშვნელობას

$$\frac{dF_{\Sigma}}{da} = 0$$

შედეგად მივიღებთ

$$a_{ობტ} = \frac{1}{3} \cdot \frac{K \epsilon_0 \pi^2}{\gamma_{ნაწ} g} \cdot E^2 \quad (23)$$



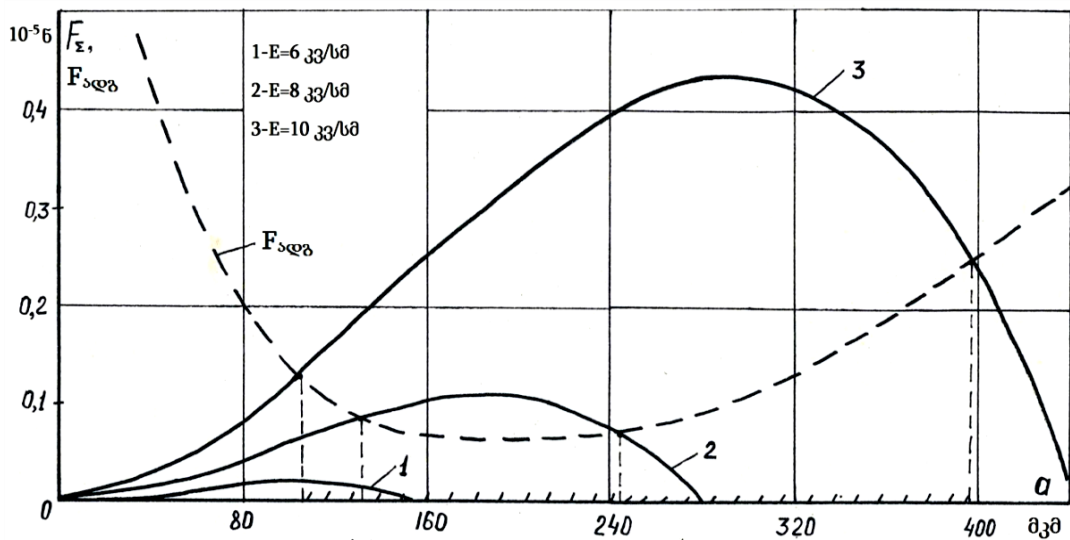
ნახ. 15. ჯამური მოწყვეტის ძალის  $F_{\Sigma}$  დამოკიდებულება ნაწილაკის ზომებზე

1, 2, 3 - ნიკელის ნაწილაკები ( $\gamma_{წ} = 8,15 \cdot 10^3$  კგ/მ<sup>3</sup>),  
4, 5, 6 - ალუმინის ნაწილაკები ( $\gamma_{წ} = 2,7 \cdot 10^3$  კგ/მ<sup>3</sup>)

ელექტრული ველის  $E$  დაძაბულობის მუდმივი მნიშვნელობის დროს ნაწილაკის ზღვრული და ოპტიმალური მნიშვნელობების ფარდობა ტოლი იქნება

$$a_{\text{ზღვრ}} = 1.5a_{\text{ოპტ}}$$

ნახ. 16-ზე მოყვანილია ნაწილაკზე მოქმედი ჯამური  $F_{\Sigma}$  ძალის სტილიზებული სახე. იქვე დატანილია ადგეზიის ძალის ჰიპოთეტური დამოკიდებულება ნაწილაკის ზომებზე.



ნახ. 16. ჯამური მოწყვეტის ძალის  $F_{\Sigma}$  და ჰიპოთეტური ადგეზიის ძალის  $F_{\text{ადგ}}$  დამოკიდებულება ნიკელის ნაწილაკის ზომებზე ( $\gamma_6 = 8,35 \cdot 10^3 \text{ კგ/მ}^3$ )

ნახ. 16-ზე მოყვანილი გრაფიკების ანალიზი „ნაწილაკი-ელექტროდი“-ის კონტაქტის გათვალისწინებით საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ დასკვნა ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის შესაძლებლობის შესახებ და ეს შესაძლებლობა გავითვალისწინოთ ნაწილაკების განცალკევების მიზნით. ელექტრული ველის დაძაბულობის მოცემული მნიშვნელობის და ნაწილაკების დამუხტვისა და მოწყვეტის უცვლელი პირობების დროს (ანუ ნაწილაკზე მოქმედი ძალთა გარკვეული დონის მოქმედების დროს) არსებობს ნაწილაკთა ზომების შემოსაზღვრული არე, რომლებიც შესაძლებელია მოსწყდნენ ელექტროდიდან. ნახ. 16-ზე ეს არე მონიშნულია დაშტრიხული არეთი. ამ ზომების დიაპაზონზე ნაკლები და მეტი ზომის



მქონე ნაწილაკები ვერ მოსწყდებიან ელექტროდიდან იმის გამო, რომ მათთვის მცირდება ჯამური მომწყვეტი ძალა, რომელიც ხდება უარყოფითი (ნაწილას მიაკრავს ელექტროდს). ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ასეთი ხასიათის გათვალისწინება შესაძლებლობას გვაძლევს ვარეგულიროთ ნაწილაკების განცალკევების პროცესი. ადგეზიის ძალის გარკვეული დონის არსებობის დროს ელექტრული ველის დაძაბულობის შემცირება ავიწროებს მოწყვეტილი ნაწილაკების ზომების დიაპაზონს. ამიტომ ელექტრული ველის დაძაბულობის რეგულირებით შესაძლებელია მთელი განსაცალკევებელი ნარევიდან მოვახდინოთ გარკვეული ზომის ნაწილაკების განცალკევება. მაგრამ ნაწილაკების მოწყვეტის რეგულირების შესაძლებლობა ელექტრული ველის დაძაბულობის საშუალებით შემოსაზღვრულია ელექტროდებს შორის სივრცის ელექტრული გარღვევით. მოწყვეტის პროცესის რეგულირების სხვა გზა მდგომარეობს ადგეზიის ძალის ცვლილებაში. ცნობილი ლიტერატურული წყაროების ანალიზი საშუალებას გვაძლევს ამ მიზნისთვის გამოვიყენოთ შემდეგი ხერხები:

- გარკვეული გარემო პირობების შექმნა (ტენიანობის შემცირება, გარემო ტემპერატურის გაზრდა);
- ნაწილაკების წინასწარი დამუშავება (გარეცხვა, რეაგენტული დამუშავება და სხვ.);
- დამმუხტავი ელექტროდის ვიბრირების გამოყენება;
- დამმუხტავი ელექტროდის მასალის შერჩევა;

ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის რეგულირება მოყვანილი საშუალებების გამოყენებით რომ არის შესაძლებელი, დასტურდება ცალკეული ცდებით, რომლებიც ჩატარდა სფერულ მეტალურ ნაწილაკებზე. სხვადასხვა გამტარ ნაწილაკზე მოწყვეტის ალბათობის ექსპერიმენტული კვლევის შედეგები მოყვანილია ცხრ. 5-7-ში. გამოკვლევები ტარდებოდა ერთეულოვან ნაწილაკებზე. მოწყვეტის ალბათობის გაანგარიშება ხდებოდა როგორც

$$\lambda = \frac{N}{N_0}$$

სადაც,  $N_0$  - არის მოცემულ ნაწილაკზე ჩატარებული გაზომვების რიცხვი,  $N$  - ამ ნაწილაკის მოწყვეტის რიცხვი.

ცდები მეორდებოდა მანამ, სანამ მოცემული ნაწილაკი არ იკარგებოდა. ამიტომ გაზომვების რიცხვი სხვადასხვა ნაწილაკისათვის იყო სხვადასხვა. ანალიზი ტარდებოდა მხოლოდ იმ ნაწილაკისათვის, რომლის გაზომვების რიცხვი იყო არანაკლებ 15.

მოყვანილი მონაცემებიდან გამომდინარეობს, რომ, მართლაც, მეტალური ნაწილაკებისათვისაც კი მოწყვეტის ალბათობა ვერ აღწევს 100 %-იან მნიშვნელობას. მოწყვეტის ალბათობის კონკრეტული მნიშვნელობა განისაზღვრება ბევრი ფაქტორით და ისინი შესაძლებელია იცვლებოდნენ, რომელიც მოყვანილი იყო ზემოთ. მითითებული ფაქტორების გავლენა მოწყვეტის ალბათობაზე უფრო მკაფიოდ ნაჩვენები იყო მაშინ, როცა ცდები ჩატარებული იქნა მინერალთა ნაწილაკებზე. შედეგები მოყვანილია ქვემოთ.

### ცხრილი 5

λ მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება ნაწილაკის a ზომებზე, როდესაც  $E=10$  კვ/სმ,  $T=20^{\circ}C$ ,  $f=20-60\%$ ; ელექტროდი ქრომირებულია, ნიკელის ნაწილაკები,  
 $\gamma_{\text{ნიკელი}} = 8,25 \cdot 10^3 \text{ კვ/მ}^3$

a, მკმ	90	II4	II6	I25	I55	I97
λ, %	37	37	37	35	24	36
$N_0$ ,	22	56	40	20	25	22

### ცხრილი 6

λ მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება a ნაწილაკის ზომებზე, როცა  $E=10$  კვ/სმ,  $f=20-60\%$ ; ელექტროდი ქრომირებულია,  $T=20^{\circ}C$ , ალუმინის ნაწილაკები,  
 $\gamma_{\text{ალუმინი}} = 2,70 \cdot 10^3 \text{ კვ/მ}^3$

a, მკმ	91	94	I25	I32
γ, %	54	55	78	87
$N_0$ ,	22	20	18	15

λ მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება a ნაწილაკის ზომებზე, როცა E=10 კვ/სმ, T=20°C, f=20-60%; ელექტროდი ქრომირებულია,  $\gamma_{\text{მომ}} = 8,25 \cdot 10^3 \text{ კგ/მ}^3$  ნაწილაკები გარეცხილია ნიშადურის სპირტით

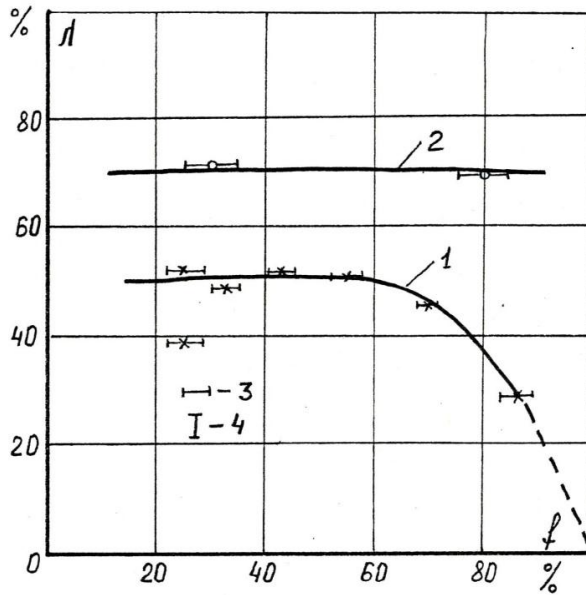
a , მკმ	115	125
λ , %	86	93
N <sub>0</sub>	21	15

### 3.1.3. ჰაერის ტენიანობის გავლენა ნაწილაკთა მოწყვეტის ალბათობაზე

ჰაერის ტენიანობის ანალიზისათვის იმ სივრცეში, სადაც ტარდებოდა ექსპერიმენტი და ნაწილაკი დამუხტვის დროს იმყოფებოდა ელექტროდის ელექტრულ ველში, ვქმნიდით ტენიანობის გარკვეულ დონეს. ჰაერის ტენიანობის მახასიათებელ სიდიდეთ ვღებულობდით ფარდობითი ტენიანობის მნიშვნელობას. მისი რეგულირებისათვის ვიყენებდით ან ჰაერის გახურებას მისი შემდგომი გაციებით (ასე იქმნებოდა ფარდობითი ტენიანობის მცირე მნიშვნელობები), ან იატაკის დასველებით (ასე იქმნებოდა ფარდობითი ტენიანობის დიდი მნიშვნელობები).

ტენიანობა იზომებოდა ფსიქრომეტრის საშუალებით, რომლის სიზუსტე შეადგენდა 5%-ს.

გაზომვების ჩატარების პროცესში ტენიანობის შენარჩუნება ზუსტად ერთსა და იმავე დონეზე ვერ ხერხდებოდა, მაგრამ მისი მნიშვნელობის შენარჩუნებას ვახერხებდით გარკვეულ დიაპაზონში. როგორც წესი, ამ დიაპაზონის აბსოლუტური მნიშვნელობა არ აღემატებოდა  $\pm 5\%$ -ს. ტენიანობის ასეთ დიაპაზონში შენარჩუნება, მოწყვეტის ალბათობაზე მისი გავლენის შეფასებისათვის, სრულიად საკმარისი იყო. გაზომვების მონაცემებიდან ვანგარიშობდით მოწყვეტის ალბათობის საშუალო მნიშვნელობას და საშუალო კვადრატულ გადახრას. მოწყვეტის ალბათობაზე ნესტიანობის გავლენის გაზომვების შედეგები მოყვანილია ნახ. 17-ზე.



ნახ. 17. მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$  დამოკიდებულება ჰაერის ფარდობით ტენიანობაზე  $f$

- 1 - ჰაერის ტემპერატურა  $T=20^{\circ}\text{C}$ , 2 - ჰაერის ტემპერატურა  $T=150^{\circ}\text{C}$ , რუტილის ნაწილაკები, ელექტროდი - ქრომირებული მეტალი,  $E=10\text{კვ/სმ}$ ,  $a = 98\text{მკმ}$ .  
 3 - ტენიანობის ცვლილების დიაპაზონი. 4 - საშუალო კვადრატული გადახრა  $\pm\sigma$ .  
 წერტილები - გაზომვის საშუალო მნიშვნელობები

როგორც ამ მონაცემებიდან ჩანს, ტენიანობის ყველაზე დიდი გავლენა შეინიშნება ოთახის ტემპერატურაზე ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ). ამ მახასიათებლისათვის გამოიკვეთა არეთა არსებობა:  $\lambda$ -ს უცვლელი მნიშვნელობის არე და  $\lambda$ -ს დაღმავალი არე, როდესაც ტენიანობის მნიშვნელობები იზრდება. უნდა აღინიშნოს, რომ მისი ინტენსიური შემცირება წარმოებს ტენიანობის 60-80 %-ის არეში. ტენიანობის ეს მნიშვნელობები ზეგავლენას ახდენენ სხვა პარამეტრებზეც, ასე მაგ., შეიმჩნევა [53] ნივთიერებათა ზედაპირული გამტარობის მკვეთრი ცვლილება. მახასიათებლების ნახტომისებური ცვლილება განპირობებულია იმით, რომ ტენიანობის 60-80%-ის ფარგლებში ცვლილების დროს სხეულის ზედაპირზე წარმოქმნას იწყებს კონდენსირებული ტენის უწყვეტი, მთლიანი არხები. რადგანაც ნაწილაკის ზედაპირზე წარმოქმნილ სითხის თხელ ფენას მივყავართ ადგეზიის ძალის კაპილარული მდგენელის

წარმოშობამდე, რასაც თან სდევს ადგეზიის ძალის ზრდა, ამიტომაც ბუნებრივია ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის შემცირება.

ტენიანობის ამგვარი გავლენა მოწყვეტის  $\lambda$  ალბათობაზე დასტურდება სხვა ტემპერატურაზე ჩატარებული ექსპერიმენტული მონაცემებით. ტემპერატურის ზრდისას შეიმჩნევა კონდენსირების წერტილის უფრო დიდ მნიშვნელობამდე ამაღლება (კონდენსირებული მთლიანი არხები წარმოიქმნება ფარდობითი ტენიანობის უფრო მაღალი მნიშვნელობის დროს), რის გამოც მცირდება უწყვეტი არხების წარმოქმნის ალბათობა. გარდა ამისა, ნაწილაკები ხურდება და ტენის რაოდენობაც მის ზედაპირზე მცირდება. საბოლოოდ, ამას მივყავართ ადგეზიის ძალის შემცირებამდე და, შესაბამისად, ნაწილაკის მოწყვეტის ალბათობა იზრდება. ამასთან ერთად,  $\lambda$ -ს მნიშვნელობების შემცირება ტენიანობის 80-90%-იანი მნიშვნელობების მახლობლობაშიც კი არ შეინიშნება.

აღნიშნული დამოკიდებულების ამგვარი ხასიათი ( $\lambda$ -ს მუდმივობა ტენიანობისაგან) შეიმჩნევა ჰაერის გახურებისას 100°C-მდე და ზევით.

იმისათვის, რომ გავზარდოთ ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა, გახურების გარდა შესაძლებელია ნაწილაკების ზედაპირული დასველებადობის შემცირების გზით. ასე, მაგ., რუტილის ნაწილაკების ნიშადურის სპირტში გარეცხვის შემდეგ მისი მოწყვეტის ალბათობა იზრდება 47-53%-დან 64-75%-მდე (ცხრ. 8). ანალოგიური სურათი გვაქვს მეტალური სფერული ნაწილაკებისათვის. ასე, მაგ., ნიკელის სფერული ნაწილაკების ნიშადურის სპირტში გარეცხვის შემდეგ  $T=20^{\circ}\text{C}$ -ისდროს მოწყვეტის ალბათობა იზრდება 35-37 %-დან 86-93 %-მდე (ცხრ. 5 და 7).

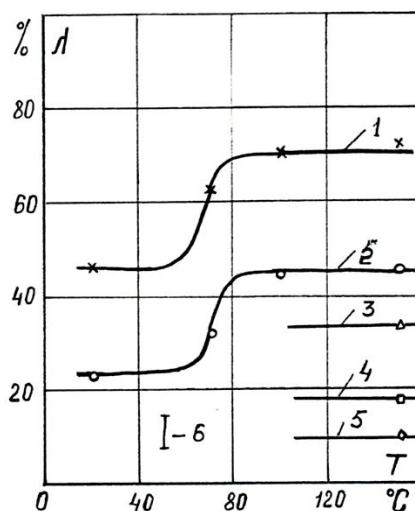
ამრიგად, გარემოს ტენიანობის შემცირება 60-70%-მდე საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის უდიდესი მნიშვნელობა. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ელექტროსეპარაციის ხარისხიანი პროცესის მისაღწევად გარემოს ტენიანობის 60-70%-ზე ზევით აყვანა დაუშვებელია.

რუტილის ნაწილაკების გარეცხვის ზეგავლენა მათი ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობაზე, როცა  $f=40-60\%$  და  $E=10$  კვ/სმ

a ,მკმ	95	100	84
λ,% გაურეცხავი	53	52	47
λ,% გარეცხილი	73	75	64

### 3.1.4. ჰაერის მაღალი ტემპერატურის გავლენა ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე

მინერალების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობაზე ზედაპირული ტენის განმსაზღვრელი როლი განპირობებულია λ-ს დამოკიდებულებით ჰაერის გახურების ტემპერატურისადმი, რა ვითარებაშიც ხდება ნაწილაკის დამუხტვა. ეს დამოკიდებულება გამოსახულია ნახ.18-ზე. მისთვის დამახასიათებელია λ-ს სიდიდის მკვეთრი, თითქმის ნახტომისებური, ცვლილება 70-90°C-ის ტემპერატურის ფარგლებში.



ნახ. 18. მოწყვეტის ალბათობის λ დამოკიდებულება ჰაერის ტემპერატურაზე T

1 - E=10კვ/სმ, 2 - E=7კვ/სმ, 3 - E=6კვ/სმ, 4 - E=5,5კვ/სმ, 5 - E=5კვ/სმ, a = 98მკმ, f =22-57%,  
6 - საშუალო კვადრატული გადახრა ±σ. წერტილები - საშუალო მნიშვნელობები;  
რუტილის ნაწილაკები, ელექტროდი - ქრომირებული მეტალი.

ექსპერიმენტის პროცესში ნაწილაკები თავსდებოდნენ ელექტროდზე, რომლის გახურება ხდებოდა საჭირო ტემპერატურამდე. მოცემული

ტემპერატურის დროს ნაწილაკები ელექტროდზე იმყოფებოდნენ ~30-40 წთ-ის განმავლობაში. ამ დროს ხდებოდა მათი დამუხტვა და მოწყვეტის ალბათობის განსაზღვრა. ექსპერიმენტი ტარდებოდა  $f=22-57\%$ -ის ტენიანობის პირობებში. მსგავსი პირობები იქმნება ტიტანისშემცველი მინერალების ჩვეულებრივ პირობებში გადამუშავების დროს.

მიღებული დამოკიდებულების ხასიათი აიხსნება შემდეგნაირად: 70-90°C-ის ტემპერატურის ფარგლებში მიმდინარეობს ნაწილაკის ზედაპირიდან ტენის ინტენსიური აორთქლება, რასაც მივყავართ ნაწილაკის ელექტროდთან ადგეზიის ძალის შემცირებამდე და, შესაბამისად, მოწყვეტის ალბათობის გაზრდამდე. უნდა აღინიშნოს, რომ ზუსტად ამ დიაპაზონშია შენარჩუნებული ტიტანო-ილმენიტის კონცენტრატის სამრეწველო გადამუშავების ტექნოლოგიური რეჟიმის ტემპერატურა [52]. ეს მნიშვნელობა შერჩეულია ექსპერიმენტულად და შეესაბამება მინერალთა განცალკევების მაქსიმალურ შესაძლებლობას.

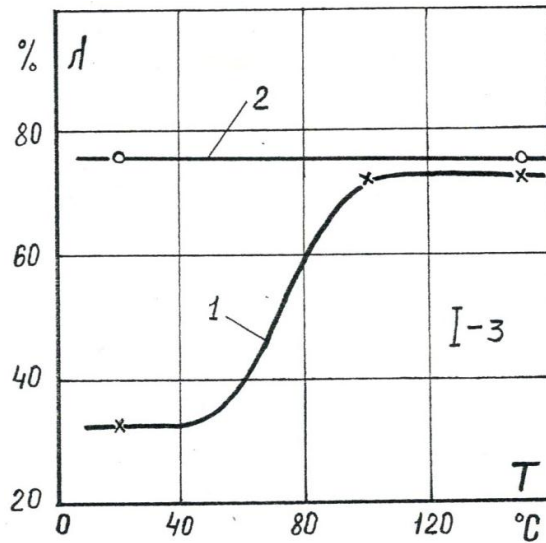
ამრიგად, ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის გაზრდისათვის მიზანშეწონილია განსაცალკევებელი მინერალები გავახუროთ 90-100°C. გახურების ტემპერატურის შემდგომ ზრდას არ მივყავართ  $\lambda$ -ს შემდგომ ზრდამდე. მამასადამე, ზედმეტი გახურება ეკონომიურად მიზანშეწონილია.

### **3.1.5. ელექტროდის ვიბრაციის გავლენა მოწყვეტის ალბათობაზე**

მოწყვეტის  $\lambda$  ალბათობაზე ტენიანობისა და გარემოს ტემპერატურის ექსპერიმენტულმა გაზომვებმა დაგვიდასტურა ადგეზიის ძალის მნიშვნელოვანი ზეგავლენა ნაწილაკების მოწყვეტის პროცესზე. აქედან გამომდინარე, ამ ძალის შემცირების ნებისმიერმა მეთოდმა ან მისმა მთლიანად გამორიცხვამ უნდა მიგვიყვანოს მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$ -ს ზრდამდე.

$\lambda$  სიდიდის გაზრდის ერთ-ერთი გზა, რომელიც ხშირად გამოიყენება პრაქტიკაში, არის დამუხტავი ელექტროდის ვიბრაცია.

ნახ.19-ზე მოყვანილია დამოკიდებულება, რომელიც ნათლად ასახავს ვიბრაციის ზეგავლენას მოწყვეტის ალბათობის ზრდაზე.



ნახ. 19. მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$  დამოკიდებულება ელექტროდის ვიბრაციაზე

1 - ვიბრაციის გარეშე; 2 - ვიბრაციის დროს; რუტილის ნაწილაკები  $a = 98\text{მკმ}$ , ელექტროდი - ქრომირებული მეტალი  $E=10\text{კვ/სმ}$ ,  $f=80\%$ , წერტილები - საშუალო მნიშვნელობები; 3 - საშუალო კვადრატული გადახრა  $\pm\sigma$

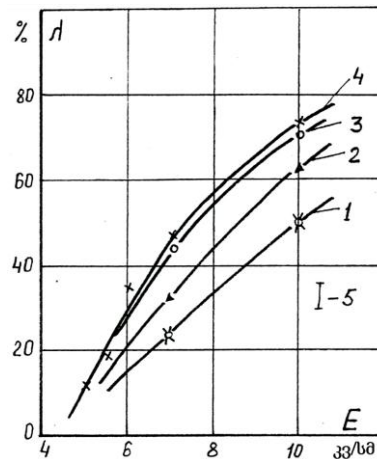
დამმუხტავი ელექტროდის ვიბრაცია განხორციელებული იყო ვიბრატორის მიერ. იგი აწყობილი იყო ელექტრომაგნიტური რელეს საფუძველზე. ვიბრაციის სიხშირე შეადგენდა 50ჰც-ს. ვიბრაციის ამპლიტუდა იცვლებოდა რელეს კვების ძაბვის ცვლილების გზით. ის შეირჩეოდა ისეთი სიდიდისა, რომლის რხევის ამპლიტუდის შემდგომ ზრდას გავლენა აღარ ჰქონდა ნაწილაკების მოწყვეტის პროცესზე.

ვიბრაციის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს  $\lambda$  გავზარდოთ იმ მნიშვნელობამდე, რომელიც შეესაბამება ჰაერის გახურებას  $100^{\circ}\text{C}$ -ით და მეტისაც. ანუ გარემოს გახურებასა და დამმუხტავი ელექტროდის ვიბრაციას ანალოგიურ ეფექტამდე მივყავართ.



### 3.1.6. ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე

ელექტრული ველის დაძაბულობა ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური მახასიათებელია, როდესაც ელექტრული სისტემის მოცემული კონსტრუქციის დროს ის განისაზღვრება მასზე მოდებული ძაბვით. მეორეს მხრივ, E სიდიდე წარმოადგენს კონსტრუქციულ მახასიათებელსაც, რადგანაც მისი სიდიდე განისაზღვრება სეპარატორის ელექტროდების კონსტრუქციით. მოწყვეტის  $\lambda$  ალბათობის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობისადმი მოცემულია ნახ.20-ზე.



ნახ. 20. მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$  დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე E

1 -  $T=20$  °C; 2 -  $T=70$  °C; 3 -  $T=100$  °C; 4 -  $T=150$  °C; 5 - საშუალო კვადრატული გადახრა  $\pm\sigma$ ; წერტილები - საშუალო მნიშვნელობები; რუტილის ნაწილაკები; ელექტროდი - ქრომირებული მეტალი  $a = 98$  მკმ,  $f = 20-40\%$ .

$\lambda$  სიდიდე ახლოსაა ნულთან ელექტრული ველის დაძაბულობის ზღურბლური მნიშვნელობის დროს  $E_{ზღურ}$ , რომელიც განისაზღვრება პირობით

$$mg = KE_{ზღურ} \cdot q_{ზღურ}$$

ელექტრული ველის დაძაბულობის ზრდისას იზრდება ნაწილაკზე მოქმედი ის ძალა, რომელიც ცდილობს ნაწილაკი მოსწყვიტოს ელექტროდს. ამის გამო დამუხტვის პირობების მუდმივობის შენარჩუნების შემთხვევაში

ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის  $\lambda$  ალბათობა ელექტრული ველის  $E$  დამაბულობის ზრდისას იზრდება. ელექტრული ველის გამოკვლეულ დიაპაზონში დაწყებული  $E_{ზღურ}$ -დან  $E=10$ კვ/სმ-მდე  $\lambda$  სიდიდე პრაქტიკულად ელექტრული ველის  $E$  დამაბულობის პროპორციულად იზრდებოდა.

ამრიგად, ელექტრული ველის დამაბულობის გაზრდა ნაწილაკების მოწყვეტის  $\lambda$  ალბათობის გაზრდის ერთ-ერთი ყველაზე ეფექტური საშუალებაა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$  -ს მდორე რეგულირება.

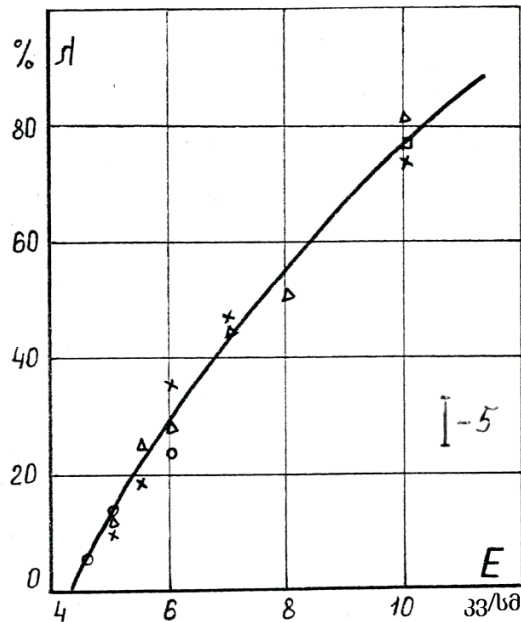
$\lambda$  სიდიდის რეგულირების ამ ხერხის ნაკლოვანი მხარე ისაა, რომ  $E$ -ს მნიშვნელობა, რომელიც ტოლია 10კვ/სმ, პრაქტიკულად არის ყველაზე უდიდესი, რომელიც შესაძლებელია მიღწეულ იქნეს რეალურ აპარატებში. სამრეწველო ელექტროსეპარატორებში მისი ჩვეულებრივი მნიშვნელობები შეადგენს გაცილებით ნაკლებს, კერძოდ, 4-5კვ/სმ-ს, ანუ იმყოფება ელექტრული ველის ზღურბლური მნიშვნელობის დონეზე.

ელექტროდებს შორის სივრცის გარღვევის თვალსაზრისით, ჰაერში ელექტრული ველის დამაბულობა შეიძლება ამაღლდეს 24,5კვ/სმ-მდე. ეს შესაძლებელია მიღწეულ იქნეს მხოლოდ ელექტრული სისტემის სრულყოფის ხარჯზე და წარმოადგენს გარკვეულ რეზერვს ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის მაქსიმალური მნიშვნელობის მიღწევის გზაზე.

### **3.1.7. ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება მათ ზომებზე**

განსაცალკევებელი მინერალური ნაწილაკების ზომები ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ტექნოლოგიური მახასიათებელია. როგორც წესი, განსაცალკევებელი ნარევის შემადგენლობაში არსებობენ სხვადასხვა ზომის ნაწილაკები, რომელთა დიაპაზონი განისაზღვრება ან მისი წარმოშობის ადგილმდებარეობით (ფხვნილისებრი წარმოშობა) ან მისი წინასწარი დამუშავებით (ქერქისებური, ქანისებური მადნეული).

წინამდებარე ნაშრომში გამოკვლეული იქნა ტიტანო-ციროკონიუმის ნაშალის მინერალური ფხვნილი. მისთვის დამახასიათებელია ნაწილაკების ზომების ვიწრო დიაპაზონი. გაზომვები ჩატარებული იქნა 73-104 მკმ-ის ზომის ნაწილაკებზე. გაზომვების შედეგები მოყვანილია ნახ.21-ზე.



ნახ. 21. სხვადასხვა ზომის ნაწილაკებისათვის მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$  დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე E

□ - 1 - a = 104მკმ, x - 2 - a = 98მკმ, o - 3 - a = 85მკმ, Δ - 4 - a = 73მკმ, რუტილის ნაწილაკები; ელექტროდი - ქრომირებული მეტალი, T=150 °C, წერტილები - საშუალო მნიშვნელობები; 5 - საშუალო კვადრატული გადახრა  $\pm\sigma$ .

ჩატარებული გაზომვების სიზუსტის საზღვრებში შეიძლება ვთქვათ, რომ ნაწილაკების გამოკვლეულ დიაპაზონში მოწყვეტის  $\gamma$  ალბათობა არ არის დამოკიდებული ნაწილაკების ზომებზე.

მართლაც, მოცემული ნაწილაკების ზღურბლური მნიშვნელობების შეფარდება ტოლია  $\sqrt{\frac{a_{max}}{a_{min}}} = 1,2$ . ამავე მნიშვნელობების ფარგლებში განსხვავდება ნაწილაკზე მოქმედი ელექტრული ძალის მნიშვნელობები ელექტრული ველის დამაბულობის სხვა მნიშვნელობების დროს. აქედან გამომდინარე, ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის  $\gamma$  მნიშვნელობები ერთმანეთისგან ძალიან არ უნდა განსხვავდებოდნენ.

იმ ნაწილაკთა ნარევისათვის, რომლებიც ხასიათდებიან მათი ზომების განსხვავების დიდი დიაპაზონით,  $\gamma$ -ს მნიშვნელობების განსხვავება დამოკიდებულია ამ დიაპაზონზე. ნაწილაკის ზომა განსაზღვრავს მუხტის სიდიდეს, რომელსაც დებულობს ნაწილაკი. ამიტომ ზომის ერთი ხარისხით ცვლილება ეკვივალენტურია ელექტრული ველის დამაბულობის  $\frac{1}{2}$  ხარისხით ( $\sqrt{10} = 3.16$ ) ცვლილებისა. ეს ფაქტი მხედველობაში უნდა იქნეს მიღებული ნაწილაკთა ნარევის ზომების განსხვავებული ფრაქციული შემადგენლობის ანალიზის დროს.

### **3.2. სეპარატორის კონსტრუქციული პარამეტრების გავლენა ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობაზე**

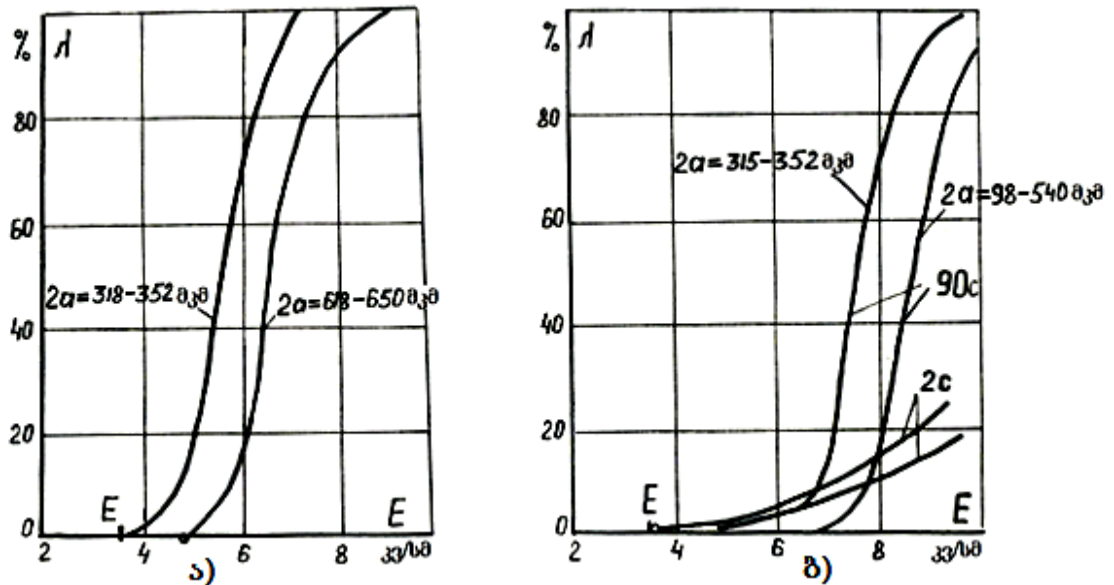
#### **3.2.1. ნაწილაკის ელექტრულ ველში ყოფნის ხანგრძლივობის ზეგავლენა მისი მოწყვეტის ალბათობაზე**

მინერალური ნაწილაკები ხასიათდება გარკვეული სიდიდის გამტარობით. ამის გამო იმ მუხტს, რომელიც საკმარისია ელექტროდიდან მათი მოწყვეტისათვის, ისინი იძენენ არა მყისიერად, არამედ გარკვეული დროის განმავლობაში. ამას მივყავართ იქამდე, რომ მოწყვეტის ალბათობის შეფასებისათვის აუცილებელია გავითვალისწინოთ ნაწილაკებზე დაკვირვების დროის თანაფარდობა მათი დამუხტვის დროის მუდმივას მიმართ.

დაკვირვების დრო ეკვივალენტურია იმ დროისა, რომლის განმავლობაშიც ნაწილაკი განიცდის ელექტრული ველის მოქმედებას, რაც განისაზღვრება სეპარატორის ელექტრული სისტემის კონსტრუქციით.

ნახ. 22-ზე მოყვანილია მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე ტიტანისშემცველი კონცენტრატის ორი ტიპის ნაწილაკებისათვის: ილმენიტისათვის, რომელიც გამტარი ნაწილაკების ფრაქციის წარმომადგენელია და პლაგიოკლაზისათვის, რომელიც არაგამტარი ნაწილაკების წარმომადგენელია. ლიტერატურული წყაროთა შეფასებები გვიჩვენებენ, რომ ილმენიტის ნაწილაკების დამუხტვის დროის მუდმივა შეადგენს წამის ნაწილებს, ხოლო პლაგიოკლაზისა კი

- ათობით წმ-ს. ამის გამო ილმენიტის ნაწილაკები, რომლებიც განიცდიდნენ ელექტრული ველის ზემოქმედებას 2წმ-ის განმავლობაში, ასწრებდნენ დამუხტულიყვნენ, მიეღოთ მოწყვეტისათვის საკმარისი მუხტი და კიდევაც წყდებოდნენ ელექტროდიდან.



ნახ. 22. მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$  დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე  $E$ ,  $t_{\text{დაბ}} = 2 \text{ წმ}$

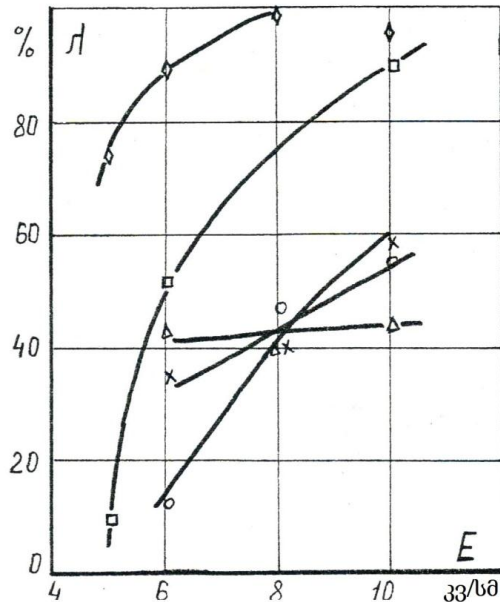
გრაფიტისშემცველი ელექტროდი  
 ა) - ილმენიტი, ბ) პლაგიოკლაზი

ამასთან ერთად, ელექტრული ველის დამაბულობის გარკვეული დონისას მოწყვეტის ალბათობა აღწევდა დიდ მნიშვნელობებს: ასე, მაგ., როდესაც  $E=8 \text{ კვ/სმ}$ , მაშინ ნაწილაკებისათვის  $2a=618-650 \text{ მკმ}$   $\lambda=90\%$ -ს, ხოლო ნაწილაკებისათვის  $2a=318-352 \text{ მკმ}$ -ს  $\lambda=99\%$ -ს.

პლაგიოკლაზის ნაწილაკებისათვის, როცა დაკვირვების დრო შეადგენდა 2 წმ-ს, მოწყვეტის  $\lambda$  მნიშვნელობები არ შეადგენდნენ დიდ სიდიდეებს და ისინი ვერ აჭარბებდნენ 20%-საც კი, როცა ელექტრული ველის დამაბულობა 10 კვ/სმ-იც კი იყო. დაკვირვების დროის გაზრდისას 90 წმ-მდე პლაგიოკლაზის ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა მატულობდა და უახლოვდებოდა ილმენიტის ნაწილაკების შესაბამის მნიშვნელობებს.

ილმენიტის ნაწილაკებისათვის დაკვირვების დროის გაზრდა არ აისახებოდა  $\lambda$ -ს დამოკიდებულებაზე  $E$ -ს მიმართ.

ნახ. 23-ზე მოყვანილი მონაცემები მიღებულია გრაფიტის შემცველ ელექტროდზე ნაწილაკების დამუხტვისას.



ნახ. 23. მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$  დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე  $E$

ნახშირბადის საფენი  $f=50\%$ ;

× - სტავროლიტი $a = 133\text{მკმ}$	} $t=6\text{წთ}$	Δ - კვარცი $a = 242\text{მკმ}$	} $t=1\text{წთ}$
o - დისტენი $a = 133\text{მკმ}$		◇ - ილმენიტი $a = 137\text{მკმ}$	
		□ - რუტილი $a = 64\text{მკმ}$	

მოწყვეტის ალბათობის დიდი მნიშვნელობების მიღების შესაძლებლობების ილუსტრაცია გახლავთ ნახ. 23-ზე მოყვანილი გრაფიკები, რომლებიც მიღებულია ნაწილაკების ელექტრულ ველში ყოფნის დიდი დროის განმავლობაში. მოყვანილი მონაცემები, რომლებიც ახასიათებენ ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულებას დაკვირვების დროზე, შესაძლებლობას გვაძლევენ გავაკეთოთ დასკვნა:

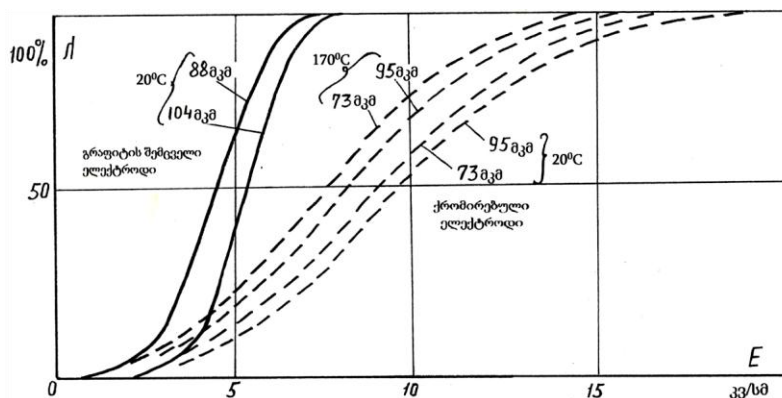
გამტარობის მიხედვით ნაწილაკების განცალკევების ძირითადი საფუძველია ნაწილაკების საკმარისი მუხტების მიღების დროში განსხვავება. განსაცალკევებელი ნაწილაკებისათვის შექმნილი უნდა იყოს ისეთი პირობები, რომლის დროსაც გამტარი ფრაქციის ნაწილაკებისათვის მათი

ელექტრულ ველში ყოფნის ხანგრძლიობა იყოს დამუხტვის დროის მუდმივაზე მეტი, ხოლო არაგამტარი ფრაქციის ნაწილაკებისათვის - მათი დამუხტვის დროის მუდმივაზე ნაკლები.

### 3.2.2. დამუხტავი ელექტროდის მასალის გავლენა ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე

ლიტერატურულ წყაროთა ანალიზი და ზემოთ მოყვანილი გაზომვების შედეგები ადასტურებენ იმას, რომ ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე მნიშვნელოვან ზეგავლენას ახდენს ელექტროდის მასალა. გამოკვლეული იქნა ორი ტიპის ელექტროდები: მეტალის ქრომირებული ელექტროდები და ნახშირბადის შემცველი ელექტროდები. შეგვიძლია წინასწარ აღვნიშნოთ, რომ მეტალურ ქრომირებულ ელექტროდს აქვს მოწყვეტის ალბათობის შესამჩნევად ცუდი მახასიათებლები ვიდრე ნახშირბადოვან ელექტროდს.

ნახ. 24-ზე ნაჩვენებია რუტილის ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე ელექტროდის მასალის გავლენა. თვალსაჩინო უპირატესობა აქვს ელექტროდს, რომელიც დამზადებულია გრაფიტის შემცველი მასალისაგან.



ნახ. 24. მოწყვეტის ალბათობის  $\lambda$  დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე  $E$ . რუტილი,  $t_{\text{დამ}} = 90$ წმ

იმისათვის, რომ შეგვეფასებინა, წარმოადგენს თუ არა ზემოთ მიღებული შედეგი მხოლოდ ამ მასალების თვისებებს, თუ ადგილი აქვს რაღაც ზოგად კანონზომიერებებს, გამოკვლეული იქნა ელექტროდების ორი

ჯგუფი. პირველ ჯგუფში შევიდნენ სხვადასხვა მეტალისაგან დამზადებული ელექტროდები, ხოლო მეორეში - ელექტროდები, რომლებიც დამზადებული იყვნენ ნახშირბადის სხვადასხვა შემცველობის მასალებისაგან.

ელექტროდის თვისებების შეფასების მიზნით მოწყვეტის ალბათობის დასადგენად გაზომვები ჩატარდა ნიკელის სფეროსებრ ნაწილაკებზე ელექტრული ველის განსხვავებული დამაბულობის დროს. ექსპერიმენტში გამოყენებული ნიკელის სფეროსებრი ნაწილაკები საშუალებას გვაძლევს უფრო თამამად გამოვრიცხოთ მოწყვეტის ალბათობაზე სხვა ფაქტორების გავლენა, გარდა ელექტროდის მასალის გავლენისა. ყოველი ელექტროდის მასალისათვის ჩატარებული იქნა გაზომვების რამდენიმე სერია, სადაც ხდებოდა 10 ნაწილაკის ერთდროული დამუხტვა. გაზომვების სერიაში ნაწილაკების მთლიანი რიცხვი შეადგენდა 100-ს. ნიკელის ნაწილაკების ზომები იყო  $a=(125\pm 15)\cdot 10^{-6}\text{მ}$ . გაზომვები ჩატარდა 20°C-ის ტემპერატურის დროს და გარემოს ტენიანობა შეადგენდა არა უმეტეს  $f=50\%$ -ს.

ნაწილაკების მოწყვეტის მინიმალური დამაბულობა - ზღურბლური დამაბულობა, რომლის დროსაც მოცემული ნაწილაკისათვის ელექტრული ძალა ტოლია სიმძიმის ძალისა, შეადგენს  $E_{\text{ზღურბ}}=4,84\cdot 10^5\text{ვ/მ}$ .

მოწყვეტის ალბათობის გაზომვების შედეგები მოყვანილია ცხრ. 9-10-ში.

**ცხრილი 9**

**λ-ს მნიშვნელობები ნიკელის ნაწილაკებისათვის, როდესაც ხდებოდა მათი დამუხტვა მეტალურ ელექტროდებზე,  $t_{\text{მუხტ}} = 90 \text{ წმ}$**

E, კვ/სმ	სპილენძი	ფოლადი-3	ქრომი	თუთია	თუნუქი
5,5	62		49	53	
	60	58	27	93	
			51	94	
6,0	64	22	33	59	35
	69	54	53	95	83
	85	73	37		76
		71	72		
8,0	81	29	44	-	59
		95			91
		98			
10,0	91	38	58	-	74 -



ცხრილი 10

λ-ს მნიშვნელობები ნიკელის ნაწილაკებისათვის, როდესაც ხდებოდა მათი დამუხტვა გრაფიტის შემცველ ელექტროდზე,  $t_{დაბ} = 90$  წმ

E, კვ/სმ	ელ.გრ-14	ელ.გრ-16	ელ.გრ-1	სპ.გრ.ტყვ-5	სპ.გრ.ტყვ.კალა
5,0	23 0	24 0	0 22 23	4	5
5,5	90 79	80 90	65 70 76 89 91	65 94 89	68 94 68 74
6,0	100	100	95 97 98 96 97 99	96 97	98 100 98

ყოველი გაზომვის წინ მეტალური ელექტროდის ზედაპირი იხეხებოდა ნულოვანი ზამფარიანი ტყავით. ელექტროდის გაწმენდის შემდეგ ექსპერიმენტის დაწყების დრო არ აღემატებოდა 2წთ. ნაწილაკების ელექტრულ ველში ყოფნის ხანგრძლიობა (დაკვირვების დრო) შეადგენდა 90 წმ.

ცხრ. 9. მონაცემებიდან გამომდინარეობს, რომ მეტალური ელექტროდებისათვის ელექტრული ველის დამაბულობის მნიშვნელობის დროსაც კი, როდესაც  $E=10 \cdot 10^5$  ვ/მ, ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა ვერ აღწევს 100%-ს. ამასთან ერთად, ექსპერიმენტის სხვადასხვა სერიაში შეინიშნება  $\gamma$  სიდიდის ძალიან დიდი გაზნევა.

უნდა აღინიშნოს შემდეგიც: მოწყვეტის ალბათობის მიხედვით, ქრომირებულ ელექტროდებს არანაირი უპირატესობა არ აქვს ფოლადთან, თუნუქსა და სხვა მეტალებთან შედარებით.

მეტალური ელექტროდების ასეთი მახასიათებლები დაკავშირებულია ადგეზიის ძალების უპირატეს მნიშვნელობასთან სიმძიმის ძალასთან შედარებით. დაყენებული ექსპერიმენტებიდან გამომდინარეობს, რომ მოცემული ელექტროდები ისე არ იქცევიან, როგორც მეტალები. ეს შეიძლება აიხსნას მხოლოდ ჟანგეული ფენის გავლენით, რომელიც წარმოიქმნება მეტალური ელექტროდების ზედაპირზე.

ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის პროცესზე ჟანგეული ფენის განმსაზღვრელ როლზე მიუთითებს ის გაზომვები, რომლებიც ჩატარებული იქნა ნახშირბადის შემცველ ელექტროდებზე (ცხრ. 10). ნახშირბადის

შემცველ მასალებს არ აქვს ჟანგეული ფენა. მათთვის ადგეზიის ძალა განისაზღვრება თვით ამ ელექტროდის მასალის თვისებებით.

ამასთან ერთად, მნიშვნელოვანია აღინიშნოს: უკვე ელექტრული ველის დამაბულობის დროსაც კი, როდესაც  $E=6 \cdot 10^5$  ვ/მ,  $\gamma$ -ს მნიშვნელობები უახლოვდება 100%-ს და გაზომვების სხვადასხვა სერიების შედეგები სტაბილურია [67].

ელექტრული ველის დამაბულობის მკვეთრი შემცირება, რაც შეესაბამება ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის 100%-იან მნიშვნელობას, მიუთითებს ადგეზიის ძალის შემცირებაზე. მოწყვეტის მნიშვნელობების სტაბილურობა, მაქსიმალური და ზღვრულური დამაბულობების ერთმანეთთან დაახლოება მიუთითებს იმაზე, რომ ამგვარი ელექტროდებისათვის ადგეზიის ძალა უფრო მცირეა, ვიდრე ნაწილაკების სიმძიმის ძალა.

აუცილებელია დამმუხტავი ელექტროდი დამზადდეს ნახშირბადის შემცველი მასალისაგან.

ეს დასკვნა დასტურდება იმ გაზომვების შედეგებითაც, რომლებიც ჩატარებული იქნა სხვადასხვა მინერალურ ნაწილაკზე. [52]-ში ასევე, გამოკვლეული იქნა სხვადასხვა მასალისაგან დამზადებული დამმუხტავი ელექტროდების გავლენა სეპარაციის ეფექტურობაზე და ასევე დადგენილი იქნა, რომ, საუკეთესო მახასიათებლები აქვს ნახშირბადის შემცველ ელექტროდებს.

### 3.3. ნაწილაკთა ელექტროდიდან მოწყვეტის დიაგრამა

როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ბრტყელი კონდენსატორის ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკზე მოქმედებს ჯამური ძალა: ელექტრული ძალა  $F_{ელ}$ , სიმძიმის ძალა  $mg$  და ადგეზიის ძალა  $F_{ადგ}$ .

როდესაც ელექტრული ძალა გადააჭარბებს სიმძიმისა და ადგეზიის (ნაწილაკის ელექტროდზე დაწოლის) ძალას, მაშინ ნაწილაკი მოსწყდება ელექტროდს. ე.ი.

$$F_{ელ} \geq mg + F_{ადგ} \quad (23)$$

ამ პირობის შესრულება აუცილებელია იმისათვის, რომ წარიმართოს ნაწილაკების ელექტროსეპარაცია.

ელექტრული ძალის დამოკიდებულება (სტილიზებული) მუხტზე, რომელსაც ნაწილაკი ღებულობს, ნაჩვენებია ნახ. 25ა-ზე. დამუხტვის უცვლელი პირობების ვითარებაში სიმძიმის ძალა წარმოადგენს მუდმივას.

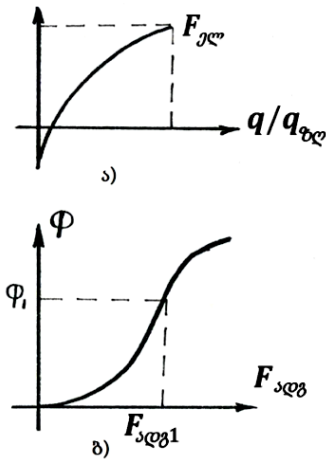
ნაწილაკზე მოქმედი ძალების შესაფასებლად ყველაზე რთულ ვითარებას ქმნის ადგეზიის ძალა. ლიტერატურულ წყაროთა ანალიზი და ზემოთ წარმოდგენილი გამოკვლევები გვიჩვენებენ, რომ ადგეზიის ძალა ალბათური მახასიათებელია. დამუხტვის გარკვეული პირობების დროს ის შეიძლება დახასიათდეს ალბათური ფუნქციით, რომლის გრაფიკი (სტილიზებული) წარმოდგენილია ნახ. 25 ბ-ზე. ეს დამოკიდებულება განსაზღვრავს  $\Phi$  ალბათობას იმისა, რომ ადგეზიის ძალა იქნება  $F_{ადგ.1}$ -ის მოცემულ მნიშვნელობაზე უფრო ნაკლები.

ძალების მოცემული სამი დამოკიდებულება ( $F_{ელ}$ ,  $mg$  და  $F_{ადგ}$ ) საშუალებას გვაძლევს ხარისხობრივად აღვწეროთ ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკების დამუხტვისა და მოწყვეტის პროცესი.

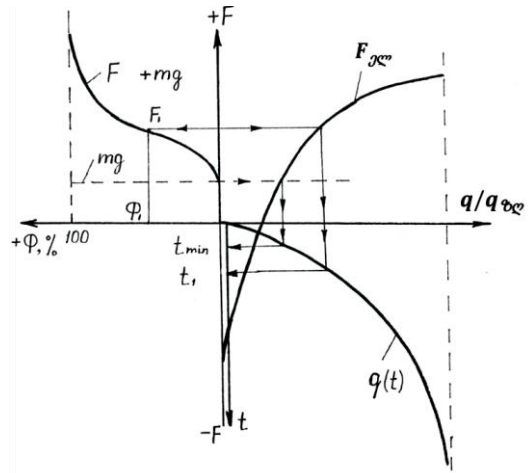
იმისათვის, რომ მოყვანილი დამოკიდებულებებით უფრო მოხერხებულად ვისარგებლოთ, გავაერთიანოთ ისინი ერთ დიაგრამაში, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. 26-ზე და იგი შევავსოთ დამუხტვის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკით.

პირობა (23)-ით ნაჩვენები ძალთა ბალანსის დიაგრამის სახით წარმოდგენა მნიშვნელოვნად აადვილებს ნაწილაკების დამუხტვისა და მოწყვეტის პირობის შესრულების ანალიზს.

ვიცით რა ადგეზიის ძალა  $F_{ადგ.1}$ ,  $F$  ძალის ღერძზე განვსაზღვრავთ ნაწილაკის ელექტროდზე დაწოლის ძალას  $F_{ადგ.1}+mg$  და ამის მიხედვით განვსაზღვრავთ იმ მუხტს, რომელიც საჭირო იქნება ამ ძალის კომპენსაციისათვის ანუ  $(q/q_{მავ})_1$  და  $t_1$  დროს, რომლის განმავლობაშიც ნაწილაკი ღებულობს ამ მუხტს. ეს პირობა შეესაბამება ალბათობის ფუნქციის  $\Phi_1$  მნიშვნელობას, რომელიც განსაზღვრავს ნაწილაკის მოწყვეტის ალბათობას.



ნახ. 25. ძალთა დიაგრამის აგებისათვის



ნახ. 26 ინდუქციური დამუხტვის პროცესში ნაწილაკზე მოქმედი ძალთა დიაგრამა

ამრიგად, მოცემული დიაგრამა საშუალებას გვაძლევს, წინასწარ ცნობილი ძალების რაოდენობრივი მახასიათებლების მიხედვით განვსაზღვროთ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის ყველა პარამეტრი. ნახ. 26 დიაგრამაზე წარმოდგენილი ყველა დამოკიდებულებას შორის უცნობი რჩება ადგეზიის ძალის ალბათობის ფუნქციის დამოკიდებულება ადგეზიის ძალის მნიშვნელობაზე  $\Phi(F_{ადგ})$ . მისი თეორიული გაანგარიშება შეუძლებელია. ამიტომ აუცილებელი ხდება მისი ექსპერიმენტალურად განსაზღვრა. ეს საკითხები განხილული იქნება მომდევნო თავში.

ნაწილაკის მოწყვეტის დიაგრამის ანალიზი, ძალთა რაოდენობრივი მახასიათებლების გამოყენების გარეშე კი, საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ მეტად მნიშვნელოვანი დასკვნები, რომლებიც განსაზღვრავენ ელექტროსეპარატორის ელექტრულ ველში ნაწილაკების ქცევას.

იმ შემთხვევაში, როდესაც  $F_{ადგ}=0$ , ანუ როდესაც ნაწილაკზე მოქმედებს მხოლოდ ელექტროდზე დაწოლის სიმძიმის ძალა ( $F = mg$ ), საქმე გვაქვს მინიმალური მუხტის ზღვრულ მნიშვნელობასთან  $(q/q_{მ.კ})_{მინ}$ . ამ ვითარებაში საჭიროა დამუხტვის მინიმალური დრო  $t_{მინ}$ . ამაზე უფრო ნაკლები მუხტისა და დამუხტვის დროის მიღება შეუძლებელია.

წარმოქმნილი მუხტების მაქსიმალური მნიშვნელობები ვერ გადააჭარბებს  $q=q_{მ.კ}$ , ანუ მათ აქვთ თავიანთი გარკვეული მნიშვნელობები. ამ

შემთხვევაში დამუხტვის დრო  $t_{დაძ} \rightarrow \infty$ . ელექტრული ველის დაძაბულობის ზრდა, ზრდის ელექტრული ძალის სიდიდეს, რომელსაც მივყავართ მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტების მნიშვნელობებისა და, ასევე, დამუხტვის დროის გაზრდის მნიშვნელობების შევიწროებამდე.

ამრიგად, ადგეზიის ძალის ალბათური მახასიათებელი არის ძირითადი მიზეზი მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტების მნიშვნელობების გაზრდისა, და შესაბამისად, ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების ნაკადის მარაოსებრი გაშლისა. მნიშვნელობების ასეთი გაზრდა დამახასიათებელია თვით ნაწილაკების დამუხტვისა და მათი მოწყვეტის ფიზიკური ბუნებისათვის.

ეს მოვლენა დადასტურებულია ელექტროსეპარაციის პრაქტიკაში, როდესაც ნაწილაკების ახლო მახასიათებლებშიც კი (ზომები, ფორმა და სიმკვრივე) შეინიშნება ნაწილაკთა ნაკადის მარაო. ეს შესამჩნევია როგორც დოლურ, ისე დახრილ-ფირფიტოვან სეპარატორებში, რომელთა განცალკევების პროცესი ეფუძნება ნაწილაკების ელექტროდთან კონტაქტს.

ამრიგად, ნაწილაკების მოწყვეტის დიაგრამა (ნახ.26) საშუალებას გვაძლევს ავხსნათ ნაწილაკების ქცევა და მახასიათებლები, რომლებიც იქმნება ნაწილაკების მოწყვეტის პროცესში და ჩამოვაყალიბოთ საერთო რეკომენდაციები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ნაწილაკების ელექტროსეპარაციის პროცესის გაუმჯობესებას.

### III თავის დასკვნები

ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკთა დამუხტვისა და ელექტროდიდან მათი მოწყვეტის ალბათობაზე ტექნოლოგიური და კონსტრუქციული ფაქტორების გავლენის ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა საშუალება მოგვცა გაგვეკეთებინა შემდეგი დასკვნები:

1. ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა განისაზღვრება ნაწილაკის ელექტროდთან ურთიერთქმედების ადგეზიის ძალის სტატისტიკური ხასიათით და პრაქტიკულად ელექტროსეპარატორთა ელექტროდების უმრავლესი მასალისათვის მისი მნიშვნელობები

შეადგენს 100%-ზე ნაკლებს, რაც ელექტროსეპარატორებში მინერალების არადამაკმაყოფილებელი გაყოფის ერთ-ერთი მიზეზია.

2. გამოსაკვლევი ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის გაზრდისათვის აუცილებელია ნაწილაკების გაყოფა მოვახდინოთ 80-100°C-ის ტემპერატურისა და 60-70 %-ზე ნაკლები ჰაერის ტენიანობის დროს. ამავე დროს მოწყვეტის ალბათობის გაზრდა შესაძლებელია ნაწილაკების რეაგენტული დამუშავებითაც.
3. ნაწილაკთა ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის ფართო დიაპაზონში რეგულირება შესაძლებელია განვახორციელოთ ელექტრული ველის დამაბულობის ცვლილების გზით.
4. დამმუხტავი ელექტროდის ვიბრაციის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს, ავამაღლოთ ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა.
5. ელექტროსეპარატორის დამმუხტავი ელექტროდები მიზანშეწონილია დამზადდეს ნახშირბადის შემცველი მასალებისაგან.
6. ნაწილაკთა მოწყვეტის ალბათობის დიაგრამის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს, განვსაზღვროთ ელექტროსეპარატორის ელექტრულ ველში ნაწილაკთა ქცევა. (მაგალითად, ნაწილაკთა მოძრაობის მარაოსებრი ნაკადის წარმოშობა), შევიმუშაოთ ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების გაყოფის პროცესის გაუმჯობესების რეკომენდაციები:
  - ელექტრული ველის დამაბულობის გაზრდით გავზარდოთ ნაწილაკთა მოწყვეტის ალბათობა და შევამციროთ მათი მნიშვნელობების გაბნევა.
  - სეპარატორის ელექტრულ ველში ნაწილაკთა ყოფნის ხანგრძლივობის გაზრდით გავზარდოთ ნაწილაკთა მოწყვეტის ალბათობა.

## IV თავი

### ინდუქციური დამუხტვის პროცესის პარამეტრების ექსპერიმენტული გამოკვლევა

#### 4.1 ნაწილაკების დამუხტვის კინეტიკა

##### 4.1.1. ნაწილაკების მოწყვეტის დროისა და მუხტის მინიმალური და საშუალო მნიშვნელობები

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის დროზე დამოკიდებულების უმნიშვნელოვანესი პარამეტრია ნაწილაკების მოწყვეტის მუხტისა და დროის ზღურბლური მნიშვნელობები. ისინი განსაზღვრავენ მათი მნიშვნელობების იმ მინიმალურ დონეს, რომლის ქვემოთაც მუხტისა და მოწყვეტის დროის მნიშვნელობების მიღება შეუძლებელია. ფაქტობრივად ეს არის მათი მნიშვნელობების ქვედა ზღვარი.

მუხტების მინიმალური მნიშვნელობა განისაზღვრება შემდეგი პირობით:

$$mg = F_{ელ}, \quad (24)$$

სადაც ელექტრული ძალა განისაზღვრება ფორმულით:

$$F_{ელ} = \pi \cdot a \cdot b \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \left( \frac{0.5(\epsilon_1 - 1)^2 (1 - I)}{K^2} + \frac{dc \cdot \epsilon_1^2 - (dc - 1) \cdot \epsilon_1 + (1 - I)}{K^2} \cdot \beta + \right. \\ \left. + \frac{0.5 \cdot dc^2 (\epsilon_1^2 - 1) + dc - 0.5I}{K^2} \cdot \beta^2 \right) \quad (25)$$

$$K = 1 + (\epsilon_1 - 1) d_a, \quad \beta = \frac{q_{თავ}}{\pi b c \epsilon_0 E}, \quad I = \frac{1}{\pi b c} \int_{s_1} \cos^3 \theta d_s,$$

$$F_g = mg = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c \cdot g \cdot \gamma_{ნაწ}$$

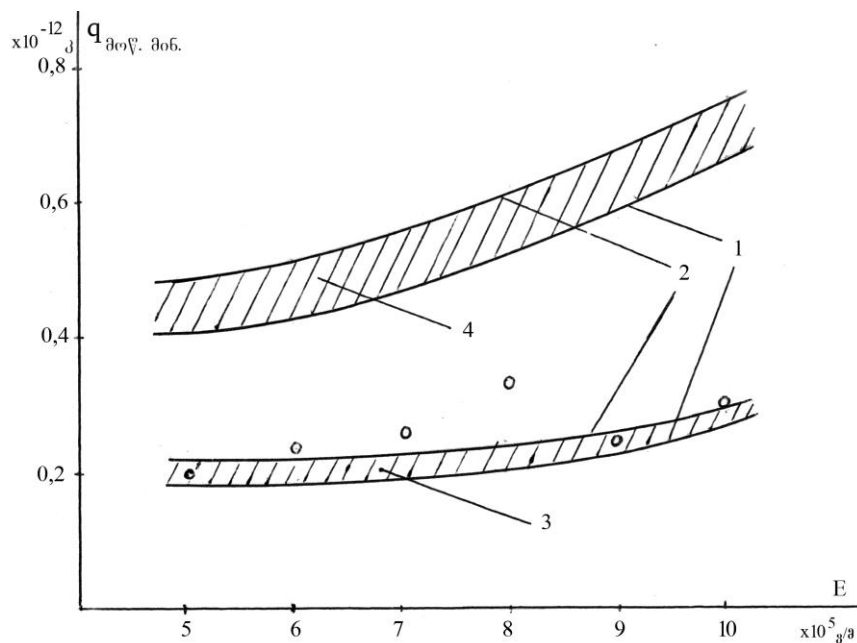
ხოლო მისი შესაბამისი დამუხტვის დრო შეიძლება განისაზღვროს ნაწილაკის დამუხტვის კინეტიკის კანონზომიერებიდან.

$$q = q_{ზღვრ.} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

მოწყვეტის დიაგრამიდან (ნახ. 26) გამომდინარეობს, რომ მუხტების მინიმალური მნიშვნელობები დამოკიდებულია მხოლოდ ელექტრული ველის დაძაბულობაზე და ნაწილაკის ფიზიკურ პარამეტრებზე (სიმკვრივე, ნაწილაკის ფორმა, დიელექტრიკული შეღწევადობა და ზომები). ეს

მტკიცდება ექსპერიმენტული მონაცემებით. ნახ. 27-ზე მოყვანილია მინიმალური მუხტების საანგარიშო (24)-ით, (მთლიანი ხაზები) და ექსპერიმენტული (წერტილები) მნიშვნელობების თანაფარდობა.

თეორიული მნიშვნელობა მოყვანილია ნაწილაკის ელექტროდზე მდებარეობის ორი უკიდურესი პოზიციის დროს. რადგან ჩვენთვის უცნობი იყო რუტილის კონკრეტული დიელექტრიკული შეღწევადობის მნიშვნელობა, ამიტომ თეორიული გაანგარიშების დროს ავიღეთ მისი უდიდესი და უმცირესი მნიშვნელობები, რომლებიც სხვადასხვა საბადოებისათვის მოყვანილია ცხრილებში.



ა

რუტილი  $a_{ელ} = 106 \text{ მკმ}$ ,  $b_{ელ} = 72 \text{ მკმ}$ ,  $c_{ელ} = 54 \text{ მკმ}$ ,  $a_{ეკ.სგ} = 74 \text{ მკმ}$ ,

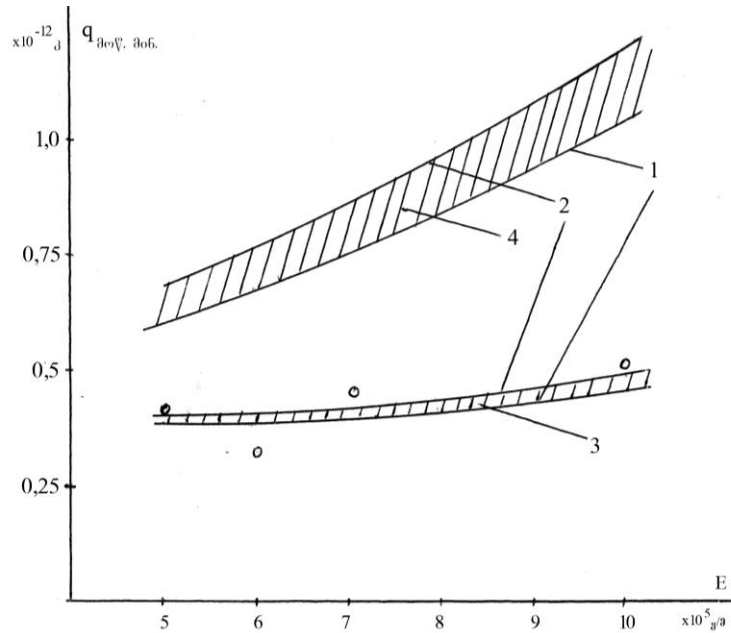
$\gamma_{ნაწ} = 4,25 \cdot 10^3 \text{ კგ/მ}^3$ , 1.  $\epsilon_1 = 31$ , 2.  $\epsilon_2 = 173$

0 - ექსპერიმენტალური წერტილები

3 - ნაწილაკი ორიენტირებულია უმცირესი ნახევარღერძით ველის გასწვრივ

4 - ნაწილაკი ორიენტირებულია უდიდესი ნახევარღერძით ველის გასწვრივ





ბ

რუტილი  $a_{ელ} = 138\text{მკმ}$ ,  $b_{ელ} = 102\text{მკმ}$ ,  $c_{ელ} = 66\text{მკმ}$ ,  $a_{კვ.სფ} = 98\text{მკმ}$ ,  
 $\gamma_{ნაწ} = 4,25 \cdot 10^3\text{კგ/მ}^3$ ,  $1 - \epsilon_1 = 3$ ,  $2 - \epsilon_2 = 173$

0 - ექსპერიმენტალური წერტილები

3 - ნაწილაკი ორიენტირებულია უმცირესი ნახევარღერძით ველის გასწვრივ

4 - ნაწილაკი ორიენტირებულია უდიდესი ნახევარღერძით ველის გასწვრივ

**ნახ. 27. რუტილის ნაწილაკების მოწყვეტის მინიმალური მუხტის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე**

მოწყვეტილ ნაწილაკთა მუხტებისა და მოწყვეტის დროის მინიმალური მნიშვნელობები გარკვეული დეტერმინირებული მნიშვნელობებია. ეს გამომდინარეობს (24) პირობიდან.

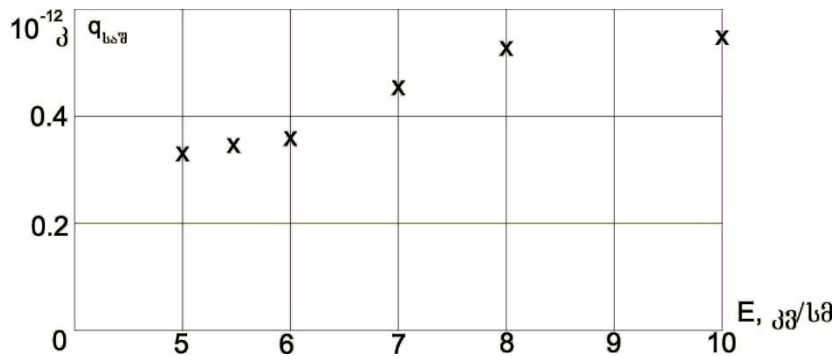
ზოგადად ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკის მუხტი და მოწყვეტის დრო განისაზღვრება მასზე მოქმედ ძალთა ბალანსის პირობიდან

$$F_{ელ} - mg - F_{ადგ} = 0 \quad (26)$$

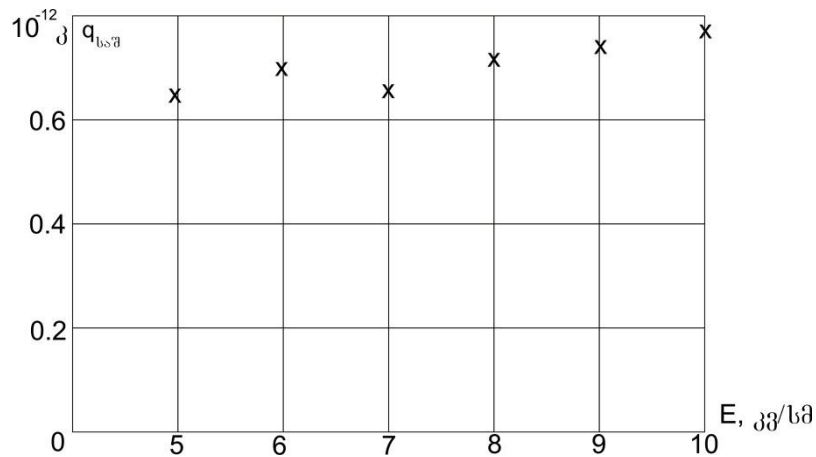
ეს ილუსტრირებულია ნახ. 26-ზე მოცემული დიაგრამით.

რაკილა ადგეზიის ძალა  $F_{ადგ}$  განისაზღვრება ალბათური დამოკიდებულებით  $\Phi(F_{ადგ})$ , ამიტომაც ნაწილაკების მუხტებიც და მოწყვეტის დროც, ასევე, აღიწერება ალბათური მახასიათებლებით და,

შესაბამისად, შესაძლებელია ისინიც განსაზღვრულ იქნას საშუალო მნიშვნელობებითა და საშუალო კვადრატული გადახრით (ნახ. 28, 29).



ა)  $a_{სგ} = 74 მკმ$ ,  $a_{საშ} = 106 მკმ$ ,  $b_{საშ} = 72 მკმ$ ,  $c_{საშ} = 54 მკმ$ ,



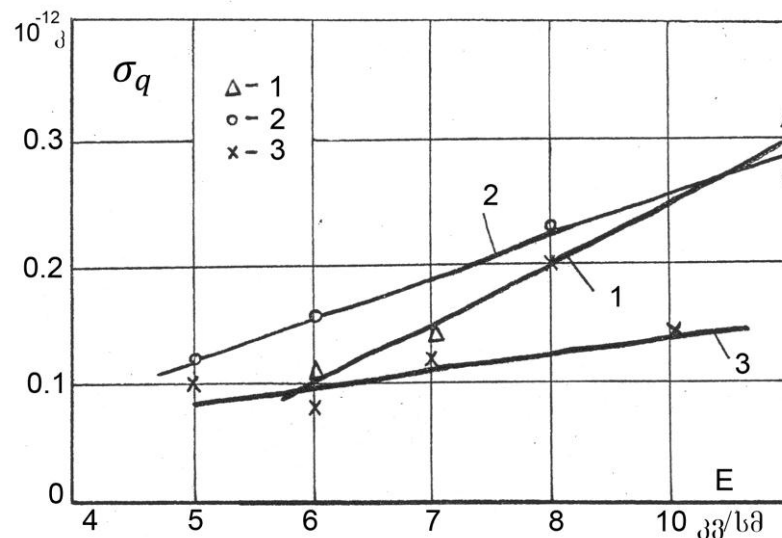
ბ)  $a_{სგ} = 86 მკმ$ ,  $a_{საშ} = 119 მკმ$ ,  $b_{საშ} = 95 მკმ$ ,  $c_{საშ} = 56 მკმ$ ,

**ნახ. 28. ქრომირებული ელექტროდი,  $T=150^{\circ}C$   
რუტილის მოწყვეტილი ნაწილაკების საშუალო მუხტის დამოკიდებულება  
ელექტრული ველის დამაბულობაზე**

განვიხილოთ მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტები. ისინი იცვლებიან თავიანთი მინიმალური მნიშვნელობიდან, რომელიც განისაზღვრება (24) პირობიდან, თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობამდე. ეს მაქსიმალური მნიშვნელობა შეესაბამება მათ ზღვრულ მნიშვნელობას, რომლის დროსაც  $F_{აღ}(\Phi = 1) \geq F_{ელ}(q/q_{ზღვრ} = 1)$  ან ის ღებულობს მნიშვნელობას, როდესაც  $F_{აღ}(\Phi = 1) < F_{ელ}(q/q_{ზღვრ} = 1)$ .

ნაწილაკი ელექტროდზე იმყოფება საკმარისად დიდი დროის განმავლობაში, ამიტომ ელექტრული ველის დამაბულობის ცვლილებისას იმ მნიშვნელობამდე, რომელიც შეესაბამება მის ზღვრულ მნიშვნელობას ( $E_{ზღვრ}$ ), შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ ნაწილაკი იმუხტება თავის ზღვრულ მნიშვნელობამდე. დამაბულობის დიდი მნიშვნელობების დროს ელექტრული ძალა აღწევს იმ მნიშვნელობებს, რომლებიც საკმარისია მათი ელექტროდიდან მოწყვეტისათვის და მათი შესაბამისი ელექტრული მუხტი უკვე ნაკლებია მათ ზღვრულ მნიშვნელობებზე. ამიტომ გაზომილი მუხტების ეს ექსპერიმენტული მნიშვნელობები არ დევს  $q_{ზღვრ}(E)$  დამოკიდებულების წრფის ზემოთ.

ელექტრული ველის დამაბულობის ზრდისას ერთდროულად იზრდება მუხტების მაქსიმალური და მცირდება მინიმალური მნიშვნელობები, შესაბამისად ამისა, იზრდება მუხტების საშუალო მნიშვნელობები. ამის გამო E-ს ზრდისას იზრდება მუხტების საშუალო კვადრატული გადახრაც (ნახ. 29).



$T = 150^{\circ}\text{C};$

1-  $a_{კვ.სფ} = 98\text{მკმ}$ , 2-  $a_{კვ.სფ} = 86\text{მკმ}$ , 3-  $a_{კვ.სფ} = 74\text{მკმ}$

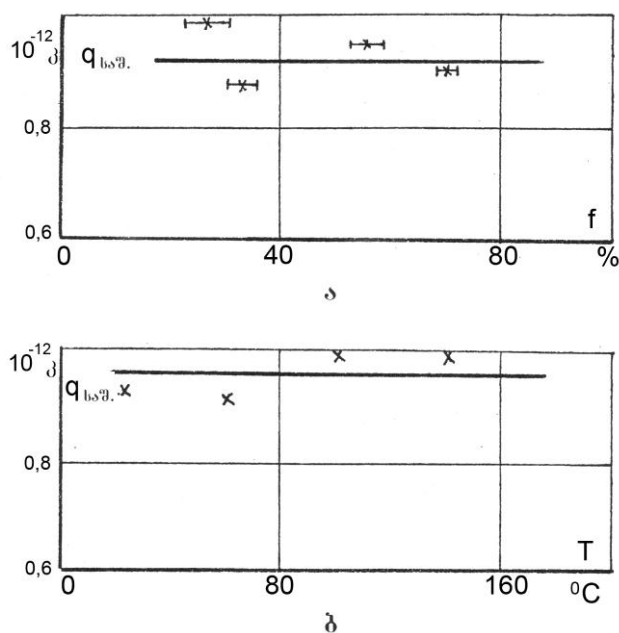
ნახ. 29 რუტილის ნაწილაკების ქრომირებული ელექტროდიდან მოწყვეტის მუხტის საშუალოკვადრატული გადახრის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე.

ამრიგად, ჩატარებული ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზი მოწყვეტის დიაგრამის გათვალისწინებით მიუთითებს:

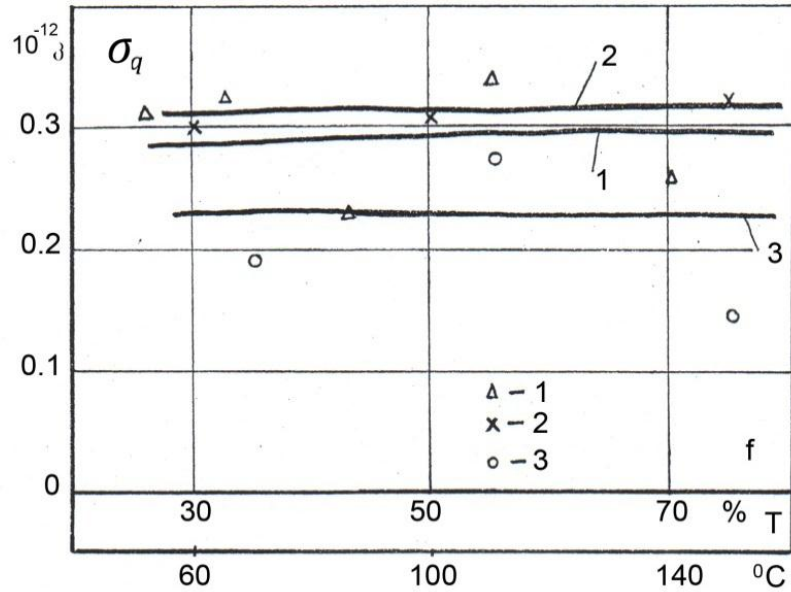
ტიტანის შემცველი ნაწილაკებისათვის ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტები ძირითადად დამოკიდებულია ელექტრული ველის დამაბულობის სიდიდეზე, ისე რომ, E-ის გაზრდისას იზრდება მუხტების საშუალო მნიშვნელობები, რაც საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ ელექტრულ ველში ნაწილაკების გაყოფის პროცესის ინტენსიფიკაცია.

ელექტრული ველის გაზრდისას იზრდება მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტების მნიშვნელობათა გაბნევა, რომელსაც შეუძლია გამოიწვიოს ნაწილაკების მოძრაობის ტრაექტორიის სელექციის დარღვევა და, შესაბამისად, სეპარატორის ელექტრულ ველში ნაწილაკების გაყოფის გაუარესება (ნახ. 29).

ელექტრული ძალა განისაზღვრება მხოლოდ  $q/q_{საშ}$  სიდიდით და, ამგვარად, ის არ არის დამოკიდებული ტემპერატურასა და გარემოს ტენიანობაზე. ამიტომაც მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტების ცვლილება უნდა განისაზღვროდეს მხოლოდ ადგეზიის ძალის ცვლილებით, რომელიც, თავის მხრივ, დამოკიდებულია f-ისა და T-ის ცვლილებაზე.



ნახ. 30. რუტილის ნაწილაკების მოწყვეტის საშუალო მუხტის დამოკიდებულება გარემოს სინესტზე (ა) და ქრომირებული ელექტროდის ტემპერატურაზე, როდესაც  $f = 20\%$ ,  $E = \frac{10^{33}}{სმ}$ ,  $a = 98$  მკმ (ბ).

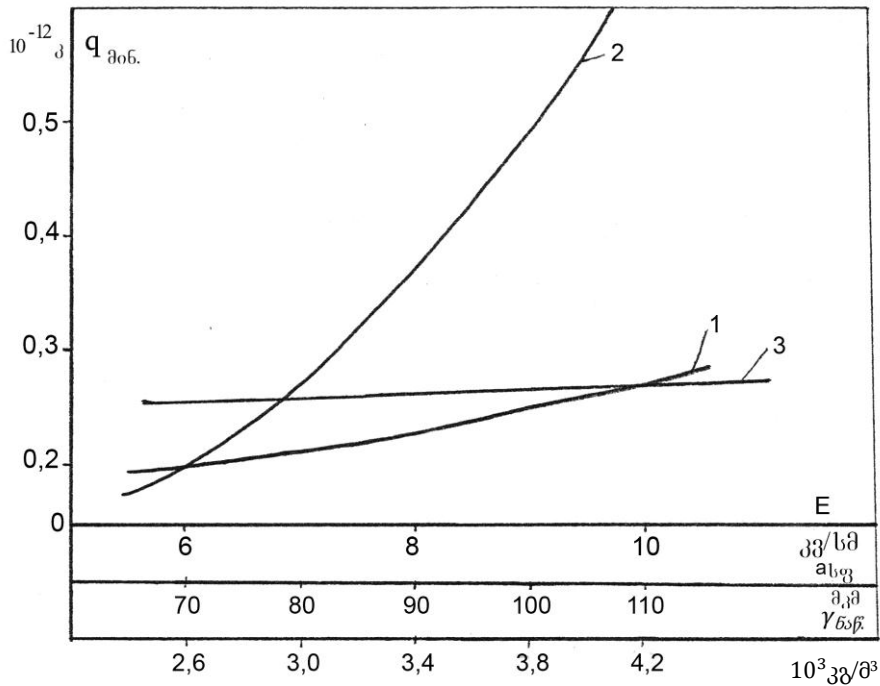


1.  $\sigma_q = f(f)$ ,  $E = 10 \text{ კვ/სმ}$ ,
  2.  $\sigma_q = f(T)$ ,  $E = 10 \text{ კვ/სმ}$ ,
  3.  $\sigma_q = f(T)$ ,  $E = 7 \text{ კვ/სმ}$ ,
- $a_{კვ.სმ} = 98 \text{ მკმ}$

**ნახ. 31. რუტილის ნაწილაკების მოწყვეტის მუხტის საშუალო კვადრატული გადახრის დამოკიდებულება გარემოს ნესტიანობაზე (1) და ქრომირებული ელექტროდის ტემპერატურაზე (2,3)**

მოწყვეტის დიაგრამის (ნახ. 26) ანალიზიდან და ექსპერიმენტული მონაცემებიდან (ნახ. 30) ჩანს, რომ ტემპერატურისა და გარემოს ნესტიანობის ცვლილება გავლენას ვერ ახდენს მოწყვეტილი ნაწილაკების საშუალო მუხტის მნიშვნელობაზე.

ამრიგად, ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტთა საშუალო მნიშვნელობები განისაზღვრება მხოლოდ ნაწილაკების მახასიათებლებით (ზომა, ფორმა და სიმკვრივე) და ელექტრული ველის დამაბულობით. ის შეიძლება გავიანგარიშოთ (24) გამოსახულებით მოწყვეტის დიაგრამის საფუძველზე. ნახ. 32-ზე ნაჩვენებია მინიმალური მუხტების მნიშვნელობათა ასეთი გაანგარიშებები.



$$\beta = 1; \quad \gamma = 0,7; \quad \gamma_{\text{ნაწ.}} = 4,25 \cdot 10^3 \text{ კვ/მ}^3$$

$$1 - q_{\text{მინ}} = f(E), \quad a_{\text{სგ}} = 70,5 \text{ მკმ}$$

$$2 - q_{\text{მინ}} = f(a_{\text{სგ}}), \quad E = 10 \text{ კვ/სმ}$$

$$3 - q_{\text{მინ}} = f(\gamma_{\text{ნაწ.}}), \quad E = 10 \text{ კვ/სმ}$$

ნახ. 32. ნაწილაკების მინიმალური მოწყვეტის მუხტის დამოკიდებულებები, როდესაც ისინი ორიენტირებული არიან თავისი მცირე ნახევარღერძით ელექტრული ველის ვექტორის გასწვრივ

#### 4.1.2. ნაწილაკების მოწყვეტის დროის საშუალო მნიშვნელობები

ნაწილაკთა მოწყვეტის დრო უფრო მეტად არის დამოკიდებული ტექნოლოგიური ფაქტორების ზემოქმედებაზე (ტემპერატურა, გარემოს ტენიანობა), ვიდრე მუხტი. ეს უკავშირდება ნაწილაკების გამტარობის დამოკიდებულებას ტემპერატურასა და გარემოს ტენიანობაზე.

ცნობილია, რომ ტენიანობის გაზრდით იცვლება (იზრდება) ნაწილაკების გამტარუნარიანობა, ამიტომ  $\tau$ -ს მნიშვნელობები მცირდება და უნდა შემცირდეს ნაწილაკების მოწყვეტის დროც. თუმცაღა მოწყვეტის დროის ცვლილების ხარისხი  $\tau_{\text{მოწყ.მინ}}$  არის მცირე, რადგანაც ნაწილაკთა გამტარობის ცვლილება ტენიანობის ცვლილებისას უნდა იყოს

მნიშვნელოვანი და [2]-ის მონაცემებით შეიძლება მიაღწიოს რამდენიმე რიგს.

ნაწილაკების მოწყვეტის დროის საშუალო მნიშვნელობების ტემპერატურაზე დამოკიდებულებას აქვს უფრო რთული სახე. ის განისაზღვრება გარემოს ტენიანობით. ტემპერატურის გაზრდისას მიმდინარეობს ნაწილაკების გაშრობა, გამტარუნარიანობის შემცირება, და შესაბამისად, მოწყვეტის დროის გადიდება. ტემპერატურის შემდგომი ზრდა იწვევს ნაწილაკების გამტარობის ცვლილებას. ცნობილია, რომ ნახევარგამტარული ნაწილაკებისათვის ტემპერატურის ზრდა იწვევს გამტარუნარიანობის ზრდას, რასაც მოჰყვება ნაწილაკების მოწყვეტის დროის საშუალო მნიშვნელობის შემცირება. ზუსტად ეს მოვლენას შეიმჩნევა ჩვენს ექსპერიმენტებში. ამასთან ერთად, 100°C-ზე ზევით ტემპერატურის აწევა უკვე აღარ იწვევს მოწყვეტის დროის ცვლილებას. ამიტომ, ამ თვალსაზრისით ტიტანის შემცველი მინერალების გახურება მიზანშეწონილია 80-100°C-ის ფარგლებში. იგივე მნიშვნელობები გვაქვს ოპტიმალური ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის გათვალისწინებით (თავი 3).

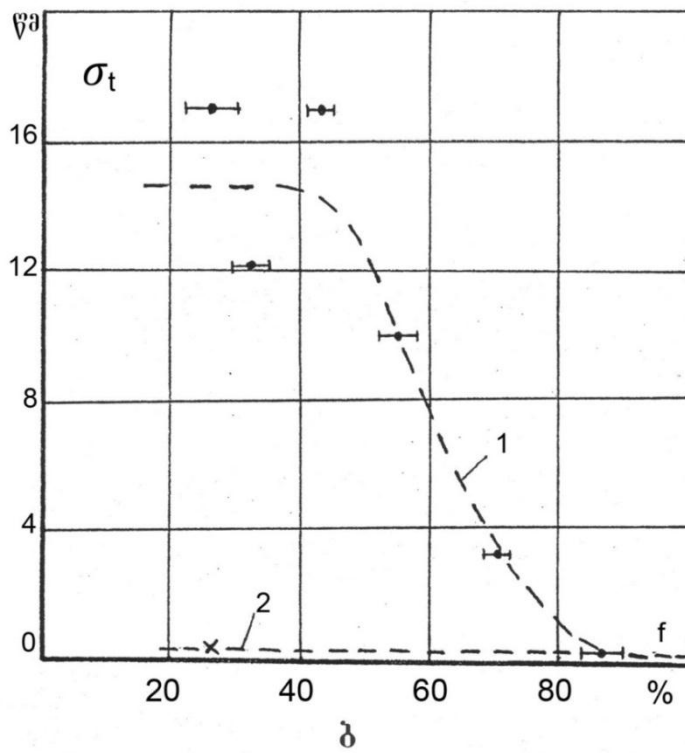
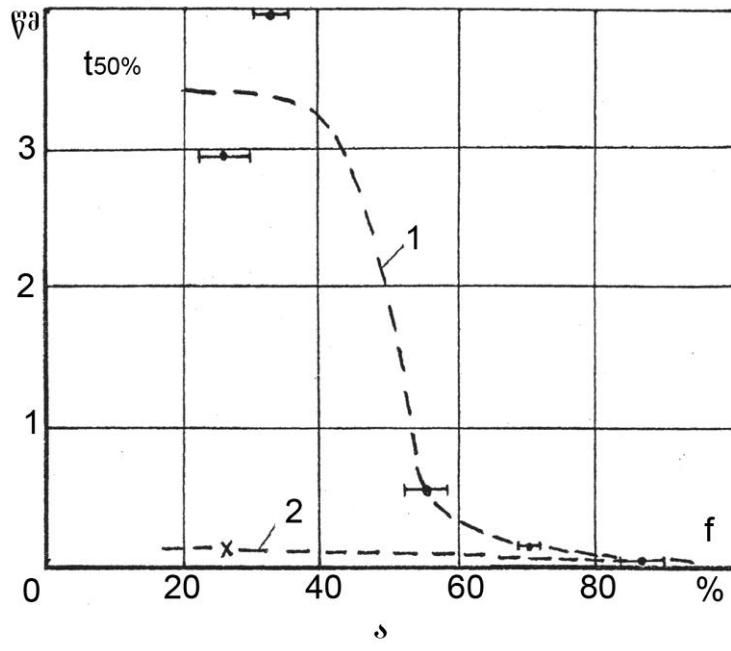
ზემოთ აღნიშნული იყო, რომ მოწყვეტის დროის ცვლილება არ შეესაბამება ნაწილაკების გამტარობის ცვლილებას (და, შესაბამისად, დამუხტვის დროის მუდმივას). გარემოს ტენიანობისა და ტემპერატურის ასე სუსტი გავლენა ნაწილაკების გამტარობაზე აიხსნება შემდეგნაირად: ნაწილაკების დამუხტვის დროის მუდმივა განისაზღვრება თვით ამ ნაწილაკების გამტარუნარიანობით (ძირითადად ზედაპირული გამტარობით) და ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის საკონტაქტო გამტარობით. ტენიანობისა და ტემპერატურის ნაჩვენებ დიაპაზონში ცვლილება იწვევს დასამუხტავი ნაწილაკების ზედაპირული გამტარობის ცვლილებას, მაგრამ პრაქტიკულად გავლენას ვერ ახდენს ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებულ გამტარობაზე.

ნაწილაკთა ელექტროდიდან მოწყვეტის დრო, ისე როგორც მოწყვეტის მუხტი, წარმოადგენს ალბათურ სიდიდეს, რომელიც განისაზღვრება ძალთა ბალანსითა (26) და დამუხტვის კინეტიკის გამოსახულებით (25). ამ მახასიათებლებისათვის მისი საშუალო მნიშვნელობები  $t_{საშ}$  და ყველაზე ალბათური მნიშვნელობები  $t_{50\%}$  ერთმანეთისგან განსხვავებულია. შემდგომი ანალიზისათვის გამოყენებული იყო მისი ყველაზე ალბათური  $t_{50\%}$  მნიშვნელობები და საშუალო კვადრატული გადახრა.

ზემოთ აღნიშნული იყო, რომ მოწყვეტილი მუხტების საშუალო მნიშვნელობები, გარემოს ტენიანობისა და ტემპერატურის ზრდის მიხედვით, პრაქტიკულად არ იცვლებოდა. ამიტომ ამ პირობებში, როგორც მოწყვეტის დროის მინიმალური მნიშვნელობებისათვის გვქონდა, ასევე გვექნება  $t_{50\%} = T \cdot \text{const}$ , ე.ი. მოწყვეტის დრო დაკავშირებულია მხოლოდ ნაწილაკის დამუხტვის დროის მუდმივას ცვლილებასთან.

გარემოს ტენიანობის ზრდის პირობებში სიდიდე  $t_{50\%}$  მცირდება (ნახ.33,ა). ეს დაკავშირებულია ნაწილაკის ეკვივალენტური გამტარობის ცვლილებასთან. მართლაც, ტენიანობის გაზრდის დროს მცირდება ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობა და მასთან ერთად იცვლება ნაწილაკის ზედაპირული გამტარობა. ამიტომ ტენიანობის დიდ მნიშვნელობებს შეესაბამება მოწყვეტის დროის მცირე მნიშვნელობები. ამავე მიზეზით არის განპირობებული მოწყვეტის დროის საშუალო კვადრატული გადახრის მნიშვნელობების შემცირება, რაც ილუსტრირებულია ნახ.33,ბ-ზე მოყვანილი ექსპერიმენტული მონაცემებით. მიღებული შედეგი სრულად აიხსნება ნახ. 26-ზე მოყვანილ მოწყვეტის დიაგრამაზე.



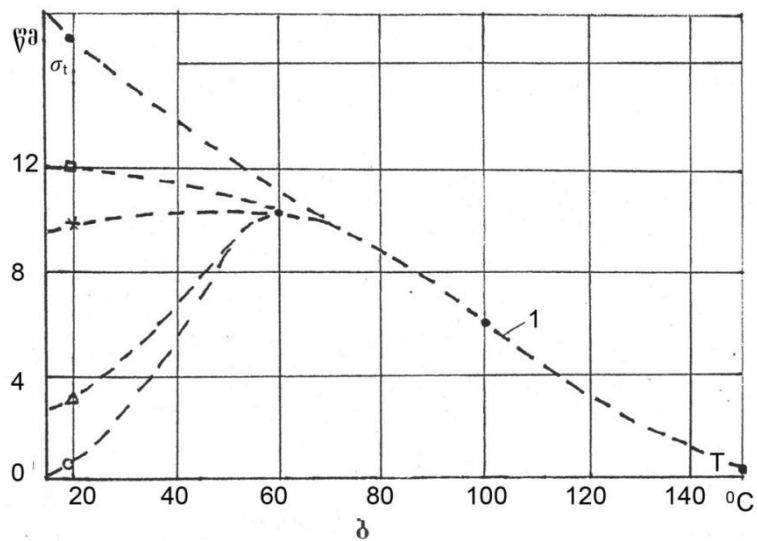
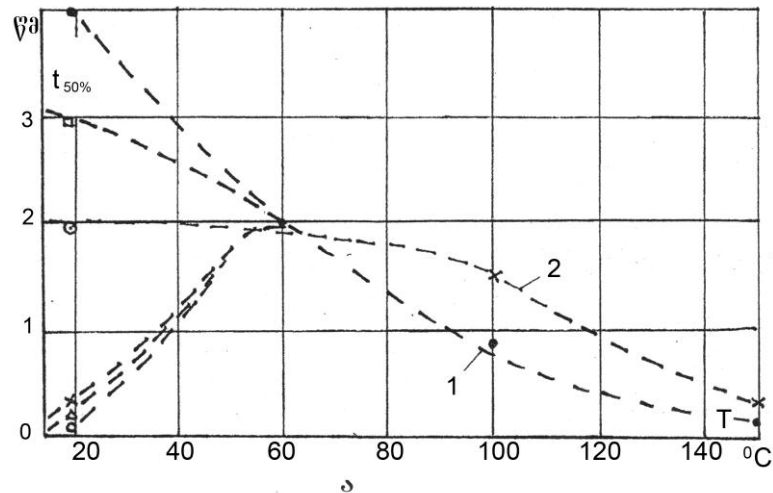


$E = 10$  კვ/სმ,  $a_{კვ/სმ} = 98$  მკმ  
 1 -  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ; 2 -  $T = 150^{\circ}\text{C}$

ნახ. 33. რუტილის ნაწილაკების ქრომირებული ელექტროდიდან მოწყვეტის  
 ორმოცდაათპროცენტიანი დროის (ა) და მისი საშუალო კვადრატული  
 გადახრის (ბ), დამოკიდებულება გარემოს სინესტეზე

გარემოს ტემპერატურის ზრდით ექსპერიმენტულად ჯერ შეიმჩნევა  
 ნაწილაკების მოწყვეტის დროის ზრდა, ხოლო შემდეგ- შემცირება (ნახ.34, ა)

და, ასევე იცვლება მისი საშუალო კვადრატული გადახრაც (ნახ.34, ბ).  
 ექსპერიმენტული დამოკიდებულების ასეთი ხასიათი შეუძლებელია აიხსნას  
 მხოლოდ ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინააღობისა  
 და ნაწილაკის ზედაპირული გამტარობის ცვლილებით.



$$a_{\text{კვ.სგ}} = 98 \cdot 10^{-6} \text{ მკმ}$$

- |                             |                                   |                             |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1. $E = 10 \text{ კვ/სმ}$   | 2. $E = 7 \text{ კვ/სმ}$          | ○ $-T = 20^\circ\text{C}$ , |
| $f = (83 - 89)\%$ ,         | $\Delta - T = 20^\circ\text{C}$ , | $f = (68 - 71)\%$ ,         |
| * $-T = 20^\circ\text{C}$ , | $f = (52 - 58)\%$ ,               | ⊙ $-T = 20^\circ\text{C}$   |
| $f = (36 - 50)\%$ ,         | □ $-T = 20^\circ\text{C}$ ,       | $f = 43\%$ ,                |
| ● $-T = 20^\circ\text{C}$ , | $f = (30 - 35)\%$                 |                             |

ნახ. 34. რუტილის ნაწილების ქრომირებული ელექტროდიდან მოწყვეტის  
 ორმოცდაათპროცენტიანი დროის (ა) და მისი საშუალო კვადრატული გადახრის  
 (ბ) დამოკიდებულება გახურების ტემპერატურაზე

ტემპერატურის გავლენა ნაწილაკის გამტარობაზე ხდება ორი სხვადასხვა გზით. ტენიანობის დიდი მნიშვნელობების დროს ნაწილაკების გახურება იწვევს ტენიანობის შემცირებას, რასაც მივყავართ ნაწილაკის მოწყვეტის დროის გაზრდამდე. ტემპერატურის 80-100°C-ის ფარგლებში თითქმის მთლიანად ორთქლდება არსებული ტენი. [56]-ში ნაჩვენებია, რომ, მართლაც, ნაწილაკების 100°C-მდე გახურებისას ნაწილაკების ზედაპირზე არსებული ტენი მთლიანად ქრება.

ამასთან ერთად, [2]-ში ნაჩვენებია, რომ ტემპერატურის გადიდებისას მინერალური ნაწილაკების გამტარობაც იზრდება. დიდი ტენიანობის ვითარებაში(ე.ი. დაბალი ტემპერატურის დროს) ეს ცვლილება ნაწილაკზე აისახება უმნიშვნელოდ, ვიდრე ტენის აორთქლების გავლენა ნაწილაკის გამტარობაზე. 80-100°C-ის ტემპერატურიდან კი ტენის გავლენა ნაწილაკის გამტარობაზე უკვე მინიმალურია და ამიტომაც ტემპერატურის შემდგომი ზრდისას ნაწილაკის გამტარობაზე უკვე გავლენას ახდენს თვით ტემპერატურა. ამ დროს ნაწილაკის გამტარობა იზრდება, რასაც მოსდევს ნაწილაკის მოწყვეტის დროის შემცირება.

ამრიგად, შეიძლება გავაკეთოთ დასკვნა: ნაწილაკთა გაყოფა მიზანშეწონილია შედარებით მცირე ფარდობითი ტენიანობის დროს. ამის მიღწევის ერთ-ერთი გზაა სეპარაციის პროცესის 80-100°C-ის დიაპაზონში წარმართვა ანუ იმ ტემპერატურაზე, რომლის დროსაც მხოლოდ ზედაპირული ტენი ორთქლდება.

მოწყვეტის დროის ასეთი ცვლილება გარემოს ტენიანობისა და ტემპერატურის მიმართ სრულად კორელირებს ნაწილაკების დამმუხტავი ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის მონაცემებთან (იხ. თავი 3).

ამ დასკვნას ადასტურებს ტიტან-ციროკონიუმის კონცენტრატების პრაქტიკული სეპარაციის რეალიზაციის მონაცემები [52], სადაც სეპარაციას საუკეთესო მაჩვენებლები აქვს 80-100°C-ის დიაპაზონში.

ნაწილაკების მოწყვეტის დროის საშუალო მნიშვნელობათა ექსპერიმენტული კვლევა ტემპერატურასა და ტენიანობაზე არ გვამღევენ

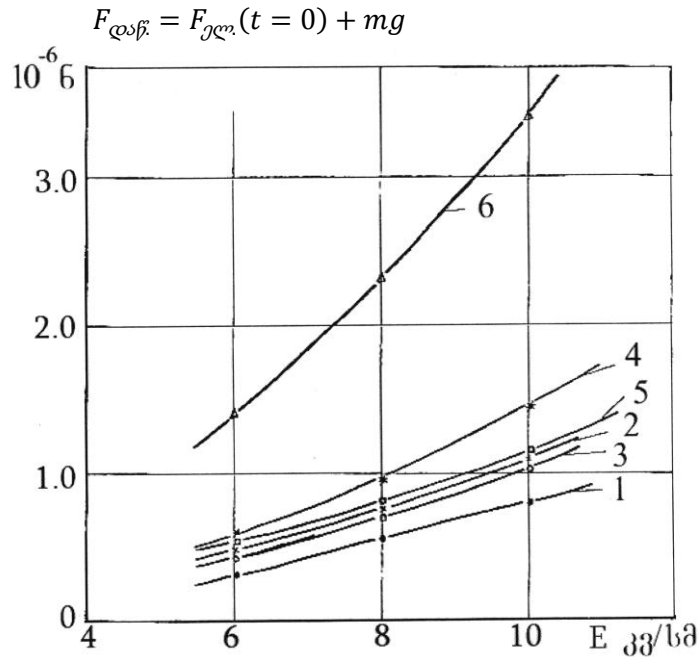
საშუალებას, რომ გავაკეთოთ ერთმნიშვნელოვანი დასკვნა, თუ რომელი მათგანი ასრულებს ძირითად როლს ნაწილაკის ეკვივალენტურ გამტარობაში - ზედაპირის თვისებები თუ ნაწილაკი-ელექტროდის კონტაქტის მდგომარეობა.

განვიხილოთ მოწყვეტის დროის  $t_{50\%}$  და მისი საშუალო კვადრატული მნიშვნელობების დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე.

მოწყვეტის დროზე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ელექტრული ველის დაძაბულობა. მას აქვს ზრდის უფრო ციცაბო ხასიათი, როდესაც დაძაბულობა  $E$  მცირდება, ვიდრე დამოკიდებულება  $q/q_{ზღვრ} = f(E)$ . ეს მოვლენა ადასტურებს ნაწილაკების დამუხტვის დროის მუდმივას ცვლილებას (და, შესაბამისად, ნაწილაკების ეკვივალენტური გამტარობის ცვლილებას) ელექტრული ველის  $E$  დაძაბულობისაგან. დაძაბულობის  $E$ -ს გაზრდისას დამუხტვის დროის მუდმივა  $\tau$ -ს სიდიდე მცირდება.

ერთადერთი მიზეზი დამუხტვის დროის მუდმივას ( $\tau$ )-ს ასეთი ცვლილებისა ელექტრული ველის დაძაბულობისაგან, შესაძლებელია, გამოწვეული იყოს ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობის ცვლილებით.

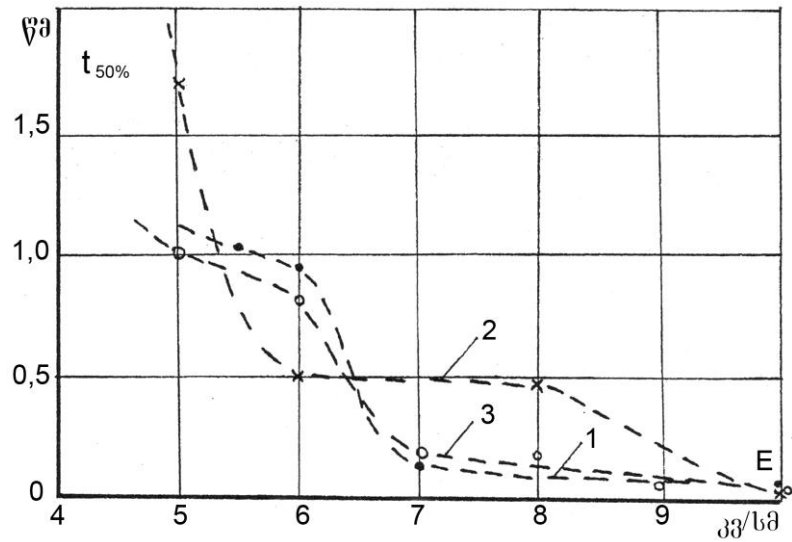
მართლაც, ელექტრული ველის დაძაბულობის ზრდისას იზრდება ის ძალა, რომელიც ნაწილაკს მიაკრავს ელექტროდს და რომელიც მოქმედებს მხოლოდ დამუხტვის საწყის მომენტში ( $t=0$ ), ანუ  $q/q_{ზღვრ}=0$ ). ეს ძალა შეიძლება გამოვიანგარიშოთ როგორც  $F_{დაწ} = F_{ელ}(t=0) + mg$ . ამ ძალის მნიშვნელობები სხვადასხვა ნაწილაკისათვის მოყვანილია ნახ.35-ზე. ცნობილია, რომ ნაწილაკზე მოქმედი კონტაქტური ძალების ზრდა იწვევს ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის ამ საკონტაქტო წინაღობის ცვლილებას. [55]-ში ნაჩვენებია, რომ ელექტრული კონტაქტი ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის წარმოიშობა მხოლოდ ნაწილაკზე მოქმედი დაწოლის ძალის მოქმედებისას, რომელიც ტოლია არანაკლებ  $1 \cdot 10^{-5}$  ნ-ისა. ჩვენს ექსპერიმენტებში ნაწილაკების დაწოლის ძალა  $F_{დაწ}$  შეადგენს  $(0,2 \div 4,0) \cdot 10^{-6}$  ნ, რაც არასაკმარისია ელექტრული კონტაქტის მისაღწევად.



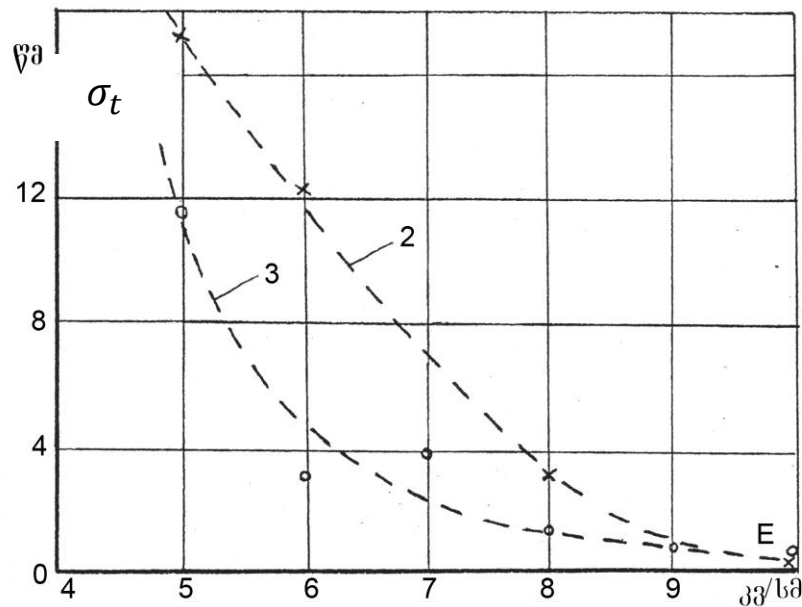
- - 1 - რუტილი,  $a_{კვ.სფ} = 74$  მკმ,  $\beta_{ნახ.ელ.} = 0,98$ ,  $\gamma_{ნახ.ელ.} = 0,67$
- × - 2 - რუტილი,  $a_{კვ.სფ} = 90$  მკმ,  $\beta_{ნახ.ელ.} = 0,98$ ,  $\gamma_{ნახ.ელ.} = 0,74$
- - 3 - რუტილი,  $a_{კვ.სფ} = 86$  მკმ,  $\beta_{ნახ.ელ.} = 0,94$ ,  $\gamma_{ნახ.ელ.} = 0,80$
- \* - 4 - რუტილი,  $a_{კვ.სფ} = 98$  მკმ,  $\beta_{ნახ.ელ.} = 0,96$ ,  $\gamma_{ნახ.ელ.} = 0,74$
- - 5 - რუტილი,  $a_{კვ.სფ} = 104$  მკმ,  $\beta_{ნახ.ელ.} = 0,81$ ,  $\gamma_{ნახ.ელ.} = 0,74$
- △ - 6 - ილმენიტი,  $a_{კვ.სფ} = 125$  მკმ,  $\beta_{ნახ.ელ.} = 0,73$ ,  $\gamma_{ნახ.ელ.} = 0,59$

**ნახ. 35. რუტილის ნაწილაკზე მოქმედი საწყისი დაწოლის ძალის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დაძაბულობაზე. ნაწილაკი ორიენტირებულია მცირე ნახევარღერძის ელექტრული ველის ვექტორის გასწვრივ**

დაძაბულობის  $E$ -ის ზრდისას  $t_{აინ}$ -ის დიდ მნიშვნელობათა არე, მოწყვეტის დიაგრამა 26-ის თანახმად, და დამოკიდებულება  $F_{ელ.}(q/q_{ზღვრ.})$ , გადინაცვლებს  $q/q_{ზღვრ.}$ -ის მცირე მნიშვნელობათა არეში და, შესაბამისად,  $t_{მოწყ}/\tau$  მცირე მნიშვნელობებისაკენ. შედეგად მოწყვეტის დროები (საშუალო დრო, საშუალო კვადრატული გადახრა) მცირდება, რაც ზუსტად დასტურდება ექსპერიმენტული მონაცემებით, რომლებიც მოყვანილია ნახ. 36-ზე.



ა



ბ

$$T = 150^{\circ}\text{C}$$

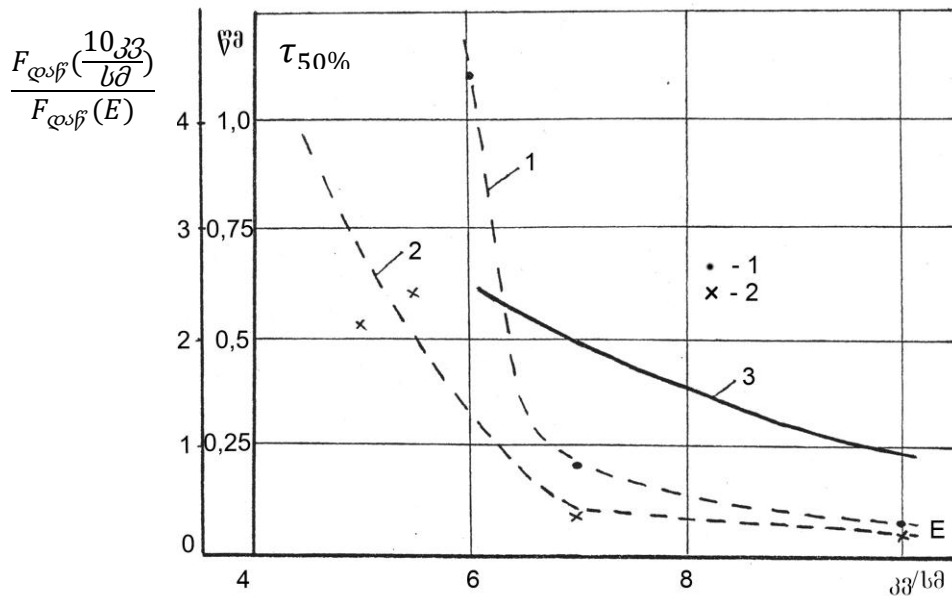
- - 1 -  $a_{\text{ek,sv}} = 98\text{მკმ}$ ,
- × - 2 -  $a_{\text{ek,sv}} = 85\text{მკმ}$
- - 3 -  $a_{\text{ek,sv}} = 75\text{მკმ}$

ნახ. 36. რუტილის ნაწილაკების ქრომირებული ელექტროდიდან მოწყვეტის 50%-იანი დროის (ა) და მისი საშუალოკვადრატული გადახრის (ბ) დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე

ნახ. 37-ზე ნაჩვენებია ნაწილაკის დამუხტვის დროის მუდმივას ეკვივალენტური მნიშვნელობების დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე. მოწყვეტის დროის მუდმივა  $\tau$  ველის დამაბულობის ზრდისას მცირდება. აქაც შეინიშნება ნაწილაკზე დამუხტვის დაწყების

მომენტში მასზე მოქმედი დაწოლის ძალის დამოკიდებულების კორელაცია დამუხტვის დროის მუდმივაზე (მრუდი 3). აქედან გამომდინარე, ერთადერთი, რაც ადასტურებს ამ ექსპერიმენტულ ფაქტს, არის ის, რომ ნაწილაკის ეკვივალენტურ გამტარობაზე დიდ ზეგავლენას ახდენს ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობა.

აუცილებელია აღინიშნოს ნახ. 37-ის მონაცემების განსაკუთრებულობა. დამუხტვის დროის მუდმივას  $\tau_{50\%}$ -ის აბსოლუტური მნიშვნელობები არსებითად უფრო მაღლა მდებარეობენ, ვიდრე  $\tau_{0.5}$ . გარდა ამისა,  $\tau(E)$ -ს და  $F_{დაწ}(E)$ -ს დამოკიდებულებათა განსხვავებები უფრო ძლიერია.



$$T_{საგ} = 150^{\circ}\text{C}$$

$$1 - a_{\text{ეკ.სგ}} = 98 \text{ მკმ}, \quad 2 - a_{\text{ეკ.სგ}} = 75 \text{ მკმ},$$

$$3 - \frac{F_{დაწ}(10\text{კვ/სმ})}{F_{დაწ}(E)}$$

**ნახ. 37. რუტილის ნაწილაკების ქრომირებული ელექტროდიდან მოწყვეტის დროის მუდმივას ორმოცდაათპროცენტიანი გადახრის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე**

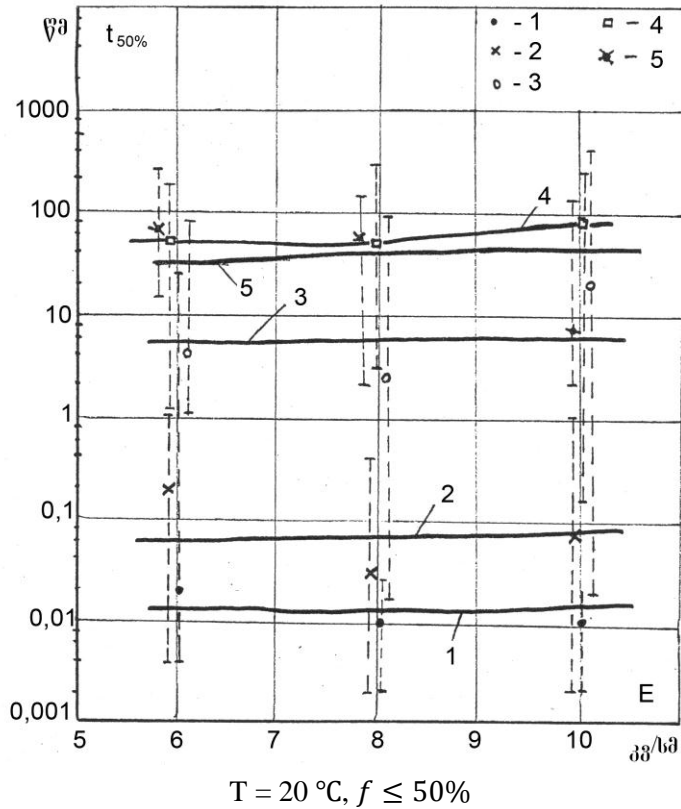
ზემო მოყვანილი ფაქტორები ადასტურებენ, რომ დამუხტვის პროცესის მიმდინარეობისას ნაწილაკი არ ინარჩუნებს მის საწყის ორიენტაციას. ის ნამდვილად იცვლება, რის გამოც იცვლება ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტური წინაღობაც. ამასთან ერთად, რაც უფრო

მეტია ნაწილაკის დამუხტვის დრო, მით უფრო ძლიერია განსხვავება მის საწყის ორიენტაციასა და მოწყვეტის დროს წარმოქმნილ ორიენტაციას შორის.

ამრიგად, მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტები და მოწყვეტის დროის ყველაზე ალბათური მნიშვნელობები ხასიათდებიან ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტით. ამ კონტაქტის საწყისი მნიშვნელობები განისაზღვრება ნაწილაკზე მოქმედი საწყისი დაწოლის ძალით, ანუ ელექტრული ველის დამაბულობის მნიშვნელობებით. დამუხტვის პროცესში ნაწილაკების საწყისი ორიენტაცია იცვლება. იცვლება ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობაც. ამის შედეგად ნაწილაკის დამუხტვის პროცესი „იწელება“. ეს მოვლენა აუცილებლად უნდა გავითვალისწინოთ ელექტროსეპარატორის ელექტრულ ველში ნაწილაკის ყოფნის ხანგრძლივობის შერჩევის დროს.

ნახ.38-ზე მოყვანილია ისეთი ნაწილაკების მოწყვეტის დროის დამოკიდებულებები, რომლებიც ხასიათდებიან მცირე ხვედრითი გამტარობებით (დისტენი, სტავროლიტი, კვარცი). ამ ნაწილაკებისათვის კონტაქტური წინაღობის „ნაწილაკი-ელექტროდის“ გავლენა უნდა იყოს უმნიშვნელო. ამასთანავე, არ უნდა არსებობდეს ელექტრული ველის დამაბულობის გავლენა მოწყვეტის დროის მნიშვნელობებზე. ეს დასტურდება ექსპერიმენტული მონაცემებით, რომლებიც მოყვანილია ნახ.38-ზე (დამოკიდებულებები 1-5).





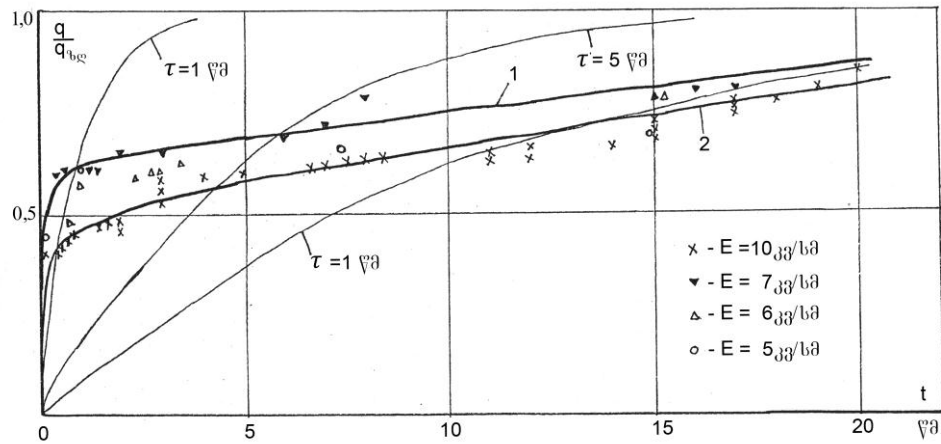
- 1 - რუტილი,  $a_{bg} = (104 \pm 7)$  მკმ,
- 2 - ილმენიტი,  $a_{bg} = (125 \pm 9)$  მკმ,
- 3 - სტავროლიტი,  $a_{bg} = (135 \pm 12)$  მკმ,
- 4 - დისტენი,  $a_{bg} = (130 \pm 12)$  მკმ,
- 5 - კვარცი,  $a_{bg} = (246 \pm 28)$  მკმ.

ნახ. 38. გრაფიტის საფენზე სხვადასხვა მინერალების დამუხტვის დროის დამოკიდებულება ელექტრული ველის დამაბულობაზე

#### 4.1.3. ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტთა დამოკიდებულება მათი დამუხტვის დროზე

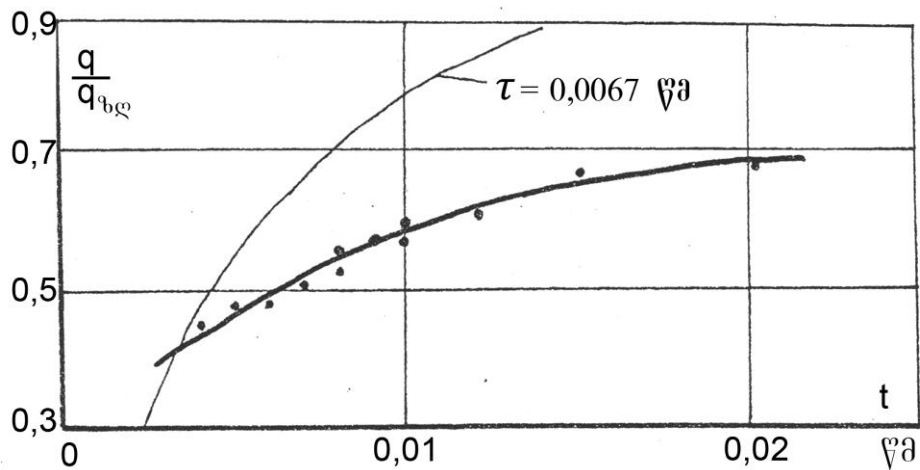
ნაწილაკთა დამუხტვის კინეტიკის ყოვლისმომცველი მახასიათებელია მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება ელექტროდიდან მათი მოწყვეტის დროზე. ეს დამოკიდებულება დამუხტვის სხვადასხვა პირობებში სხვადასხვა ნაწილაკებისათვის აგებულ იქნა ალბათური დამოკიდებულებების საფუძველზე  $\Phi(q)$ -სა და  $\Phi(t)$ -ს შორის. ეს ხდებოდა შემდეგნაირად: მოწყვეტის  $\Phi$  ალბათობისას შესაბამისად  $\Phi(q)$ -სა და  $\Phi(t)$ -ს მიხედვით ხდებოდა მუხტის  $(q)$ -ს და

მოწყვეტის დროის  $t$ -ს მნიშვნელობების განსაზღვრა. ამ გზით აგებული დამოკიდებულებების მაგალითი ქრომირებული ელექტროდისათვის მოყვანილია ნახ.39-ზე, ხოლო გრაფიტის შემცველი ელექტროდისათვის ნახ. 40 - 42-ზე.



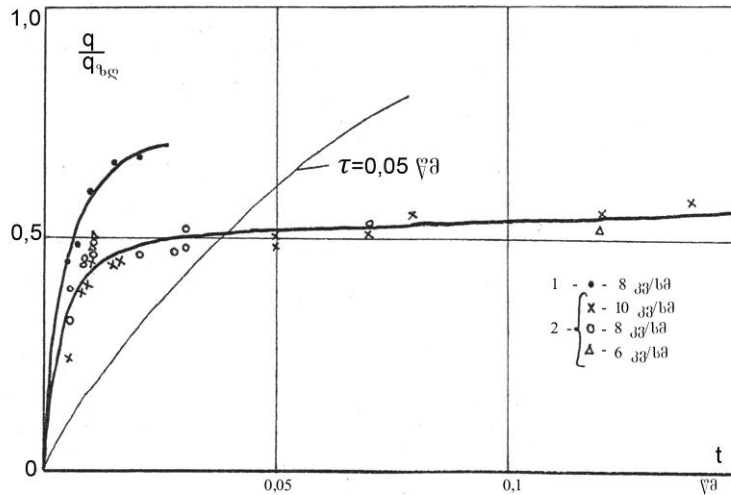
ქრომირებული ელექტროდი,  $a = 98 \pm 9 \mu\text{კმ}$ .  $f = 30 - 35\%$   
 1 -  $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2 -  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

ნახ. 39. რუტილის ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე



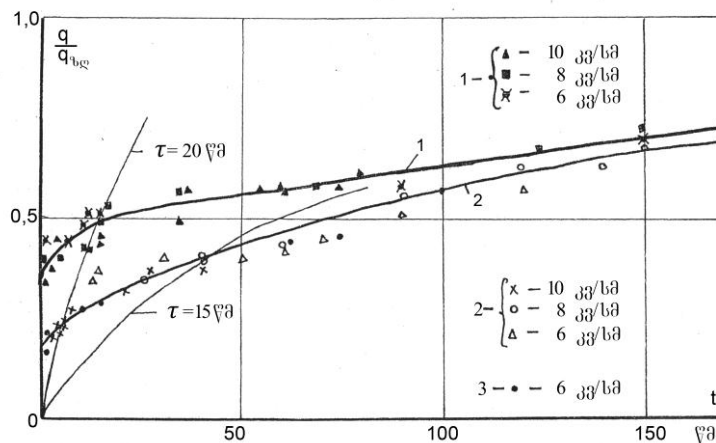
გრაფიტის შემცველი ელექტროდი  
 $a = 104 \pm 7 \mu\text{კმ}$ ,  $E = 8 \text{ კვ/სმ}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $f = 30 - 35\%$ .

ნახ. 40. რუტილის ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე



გრაფიტის შემცველი ელექტროდი.  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $f = 30 - 35\%$ .  
 1 - რუტილის ნაწილაკები,  $a = 104 \pm 7$  მკმ  
 2 - ილმენიტის ნაწილაკები,  $a_{ბფ} = (125 \pm 9)$  მკმ,

ნახ. 41. ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე.



გრაფიტის შემცველი ელექტროდი,  $T = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $f = 30 - 35\%$ .  
 1 - ცირკონის ნაწილაკები,  $a = 85 \pm 7$  მკმ,  
 2 - კვარცის ნაწილაკები,  $a = 246 \pm 28$  მკმ,  
 3 - დისტენის ნაწილაკები,  $a = 130 \pm 19$  მკმ,

ნახ. 42. ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე

ინდუქციური დამუხტვის თეორიიდან გამომდინარეობს, რომ, როდესაც ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობის მნიშვნელობა მუდმივი(უცვლელი) სიდიდეა, მაშინ ინდუქციური

დამუხტვის კინეტიკას აქვს ექსპონენციური ხასიათი. ამ ექსპონენტების ექსპერიმენტული მახასიათებლები მოყვანილია ნახ.39- 42-ზე.

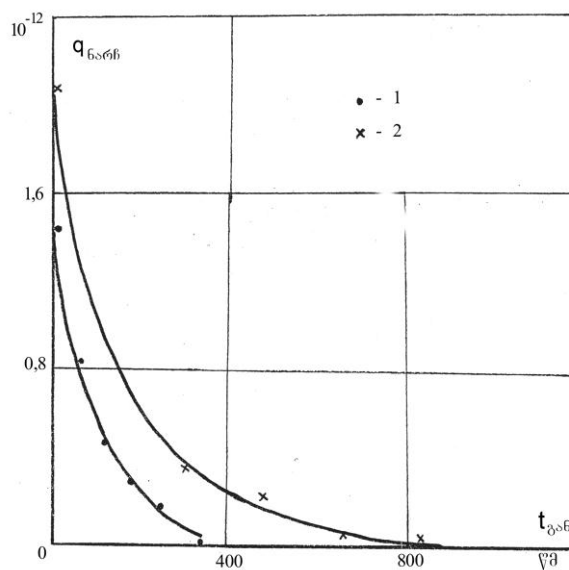
მიღებული ექსპერიმენტული დამოკიდებულებები  $t_{50\%} = f(E)$  ადასტურებენ: რუტილის ნაწილაკებისათვის გადამწყვეტ როლს ასრულებს ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობა. ამ კონტაქტური წინაღობის ხარისხის ცვლილების ილუსტრაცია გახლავთ ნახ.36-ზე წარმოდგენილი დამოკიდებულებები. ეს დამოკიდებულებები კარგად კორელირებს ნაწილაკზე მოქმედი დაწოლის ძალის ცვლილებაზე ელექტრული ველის დამახულობის მიმართ  $F_{მოწყ}(10)/F_{მოწყ}(E)$  ნახ.35-ზე.

მოწყვეტის დროის  $t_{მოწყ}$  დამოკიდებულების ცვლილება სხვადასხვა პარამეტრისაგან (E,T,f) ანალოგიურია როგორც მეტალური ელექტროდების, ასევე, გრაფიტის შემცველი ელექტროდებისათვის. ერთადერთი განსხვავება, რაც ახასიათებს გრაფიტის შემცველ ელექტროდებს, არის ის, რომ მათთვის მოწყვეტის დროის მნიშვნელობები გაცილებით მცირეა. ასე, მაგ. ქრომირებული ელექტროდებისათვის ის შეადგენს 10-20 მწმ-ს, ხოლო გრაფიტის შემცველი ელექტროდებისათვის - 1-2 მწმ-ს. ეს მონაცემები კიდევ ერთხელ ადასტურებენ კონტაქტური წინაღობის როლს ნაწილაკის ეკვივალენტური გამტარობის სიდიდის შექმნაში, რადგანაც გრაფიტის შემცველ ელექტროდებს მის ზედაპირზე არ გააჩნიათ ჟანგეულის ფენა მაშინ, როდესაც მეტალური ელექტროდების ზედაპირზე წარმოქმნილი ეს ფენა ზრდის კონტაქტური წინაღობის სიდიდეს.

მოყვანილი ექსპერიმენტული დამოკიდებულებების განსაკუთრებული თვისებაა ის, რომ მათი მიმდინარეობის კანონზომიერება განსხვავდება ექსპონენციური კანონზომიერებისაგან. ამასთან ერთად, როგორც ადრე იყო აღნიშნული, დამუხტვის პროცესში შეინიშნება ეკვივალენტური დამუხტვის დროის მუდმივას ზრდა.

ექსპერიმენტულად დადასტურებული დამუხტვის კინეტიკის  $q(t)$ -ის ასეთი ხასიათი აიხსნება დამუხტვის პროცესში ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობის ცვლილებით, რომლის დროსაც

ნაწილაკი ელექტროდზე იცვლის თავის ორიენტაციას. აქედან გამომდინარე, თუ დამუხტვის პროცესში ნაწილაკი ელექტროდზე არ შეიცვლიდა თავის ორიენტაციას, კერძოდ, არ შეიცვლებოდა ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობა, მაშინ დამოკიდებულებას  $q(t)$ -ს ექნებოდა ექსპონენციური ხასიათი. ამის დასადასტურებლად ჩავატარეთ შემდეგი სახის ექსპერიმენტი. ნაწილაკი წინასწარ დავმუხტეთ გარკვეული სიდიდის მუხტის მნიშვნელობამდე, რომლის შემდეგაც გამოვრთეთ მოდებული ძაბვა და ვაკვირდებოდით ნაწილაკის განმუხტვის პროცესს. კვლევის შედეგები გვიჩვენებს, რომ ნაწილაკის განმუხტვას მართლაც აქვს ექსპონენციური ხასიათი. გაზომვები ჩატარდა გრაფიტის შემცველ ელექტროდზე სტავროლიტის ნაწილაკებზე, როდესაც გარემოს ტენიანობა აღწევდა არა უმეტეს 60%-ისა, ხოლო ტემპერატურა იყო  $20^{\circ}\text{C}$  და მეტალურ ელექტროდზე დისტენის ნაწილაკებზე (ნახეთ ნახ. 43).



1 - დისტენის ნაწილაკი, მეტალური საფენი,  $T_{განზ.} = 20^{\circ}\text{C}$

$a_{ნაწ.} = 233\text{მკმ}$ ,  $b_{ნაწ.} = 201\text{მკმ}$ ,  $C_{ნაწ.} = 156\text{მკმ}$ ,

2 - სტავროლიტის ნაწილაკი, ნახშირბადის შემცველი საფენი,  $T_{განზ.} = 20^{\circ}\text{C}$

$a_{ნაწ.} = 169\text{მკმ}$ ,  $b_{ნაწ.} = 145\text{მკმ}$ ,  $C_{ნაწ.} = 92\text{მკმ}$ ,

**ხაზი-გაანგარიშება** დისტენის ნაწილაკისათვის  $\tau_{საშ} = 112$  წმ,

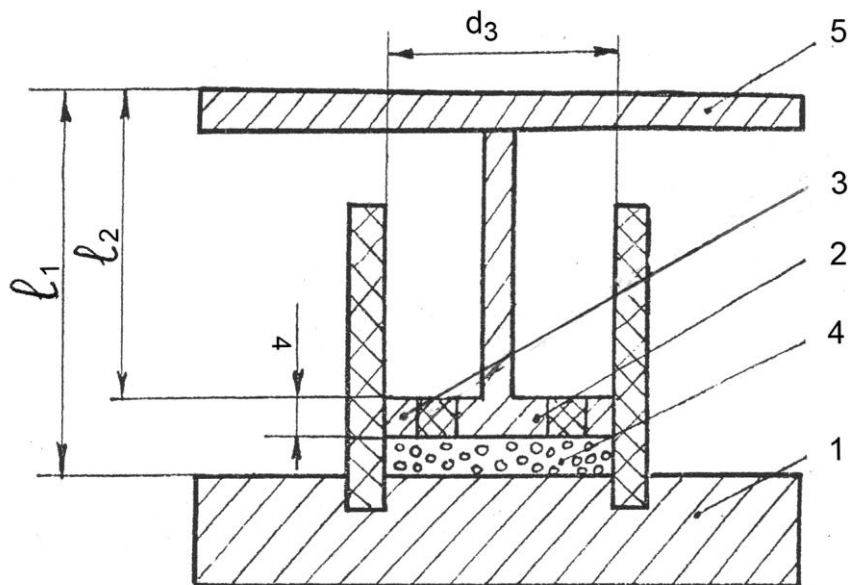
სტავროლიტის ნაწილაკისთვის -  $\tau_{საშ} = 191$  წმ.

**ნახ. 43.** ნარჩენი მუხტის დამოკიდებულება განმუხტვის დროზე

ზემოთქმულიდან გამომდინარე, ნაწილაკის დამუხტვის დროის მუდმივა ყველაზე უფრო ახლოს იქნება  $\tau$ -ის იმ მნიშვნელობებთან, რომლებიც განისაზღვრება ნაწილაკის ნივთიერების გამტარობით, ოღონდ დამაბულობის გაზრდისას, ვინაიდან ამ დროს მცირდება ნაწილაკის მოწყვეტის დრო (ანუ ნაწილაკი ელექტროდიდან მოწყვეტამდე ვერ ასწრებს თავისი ორიენტაციის შეცვლას ელექტროდზე). გაანგარიშების შედეგები მოყვანილია ცხრილში 11.

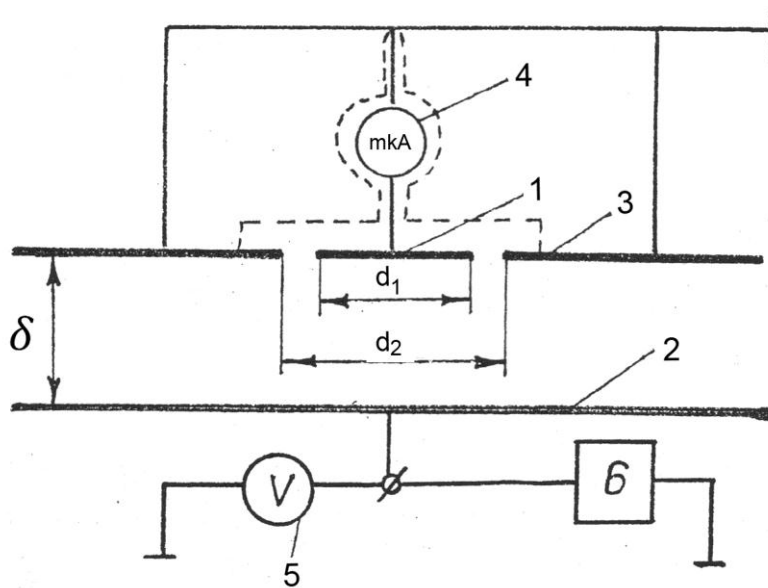
ამ შესაბამისობის შემოწმების მიზნით ჩატარდა ელექტროგამტარობის გაზომვები მინერალური ნაწილაკების ნივთიერებათა ფხვნილების სინჯებზე.

მინერალთა ფხვნილების სინჯებზე ელექტროგამტარობის  $\gamma$ -ს გაზომვებისათვის გამოყენებული იქნა საზომი ჭიქა, რომლის კონსტრუქცია მოყვანილია ნახ.44-ზე, ხოლო ელექტრული სქემა- ნახ.45-ზე.



- 1- ქვედა ელექტროდი-ფუძე, 2 - ზედა ელექტროდი  
 3- დამცავი რგოლი, 4 - გამოსაკვლევ ფხვნილი, 5 - სახურავი.

ნახ. 44. გამზომი ჭიქის კონსტრუქცია



- 1- გამზომი ელექტროდი, 2 - ქვედა ელექტროდი,  
 3 - ელექტროდი-დამცავი რგოლი, 4 - დენის გამზომი,  
 5 - ვოლტმეტრი, 6 - კვების წყარო.

ნახ. 45. გამზომი კონდენსატორის ელექტრული სქემა დამცავ რგოლთან ერთად.

გამზომი ჭიქა შედგებოდა ქვედა ელექტროდისაგან 2, რომელიც დამზადებული იყო თითბრისაგან, ზედა გამზომი ელექტროდისაგან 1 და დამცავი რგოლისაგან 3. ამ უკანასკნელის დანიშნულება იყო, რომ გასაზომ მოცულობაში შექმნილი ყოფილიყო ერთგვაროვანი ელექტრული ველი.

ელექტროდებზე ძაბვა მიეწოდებოდა უნივერსალური კვების წყარო УИП-1-დან. ძაბვის ცვლილების დიაპაზონი იყო 50 -დან 400ვ-მდე. ძაბვა იზომებოდა ელექტროსტატიკური ვოლტმეტრით, რომლის სიზუსტის კლასი იყო 0,5.

ძაბვა მიეწოდებოდა ქვედა ელექტროდს 2-ს, დამცავი რგოლი 3 დამიწებული იყო, ხოლო გამზომ ელექტროდთან 1-თან მიერთებული იყო დენის გამზომი. საამისოდ გამოვიყენეთ ელექტრომეტრი BK2-16. თავიდან რომ აგვეცილებინა გარეშე ველის ზემოქმედება, ყველა შეერთება განხორციელდა ეკრანირებული გამტარებით, ხოლო ეკრანი დამიწებული იყო.

გამზომი ჭიქის კონსტრუქციაში გათვალისწინებული იყო სახურავი 5, რომელიც უზრუნველყოფდა გამზომი დენის ეკრანირებას და, ამავე დროს, წარმოადგენდა იმ სიმძიმის საყრდენს, რომლის საშუალებითაც ხორციელდებოდა ფხვნილის შემჭიდროებისათვის საჭირო წნევის შექმნა.

ელექტროგამტარობის გაზომვა ხდებოდა შემდეგნაირად: ექსპერიმენტის დასაწყისში იზომებოდა გამზომი ჭიქის სიმაღლე ( $l_1$ -ის ზომა ნახ.44-ზე). შემდეგ ქვედა ელექტროდზე იყრებოდა გამოსაკვლევი მინერალის ფხვნილის გარკვეული რაოდენობა და კვლავ იზომებოდა გამზომი ჭიქის სიმაღლე ( $l_2$ -ის ზომა ნახ.44-ზე).

ფხვნილის სიმაღლე განისაზღვრებოდა როგორც

$$\delta = l_1 - l_2 - h ,$$

სადაც  $h$  ზედა ელექტროდის სისქეა.

ჭიქის სიმაღლის განსაზღვრა ხდებოდა მიკრომეტრის საშუალებით, რომლის სიზუსტეა 0,5 მკმ. გაზომვის დროს ყურადღება ეთმობოდა ელექტროდების პარალელურ მდებარეობას.

ამ გაზომვების შემდეგ ელექტროდებს მიეწოდებოდა საჭირო ძაბვა და იზომებოდა იმ დენის მნიშვნელობები, რომელიც გადიოდა ფხვნილის საშუალებით. მინერალების ხვედრითი გამტარობა განისაზღვრებოდა ფორმულით:

$$\gamma_v = \frac{I \cdot \delta}{U \cdot S}$$

სადაც  $I$  არის გაზომილი დენი,  $U$ - ელექტროდებზე მიწოდებული ძაბვა,  $S$ -გამზომი ელექტროდის ფართობი, რომელიც ტოლია

$$S = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$$

სადაც  $d_1$  გამზომი ელექტროდის დიამეტრია.

დიდი წინააღობის მინერალების გამოსაკვლევად გამოიყენებოდა ტერაომეტრი, რომლის საშუალებითაც უშუალოდ იზომებოდა მინერალური ფხვნილის წინააღობა  $R$ . იგი მოთავსებული იყო ზედა და



ქვედა გამზომ ელექტროდებს შორის. ამ შემთხვევაში მინერალების ხვედრითი მოცულობითი წინაღობა განისაზღვრებოდა როგორც

$$\gamma_V = \frac{\delta}{R \cdot S}$$

იმისათვის, რომ შეგვექმნა კარგი კონტაქტი მინერალური ფხვნილის ნაწილაკებსა და გამზომ ელექტროდებს შორის, ზედა ელექტროდზე ჰიდრავლიკური წნეხის საშუალებით ვიღებდით  $2 \cdot 10^4$  ნ/მ<sup>2</sup> სიდიდის წნევას. ასეთი წნევის დროს გამორიცხული იყო ნაწილაკებსა და ელექტროდებს შორის გარდამავალი წინაღობა, რაზედაც მეტყველებდა დენის გამზომი ხელსაწყოების მაჩვენებლების სტაბილური მნიშვნელობები. გაზომვის შედეგების გასაშუალოებული მნიშვნელობები, რომლებიც ჩატარებული იქნა მინერალური ფრაქციების სხვადასხვა სინჯებზე, მოყვანილია ცხრილში 11.

#### ცხრილი 11

მინერალური ნაწილაკების ხვედრითი მოცულობითი გამტარობა, (ომ·მ)<sup>-1</sup>

მინერა- ლები	რუტილი	ილმენიტი	ციროკონი	სტავრო- ლიტი	დისტენი	კვარცი
ლიტერა- ტურული მონაცე- მებით	$10^{-1}-10^{-3}$	$10^{-2}-10^{-4}$	$10^{-8}-10^{-12}$	$10^{-7}-10^{-9}$	$10^{-8}-10^{-10}$	$10^{-8}-10^{-14}$
ფხვნი- ლების გაზომ- ვებით	$(0,1-0,2) \cdot 10^{-8}$	$(0,2-0,5) \cdot 10^{-9}$	$(0,6-1,0) \cdot 10^{-10}$	$(0,8-1,2) \cdot 10^{-10}$	$(0,5-0,9) \cdot 10^{-10}$	$(1,0-1,3) \cdot 10^{-11}$
ნაწილა- კების მოწყვე- ტის გაზომ- ვებით	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,7 \cdot 10^{-7}$	–	$0,1 \cdot 10^{-8}$	$0,7 \cdot 10^{-10}$	$0,7 \cdot 10^{-10}$

გაზომვები ჩატარდა ოთახის ტემპერატურაზე 18-20°C-ის დროს და გარემოს ტენიანობის პირობებში არა უმეტეს 40-50%-სა.

გამტარობის მიღებული მნიშვნელობები დიელექტრიკული ნაწილაკებისათვის (სტავროლიტი, დისტენი, კვარცი) კარგად ეთანხმება ლიტერატურულ მონაცემებს. გამტარი ნაწილაკებისათვის (რუტილი,

ილმენიტი) ეს სიდიდეები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან. გამტარი მინერალებისათვის ამ სიდიდეებს შორის ასეთი განსხვავება შეიძლება აიხსნას იმით, რომ მათი გამტარობა ძლიერადაა დამოკიდებული ქიმიურ შემადგენლობაზე, რაც, თავის მხრივ, განისაზღვრება მოცემული მინერალების საბადოს ადგილმდებარეობით.

ამრიგად, ნაწილაკების დამუხტვის კინეტიკის კანონზომიერებაზე ჩატარებული გამოკვლევები გვიჩვენებს შემდეგს:

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე ატარებს არაექსპონენციურ ხასიათს. ნაწილაკის ეკვივალენტური გამტარობა განისაზღვრება ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტური წინაღობით. ნაწილაკის დამუხტვის დროის ზრდასთან ერთად იზრდება ნაწილაკის მიერ მიღებული მუხტი, რაც იწვევს მისი ორიენტაციის შეცვლას ელექტროდზე. ამის გამო ნაწილაკის კონტაქტური წინაღობა ელექტროდთან იზრდება. ეს იწვევს ეკვივალენტური წინაღობის გაზრდას და, შესაბამისად, ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის (დამუხტვის) დროის გაწელვას (გაზრდას).

ნაწილაკების ეკვივალენტური გამტარობის მიღებული მნიშვნელობები მათი ელექტროდიდან მოწყვეტის გაზომვებისა და შესაბამისი ფხვნილების სინჯების გაზომვების მიხედვით ერთმანეთს კარგად ეთანხმებიან.

დიელექტრიკული ნაწილაკების გამტარობის გაზომვის შედეგები კარგად ეთანხმება ლიტერატურულ მონაცემებს, ხოლო გამტარ ნაწილაკებში ასეთი თანხვედრა არ შეინიშნება.

## **4.2. ელექტროდთან ნაწილაკების ადგეზიის ძალების შეფასებები**

### **4.2.1. ადგეზიის ძალის ალბათური მახასიათებელი**

ერთი და იმავე ზომის ნაწილაკების ერთსა და იმავე ელექტროდთან კონტაქტისას ერთსა და იმავე პირობებში დამუხტვის დროს ნაწილაკზე

მოქმედი ადგეზიის ძალები არ იქნება ერთნაირი. ნაწილაკების განაწილება ადგეზიის ძალის მიხედვით ხასიათდება ალბათური მახასიათებლით  $\Phi(F_{ადგ})$ .

ამ მახასიათებლის აგების დროს გამოიყენებოდა მოწყვეტის მუხტების  $q_{მოწყ}$ -ის ექსპერიმენტული მონაცემები, რომლებიც წარმოდგენილია ალბათური  $\Phi(q_{მოწყ})$  დამოკიდებულების სახით [69].

მოწყვეტის მომენტში გვაქვს

$$F_{ადგ} = F_{ელ} - mg \quad (27)$$

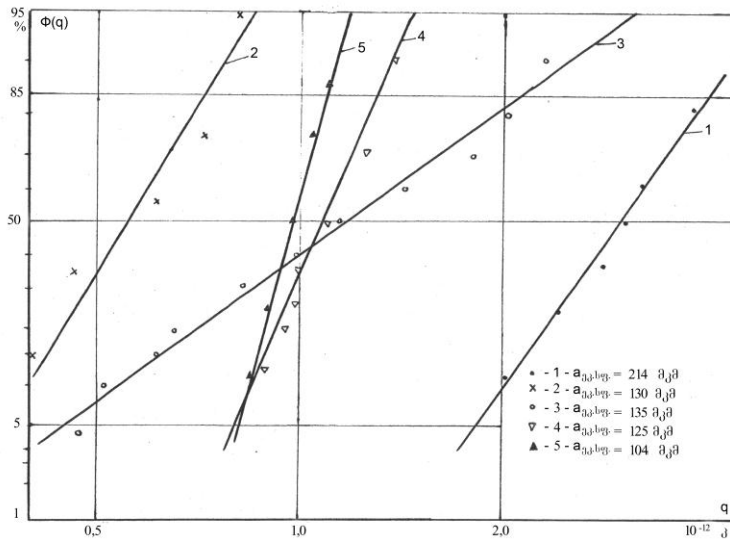
ეს პირობა სრულდება  $\Phi$  ალბათობით. ამასთან ერთად, ამ პირობის შესრულების ალბათობა განისაზღვრება ელექტრული ძალის  $F_{ელ}$  განსაზღვრული სიდიდის წარმოშობის ანუ განსაზღვრული სიდიდის მუხტის წარმოშობის ალბათობით  $\Phi(q_{მოწყ})$ .

ამრიგად, ვიცით რა რაღაც ალბათობა  $\Phi_i$ , რასაც შეესაბამება  $q_{მოწყ,i}$  მუხტის წარმოქმნა, (27) პირობიდან შეიძლება ვიპოვოთ ადგეზიის ძალა  $F_{ადგ,i}$ , რომელიც შეესაბამება მოცემული ალბათობის მნიშვნელობას. სიდიდეების  $\Phi_i$  და  $q_{მოწყ,i}$  განსაზღვრა ხდება  $\Phi(q_{მოწყ})$ -ის განაწილების მიხედვით. ამ გზით განსაზღვრული დამოკიდებულების  $\Phi(F_{ადგ})$  აგება ხდებოდა ნორმალურ-ლოგარითმულ კოორდინატებში. ნახ.46-ზე ნაჩვენებია ამ გზით აგებულ დამოკიდებულებათა მაგალითები.

ამავე კოორდინატებში აგებულ ნაწილაკების განაწილების ფუნქციას ადგეზიის ძალის მიხედვით აქვს წრფივი დამოკიდებულება, ანუ ემორჩილება ნორმალური-ლოგარითმული განაწილების კანონს, რომელის დიფერენცირებულ ფორმას აქვს შემდეგი სახე:

$$f(F_{ადგ}) = \frac{1}{F_{ადგ} \cdot \sigma_{\ln F_{ადგ}} \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\ln F_{ადგ} - \ln F_{ადგ})^2}{2\sigma_{\ln F_{ადგ}}^2} \right]$$

ნაშრომში ჩამოყალიბებულია ადგეზიის ძალის გაანგარიშების მეთოდის და დადასტურებულია გამოგონების საავტორო უფლებით [64].



$$T_{საფ.} = 20^{\circ}\text{C}, f \leq 50\%, E = 10 \text{ კვ/სმ}$$

1 - კვარცის ნაწილაკები, 2 - დისტენი, 3 - სტავროლიტი,  
4 - ილმენიტი, 5 - რუტილი

ნახ. 46. მუხტის განაწილების ფუნქცია. გრაფიტის შემცველი საფენი

ასეთი დასკვნის გაკეთების საფუძველია ამ დამოკიდებულებების მიმდინარეობა იმ შემთხვევებში, როდესაც ნაწილაკების მიწყვეტის ალბათობა  $\lambda$  ახლოსაა 100%-თან, ანუ იმ შემთხვევაში, როდესაც ანალიზისათვის მონაწილეობს ყველა ნაწილაკი.

#### 4.2.3. ელექტროდთან ნაწილაკის ადგეზიის ძალის განსაზღვრის მეთოდика

ზემოთ მოყვანილი გაზომვების მონაცემები და მიღებული შედეგების ანალიზი საშუალებას გვაძლევს შევიმუშაოთ ნაწილაკის ელექტროდის ზედაპირთან წარმოშობილი ადგეზიის ძალის განსაზღვრის მეთოდика ელექტრული ველის არსებობის პირობებში.

ამ მეთოდის ამოცანაა კონკრეტული ნაწილაკებისათვის კონკრეტულ პირობებში ადგეზიის ძალის ექსპერიმენტული განსაზღვრა [64].

მეთოდика დაფუძნებულია ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის დროს მათ მიერ მიღებული

მუხტების ექსპერიმენტულ მონაცემებზე და გამომდინარეობს იმ ძალების მოქმედების ბალანსის პირობიდან, რომლებიც ნაწილაკზე მოქმედებენ.

საწყისი მონაცემები:

- ნაწილაკის მახასიათებლები: ნახევარღერძების ზომები,  $a_{ნაწ} \geq b_{ნაწ} \geq c_{ნაწ}$ , ნაწილაკის სიმკვრივე  $\gamma_{ნაწ}$ ;
- დამუხტვის პირობა: E- ელექტრული ველის დაძაბულობა.

საანგარიშო ფორმულები:

ზღვრული მუხტი, როდესაც ნაწილაკი თავისი მცირე ნახევარღერძით c ორიენტირებულია ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორის გასწვრივ

$$q_{ზღვრ} = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot a \cdot b \cdot E}{d_a} \quad (28)$$

ელექტრული ძალა

$$F_{ელ} = \pi \cdot a \cdot b \cdot \epsilon_0 \cdot E^2 \left( \frac{0.5(\epsilon_1 - 1)^2 (1 - I)}{K^2} + \frac{dc \cdot \epsilon_1^2 - (dc - 1) \cdot \epsilon_1 + (1 - I)}{K^2} \cdot \beta + \frac{0.5 \cdot dc^2 (\epsilon_1^2 - 1) + dc - 0.5I}{K^2} \cdot \beta^2 \right) \quad (29)$$

სიმძიმის ძალა

$$F_g = mg = \frac{4}{3} \pi \cdot a \cdot b \cdot c \cdot g \cdot \gamma_{ნაწ} \quad (30)$$

ძალთა ბალანსი

$$F_{ადგ} = F_{ელ} - mg \quad (31)$$

ჩასატარებელი გაზომვები: დამუხტვის მოცემულ პირობებში (T, f, ელექტროდის მდგომარეობა) მოცემული ზომის ნაწილაკის მოწყვეტის მუხტის განსაზღვრა:  $q_{მოწყ,i}$ , სადაც  $i=1 \div N$ , N არის მუხტების გაზომვების რიცხვი.

ადგეზიის ძალის ანგარიში:

I. ალბათობის მახასიათებლის აგება

1. ნაწილაკის სიმძიმის ძალის გამოთვლა (30)-ით;
2. ზღვრული მუხტის გამოთვლა  $q_{ზღვრ}$  (28)-ით;
3. გაზომილი მოწყვეტის მუხტების მონაცემების საფუძველზე  $q_{მოწყ,i}$  ვაგებთ ალბათურ დამოკიდებულებას  $\Phi(q_{მოწყ})$ ;

4. აბცისთა ღერძზე ვაფიქსირებთ რაიმე მნიშვნელობას  $\Phi_K$ -ს;
5.  $\Phi_K$ -ს ფიქსირებული მნიშვნელობისათვის ორდინატთა ღერძზე ვპოულობთ მოწყვეტის მუხტის  $q_{მოწყ}$ -ის მნიშვნელობას;
6. ვანგარიშობთ მოწყვეტის მუხტის ფარდობით მნიშვნელობას  $q_{მოწყ}/q_{ზღვ}$ ;
7. (29)-ით ვანგარიშობთ ელექტრული ძალის მნიშვნელობას  $F_{ელ,K}$  ;
8. (31)-ით ვანგარიშობთ ადგეზიის ძალის მნიშვნელობას  $F_{ადგ,K}$
9. ვაგებთ  $\Phi(F_{ადგ.})$ -ის ალბათურ დამოკიდებულებას ლოგარითმულ-ნორმალურ კოორდინატებში.

## II. ადგეზიის ძალის სტატისტიკური მახასიათებლის განსაზღვრა.

1.  $\Phi(F_{ადგ.})=50\%$ -ის მნიშვნელობისათვის გრაფიკზე  $\Phi(F_{ადგ.})$  ვპოულობთ  $F_{ადგ.50\%}$  -ის მნიშვნელობას ;

2. ვსაზღვრავთ  $\sigma_{F_{ადგ.}}$  -ის მნიშვნელობას ფორმულით:

$$\sigma_{F_{ადგ.}} = \frac{F_{ადგ.(84.1\%)} - F_{ადგ.(50\%)}}{F_{ადგ.(50\%)} - F_{ადგ.(15.9\%)}}$$

მოყვანილი მეთოდის საფუძველზე განსაზღვრული იქნა ტიტანისშემცველი კოლექტიური კონცენტრატების მინერალური ნაწილაკების ადგეზიის ძალის სტატისტიკური მახასიათებლები. შედეგები მოყვანილია ცხრილში 12.

### ცხრილი 12

#### ნაწილაკების ეკვივალენტური გამტარობის მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები

მინერალი	ნაწილაკების ზომები მკმ	დიელექტრიკული შეღწევადობა $\epsilon$	ადგეზიის ძალა	
			საშუალო მნიშვნელობა $F_{ადგ.}, 10^{-6} \text{ ნ}$	საშუალო კვადრატული გადახრა $\sigma_{F_{ადგ.}}, 10^{-6} \text{ ნ}$
რუტილი	104	31÷173	0.8	1.2
ილმენიტი	125	33.7÷87.1	0.81	1.5
დისტენი	130	5.7÷7.2	0.28	3.4
სტავროლიტი	135	6.8	1.03	6.9
კვარცი	214	4.2÷6.5	1.78	3.1

### 4.3. მეოთხე თავის დასკვნები:

ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკებზე ინდუქციური დამუხტვის პროცესის პარამეტრებზე ჩატარებული გამოკვლევები საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები.

1. ნაწილაკების დამუხტვის კინეტიკა ხასიათდება შემდეგი პარამეტრებით: ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის მუხტებისა და დროის მინიმალური მნიშვნელობებით, მოწყვეტის მუხტებისა და დროის საშუალო მნიშვნელობებით და ნაწილაკების მოწყვეტის მუხტებისა და დროის საშუალო კვადრატული გადახრით. ნაწილაკების მოწყვეტის მუხტების მინიმალური მნიშვნელობანი განისაზღვრებიან ნაწილაკების მახასიათებლებით და ელექტრული ველის დამაბულობით.
2. მოწყვეტის მუხტებისა და დროის საშუალო მნიშვნელობები, აგრეთვე მათი გაზნევა, განპირობებულია ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტური წინაღობით, რომელიც განისაზღვრება საწყისი დაწოლის ძალით, ანუ ელექტრული ველის დამაბულობით.
3. ინდუქციური დამუხტვის დამოკიდებულება დამუხტვის დროის მიმართ არ ატარებს თეორიული წარმოდგენების შესაბამის ექსპონენციურ ხასიათს. დამუხტვის პროცესში იცვლება ნაწილაკის საწყისი ორიენტაცია, რასაც მივყავართ ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობის ცვლილებასა და ნაწილაკის დამუხტვის სიჩქარის დროში შემცირებასთან.
4. ნაწილაკთა ეკვივალენტური გამტარებლობის მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები, მათი ელექტროდიდან მოწყვეტის მიხედვით, კარგად ეთანხმება იმ მონაცემებს, რომლებიც განისაზღვრა ფხვნილების სინჯების მიხედვით.
5. ნაწილაკის ელექტროდთან წარმოქმნილი ადგეზიის ძალის განსაზღვრის შემოთავაზებული მეთოდიკა საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ ადგეზიის ძალის რაოდენობრივი მახასიათებლები:

## V თავი

### ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის რეალური ფაქტორების გათვალისწინება

#### 5.1. ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ფიზიკური სურათის საერთო დახასიათება

ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკების დამუხტვისა და მოწყვეტის შესახებ ჩატარებულმა კვლევებმა დაადასტურა და დააზუსტა ცნობილი განსხვავებები ექსპერიმენტულ მონაცემებსა და თანამედროვე თეორიულ წარმოდგენებს შორის, რომელიც დაკავშირებულია ინდუქციური დამუხტვის პროცესთან და წარმოაჩინა მთელი რიგი ახალი განსხვავებები. მიზანშეწონილია მათი ერთროული განხილვა.

საწყის ეტაპზე განვიხილოთ თუ როგორ გავლენას ახდენს ეს მოვლენები პროცესის გარე ინტეგრალურ მახასიათებელზე. პირველ რიგში საჭიროა აღინიშნოს ნაწილაკების დამუხტვისა და მოწყვეტის დაკვირვების შედეგად მიღებული სიდიდეების მნიშვნელოვანი გაბნევა. ეს გაბნევა დამოკიდებულია იმ პირობებზე, რომლებშიც ხორციელდება დამუხტვა, ე.ი. გარემოს ტემპერატურასა და სინესტეზე და ელექტრული ველის დამაბულობაზე. პირველი ორი ფაქტორი გავლენას ახდენს ნაწილაკების გამტარობაზე, ხოლო უკანასკნელი კი იმ ძალაზე, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე.

ექსპერიმენტული მონაცემების მეორე განსაკუთრებული თვისება არის ის, რომელიც არ ყოფილა აღნიშნული ცნობილ ლიტერატურულ წყაროებში, რომ ნაწილაკების მუხტის დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე, თეორიული წარმოდგენების საწინააღმდეგოდ, ატარებს არაექსპონენციალურ ხასიათს. ეს მოვლენა დაკავშირებულია, ნაწილაკების დამუხტვის მომენტიდან მათ მოწყვეტამდე დამუხტვის პირობების ცვალებად ხასიათთან. ამასთან ერთად, დროთა განმავლობაში მიმდინარეობს დამუხტვის პროცესის სიჩქარის შენელება და შესაბამისად ნაწილაკების



ეკვივალენტური დამუხტვის დროის მუდმივა იზრდება დამუხტვის დროის მიმდინარეობის(ზრდის) მიხედვით.

ექსპერიმენტალური მონაცემების მესამე განსაკუთრებული თვისება მდგომარეობს იმაში, რომ ინდუქციური დამუხტვის შედეგად ნაწილაკები ელექტროდიდან წყდებიან გარკვეული ალბათობის მიხედვით, თანაც ეს ალბათობა არასდროს არ აღწევს 100%-ს.

ექსპერიმენტული მონაცემების გამოვლენილი ეს განსაკუთრებული მომენტები, რომლებიც განსხვავდება მათი თეორიული წარმოდგენებისაგან დაკავშირებულია ინდუქციური დამუხტვის მიმდინარეობის კანონზომიერების განსაკუთრებულ მოვლენებთან. ექსპერიმენტული კვლევის პროცესში აღმოჩნდა, რომ დამუხტვის პროცესის თეორიული ანალიზის დროს მიღებული ყველა პირობა არ კმაყოფილდება. მათგან არ სრულდება ორი უმთავრესი დაშვება, კერძოდ დამუხტვის პროცესში ნაწილაკსა და დამუხტავ ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობა არ არის მუდმივი, უცვლელი სიდიდის. ამასთან ერთად, დამუხტვის პროცესში ნაწილაკის ორიენტაცია ელექტროდზე იცვლება.

ეს მოვლენები განაპირობებენ ნაწილაკსა და დამუხტავ ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინაღობის ცვალებად ხასიათს. ნაწილაკის ორიენტაციის ცვლილება განაპირობებს მის ელექტროდთან კონტაქტის არასტაბილურ ხასიათს, მაგრამ წინაღობის ცვლილების ცვალებადი ხასიათის ძირითად მიზეზს წარმოადგენს იმ ძალის მოქმედების ცვალებადი ხასიათი, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე. დამუხტვის საწყის ეტაპზე ელექტრული ძალა წარმოადგენს როგორც ნაწილაკის ელექტროდზე დაწოლის ძალას და თანაც მისი სიდიდე საწყის ეტაპზე სიდიდით მაქსიმალურია. შემდგომში, დამუხტვის მიმდინარეობის პროცესში, ეს ძალა მცირდება, შემდეგ იცვლის მიმართულებას და ხდება ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის მიმართულების. ყველაფერ ამას მიყვარათ ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტის ცვალებად ხასიათთან და

შესაბამისად ნაწილაკის დამუხტვის შედეგად მიღებული მუხტის დამუხტვის დროზე არაექსპონენციალურ დამოკიდებულებასთან.

გარდა ამისა, დამუხტვის პროცესის კიდევ ერთ განსაკუთრებულ მოვლენას წარმოადგენს ადგეზიის ძალის ალბათური ხასიათი, რომელიც განპირობებულია ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტის თვისებებისა და გარემოს მახასიათებლებით. ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტი უთავრესად განპირობებულია ნაწილაკის საწყისი დაწოლის ძალით ანუ ელექტრული ველის დამაბულობის სიდიდით. გარდა ამისა, ამ პროცესში მოქმედებენ კიდევ მრავალი ფაქტორები, რომლებიც განსაზღვრავენ ადგეზიის ძალის ალბათურ ხასიათს. ყველაფერი ეს იწვევს ნაწილაკების მუხტებისა და მოწყვეტის დროის მნიშვნელობების გაზრდას და, რაც მთავარია, ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა ხდება 100%-ზე ნაკლები.

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე წამყვანი როლი ენიჭება ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტს, შესაბამისად ამ პროცესის პარამეტრები დამოკიდებულია ელექტროდის მასალაზე. მეტალური ელექტროდებისათვის დამახასიათებელია მათ ზედაპირზე ჟანგეულების თხელი ფენის წარმოქმნასთან, რომლებიც ართულებენ ზემოთაღნიშნულ კონტაქტს და შესაბამისად ზრდიან დამუხტვის დროს და ამცირებენ ნაწილაკის ელექტროდთან მოწყვეტის ალბათობას.

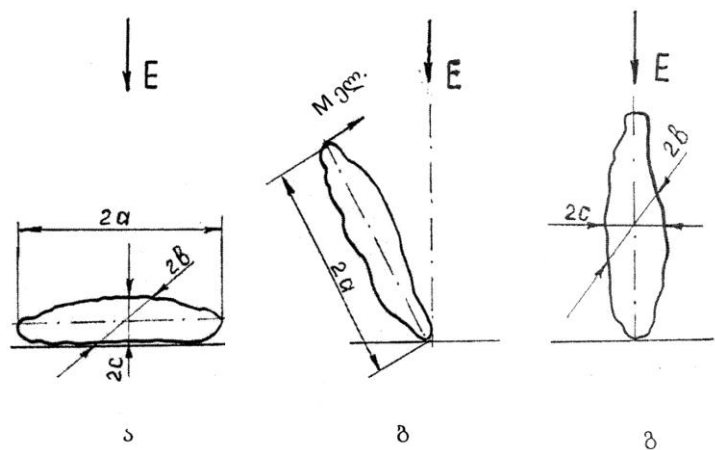
ასეთი მავნე მოვლენის თავიდან აცილება შესაძლებელია ისეთი ელექტროდების გამოყენებით, რომლებიც დამზადებულია გრაფიტის შემცველი მასალებისაგან. მათთვის დამახასიათებელია ნაწილაკების მუხტებისა და დამუხტვის დროის მნიშვნელობების ნაკლები გაზრდა და 100%-თან მიახლოებული მოწყვეტის ალბათობა.

ამრიგად, ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ლიტერატურული მონაცემების ანალიზმა და ჩატარებულმა კომპლექსურმა ექსპერიმენტულმა გამოკვლევებმა საშუალება მოგვცა დაგვედგინა კონკრეტული მოვლენები და ის განსხვავებები, რომლებიც არსებობს ექსპერიმენტულ მონაცემებსა და

ლიტერატურულ წყაროებში არსებულ წარმოდგენებს შორის. ყველაფერმა ამან საშუალება მოგვცა ჩამოგვეყალიბებინა ერთგვაროვან ელექტრულ ველში მიმდინარე ინდუქციური დამუხტვის პროცესის დაზუსტებული ფიზიკური სურათი. განვიხილოთ ეს სურათი.

ნაწილაკს გააჩნია ფორმა, რომელიც შეიძლება გამოვსახოთ სამღერძიანი ეკვივალენტური ელიპსოიდით. ეს ნიშნავს იმას, რომ განიხილება ის ნაწილაკები, რომელთა ზომების განსხვავება ელიპსოიდთან გაცილებით ნაკლებია ვიდრე მისი ეკვივალენტური ელიპსოიდის ზომები.

დამუხტვის წინ ნაწილაკი ელექტროდზე თავსდება მისთვის ყველაზე უფრო მოსახერხებელი, მდგრადი მდგომარეობით (ნახ.47,ა), ანუ მისი უმცირესი ღერძით ელექტროდის სიბრტყის პერპენდიკულარულად. ამავე მიმართულებით არის ორიენტირებული ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორი. ელექტრული ველი მიეწოდება ნახტომისებურად, ხოლო ელექტრული ველის დაძაბულობა მთელი დამუხტვის დროის განმავლობაში რჩება უცვლელი, მუდმივი სიდიდის. ელექტრული ზედაპირის მდგომარეობა არ იცვლება.



ნახ. 47. ელექტროდზე მდებარე ნაწილაკის ორიენტაცია ელექტრულ ველში

საწყის მომენტში ნაწილაკზე მოქმედებს მხოლოდ ელექტროდზე დაწოლის ძალები: სიმძიმის, ადგეზიისა და ელექტრული ძალა, რომელიც გამოწვეულია ნაწილაკის პოლარიზაციით. ყველაფერს ამას მივყავართ ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტის ჩამოყალიბებასთან,

რომლებიც განისაზღვრება ნაწილაკის, ელექტროდისა და ელექტრული ველის მონაცემებით. კონტაქტი ხასიათდება კონტაქტური წინაღობის გარკვეული მნიშვნელობით და ადგეზიის ძალით. ამის შემდეგ იწყება იმ პროცესის მიმდინარეობა, რომელიც აღიწერება თეორიული წარმოდგენებით: წარმოიქმნება მუხტის მატარებლების ნაკადი და წარმოებს ნაწილაკის დამუხტვა. მაგრამ, როგორც კი ნაწილაკზე წარმოიქმნება ჭარბი მუხტი, დამუხტვის პირობები იცვლება. ბუნებრივია, ეს ცვლილებები უეცრად არ მჟღავნდება. შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ მათი შესამჩნევი გავლენა იწყება მაშინ, როცა ელექტრული ძალა იცვლის თავის მიმართულებას და ხდება მოწყვეტის მიმართულების.

იმის გამო, რომ ნაწილაკი ვერტიკალური ღერძის მიმართ არ წარმოადგენს მკაცრად სიმეტრიულს, ამიტომ ელექტრული ველის მოქმედების დაწყებასთან ერთად ნაწილაკზე ზემოქმედებას იწყებს მაბრუნებელი მომენტი, რომელიც ცდილობს შემოაბრუნოს ნაწილაკი თავისი უდიდესი ღერძით ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორის მიმართულებით (ნახ.47,ბ). ამას მივყავართ კონტაქტის ფართობის ცვლილებასთან და შესაბამისად კონტაქტური წინაღობის ცვლილებასთან. ამასთან ერთად, იცვლება ნაწილაკის ზღვრული მუხტი, რომელიც მეტია (ნახ.47,გ) ვიდრე ნაწილაკის (47,ა) მდგომარეობის დროს იყო. ყველაფერ ამას მივყავართ იმასთან, რომ დამუხტვის პროცესის სიჩქარე მცირდება.

საწყისი კონტაქტის ჩამოყალიბება და მისი შემდგომი თანდათანობითი ცვლილება იწვევს მოცემული დამუხტვის პირობებში ადგეზიის ძალის ალბათურ დამოკიდებულებას. ამ პირობებში წარმოქმნილი ადგეზიის ძალის ალბათობა კი განსაზღვრავს ნაწილაკის მოწყვეტის ალბათობას. თუკი ნაწილაკი ღებულობს საკმარის მუხტს იმისათვის, რომ მან გადალახოს სიმძიმის ძალისა და ადგეზიის ძალის ზემოქმედება, მაშინ ის წყდება ელექტროდს. მოწყვეტის ეს მომენტი შესაძლებელია წარმოიშვას ნაწილაკის ნებისმიერი შესაძლო ორიენტაციის

პირობებში რაც განსაზღვრავს ნაწილაკზე წარმოქმნილი მუხტებისა და მოწყვეტის დროის მნიშვნელობების გაზომვას.

წინამდებარე სამუშაოში მიღებული ადგეზიის ძალის ალბათური დამოკიდებულებები, რომელიც მიღებული იქნა ტიტანის შემცველი კონცენტრატების მინერალური ნაწილაკებისათვის, საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ სეპარატორის ელექტრულ ველში მათი მოწყვეტის ალბათობა

## **5.2. ელექტროსეპარატორში ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ორგანიზაციის პრაქტიკული რეკომენდაციები**

გამოვლენილი კანონზომიერებების საფუძველზე შეიძლება ჩამოვყალიბოთ რეკომენდაციები, რომლებიც დაკავშირებულია ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ორგანიზაციასთან. ეს რეკომენდაციები საშუალებას მოგვცემს მოვახდინოთ ელექტროსეპარატორში მინერალური ნაწილაკების ოპტიმალური გაყოფა, რომელიც დაფუძნებულია მათი თვისებების განსხვავებაზე ელექტროგამტარობის მიხედვით.

ნაწილაკების დამუხტვისა და ელექტროდიდან მათი მოწყვეტის გარე ინტეგრალურ მახასიათებელს წარმოადგენს მოწყვეტის ალბათობა. მისი მნიშვნელობები გასაყოფი ნაწილაკებისათვის განსაზღვრავს სეპარაციის ხარისხს. სეპარაციის მაქსიმალური შედეგის მისაყწევად აუცილებელია მივისწრაფვოდეთ იქეთკენ, რომ მოწყვეტის ალბათობა მიუახლოვდეს მის ასპროცენტთან მნიშვნელობას. მხოლოდ ამ შემთხვევაში მიიღწევა სეპარატორის ელექტრულ ველში ნაწილაკების ერთმნიშვნელოვანი მკვეთრად გამოხატული ქცევა, რაც საშუალებას მოგვცემს გავიანგარიშოთ ნაწილაკების გაყოფის პროცესი.

ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე დიდ გავლენას ახდენს სინესტე, რომელიც განაპირობებს ნაწილაკების ზედაპირზე მცირე ზომის წვეთების წარმოშობას. იმისათვის, რომ მივაღწიოთ ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, აუცილებელია სინესტის

მნიშვნელობები იმ გარემოში, სადაც მიმდინარეობს ნაწილაკების დამუხტვა და მათი ელექტროდიდან მოწყვეტა, არ აჭარბებდეს 60-70 %-ს.

სინესტის შემცირება და მოწყვეტის ალბათობის გაზრდა შესაძლებელია ნაწილაკების რეაგენტული დამუშავების გზით, რაც განაპირობებს ნაწილაკების ზედაპირის დასველებადობის პირობების შემცირებას.

ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის მნიშვნელოვანი გაზრდა შესაძლებელია დამუხტავი ელექტროდის ვიბრაციის გამოყენების პირობებში.

ჩატარებული კვლევები საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ ნაწილაკების გამტარობის მიხედვით გამყოფი სეპარატორების კონსტრუირება, რომელთა მუშაობა დამყარებულია რამოდენიმე პრინციპის გათვალისწინების საფუძველზე.

ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის კონკრეტული მნიშვნელობა დამოკიდებულია იმაზე, თუ რა დროის განმავლობაში იმყოფება ის დამუხტავ ელექტროდზე. მოწყვეტის ალბათობის გაზრდის მიზნით აუცილებელია გავზარდოთ ნაწილაკების ელექტრულ ველში ყოფნის ხანგრძლიობა(დამუხტვის დრო). მოწყვეტის ალბათობა თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას აღწევს მაშინ, როდესაც ეს დრო მნიშვნელოვნად აჭარბებს ნაწილაკების დამუხტვის დროის მუდმივას. ამ შემთხვევაში ნაწილაკზე მოქმედი მოწყვეტის ძალა აღწევს თავის მაქსიმალურ მნიშვნელობას. და პირიქით, მოწყვეტის ალბათობას აქვს თავისი უმცირესი მნიშვნელობები, როდესაც ეს დრო და შესაბამისად ნაწილაკების მუხტი იქნება გაცილებით ნაკლები მათი დამუხტვის დროის მუდმივაზე.

აქედან გამომდინარეობს სეპარატორების კონსტრუქციული პარამეტრების რეკომენდაცია. იმისათვის, რომ მივაღწიოთ განსაცალკევებელი ნაწილაკების დამუხტვის შედეგად მიღებული მუხტების მაქსიმალურ სხვაობას, ამისათვის აუცილებელია, რომ

ნაწილაკების დამუხტვის ზონის სეგმენტი (დამუხტვის ხანგრძლივობა) აკმაყოფილებდეს შემდეგ პირობას

$$\tau_1 \ll \tau_{\text{დამ}} \ll \tau_2$$

სადაც  $\tau_{\text{დამ}}$  - არის ნაწილაკის ელექტრული ველის ზემოქმედების არეში ყოფნის ხანგრძლივობა,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  კი განსაცალკევებელი ნაწილაკების დამუხტვის დროის მუდმივები.

სეპარატორების კონსტრუირება დაკავშირებულია დამუხტავი ელექტროდების შერჩევის საკითხთან. დამუხტავი ელექტროდების დამზადებას ქრომირებული ფოლადისაგან, რაც თანამედროვე დოლურ სეპარატორებში ძალიან ხშირად გამოიყენება, განაპირობებს მოწყვეტის ალბათობის შედარებით ნაკლებ მნიშვნელობებს ვიდრე ამას ადგილი აქვს სხვა მეტალებისათვის, მაგ. ფოლადი 3, სპილენძი, ჟესტი, თუთია.

ელექტროსეპარატორების დამუხტავი ელექტროდების დამზადება მიზანშეწონილია გრაფიტისშემცველი ელექტროდებისაგან, რომლებიც საშუალებას გვაძლევენ მივაღწიოთ სტაბილურ და 100%-თან ახლო მოწყვეტის ალბათობის მნიშვნელობებს.

სამუშაოში მიღებული შედეგები საშუალებას გვაძლევენ გამოვაკლინოთ ტენდენციები, რომლებიც მიმართულია გამტარობის მიხედვით სეპარაციის პროცესის გაუმჯობესებისაკენ.

მოწყვეტის ალბათობის რეგულირება და შესაბამისად ნაწილაკების ფართო დიაპაზონში გაყოფას შესაძლებელია მივაღწიოთ ელექტრული ველის დამაბულობის ცვლილების საშუალებით. სეპარატორის მუშა ძაბვის ამალევა წარმოადგენს გაყოფის ეფექტურობის გაზრდის ერთ-ერთ დიდ რეზერვს. ამ დროს, მოწყვეტის ალბათობის მნიშვნელობების გაზრდასთან ერთად, ადგილი აქვს გაბნევის მნიშვნელობების შევიწროებასაც, რაც საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ მინერალთა განცალკევების სტაბილური მნიშვნელობები.

გაყოფის პროცესის რეგულირების კიდევ ერთ შესაძლებლობას წარმოადგენს ნაწილაკების ელექტრულ ველში ყოფნის ხანგრძლივობის

ცვლილება, თუმცა ზოგიერთ შემთხვევაში ამას მიყვავართ რამდენიმე სახის ნაკლოვანებასთან, ისეთების როგორცაა, წარმადობის შემცირება და მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტების მნიშვნელობების გაზრდის გაზრდა. მიუხედავად ამისა, ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის გაზრდა ხსნის ახალ შესაძლებლობებს ცუდი გამტარობის მქონე ნაწილაკებისათვის, რომლებიც ხასიათდებიან როგორც გამტარობების ერთმანეთთან ახლო მნიშვნელობებით, ასევე დამუხტვის დროის დიდი მნიშვნელობებით.

ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობის გაზრდას და მისი მნიშვნელობების სტაბილიზაციას შესაძლებელია მივაღწიოთ ნაწილაკების გახურების გზით. ამით მიიღწევა ნაწილაკების ზედაპირებიდან ნესტის აორთქლება. ნაწილაკების ყველაზე უფრო ეფექტური გაყოფა მიმდინარეობს ჰაერის 80-100°C-ზე გახურების პირობებში. უფრო ნაკლები ტემპერატურის დიაპაზონში პროცესის მიმდინარეობა იწვევს მოწყვეტის ალბათობის ნახტომისებურ შემცირებას, ხოლო ამ მნიშვნელობების უფრო მაღალი დიაპაზონი არ იწვევს მოწყვეტის ალბათობის მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას და მასთან ერთად არ არის ეკონომიურად მიზანშეწონილი.

### 5.3. მეხუთე თავის დასკვნები

მიღებული მონაცემების საფუძველზე შესაძლებელია გავაკეთოთ შემდეგი დასკვნები:

1. ჩამოყალიბებულია ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ფიზიკური სურათი, რომელიც ითვალისწინებს ნაწილაკების ელექტრულ ველში რეალური ქცევის თავისებურებებს, რომელიც განსხვავდება მისი თეორიული წარმოდგენებისაგან. ეს საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ გამტარობის მიხედვით რეალურ ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების ქცევის პროგნოზი და მოვახდინოთ ამ მოწყობილობების მეცნიერულად დასაბუთებული ოპტიმიზაცია.



2. ჩამოყალიბებულია გამტარობის მიხედვით კონსტრუირებულ ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვისა და მათი ელექტროდიდან მოწყვეტის რაციონალური ორგანიზაციის პრაქტიკული რეკომენდაციები, რომლებიც განისაზღვრება ნაწილაკების თვისებებით და მათი გაყოფის პირობებით, რომლებიც უზრუნველყოფენ გამტარობის მიხედვით გაყოფის პროცესის გაუმჯობესებას.

3. სამუშაოში მიღებული რიცხოვრივი მონაცემები საშუალებას გვაძლევს დავაზუსტოთ ინდუქციური დამუხტვისა და მოწყვეტის დროის თეორიული გაანგარიშებები.

## დასკვნები

სამუშაოში მიღებული შედეგები შესაძლებელია ჩამოყალიბებული იქნას შემდეგნაირად:

1. შემუშავებულია ექსპერიმენტული დანადგარი და ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური კვლევის მეთოდიკა, რომელიც საშუალებას გვაძლევს ჩავატაროთ კვლევები სხვადასხვა თვისების მქონე ნაწილაკებზე და მივიღოთ ყოვლისმომცველი ინფორმაცია დამუხტვის პირობების ფართო დიაპაზონში.
2. შემოთავაზებულია და დასაბუთებულია სხვადასხვა ფორმის მინერალური ნაწილაკების ზღვრული მუხტის განსაზღვრის მეთოდიკა, რომელიც დაფუძნებულია ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის მინიმალური ელექტრული ველის დამაბულობის გაზომვაზე.
3. პირველადაა მიღებული ექსპერიმენტული შედეგები, რომლებიც ინდუქციური დამუხტვის რეალურ პროცესში წარმოადგენენ დამუხტვის დროის მიხედვით ნაწილაკების მუხტის ცვლილების ხასიათს. გამოვლენილია თეორიული წარმოდგენებისაგან განსხვავებული ნაწილაკების ქცევის განსაკუთრებული მომენტები.
4. შემუშავებულია რეალურად მოქმედი ფაქტორების გათვალისწინებით ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ფიზიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ რეალურ ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების ქცევის პროგნოზი და მოვახდინოთ ამ მოწყობილობების ოპტიმიზაცია.
5. გამოვლენილია ინდუქციური დამუხტვის პროცესის მიმდინარეობაზე ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტური წინააღობის მნიშვნელოვანი როლი. ჩამოყალიბებულია მოთხოვნები გამტარობის მიხედვით ელექტროსეპარატორების დამუხტავი ელექტროდის კონსტრუქციული პარამეტრებისა და მასალის შერჩევის შესახებ.

6. დასაბუთებულია ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის დროს მისი ელექტროდთან ადგეზიის ძალის გაანგარიშების მეთოდიკა.
7. შემუშავებულია მოთხოვნები რათა უზრუნველყოთ:
  - ა) მინერალური ნაწილაკების ელექტროდის მიმართ ადგეზიის ძალის სიმძიმის ძალასთან შედარებით მცირე მნიშვნელობები;
  - ბ) ნაწილაკების დამუხტავ ელექტროდთან კონტაქტის რაციონალური ხანგრძლიობა;
  - გ) ელექტროსეპარატორების დამუხტავი ელექტროდების დამზადება გრაფიტის შემცველი მასალებისაგან.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Верещагин И. П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. Основы электрогазодинамики дисперсных систем. М., Энергия, 1974, С.480.
2. Олофинский Н. Ф. Электрические методы обогащения. М., Недра, 1977, С.519.
3. Ангелов А. И., Верещагин И.П., Ершов В.С. и др. Физические основы электрической сепарации Под ред. В.И.Ревнивцева. М., Недра, 1983, С.496.
4. Месеняцин А.И. Электросепарация в сильных полях. М., Недра, 1978, С.386.
5. Морозов В.С., Кривов С.А., Киричок А.С. Принцип работы и общие закономерности, лежащие в основе работы наклонного пластинчатого электростатического сепаратора типа ПЭСС. Деп. Информэлектро, № 224-эт, 1986.
6. Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. М., Наука, 1973. С.279.
7. Зимон А. Д. Адгезия пыли и порошков. М., Химия, 1976. С.431.
8. Олофинский Н.Ф., Новикова В.А. Трибоадгезионная сепарация. М. Недра, 1974. С.365.
9. Волков В.Н. К теории зарядки частиц на электродах. Новые методы исследования в теоретической электротехнике и инженерной электрофизике. Изд. Ивановского энергетического института. Иваново. 1974. Вып.3. С.31-37
10. Лебедев Н.Н., Скальская И.П. Сила, действующая на проводящий шарик, помещенный в поле плоского конденсатора. ЖТФ. Т. XXXII. Вып.3. 1962. С.375-378.
11. Коряков И.И., Мартинов Е.П. О максимальном заряде частиц при контактном способе зарядки. Электронная техника. 1966. Сер.10. Вып.3. С.12-16
12. Skowron M., Surowaik A., Syrek P., Ciesla A., Kraszewski W., Lachendrowicz D. The possibility of separation of electronic waste by means of their electrical properties. E3S Web of Conferences., 2016, Vol.10, 1-9.

13. Skowron M., Syrek P., Surowaik A. The application of the electrodynamic separator in minerals beneficiation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering., 2017, Vol.200, 1-9.
14. Kurgan E., Gas P., Mutual forces acting on chains of particles. 13 th selected Issues of Electrical Engineering and Electronics., 2016, pp. 355-364.
15. Бебеш А.А., Кармазин В.И. О зарядах, возникающих на минеральных частицах в поле коронного разряда. Сб. Трудов Днепропетровского горного института. 1965. Вып. 2. С.174-176.
16. Abouelsaad M., Abouelatta M., Abdelhadi S. Experimental and numerical investigations of the corona characteristics of a new Tri- electrode system for electrostatic separation processes. J. Appl.Phys. 2014, Vol.67, Num.3, pp.35-46.
17. Кармазин В.И., Бебеш А.А., Карасева В.Н. Влияние некоторых факторов на величину заряда минералов, получаемого в электрическом поле коронного разряда. Цветные металлы. 1965. №4, С.17-20.
18. Kachi M., Dascalescu L. Corona discharges in asymmetric electrode configurations. Proc. ESA Annual meeting on electrostatics. 2013. PP. 1-9.
19. Кармазин В.И., Бебеш А.А. О влиянии пленки реагента, адсорбированного на поверхности минералов, на величину их заряда в электрическом поле коронного разряда. Изв. ВУЗов. Горный журнал. 1965. №8. С.176-179.
20. Бебеш А.А. Об одном методе замера величины заряда, получаемого минералами в электрическом поле коронного разряда. Обогащение руд. 1965. №3 С.88-91.
21. Попков В.И., Глазов М.И. Кинетика зарядки и динамика волокон в электрическом поле. М. Наука, 1976. С. 128.
22. Попков В.И., Наги-заде А.Т. Биполярное заряджение волокон на электродах, способ обнаружения и предельная величина заряда. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1968. №1. С.56-63
23. Наги-заде А.Т. Зарядка частиц удлиненной формы на плоском электроде. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1966. №1. С.156-160.
24. Глазов М.И., Пимошин А.А. Влияние влажности среды на электродную зарядку хлопковых волокон и на время релаксации зарядов. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1969. № 5. С.117-121.

25. Наги-заде А.Т. Зарядка волокон на плоских электродах. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1966.№4. С.81-89.
26. Наги-заде А.Т. Силовое воздействие однородного электрического поля на одиночное волокно. Изв.Вузов. Электромеханика. 1967.№ I.
27. наги-заде А.Т. Электродное заряджение волокон различных длин. Докл. АН Азерб.ССР. 1971. № 6.
28. Мартинов В.А. К анализу электрического разряда между частицей и плоскостью. Электронная техника. Серия 10. Вып.3. 1968. С. 3-13.
29. Верещагин И.П., Кривов С.А., Морозов В.С. Электрическая сила, действующая на частицу на электроде. Изв.АН СССР. Энергетика и транспорт. 1984. № 5. С.87-94.
30. Верещагин И.П., Кривов С.А., Морозов В.С. Кинетика зарядки частицы и электрическая сила, действующая на нее при учете контактного сопротивления. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1987.№ 2. С.92-98.
31. Felici N.I. Forces et charges de petits objets en contact avec une e'lectrode affece'e d'un champ e'lectrique. Rev. Ge'nerale de L'Electricite'. 1966. V. 25. N 10. P.1145-1160
32. Болога М.К., Пушков В.В., Берков А.Б. Автоколебательное движение частиц в однородном электрическом поле. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1980. №4. С.109-116.
33. Ган. Прибор для получения малых точно известных электрических зарядов. Приборы для научных исследований. 1964. № 7. С.87-88.
34. Lower I. E. Fundamentals of electrical concentration of minerals. Mines Meg. V.50.N1. 1960. P. 20-27.
35. Шуй Р.Т. Полупроводниковые рудные минералы.М. Недра. 1979. С. 356.
36. Peterson I.W. Contact charging between a Borosilicate glass and Nickel. I. Appl. Phys. 1954. V. 25. N4. P. 501-504.
37. Кирхберг н., Шиккель А. К вопросу о количественной оценке процессов разделения в электростатическом поле. VIII Международный конгресс по обогащению полезных ископаемых. Л. Изд.инст. Механобр. 1968. С. 132-147.

38. Niedoba T. Multi-parameter data visualization by means of principal component analysis in qualitative evaluation of various coal types. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2014, vol.50,num.2, pp.575-589
39. Наремский Н.К., Недранец В.С., Песчаный Е.Ф. Стартовые параметры поля при сепарации твердой фазы фэрозоля. *Физика аэродисперсных систем.* Вып. 17. 1978. С. 39-43.
40. Обидченко А. В., Константинова И.А., Курочкина М. И. Экспериментальное исследование особенностей индукционной перезарядки тонкодисперсных материалов. *Журн. Прикл. Химии.* 1976. Т. 49. Вып. 3. С. 692.
41. Обидченко А.В., Константинова И.А., Курочкина М. И. Исследование сепарации в электрическом поле при контактной(индукционной) зарядке. *Журн. прикл. химии.* 1976. Т. 49. Вып. 3. С. 697.
42. Обидченко А. В., Константинова И.А., Курочкина М.И., Зажда С. А. Дезагрегирование аэрозольных частиц в электрическом поле. *Физика аэродисперсных систем.* Киев.-Одесса. Виша школа. 1977. Вып. 15. С. 20-24.
43. Обидченко А. В., Константинова И.А., Курочкина М.И. Особенности контактной перезарядки аэрозольных частиц металлов при ударе об электрод. *Физика аэродисперсных систем.* Киев.-Одесса. Виша школа. 1977. Вып . 15 С. 25-29.
44. Верков А. Б., Болога М.К., Горбис З.Р., Пушков В.В. Распределение концентрации электропроводных частиц при автоколебательном движении в плоском конденсаторе. *Электронная обработка материалов.* 1979. №6. С. 38-45.
45. Мяздриков О.А. Электродинамическое псевдооживление дисперсных систем. *Л. Химия.* 1984. С.432.
46. Ангелов А.И., Пашин М.М., Лосаберидзе С.И. Измерение зарядов частиц кварца и фосфата при электростатической сепарации. *Изв. ВУЗов. Горный Журнал.* 1977. №4. С. 138-142.
47. Морозов В.С., Движение и ориентация частиц различной формы в поле коронного разряда. Автореф. Дисс...канд.техн.наук. М., 1977.

48. Верещагин И.П. Мутоды расчета электрического поля и поведение частиц при униполярном коронном разряде. Автореф. Дисс...докт. техн. наук. М.,1975.
49. Сливков И.Н. Электроизоляция и разряд в вакууме. М. Атомиздат. 1972. С.453.
50. Горгошидзе А.Р. и др. Устройство для определения предельного электрического заряда проводящих частиц при контактной электризации. СССР., А.С. №115740, 8.01.1985, Заявка №3669511, Приоритет изобретения 30.11.1983.
51. Верещагин И.П., Морозов В.С., Пашин М.М. Зарядка проводящих несферических частиц в поле коронного разряда. Электричество. 1975. № 2. С. 44-48.
52. Тищенко А. Г., Герусов В.М., Манжелей С.А. Пластинчатый электросепаратор для доводки титано-циркониевого концентрата. Сб. научн. тр. Исследование процесса электросепарации и разработка конструкции электросепараторов. Л. ОНТИ ин-та Механобр., 1981.
53. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М. Энергия. 1973. С. 476.
54. Справочник по обогащению руд. Основные процессы. Под ред. О.С.Богданова. М. Недра. 1983. С. 276.
55. Хольм Р. Электрические контакты. М. ИИЛ. 1961 С.329.
56. Леб Л. Статическая электризация. М.-Л. Госэнергоиздат. 1963. С.396.
57. Месеняшин А.И. Разделение частиц в трубчатом электростатическом сепараторе. Обогащение руд. 2002. №5. С. 27-33.
58. Mesenyashin A.I., Kravets I.M. Radial electrostatic separator. Mineral Engineering. 2002. N 15. PP. 193-196.
59. Mesenyashin A.I., Novel tubular electrostatic separators/ Proc. Of the XXI International Mineral Processing Congress. 2000.,Rome, Italy. July. PP. 23-27.
60. Месеняшин А.И. Зарядка частиц в электростатических полях сепараторов. Обогащение руд. 2001. №2. С. 22-27.



61. Бочаров В.А., Игнаткина В.А. Тухнология обогашения золотосодержащего сырья. М: Изд. Дом «Руда и металлы», 2003. 407с.
62. Соложенкин П.М., Бондаренко Е.В., Чертова Е.В. Обогащение сурьмяных руд Забайкалья. Обогащение руд, 2008 №1, с.15-19.
63. Костюкова Т.П., Саубанов В.С. Моделирование электростатических полей коронного разряда в устройствах сепарации сыпучих материалов. Современные Наукоемкие Технологии. 2017. №5. С. 35-39.
64. Горгошидзе А.Р. и др. Способ измерения силы адгезии полупроводящих частиц к электроду. СССР., А.С. №1612727. 8.08.1990, Заявка №4625863. Приоритет изобретения 26.12.1988.
65. Верещагин И.П. Высоковольтные электротехнологии М., МЭИ. 1999.
66. Верещагин И.П., Горгошидзе А.Р., Кривов С.А., Морозов В.С. Исследование процесса индукционной зарядки частиц. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. №1. 1986 С.127-135.
67. Горгошидзе А.Р., Морозов В.С. Роль материала электрода в процессе зарядки и отрыва частиц от электрода в электрическом поле сепаратора. Электронная обработка материалов. Л. №4. 1990. С. 35-37.
68. გორგოშიძე ა., ბიბილური მ. მიკრონაწილაკების მუხტების განსაზღვრა მათი ინდუქციური დამუხტვის დროს. შრომები „მართვის ავტომატიზირებული სისტემები“. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. N1(23). 2017. გვ. 176-179.
69. გორგოშიძე ა., ჩახიანი ზ. დამუხტული ნაწილაკების მუხტებისა და დამუხტვის დროის განაწილების ფუნქციის ანალიზი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. განათლება. 3(22). 2018. გვ. 165-170.
70. გორგოშიძე ა. ერთგვაროვან ელექტრულ ველში არასფერული მინერალური ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის მინიმალური მუხტების განსაზღვრა. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. განათლება. N1(24) 2019. გვ.206-212.
71. Шихов. Н.В. Обоснование параметров барабанного коронно-электростатического сепаратора повышенной удельной производительности. Автореф. Дисс...канд.техн. наук. Екатеринбург. 2010.