

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ალექსანდრე გორგოშიძე

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის ფიზიკური
მოდელის დამუშავება

სადოქტორო პროგრამა - საინჟინრო ფიზიკა

შიფრი - 0404

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2019 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში, ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ფიზიკის დეპარტამენტში. გარკვეული კვლევები ჩატარებულია მოსკოვის ენერგეტიკის ინსტიტუტის მაღალი ძაბვების ტექნიკისა და ელექტროფიზიკის კათედრაზე და თბილისის ელექტრონულ-იონური ტექნოლოგიის კვლევით სამეცნიერო ინსტიტუტში.

ხელმძღვანელი: ფიზ. მათ. მეცნ. დოქტორი
პროფესორი ზურაბ ჩაჩხიანი

რეცენზენტები:

.....

დაცვა შედგება 2019 წლის „-----“ ----- საათზე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს სხდომაზე, კორპუსი -----, აუდიტორია -----
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში, ხოლო ავტორეფერატისა ფაკულტეტის ვებ-გვერდზე

საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოს მდივანი:
პროფესორი თინათინ კაიშაური

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

სასარგებლო წიაღისეულის გამდიდრების მეთოდებს შორის ერთ-ერთი წამყვანი ადგილი უჭირავს მინერალური ნაწილაკების განცალკევებას (სეპარაციას) მათი გამტარობის მიხედვით, რომელიც ხორციელდება დოლურ ელექტროსტატიკურ ან დახრილ ფირფიტოვან ელექტროსეპარატორებში. ამ მოწყობილებებში მინერალური ნაწილაკების სელექციური დამუხტვის პროცესი ხორციელდება ინდუქციური (კონტაქტური) დამუხტვის გზით.

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის დროს დამუხტავ ელექტროდზე მიმდინარე პროცესები, კერძოდ კი, მათ მიერ მიღებული მუხტების ცვლილება დროში და ამასთან ერთად, მათზე მოქმედი ძალების ბალანსი, განაპირობებენ ნაწილაკების მოწყვეტას დამუხტავი ელექტროდიდან და შესაბამისად მათი განცალკევების ეფექტურობას გამტარობის მიხედვით.

თემის აქტუალობა. მრეწველობაში ელექტრული სეპარაციის ფართო გამოყენებას ხელს უშლის როგორც დოლური ისე დახრილ ფირფიტოვანი ელექტროსეპარატორების კონსტრუქციული ნაკლოვანობები, ასევე ფიზიკური პროცესების და პირველ რიგში ნაწილაკების დამუხტვის პროცესის არასაკმარისი შესწავლა. მიუხედავად ელექტროსეპარატორების კონსტრუქციული შესრულების სიმარტივისა სხვა გამამდიდრებელ მანქანებთან შედარებით, დოლურ და ფირფიტოვან სეპარატორებში თვით სეპარაციის ფიზიკური ორგანიზაცია დაკავშირებულია ზოგიერთ შეზღუდვებთან, რაც ხელს უშლის ამ პროცესის პოტენციურ შესაძლებლობებს. ამის გამო სეპარაცია ხორციელდება ცალკეული აგრეგატის დაბალი მწარმოებლურობით ნაწილაკების სიმსხოს ან შემადგენლობის, ასევე განსაცალკევებელი მინერალების სხვადასხვა პარამეტრების ცვლილებისას გაყოფის ეფექტურობა მკვეთრად მცირდება.

ელექტრული სეპარაციის ფართო გამოყენების შეფერხების ძირითადი მიზეზი მდგომარეობს იმაში, რომ სეპარატორების

კონსტრუირება ხდება ემპირულ საფუძველზე, ტექნოლოგიური გამოცდილების გათვალისწინებით და არა ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ფიზიკური საფუძვლების სიღრმისეული კვლევისა და ანალიზის მიხედვით

ინდუქციური დამუხტვის პროცესს, როგორც სხვადასხვა მინერალურ ნაწილაკებზე სელექციური მუხტის წარმოქმნის საფუძველს, აქვს დიდი შესაძლებლობები რომ განვახორციელოთ მინერალების ელექტრული გაყოფა. პრაქტიკულად ყველა მინერალური ნაწილაკები, რომელთა გამტარობა ერთმანეთისგან განსხვავდება რამოდენიმე რიგით შესაძლებელია განცალკევებული იქნან ელექტრული მეთოდებით.

მიუხედავად ამისა, გამტარობის მიხედვით ელექტრული სეპარაციის შესაძლებლობები ამოწურული არ არის. არ არსებობს რწმენა იმისა, რომ ეს პროცესები მიმდინარეობენ ოპტიმალური გზით. სიძნელეები დაკავშირებულია ელექტროსეპარაციის გამოყენებასთან სულ ახალი და ახალი საბადოების მიმართ, რისთვისაც გვიხდება ჩავატაროთ ექსპერიმენტული ლაბორატორიული და ნახევრად სამრეწველო ტიპის ფართო მოცულობის კვლევები. ამ სიძნელეების თავიდან აცილება შესაძლებელი იქნებოდა თუ გვეცოდინებოდა თუ როგორ მიმდინარეობს ელექტროსეპარაციის პროცესი და პირველ რიგში ინდუქციური დამუხტვის პროცესი.

ნაშრომის მიზანს წარმოადგენს ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის კანონზომიერებების ექსპერიმენტული კვლევა და გამტარობის მიხედვით ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების განცალკევების ეფექტური უზრუნველყოფის რეკომენდაციების შემუშავება.

ამ ამოცანის მისაღწევად საჭიროა გადავჭრათ შემდეგი ამოცანები:

- შევიმუშაოთ ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდოლოგია
- ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის თეორიული წარმოდგენების შესაბამისობის შემოწმება ექსპერიმენტულად მიღებულ შედეგებთან.

- ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვისას, ნაწილაკის მიერ მუხტის მიღების პროცესში ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის არსებული კონტაქტის როლის ანალიზი
- ელექტროსეპარატორებში ნაწილაკების დამუხტვის პროცესის რაციონალური ორგანიზაციის რეკომენდაციების ჩამოყალიბება, რომლის დროსაც ხორციელდება ნაწილაკების განცალკევება მათი გამტარობის მიხედვით.

ნაშრომში წარმოდგენილი კვლევის შედეგების პრაქტიკული დირექტულები მდგომარეობს შემდეგში:

1. შემუშავებულია ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრების გაანგარიშების რეკომენდაციები;
2. დადგენილია მეტალური დამუხტავი ელექტროდების ჟანგეული ფენის როლი ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესში;
3. შემუშავებულია ჟანგეული ფენის მავნე ზემოქმედების უვნებელყოფის რეკომენდაციები, დასაბუთებულია გამტარობის მიხედვით ელექტროსეპარატორების დამუხტავი ელექტროდების დამზადება გრაფიტის შემცველი მასალებისაგან.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე და დასაცავად გამოტანილი დებულებები

1. შემუშავებულია ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური ექსპერიმენტული კვლევის მეთოდოლოგია, რომელიც საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ პრაქტიკულად იმ პარამეტრების სრული კომპლექსი, რომლებიც ახასიათებენ ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესს.

2. შემოთავაზებულია და დასაბუთებულია ნაწილაკების ზღვრული მუხტის განსაზღვრის ხერხი, რომელიც დაფუძნებულია ნაწილაკების მოწყვეტის ზღვრულ (მინიმალური) ელექტრული ველის დაძაბულობის გაზომვაზე.

3. პირველად იქნა მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემები, რომელიც ასახავს მუხტის დროში ცვლილებას რეალური ინდუქციური დამუხტვის პროცესში, ნაწილაკების პარამეტრების, გარემომცველი გარემოს და ელექტრული ველის დამაბულობის ფართო დიაპაზონში ცვლილების დროს.

4. ჩატარებული იქნა ინდუქციური დამუხტვის თეორიული წარმოდგენების შედარება ექსპერიმენტულად მიღებულ დამოკიდებულებებთან, რომელიც საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ ნაწილაკების ქცევის განსაკუთრებული ხასიათი, ცნობილ თეორიულ წარმოდგენებსა და ექსპერიმენტულად მიღებულ შედეგებს შორის განსხვავების ძირითადი მიზეზები და შევიძუშაოთ ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ფიზიკური მოდელი, რომელიც ითვალისწინებს რეალურად მოქმედი ფაქტორების მთელ ერთობლიობას.

5. გამოვლენილია ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტური წინაღობის მნიშვნელოვანი როლი ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე, რაც საშუალებას გვაძლევს ჩამოვყალიბოთ მოთხოვნები გამტარობის მიხედვით ელექტროსეპარატორების დამუხტავი ელექტროდის მასალისა და მისი კონსტრუქციული პარამეტრების შერჩევის მიხედვით.

6. მიღებულია ადგეზიის ძალის რაოდენობრივი შეფასებები და განგარიშების მეთოდოლოგია. განსაზღვრულია ნაწილაკის ელექტროდთან ადგეზიის ძალის როლი ძალთა ბალანსში, რომელებიც მოქმედებენ ნაწილაკზე ინდუქციური დამუხტვის დროს.

7. ჩამოყალიბებულია მოთხოვნები ნაწილაკების დამუხტვისა და მოწყვეტის პროცესის რაციონალური ორგანიზაციის შესახებ მათი გამტარობის მიხედვით ელექტროსეპარაციის დროს.

ნაშრომის აპრობაცია.

1. გორგოშიძე ა. ნაწილაკების დამუხტავი ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა, როგორც ინდუქციური დამუხტვის პროცესის გარე

ინტეგრალური მახასიათებელი. მოხსენების თეზისები, 85-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, 2018, გვ. 423;

2. გორგოშიძე ა., მინერალური ნაწილაკების ელექტროფიზიკური პარამეტრების კვლევა ინდუქციური დამუხტვის დროს. მოხსენების თეზისები, 86-ე ღია საერთაშორისო კონფერენცია, 2019, გვ. 272.

პუბლიკაციები: დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია 9 სამეცნიერო ნაშრომში. ძირითადი პუბლიკაციების ნუსხა მოყვანილია ავტორეფერატის ბოლოში.

ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა: დისერტაციის მოცულობა შეადგენს 169 ნაბეჭდ გვერდს. დისერტაცია შედგება რეზიუმესაგან(ორ ენაზე), სარჩევის, შესავალის, ხუთი თავის, ილუსტრაციის სახით მოყვანილი 47 ნახაზის, 12 ცხრილის, დასკვნისა და 72 დასახელების ლიტერატურისაგან.

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში მოცემულია ნაშრომის ზოგადი დახასიათება, ნაჩვენებია თემის აქტუალობა, ჩამოყალიბებულია ნაშრომის მიზანი, მისი მეცნიერული სიახლე და პრაქტიკული ღირებულება, დასახელებულია კვლევის ამოცანები.

პირველ თავში აღწერილია გვირგვინულ- ელექტროსტატიკური დოლური და დახრილფირფიტოვანი ელექტროსტატიკური სეპარატორები, რომლებიც წარმოადგენენ ყველაზე უფრო გავრცელებულ ელექტროსეპარატორებს გამტარობის მიხედვით. ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესისა და დამუხტავ ელექტროდზე მისი ქცევის შესწავლისათვის განხილული იქნა ელექტროსტატიკური სეპარატორის ფიზიკური მოდელი - ბრტყელი ჰორიზონტალური კონდენსატორი, დასაბუთებულია აუცილებლობა და მართებულობა რეალური ელექტროსტატიკური სეპარატორის ასეთი იდეალიზაცია.

დამმუხტავ ელექტროდზე ნაწილაკის ქცევის ანალიზისთვის განხილული იყო ყველა ის ძალები, რომლებიც დამუხტვის პროცესში მოქმედებდნენ ნაწილაკზე. ამ ძალებს მიეკუთვნება სიმძიმის ძალა F_g , ცენტრისკენული ძალა F_c , ადგეზიის ძალა $F_{ადგ}$, პონდერომოტორული ძალა F_E და ელექტრული (კულონური) ძალა F_e . ელექტრული ძალის განხილვის დროს მნიშვნელოვანია გავითვალისწინოთ ელექტრული წარმოშობის სხვა ძალებიც, ისეთების როგორცაა სარკისებური ანარეკლის ძალა $F_{ს.ა}$, ძალა, რომელიც განპირობებულია ნაწილაკის პოლარიზაციით. ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტისას და მისი გადაადგილებისას დაახლოებით ნაწილაკის ზომების ტოლ მანძილზე, სარკისებური ანარეკლის, ორმაგი ელექტრული ფენისა და ადგეზიის ძალების მოქმედება ნაწილაკზე შეიძლება უგულვებელვყოთ.

ნაწილაკის ელექტროდზე ქცევის ანალიზისთვის ყველაზე რთულ საკითხს წარმოადგენს ნაწილაკზე მოქმედი ადგეზიის ძალის თეორიული განსაზღვრა. ადგეზიის ძალის შეფასების თეორიული მონაცემები გვაძლევენ მისი მნიშვნელობების ძალზე დიდ გაბნევას და ზოგიერთ შემთხვევაში ურთიერთსაწინააღმდეგო დამოკიდებულებებს სხვადასხვა პარამეტრების მიხედვით. ეს გამოწვეულია ერთის მხრივ ადგეზიის ძალაზე ძალიან ბევრი ფაქტორების გავლენით და მეორეს მხრივ გაზომვის სირთულეებით. შესაბამისად, ადგეზიის ძალის გაანგარიშება ვერ ხერხდება. ამის გამო, ადგეზიის ძალის განსაზღვრის ძირითად მეთოდად რჩება მისი ექსპერიმენტული შეფასებები. გარდა ამისა, სხვადასხვა ფაქტორების ძლიერ გავლენას ადგეზიის ძალაზე მას აქცევს როგორც ალბათურ სიდიდეს. ამიტომ მისი ყველაზე უფრო სრულყოფილი მახასიათებელი იქნება ადგეზიის ძალის განაწილების ფუნქცია მისი მნიშვნელობების მიხედვით $F(F_{ადგ})$, რომელიც განსაზღვრავს კონტაქტის არსებობის შემთხვევაში ამ ძალის წარმოშობის ალბათობას, რომლის მნიშვნელობა მოცემულ მნიშვნელობაზე ნაკლები იქნება.

ადგეზიის ძალის მეორე მახასიათებელ პარამეტრად შემოგვაქვს ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა, რომელიც გარკვეულ პირობებში განისაზღვრება როგორც ელექტროდიდან მოწყვეტილი ნაწილაკების რაოდენობის ფარდობა ნაწილაკების მთლიან რაოდენობასთან.

ინდუქციური დამუხტვის პროცესის წარმოდგენისათვის საჭიროა ინდუქციური დამუხტვის პროცესის მიმდინარეობის აღწერა. საწყის მომენტში ელექტრული ველის გავლენის შედეგად ნაწილაკი პოლარიზდება. მის ბოლოებზე წარმოიქმნება ბმული მუხტები. ისინი ნაწილაკის შიგნით ქმნიან საკუთარ ველს, რაც იწვევს თავისუფალი მუხტების ნაკადს. ამის შედეგად ელექტრული ველი ნაწილაკის შიგნით მცირდება და ბოლოს დამუხტვის პროცესი წყდება.

საწყის მომენტში, როდესაც ნაწილაკი პოლარიზებულია, ხოლო ჭარბი მუხტი ნულის ტოლია, ელექტრული ძალა განპირობებულია პოლარიზებული მუხტების უპირატესი ურთიერთქმედებით. ამის გამო, ამ მომენტისათვის ნაწილაკზე მოქმედი ძალა მიმართულია ელექტროდისაკენ და ის წარმოადგენს ნაწილაკზე ელექტროდის მიმართ დაწოლის ძალას. ჭარბი მუხტების ზრდასთან ერთად პოლარიზაციის მუხტების რაოდენობა მცირდება, ერთდროულად იზრდება ჭარბ მუხტებსა და ელექტრულ ველს შორის ურთიერთქმედების ძალა და დამუხტვის პროცესის ბოლოს ის ხდება ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის მიმართულების. ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტისათვის საჭიროა შესრულდეს შემდეგი პირობა $F_{ელ} \geq F_g + F_{ადგ}$.

შემდგომ განყოფილებაში მოყვანილია ლიტერატურული მონაცემები ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის შესახებ. ნაჩვენებია, რომ გამტარი სფერული ნაწილაკებისათვის, რომელიც ელექტროდზე იმუხტება ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტის მეშვეობით, მიღებული შედეგები კარგად ეთანხმება მის თეორიულ მნიშვნელობებს. ზოგიერთ შრომებში, ინდუქციური დამუხტვის პროცესში ნაწილაკის ზღვრული მუხტის განსაზღვრის დროს, არ ითვალისწინებენ მისი ორიენტაციის ცვლილებას

ელექტრული ველის გასწვრივ, რაც წარმოადგენს იმ განსხვავების მიზეზს, რომელიც წარმოიშობა მის თეორიულ და ექსპერიმენტულ მნიშვნელობებს შორის.

ნაწილაკის ელექტროდთან განმუხტვის პროცესის ექსპერიმენტული კვლევის დროს კეთდება დასკვნა იმის შესახებ, რომ განმუხტვის პროცესი მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტის წინააღმდეგობაზე და ნაწილაკის ზედაპირის მდგომარეობაზე, მაგრამ არ არსებობენ შედარებები თეორიულ მონაცემებთან, რაც არ გვაძლევს საშუალებას გავაკეთოთ რაიმე სახის პროგნოზი ამ პროცესის მიმდინარეობის შესახებ.

მრავალ შრომაში მუხტების ექსპერიმენტალური მნიშვნელობები და ნაწილაკის გამტარობები არ ეთანხმება მის თეორიულ დამოკიდებულებებს.

განსაკუთრებულ ინტერესს იწვევს ნაწილაკის დამუხტვის კინეტიკის ხასიათი, რელაქსაციის დრო და ნაწილაკის ჩამოსრიალების დრო (ან დოლის ელექტროდზე ყოფნის დრო). ეს საკითხები, რამოდენიმე ტიპის მინერალებისათვის, გამოკვლეულია სხვადასხვა პარამეტრების ცვლილების მცირე დიაპაზონში, რაც საშუალებას არ გვაძლევს გამოვავლინოთ ინდუქციური დამუხტვის კინეტიკის ხასიათი.

ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობები განხილულია მრავალი ავტორის მიერ. ზოგიერთი მათ შორის არ ითვალისწინებს სხვადასხვა ფაქტორებს, მაგალითად ისეთებს, როგორცაა ძალა, რომელიც აღიძვრება ნაწილაკის პოლარიზაციის შედეგად, ადგეზიის ძალა და ა. შ., რასაც მივყავართ მოწყვეტის პირობების მცდარი წარმოდგენებისაკენ.

ზოგიერთ შრომებში ადგეზიის ძალა განიხილება როგორც ფუნქციები, ოღონდ ამ ფუნქციების სახე მოყვანილი არ არის და განიხილება მხოლოდ მისი უკიდურესი მნიშვნელობები.

პრაქტიკულად ყველა ნაშრომში არ იცვლებიან ან არ ფიქსირდებიან ის პარამეტრები, რომლებიც განსაზღვრავენ დამუხტვის პროცესს, ისეთების

როგორცაა ტემპერატურა, გარემოს ნესტიანობა, ნაწილაკების ზომები, ელექტრული ველის დაძაბულობა და სხვა.

ამის გამო არსებული კვლევები წარმოადგენენ ცალკეულ მონაცემებს ნაწილაკების დამუხტვისა და მოწყვეტის დაძაბულობის შესახებ, რომლებიც არ ექვემდებარებიან განზოგადობას.

ამის გამო, პრაქტიკულად შეუძლებელია ჩავატაროთ ექსპერიმენტული მონაცემების შედარება მის თეორიულ შედეგებთან ასევე შევასრულოთ ჩატარებული კვლევების განზოგადობა.

ამასთან ერთად, ლიტერატურული მონაცემებიდან შეიძლება გამოვავლინოთ ის ძირითადი ფაქტორები და პარამეტრები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე. ლიტერატურული მონაცემები ინდუქციური დამუხტვის შედეგების შესახებ გვეუბნება, რომ ნაწილაკს ელექტროდის მიმართ დამუხტვის პროცესში შეუძლია შეიცვალოს თავისი მდგომარეობა და შესაბამისად თავისი კონტაქტური წინაღობა ელექტროდთან. მნიშვნელოვან ფაქტს წარმოადგენს აგრეთვე ის, რომ ყველა ნაწილაკი არ წყდება ელექტროდიდან მიუხედავად იმისა, რომ სრულდება მათი მოწყვეტის პირობები.

ლიტერატურული მონაცემებიდან აგრეთვე რჩება გაურკვეველი ის, რომ ატარებს თუ არა მუხტის ცვლილების დამოკიდებულების ფუნქცია დამუხტვის დროზე ექსპონენციალურ ხასიათს.

იმ მუხტების მნიშვნელობების პროგნოზირებისათვის, რომელიც წარმოიქმნება ინდუქციური დამუხტვის შედეგად, აუცილებელია შევიმუშაოთ გაზომვის ჩატარების მეთოდიკა. ლიტერატურულ წყაროებში ასეთი მეთოდიკა არ არსებობს. ექსპერიმენტული კვლევის ასეთმა მეთოდიკამ უნდა უზრუნველყოს გასაზომ სიდიდეთა კომპლექსური ერთიანობა, რომლებიც დაახასიათებს ინდუქციური დამუხტვის პროცესს, კერძოდ კი მუხტს, დამუხტვის დროს, ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობას, ადგეზიის ძალას, ინდუქციური დამუხტვის დროის მუდმივას და ნაწილაკების ზღვრულ მუხტს, როდესაც ნაწილაკების პარამეტრები,

ელექტრული ველის დაძაბულობის მნიშვნელობები, დამმუხტავი ელექტროდის ტიპი და გარემო პირობები (სინესტე, ტემპერატურა) იცვლება ფართო დიაპაზონში. მიღებული ექსპერიმენტული შედეგები, რომლებიც ასახავენ ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის კანონზომიერებებს, საფუძვლად უნდა დაედოს გამტარობის მიხედვით ელექტროსეპარატორებით ნაწილაკების განცალკევების ყველაზე მაღალი ეფექტურობის რეკომენდაციების შემუშავებას.

ზემოთჩამოთვლილი საკითხები ჩამოყალიბებულია როგორც კვლევის ძირითადი ამოცანები.

მეორე თავი ეძღვნება ექსპერიმენტული დანადგარის აღწერასა და ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრების გაზომვის ჩატარების მეთოდებს. ექსპერიმენტული დანადგარი საშუალებას გვაძლევს ინდუქციური დამუხტვის პროცესის კომპლექსური კვლევის ჩატარების შესაძლებლობას, რომელიც თავისთავში შეიცავს დამუხტვის ყველა პარამეტრების ერთდროულ გაზომვას.

ექსპერიმენტული დანადგარი შედგება ელექტრული და ოპტიკური ნაწილებისაგან. დანადგარის ელექტრული ნაწილი ემსახურება ნაწილაკის უშუალო დამუხტვას და იმ სიგნალის გამომუშავებას, რომელიც უზრუნველყოფს ნაწილაკის დამუხტვის დაწყების მომენტის დაფიქსირებას. დანადგარის ოპტიკური ნაწილის დანიშნულებაა მოახდინოს ნაწილაკის დამთავრების რეგისტრაცია ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის მომენტში.

ნაწილაკის დამუხტვის დაწყების რეგისტრაცია ხორციელდება შემდეგნაირად. ვაკუუმური კომპუტატორის ჩართვის შემდეგ მუხტის დამგროვებელი კონდენსატორიდან ძაბვა მიეწოდება ტევადურ-რეზისტორულ ძაბვის გამყოფს და მუშა კონდენსატორს, რომლის ქვედა ფირფიტაზე იმყოფებიან გამოსაკვლევნი ნაწილაკები. ძაბვის გამყოფიდან სიგნალი ერთდროულად მიეწოდება ოსცილოგრაფის გარედან გაშვების შესასვლელს, რომელიც მუშაობს მომლოდინე გაშვების (სხივის გაშლის)

რეჟიმში. სიგნალის მიღების შემდეგ ოსცილოგრაფი გაეშვება, რითაც ფიქსირდება ნაწილაკის დამუხტვის დაწყების მომენტი.

ნაწილაკი იწყებს დამუხტვას და როდესაც მუხტის სიდიდე მიაღწევს გარკვეულ მნიშვნელობას, ის წყდება მუშა კონდენსატორის ქვედა ელექტროდიდან და თავისი მოძრაობისას ვერტიკალურად ზევით, ის გადაკვეთს ლაზერის სხივს, რომელიც გადის ნაწილაკის ზემოთ მისი ზედა ზედაპირის უშუალო მახლობლობაში. ნაწილაკი ელექტროდიდან მოწყვეტისას გადაკვეთს ლაზერის სხივს და ამ დროს ის თავისი ზედაპირიდან აირეკლავს მას, რომლის ნაწილი ხვდება ფოტოელექტრული გამამრავლებლის (ფეგ) ეკრანზე. ელექტრული სიგნალი ფეგ-დან მიეწოდება ოსცილოგრაფის ვერტიკალურად გადამხრელ ფირფიტებს, რითაც ფიქსირდება ნაწილაკის დამუხტვის დამთავრების დრო.

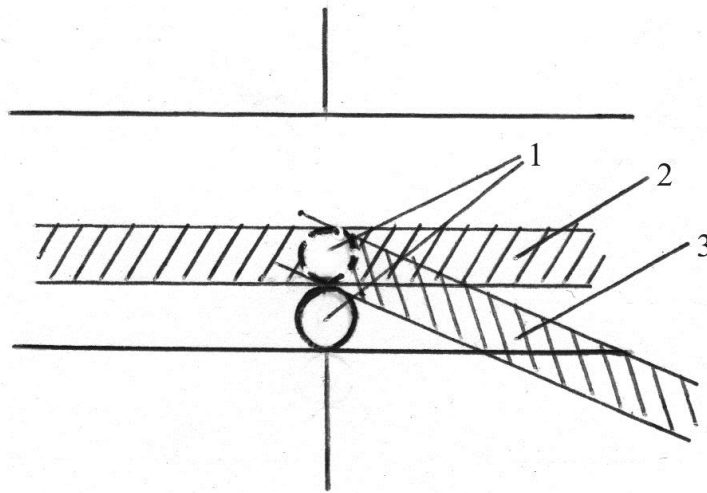
ელექტრული და ოპტიკური სქემის პარამეტრები ისეა შერჩეული, რომ ამ ელემენტებით გამოწვეულმა გაზომვის ცდომილებამ არ გადააჭარბოს 0,1%-ს.

აღნიშნული დანადგარით შესაძლებელია ექსპერიმენტული კვლევები განხორციელდეს როგორც ერთეულოვან ნაწილაკებზე ასევე ნაწილაკთა ჯგუფზე. ნაწილაკთა რაოდენობა, რომლებიც შესაძლებელია ერთდროულად გაიზომოს, განისაზღვრება ცალკეული ნაწილაკების მოწყვეტის დროით ($t_{გაზ}$), ოსცილოგრაფის სხივის გაშლის სიჩქარით ($t_{გაშ}$) და იმპულსის ხანგრძლიობით ($t_{იმპ}$). როდესაც $t_{გაზ} \gg t_{იმპ}$, მაშინ ოსცილოგრაფის ეკრანზე ვლევულობთ რამდენიმე ცალკეულ იმპულსს, რომელიც საშუალებას გვაძლევს დავაფიქსიროთ ცალკეული ნაწილაკების დამუხტვის დრო.

ნაწილაკის გაზომილი დამუხტვის დრო განისაზღვრება მისი გამტარობით. შესაბამისად, ის ნაწილაკები, რომლებიც ხასიათდებიან გამტარ ნაწილაკებთან ახლო თვისებებით გაზომვები უნდა ჩატარდეს ერთეულ ნაწილაკებზე. ამ შემთხვევაში გაზომვების ჩატარება ნაწილაკთა ჯგუფებზე არის უკიდურესად გამწვანებული. ნაწილაკთა ჯგუფებისათვის

გაზომვების ჩატარების დროს, სხივის გაშლის სიჩქარე აირჩევა იმის გათვალისწინებით, რომ უზრუნველყოფილი იქნას ნაწილაკების მთლიანი რაოდენობიდან მაქსიმალური რაოდენობის ნაწილაკების მოწყვეტის დროის ფიქსაცია. დანარჩენი ნაწილაკების მოწყვეტის დროის ფიქსაცია ხდება წამზომის საშუალებით, რომელიც ჩაირთვება მუშა კონდენსატორზე მაღალი ძაბვის მიწოდების მომენტში.

მუშა კონდენსატორის მოწყობილობა ნაჩვენებია ნახ.1-ზე:



ნახ. 1. მუშა კონდენსატორის მოწყობილობა

1-გამოსაკვლევ ნაწილაკი, 2- გატარებული ლაზერის სხივი 3- არეკლილი ლაზერის სხივი

დამუხტული ნაწილაკის ზედა ელექტროდიდან მოხსნის შემდეგ, რომელიც ხორციელდება იზოლირებული ფირფიტის საშუალებით, მას ვათავსებთ ელექტრომეტრში და მისი მუხტის გაზომვის შემდეგ, მას ისევ ვათავსებთ მუშა კონდენსატორის ქვედა ფირფიტაზე ექსპერიმენტის იმავე ნაწილაკზე გამეორების მიზნით.

მუშა კონდენსატორის ქვედა ელექტროდის კონსტრუქციული შესრულება საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ სხვადასხვა ფაქტორების გავლენა ინდუქციური დამუხტვის პროცესზე, კერძოდ გამოსაკვლევ ნაწილაკების გახურება ოთახის ტემპერატურიდან 300°C-მდე დიაპაზონში,

დამმუხტავი ელექტროდის ვიბრაცია, რომლის ამპლიტუდა რეგულირდება ელექტრომაგნიტზე მიწოდებული ძაბვის საშუალებით.

მუშა კონდენსატორის ზედა ელექტროდი დაფარულია იზოლირებული მასალისაგან. ამის გამო დამუხტული ნაწილაკები, რომლებიც ქვედა ელექტროდიდან მოწყვეტის შემდეგ მიემართებიან ზედა ელექტროდისაკენ, მათზე არსებული მუხტის გამო მიეკვრებიან მას. ეს საშუალებას გვაძლევს შევინარჩუნოთ ამ ნაწილაკების მუხტები და მაღალი ძაბვის მოხსნის შემდეგ გავზომოთ ისინი. გარდა ამისა, ამით თავიდან ავიცილებთ ნაწილაკების გადამუხტვას ზედა ელექტროდზე და მათ უკუ მოძრაობას ქვედა ელექტროდისაკენ. ეს გამოიწვევდა ოსცილოგრაფის ეკრანზე ერთი და იმავე ნაწილაკიდან რამოდენიმე იმპულსის წარმოქმნას.

გარემოს სინესტის ცვლილებას ვახდენდით მუშა კონდენსატორის გარშემო არსებული მცირე ზომის სივრცეში წყლის აორთქლების გზით.

ნაწილაკების გაზომილი დამუხტვის დრო $t_{დამ.გაზ.}$ წარმოადგენს თვით დამუხტვის დროის $t_{დამ.}$, ნაწილაკის ლაზერის სხივამდე ფრენის დროისა $t_{ფრენ.}$ და იმ დროისა, რომელიც აუცილებელია ოსცილოგრაფზე მიღებული იმპულსის დასაწყისის ფიქსაციისათვის $t_{ოსც.}$ დროთა ჯამს,

$$t_{დამ.გაზ.} = t_{დამ.} + t_{ფრენ.} + t_{ოსც.}$$

$t_{ფრენ.}$ და $t_{ოსც.}$ დროთა მნიშვნელობების შეფასებები გვიჩვენებენ, რომ გამოსაკვლევი მინერალებისათვის ისინი ბევრად ნაკლებია ვიდრე დამუხტვის დრო, ამიტომ $t_{დამ.გაზ.} = t_{დამ.}$

ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$KEq - F_g - F_{ადგ} \geq 0 \quad (1)$$

სადაც E - არის ერთგვაროვანი ელექტრული ველის დამაბულობა, K - კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს სარკისებური ანარეკლი ძალის მოქმედებას.

ნაწილაკის მუხტი ელექტრულ ველში იცვლება შემდეგი კანონით

$$q = q_{ზღვ.} (1 - e^{-\frac{t_{დამ.}}{\tau_{დამ.}}}) \quad (2)$$

სადაც $\tau_{დამ.}$ - არის ნაწილაკის დამუხტვის დროის მუდმივა, $q_{ზღვ.}$ - არის ნაწილაკის ზღვრული მუხტი.

მაშინ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა ჩაიწერება შემდეგნაირად

$$K E q = q_{ზღვ.} (1 - e^{-\frac{t_{დამ.}}{\tau_{დამ.}}}) - mg - F_{ადგ.} \geq 0 \quad (3)$$

აქედან გამომდინარე, მეტალური ნაწილაკებისათვის, რომელთათვისაც ($\tau_{დამ.} = 0$) გვექნება

$$K E q_{ზღვ.} - mg - F_{ადგ.} \geq 0 \quad (4)$$

ანუ ნაწილაკი ელექტროდიდან მოწყდება თავისი ზღვრული მუხტით

$$q = q_{ზღვ.} \quad (5)$$

დიელექტრული ნაწილაკებისათვის ($\tau_{დამ.} \neq 0$), ამიტომ ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის პირობა შესრულდება მაშინ, როდესაც

$$q < q_{ზღვ.} \quad (6)$$

დამუხტულ ნაწილაკებს, რომლებიც მიკრულია ზედა ელექტროდზე, ვხსნით იზოლირებული ფირფიტის საშუალებით და ვუშვებთ BK2-16 ელექტრომეტრის გამზომ უჯრედში.

მუხტის გაზომვის სიზუსტეზე შესაძლებელია გავლენა მოახდინოს როგორც ტრიბომუხტის წარმოქმნამ, რომელიც შეიძლება გაჩნდეს ნაწილაკის ზედა ელექტროდთან კონტაქტის დროს, ისე მუხტების გაჟონვის შედეგად როგორც ზედა ელექტროდისა და ფირფიტის იზოლაციის საშუალებით ისე ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტის დროს აღძრული ელექტრული განმუხტვის შედეგად.

ნაწილაკების მუხტების გაზომვის მართებულობა შემოწმებული იქნა სფერული მეტალური ნაწილაკების საშუალებით, რომლებიც დამმუხტავი ელექტროდიდან წყდებიან თავისი ზღვრული მუხტით (ნახეთ მოწყვეტის პირობა (6)). ამ შემთხვევაში ზღვრული მუხტის თეორიული

მნიშვნელობები და მათი ექსპერიმენტული შემოწმება ყველაზე უფრო სარწმუნოა.

ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ანალიზისათვის აუცილებელია ვიცოდეთ მათი ზღვრული მნიშვნელობები. სამუშაოში შემოთავაზებულია ნებისმიერი ფორმის დიელექტრიკული ნაწილაკების ზღვრული მუხტის გაზომვის ახალი მეთოდი და დადასტურებულია საავტორო უფლებით. შემუშავებული მეთოდი დაფუძნებულია ნაწილაკზე მოქმედ (3)-ში აღწერილ ძალთა ბალანსში ადგეზიის ძალის გამორიცხვის შესაძლებლობაზე, რომელიც ექსპერიმენტალურ დანადგარში ხორციელდება მუშა კონდენსატორის ქვედა ელექტროდის ვიბრაციის საშუალებით. ვიბრაციის ამპლიტუდა უზრუნველყოფს ნაწილაკის ელექტროდიდან მოწყვეტას ისეთ მანძილზე, რომელიც ნაწილაკის ზომების რიგისაა. მაშინ პირობა (3) ღებულობს მარტივ სახეს: $E_q = F_g$; აქედან შესაძლებელია განსაზღვრული იქნას ის მინიმალური ელექტრული ველის დამაბულობა, რომლის დროსაც ნაწილაკი ღებულობს თავის ზღვრულ მუხტს, ვიბრაციის არსებობის პირობებში წყდება ელექტროდს და მოძრაობას განაგრძობს ზედა ელექტროდისაკენ.

ნებისმიერი ფორმის ნაწილაკები შესაძლებელია აპროქსიმირებული იქნას მოცულობის მიხედვით თანაბარზომადი ნახევარელიპსოიდის საშუალებით. ვიზუალურად დადგენილი იქნა, რომ ნაწილაკები ელექტროდიდან მოწყვეტამდე განიცდიან ორიენტაციას თავისი უდიდესი ნახევარღერძით ელექტრული ველის გასწვრივ და მხოლოდ ამის შემდეგ წყდებიან დამუხტავი ელექტროდიდან.

ექვივალენტური ელიპსოიდის მუხტის ფარდობა მისი ექვივალენტური სფეროს მუხტთან შეადგენს

$$K = \frac{q_{ზღვ.ა}}{q_{ზღვ.ა.სფ.}} = \frac{3}{\sqrt[3]{2\pi^2}} \cdot \frac{\sqrt[3]{\beta\gamma}}{d_a}$$

სადაც a -ნაწილაკის დიდი ნახევარღერძია, β და γ - არის ნახევარღერძების ფარდობა, d_a - დაპოლიარიზაციის კოეფიციენტი.

გაზომილი პარამეტრები $q_{მოწყ}$, $q_{ზღვ}$ და $t_{დამ}$ შესაძლებლობას გვაძლევენ განვსაზღვროთ დამუხტვის დროის მუდმივა და ადგეზიის ძალა

$$\tau = - \frac{t_{დამ}}{\ln\left(1 - \frac{q_{გაზ.}}{q_{ზღვ}}\right)} \quad (7)$$

$$F_{ადგ.} = F_{ელ.} - mg \quad (8)$$

სფერული ფორმის გამტარი ნაწილაკებისათვის, რომლებიც ელექტროდიდან მოწყვეტამდე ასწრებენ თავისი ზღვრული მუხტის მიღებას, ადგეზიის ძალის განსაზღვრისათვის საკმარისია გავზომოთ ელექტრული ველის დამაბულობის ის მნიშვნელობა, რომლის დროსაც ისინი წყდებიან ელექტროდს

$$F_{ადგ.} = 0,83 \cdot 4\pi\epsilon_0 \frac{\pi^2}{6} E a^2 - mg \quad (9)$$

არაგამტარი ნაწილაკებისათვის ადგეზიის ძალის განსაზღვრისათვის აუცილებელია გაიზომოს ნაწილაკების მოწყვეტის ელექტრული ველის დამაბულობა და ამ დროს მათ მიერ მიღებული მუხტების მნიშვნელობები.

ექსპერიმენტალური კვლევები ადასტურებენ ლიტერატურულ მონაცემებს, რომლის თანახმად თეორიული გაანგარიშების საფუძველზე ნაწილაკები აუცილებლად უნდა მოწყდნენ დამმუხტავ ელექტროდს. მიუხედავად ამისა, ყველა მათგანი მაინც არ წყდება მისგან. ეს ფაქტი მხოლოდ და მხოლოდ შეიძლება აიხსნას ადგეზიის ძალის დიდი მნიშვნელობებით, რომელიც ექსპერიმენტის მრავალჯერადი გამეორებისას ვლინდება სხვადასხვაგვარად. შესაბამისად, ნაწილაკების მოწყვეტის პირობა აღწერილი უნდა იქნას ალბათური მახასიათებლებით, რომელიც წარმოადგენს დიდი რაოდენობის ფაქტორების გავლენის ინტეგრალურ მახასიათებელს. მოწყვეტის ალბათობა $\lambda = \frac{N}{N_0} \cdot 100\%$, სადაც N-არის მოწყვეტილი ნაწილაკების რაოდენობა, ხოლო N_0 - ნაწილაკების საერთო რიცხვი.

ელექტრული სეპარაციის თვალსაზრისით მოწყვეტის ალბათობა λ განსაზღვრავს მინერალების განცალკევების ხარისხს. ის, რომ $\lambda < 100\%$ -ზე ნიშნავს იმას, რომ ნაწილაკების განცალკევება განხორციელდება არა მარტო

მათი გამტარობის შესაბამისად, არამედ ადგეზიის ძალების მნიშვნელობების შესაბამისადაც.

გამოსაკვლევი ნაწილაკების სახით შერჩეული იქნა ტიტანის შემცველი მინერალები, კერძოდ ტიტანო-ციროკონიუმის საბადო. ამ კონცენტრატიდან კვლევები ჩატარებული იქნა გამტარი ტიპის ორ მონომინერალზე-რუტილზე და ილმენიტზე და არაგამტარი ტიპის ოთხ მონომინერალზე- სტავროლიტზე, დისტენზე, ციროკონზე და კვარცზე.

მესამე თავში განხილულია მონომინერალური ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე ტექნოლოგიური და კონსტრუქციული პარამეტრების გავლენა. შედეგების შედარების მიზნით ცდები ჩატარებული იქნა სფერულ მატალურ ნაწილაკებზეც, რომელთათვისაც შესაძლებელია თეორიული ანალიზის ჩატარება.

მართლაც, იმის დაშვებით, რომ $F_{ადგ} = 0$, მივიღებთ ელექტრული ველის დამაბულობის მინიმალურ (ზღვრბლურ) მნიშვნელობას, რომელიც აუცილებელია a ზომის ნაწილაკებისათვის ელექტროდიდან მოსაწყვეტად

$$E_{ზღვრ} = \sqrt{\frac{\gamma_{ნაწ} \cdot g}{K \cdot \epsilon_0 \cdot \pi^2}} \cdot 2a \quad (10)$$

ადგეზიის ძალის გათვალისწინების გარეშე, დამუხტვის პროცესში ნაწილაკზე მოქმედებს ჯამური მოწყვეტის ძალა $F_{\Sigma} = F_{ელ} - mg$. ამ ძალას ნაწილაკის ზომების მიხედვით აქვს თავისი მაქსიმუმი. ნაწილაკის ოპტიმალური ზომა, რომელიც შეესაბამება ამ მაქსიმუმს განისაზღვრება პირობიდან $\frac{dF_{\Sigma}}{da} = 0$ რის შედეგადაც ვღებულობთ

$$a_{ოპტ} = \frac{K \cdot \epsilon_0 \cdot \pi^2}{\gamma_{ნაწ}} \cdot \frac{1}{3} \cdot E^2$$

ელექტრული ველის დამაბულობის მუდმივი მნიშვნელობის შემთხვევაში ნაწილაკების ნაწილაკების ოპტიმალურ და ზღვრულ მნიშვნელობათა ფარდობა იქნება $a_{ზღვ} = 1,5a_{ოპტ}$.

ჩატარებული იქნა ნაწილაკების მოწყვეტის დამოკიდებულების ანალიზი მათი ზომების გარკვეულ დიაპაზონში ცვლილებაზე, როდესაც

ვითვალისწინებდით ადგეზიის ძალის ცვლილების ჰიპოთეზურ მრუდს. ასეთი ანალიზი საშუალებას გვაძლევს ვარეგულიროთ ნაწილაკების მოწყვეტის პირობა. ამას შესაძლებელია მივაღწიოთ ელექტრული ველის დამაბულობის ცვლილებით, მაგრამ ეს შესაძლებლობა შეზღუდულია ელექტროდებს შორის გარღვევის წარმოშობის შესაძლებლობით. ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის რეგულირების მეორე გზა მდგომარეობს ადგეზიის ძალის ცვლილებაში. ამას შესაძლებელია მივაღწიოთ შემდეგი გზებით: გარემოს ნესტიანობის ცვლილებით, ნაწილაკების ზედაპირის დამუშავებით, დამმუხტავი ელექტროდის ვიბრაციის გამოყენებით, დამმუხტავი ელექტროდის შესაბამისი მასალის შერჩევით.

ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობაზე ჰაერის ნესტიანობის გავლენის ექსპერიმენტულმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ჰაერის ნესტიანობის ზრდისას იზრდება კაპილარული წარმოშობის ადგეზიის ძალა და შესაბამისად მცირდება ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა. გახურების ტემპერატურის ზრდა იწვევს ნაწილაკების ზედაპირიდან ნესტის აორთქლებას და ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის ზრდას.

ნაწილაკების ზედაპირის დასველებადობის თვისებების ცვლილება შეიძლება განვახორციელოთ ნაწილაკების ნიშადურის სპირტში გავლებით. ნაშრომში ნაშვენებია ნაწილაკების ზედაპირის ასეთი დამუშავების გავლენა მოწყვეტის ალბათობაზე.

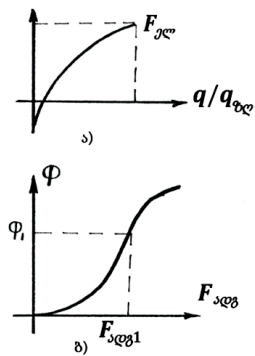
ადგეზიის ძალაზე შესაძლებელია დიდი გავლენა მოახდინოს ნაწილაკი-ელექტროდი კონტაქტის არსებობამ. ასეთი კონტაქტის გაწყვეტის შემთხვევაში ადგეზიის ძალა უნდა შემცირდეს. ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულებამ დამმუხტავი ელექტროდის ვიბრაციაზე ექსპერიმენტულად დაადასტურა ასეთი მოლოდინი.

გაყოფის პროცესის განსაზღვრისათვის დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულებას ელექტროსეპარატორის კონსტრუქციულ პარამეტრებზე, კერძოდ დამმუხტავი ელექტროდის

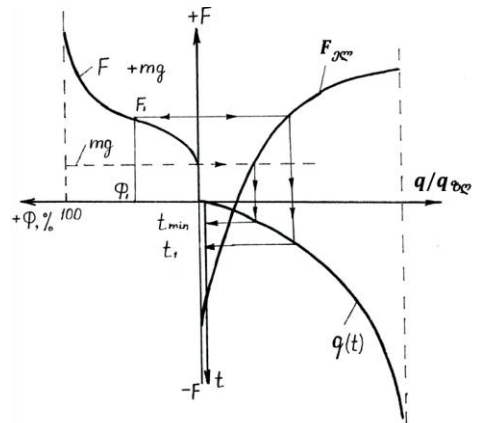
სიგრძეზე. ნაწილაკის ყოფნის ხანგრძლიობა დამუხტავ ელექტროდზე პროპორციულია დამუხტავი ელექტროდის სიგრძისა. ექსპერიმენტული კვლევები გვიჩვენებენ, რომ ნაწილაკის დამუხტვის დროის გაზრდით იზრდება მათი დამუხტავი ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა.

ექსპერიმენტალური კვლევების ჩატარების დროს განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმო მოწყვეტის ალბათობის დამოკიდებულებას დამუხტავი ელექტროდის მასალაზე. გამოკვლეული იქნა ორი ტიპის ელექტროდები: მეტალური და ნახშირბადის სხვადასხვა შემცველობის ელექტროდები. კვლევის შედეგები მიგვითითებენ მოწყვეტის ალბათობის დიდ განსხვავებაზე ელექტროდების ამ ორ კლასს შორის. მეტალური ელექტროდებისათვის, $10 \cdot 10^5$ ვ/მ ელექტრული ველის დაძაბულობის დროსაც კი, ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა ვერ აღწევს 100%-იან მნიშვნელობას. დამახასიათებელია აგრეთვე, ექსპერიმენტის სხვადასხვა სერიებში, λ -ს მნიშვნელობების დიდი გაზრდა. ნახშირბადის შემცველ ელექტროდებში კი, უკვე $6 \cdot 10^5$ ვ/მ ელექტრული ველის დაძაბულობის დროს, γ -ს მნიშვნელობები ახლოსაა 100%-თან და გაზომვის სხვადასხვა სერიების შედეგები გამოირჩევა სტაბილურობით. მეტალური ელექტროდების ასეთი მახასიათებლები დაკავშირებულია ადგეზიის ძალის დიდ მნიშვნელობებთან. ჩატარებული გაზომვები გვიჩვენებენ, რომ ეს ელექტროდები თავის თავს არ ავლენენ ისე როგორც მეტალები. ეს შეიძლება აიხსნას მხოლოდ ჟანგეული ფენის არსებობით, რომელიც წარმოიქმნება მეტალური ელექტროდების ზედაპირზე, ხოლო ნახშირბადის შემცველ ელექტროდებს ასეთი ფენა არ აქვს, შესაბამისად, მათთვის ადგეზიის ძალა განისაზღვრება თვით ელექტროდის მასალით.

ნახ.2-ზე ნაჩვენებია ინდუქციური დამუხტვის პროცესში ნაწილაკზე მოქმედი ყველა ძალის დიაგრამა. ნაწილაკის მოწყვეტის დიაგრამის ანალიზი საშუალებას გვაძლევს ავხსნათ ელექტროსეპარატორის ელექტრულ ველში ნაწილაკის ქცევა. რაც დასტურდება ელექტროსეპარაციის პრაქტიკით.



ა) ძალთა დიაგრამის აგებისათვის



ბ) ინდუქციური დამუხტვის პროცესში ნაწილაკზე მოქმედი ძალთა დიაგრამა

ნახ.2. ნაწილაკის მოწყვეტის დიაგრამა

მეოთხე თავში განხილულია ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრების ექსპერიმენტალური კვლევის საკითხები.

ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ერთერთ ძირითად პარამეტრს წარმოადგენს მუხტისა და მოწყვეტის დროის მინიმალური მნიშვნელობები. (1) გამოსახულებიდან გამომდინარეობს, რომ მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტის მინიმალური მნიშვნელობები შეესაბამება მოწყვეტის იმ ძალას, რომლის დროსაც შესაძლებელია ადგეზიის ძალის უგულვებელყოფა. ეს მნიშვნელობა განისაზღვრება მხოლოდ ნაწილაკის პარამეტრებით და ელექტრული ველის დამაბულობით და არ არის დამოკიდებული გახურების ტემპერატურაზე და გარემოს სინესტეზე, რაც დასტურდება ექსპერიმენტული მონაცემებით.

ნაწილაკის მოწყვეტის დროის მინიმალური მნიშვნელობები განისაზღვრება დამუხტვის კინეტიკის განზოგადოებული დამოკიდებულებით და ის დამოკიდებულია დამუხტვის დროის მუდმივაზე. შესაბამისად, გარემოს სინესტის ან გახურების ტემპერატურის ცვლილებისას იცვლება ნაწილაკის გამტარობა და შესაბამისად, ნაწილაკის დამუხტვის დროის მუდმივა. ექსპერიმენტული კვლევები ადასტურებენ ასეთ

დამოკიდებულებებს. მაგრამ მოწყვეტის დროის ცვლილების ხარისხი *t_{მოწყ.მინ}* შედარებით მცირეა, რადგანაც ნაწილაკის გამტარობის ცვლილებამ სინესტისა და ტემპერატურის ცვლილებისას შესაძლებელია მიაღწიოს რამდენიმე რიგს. ეს მოვლენა აიხსნება იმით, რომ სინესტისა და ტემპერატურის ცვლილება იწვევს დასამუხტი ნაწილაკის ზედაპირული გამტარობის ცვლილებას და ვერ ახდენს გავლენას ნაწილაკი-ელექტროდი კონტაქტის გამტარობაზე.

ელექტრული ველის დაძაბულობის გავლენა დამუხტვის დროის მუდმივაზე და შესაბამისად, მოწყვეტის დროის მინიმალურ მნიშვნელობაზე აიხსნება კონტაქტური წინაღობის ცვლილებით, რაც დასტურდება ლიტერატურული მონაცემებით. ეს ვარაუდი დასტურდება ნახშირბადის შემცველ ელექტროდზე ჩატარებული ექსპერიმენტული მონაცემებით, რომლებზეც მიიღება გაცილებით ნაკლები მოწყვეტის დროის მნიშვნელობები.

ინდუქციური დამუხტვის შემდგომ მნიშვნელოვან პარამეტრს წარმოადგენს მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტისა და მოწყვეტის დროის საშუალო მნიშვნელობები. თუ მოწყვეტილი ნაწილაკების მუხტისა და დროის მინიმალურ მნიშვნელობებზე უმთავრესად გავლენას ახდენს ნაწილაკი-ელექტროდი კონტაქტის მდგომარეობა, მაშინ ზოგად შემთხვევაში ამას კიდევ ემატება ადგეზიის ძალა.

ნაჩვენებია, რომ მუხტის საშუალო მნიშვნელობები არ იცვლება გარემოს სინესტისა და ტემპერატურის ცვლილებისას. ეს გარემოება მიუთითებს იმაზე, რომ მოყვანილ გაზომვებში ადგეზიის ძალა სუსტად იცვლება.

მუხტების საშუალო მნიშვნელობებზე ყველაზე მეტ გავლენას ახდენს ელექტრული ველის დაძაბულობა. ელექტრული ველის დაძაბულობის ზრდისას იზრდება მაქსიმალური მუხტის მნიშვნელობები და მცირდება მინიმალური მნიშვნელობები. ამიტომ ელექტრული ველის დაძაბულობის ზრდისას იზრდება მუხტის საშუალო კვადრატული

გადახრა. ამით აიხსნება ნაწილაკების მოძრაობის ტრაექტორიის გაბნევის ზრდა და გაყოფის მახასიათებლების გაუარესება.

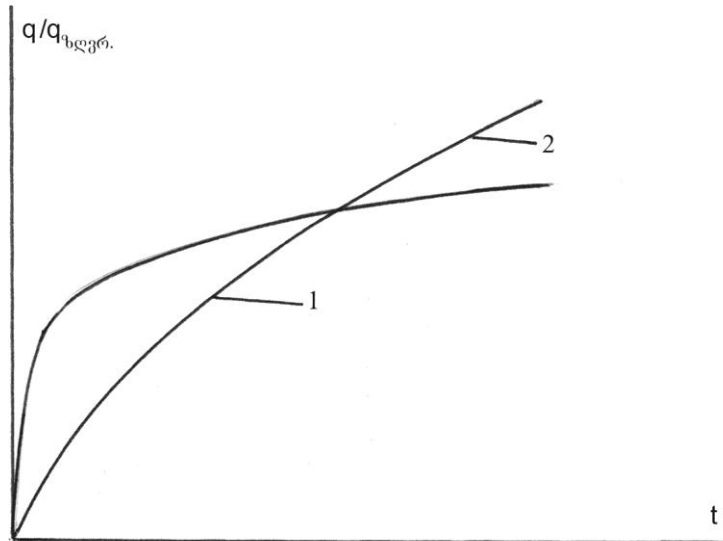
ნაჩვენებია მოწყვეტის დროის საშუალო მნიშვნელობების ცვლილება გარემოს სინესტისა და გახურების ტემპერატურის ცვლილების დროს. უკანასკნელ დამოკიდებულებას აქვს მკვეთრად გამოხატული მაქსიმუმი. დამუხტვის დროის საშუალო მნიშვნელობის ($t_{50\%}$) ცვლილების ასეთი ხასიათი გახურების ტემპერატურაზე აიხსნება როგორც ზედაპირული გამტარებლობის ისე მოცულობითი გამტარებლობისა და გარდამავალი წინაღობის ნაწილაკი-ელექტროდის ცვლილებით. მაგრამ ძნელია დავადგინოთ, თუ რომელ მათგანს შეაქვს გადამწყვეტი როლი ნაწილაკის ეკვივალენტური გამტარობის ჩამოყალიბებაში.

$t_{50\%}$ -ის მნიშვნელობების ცვლილებას ელექტრული ველის დაძაბულობაზე აქვს იგივე ხასიათი რაც მინიმალური მოწყვეტის დროის დამოკიდებულებას ელექტრული ველის დაძაბულობაზე.

ნაწილაკის ეკვივალენტური დამუხტვის დროის მუდმივას გაანგარიშებები, რომლებიც განისაზღვრება $t_{50\%}$ –სა და $q_{50\%}$ -ის შესაბამისი მნიშვნელობების საშუალებით, გვიჩვენებენ, რომ დამუხტვის პროცესში τ იცვლება, თითქოს ნაწილაკის დამუხტვის პროცესის ტემპი დროში „იწელება“. ამ მოვლენის ერთადერთი ახსნა შეიძლება იყოს დამუხტვის პროცესში ნაწილაკის საწყისი ორიენტაციის ცვლილება.

ექსპერიმენტული კვლევები, რომელიც ჩატარებული იქნა გრაფიტის შემცველ ელექტროდებზე, მიგვითითებენ კონტაქტური გარდამავალი წინაღობის დიდ გავლენაზე ნაწილაკის მოწყვეტის დროის $t_{50\%}$ მნიშვნელობებზე.

ალბათური დამოკიდებულებების $\Phi(q)$ და $\Phi(t)$ -ს ჩატარებული კვლევების საფუძველზე აგებული იქნა ნაწილაკის დამუხტვის კინეტიკის ექსპერიმენტული დამოკიდებულება $q = f(t)$ სხვადასხვა ნაწილაკებისათვის, დამუხტვის პირობებისათვის და დამუხტავი ელექტროდების ტიპებისათვის (ნახ.3.)



ნახ.3. ნაწილაკის მუხტის ცვლილების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე.
1-ექსპერიმენტული დამოკიდებულება 2-თეორიული დამოკიდებულება.

ნაწილაკის მუხტის ცვლილების ხასიათი დროში განსხვავდება მისი თეორიული ექსპონენციალური მრუდისაგან, რაც დაკავშირებულია ჯამური ძალის ცვლილებასთან, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე და შესაბამისად, მისი საწყისი ორიენტაციის ცვლილებასთან. გარე ძალების მუდმივობის პირობებში, რომელიც მოქმედებს ნაწილაკზე, ნაწილაკის დამუხტვის მრუდი უნდა ყოფილიყო ექსპონენციალური დამოკიდებულების. ეს ვარაუდი დადასტურებულია მუშა კონდენსატორის ფირფიტაზე ნაწილაკის განმუხტვის პირდაპირი ექსპერიმენტით მაღალი ძაბვის მოხსნის შემდეგ.

იმ მიზნით, რომ შეგვემოწმებინა თუ რამდენად შეესაბამება დამუხტვის დროის მუდმივა, რომელიც განისაზღვრება ნაწილაკის მასალის გამტარობით, დამუხტვის დროის მუდმივას, რომელიც განისაზღვრება ნაწილაკის ინდუქციური დამუხტვის პარამეტრებით, ჩატარებული იქნა კუთრი ელექტროგამტარობის განსაზღვრის გაზომვები სხვადასხვა ფრაქციის ნაწილაკების მასალის ფხვნილების სინჯებზე. ნაწილაკების ექვივალენტური გამტარობის მიღებული მონაცემები, რომელიც განისაზღვრებოდა ნაწილაკების ელექტროდიდან მოწყვეტის მიხედვით და ფხვნილების სინჯების მიხედვით კარგად ეთანხმებოდა ერთმანეთს

არაგამტარი ნაწილაკებისათვის, ხოლო გამტარი ნაწილაკებისათვის შეინიშნება გარკვეული განსხვავება, რაც შეიძლება აიხსნას სინჯებში დიელექტრიკული ნაწილაკების გარკვეული კონცენტრაციის არსებობით.

ჩამოყალიბებულია ადგეზიის ძალის ექსპერიმენტული განსაზღვრის მეთოდი, რომელიც დადასტურებულია საავტორო უფლებით. შემოთავაზებულია ადგეზიის ძალის გაანგარიშების მეთოდიკა.

მეხუთე თავში განხილულია ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ფიზიკური სურათის ზოგადი მახასიათებლები და მიღებული შედეგების საფუძველზე მოცემულია ელექტროსეპარატორებში ინდუქციური დამუხტვის პროცესის ორგანიზაციის პრაქტიკული რეკომენდაციები.

ნაწილაკების დამუხტვისა და მათი მოწყვეტის შესახებ ჩატარებულმა კვლევებმა დაადასტურა და დააზუსტა ის ცნობილი განსხვავებები, რომლებიც არსებობენ ექსპერიმენტულ მონაცემებსა და თანამედროვე თეორიულ წარმოდგენებს შორის და აღმოაჩინა სხვა ახალი განსხვავებები. ამ განსხვავებათა რიცხვში შედის : ნაწილაკების მუხტებისა და მოწყვეტის დროის მნიშვნელოვანი გაზრდა, ნაწილაკების მუხტების დამოკიდებულება დამუხტვის დროზე ატარებს არაექსპონენციალურ ხასიათს, მოწყვეტის ალბათობა ვერ აღწევს 100%-იან მნიშვნელობას, ადგეზიის ძალის ალბათური ხასიათი, რომელიც გამოწვეულია ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტის თვისებებით და გარემოს მახასიათებლებით.

ექსპერიმენტულ მონაცემებსა და თეორიულ წარმოდგენებს შორის ზემოთჩამოთვლილი განსხვავებები ახსნილია ინდუქციური დამუხტვის პროცესის წარმართვის განსაკუთრებული ხასიათით. ნაჩვენებია, რომ ყველა დაშვება, რომელიც მიღებულია თეორიული ანალიზის დროს, ამ დროს არ სრულდება, კერძოდ დამუხტვის პროცესში ნაწილაკსა და ელექტროდს შორის კონტაქტი არ არის მუდმივი სიდიდე, ასევე ნაწილაკის ორიენტაცია(მდებარეობა) ელექტროდის მიმართ დამუხტვის პროცესში იცვლება. გარდა ამისა, ნაწილაკის ელექტროდთან კონტაქტი ბევრწილად დამოკიდებულია ნაწილაკის საწყისი დაწოლის ძალაზე ანუ ელექტრული

ველის დამაბულობაზე. გარდა ამისა, დამუხტვის პროცესში კიდევ მოქმედებენ ბევრი სხვა ფაქტორები (ტემპერატურა, სინესტე), რომლებიც განსაზღვრავენ ადგეზიის ძალის ალბათურ ხასიათს. ყველგფერი ეს იწვევს მუხტისა და მოწყვეტის დროის მნიშვნელობების გაბნევას და გარდა ამისა იმასაც, რომ ნაწილაკების მოწყვეტის ალბათობა 100%-ზე ნაკლებია.

კომპლექსური ექსპერიმენტული კვლევის საფუძველზე ჩამოყალიბებულია ერთგვაროვან ელექტრულ ველში ინდუქციური დამუხტვის პროცესის დაზუსტებული ფიზიკური სურათი. ნაჩვენებია დამმუხტავ ელექტროდზე ნებისმიერი ფორმის ნაწილაკის საწყისი მდებარეობა, მისი ქცევა დამუხტვის პროცესში და მოწყვეტის პირობის შესრულების შემდეგ (1), მისი ელექტროდიდან მოწყვეტა ჭარბი მუხტის გარკვეული რაოდენობით, რომელიც განისაზღვრება როგორც მოცულობითი და ზედაპირული გამტარებლობით ისე ნაწილაკზე მოქმედი ტოლქმედი ძალით. მოცემულია რეკომენდაციები გარემოს სინესტისა და დამმუხტავი ელექტროდის გახურების ტემპერატურის გარკვეული დიაპაზონის შენარჩუნების შესახებ, ნაწილაკების რეაგენტული დამუშავებისა და დამმუხტავი ელექტროდის ვიბრაციის შესახებ. ელექტროსეპარატორის კონსტრუქციული პარამეტრები უნდა აკმაყოფილებდნენ პირობას: $\tau_1 \ll t_{\text{დაბ}} \ll \tau_2$, სადაც $t_{\text{დაბ}}$ - არის ნაწილაკის ელექტრული ველის ზემოქმედების არეში ყოფნის დრო, ხოლო τ_1 და τ_2 – კი განსაცალკევებელი ნაწილაკების დამუხტვის დროის მუდმივები.

გრაფიტის შემცველი ელექტროდების გამოყენება უზრუნველყოფს 100%-თან ახლო მოწყვეტის ალბათობის მნიშვნელობებს და ნაწილაკების დამუხტვის პარამეტრების მცირე გაბნევას, რაც საშუალებას მოგვცემს მოვახდინოთ გაყოფის სტაბილური შედეგების მიღება.

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 წინაღობის 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 უზრუნველვყოთ:
 - 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.

• **დისერტაციის ძირითადი შინაარსი გადმოცემულია შემდეგ შრომებში:**

1. გორგოშიძე ა. ნაწილაკების დამუხტავი ელექტროდიდან მოწყვეტის ალბათობა, როგორც ინდუქციური დამუხტვის პროცესის გარე ინტეგრალური მახასიათებელი. მოხსენების თეზისები, 85-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, 2018, გვ. 423.
2. გორგოშიძე ა. მინერალური ნაწილაკების ელექტროფიზიკური პარამეტრების კვლევა ინდუქციური დამუხტვის დროს. მოხსენების თეზისები, 86-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, 2019, გვ. 272.
3. 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.
4. Верещагин И.П. Горгошидзе А.Р. Кривов С.А. Морозов В.С. Исследование процесса индукционной зарядки частиц. Известия АН СССР. «Энергетика и транспорт». N1, 1986, стр.127-135.
5. Горгошидзе А. Р., Морозов В. С. Роль материала электрода в процессе зарядки и отрыва частиц от электрода в электрическом поле сепаратора. «Электронная обработка материалов». Ленинград, №4, 1990. стр. 35-37.

6. 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.
7. გორგოშიძე ა., ბიბილური მ. მიკრონაწილაკების მუხტების განსაზღვრა მათი ინდუქციური დამუხტვის დროს. შრომები „მართვის ავტომატიზირებული სისტემები“. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი N1(23)2017, გვ. 176-179.
8. გორგოშიძე ა., ჩაჩხიანი ზ. დამუხტული ნაწილაკების მუხტებისა და დამუხტვის დროის განაწილების ფუნქციის ანალიზი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „განათლება“, 3(22) 2018, გვ. 165-170.
9. გორგოშიძე ა. ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში არასფერული მინერალური ნაწილაკების ინდუქციური დამუხტვის მინიმალური მუხტების განსაზღვრა. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, „განათლება“, N1(24) 2019, გვ. 206-2012

ABSTRACT

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 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.