

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მ. ონიანი

# ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაცია



დამტკიცებულია მონოგრაფიად  
სტუ-ის სარედაქციო-საგამომცემლო  
საბჭოს მიერ. 15.12.2011, ოქმი №4

თბილისი  
2012

მონოგრაფია დაწერილია სადისერტაციო ნაშრომის მიხედვით, რომელიც შესრულებულია ტ.მ.დ., პროფესორ გარბერტ ბუცხრიკიძის ხელმძღვანელობით. სწორედ მისი გულისხმიერებითა და თანადგომით შესრულდა წარმოდგენილი სამუშაო, რისთვისაც დიდი მადლიერებით ქედს ვიხრი ამ უდიდესი პიროვნებისა და მეცნიერის ხსოვნის წინაშე.

ნაშრომში შემუშავებულია მანგანუმის მადნის შლამების ფლოტაციის პროცესის მათემატიკური მოდელი; დასმულია ოპტიმიზაციის ამოცანა და მის გადასაჭრელად გამოყენებულია წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გრაფიკული ვარიანტი; ჩამოყალიბებულია პროცესის მართვის ალგორითმი; მოცემულია მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციების მოდელები; ნაჩვენებია რეჟიმული სიდიდით შემაშფოთებელი სიდიდის შეცვლის ხერხი. მანგანუმის შლამების ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციის შემოთავაზებული მეთოდი საშუალებას იძლევა მივიღოთ მოცემული ხარისხის კონცენტრატის მაქსიმალური გამოსავალი. ეს მეთოდი შესაძლებელია გამოვიყენოთ სხვა მადნების ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციისთვის.

წიგნი განკუთვნილია ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო-გეოლოგიის ფაკულტეტის სამთო ტექნოლოგიის მიმართულების მაგისტრანტებისა და დოქტორანტებისთვის, ასევე ამ დარგში მომუშავე სამეცნიერო-კვლევითი ინსტიტუტის თანამშრომლებისთვის. იგი სასარგებლო იქნება აგრეთვე მამდიდრებელი ფაბრიკების ინჟინერ-ტექნიკური პერსონალისთვის.

რეცენზენტები: პროფ. რ. ენაგელი

პროფ. დ. პატარაია

© საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2012

ISBN 978-9941-20-054-0

<http://www.gtu.ge/publishinghouse/>



ყველა უფლება დაცულია. ამ წიგნის ნებისმიერი ნაწილის (ტექსტი, ფოტო, ილუსტრაცია თუ სხვა) გამოყენება არც ერთი ფორმითა და საშუალებით (ელექტრონული თუ მექანიკური) არ შეიძლება გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

საავტორო უფლებების დარღვევა ისჯება კანონით.

## შ ი ნ ა ა რ ს ი

შ ე ს ა გ ა ლ ი .....	5
თ ა ვ ი 1 . ტექნოლოგიური პროცესის მიმოხილვა .....	6
1.1. ჭიათურის აუზის მანგანუმის მადანი .....	6
1.2. ფლოტაციის პროცესი და მისი ფიზიკურ-ქიმიური არსი .....	7
1.3. პროცესის ზოგადი დახასიათება .....	11
თ ა ვ ი 2 . ექსპერიმენტი .....	16
2.1. წინასწარი ექსპერიმენტი .....	16
2.2. ავტოკორელაციური ფუნქციები და დროის ინტერვალი გაზომვებს შორის .....	19
2.3. ურთიერთკორელაციური ფუნქციები და დროითი წანაცვლება რეალიზაციებს შორის .....	22
2.4. ძირითადი ექსპერიმენტი .....	24
თ ა ვ ი 3 . ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი და ამოცანა .....	26
3.1. საფლოტაციო მანქანა – მართვის ობიექტი .....	26
3.2. ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი .....	29
3.3. ექსპერიმენტის მონაცემების წინასწარი დამუშავება .....	31
თ ა ვ ი 4 . მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციები .....	33
4.1. გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლებზე მმართველი სიდიდის გავლენის მოდელი .....	33
4.2. კონცენტრატის გამოსავლის მოდელი .....	37
4.3. კონცენტრატის ხარისხის მოდელი .....	39
4.4. მიზნის ფუნქცია .....	39
4.5. შეზღუდვის ფუნქცია .....	43
4.6. მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციების ანალიზი .....	47

თ ა ვ ი 5 . ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაცია .....	54
5.1. ექსტრემალური ამოცანების მათემატიკური დაპროგრამება .....	54
5.2. მოდელებისა და ფიზიკური ობიექტების ოპტიმიზაციის მეთოდები .....	55
5.3. შეზღუდვების მქონე წრფივი მოდელების ანალიზური ოპტიმიზაცია .....	63
5.4. ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაცია წრფივი დაპროგრამების მეთოდით .....	65
5.5. ოპტიმიზაციის შედეგების პროგნოზირება .....	75
5.6. ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სქემა .....	80
თ ა ვ ი 6 . პროცესის მართვა რეჟიმული სიდიდის მიხედვით .....	83
დასკვნა .....	88
ლიტერატურა .....	90
დანართი 1 .....	96
დანართი 2 .....	97
დანართი 3 .....	102
დანართი 4 .....	107
დანართი 5 .....	111
დანართი 6 .....	121

## შესავალი

საქართველო ბუნებრივი წიაღისეულით მდიდარი ქვეყანაა. ამიტომ ბუნებრივი წიაღისეულის მოპოვება და მისი ეფექტური გადამუშავება ჩვენი ქვეყნის ეკონომიკური განვითარებისათვის მნიშვნელოვანი ამოცანაა.

გასული საუკუნის 80-იანი წლების ბოლოს საქართველოში იწარმოებოდა მსოფლიო მანგანუმის პროდუქტების 6–8 %, ბოლო წლებში ეს წილი 0,3–0,5 %-მდე დაეცა. დღეს ამ პრობლემის გადაწყვეტის საფუძველად მიჩნეულია ჭიათურის მანგანუმის ნედლეულის ბაზისა და ზესტაფონის ფეროშენადნობთა ქარხნის ერთობლივი და შეთანხმებული ფუნქციონირება. მსხვილ სამთო-მეტალურგიულ საწარმოებს აქვთ მადნის მოპოვებისა და მეტალურგიული გადამუშავების ახალი ტექნოლოგიების შემუშავებისა და გამოყენების გაცილებით დიდი შესაძლებლობები, რაც, შესაბამისად, უზრუნველყოფს საწარმოო დანახარჯების შემცირებას და პროდუქციის კონკურენტუნარიანობის ამაღლებას. სპეციალისტების გაანგარიშებით ჭიათურის აუზში მაღალი ხარისხის მანგანუმის კონცენტრატის წარმოება წელიწადში 75 ათასი ტონიდან გაიზრდება 200 ათას ტონამდე [1, 2].

დღეს აღარავის ეპარება ეჭვი, რომ მანგანუმის მამდიდრებელი ფაბრიკების აღორძინება ძველი ტექნოლოგიების ბაზაზე მიუღებელია და შეუძლებელიც. ახალი ტექნოლოგიების ორგანულ ნაწილს წარმოადგენს მათი ავტომატიზაცია. ცხადია, ავტომატიზაციის მოწყობილობაც თანამედროვე, უახლეს პრინციპებზე უნდა იყოს აგებული. ეს კი შესაძლებელს ხდის, გადაწყდეს ისეთი აქტუალური ამოცანა, როგორც არის გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესების ოპტიმალური მართვა, მამდიდრებელ ფაბრიკებზე ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ავტომატიზებული სისტემების დამუშავება და დანერგვა. ამიტომაც წარმოდგენილი ნაშრომი დღეისთვის საკმაოდ მნიშვნელოვანია, რამდენადაც იგი ეძღვნება ფლოტაციის, როგორც გამდიდრების ერთ-ერთი ძირითადი ტექნოლოგიური პროცესის ოპტიმიზაციის ხერხის შემუშავებასა და შესაბამისი ავტომატიზური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურის აგებას ავტომატიზაციის თანამედროვე ტექნოლოგიების ბაზაზე.

## თავი 1. ტექნოლოგიური პროცესის მიმოხილვა

### 1.1. ჭიათურის აუზის მანგანუმის მადანი

ჩვენი ქვეყნის სასარგებლო წიაღისეულს შორის ჭიათურის აუზში მოპოვებულ მანგანუმის მადანს მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს არა მარტო საქართველოს მასშტაბით. მანგანუმის მადნის საბადოები 40-ზე მეტ ქვეყანაში არსებობს, მაგრამ ჭიათურის აუზში მოპოვებული მანგანუმის მადანი თავისი ფიზიკური და ქიმიური თვისებებისა და მინერალური შემცველობის გამო მსოფლიოში გამორჩეულია როგორც ერთ-ერთი საუკეთესო. მანგანუმის მადანს იყენებენ მრეწველობის სხვადასხვა დარგში: შავ და ფერად მეტალურგიაში, ქიმიურ და კერამიკულ მრეწველობაში და ა.შ.

საქართველოში მანგანუმის მადნის მოპოვებას საუკუნეზე მეტი ხნის ისტორია აქვს. ჭიათურაში ამ მადნის მოპოვება დაიწყო 1879 წელს, ხოლო მანგანუმის პირველი მამდიდრებელი ფაბრიკა აიგო 1901 წელს.

ჭიათურის აუზში მოპოვებული მადანი წარმოშობისა და შემადგენლობის მიხედვით შეიძლება დაგვით ჟანგეულ, კარბონატულ და დაჟანგულ მადნებად [3, 4, 5].

ჟანგეული მადნები გავრცელებულია ჭიათურის მანგანუმის აუზის ცენტრალურ და დასავლეთ ნაწილში. მინერალოგიურად ის წარმოდგენილია მოშავო-მორუხო ფერის პიროლუზიტით  $MnO_2$ , Mn-ის შემცველობით 63.5% და შავი ფერის ფსილომელანით  $(MnO_2)_m(MnO_2)_n(H_2O)_p$ , რომელსაც არა აქვს მუდმივი შედგენილობა და შეიცავს წვრილად ჩაწინწკლულ თაბაშირს და ფუჭ ქანს. ჟანგეულ მადნებს მიეკუთვნება აგრეთვე მოშავო-მურა ფერის მანგანატი  $Mn_2O_3$ , Mn-ის 62.5% შემცველობით.

საბადოს ზოგიერთ ნაწილში, კერძოდ, ჩრდილო-აღმოსავლეთით, გვხვდება კარბონატული მადნები – როდოქროზიტი  $(MnCO_3)$  და მორუხო-თეთრი მანგანოკალციტი  $(MnCa)CO_3$ , მცირე რაოდენობით გვხვდება როდონიტი  $(MnSiO_3)$  და ჰაუსმანიტიც  $(MnMn_2O_4)$ .

დაჟანგული (მხატე ფოროვანი) მადნები წარმოიქმნება კარბონატული მადნების დაჟანგვის ხარჯზე და გვხვდება მათ მეზობლად საბადოს მთელ ტერიტორიაზე. მინერალოგიურად დაჟანგული მადნები გვხვდება მოშავო-მოყავისფრო ბერნადიტის  $(MnO_2 \cdot mH_2O)$  სახით, მანგანუმის შემცველობით 15%-დან 40%-მდე.

ყველა ეს მადანი ფაბრიკაში შეიძლება მოხვდეს ერთდროულად. მათ გააჩნიათ მანგანუმის სხვადასხვა შემცველობა, სხვადასხვა კუთრი წონა და სიმკვრივე. გარდა ამისა, მადნებში გვხვდება ფუჭი ქანი, რომელიც, ძირითადად, წარმოდგენილია კვარცით, მინდვრის შპატით, კალციტებით, თაბაშირით, დოლომიტით, გლაუკონითა და ქვიშაქვებით. ეს კი საკმაოდ ართულებს ტექნოლოგიური პროცესის მართვას და ზრდის დანაკარგებს.

მანგანუმის მადნები ძირითადად მდიდრდება კომბინირებული სქემით, რომელიც ითვალისწინებს მორეცხვას, დალექვას და მაგნიტურ სეპარაციას. ფლოტაციას კი მიეწოდება შლამები.

## I.2. ფლოტაციის პროცესი და მისი ფიზიკურ-ქიმიური არსი

ფლოტაცია, როგორც მინერალთა გაყოფის მეთოდი, უძველესი დროიდანაა ცნობილი. მას ფესვები შორეულ წარსულში აქვს. ჰეროდოტეს ცნობით, ჯერ კიდევ ჩვენს წელთაღრიცხვამდე V საუკუნეში მოიპოვებდნენ ოქროს ზეთში ამოვლებული ფრთების მეშვეობით, მაგრამ ფლოტაციის, როგორც წიაღისეულის გამდიდრების ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდის გამოყენება, XIX ს-ის შუა პერიოდიდან იწყება. კერძოდ, 60-იან წლებში ინგლისელმა უილიამ ჰაინსმა პირველად გამოიყენა ზეთი დაფქვის პროცესში; 1884 წელს დაპატენტებულ იქნა ქაფიანი ფლოტაცია; ძმებმა ბესელეებმა (1877 წელი) და ეფერსონმა (1885 წელი) საფუძველი ჩაუყარეს ფლოტაციის საწარმოო პროცესების საწყისებს; 1902 წელს ინგლისში გამოიყენეს ზეთიანი ფლოტაციის აპარატი; 1904 წელს ამოქმედდა პირველი საფლოტაციო ფაბრიკა რუსეთში; 1904 წელს აშშ-ში პირველად გამოიყენეს აფსკიანი ფლოტაცია წარმოებაში; იმავე წელს ინგლისში შეიქმნა ვაკუუმური ფლოტაციის აპარატები; 1914 წელს აშშ-ში შეიქმნა პირველი პნევმატიკური ტიპის საფლოტაციო მანქანა; XX ს-ის დასაწყისში, 10–20-იან წლებში აღმოჩენილ იქნა ფიჭვისა და ზოგიერთი სხვა ზეთების ქაფწარმოქმნის თვისებები, სელექციური ფლოტაციის არსი, ტუტემიწა ლითონების მადეპრესირებელი მოქმედება, ორგალენტისანი გოგირდის და აზოტის შემცველი სინთეზური კოლექტორები, თეორიულად იქნა დასაბუთებული აფსკიანი ფლოტაციის დროს მინერალური ნაწილაკების წყლის ზედაპირზე დამაგრების პროცესი და მრავალი სხვ. ფლოტაცია, როგორც გამდიდრების ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი მეთოდი, დღესაც ვითარდება [5].

ფლოტაცია სასარგებლო წიაღისეულის გამდიდრების ერთ-ერთი ყველაზე ფართოდ გავრცელებული მეთოდია, რომელიც ფართოდ გამოიყენება სასარგებლო

წიაღისეულის თითქმის ყველა სახეობის: შავი, ფერადი, იშვიათი, კეთილშობილი ლითონებისა და ნახშირების გასამდიდრებლად.

ფლოტაციის ფართო გავრცელება აიხსნება მისი უნივერსალურობით, რაც მდგომარეობს შემდეგში: ფლოტაცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას ნებისმიერი მადნის გამდიდრების შემთხვევაში. მაგალითად, თუ გამდიდრების გრავიტაციული მეთოდი ეფუძნება მადნის შემადგენელი კომპონენტების სიმკვრივეებით განსხვავებას, გამდიდრების მაგნიტური მეთოდი კი ამ კომპონენტების მაგნიტური თვისებებით განსხვავებას, ფლოტაციის მეთოდით გამდიდრებას ნებისმიერი მინერალი ექვემდებარება. იგი ემყარება მინერალების ზედაპირულ თვისებებს შორის სხვაობას. ამასთან, ფლოტაციის მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია ღარიბი და ძალიან წვრილი ჩაწინწკლულობის მქონე მინერალთა გამდიდრება, რაც სხვა მეთოდით პრაქტიკულად შეუძლებელია [5, 6, 7, 8].

ფლოტაცია არის სასარგებლო წიაღისეულის გამდიდრების მეთოდი. იგი ეყრდნობა გარკვეულ ზომამდე დაწვრილმანებული მინერალების ფაზათა გაყოფის საზღვარზე შერჩენის სხვადასხვა უნარს, რაც ემყარება მინერალების ზედაპირულ თვისებებს შორის სხვაობას.

მინერალებს, რომლებიც წყლით სველდება, ჰიდროფილურს უწოდებენ, ხოლო მინერალებს, რომლებიც ცუდად, ან საერთოდ არ სველდება – ჰიდროფობურს. მინერალების წყლით დასველების ხარისხი შეიძლება ვცვალოთ ხელოვნურად, მინერალების სპეციალური ნივთიერებებით დამუშავების შედეგად. ამ უკანასკნელთ საფლოტაციო რეაგენტები ეწოდებათ. საფლოტაციო რეაგენტებს აქვთ უნარი ამორჩევით აღსორბიდნენ მინერალის ზედაპირზე და შეამცირონ ან გაზარდონ მათი დასველებადობის უნარი.

არსებობს ფლოტაციის შემდეგი სახეობები: აფსკიანი, ზეთიანი, ქაფიანი, ვაკუუმური, ქიმიური, იონური, ემულსიური, ელექტროფლოტაცია, ფლოტაცია დუდილით, ფლოტაცია ამაღლამირებით და სხვ.

ყველაზე მეტად გავრცელებულია ქაფიანი ფლოტაცია. იგი ეფუძნება არადასველებადი (ჰიდროფობური) ნაწილაკების თვისებას მიეკრას აერაციის შედეგად წარმოქმნილ ჰაერის ბუშტულაკებს და ამოტივტივდეს მათთან ერთად პულპის ზედაპირზე ქაფის პროდუქტის სახით, ხოლო დასველებული (ჰიდროფილური) მინერალური ნაწილაკები კი იძირება საფლოტაციო მანქანის ფსკერზე და გამოიყოფა კამერული პროდუქტის სახით. თუ ქაფის პროდუქტში სასარგებლო კომპონენტია კონცენტრირებული, ფლოტაცია პირდაპირია, ხოლო თუ



სასარგებლო კომპონენტი კამერულ პროდუქტში გადადის, ხოლო ფუჭი ქანი ქაფს მიყვება, ფლოტაცია შებრუნებულია [5, 6, 7].

ქაფიანი ფლოტაციური სისტემა სამფაზოვანია: თხევადი, მყარი და აიროვანი. თხევად ფაზად გამოყენებულია წყალი. წყლის იონურ შედგენილობას დიდი მნიშვნელობა აქვს ზოგიერთი რეაგენტის გამოყენების დროს, რის გამოც იგი წინასწარ უნდა იქნას შესწავლილი. ფლოტაციაში გამოყენებული წყალი ყოველთვის შეიცავს გარკვეულ მინარევებს მინერალური მარილების და ორგანული შენაერთების სახით, რომელთა არსებობა განსაზღვრავს მის სიხისტეს. განასხვავებენ დროებით და მუდმივ სიხისტეს. დროებით სიხისტეს ქმნიან ბიკარბონატები, მუდმივს – სულფატები და ლითონთა ქლორიდები. ფლოტაციაში საერთო სიხისტეს ზომავენ გერმანულ გრადუსებში.

აიროვან ფაზას საფლოტაციო სისტემაში წარმოადგენს ატმოსფერული ჰაერი. იგი ძირითადად შედგება ჟანგბადის, აზოტის და ნახშირორჟანგისგან. ფლოტაციის პროცესის დროს ჰაერი აერაციის გზით შეყავთ, თუმცა ზოგჯერ იგი წყლიდანაც გამოიყოფა.

საფლოტაციო სისტემაში მყარ ფაზას წარმოადგენს დაწვრილმანებული მინერალური ნაწილაკები. შეიძლება ითქვას, რომ მყარი ფაზის ზედაპირული თვისებები მთლიანად განსაზღვრავს ფლოტაციის ეფექტურობას. მყარი ნაწილაკების ზედაპირული თვისებები საფლოტაციო სისტემაში იცვლება სხვადასხვა ფაქტორის ზეგავლენით. მინერალური ნაწილაკების ფლოტაციის უნარი დამოკიდებულია მათი ზედაპირის ენერგეტიკულ მდგომარეობაზე. მინერალური ნაწილაკების ზედაპირს ყოველთვის აქვს გარკვეული მიკრო- და მაკროზარები, დეფექტები, რომელთა არსებობა განაპირობებს რეაგენტებთან ურთიერთქმედების ეფექტურობას. საფლოტაციო რეაგენტები უმთავრესად მაგრდება მინერალური ნაწილაკების ზედაპირის წიბოებზე, რელიეფურ შვერილებზე და ნაპრალებში. ეს განპირობებულია თავისუფალი ზედაპირული ენერჯის სიჭარბით აღნიშნულ უბნებზე. ნივთიერების ელემენტარული ნაწილაკები, ატომები და იონები, განსხვავებულ ენერგეტიკულ მდგომარეობაში იმყოფებიან იმისდა მიხედვით, თუ სად არიან განლაგებული, კრისტალის მოცულობაში თუ მის ზედაპირზე. მაგალითად, მოცულობაში მოთავსებული ატომი მთელ თავის ენერჯიას ხარჯავს მეზობელ ატომებთან ურთიერთქმედებაში, ე.ი. მისი ყველა კავშირი გაჯერებულია. კრისტალის ზედაპირზე მოთავსებულ ატომებს კი ზოგიერთი კავშირი გაუჯერებელი რჩებათ. ასეთი გაუჯერებელი კავშირების არსებობა განაპირობებს თავისუფალი ზედაპირული ენერჯის არსებობას

(ერგ/სმ<sup>2</sup>). სწორედ ეს ენერგია განსაზღვრავს ამა თუ იმ მინერალის ზედაპირის ბუნებას და წყალთან და მასში არსებულ რეაგენტებთან ურთიერთქმედების უნარს. სითხეებისთვის თავისუფალ ენერგიას ზედაპირული დაჭიმულობით გამოხატავენ. თავისუფალი ზედაპირული ენერგია ზედაპირული დაჭიმულობის მათემატიკური ეკვივალენტია, მაგრამ მინერალის წყალთან ურთიერთქმედების შედეგი დამოკიდებულია არა მხოლოდ მინერალის თავისუფალ ზედაპირულ ენერგიაზე, არამედ წყლის მოლეკულების ურთიერთქმედების ენერგიაზეც. მინერალების ზედაპირზე თავისუფალი კავშირების არსებობა განაპირობებს მის ურთიერთქმედებას წყლის დიპოლებთან. წყლით დასველების პროცესი მინერალების წყალთან ურთიერთქმედების საწყისი ფაზაა და დამოკიდებულია მინერალური ნაწილაკების ენერგეტიკულ მდგომარეობაზე: რაც მეტია მინერალების თავისუფალი ზედაპირული ენერგია, მით უფრო ადვილად სველდება მინერალი წყლით. მაგრამ ფლოტაციის პროცესი ვერ დაეყრდნობა მხოლოდ მინერალების ზედაპირული თვისებების ბუნებრივ განსხვავებას. ფლოტაციის პროცესის ეფექტურად წარმართვისთვის აუცილებელია გავაძლიეროთ მინერალური ნაწილაკების დასველებადობის უნარი, რაც მიიღწევა პულპაში დამატებითი ქიმიური ნივთიერებების, რეაგენტების შეყვანით. რეაგენტების მინერალური ნაწილაკების ზედაპირზე და ჰაერის ბუშტულაკებზე დამაგრება ხდება ფაზების გაყოფის საზღვარზე ქიმიური რეაგენტების ადსორბციის შედეგად თავისუფალი ზედაპირული ენერგიის შემცირების ხარჯზე [5, 6, 8].

ფლოტაციური პროცესი წარმოუდგენელია საფლოტაციო რეაგენტების გარეშე. სწორედ მათ სწორად შერჩევაზეა დამოკიდებული პროცესის ეფექტურობა. საფლოტაციო რეაგენტები ცვლიან მინერალური ნაწილაკების ზედაპირულ საფლოტაციო თვისებებს და ქმნიან სასარგებლო კომპონენტისა და ფუჭი ქანის სელექციის პირობებს. მათი შედგენილობა მეტად რთული და მრავალფეროვანია. დანიშნულების მიხედვით საფლოტაციო რეაგენტები იყოფა სამ ჯგუფად: კოლექტორები, ანუ შემკრებები, ამქაფებლები და რეგულატორები.

კოლექტორები წარმოადგენენ ორგანულ ნაერთებს, ადსორბირდებიან რა მინერალური ნაწილაკების ზედაპირზე არჩევითად, ახდენენ მათ ჰიდროფობიზაციას, ანუ უხშობენ წყლით დასველების უნარს, კონცენტრირდებიან მყარი და თხევადი ფაზების გაყოფის საზღვარზე და ხელს უწყობენ მინერალური ნაწილაკების ჰაერის ბუშტულაკებზე მიკვრას.

ამქაფებლები ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებებია, რომლებიც მაგრდებიან წყლისა და ჰაერის გაყოფის საზღვარზე, ზრდიან ჰაერის

ბუშტულაკების მექანიკურ სიმტკიცეს, ეწინააღმდეგებიან მათ კოვალესცენციას და ამით ხელს უწყობენ ბუშტულაკების დისპერგირებულ მდგომარეობაში შენარჩუნებას, ზრდიან ფლოტაციური ქაფის მდგრადობას.

რეგულატორები კი უმთავრესად არაორგანული ნაერთებია. მათი დანიშნულებაა მინერალის ზედაპირზე კოლექტორის დამაგრების რეგულირება. თუ რეგულატორის მოქმედება ხელს უწყობს კოლექტორის დამაგრებას მინერალის ზედაპირზე, მას აქტივატორს უწოდებენ, ხოლო თუ ხელს უშლის – დეპრესორს. რეგულატორების ასეთი კლასიფიკაცია პირობითია, რადგან ერთი და იგივე რეგულატორი კონკრეტულ პირობებზე დამოკიდებულებით შეიძლება ამჟღავნებდეს როგორც აქტივატორის, ასევე დეპრესორის თვისებებს.

რეგულატორებს მიეკუთვნება აგრეთვე არის რეგულატორები. მათი დანიშნულებაა კოლექტორების, აქტივატორების და დეპრესორების მოქმედებისთვის ხელსაყრელ პირობებისა და საჭირო PH (მჟავა ან ტუტე) გარემოს შექმნა, რაც საბოლოო ჯამში ამაღლებს ფლოტაციის პროცესის ეფექტურობას [5, 6, 7, 8, 9, 10].

ასეთი საკითხების გადაწყვეტა ტექნოლოგიის დამუშავების დროს ხდება. ტექნოლოგიურად გამართული პროცესი კი, თავის მხრივ, საჭიროებს მართვას. პროცესის ხელით მართვა, როდესაც შედეგი მომსახურე პერსონალის უნარზე და კვალიფიკაციაზეა დამოკიდებული, არაეფექტურია. პროცესის ეფექტურობის ამაღლება შესაძლებელია მხოლოდ სწორად გაანგარიშებული და პროცესის ოპტიმიზაციაზე ორიენტირებული ავტომატური მართვის სისტემით.

### 1.3. პროცესის ზოგადი დახასიათება

მოცემულ შემთხვევაში ჭიათურის ცენტრალური საფლოტაციო ფაბრიკა მუშაობს ორი სქემით. ფაბრიკაში შემოსული შლამები იყოფა ორ ნაწილად. ერთი ნაწილი დაფქვისა და ორჯერადი დემლამაციის შემდეგ მიეწოდება ქაფიანი ფლოტაციის პირველ სექციას. გამდიდრება ხდება მექანიკურ საფლოტაციო მანქანებზე. გადანადენის გადაწმენდის შემდეგ მიიღება მხოლოდ კარბონატული კონცენტრატი.

შემოსული შლამების მეორე ნაწილი მიეწოდება ფაბრიკის მეორე სექციას. აქ უკვე გამდიდრება ხდება ФПС-16 ტიპის ქაფიანი სეპარაციის საფლოტაციო მანქანებზე. ქაფიანი სეპარაციის შემდეგად მიიღება როგორც კარბონატული, ისე ჟანგეული კონცენტრატები. თუ შემოსულ შლამებში დომინირებს პეროქსიდების მამდიდრებელი ფაბრიკის №29 და №25 მამდიდრებელი ფაბრიკებიდან შემოსული

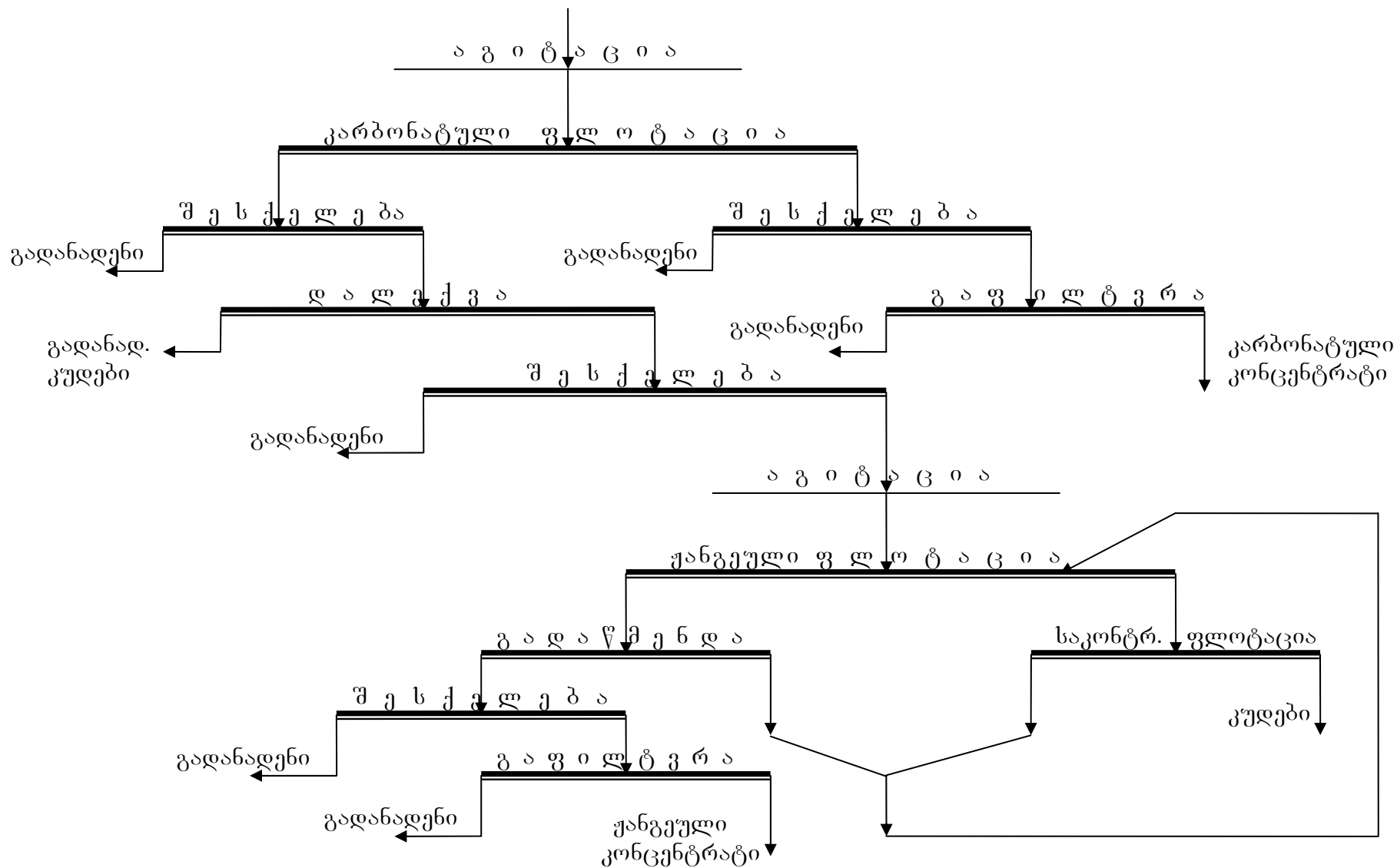
შლამები, მაშინ შლამების 60-70% მიეწოდება ქაფიან სეპარაციას, დანარჩენი 30-40% კი მექანიკურ საფლოტაციო მანქანებს და პირიქით (ნახ. 1.1).

ფაბრიკაში საფლოტაციო რეაგენტებად გამოიყენება გასაპნული ტალის ზეთი, სოლარის ზეთი და თხევადი მინა.

**გასაპნული ტალის ზეთი.** როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მინერალის ზედაპირის ჰიდროფობიზაცია ფლოტაციურ სისტემაში დაკავშირებულია კოლექტორების მოქმედებასთან. იმისდა მიხედვით, განიცდიან თუ არა დისოციაციას წყალში, ე.ი. წარმოქმნიან თუ არა იონებს, კოლექტორები იყოფა იონოგენურ და არაიონოგენურ კოლექტორებად. იონოგენური კოლექტორები, თავის მხრივ, იყოფა ანიონურად და კათიონურად. ანიონურ კოლექტორებში მაჰიდროფობიზებელი მოქმედება დაკავშირებულია ანიონთან (მინერალის ზედაპირზე მაგრდება ანიონი), კათიონურში – კათიონთან. ანიონური კოლექტორები ორი სახისაა: I. კოლექტორები ორგანული და სულფომჟავების ანიონებიანი სოლიდოფილური ჯგუფით და II – კოლექტორები, რომელთა სოლიდოფილური ჯგუფი შექმნილია ორვალენტიანი გოგირდის საფუძველზე. I ჯგუფის კოლექტორებს სხვანაირად ოქსჰიდრილურ შემკრებებსაც უწოდებენ, ვინაიდან მასში წყალბადი ან ლითონი ნახშირწყალბადოვან რადიკალს ჟანგბადის საშუალებით უკავშირდება. სწორედ ამ ჯგუფს მიეკუთვნება გასაპნული ტალის ზეთი. იგი წარმოადგენს ცხიმოვანი და გაფისული მჟავებისა და ნეიტრალური ნივთიერებების ნარევს. ცხიმოვანი მჟავებიდან იგი ძირითადად შეიცავს ოლეინის (28–43)%, ლინოლევის (38–65)%, სტეარინის (4–10)% და პალმიტინის (4–10)% მჟავებს.

ტალის ზეთი ბოლოდროინდელი იაფფასიანი შემცველია ისეთი ძვირადღირებული და დეფიციტური რეაგენტებისა, როგორცაა ოლეინის მჟავა და ნატრიუმის ოლეატი. ტალის ზეთი ცელულოზის წარმოების ერთ-ერთი პროდუქტია. მერქნის გადამუშავებით დებულობენ სულფატურ საპონს, ამ უკანასკნელის გოგირდმჟავათი დაშლის შედეგად კი – ტალის ზეთს. გამოიყენება ხსნარის სახით გასაპნის შემდეგ. კოლექტორული თვისებების გარდა, გასაპნულ ტალის ზეთს გააჩნია ამქაფებლის თვისებებიც [5, 6, 9].

**სოლარის ზეთი** მიეკუთვნება არაიონოგენურ კოლექტორებს. არაიონოგენური კოლექტორები აპოლარული ნივთიერებებია, უმთავრესად წყალში არახსნადი ნახშირწყალბადოვანი სითხეები. ისინი მინერალს გადაეკვრიან აფსკის ან წვეთების სახით და ჰიდროფობიზაციას უკეთებენ მას. ამ სახის კოლექტორების



ნახ. 1.1. თვისებითი სქემა  
13

ტიპური წარმომადგენელია ნავთობზეთები, რომელთა რიცხვსაც მიეკუთვნება სოლარის ზეთი. გამოიყენება 1–10% წყლის ემულსიის სახით.

**თხევადი მინა**, იგივე ნატრიუმის სილიკატი ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), ცნობილი დეპრესორია. მისი თვისებები ფლოტაციაში განისაზღვრება მოდულით:

$$M = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}$$

საიდანაც ნათლად ჩანს, რომ მოდულის გაზრდით თხევადი მინის ტუტიანობა იკლებს. ფლოტაციაში გამოიყენება თხევადი მინა მოდულით 2–3. უფრო დიდი მოდულის მინა ძნელად იხსნება წყალში. თხევადი მინის მადეპრესირებელი მოქმედების მექანიზმი მდგომარეობს მინერალური ნაწილაკების ზედაპირზე თხევადი მინის მიცელების (100–200 მოლეკულა ერთად) სელექტიურ დალექვაში. იგი ჰიდროფილურს ხდის მინერალის ზედაპირს.

თხევადი მინა გამოიყენება კრისტალური ნატრიუმის სულფიტის  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  და უწყლო ნატრიუმის სულფიტის  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ -ის სახით. კრისტალური ნატრიუმის სულფიტი ორი სახისაა: ფოტოგრაფიული და ტექნიკური. ის ძირითადი მინარეგების სახით შეიცავს ნატრიუმის კარბონატს ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), რკინას და ნატრიუმის სულფატს. ძირითადი შემცველობისა და მინარეგების შემცველობის მიხედვით არსებობს სამი სახის თხევადი მინა: A და B ხარისხის ფოტოგრაფიული (92% და 95%) და ტექნიკური (87%). ფლოტაციაში გამოიყენება 5–15% ხსნარების სახით, ხშირად გამოიყენება რკინის, თუთიის ან სპილენძის აჯასპთან და გოგირდმჟავა აღუმინთან ერთად.

საზოგადოდ, თხევადი მინა ისეთი ფუჭი ქანების საუკეთესო დეპრესორია, როგორცაა კვარცი, კვარციტი, დოლომიტი და სხვ., სწორედ ეს მინერალები გვხვდება ფუჭი ქანის სახით მანგანუმის მადანში. ამიტომ თხევადი მინა წარმატებით გამოიყენება მანგანუმის მადნის ფლოტაციის დროს. იგი ხელს უშლის ფუჭ ქანზე კოლექტორის (შემკრების) დამაგრებას, რითაც ხელს უწყობს მის სელექციურ მოქმედებას. ჭიათურის საფლოტაციო ფაბრიკის პირობებში გამოიყენებულა ტექნიკური თხევადი მინა ხსნარის სახით. თხევადი მინის საშუალებით ფლოტაცია მიმდინარეობს ტუტე არეში: pH იცვლება 9–9.5 ფარგლებში [5, 9].

ფაბრიკის რეაგენტული რეჟიმი კარბონატული ფლოტაციისთვის მექანიკურ საფლოტაციო მანქანებზე ასეთია:

– თხევადი მინა ძირითადი ფლოტაციისთვის – 0.4 კგ/ტ,

- გადაწმენდისთვის – 0.3 კგ/ტ;
- გასაპნული ტალის ზეთი – 2.7 კგ/ტ;
- სოლარის ზეთი – 1.5 კგ/ტ.

ქაფიანი სეპარაცია კი მიმდინარეობს შემდეგი რეაგენტული რეჟიმით:

კარბონატული ფლოტაცია:

- თხევადი მინა – 0.7 კგ/ტ;
- გასაპნული ტალის ზეთი – 1.8 კგ/ტ;
- სოლარის ზეთი – 1.1 კგ/ტ.

ჟანგეული ფლოტაცია:

- თხევადი მინა – 0.3 კგ/ტ;
- გასაპნული ტალის ზეთი – 2.2 კგ/ტ;
- სოლარის ზეთი – 1.5 კგ/ტ.

პროექტის მიხედვით ფაბრიკაში შემოდის დეშლამაციის სილები.

გამდიდრების შედეგად კონცენტრატი მიიღება როგორც მექანიკური ფლოტაციით, ასევე ქაფიანი სეპარაციით. საბოლოოდ ორივე გზით მიღებული კონცენტრატები ერთმანეთში აირევა და მიიღება საერთო კარბონატული კონცენტრატი.

გარდა კარბონატული კონცენტრატისა, მიიღება აგრეთვე ჟანგეული კონცენტრატი. შემოსული შლამებიდან ძირითად მასას (თითქმის ნახევარს) წარმოადგენს დეშლამაციის შედეგად მიღებული გადანადენი, რომელიც არ ექვემდებარება გამდიდრებას და იკარგება.

## თავი 2. ექსპერიმენტი

### 2.1. წინასწარი ექსპერიმენტი

ფლოტაცია რთული ტექნოლოგიური პროცესია. ამ დროს გამდიდრების პროცესს მიეწოდება პულპა. იგი ხასიათდება მთელი რიგი თვისებებით, რომლებიც განპირობებულია როგორც პულპის მინერალოგიური შედგენილობით, ისე წინმსწრები დამუშავების მეთოდებით, როგორცაა დამსხვრევა, დაწვრილმანება თუ გამდიდრების სხვა ოპერაციები. შესაძლებელია გამოვყოთ ათობით ფაქტორი, რომლებიც მოქმედებს ფლოტაციის პროცესზე. სწორედ ამიტომ არის რთული ფლოტაციის პროცესის მართვა.

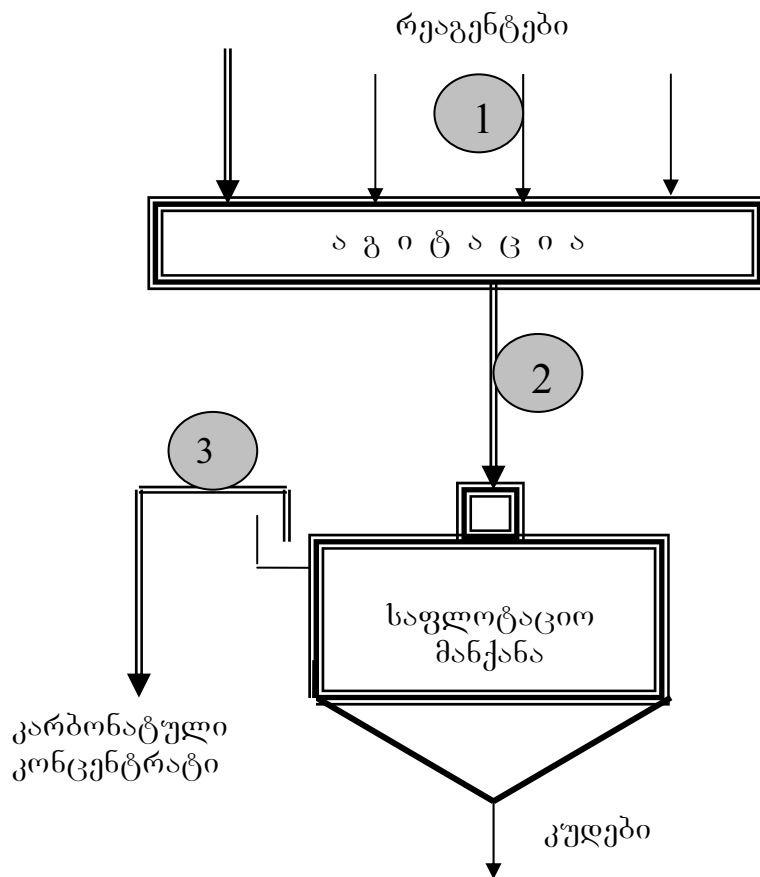
ტექნოლოგიური პროცესის ავტომატური მართვის სისტემის დამუშავებისას სამუშაოს საწყისი საფეხურია ობიექტის მათემატიკური აღწერა. ამ დროს შესაძლებელია გამოვლენილ იქნას პროცესის მიმდინარეობის ისეთი თავისებურებები, რაც ტექნოლოგის თვალისთვის ჩვეულებრივ შეუმჩნეველია. ობიექტის მათემატიკური აღწერა საშუალებას გვაძლევს შევარჩიოთ მმართველი ზემოქმედებები, განვსაზღვროთ ავტომატიზაციის ოპტიმალური მოცულობა, დავადგინოთ მართვის მეთოდი.

ქაფიანი სეპარაციის საფლოტაციო მანქანებზე მანგანუმის შლამების ფლოტაციის პროცესის პარამეტრების სტატისტიკური მონაცემების მისაღებად გამოიყენება პასიური ექსპერიმენტის მეთოდი, რაც ნიშნავს პროცესის პარამეტრების გაზომვას საწარმოო პირობებში.

პასიური ექსპერიმენტის ჩატარებამდე საჭირო იყო განგვესაზღვრა გაზომვებს შორის დროის ბიჯი და დაგვიანების დრო გასაზომ პარამეტრებს შორის, რისთვისაც ჩატარდა წინასწარი ექსპერიმენტი [11].

წინასწარი ექსპერიმენტის ჩატარების სქემა მოცემულია ნახ. 2.1-ზე, სადაც: 1 არის რეაგენტების (გასაპნული ტალის ზეთი, სოლარის ზეთი, თხევადი მინა) ხარჯის ( $Q_1, Q_2, Q_3$ , კგ/სთ) გაზომვის წერტილი; 2 – გასამდიდრებელი მასალის მიხედვით მწარმოებლურობის ( $Q_a$ , ტ/სთ) გაზომვის წერტილი; 3 – კონცენტრატის მიხედვით მწარმოებლურობის ( $Q_b$ , ტ/სთ) გაზომვის წერტილი. გაზომვები ტარდებოდა  $\Delta t = 3$  წუთის ინტერვალით. ასეთი გზით მიღებულ იქნა ამ სიდიდეებისთვის თითო რეალიზაცია  $x(t)$ . წინასწარი ექსპერიმენტის მონაცემები მოცემულია №1 დანართში.





ნახ. 2.1. წინასწარი ექსპერიმენტის სქემა

როგორც დანართის ცხრილიდან ჩანს, ექსპერიმენტული ანათვლები ღებულობს ჩვენთვის წინასწარ უცნობ შემთხვევით მნიშვნელობებს და იმაგდროულად უწყვეტად იცვლება ექსპერიმენტის მიმდინარეობის პროცესში. აქედან გამომდინარე, რადგან შემთხვევითი სიდიდეები, იგივე ანათვლები, იცვლება ცდის მიმდინარეობის პროცესში, საქმე გვაქვს შემთხვევით ფუნქციებთან. კონკრეტული სახე, რომელსაც შემთხვევითი ფუნქცია ღებულობს ცდის შედეგად, არის შემთხვევითი ფუნქციის რეალიზაცია.

პრაქტიკაში ხშირად გვხვდება შემთხვევითი პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობს დროში ერთგვაროვნად და რომლებიც ირხევიან რაღაც საშუალო მნიშვნელობის მიმართ საშუალო ამპლიტუდით. ასეთი პროცესი შეიძლება მივიჩნიოთ სტაციონარულად.

სტაციონარული პროცესი შეიძლება განვიხილოთ როგორც დროში განუსაზღვრელად გახანგრძლივებული პროცესი. ასეთი პროცესის კვლევისას ანათვლების აღება შეიძლება ვაწარმოთ დროის ნებისმიერ მომენტში. დროის ნებისმიერ მონაკვეთში მიღებული მახასიათებლები ასეთ შემთხვევაში იდენტურია. მაშასადამე, შესაძლებელია ჩავთვალოთ, რომ სტაციონარულ პროცესს არ გააჩნია დასაწყისი და დასასრული [12].

განსხვავებით სტაციონარული პროცესისგან, არასტაციონარული პროცესი ხასიათდება დროში სწრაფი განვითარების (ცვლილების) ტენდენციით. ამიტომაც ასეთი პროცესის მახასიათებლები დამოკიდებულია ანათვლის აღების მომენტზე, დროზე.

პრაქტიკაში უხვად შეიძლება მოვიყვანოთ ასეთი სახის პროცესების მაგალითები. აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ ნებისმიერ დინამიკურ სისტემაში გვხვდება როგორც არასტაციონარული, ასევე სტაციონარული პროცესები. შემთხვევითი პროცესი დინამიკურ სისტემაში იწყება გარდამავალი პროცესით. მისი ჩაქრობის შემდეგ იწყება დამყარებული რეჟიმი, რომელიც თავისუფლად შეიძლება ჩავთვალოთ სტაციონარულად, მისი აღმწერი ფუნქცია კი – სტაციონარულ შემთხვევით ფუნქციად.

სტაციონარული შემთხვევითი ფუნქციის მახასიათებლებია: მათემატიკური მოლოდინი, დისპერსია და კორელაციური ფუნქცია.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, სტაციონარული შემთხვევითი ფუნქცია მიმდინარეობს დროში ერთგვაროვნად. ამის საფუძველზე შესაძლებელია მოვითხოვოთ, რომ სტაციონარული შემთხვევითი ფუნქციის მათემატიკური მოლოდინი იყოს მუდმივი:

$$m_x(t) = m_x = \text{const} . \quad (2.1)$$

მეორე პირობა, რასაც უნდა აკმაყოფილებდეს სტაციონარული შემთხვევითი ფუნქცია, ეს არის დისპერსიის მუდმივობა:

$$D_x(t) = D_x = \text{const} . \quad (2.2)$$

მესამე პირობა შეეხება კორელაციურ ფუნქციას. როგორც ვიცით, კორელაციური ფუნქცია ახასიათებს სხვადასხვა დროის ჭრილში ( $t$ ,  $t'$ ) შემთხვევითი ფუნქციის მნიშვნელობებს შორის დამოკიდებულების ხარისხს. მაგრამ სტაციონარული შემთხვევითი პროცესი დამოკიდებული არ არის იმაზე, თუ სად აიღება დროით ღერძზე  $t$  და  $t'$ , არამედ დამოკიდებულია მხოლოდ იმაზე, თუ როგორია მათ შორის შუალედი  $\tau$ . აქედან გამომდინარე, სტაციონარული

შემთხვევითი ფუნქციის შემთხვევაში კორელაციური ფუნქცია გამოდის არა ორი  $t$  და  $t'$ -ის, არამედ ერთი  $\tau$  არგუმენტის ფუნქცია, რაც მეტად ამარტივებს ოპერაციებს სტაციონარული შემთხვევითი ფუნქციების დროს:

$$K_x(t, t + \tau) = K_x(\tau). \quad (2.3)$$

ისმება კითხვა, თუ შემთხვევითი პროცესი სტაციონარულია და ერთგვაროვნად მიმდინარეობს დროში, არის კი საჭირო შემთხვევითი ფუნქციის მახასიათებლების გასაგებად რამდენიმე რეალიზაციის ცოდნა? თუ ჩავთვლით, რომ სტაციონარული შემთხვევითი ფუნქცია შესაძლებელია დავახასიათოთ მისი ერთი კონკრეტული რეალიზაციით, ეს ბევრად გაამარტივებს საქმეს [12].

თუ შემთხვევითი ფუნქციის თითოეული კონკრეტული რეალიზაცია სრულყოფილად წარმოადგენს შემთხვევითი ფუნქციის ყველა შესაძლო რეალიზაციის სიმრავლეს, ამბობენ, რომ შემთხვევით ფუნქციას გააჩნია ერგოდიულობის თვისება.

ერგოდიულობის თვისება დამახასიათებელია იმ პროცესებისთვის, რომლებიც არ ხასიათდება განშლადობით შინაგანი ერთგვაროვნების გამო. ერგოდიული პროცესების დროს კორელაციური ფუნქცია მკვეთრად მცირდება და მიისწრაფვის ნულისკენ, როცა  $\tau \rightarrow \infty$ . მაგრამ პრაქტიკაში ჩვენ არ გვაქვს საშუალება გამოვიკვლიოთ შემთხვევითი პროცესი და მისი კორელაციური ფუნქცია დროის უსასრულოდ დიდ მონაკვეთზე, ამიტომ სტაციონარული შემთხვევითი ფუნქციებისთვის ერგოდიულობის თვისების მინიჭება ხდება ფიზიკური მოსაზრებებიდან გამომდინარე [12].

შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ ჩვენ მიერ შერჩეული შემთხვევითი ფუნქციები არ ხასიათდება განშლადობით (შემთხვევითი პროცესები არ იშლება სხვადასხვა ტიპის ელემენტარულ პროცესებად), რაც საფუძველს გვაძლევს ჩავთვალოთ, რომ საქმე გვაქვს ერგოდიულ სტაციონარულ შემთხვევით ფუნქციებთან.

## 2.2. ავტოკორელაციური ფუნქციები და დროის ინტერვალი გაზომვებს შორის

განვსაზღვროთ ერგოდიული სტაციონარული შემთხვევითი ფუნქციის  $X(t)$ -ს მახასიათებლები ერთი რეალიზაციის მიხედვით.

მათემატიკური მოლოდინი საკმაოდ დიდი  $T$  დროის მონაკვეთისთვის იანგარიშება ფორმულით:

$$m_x \approx \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt. \quad (2.4)$$

ანალოგიურად შეიძლება ვიპოვოთ მიახლოებითი კორელაციური ფუნქცია  $k_x(\tau)$  ნებისმიერი  $\tau$ -თვის. მართლაც, კორელაციური ფუნქცია წარმოადგენს შემთხვევითი ფუნქციების  $\overset{0}{X}(t)$  და  $\overset{0}{X}(t+\tau)$ -ს მათემატიკურ მოლოდინს:

$$K_x(\tau) = M[\overset{0}{X}(t)\overset{0}{X}(t+\tau)], \quad (2.5)$$

სადაც  $\overset{0}{X}(t)$  და  $\overset{0}{X}(t+\tau)$  არის  $X(t)$  ფუნქციის დაცენტრებული ფუნქციები და იანგარიშება ფორმულით:

$$\overset{0}{x}(t) = x(t) - m_x. \quad (2.6)$$

მოცემული  $\tau$ -თვის  $\overset{0}{X}(t)\overset{0}{X}(t+\tau)$  შემთხვევითი ფუნქციის მათემატიკური მოლოდინი იანგარიშება როგორც დროის მიხედვით საშუალო. აქვე უნდა შევნიშნოთ, რომ ამ შემთხვევაში დროის მონაკვეთი იცვლება არა 0-დან T-მდე, არამედ 0-დან  $(T-\tau)$ -მდე. შესაბამისად მივიღებთ:

$$K_x(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} \overset{0}{x}(t)\overset{0}{x}(t+\tau) dt. \quad (2.7)$$

გამარტივების მიზნით (2.4) და (2.7) ინტეგრალები შეიძლება შევცვალოთ ჯამებით. ამის გათვალისწინებით მივიღებთ საანგარიშო ფორმულას:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t_i) \quad (2.8)$$

და

$$K_x(\tau) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} \overset{0}{x}(t_i)\overset{0}{x}(t_i+m\Delta t). \quad (2.9)$$

კორელაციური ფუნქციის ანგარიში (2.9) ფორმულის მიხედვით გრძელდება  $m = 0, 1, 2, \dots$   $m$ -ის იმ მნიშვნელობამდე, როდესაც კორელაციური ფუნქცია პრაქტიკულად ხდება ნულის ტოლი და იწყებს მცირე რხევას ნულის მიმართ [10].

ზემომოყვანილის საფუძველზე  $R_x(\tau)$  ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციების გაანგარიშება  $Q_\alpha, Q_\beta, q_1, q_2, q_3$  სიდიდეებისათვის (№1 დანართის მონაცემების მიხედვით) ჩატარდა შემდეგი სქემით [11, 12]:

1. საშუალო მნიშვნელობა:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t_i), \quad (2.10)$$

სადაც  $n$  არის ცდების რაოდენობა,  $i$  – ცდის ნომერი.

2. დაცენტრება:

$$\dot{x}(t_i) = x(t_i) - \bar{x}. \quad (2.11)$$

3. დისპერსია:

$$D_{\dot{x}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\dot{x}(t_i)]^2. \quad (2.12)$$

4. კორელაციური ფუნქციის მნიშვნელობები  $\tau = m \cdot \Delta t$  სხვადასხვა მნიშვნელობისთვის:

$$K_{\dot{x}}(\tau) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=0}^{n-m} \dot{x}(t_i) \dot{x}(t_i + m \cdot \Delta t), \quad (2.13)$$

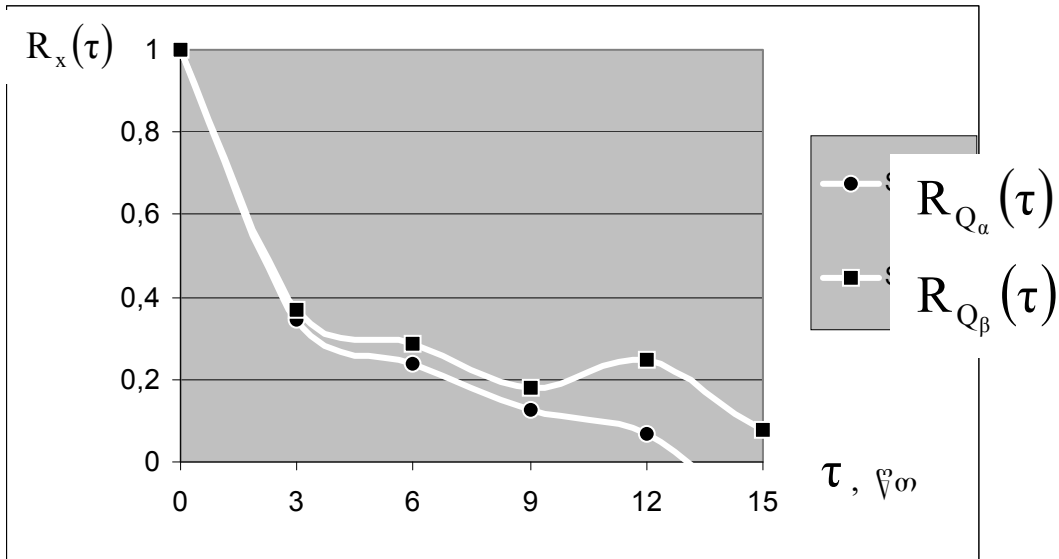
სადაც  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  და, შესაბამისად,  $\tau = 0, 3, 6, 9, \dots$  (წთ).

5. ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციის მნიშვნელობები  $m$ -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის:

$$R_x(\tau) = \frac{K_{\dot{x}}(\tau)}{D_{\dot{x}}}. \quad (2.14)$$

ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციის მნიშვნელობების გაანგარიშება (2.14) გამოსახულების მიხედვით გრძელდება  $m$ -ის (და, შესაბამისად,  $\tau$ -ს) იმ მნიშვნელობამდე, როდესაც ფუნქცია პრაქტიკულად ნულის ტოლი ხდება (დანართი 2).

ცდებს შორის დროის სიდიდე განისაზღვრა  $Q_a, Q_b, q_1, q_2, q_3$  სიდიდეების ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციების მიხედვით. აღმოჩნდა, რომ კორელაციური ფუნქციები განიცდის ვარდნას 10-15 წუთის შემდეგ. ამ დროისთვის ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციები პრაქტიკულად განულებულია, რაც იმას ნიშნავს, რომ სწორედ ამ დროის შემდეგ მომდევნო ანათვალის წინასვან დამოუკიდებელი ხდება. ამის გათვალისწინებით პასიური ექსპერიმენტისთვის გაზომვებს შორის დროის ინტერვალად შეირჩა 15 წუთი, რაც  $Q_a, Q_b$ -ს მაგალითზე მოცემულია 2.2 ნახაზზე.



ნახ. 2.2.

$Q_\alpha, Q_\beta$ -ს ავტოკორელაციური ფუნქციები

### 2.3. ურთიერთკორელაციური ფუნქციები და დროითი წანაცვლება

#### სიდიდეების რეალიზაციებს შორის

გაზომვებს შორის დროის ინტერვალის შესარჩევად ჩვენ გამოვიყენეთ ნორმირებული ავტოკორელაციური ფუნქციები. დროის ეს ინტერვალი ერთნაირია ყველა  $Q_\alpha, Q_\beta, q_1, q_2, q_3$  სიდიდისთვის, მაგრამ ისინი ერთდროულად არ იზომება, რადგან ერთმანეთის მიმართ დროითაა წანაცვლებული (წერტილები 1, 2 და 3 ნახ. 2.1-ზე). ამ სიდიდეებს შორის გაზომვის დროის ინტერვალის, ანუ რეალიზაციებს შორის დროითი წანაცვლების შესარჩევად შეიძლება გამოვიყენოთ ნორმირებული ურთიერთკორელაციური ფუნქციები.

ზემოაღწერილი სქემის ანალოგიურად  $R_{x_1 x_2}(\tau)$  ნორმირებული ურთიერთკორელაციური ფუნქციების გაანგარიშება წყვილ-წყვილად  $Q_\alpha, Q_\beta, q_1, q_2, q_3$  სიდიდეებისთვის ( $Q_\alpha - Q_\beta, q_1 - Q_\beta, q_2 - Q_\beta, q_3 - Q_\beta$ ) ჩატარდა №1 დანართის მონაცემების მიხედვით შემდეგი სქემით:

1. საშუალო მნიშვნელობები:

$$\bar{x}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_1(t_i), \quad \bar{x}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_2(t_i), \quad (2.15)$$

2. დაცენტრება:

$$\dot{x}_1(t_i) = x_1(t_i) - \bar{x}_1, \quad \dot{x}_2(t_i) = x_2(t_i) - \bar{x}_2, \quad (2.16)$$

3. დისპერსიები:

$$D_{\dot{x}_1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\dot{x}_1(t_i)]^2, \quad D_{\dot{x}_2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\dot{x}_2(t_i)]^2, \quad (2.17)$$

4. ურთიერთკორელაციური ფუნქციის მნიშვნელობები  $\tau = m \cdot \Delta t$  სხვადასხვა მნიშვნელობისთვის:

$$K_{\dot{x}_1 \dot{x}_2}(\tau) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=0}^{n-m} \dot{x}_1(t_i) \dot{x}_2(t_i + m \cdot \Delta t), \quad (2.18)$$

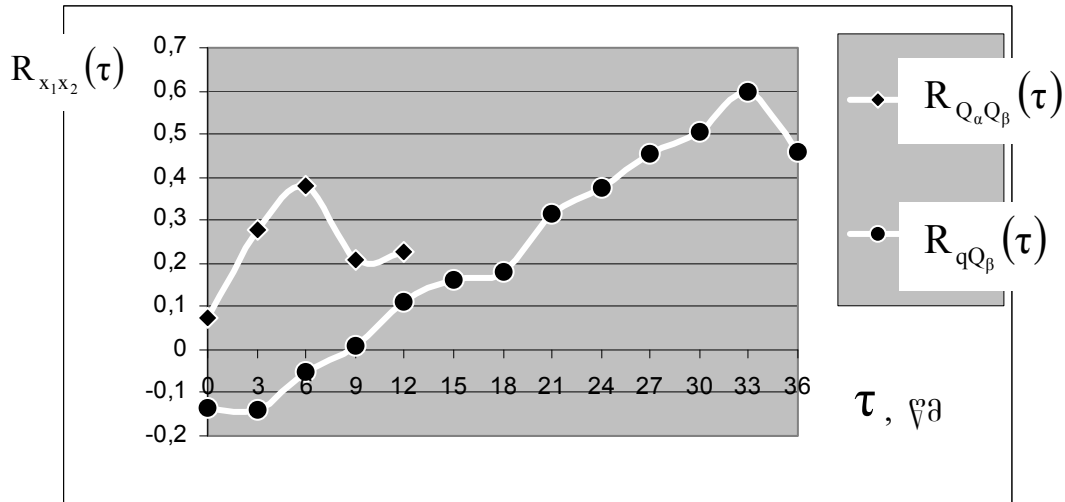
5. ნორმირებული ურთიერთკორელაციური ფუნქციის მნიშვნელობები  $m$ -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის

$$R_{\dot{x}_1 \dot{x}_2}(\tau) = \frac{K_{\dot{x}_1 \dot{x}_2}(\tau)}{\sqrt{D_{\dot{x}_1}} \cdot \sqrt{D_{\dot{x}_2}}}. \quad (2.19)$$

ურთიერთკორელაციური ფუნქციის გაანგარიშება (2.19) გამოსახულების მიხედვით გრძელდება  $m$ -ის (და, შესაბამისად,  $\tau$ -ს) იმ მნიშვნელობამდე, როცა ურთიერთკორელაციური ფუნქცია აღწევს თავის მაქსიმუმს (დანართი 3) [11, 12].

$Q_\alpha$ - $Q_\beta$  წყვილისათვის ნორმირებული ურთიერთკორელაციური ფუნქცია გვიჩვენებს, რომ მაქსიმალური ურთიერთკავშირი  $Q_\alpha$  და  $Q_\beta$  სიდიდეებს შორის შეიმჩნევა 6 წუთის შემდეგ ( $\tau = 6$  წთ), ხოლო  $q_2 - Q_\beta$  სიდიდეებს შორის – 33 წუთის შემდეგ. აქედან გამომდინარე,  $Q_\alpha$ -ს ანათვალა აღებულ უნდა იქნას 6 წუთით ადრე, ვიდრე  $Q_\beta$ -ს ანათვალა, ხოლო  $q_2$ -ისა – 33 წუთით ადრე (ნახ. 2.3). ანალოგიურად ვღებულობთ, რომ  $q_1$ - $Q_\beta$  სიდიდეებს შორის მაქსიმალური დამოკიდებულების ხარისხი შეიმჩნევა 45 წუთის შემდეგ, ხოლო  $q_3 - Q_\beta$  სიდიდეებს შორის – 57 წუთის შემდეგ. ამის გათვალისწინებით, პასიური ექსპერიმენტის ჩატარების დროს  $q_1$  სიდიდის პირველი ანათვლის აღება უნდა დაიწყო 45 წუთით ადრე, ხოლო  $q_3$ -ისა – 57 წუთით ადრე  $Q_\beta$ -ს ანათვლის აღების მომენტთან მიმართებით.

მაშასადამე, სიდიდეები შემდეგი თანამიმდევრობით უნდა გაიზომოს: თავდაპირველად –  $q_3$ ,  $57-45=12$  წთ-ის შემდეგ –  $q_1$ ,  $45-33=12$  წთ-ის შემდეგ –  $q_2$ ,  $33-6=27$  წთ-ის შემდეგ –  $Q_\alpha$ , 6 წთ-ის შემდეგ –  $Q_\beta$ . სულ გაზომვის ერთი ციკლი გაგრძელდება 57 წთ და ციკლები, როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, გამეორდება ყოველ 15 წუთში.



ნახ. 2.3.

ურთიერთკორელაციური ფუნქციები

2.4. ძირითადი ექსპერიმენტი

დადგენილი დროითი ინტერვალების დაცვით ჭიათურის საფლოტაციო ფაბრიკაზე ჩატარდა პასიური ექსპერიმენტი, რომლის შედეგები მოცემულია №4 დანართში. აქ:

$\beta$  არის კარბონატული კონცენტრატის ხარისხი (მანგანუმის შემცველობა კარბონატული ფლოტაციის კონცენტრატში), %;

$\theta$  – მანგანუმის შემცველობა კარბონატული ფლოტაციის კუდებში, %;

$Q$  – კარბონატული ფლოტაციის მწარმოებლურობა კვების მიხედვით, ტ/სთ;

$Q_\beta$  – კარბონატული ფლოტაციის მწარმოებლურობა კონცენტრატის მიხედვით, ტ/სთ;

$Q_\theta$  – კარბონატული ფლოტაციის მწარმოებლურობა კუდების მიხედვით, ტ/სთ;

$q_1$  – გასაპნული ტალის ზეთის მწარმოებლურობა, კგ/სთ;

$q_2$  – სოლარის ზეთის მწარმოებლურობა, კგ/სთ;

$q_3$  – თხევადი მინის მწარმოებლურობა, კგ/სთ;

$h$  – ქაფის დონე საფლოტაციო მანქანაში, სმ.

ჩამოთვლილი პარამეტრების გარდა, ექსპერიმენტის მონაცემების მიხედვით გაანგარიშებულ იქნა კონცენტრატის გამოსავალი:

$$\gamma = \frac{\alpha - \vartheta}{\beta - \vartheta} \tag{2.20}$$



და კონცენტრატში მანგანუმის ამოკრეფა:

$$\xi = \frac{\gamma\beta}{\alpha}. \quad (2.21)$$

ექსპერიმენტის შედეგად მიღებული მანგანუმის შლამების კარბონატული ფლოტაციის პროცესის პარამეტრების რიცხვითი მასივები ჭიათურის საფლოტაციო ფაბრიკის პირობებისთვის შეტანილია №4 დანართის ცხრილში.

### თავი 3. ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი და ამოცანა

#### 3.1. საფლოტაციო მანქანა – მართვის ობიექტი

გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესი საფლოტაციო მანქანაში ემყარება მინერალების ზედაპირულ თვისებებს შორის სხვაობას. კერძოდ, ქაფიანი ფლოტაციის დროს ჰიდროფობური ნაწილაკები ეკვრიან აერაციის შედეგად წარმოქმნილ ჰაერის ბუშტულაკებს და ამოტივტივდებიან მათთან ერთად პულპის ზედაპირზე, ხოლო ჰიდროფილური მინერალური ნაწილაკები იძირებიან საფლოტაციო მანქანის ფსკერზე.

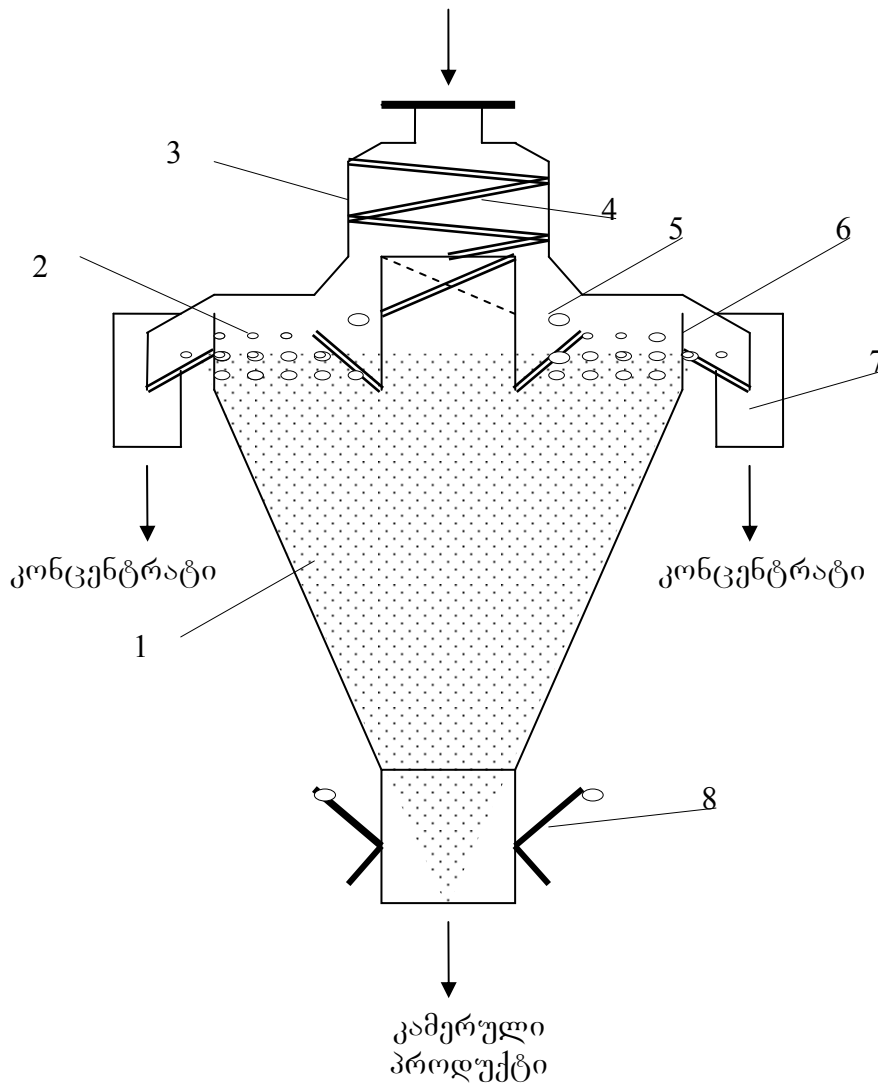
ჭიათურის საფლოტაციო ფაბრიკის პირობებში კარბონატული ფლოტაციისთვის გამოყენებული იყო ქაფიანი სეპარაციის მანქანები ФПС-16 (ნახ. 3.1). ასეთი ტიპის მანქანების კონსტრუქცია შედარებით ახალი შექმნილია და გამოიყენება მსხვილადნაწილული მადნების გასამდიდრებლად.

მანქანა შედგება საფლოტაციო კამერისგან 1, რომლის შუა ნაწილში განთავსებულია ჯონსის გამყოფის ტიპის ჩამტვირთავი მოწყობილობა 3. იგი შედგება რამდენიმე დახრილი დეკისგან 4 და უზრუნველყოფს მანქანის მთელ სიგრძეზე პულპის თანაბარ მიწოდებას. მანქანაში პულპა მიეწოდება ქაფის შრეს ზემოდან. ამ საკმაოდ მდგრად შრეს წარმოქმნის მილისებრი რეზინის აერატორები 2, რომლებიც განლაგებულია ერთმანეთისგან 18–20 მმ-ის დაშორებით ორ მწკრივად. პროცესის მიმდინარეობისას ჰიდროფობური ნაწილაკები რჩებიან ქაფის შრეში და გადაადგილდებიან მასთან ერთად ქაფის ზღუდარისკენ 6 საშხეფურით. წყალი და რეაგენტების წყალხსნარი მიეწოდება ქაფის ზედაპირზე. ეს უკანასკნელი ქაფმომხდელის საშუალებით განიტვირთება ღარებში 7 კონცენტრატის სახით. ჰიდროფილური (არაფლოტირებული) ნაწილაკები იძირებიან კამერის ქვედა ნაწილში და გამოიყოფიან შლანგური საკეტის 8 გავლით კამერული პროდუქტის სახით [5, 9].

იდენტიფიკაციის, ოპტიმიზაციისა და მართვის თვალსაზრისით მამდიდრებელი ფაბრიკების ტექნოლოგიური პროცესები და მანქანები (აპარატები) განეკუთვნება რთული ობიექტების კლასს, რომლებიც ხასიათდება დიდი რაოდენობის შესავალი და გამოსავალი სიდიდეებით.

საფლოტაციო მანქანა, როგორც მართვის ობიექტი [13, 14, 15], მოცემულია 3.2 ნახაზზე.

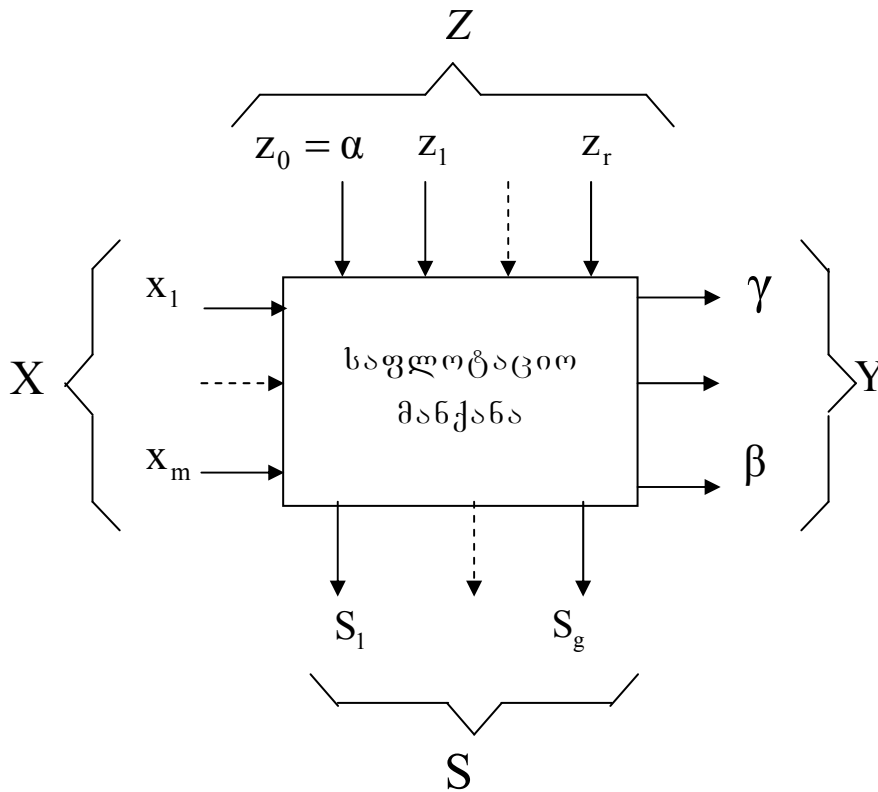
შესავალი სიდიდეები იყოფა ორ ჯგუფად:  $X(x_1, x_2, \dots, x_m)$  მმართველ და  $Z(z_0 = \alpha, z_1, z_2, \dots, z_r)$  შემაშფოთებელ სიდიდეებად.



ნახ. 3.1. საფლოტაციო მანქანა

მმართველად მიიჩნევა ისეთი სიდიდე, რომლის რეგულირებით პროცესი შეიძლება წარიმართოს სასურველ (ოპტიმალურ) რეჟიმში. ჩვენს შემთხვევაში ფლოტაციის პროცესისთვის მმართველ სიდიდედ მიღებულია რეაგენტების:  $Q_1$  გასაპნული ტალის ზეთის,  $Q_2$  სოლარის ზეთისა და  $Q_3$  თხევადი მინის ხარჯები, კგ/წთ.

შემაშფოთებლად მიიღება სიდიდე, რომელიც გავლენას ახდენს ტექნოლოგიური პროცესის მსვლელობაზე, მაგრამ არ გამოდგება მმართველ სიდიდედ (არ ემორჩილება რეგულირებას). ასეთ სიდიდედ მივიჩნიეთ გასამდიდრებელი მადნის ხარისხი ( $Mn$ -ის შემცველობა გასამდიდრებელ მადანში)  $Z_0 = \alpha$ , % და გასამდიდრებელი მადნის ხარჯი (მწარმოებლურობა)  $Q$ , ტ/სთ.



ნახ. 3.2. საფლოტაციო მანქანა – მართვის ობიექტი

გამოსავალი სიდიდეებიც ორ ჯგუფად იყოფა: ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებელ (გამდიდრების მაჩვენებლებად)  $Y(\beta, \varepsilon, \gamma, Q_{\beta})$  და რეჟიმულ  $S(s_1, \dots, s_g)$  სიდიდეებად.

ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლად მიიჩნევა სიდიდე, რომელიც დამოკიდებულია შესავალ სიდიდეებზე, ახასიათებს პროცესის ეფექტურობას და გამოიყენება ოპტიმალურობის კრიტერიუმის ფორმულირებისას. გამდიდრების მაჩვენებლად მივიღეთ კონცენტრატის გამოსავალი (კონცენტრატის წონითი რაოდენობის ფარდობა საწყისი მასალის წონით რაოდენობასთან)  $\gamma$  (%) და კონცენტრატის ხარისხი (Mn-ის შემცველობა კონცენტრატში)  $\beta$  (%).

რეჟიმულ სიდიდეთა ჯგუფს განეკუთვნება სიდიდეები, რომლებიც აგრეთვე დამოკიდებულია შესავალ სიდიდეებზე, არ წარმოადგენს ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლებს, მაგრამ ახასიათებს პროცესის მიმდინარეობას, აფასებს მოსალოდნელ შედეგებს და შეიძლება გამოყენებულ იქნას პროცესის მართვისას. ფლოტაციის პროცესის შემთხვევაში ასეთად მივიჩნიეთ ქაფის სიმაღლე.

### 3.2. ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი

გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესის მართვის ამოცანა ზოგად შემთხვევაში დაიყვანება მმართველი სიდიდეების რეგულირებაზე შემაშფოთებელი ან რეჟიმული (ან ორივე ერთად) სიდიდის მიხედვით. მართვის მიზანია ისეთი შედეგის მიღწევა, რომელიც აკმაყოფილებს ოპტიმალურობის განსაზღვრულ, შერჩეულ კრიტერიუმს.

იმის მიხედვით, თუ რომელი მაჩვენებლის ექსტრემიზაციას ითვალისწინებს ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი, არსებობს ტექნოლოგიური, თერმოდინამიკური, კინეტიკური, სტატისტიკური და ეკონომიკური კრიტერიუმები [16, 17, 18].

ოპტიმიზაციის ტექნოლოგიური კრიტერიუმი ითვალისწინებს გამდიდრების მაჩვენებლების (მაგალითად, ამოკრეფის, გამოსავლის ან მათზე დამოკიდებული რომელიმე კომბინირებული სიდიდის) ექსტრემიზაციას;

თერმოდინამიკურ კრიტერიუმებში საექსტრემიზაციო მაჩვენებლად განიხილება ენტროპია, გამყოფი პოტენციალი ან სიმძლავრე;

კინემატიკური კრიტერიუმები ითვალისწინებს პროცესის მიმდინარეობის სიჩქარეს;

სტატისტიკურ კრიტერიუმებში გამოიყენება მაჩვენებლები, რომლებიც განისაზღვრება სტატისტიკური დამოკიდებულებების მიხედვით ან წარმოადგენს ანალიზურად აღწერილი რომელიმე სტატისტიკური განაწილების პარამეტრებს;

ეკონომიკური კრიტერიუმები ითვალისწინებს ღირებულებითი მაჩვენებლების ექსტრემიზაციას.

მიუხედავად გადასაჭრელი ამოცანის ხასიათისა, კრიტერიუმის არჩევა ყოველთვის ემსახურება ერთ საერთო მიზანს – მიღწეულ იქნეს ოპტიმალური ეკონომიკური და ტექნოლოგიური მაჩვენებლები [16].

კრიტერიუმების ანალიზი, რომელიც მოყვანილია [16, 17, 18] -ში, აჩვენებს, რომ მართვის თვალსაზრისით უპირატესობა უნდა მიენიჭოს ეკონომიკურ კრიტერიუმებს, მაგრამ მამდიდრებელი ფაბრიკების ტექნოლოგიური პროცესების ოპტიმიზაციისთვის ასეთი კრიტერიუმის გამოყენება ყოველთვის არ ხერხდება მონაცემთა უკმარისობის გამო. გარდა ამისა, ეკონომიკური მიდგომა სხვებისგან განსხვავდება იმით, რომ მიზნობრივი ფუნქცია მთლიანობაში უნდა ითვალისწინებდეს როგორც პროდუქციის მიმწოდებლის (ამ შემთხვევაში, მამდიდრებელი ფაბრიკის), ასევე მომხმარებლის მოთხოვნებს. ამასთან, მომხმარებლის მოთხოვნების გათვალისწინების უნივერსალურ მეთოდს წარმოადგენს შეზღუდვების დადება პროდუქციის (კონცენტრატის) თვისებებზე. თუ

ჩათვლით, რომ ფასები გამომდინარეობს მომხმარებლის მოთხოვნებიდან, აღნიშნული შეზღუდვებისას შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ ეკონომიკური კრიტერიუმი მხოლოდ მამდიდრებელი ფაბრიკის მოთხოვნების ბაზაზე. ასეთ კრიტერიუმებში საექსტრემიზაციო მაჩვენებელი შეიძლება იყოს პროდუქციის თვითღირებულება ან მისგან გამომდინარე სხვა სიდიდეები, მაგალითად ამოკრეფა [16].

ზემომოყვანილი მსჯელობის საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესების მართვისას მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ ტექნოლოგიური კრიტერიუმი, რომელიც ითვალისწინებს მოცემული (დავალებული) ხარისხის კონცენტრატის გამოსავლის მაქსიმიზაციას.

მივიღოთ კონცენტრატის გამოსავალი  $\gamma$  სამაქსიმიზაციო მაჩვენებლად და კონცენტრატის ხარისხი  $\beta$  მაჩვენებლად, რომელიც სტაბილიზებულ უნდა იქნეს დავალებულ (მოცემულ) დონეზე. მაშინ ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი შემდეგნაირად ჩამოყალიბდება:

$$\gamma = F_1(X, Z) \rightarrow \max, \quad (3.1)$$

$$\beta = F_2(X, Z) = \beta_0, \quad (3.2)$$

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}. \quad (3.3)$$

ეს, როგორც ერთ-ერთი ტექნოლოგიური კრიტერიუმი, გამომდინარეობს საერთო ეკონომიკური კრიტერიუმიდან და გამოიყენება მამდიდრებელ ფაბრიკებში როგორც ტექნოლოგიური პერსონალის, ისე მართვის სისტემების კონსტრუქტორების მიერ.

რამდენადაც გამდიდრების ნებისმიერი ტექნოლოგიური პროცესი გულისხმობს  $\alpha$  ხარისხის საწყისი მასალიდან (გასამდიდრებელი მადნიდან)  $\beta$  ხარისხის საბოლოო (მოცემული სტადიისთვის) პროდუქტის მიღებას, გასამდიდრებელი მადნის ხარისხი  $Z_0 = \alpha$  სპეციალურად არის გამოყოფილი (ნახ. 3.2), როგორც ერთ-ერთი შემაშფოთებელი სიდიდე. მწარმოებლურობა გასამდიდრებელი მადნის მიხედვით  $Q$  სქემაზე არ არის ნაჩვენები, რადგან ზოგადად იგი შეიძლება მოხვდეს როგორც მმართველ (მაგალითად,  $X_1 = Q$ ), ისე შემაშფოთებელ (მაგალითად,  $Z_1 = Q$ ) სიდიდეთა ჯგუფში. თუმცა ჩვენს კონკრეტულ შემთხვევაში იგი მივაკუთვნეთ შემაშფოთებელ სიდიდეთა რიცხვს.

ფლოტაციის ტექნოლოგიური პროცესისთვის  $\gamma$  და  $\beta$  მაჩვენებლები შეიძლება წარმოადგინოთ, როგორც  $q_1, q_2$  და  $q_3$  მმართველი სიდიდეებისა და  $\alpha$  და  $Q$  შემაშფოთებელი სიდიდეების ფუნქციები:

$$\gamma = F_1(q_1, q_2, q_3, Q, \alpha), \quad (3.4)$$

$$\beta = F_2(q_1, q_2, q_3, Q, \alpha). \quad (3.5)$$

(3.1),..., (3.5) გამოსახულებების გათვალისწინებით ოპტიმიზაციის ზემოთ აღნიშნული ამოცანა შემდეგი სახით შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ:

$$\gamma = F_1(q_1, q_2, q_3, Q, \alpha) \rightarrow \max, \quad (3.6)$$

$$\beta = F_2(q_1, q_2, q_3, Q, \alpha) = \beta_0, \quad (3.7)$$

სადაც  $\beta_0$  არის  $\beta$  მაჩვენებლის დავალბებული (მოცემული) მნიშვნელობა.

მიზნის ფუნქციის (3.6) მაქსიმიზაციის დროს, შეზღუდვის ტოლობის (3.7) გარდა, უნდა გავითვალისწინოთ აგრეთვე შეზღუდვები მმართველი სიდიდეებისთვის:

$$q_{1\min} \leq q_1 \leq q_{1\max}, \quad (3.8)$$

$$q_{2\min} \leq q_2 \leq q_{2\max}, \quad (3.9)$$

$$q_{3\min} \leq q_3 \leq q_{3\max}. \quad (3.10)$$

ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტის შედეგად მიღებულ უნდა იქნეს ოპტიმალური დამოკიდებულებები მმართველ და შემაშფოთებელ სიდიდეებს შორის:

$$q_1 = f_1(\alpha, Q), \quad (3.11)$$

$$q_2 = f_2(\alpha, Q), \quad (3.12)$$

$$q_3 = f_3(\alpha, Q). \quad (3.13)$$

### 3.3. ექსპერიმენტის მონაცემების წინასწარი დამუშავება

გაანგარიშებისთვის საწყის მონაცემებად ავიღეთ ჭიათურის ცენტრალური საფლოტაციო ფაბრიკის პირობებში ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგები, რომლებიც მოცემულია №4 დანართში.

მმართველი სიდიდეები  $q_1, q_2, q_3$ , შემაშფოთებელი სიდიდე  $\alpha$  და  $Q$ , გამდიდრების მაჩვენებლები  $\gamma, \beta$  განიხილება როგორც შემთხვევითი სიდიდეები. მათი სტატისტიკური მახასიათებლები და ცვლილების ზღვრები მოცემულია 3.1 ცხრილში.

ცხრილი 3.1

ტექნოლოგიური პროცესის მახასიათებლები	ცვლილების ზღვარი	საშუალო მნიშვნელობა	საშუალო კვადრატული გადახრა
$Q$	$7.04 \div 18.96$	11,5	2.28
$q_1$	$5.3 \div 7.5$	6.3	0.11
$q_2$	$0.4 \div 0.75$	0.56	0.09
$q_3$	$3.6 \div 5$	4.4	0.33
$\alpha$	$8.76 \div 15.05$	12	1.56
$\gamma$	$9 \div 55$	26.4	0.1
$\beta$	$17.3 \div 23$	20	1.21

ცხრილში მოყვანილი მნიშვნელობები გაანგარიშებულია №4 დანართის მონაცემების მიხედვით (ცდების რაოდენობა  $n = 98$ ).

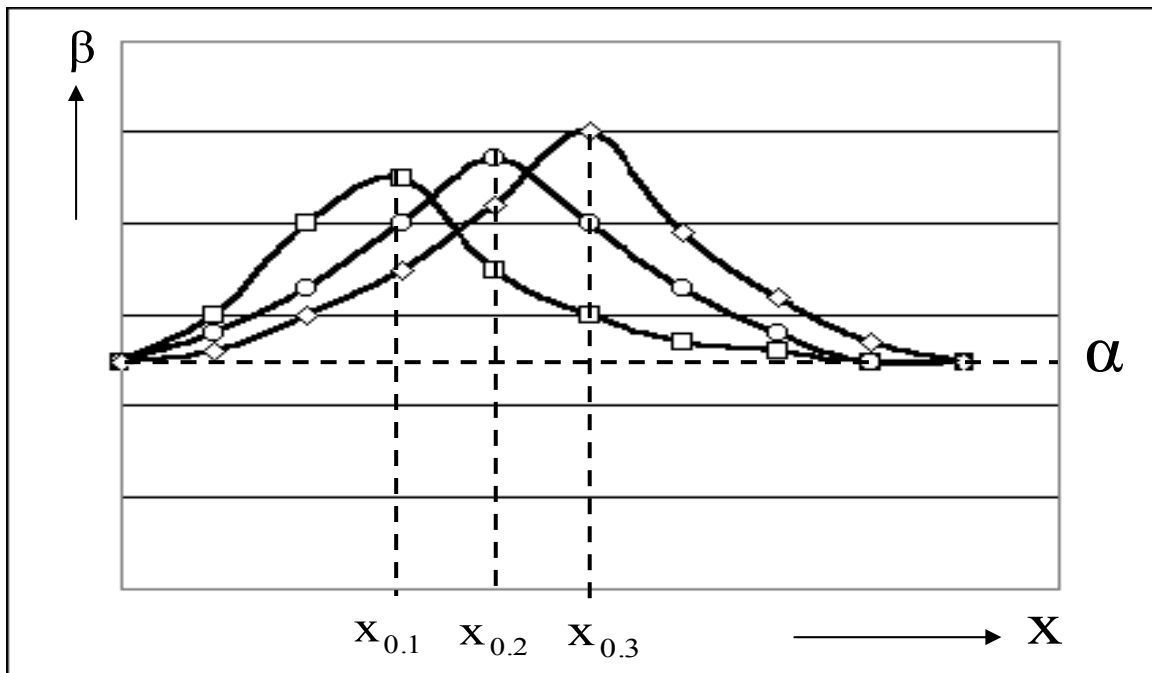


თავი 4. მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციები

4.1. გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლებზე მმართველი სიდიდის გავლენის მოდელი

გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესის  $\beta$  და  $\gamma$  (კონცენტრატის ხარისხი და გამოსავალი) მაჩვენებლებზე  $X$  მმართველი სიდიდის გავლენის განხილვისას გავითვალისწინოთ, რომ  $Z$  შემაშფოთებელი სიდიდეები ემორჩილება განაწილების ნორმალურ კანონს განაწილების მუდმივი პარამეტრებით.

ზოგადად,  $\beta = f(x)$  დამოკიდებულება შეიძლება წარმოვადგინოთ ნახ. 4.1-ზე მოცემული მრუდების სახით [19]. კონკრეტულ შემთხვევაში ეს დამოკიდებულება შეიძლება ახლოს იყოს სიმეტრიულთან ან ჰქონდეს გამოკვეთილი ასიმეტრია, მაგრამ ყველა შემთხვევაში მისთვის დამახასიათებელია შემდეგი თვისებები:



ნახ. 4.1.  $\beta = f(x)$  დამოკიდებულების ზოგადი სახე

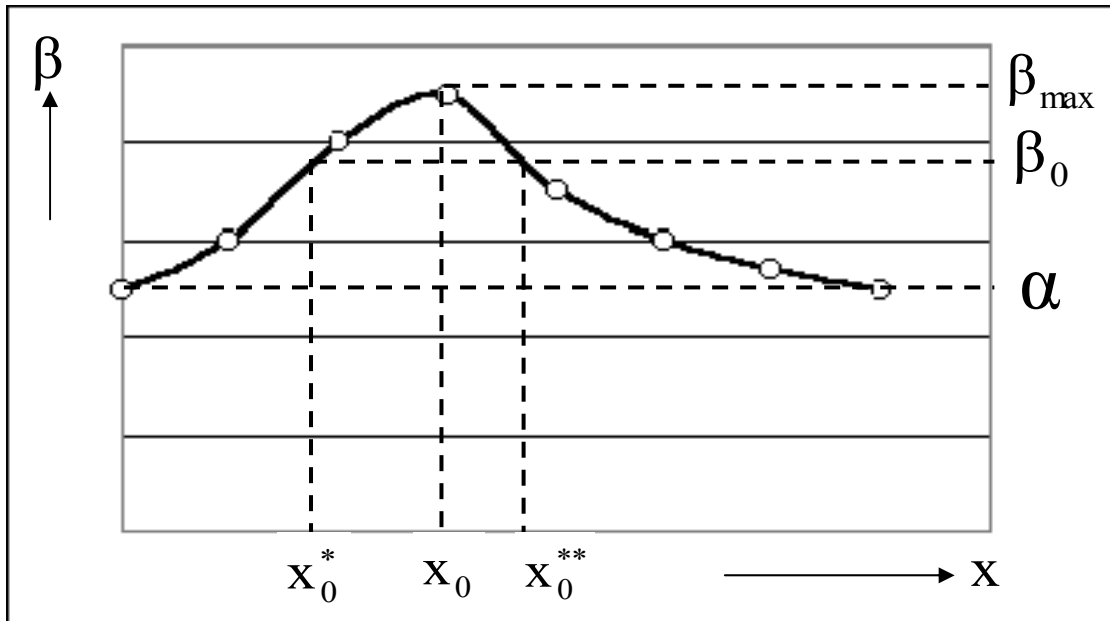
- როცა  $X = 0$ , დაცულია პირობა  $\beta = \alpha$ . ამ შემთხვევაში მმართველი სიდიდის მნიშვნელობა ნულის ტოლია, ხარისხის მომატება არ ხდება და საბოლოო პროდუქტად მიიღება  $\alpha$  ხარისხის საწყისი (გასამდიდრებელი) მადანი;

2.  $X$ -ის გაზრდით მატულობს  $\beta$  და როცა მმართველი სიდიდე  $X = X_0(X_{0.1}, X_{0.2}, X_{0.3})$ ,  $\beta$  აღწევს მაქსიმალურ მნიშვნელობას, ე.ი. ვლესულობთ მაქსიმალური ხარისხის კონცენტრატს. შემდეგ პროცესის მიმდინარეობის პირობები უარესდება და  $\beta$  იწყებს შემცირებას;
3.  $X$ -ის შემდგომი გაზრდისას  $\beta$  კვლავ მიისწრაფვის  $\alpha$ -სკენ, ანუ მმართველი სიდიდის დიდი მნიშვნელობების დროს გამდიდრება არ ხდება.

მართლაც, თუ თავდაპირველად გავზრდით რეაგენტების ხარჯს, ვნახავთ, რომ მინერალების გაყოფის პირობები გაუმჯობესდება და გაიზრდება კონცენტრატის ხარისხი. მაგრამ რეაგენტების ხარჯის ზედმეტად გაზრდით მინერალების ზედაპირულ თვისებებს შორის განსხვავება კვლავ შემცირდება და, შესაბამისად, გაუარესდება ფლოტაციის პირობები. მაშასადამე, მმართველ სიდიდეებს თითქოს გააჩნიათ ზღვრული მნიშვნელობა, რომლის ზემოთაც გამდიდრების პროცესი ვეღარ წარიმართება.

ამრიგად,  $\beta$  კონცენტრატის ხარისხს აქვს თავისი მაქსიმალური მნიშვნელობა  $\beta_{max}$  (ნახ. 4.2), რომლის ზევითაც ხარისხის აწევა მოცემული ტექნოლოგიური პროცესისთვის შეუძლებელია. ტექნოლოგიური პროცესის დაპროექტებისას კონცენტრატის ხარისხის დავალებული მნიშვნელობა  $\beta_0$  ყოველთვის იგეგმება მარაგით ( $\beta_0 < \beta_{max}$ ). არ შეიძლება დაიგეგმოს  $\beta_0 = \beta_{max}$ , რადგან შეუძლებელია მმართველი სიდიდის შენარჩუნება  $X = X_0$  დონეზე გადახრების გარეშე, ხოლო  $X$ -ის ნებისმიერი გადახრა  $X_0$ -დან იწვევს  $\beta$ -ს შემცირებას. ამიტომ  $\beta$ -ს რეალური საშუალო მნიშვნელობა ყოველთვის ნაკლებია  $\beta_{max}$ -ზე.

ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესის რეჟიმის დადგენისას ორიენტაცია აიღება არა წერტილზე კოორდინატებით  $X_0; \beta_{max}$ , არამედ  $X_0^*; \beta_0$  ან  $X_0^{**}; \beta_0$ . სხვანაირად რომ ვთქვათ, მუშაობა იგეგმება ზემომოყვანილი დამოკიდებულების ან აღმაგვალ  $X \leq X_0$ , ან დაღმაგვალ შტოზე  $X \geq X_0$ .



ნახ. 4.2.  $\beta = f(x)$  დამოკიდებულების ანალიზისთვის

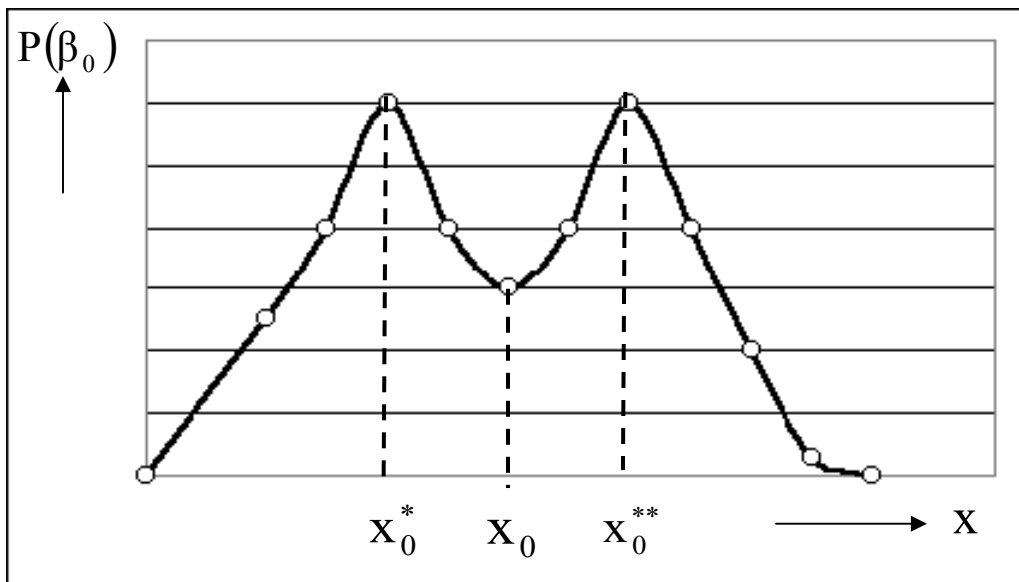
რეალურ პირობებში  $X$ -ის რაიმე მნიშვნელობას არ შეესაბამება  $\beta$ -ს მკაცრად განსაზღვრული ერთი მნიშვნელობა. კონცენტრატის ხარისხი, გარდა მმართველი სიდიდეებისა, დამოკიდებულია აგრეთვე შემაშფოთებელ სიდიდეებზე, რომელთა სრულად გათვალისწინება პროცესის მათემატიკურ მოდელში შეუძლებელია. ამიტომ, მაშინაც კი, როცა მკაცრად სრულდება პირობა  $x = x_0^*$  ( $x = x_0^{**}$ ), ხარისხი  $\beta$  დებულობს სხვადასხვა მნიშვნელობებს. პრაქტიკა აჩვენებს, რომ ეს მნიშვნელობები ხასიათდება ნორმალური განაწილების კანონით და განაწილების ცენტრი ემთხვევა  $\beta_0$ -ს. აქედან გამომდინარე, როცა  $x = x_0^*$  ( $x = x_0^{**}$ ), დაგეგმილი  $\beta_0$  მნიშვნელობის მიღების ალბათობა 1-ზე ნაკლებია, მაგრამ მაქსიმალურია. ბუნებრივია, რომ, როცა  $x \neq x_0^*$  ( $x \neq x_0^{**}$ ),  $\beta$ -ს განაწილების ცენტრი შეიცვლება (მნიშვნელობა მოიმატებს ან მოიკლებს).

ამრიგად,  $\beta = f(x)$  დამოკიდებულება ატარებს ალბათობით ხასიათს. აქედან გამომდინარე, კონცენტრატი  $\beta = \beta_0$  ხარისხით შეიძლება მიღებულ იქნეს  $X$

მმართველი სიდიდის სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს, მაგრამ ასეთი ხდომილობის ალბათობა  $P(\beta_0)$  მაქსიმალურია, როცა  $x = x_0^*$  ( $x = x_0^{**}$ ).

როცა  $x < x_0^*$ , ალბათობა  $P(\beta_0)$  მცირდება. ეს ალბათობა მცირდება მაშინაც, როცა  $x_0^* < x < x_0$ . აღნიშნულ დიაპაზონებში  $x$  რაც მეტად განსხვავდება  $x_0^*$ -საგან, მით ნაკლებია ალბათობა  $P(\beta_0)$ . მსგავსი სურათია  $\beta = f(x)$  დამოკიდებულების მარჯვენა შტოზეც. როცა  $x$  მმართველი სიდიდე იზრდება  $x_0$ -დან  $x_0^{**}$ -მდე, ალბათობა  $P(\beta_0)$  იზრდება, შემდეგ კი ( $x > x_0^{**}$ ) - იწყებს შემცირებას.

ზემოაღნიშნულის საფუძველზე, დამოკიდებულება  $x$  მმართველ სიდიდესა და  $P(\beta_0)$  ალბათობას შორის შეიძლება წარმოვიდგინოთ 4.3 ნახაზზე ნაჩვენები გრაფიკის სახით. როცა  $x = 0$ , გასამდიდრებელი მასალა არ იცვლება,  $\beta = \alpha$  და  $\beta_0$  ხარისხის კონცენტრატის მიღების ალბათობა ნულის ტოლია. როცა  $x = x_0^*$  ( $x = x_0^{**}$ ), ალბათობას აქვს მაქსიმალური მნიშვნელობა.



ნახ. 4.3.  $P(\beta_0) = f(x)$  დამოკიდებულების ზოგადი სახე

$X$  -ის დიდი მნიშვნელობების დროს ალბათობა კვლავ ნულისაკენ მიისწრაფვის.  $\beta = f(x)$  დამოკიდებულების (ნახ. 4.2) აღმაგვალ შტოზე მუშაობას შეესაბამება 4.3 ნახაზზე მოყვანილი მრუდის მარცხენა ნაწილი ( $x \leq x_0$ ), ხოლო დაღმავალ შტოზე მუშაობას – მარჯვენა ნაწილი ( $x \geq x_0$ ).

#### 4.2. კონცენტრატის გამოსავლის მოდელი

ზემომოყვანილი მსჯელობის საფუძველზე გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესი შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ, როგორც სისტემის (გასამდიდრებელი მანძის) საწყისი მდგომარეობიდან (ხარისხით  $\alpha$ ) ბოლო მდგომარეობაში (ხარისხით  $\beta$ ) ალბათობითი თანამიმდევრული გადასვლების ერთობლიობა. გადასვლა ყოველი მდგომარეობიდან შემდეგში ხდება გარკვეული ალბათობით. საწყისიდან ბოლო მდგომარეობამდე საჭირო „პირობითი“ გადასვლების რიცხვი მაქსიმალური ალბათობით ხორციელდება მმართველი სიდიდის შესაბამისი მნიშვნელობის დროს. საკითხის ასეთი წარმოდგენის საფუძველზე [20]-ში ჩამოყალიბებულია მამდიდრებელი ფაბრიკების ტექნოლოგიური პროცესების ალბათობითი მოდელი, რომელიც გამოსადეგია შემაშფოთებელ და მმართველ სიდიდეებს შორის ოპტიმალური დამოკიდებულებების მისაღებად.

აღნიშნული ალბათობითი მოდელის საფუძველზე [20]-ში მოცემულია გამოსახულება:

$$P(k, x) = \frac{c^k}{k!} x^k e^{-cx} \quad (4.1)$$

გამოსახულება (4.1) წარმოადგენს ზოგად ფორმულას, რომელიც განსაზღვრავს სისტემის ყოფნის ალბათობას ნებისმიერ  $k$  მდგომარეობაში  $X$ -ის ნებისმიერი მნიშვნელობის დროს. რეალური ტექნოლოგიური პროცესისთვის სისტემის გადასვლას რომელიმე  $k > 0$  მდგომარეობაში შეესაბამება გასამდიდრებელი მანძის ხარისხის ამაღლება განსაზღვრული სიდიდით და, მაშასადამე, შესაბამისი ხარისხის კონცენტრატის მიღება.

ზემოაღნიშნულის საფუძველზე [20]-ში მიღებულია კონცენტრატის გამოსავლის ფორმულა:

$$\gamma(x) = ax^k e^{-cx}, \quad (4.2)$$

რომელიც ასახავს კონცენტრატის გამოსავლის დამოკიდებულებას  $X$  მმართველ სიდიდეზე და სადაც  $a$ ,  $k$  და  $c$  კოეფიციენტები განისაზღვრება ექსპერიმენტულად.

გამოსავლის ფორმულა (4.2) ერთ-ერთი მმართველი სიდიდისგან კონცენტრატის გამოსავლის წყვილი კორელაციური დამოკიდებულებების მოდელია. იგულისხმება, რომ სხვა მმართველი სიდიდეები იცვლება ისევე, როგორც იცვლებოდა ექსპერიმენტის დროს და გამოსახულება (4.2) განსაზღვრავს გამოსავლის საშუალო მნიშვნელობას მოდელში შეყვანილი მმართველი სიდიდის მოცემული მნიშვნელობის დროს.

$k$  და  $c$  კოეფიციენტების დადებითი მნიშვნელობების შემთხვევაში (4.2) გამოსახულება  $X$ -ის მიმართ ერთმაქსიმუმიანი ექსტრემალური ფუნქციაა, რაც შეესაბამება ნახ. 4.3-ზე მოყვანილი გრაფიკის მარცხენა ან მარჯვენა ნახევარს. იგი მაქსიმუმს აღწევს, როცა

$$\frac{\partial \gamma(x)}{\partial x} = a[kx^{k-1}e^{-cx} + x^k e^{-cx} \cdot (-c)] = ax^k e^{-cx} \left( \frac{k}{x} - c \right) = \left( \frac{k}{x} - c \right) \gamma(x) = 0, \quad (4.3)$$

$$\frac{k}{x} - c = 0, \quad (4.4)$$

$$x_0 = \frac{k}{c}. \quad (4.5)$$

კონცენტრატის გამოსავლის მოდელში შემაშფოთებელი სიდიდე  $Z$  არ არის შეყვანილი. მართალია, იგი ზოგადად გავლენას ახდენს გამოსავალზე, მაგრამ კონცენტრატის გამოსავლის დამოკიდებულება მმართველი სიდიდეებისგან გამოყენებული იქნება თვითონ მმართველ სიდიდეებს შორის ოპტიმალური თანაფარდობის დასადგენად და ეს თანაფარდობა, საშუალოდ, გარკვეული სიზუსტით, შეიძლება სამართლიანად ჩავთვალოთ შემაშფოთებელი სიდიდის სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის. ამასთან, რადგან ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტის შედეგად მმართველი სიდიდეები აღნიშნული თანაფარდობით უნდა ვცვალოთ შემაშფოთებელი სიდიდისგან დამოკიდებულებით, ცხადია, კონცენტრატის გამოსავალი დამოკიდებული იქნება შემაშფოთებელ სიდიდეზე.

### 4.3. კონცენტრატის ხარისხის მოდელი

ზემომოყვანილი 4.2 ნახაზის ანალიზის საფუძველზე კონცენტრატის ხარისხის დამოკიდებულება მმართველი სიდიდისგან უნდა ატარებდეს მონოტონურ (არაექსტრემალურ) ხასიათს. იგი უნდა იწყებოდეს  $\beta = \alpha$  მნიშვნელობით და იყოს აღმავალი (ნახ. 4.2-ზე ნაჩვენები გრაფიკის მარცხენა ნახევარი) ან დაღმავალი და მიისწრაფვოდეს  $\beta = \alpha$  მნიშვნელობისკენ (ნახ. 4.2-ზე ნაჩვენები გრაფიკის მარჯვენა ნახევარი). შესაბამისად, კონცენტრატის ხარისხი მიზანშეწონილია ვეძებოთ ამ სახით:

$$\beta(x) = \alpha + bx^\psi. \quad (4.6)$$

როცა  $\psi > 0$ , დამოკიდებულება აღმავალია, ხოლო როცა  $\psi < 0$  – დაღმავალი.

კონცენტრატის ხარისხის დამოკიდებულება შემაშფოთებელი სიდიდისგან თავისი შინაარსით ისეთივე ხასიათისაა, როგორც მმართველი სიდიდისგან. მაშასადამე, დამოკიდებულებას ექნება სახე:

$$\beta(z) = \alpha + b_0 z^\theta. \quad (4.7)$$

ხარისხის ფორმულები (4.6) და (4.7), სადაც  $b$ ,  $b_0$ ,  $\psi$  და  $\theta$  კოეფიციენტები განისაზღვრება ექსპერიმენტულად, ერთ-ერთი მმართველი ან შემაშფოთებელი სიდიდისგან კონცენტრატის ხარისხის წყვილი კორელაციური დამოკიდებულებების მოდელია. იგულისხმება, რომ სხვა მმართველი და შემაშფოთებელი სიდიდეები იცვლება ისევე, როგორც იცვლებოდა ექსპერიმენტის დროს და გამოსახულებები (4.6) და (4.7) განსაზღვრავს ხარისხის საშუალო მნიშვნელობას მოდელში შეყვანილი მმართველი ან შემაშფოთებელი სიდიდის მოცემული მნიშვნელობის დროს.

### 4.4. მიზნის ფუნქცია

ზემოთ მოყვანილი ალბათური მოდელებისა და გამოსავლის წყვილი დამოკიდებულების ანალიზის საფუძველზე კონცენტრატის გამოსავლის მრავლობით დამოკიდებულებას მმართველ სიდიდეებზე, ანუ მიზნის ფუნქციას შეიძლება მივცეთ სახე [21]:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = a q_1^{k_1} q_2^{k_2} q_3^{k_3} e^{-c_1 q_1 - c_2 q_2 - c_3 q_3}. \quad (4.8)$$

მიზნის ფუნქციის კოეფიციენტების რიცხვითი მნიშვნელობების განსაზღვრა ანალიზური ხერხით არ ხერხდება. ამიტომ საჭიროა ექსპერიმენტული მონაცემების გამოყენება. ჭიათურის ცენტრალურ საფლოტაციო ფაბრიკაზე ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგად მიღებულ მონაცემებს ვამუშავებთ უმცირეს კვადრატთა მეთოდით.

უმცირეს კვადრატთა მეთოდს საფუძვლად უდევს უმცირეს კვადრატთა პირობა, რომელიც თხოულობს (4.8) განტოლებაში შემავალი კოეფიციენტების ( $a$ ,  $k$ ,  $c$ ) ისეთი მნიშვნელობების განსაზღვრას, რომ  $\gamma$  ცვლადის ექსპერიმენტით მიღებულ და ამ განტოლებით გამოთვლილ შესაბამის მნიშვნელობებს შორის სხვაობების კვადრატების ჯამი იყოს მინიმალური, ანუ დაცულ იქნეს გადახრათა კვადრატების ჯამის მინიმიზაციის პირობა:

$$f = \sum_{i=1}^n [\gamma_i - \gamma_i(q_1, q_2, q_3)]^2 = \min, \quad (4.9)$$

სადაც  $i$  არის ცდის ნომერი ექსპერიმენტის დროს,  $n$  – ცდების რაოდენობა.

ამ ამოცანის გადაწყვეტა (4.8) გამოსახულებისთვის არ ხერხდება, ამიტომ უმცირეს კვადრატთა მეთოდს იყენებენ არა ამ გამოსახულების, არამედ მისი ათობითი ან ნატურალური ლოგარითმის მიმართ:

$$\ln \gamma(q_1, q_2, q_3) = \ln a + k_1 \ln q_1 + k_2 \ln q_2 + k_3 \ln q_3 - c_1 q_1 - c_2 q_2 - c_3 q_3. \quad (4.10)$$

ასეთ შემთხვევაში უმცირეს კვადრატთა პირობა იღებს სახეს:

$$f = \sum_{i=1}^n [\ln \gamma_i - \ln \gamma_i(q_1, q_2, q_3)]^2 = \min \quad (4.11)$$

ან

$$f = \sum_{i=1}^n [\ln \gamma_i - \ln a - k_1 \ln q_1 - k_2 \ln q_2 - k_3 \ln q_3 + c_1 q_1 + c_2 q_2 + c_3 q_3]^2 = \min. \quad (4.12)$$

(4.12) გამოსახულების მიხედვით  $\ln a, k_1, k_2, k_3, c_1, c_2, c_3$  კოეფიციენტების მნიშვნელობების საპოვნელად შესაბამისი კერძო წარმოებულები უნდა გავუტოლოთ ნულს:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \ln a} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial k_1} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial k_2} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial k_3} = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial c_1} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial c_2} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial c_3} = 0, \end{aligned} \quad (4.13)$$



რაც ვგაძღვებს შვიდუცნობიან განტოლებათა სისტემას:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & n \cdot \ln a + K_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} + K_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} + K_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} - C_1 \sum_{i=1}^n q_{1i} - C_2 \sum_{i=1}^n q_{2i} - \\
 & - C_3 \sum_{i=1}^n q_{3i} = \sum_{i=1}^n \ln \gamma_i; \\
 & \ln a \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} + K_1 \sum_{i=1}^n (\ln q_{1i})^2 + K_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln q_{1i} + K_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln q_{1i} - C_1 \sum_{i=1}^n q_{1i} \ln q_{1i} - \\
 & - C_2 \sum_{i=1}^n q_{2i} \ln q_{1i} - C_3 \sum_{i=1}^n q_{3i} \ln q_{1i} = \sum_{i=1}^n \ln \gamma_i \ln q_{1i}; \\
 & \ln a \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} + K_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln q_{2i} + K_2 \sum_{i=1}^n (\ln q_{2i})^2 + K_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln q_{2i} - C_1 \sum_{i=1}^n q_{1i} \ln q_{2i} - \\
 & - C_2 \sum_{i=1}^n q_{2i} \ln q_{2i} - C_3 \sum_{i=1}^n q_{3i} \ln q_{2i} = \sum_{i=1}^n \ln \gamma_i \ln q_{2i}; \\
 & \ln a \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} + K_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln q_{3i} + K_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln q_{3i} + K_3 \sum_{i=1}^n (\ln q_{3i})^2 - C_1 \sum_{i=1}^n q_{1i} \ln q_{3i} - \\
 & - C_2 \sum_{i=1}^n q_{2i} \ln q_{3i} - C_3 \sum_{i=1}^n q_{3i} \ln q_{3i} = \sum_{i=1}^n \ln \gamma_i \ln q_{3i}; \\
 & \ln a \sum_{i=1}^n q_{1i} + K_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \cdot q_{1i} + K_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \cdot q_{1i} + K_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \cdot q_{1i} - C_1 \sum_{i=1}^n (q_{1i})^2 - \\
 & - C_2 \sum_{i=1}^n q_{2i} q_{1i} - C_3 \sum_{i=1}^n q_{3i} q_{1i} = \sum_{i=1}^n \ln \gamma_i \cdot q_{1i}; \\
 & \ln a \sum_{i=1}^n q_{2i} + K_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \cdot q_{2i} + K_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \cdot q_{2i} + K_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \cdot q_{2i} - C_1 \sum_{i=1}^n q_{1i} q_{2i} - \\
 & - C_2 \sum_{i=1}^n q_{2i}^2 - C_3 \sum_{i=1}^n q_{3i} q_{2i} = \sum_{i=1}^n \ln \gamma_i \cdot q_{2i}; \\
 & \ln a \sum_{i=1}^n q_{3i} + K_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \cdot q_{3i} + K_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \cdot q_{3i} + K_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \cdot q_{3i} - C_1 \sum_{i=1}^n q_{1i} q_{3i} - \\
 & - C_2 \sum_{i=1}^n q_{2i} q_{3i} - C_3 \sum_{i=1}^n q_{3i}^2 = \sum_{i=1}^n \ln \gamma_i \cdot q_{3i}.
 \end{aligned} \right. \quad (4.14)$$

ჯამების მნიშვნელობების (დანართი 5) გათვალისწინებით (4.14) სისტემა იღებს სახეს:

$$\begin{cases}
109 \ln a + K_1 \cdot 198.6744 - K_2 \cdot 69.1163 + K_3 \cdot 158.1396 - C_1 \cdot 676.5 - C_2 \cdot 59.0833 - \\
- C_3 \cdot 469.75 = 352.3692 \\
\ln a 198.6744 + K_1 362.7526 - K_2 124.9679 + K_3 288.6652 - C_1 1236.9585 - \\
- C_2 108.198 - C_3 857.7634 = 641.9581 \\
\ln a 69.1163 - K_1 124.9679 + K_2 48.7611 - K_3 98.3062 + C_1 422.8688 - \\
+ C_2 34.9552 + C_3 290.8494 = -225.2118 \\
\ln a 158.1396 + K_1 288.6652 - K_2 98.3062 + K_3 231.9339 - C_1 984.0285 - \\
- C_2 86.6417 - C_3 690.3476 = 509.5769 \\
\ln a 676.5 + K_1 1236.9585 - K_2 422.8688 + K_3 984.0285 - C_1 4222.9167 - \\
- C_2 369.75 - C_3 2924.764 = 2185.0912 \\
\ln a 59.0833 + K_1 108.198 - K_2 34.9552 + K_3 86.6417 - C_1 369.75 - \\
- C_2 33.3264 - C_3 257.9444 = 190.2561 \\
\ln a 469.75 + K_1 857.7634 - K_2 290.8494 + K_3 690.3476 - C_1 2924.764 - \\
- C_2 257.9444 - C_3 2056.1181 = 1512.7715.
\end{cases} \quad (4.15)$$

(4.15) სისტემის ამოხსნის შედეგად ვღებულობთ:

$$\begin{aligned}
a &= 1.25 \cdot 10^{-8}; \quad K_1 = 0.62; \quad K_2 = -6.45; \quad K_3 = 22.9; \\
c_1 &= 5.95 \cdot 10^{-6}; \quad c_2 = -11.7; \quad c_3 = 5.37.
\end{aligned} \quad (4.16)$$

შესაბამისად, მიზნის ფუნქცია, ანუ გამოსახულება (4.8) იღებს სახეს:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 1.25 \cdot 10^{-8} q_1^{0.62} q_2^{-6.45} q_3^{22.9} e^{-5.95 \cdot 10^{-6} q_1 + 11.07 q_2 - 5.37 q_3}. \quad (4.17)$$

აპროქსიმაციის სიზუსტეს  $q_1, q_2, q_3$ -თვის ვაფასებთ კოეფიციენტით, რომელიც გამოითვლება კორელაციური ფარდობის ანალოგიურად:

$$\eta = \frac{1}{\sigma(\ln \gamma)} \sqrt{K_1 \operatorname{cov}(\ln \gamma, \ln q_1) + K_2 \operatorname{cov}(\ln \gamma, \ln q_2) + K_3 \operatorname{cov}(\ln \gamma, \ln q_3)} - \\
\sqrt{-c_1 \operatorname{cov}(\ln \gamma, q_1) - c_2 \operatorname{cov}(\ln \gamma, q_2) - c_3 \operatorname{cov}(\ln \gamma, q_3)}, \quad (4.18)$$

სადაც

$$\sigma(\ln \gamma) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \ln^2 \gamma - \left( \frac{1}{n} \sum \ln \gamma \right)^2}; \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned}
\text{cov}(\ln\gamma, \ln q_1) &= \frac{1}{n} \sum \ln\gamma \cdot \ln q_1 - \frac{\sum \ln\gamma}{n} \cdot \frac{\sum \ln q_1}{n}; \\
\text{cov}(\ln\gamma, \ln q_2) &= \frac{1}{n} \sum \ln\gamma \cdot \ln q_2 - \frac{\sum \ln\gamma}{n} \cdot \frac{\sum \ln q_2}{n}; \\
\text{cov}(\ln\gamma, \ln q_3) &= \frac{1}{n} \sum \ln\gamma \cdot \ln q_3 - \frac{\sum \ln\gamma}{n} \cdot \frac{\sum \ln q_3}{n}; \\
\text{cov}(\ln\gamma, q_1) &= \frac{1}{n} \sum q_1 \cdot \ln\gamma - \frac{\sum \ln\gamma}{n} \cdot \frac{\sum q_1}{n}; \\
\text{cov}(\ln\gamma, q_2) &= \frac{1}{n} \sum q_2 \cdot \ln\gamma - \frac{\sum \ln\gamma}{n} \cdot \frac{\sum q_2}{n}; \\
\text{cov}(\ln\gamma, q_3) &= \frac{1}{n} \sum q_3 \cdot \ln\gamma - \frac{\sum \ln\gamma}{n} \cdot \frac{\sum q_3}{n}.
\end{aligned} \tag{4.20}$$

ვღებულობთ, რომ სიმჭიდროვის კოეფიციენტი (კორელაციური ფარდობა) შეადგენს  $\eta = 0.5067$ .

#### 4.5. შეზღუდვის ფუნქცია

ზემოაღნიშნული ალბათური მოდელის საფუძველზე კონცენტრატის ხარისხის დამოკიდებულება მმართველ და შემაშფოთებელ სიდიდეებზე მონოტონური (არაექსტრემალური) ხასიათისაა. შესაბამისად, შეზღუდვის ფუნქცია, ანუ კონცენტრატის ხარისხის მრავლობითი დამოკიდებულება მმართველ და შემაშფოთებელ სიდიდეებზე, შეიძლება ასე გამოისახოს:

$$\begin{aligned}
\beta(x_1, x_2, \dots, x_m, \alpha, z_1, z_2, \dots, z_r) &= \alpha + b x_1^{\psi_1} x_2^{\psi_2} \dots x_m^{\psi_m} \cdot \\
&\cdot \alpha^{\theta_0} z_1^{\theta_1} z_2^{\theta_2} \dots z_r^{\theta_r}.
\end{aligned} \tag{4.21}$$

შესაბამისად, ჩვენს შემთხვევაში:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = \alpha + b q_1^{\psi_1} q_2^{\psi_2} q_3^{\psi_3} \alpha^{\theta_0} Q^{\theta_0}. \tag{4.22}$$

როცა  $\psi > 0$  ან  $\theta > 0$ , დამოკიდებულება აღმავალია და იწყება  $\beta = \alpha$  მნიშვნელობით, ხოლო როცა  $\psi < 0$  ან  $\theta < 0$ , დამოკიდებულება დაღმავალია და მიისწრაფვის  $\beta = \alpha$  მნიშვნელობისკენ.

შეზღუდვის ფუნქციის კოეფიციენტების საპოვნელად მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ უმცირეს კვადრატთა მეთოდი (4.22) გამოსახულების ნატურალური ლოგარითმის მიმართ:

$$\ln[\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) - \alpha] = \ln b + \psi_1 \ln q_1 + \psi_2 \ln q_2 + \dots + \psi_3 \ln q_3 + \theta \ln \alpha + \theta_0 \ln Q. \quad (4.23)$$

ასეთ შემთხვევაში უმცირეს კვადრატთა პირობა შემდეგ სახეს იღებს:

$$f = \sum_{i=1}^n \{ \ln(\beta_i - \alpha_i) - \ln[\beta(q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}, \alpha_i, Q_i) - \alpha_i] \}^2 = \min, \quad (4.24)$$

ანუ

$$f = \sum_{i=1}^n [ \ln(\beta_i - \alpha_i) - \ln b - \psi_1 \ln q_{1i} - \psi_2 \ln q_{2i} - \psi_3 \ln q_{3i} - \theta \ln \alpha_i - \theta_0 \ln Q_i ]^2 = \min. \quad (4.25)$$

(4.25) გამოსახულების მიხედვით  $\ln b, \psi_1, \psi_2, \psi_3, \theta, \theta_0$  კოეფიციენტების მნიშვნელობების საპოვნელად შესაბამისი კერძო წარმოებულები უნდა გავუტოლოთ ნულს:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \ln b} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \psi_1} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \psi_2} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \psi_3} = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial \theta_0} = 0, \end{aligned} \quad (4.26)$$

რაც გვაძლევს ექვსუცნობიან განტოლებათა სისტემას:

$$\left\{ \begin{aligned}
& n \cdot \ln b + \psi_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} + \psi_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} + \psi_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} + \theta \sum_{i=1}^n \ln \alpha_i + \\
& + \theta_0 \sum_{i=1}^n \ln Q_i = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i); \\
& \ln b \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} + \psi_1 \sum_{i=1}^n (\ln q_{1i})^2 + \psi_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln q_{1i} + \psi_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln q_{1i} + \theta \sum_{i=1}^n \ln \alpha_i \ln q_{1i} + \\
& + \theta_0 \sum_{i=1}^n \ln Q_i \ln q_{1i} = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln q_{1i}; \\
& \ln b \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} + \psi_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln q_{2i} + \psi_2 \sum_{i=1}^n (\ln q_{2i})^2 + \psi_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln q_{2i} + \theta \sum_{i=1}^n \ln \alpha_i \ln q_{2i} + \\
& + \theta_0 \sum_{i=1}^n \ln Q_i \ln q_{2i} = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln q_{2i}; \tag{4.27} \\
& \ln b \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} + \psi_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln q_{3i} + \psi_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln q_{3i} + \psi_3 \sum_{i=1}^n (\ln q_{3i})^2 + \theta \sum_{i=1}^n \ln \alpha_i \ln q_{3i} + \\
& + \theta_0 \sum_{i=1}^n \ln Q_i \ln q_{3i} = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln q_{3i}; \\
& \ln b \sum_{i=1}^n \ln \alpha_i + \psi_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln \alpha_i + \psi_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln \alpha_i + \psi_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln \alpha_i + \theta \sum_{i=1}^n (\ln \alpha_i)^2 + \\
& + \theta_0 \sum_{i=1}^n \ln Q_i \ln \alpha_i = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln \alpha_i; \\
& \ln b \sum_{i=1}^n \ln Q_i + \psi_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln Q_i + \psi_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln Q_i + \psi_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln Q_i + \\
& + \theta \sum_{i=1}^n \ln \alpha_i \ln Q_i + \theta_0 \sum_{i=1}^n (\ln Q_i)^2 = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln Q_i;
\end{aligned} \right.$$

ჯამების მნიშვნელობების გათვალისწინებით (დანართი 6) (4.27) სისტემა მიიღებს სახეს:

$$\begin{cases}
98 \cdot \ln b + \psi_1 1986744 - \psi_2 69.1163 + \psi_3 1581396 + \theta 2711829 + \\
+ \theta_0 2651984 = 2215475 \\
\ln b 1986744 + \psi_1 1986744 - \psi_2 1249679 + \psi_3 2886652 + \theta 4944626 + \\
+ \theta_0 483571 = 40414 \\
\ln b 69.1163 + \psi_1 1249679 + \psi_2 69.1163 + \psi_3 98.3062 + \theta 1720502 + \\
+ \theta_0 1674364 = 1391662 \\
\ln b 1581396 + \psi_1 2886652 - \psi_2 98.3062 + \psi_3 1581396 + \theta 3931035 + \\
+ \theta_0 3848102 = 3233256 \\
\ln b 2711829 + \psi_1 4944626 - \psi_2 1720502 + \psi_3 3931035 + \theta 676581 \\
+ \theta_0 6610362 = 5486221 \\
\ln b 2651984 + \psi_1 483571 - \psi_2 1674364 + \psi_3 3848102 + \\
+ \theta 6610362 + \theta_0 6495052 = 5375973
\end{cases} \quad (4.28)$$

(4.28) განტოლებათა სისტემის ამოხსნა გვაძლევს:

$$\begin{aligned}
b &= 6.68; \quad \psi_1 = 0.6785; \quad \psi_2 = -0.1985; \\
\psi_3 &= 0.8734; \quad \theta = -1; \quad \theta_0 = -0.0084.
\end{aligned} \quad (4.29)$$

შესაბამისად, შეზღუდვის ფუნქცია, ანუ დამოკიდებულება (4.22) იღებს სახეს:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) - \alpha = 6.68 q_1^{0.6785} q_2^{-0.1985} q_3^{0.8734} \alpha^{-1} Q^{-0.0084}. \quad (4.30)$$

აპროქსიმაციის სიზუსტეს  $q_1, q_2, q_3$ -თვის ვაფასებთ კოეფიციენტით, რომელიც გამოითვლება კორელაციური ფარდობის ანალოგიურად:

$$\eta = \frac{1}{\sigma(\ln C)} \sqrt{K_1 \operatorname{cov}(\ln C, \ln q_1) + K_2 \operatorname{cov}(\ln C, \ln q_2) + K_3 \operatorname{cov}(\ln C, \ln q_3) + \sqrt{K_4 \operatorname{cov}(\ln C, \alpha) + K_5 \operatorname{cov}(\ln C, Q)}}, \quad (4.31)$$

სადაც,  $C$ -თი აღნიშნული გვაქვს  $\beta - \alpha$ ,

$$\sigma(\ln C) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \ln^2 C - \left( \frac{1}{n} \sum \ln C \right)^2}, \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned}
\text{cov}(\ln C, \ln q_1) &= \frac{1}{n} \sum \ln C \cdot \ln q_1 - \frac{\sum \ln C}{n} \cdot \frac{\sum \ln q_1}{n}, \\
\text{cov}(\ln C, \ln q_2) &= \frac{1}{n} \sum \ln C \cdot \ln q_2 - \frac{\sum \ln C}{n} \cdot \frac{\sum \ln q_2}{n}, \\
\text{cov}(\ln C, \ln q_3) &= \frac{1}{n} \sum \ln C \cdot \ln q_3 - \frac{\sum \ln C}{n} \cdot \frac{\sum \ln q_3}{n}, \\
\text{cov}(\ln C, \ln \alpha) &= \frac{1}{n} \sum \ln C \ln \alpha - \frac{\sum \ln C}{n} \cdot \frac{\sum \ln \alpha}{n}, \\
\text{cov}(\ln C, \ln Q) &= \frac{1}{n} \sum \ln C \ln Q - \frac{\sum \ln C}{n} \cdot \frac{\sum \ln Q}{n}.
\end{aligned} \tag{4.33}$$

ვლენობით, რომ სიმჭიდროვის კოეფიციენტი (კორელაციური ფარდობა) შეადგენს  $\eta = 0.796$ .

#### 4.6. მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციების ანალიზი

საბოლოოდ, ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი იღებს სახეს:

მიზნის ფუნქცია:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 1.25 \cdot 10^{-8} q_1^{0.62} q_2^{-6.45} q_3^{22.9} e^{-5.95 \cdot 10^{-6} q_1 + 11.07 q_2 - 5.37 q_3}, \tag{4.34}$$

შეზღუდვის ფუნქცია:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) - \alpha = 6.68 q_1^{0.6785} q_2^{-0.1985} q_3^{0.8734} \alpha^{-1} Q^{-0.0084} = \beta_0, \tag{4.35}$$

რეაგენტის ცვალებადობის ზღვრები:

$$5.3 \leq q_1 \leq 7.5; \quad 0.4 \leq q_2 \leq 0.75; \quad 3.6 \leq q_3 \leq 5, \tag{4.36}$$

ხოლო მათი საშუალო მნიშვნელობები:

$$q_1=6.3; \quad q_2=0.56; \quad q_3=4.4. \tag{4.37}$$

გავანალიზოთ მიზნის ფუნქცია (4.34):  $q_1$ ,  $q_2$  და  $q_3$  რეაგენტების ხარჯებზე  $\gamma$  გამოსავლის დამოკიდებულება [22]. დავეუშვათ, რომ  $\overline{q_2} = q_2 = 0.56$ ,  $\overline{q_3} = q_3 = 4.4$ , მაშინ მიზნის ფუნქცია მიიღებს სახეს:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 1.25 \cdot 10^{-8} q_1^{0.62} 0.56^{-6.45} 4.4^{22.9} e^{-5.95 \cdot 10^{-6} q_1 + 11.07 \cdot 0.56 - 5.37 \cdot 4.4},$$

ანუ

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 285.69 \cdot 10^4 q_1^{0.62} e^{-5.95 \cdot 10^{-6} q_1 - 17.43}. \tag{4.38}$$

ანალოგიური დაშვებები განვახორციელოთ კონცენტრატის ხარისხის განტოლებაშიც. დამატებით დავუშვათ, რომ:

$$\alpha = \bar{\alpha} = 12.0, \quad Q = \bar{Q} = 11.5. \quad (4.39)$$

ამ დაშვებების გათვალისწინებით კონცენტრატის ხარისხის განტოლებას ექნება სახე:

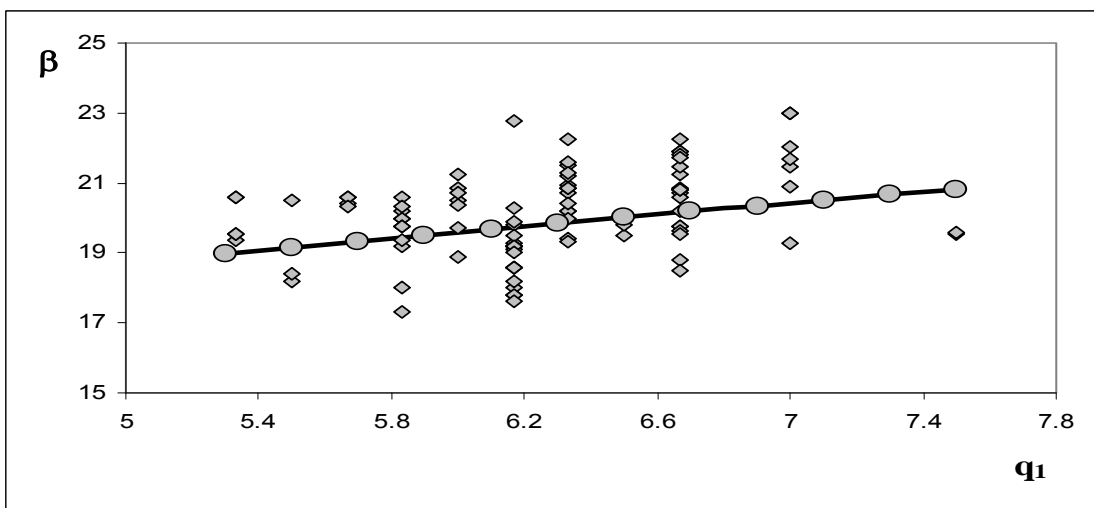
$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 12 + 6.68q_1^{0.6785} 0.56^{-0.1985} 4.4^{0.8734} 12^{-1} 11.5^{-0.0084},$$

ანუ

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 12 + 2.25q_1^{0.6785}. \quad (4.40)$$

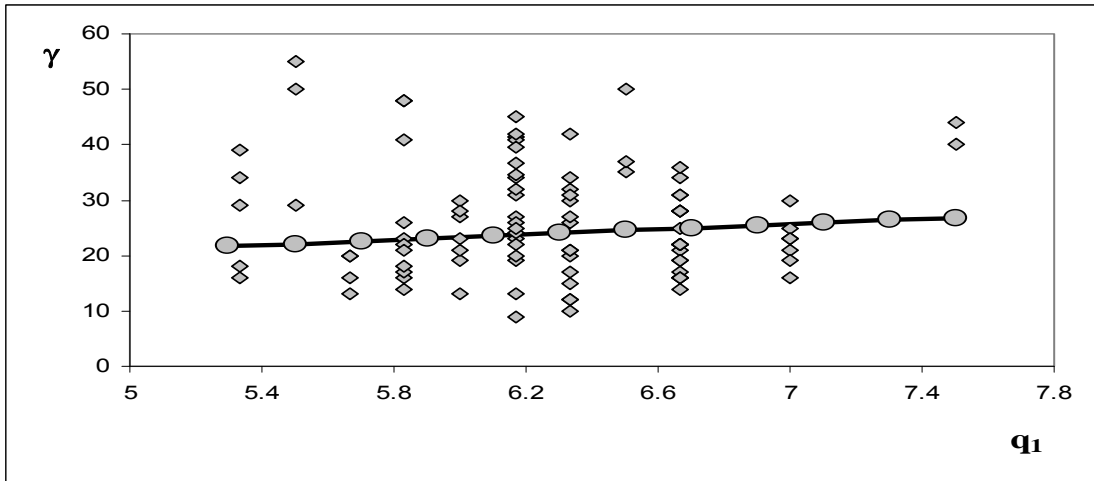
მიღებული (4.38) და (4.40) ფუნქციური დამოკიდებულებების საფუძველზე ვაგებთ ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლების  $\beta$  და  $\gamma$ -ს  $q_1$  რეაგენტის ხარჯზე დამოკიდებულების გრაფიკს. კოორდინატთა სიბრტყეზე დაგვაქვს  $\beta$ -ს და  $\gamma$ -ს ექსპერიმენტით მიღებული მნიშვნელობებიც (რომბისებრი წერტილები) (იხ. ნახ. 4.4 და ნახ. 4.5).

ნახაზებიდან ჩანს, რომ ორივე გრაფიკი სწორხაზოვანია და  $q_1$  რეაგენტის ხარჯის ზრდა იწვევს ორივე მაჩვენებლის ზრდას. მაშასადამე, თუ ტექნოლოგიური პროცესი წარიმართება წრფის მარჯვენა უბანზე, მივიღებთ უფრო მაღალ ხარისხობრივ მაჩვენებლებს. ამიტომ, ბუნებრივია, ვირჩევთ  $q_1$  რეაგენტის ხარჯის



ნახ. 4.4.  $q_1$  რეაგენტის ხარჯზე  $\beta$ -ს დამოკიდებულების გრაფიკი





ნახ. 4.5.  $q_1$  რეაგენტის ხარჯზე  $\gamma$ -ს დამოკიდებულების გრაფიკი

მნიშვნელობებს მისი საშუალო მნიშვნელობიდან მაქსიმუმამდე. ამის გათვალისწინებით  $q_1$  რეაგენტის ხარჯის ცვალებადობის უბანი იქნება:  $6.3 \leq q_1 \leq 7$ .

ახლა დაეუშვათ, რომ  $q_1 = \bar{q}_1 = 6.3$ ,  $q_3 = \bar{q}_3 = 4.4$ , მაშინ მიზნის ფუნქცია აღიწერება გამოსახულებით:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 1.25 \cdot 10^{-8} \cdot 6.3^{0.62} q_2^{-6.45} 4.4^{22.9} e^{-5.95 \cdot 10^{-6} \cdot 6.3 + 11.07 q_2 - 5.37 \cdot 4.4},$$

ანუ

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 21.24 \cdot 10^4 q_2^{-6.45} e^{11.07 q_2 - 23.63}. \quad (4.41)$$

კონცენტრატის ხარისხის განტოლებაში ანალოგიური დაშვებების საფუძველზე მივიღებთ:

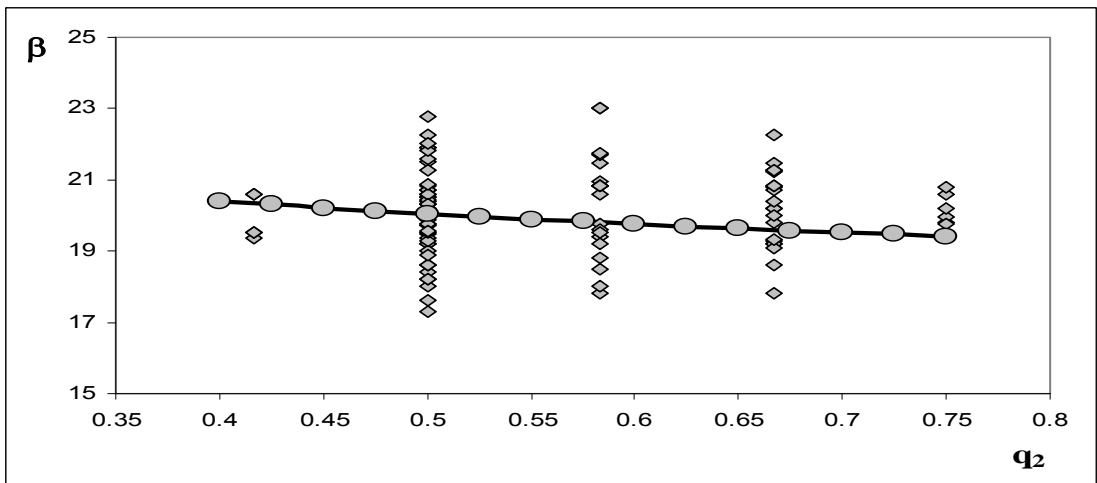
$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 12 + 6.68 \cdot 6.3^{0.6785} q_2^{-0.1985} 4.4^{0.8734} 12^{-1} 11.5^{-0.0084},$$

ანუ

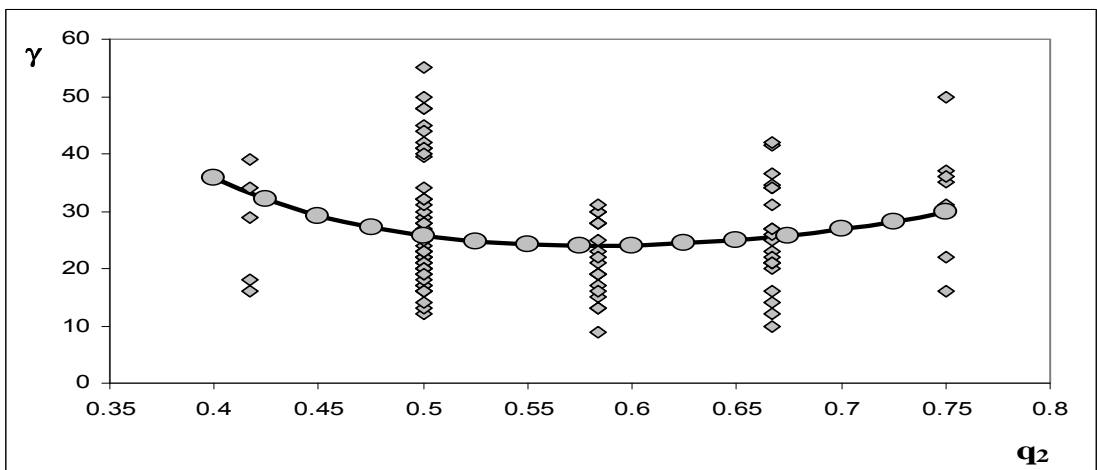
$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 12 + 7.01 q_2^{-0.1985}. \quad (4.42)$$

4.6 და 4.7 ნახაზებზე (4.41) და (4.42) ფუნქციური დამოკიდებულების საფუძველზე აგებულია ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლების  $q_2$  რეაგენტის ხარჯზე დამოკიდებულების გრაფიკი.  $q_2$  რეაგენტის ხარჯის ზრდა იწვევს კონცენტრატის ხარისხის თითქმის უმნიშვნელო შემცირებას. ე.ი. კონცენტრატის

ხარისხისთვის მნიშვნელობა არ აქვს  $q_2$  ხარჯის სიდიდეს. ამიტომაც,  $q_2$ -ის ცვალებადობის უბნის დასადგენად ვიყენებთ  $\gamma - q_2$  დამოკიდებულებას.



ნახ. 4.6.  $q_2$  რეაგენტის ხარჯზე  $\beta$  -ს დამოკიდებულების გრაფიკი



ნახ. 4.7.  $q_2$  რეაგენტის ხარჯზე  $\gamma$  -ს დამოკიდებულების გრაფიკი

4.7 ნახაზიდან ჩანს, რომ  $\gamma - q_2$  დამოკიდებულება არაწრფივია, აქვს მინიმუმი და  $q_2$ -ის საკმაოდ დიდ ფარგლებში გამოსავალი რჩება მინიმალური. ამავე დროს  $\overline{q_{2min}} - q_2$  უბანზე რეაგენტის ხარჯის ზრდით გამოსავალი მცირდება, ხოლო  $\overline{q_2} - q_{2max}$  უბანზე – მატულობს. ამიტომ ვირჩევთ  $q_2$  რეაგენტისთვის მისი ხარჯის ცვალებადობის უბანს:  $0.56 \leq q_2 \leq 0.75$ .

დასასრულ, დაუშვათ, რომ  $q_1 = \overline{q_1} = 6.3$ ,  $q_2 = \overline{q_2} = 0.56$ , მაშინ მიზნის ფუნქციას ექნება სახე:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 1.25 \cdot 10^{-8} 6.3^{0.62} 0.56^{-6.45} q_3^{22.9} e^{-5.95 \cdot 10^{-6} \cdot 6.3 + 11.07 \cdot 0.56 - 5.37 q_3},$$

ანუ

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 164.68 \cdot 10^{-10} q_3^{22.9} e^{6.20 - 5.37 q_3}, \quad (4.43)$$

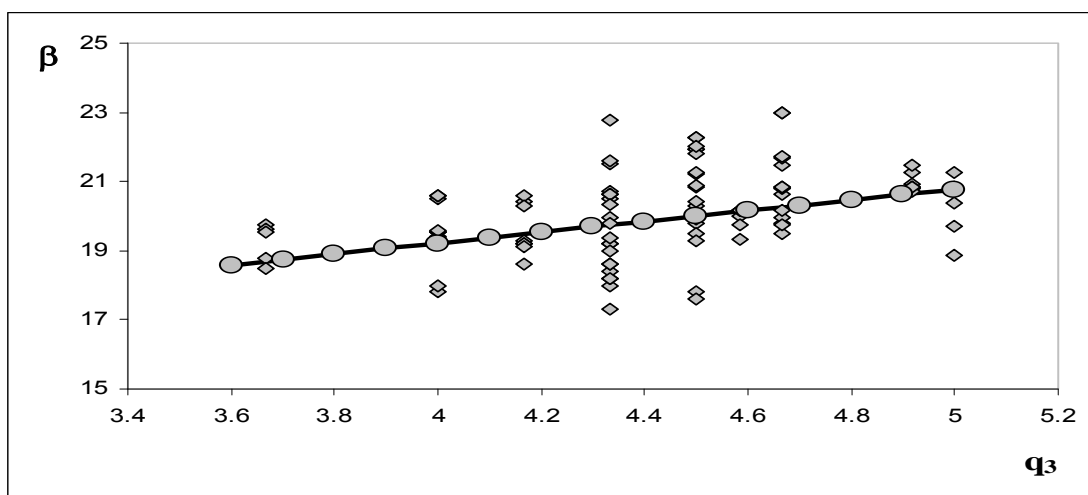
სოლო კონცენტრატის ხარისხის განტოლებისთვის მივიღებთ:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 12 + 6.68 \cdot 6.3^{0.6785} 0.56^{-0.1985} q_3^{0.8734} 12^{-1} 11.5^{-0.0084},$$

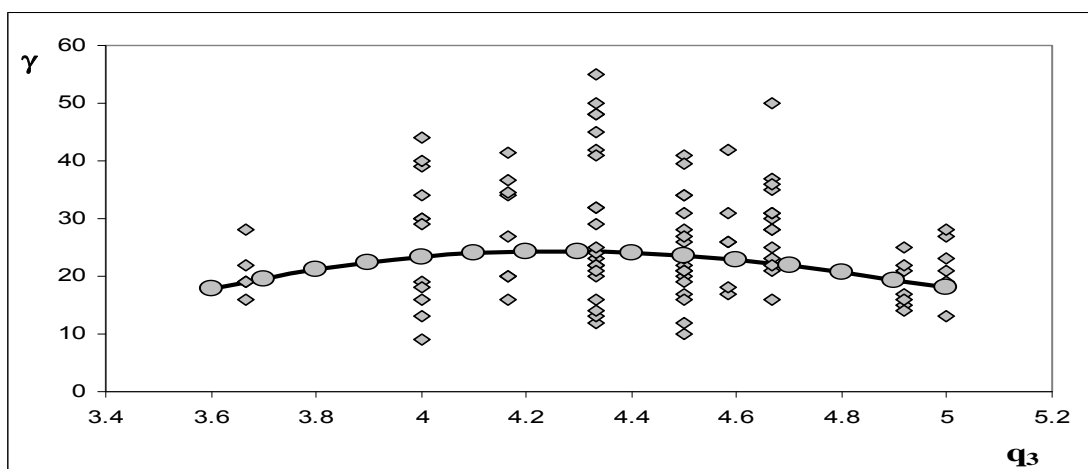
ანუ

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 12 + 2.15 q_3^{0.8734}. \quad (4.44)$$

(4.43) და (4.44) განტოლებების საფუძველზე ვაგებთ ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლების  $q_3$  რეაგენტის ხარჯზე დამოკიდებულების გრაფიკებს.



ნახ. 4.8.  $q_3$  რეაგენტის ხარჯზე  $\beta$ -ს დამოკიდებულების გრაფიკი



ნახ. 4.9.  $q_3$  რეაგენტის ხარჯზე  $\gamma$ -ს დამოკიდებულების გრაფიკი

$q_3$  რეაგენტის ხარჯის ზრდა იწვევს  $\beta$  კონცენტრატის ხარისხის მატებას, დამოკიდებულება წრფივია (ნახ. 4.8), ამიტომაც მაღალი ხარისხის კონცენტრატის მისაღებად სასურველია  $q_3$  რეაგენტის ხარჯის შენარჩუნება  $\overline{q_3} - q_{3\max}$  ფარგლებში.  $\gamma$  –  $q_3$  დამოკიდებულება კი ექსტრემალურია (ნახ. 4.9). ბუნებრივია, გამოსავლის მაქსიმალური მნიშვნელობის შესანარჩუნებლად საჭიროა  $q_3$  რეაგენტის ხარჯი იცვლებოდეს საშუალო მნიშვნელობის სიახლოვეს. გასათვალისწინებელია, რომ ექსპერიმენტით მიღებული წერტილების სიმჭიდროვე  $\gamma - q_3$  დამოკიდებულების მარჯვენა უბანზე მეტია. აქედან გამომდინარე, ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლების მაქსიმალურად მაღალი მნიშვნელობების შესანარჩუნებლად უმჯობესია  $q_3$  რეაგენტის ხარჯი იცვლებოდეს ფარგლებში:  $4.4 \leq q_3 \leq 5$ .

მაშასადამე, ჭიათურის საფლოტაციო ფაბრიკის პირობებში ფლოტაციის პროცესისთვის საბოლოოდ დადგენილ იქნა ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი, რომელიც მოიცავს:

მიზნის ფუნქციის მაქსიმიზაციის მოთხოვნას:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 1.25 \cdot 10^{-8} q_1^{0.62} q_2^{-6.45} q_3^{22.9} e^{-5.95 \cdot 10^{-6} q_1 + 11.07 q_2 - 5.37 q_3} \rightarrow \max, \quad (4.45)$$

შეზღუდვის ტოლობას:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = \alpha + 6.68 q_1^{0.68} q_2^{-0.2} q_3^{0.87} \alpha^{-1} Q^{-0.0084} = \beta_0 \quad (4.46)$$

და რეაგენტების დასაშვები ცვალებადობის საზღვრებს:

$$6.3 \leq q_1 \leq 7; \quad 0.56 \leq q_2 \leq 0.75; \quad 4.4 \leq q_3 \leq 5, \quad (4.47)$$

სადაც  $\gamma$  არის კონცენტრატის გამოსავალი, %;  $\beta$  - კონცენტრატის ხარისხი, %;  $\beta_0$  – კონცენტრატის ხარისხის დავალებული მნიშვნელობა, %;  $\alpha$  – გასამდიდრებელი მადნის ხარისხი (Mn-ის შემცველობა), %;  $Q$  – გასამდიდრებელი მადნის ხარჯი (მწარმოებლურობა), ტ/სთ;  $q_1, q_2, q_3$  – რეაგენტების (შესაბამისად, გასაპნული ტალის ზეთის, სოლარის ზეთისა და თხევადი მინის) ხარჯები, კგ/წთ.

გავითვალისწინოთ, რომ  $q_1, q_2, q_3$  მმართველი სიდიდეებია, ხოლო  $\alpha$  და  $Q$  – შემაშვოთებელი.

(4.46) გამოსახულების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ  $Q$ -ს გაველენა  $\beta$ -ს ცვალებადობაზე უმნიშვნელოა, რასაც ადასტურებს შესაბამისი ხარისხის მაჩვენებლის (-0.0084) სიმცირე. ამიტომ ჩავთვალოთ, რომ ეს შემაშფოთებელი სიდიდე არ იცვლება და ექსპერიმენტის დროს მიღებული საშუალო მნიშვნელობის ტოლია:

$$\bar{Q} = 11.5. \quad (4.48)$$

აქედან გამომდინარე, შემაშფოთებელ სიდიდედ რჩება  $\alpha$ , რომლის ცვალებადობის დიაპაზონი და საშუალო მნიშვნელობა შეადგენს:

$$9 \leq \alpha \leq 15, \quad \bar{\alpha} = 12. \quad (4.49)$$

ზემოაღნიშნულის საფუძველზე კვლევის შემდგომი ამოცანა მდგომარეობს გასამდიდრებელი მანძის  $\alpha$  ხარისხზე  $q_1$ ,  $q_2$  და  $q_3$  რეაგენტების ხარჯების ისეთი დამოკიდებულების პოვნაში, რომლებიც უზრუნველყოფენ პროცესის ოპტიმალურობას (4.45) და (4.46) დამოკიდებულების შესაბამისად.

თავი 5. ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაცია  
5.1. ექსტრემალური ამოცანების მათემატიკური  
დაპროგრამება

დასახული მიზნისკენ სწრაფვა ცხოვრების თანამდევი პროცესია. ანალოგიური ვითარებაა საწარმოო პრაქტიკაშიც. ყოველთვის არსებობს რაღაც მიზანი, რომლის მისაღწევადაც დაჩქარებული მეთოდით და იმავდროულად ნაკლები დანაკარგებით სწრაფვა ბუნებრივი რეალობაა. მაგრამ მეტად რთულია ამ მიზნის ფორმულირება რაოდენობითი გამოსახულებით, ანუ მიზნის ფუნქციის მიღება ან კრიტერიუმის შერჩევა, რადგან პრაქტიკაში ხშირად არის გადასაწყვეტი ურთიერთსაწინააღმდეგო ამოცანები. მაგალითად, მამდიდრებელი პროცესების დროს ყოველთვის გვსურს ამოკრეფის გაზრდაც და მადნის გადამუშავების თვითღირებულების შემცირებაც. ეს რთული ამოცანაა. თუმცა ეს საკითხი (კრიტერიუმის შერჩევა) მესამე თავში გადავწყვიტეთ.

ახლა უკვე დასახულ მიზანს შეიძლება მივცეთ შემდეგნაირი ფორმულირება: მივაღწიოთ გამდიდრების რაც შეიძლება მაღალ ხარისხს კონცენტრატის მინიმალური თვითღირებულების დროს, ანუ მივიღოთ მიზნის ფუნქციის მაქსიმალური მნიშვნელობა, რომლის არგუმენტებია პროცესის პარამეტრები: მწარმოებლურობა, მადნის ხარისხი, რეაგენტის ხარჯი და ა.შ., და ამავე დროს გავითვალისწინოთ მმართველი ზემოქმედებების ცვლილება განსაზღვრულ, დასაშვებ დიაპაზონში.

თუ რა მიდგომით ამოიხსნება მართვის ამოცანები, ეს თავის ნაშრომში კარგად ჩამოაყალიბა ი.ზ. ციპკინმა [23]. მისი თვალთახედვით, ავტომატური მართვის თეორიის განვითარებაში შესაძლებელია გამოვეყოთ სამი პერიოდი: დეტერმინიზმის, სტოქასტურობის და ადაპტურობის.

დეტერმინიზმის დროს მართული ობიექტების მდგომარეობის აღმწერი განტოლებებიც და გარე ზემოქმედებებიც (მავალბელი და შემაშფოთებელი) ცნობილად ითვლებოდა. ასეთი სრული გარკვეულობა საშუალებას იძლეოდა, მართვის თეორიის მრავალფეროვანი ამოცანები გადაეწყვიტათ კლასიკური ანალიტიკური აპარატით. განსაკუთრებით ეს ეხებოდა წრფივ ამოცანებს. სირთულეები გამოიწვია არაწრფივი ფაქტორების გამოჩენამ. თუმცა ეს საკითხებიც მოგვარდა ანალიზით, მიუხედავად იმისა, რომ ასეთი საკითხების გადაწყვეტისთვის განზოგადებული მეთოდები არ არსებობდა.

მდგომარეობა გართულდა მეორე – სტოქასტურობის პერიოდში. ამ პერიოდში უკვე დაადგინეს, რომ გარე ზემოქმედებები, როგორც მავალელები, ასევე შემაშფოთებელი, უწყვეტად იცვლებიან დროში და არ შეიძლება განისაზღვრონ ცალსახად. ეს ეხება მართული ობიექტის განტოლების კოეფიციენტებსაც. ამიტომ საჭირო გახდა სხვა მიდგომის მოძებნა, რომელიც გაითვალისწინებდა გარე და მმართველი ზემოქმედების ალბათურ ხასიათს. ასეთი მიდგომა დაფუძნებული უნდა ყოფილიყო შემთხვევითი ფუნქციების სტატისტიკური მახასიათებლების ცოდნასა და ანალიტიკურ მეთოდებზე.

თანამედროვე მრავალფეროვან პირობებში მომუშავე რთულ ავტომატურ სისტემებში არამარტო უცნობია მართული ობიექტების განტოლებები, გარე ზემოქმედებები და მათი სტატისტიკური მახასიათებლები, არამედ წინასწარ შეუძლებელია მათი სავარაუდო განსაზღვრა. მაშასადამე, საქმე გვაქვს საწყის გაურკვევლობასთან. რასაკვირველია, ეს ართულებს ამ ობიექტების მართვას და მოწმობს მართვის მესამე პერიოდის – ადაპტურობის პერიოდის დადგომას. ადაპტაციის გამოყენება ამცირებს საწყის გაურკვევლობას მართვის პროცესის მიმდინარეობის დროს მიღებული ინფორმაციის საფუძველზე [23].

თუ დასაშვებ ამოხსნათა რიცხვი დიდი არ არის, მაშინ შეიძლება ვიანგარიშოთ მიზნის ფუნქცია არგუმენტის ყველა მნიშვნელობისთვის და ამოვირჩიოთ მათგან მაქსიმალური მნიშვნელობის ვარიანტი. ვარიანტების დიდი რიცხვის შემთხვევაში კი უნდა გამოვიყენოთ კომპიუტერი და შევირჩიოთ ალგორითმი. მიზნის ფუნქციის საპოვნელად შესაძლებელია ვისარგებლოთ დიფერენციალური აღრიცხვით, მაგრამ ეს შესაძლებლობა იკარგება მიზნის ფუნქციის არგუმენტების ზრდის დროს, სრულიად უვარგისი ხდება ფუნქციის არადიფერენცირებულობის დროს და მიუღებელი – ფუნქციის დისკრეტულობის შემთხვევაში. ყველა ამ შემთხვევაში საჭიროა ახალი მათემატიკური აპარატის გამოყენება, რომელიც მორგებული იქნება ასეთი სახის ამოცანებზე. ასეთი აპარატია მათემატიკური დაპროგრამების მეთოდი [23].

## 5.2. მოდელისა და ფიზიკური ობიექტების ოპტიმიზაციის მეთოდები

ოპტიმიზაცია, ზოგადად, სიტუაციის ცვლილების შესაბამისად განსაზღვრულ გადაწყვეტილებათა მიღებაა. არსებობს მრავალი დასაშვები გარემოება. სწორედ ამ მრავალთაგან ერთის ამორჩევაში მდგომარეობს გადაწყვეტილების მიღების არსი. რაც მეტია ვარიანტების რაოდენობა, მით მეტი

ინფორმაცია გეჭირდება ამ ვარიანტების გასარჩევად და, ცხადია, მით მეტი სამუშაოს ჩატარება დაგეჭირდება ამოცანის შესასრულებლად.

გადაწყვეტილების მიღების პროცესში გამოიყენება ფუნქცია, რომლის არგუმენტებად მიღებულია გადაწყვეტილებათა დასაშვები ვარიანტები, მნიშვნელობებად კი რიცხვი, რომელიც გვიჩვენებს დასახული მიზნის მიღწევის ზომას. შედეგად გადაწყვეტილებათა მიღების ამოცანა დაიყვანება მიზნის ფუნქციის მაქსიმალური (მინიმალური) მნიშვნელობის პოვნაში და ამასთან, არგუმენტების ისეთი მნიშვნელობების პოვნაში, რომლებისთვისაც მიიღწევა ეს მაქსიმუმი. არგუმენტების მნიშვნელობას, რომლის დროსაც მიზნის ფუნქცია ხდება მაქსიმალური (მინიმალური) მნიშვნელობის, ეწოდება არგუმენტების ოპტიმალური მნიშვნელობა [16].

ოპტიმიზაცია ხშირად დაკავშირებულია მოდელის მიღებასთან. მიღებული მოდელი შესაძლებელია გამოვიყენოთ არა მარტო პროცესის მექანიზმისა და შედეგის ასახსნელად, არამედ იგი საშუალებას გვაძლევს გადავწყვიტოთ კვლევის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ამოცანა. კერძოდ, მივიღოთ დამოუკიდებელი ცვლადების (X) მნიშვნელობები, რომლებისთვისაც შერჩეული მიზნის ფუნქცია მიაღწევს ექსტრემუმს. გამდიდრებაში ასეთი ამოცანაა მაქსიმალური ამოკრეფის (ან გამოსავლის) მიღება კონცენტრატის ხარისხის მოცემული მნიშვნელობის დროს [16].

დავუშვათ, ექსპერიმენტის შედეგების დამუშავებით მიღებულია მოდელი, რომელიც აკავშირებს გამოსავალს და კონცენტრატის ხარისხს რეაგენტების ხარჯთან:

$$\begin{aligned} \gamma &= f_1(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) \\ \beta &= f_2(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) \end{aligned} \quad (5.1)$$

ოპტიმალურ რეაგენტულ რეჟიმს დავადგენთ მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც განვსაზღვრავთ  $q_{1\text{ობტ.}}$ ,  $q_{2\text{ობტ.}}$  და  $q_{n\text{ობტ.}}$ :

$$\begin{aligned} \gamma &\rightarrow \max, \\ \beta &= \beta_0, \\ q_{i\min} &\leq q_i \leq q_{i\max}. \end{aligned} \quad (5.2)$$

ჩვენი მიზანი არის  $q_{i\text{ობტ.}}$  მნიშვნელობების პოვნა მოცემული მოდელისთვის. აღნიშნული მოდელისთვის ოპტიმალური პირობების პოვნის მეთოდი



დამოკიდებულია მის სახეზე. მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციების წრფივი მოდულებისთვის გამოიყენება წრფივი დაპროგრამების მეთოდი.

წრფივი დაპროგრამება ოპტიმიზაციის მნიშვნელოვანი სფეროა რამდენიმე მიზეზის გამო. მრავალი პრაქტიკული პრობლემა ოპტიმიზაციის კვლევაში, კერძოდ, მათემატიკური მოდელირება, შეიძლება წარმოდგეს როგორც წრფივი დაპროგრამების პრობლემა. წრფივი დაპროგრამების გარკვეული სპეციფიკური შემთხვევები, როგორც არის ტექნოლოგიური პროცესების ოპტიმიზაციის პრობლემები და, მათ შორის, ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციის პრობლემები, მეტად მნიშვნელოვანია. რიგი ალგორითმებისა სხვა ტიპის ოპტიმიზაციის პრობლემების დროს მუშაობს წრფივი დაპროგრამების პრობლემების ქვეპრობლემების გადაწყვეტის შედეგად. მათ ამოსახსნელად ჩატარებულია კვლევები სპეციალიზებულ ალგორითმებზე. წრფივი დაპროგრამების იდეები საფუძვლად დაედო ოპტიმიზაციის თეორიის მრავალ ისეთ მთავარ კონცეფციას, როგორც არის დუალიზმი, დეკომპოზიცია, ამოხსენილობის მნიშვნელობა და მისი განზოგადებები.

ოპტიმალური მართვის თეორიაში დამუშავებულია ფუნქციური უტოლობების სახით მოცემული შეზღუდვების დროს ექსტრემალური ამოცანის ამოხსნის რამდენიმე მეთოდი. მათ მიეკუთვნება ანალიტიკური მეთოდები: ვარიაციული აღრიცხვა, შემთხვევითი ძებნის მეთოდი, ლაგრანჟის განუსაზღვრელ მამრავლთა მეთოდი და მისი მოდიფიკაცია, ბელმანის დინამური დაპროგრამება, პონტრიაგინის მაქსიმუმის მეთოდი და გამოთვლითი მეთოდები, როგორცაა გრადიენტის მეთოდი. ყველა ეს მეთოდი სხვადასხვა სიზუსტით და გამოთვლის სხვადასხვა სირთულით ხასიათდება და საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ არაწრფივი მართვის სისტემები.

ამოცანის მათემატიკური დასმა ითვალისწინებს, რომ რაღაც  $n$ -ჯერად სივრცეში მოცემულია ფუნქცია  $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , უტოლობები  $x_{i \min} \leq x_i \leq x_{i \max}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) და ამ პირობებში უნდა ვიპოვოთ  $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ფუნქციის მაქსიმუმი ან მინიმუმი.

აუცილებელია შევნიშნოთ, რომ მათემატიკური დაპროგრამების დროს არ არის აუცილებელი ამოცანის პირობების აღწერა ანალიტიკური (ფორმულის) სახით. ამ მიზეზის გამო ის მოიცავს ამოცანათა უფრო ფართო სპექტრს, ვიდრე ის მეთოდები, რომლებიც მოითხოვენ ამ საკითხის გადაწყვეტას ანალიტიკური ფორმით. ექსტრემალური ამოცანების ამოხსნის ალგორითმული ფორმა

საშუალებას იძლევა ოპტიმალურობის საპოვნელად გამოვიყენოთ გამოთვლითი ტექნიკის საშუალებები უშუალოდ ფიზიკურ ობიექტებზე.

ამოცანის ამოხსნა მოდულებსა და ფიზიკურ ობიექტებზე განსხვავებულია. ფიზიკურ ობიექტებზე ძებნა მიმდინარეობს დაბრკოლებებით და რეალური დროის მასშტაბით, რასაც მივყავართ ძებნის გახანგრძლივებასა და დანაკარგების ზრდასთან. მოდელის მისაღებად და ამ გზით ექსტრემუმის ამოცანის გადასაწყვეტად კი საჭიროა დამატებითი გამოთვლების ჩატარება. მიუხედავად ამისა, უმეტესად არჩევანი კეთდება სწორედ მოდელირების სასარგებლოდ [16].

მოდელის მიღებისთვის მართული ობიექტზე საჭირო ინფორმაციის მოცემა შეუძლია მხოლოდ მოცემული რეჟიმიდან გადახრებს, რომელიც დაკავშირებული არის რეგულირების დროს მიმდინარე გარდამავალ პროცესებთან. უმართავ ან ცუდად მართულ ობიექტებზე არსებობს მოცემული რეჟიმიდან გადახრილი მრავალი სიტუაცია, რომელიც იძლევა მოდელის მოძებნის საშუალებას. ასეთი ინფორმაციის გადამუშავება შრომატევადი სამუშაოა და, ფაქტობრივად, ძებნას წარმოადგენს [16].

ექსპერიმენტის დაწყებისას ჩვენ არ ვიცით, რა შედეგს მივიღებთ. თუ ეს შედეგი დამოკიდებულია ფაქტორების მნიშვნელობების ამორჩევაზე, რომელიც შეესაბამება მიზნის ფუნქციის (ოპტიმიზაციის პარამეტრის) განსაზღვრულ მნიშვნელობას, მაშინ აუცილებელია ვეძებოთ ამ ფაქტორების მნიშვნელობები, ანუ განვახორციელოთ ძებნა. ძებნა უმეტეს შემთხვევაში ექსპერიმენტული სამუშაოს აუცილებელი ნაწილია. თუ პარამეტრის მაქსიმალურ ან მინიმალურ მნიშვნელობას დავარქმევთ მიზნის ოპტიმიზაციას, მაშინ ძებნა არის მიზნისკენ მოძრაობა, ანუ დროში მიმდინარე მოქმედებების თანმიმდევრობითი პროცესი.

არაწრფივი მოდელირების ოპტიმიზაციის ამოცანის ანალიტიკური გადაწყვეტა უმრავლეს შემთხვევაში შეუძლებელია. ასეთი ამოცანები ამოიხსნება მხოლოდ ალგორითმული რიცხვითი მეთოდებით, ანუ განსაზღვრული გამოთვლითი პროცედურებით. ასეთ შემთხვევაში ვირჩევთ  $q$  ცვლადის რომელიღაც მნიშვნელობას, ვიღებთ მის საწყის წერტილს, ვანგარიშობთ ამ წერტილში მიზნის ფუნქციის მნიშვნელობას და უკვე შემდეგ, მეზობელ წერტილებში მიზნის ფუნქციის მნიშვნელობების შედარებით ვღებულობთ გადაწყვეტილებას, გადავაადგილოთ საწყისი წერტილი მანამ, სანამ არ მიუახლოვდება ოპტიმალურს. ალგორითმი გრადიენტული მეთოდია, ამიტომ მოდელის გრადიენტის შერჩევაც საერთო ოპტიმალური პირობების მოძებნის ამოცანის ერთ-ერთი შემადგენელი ნაწილია.



– არაწრფივი მოდელი შემფოთების გათვალისწინებით:

$$\begin{aligned}
 \gamma(x_1, \dots, x_n, \alpha, z_1, \dots, z_r) &= a_0 + a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + \dots + \\
 &+ a_{n1}x_n + a_{n2}x_n^2 + c_{01}\alpha + c_{02}\alpha^2 + \\
 &+ c_{11}z_1 + c_{12}z_1^2 + \dots + c_{r1}z_r + c_{r2}z_r^2 \rightarrow \max, \\
 \beta(x_1, \dots, x_n, \alpha, z_1, \dots, z_r) &= b_0 + b_{11}x_1 + b_{12}x_1^2 + \\
 &+ \dots + b_{n1}x_n + b_{n2}x_n^2 + d_{01}\alpha + d_{02}\alpha^2 + \\
 &+ d_{11}z_1 + d_{12}z_1^2 + \dots + d_{r1}z_r + d_{r2}z_r^2 = \beta_0, \\
 x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max} \quad (i=1, \dots, n), \\
 \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}, \\
 z_{j\min} \leq z_j \leq z_{j\max} \quad (j=1, \dots, r);
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

(5.4) . . . (5.7) გამოსახულებებში არსებული  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  კოეფიციენტები განისაზღვრება ექსპერიმენტული მონაცემების მიხედვით. ზოგ შემთხვევაში, მიზნის ფუნქცია აიგება არა გამოსავლის, არამედ ამოკრეფის ან სხვა რომელიმე მაჩვენებლის მიმართ, თუმცა იდენტიფიკაციის და ოპტიმიზაციის არსი ამით არ იცვლება.

შემფოთების გარეშე წრფივი მოდელის (5.4) ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის უნივერსალური მათემატიკური აპარატია წრფივი დაპროგრამების მეთოდი [16, 24, 25]. მაგრამ პრაქტიკაში სარგებლობენ უფრო მარტივი, გრაფიკული მეთოდებით [16, 26]. არაწრფივი მოდელის შემთხვევაში იყენებენ ლაგრანჟის განუსაზღვრელ მამრავლთა მეთოდს [16, 27, 24], არაწრფივი დაპროგრამების მეთოდს [16, 26, 28]. უნდა შევნიშნოთ, რომ ამოხსნის მეთოდები რთული და შრომატევადია. ამასთან, ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის სირთულეები იზრდება მმართველი სიდიდეების და შეზღუდვების ზრდასთან ერთად. გარდა ამისა, (5.4) და (5.5) მოდელები არ ითვალისწინებენ შემაშფოთებელ სიდიდეებს და ამით ოპტიმიზაცია დაიყვანება არა ოპტიმალური დამოკიდებულებების მოძებნაზე, არამედ მმართველი სიდიდეების რიცხვითი მნიშვნელობების პოვნაზე [16, 29, 24, 25, 26, 28, 30, ..., 34]. ასეთი გადაწყვეტა კი არაეფექტურია შემაშფოთებელი სიდიდეების მნიშვნელოვნად ცვალებადობის პირობებში.

ამ მიზეზის გამო ხშირად მიმართავენ (5.6) და (5.7) სახის მოდელებს. თუმცა ამ მოდელების ნაკლი იმაში მდგომარეობს, რომ ოპტიმიზაცია მათი გამოყენებით არ გვაძლევს საშუალებას მივიღოთ ოპტიმალური დამოკიდებულებები უშუალოდ ანალიტიკური სახით. ამოცანის ამოხსნა დაიყვანება მმართველი სიდიდეების

ოპტიმალური მნიშვნელობების მოძებნაზე შემაშფოთებელი სიდიდის ცალკეული ფიქსირებული მნიშვნელობის დროს, რაც ძალიან ართულებს პროცესის მართვას მიღებული შედეგებით რამდენიმე შემაშფოთებელი სიდიდის არსებობის შემთხვევაში.

მხოლოდ ზემოთ ჩამოთვლილი სიძნელეები არ არის (5.4), (5.5), (5.6) და (5.7) მოდელების უარყოფის მიზეზი. მამდიდრებელი ფაბრიკების ტექნოლოგიური პროცესების ოპტიმიზაციისადმი ტრადიციული მიდგომის მნიშვნელოვანი ნაკლოვანება მდგომარეობს შემდეგში: არსებული ფორმალური მიდგომა, როდესაც არა არის გათვალისწინებული ტექნოლოგიური პროცესის კანონზომიერებები და მართვისათვის გამოყენებულ ოპტიმალურ დამოკიდებულებებში ჩადებულია მხოლოდ ექსპერიმენტული, პოლინომიალური მოდელი, არ იძლევა შედეგს. ეს დადასტურებულია პრაქტიკით და ამაზე თანხმდება მკვლევართა უმრავლესობა [18, 24].

ყოველივე ზემოთქმულმა გამოიწვია, რომ ბოლო წლებში გაჩნდა ნაშრომები, რომლებშიც ჩანს ახლებური მიდგომა საკითხისადმი. დაიწყო მართვის თეორიის განვითარების ახალი ეტაპი [24, 35]. “გამდიდრების პროცესების მიმდინარეობის განმსაზღვრელი ფიზიკური აქტების ღრმა ანალიზი შესაძლებლობას იძლევა წარმოვადგინოთ იგი ორი ნაწილის სახით: დეტერმინირებული, რომლის ფიზიკური საფუძვლები კარგად არის შესწავლილი და აღიწერება ანალიზურად და სტოქასტური, რომელთა ბუნება გაურკვეველია და მიეკუთვნება შემთხვევით სფეროს. შემოვიტანოთ რა განსაზღვრულ ვარაუდებს (ჰიპოთეზებს) სტოქასტური ნაწილის ქცევის კანონზომიერებაზე, მაშინ შესაძლებელი გახდება აიგოს გამდიდრების პროცესის საძებნი მათემატიკური მოდელი. სრულიად გასაგებია, რომ ასეთ შემთხვევაში ის შეიძლება განხილულ იქნას როგორც კვაზიდეტერმინირებული. შემოტანილი ვარაუდების რაოდენობითი ფაქტორები (ჰიპოტეტიური კოეფიციენტები) კი დადგინდეს ექსპერიმენტულად კონკრეტულ ობიექტზე” [35]. “უმრავლეს შემთხვევებში ასეთ მოდელებში თეორიული ანალიზი შემოსაზღვრება ტექნოლოგიური პროცესების ფენომენოლოგიის განხილვით (ფენომენოლოგიური მოდელი). ფენომენოლოგიური მიდგომის არსი მდგომარეობს შემდეგში: პროცესი, რომლის მოდელირებასაც ვახდენთ, სტრუქტურულად ნაწევრდება მთელ რიგ მოვლენებად, ანუ სუბპროცესებად. თითოეული ასეთი სუბპროცესისათვის შემოიტანება ეფექტურობის დამაჯერებელი მაჩვენებლები . . . , რომლებიც გამოიყენებიან როგორც მოდელის პარამეტრები და რომლებიც განისაზღვრებიან ექსპერიმენტული გზით. მოდელების სტრუქტურული

ფენომენოლოგიური დამუშავება საშუალებას იძლევა უფრო დასაბუთებულად გამოვიყენოთ რეგრესიული ანალიზი . . . ვინაიდან მოდელები სტრუქტურულად შეპირობებული არიან და განსაზღვრული კოეფიციენტები იძენენ აშკარა ფიზიკურ (ან ფენომენოლოგიურ) აზრს, იქმნება საფუძვლები მიღებული მოდელების გავრცელებისა ექსპერიმენტის პირობების საზღვრებს გარეთ” [24].

“კვაზიდეტერმინირებული”, ანუ “ფენომენოლოგიური” მიდგომაც საკითხისადმი, მიუხედავად ამდენი უპირატესობისა, არ იძლევა პრობლემის სრულყოფილად გადაწყვეტის საშუალებას. მას გააჩნია სამი არსებითი ნაკლოვანება.

პირველი ნაკლოვანება: შეუძლებელია მივიღოთ ანალიზური სახით მმართველ და შემაშფოთებელ სიდიდეებს შორის ოპტიმალური დამოკიდებულებები.

მეორე ნაკლი: არაა ფორმულირებული საერთო კონცეფცია, რომელიც საშუალებას მოგვცემდა შეგვექმნა პროცესის მათემატიკური მოდელის ერთიანი სტრუქტურა, რის გამოც გვიხდება ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში ცალკეული დამოკიდებულებების ძებნა.

მესამე ნაკლი ეფუძნება წინა ორს. რადგან არ არსებობს მოდელის შექმნის და ოპტიმალური დამოკიდებულებების მიღების საერთო მეთოდი, ამიტომ არ არსებობს მათი რეალიზაციის შემთხვევაში ეფექტურობის პროგნოზირების მეთოდიც.

ვაანალიზებთ რა ოპტიმიზაციის მიზნით გამდიდრების პროცესების იდენტიფიკაციის მეთოდების განვითარების ეტაპებს და მათ ნაკლოვანებებს, ობიექტურად მივლივართ მესამე ეტაპზე გადასვლის აუცილებლობამდე. ოპტიმიზაციის იდენტიფიკაციის თეორია ამ ეტაპზე უნდა ეფუძნებოდეს გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესების განზოგადებული მათემატიკური მოდელის შექმნას ისე, რომ შეინარჩუნოს “კვაზიდეტერმინირებულობა”, ანუ “ფენომენალურობა” და თავიდან იქნას აცილებული ზემოთჩამოთვლილი ნაკლოვანებები.

ოპტიმიზაციის ამოცანის ამოხსნის საფუძველზე წყდება ოპტიმალური დამოკიდებულებების (5.3) მიღების საკითხი და იმავდროულად ტექნოლოგიური პროცესის მართვის მეთოდის შემუშავების საკითხი, ანუ ავტომატური მართვის სისტემების ამ დამოკიდებულებების რეალიზაციის ალგორითმის საკითხი. იდენტიფიკაციის ახალი მეთოდი ასეთი ზოგადი მიდგომის საფუძველზე

საშუალებას გვაძლევს დავასაბუთოთ უკვე ცნობილი და შეექმნათ ახალი მართვის მეთოდები მამდიდრებელი ფაბრიკების ტექნოლოგიური პროცესებისთვის.

### 5.3. შეზღუდვების მქონე წრფივი მოდელების ანალიზური ოპტიმიზაცია

დაპროგრამების მეთოდით წრფივი მოდელების ოპტიმიზაცია განხილული აქვს ლ. ბარსკის და ვ. კოზინს [16]. მათ შეზღუდვების მქონე წრფივი მოდელების ანალიტიკური ოპტიმიზაცია მოცემული აქვთ შემდეგ მაგალითზე:

ამოცანის დასმა: ვიპოვოთ კონცენტრატის გამოსავლის მაქსიმუმი მისი ხარისხის შეზღუდვის დროს, თუ ცნობილია ცვლადი სიდიდეების ცვლილების დასაშვები დიაპაზონი:

$$\begin{aligned} \gamma &= a_0 + a_1 q_1 + a_2 q_2 + \dots + a_n q_n \rightarrow \max; \\ \beta &= b_0 + b_1 q_1 + b_2 q_2 + \dots + b_n q_n = C; \\ q_{i \min} &\leq q_i \leq q_{i \max}. \end{aligned} \tag{5.8}$$

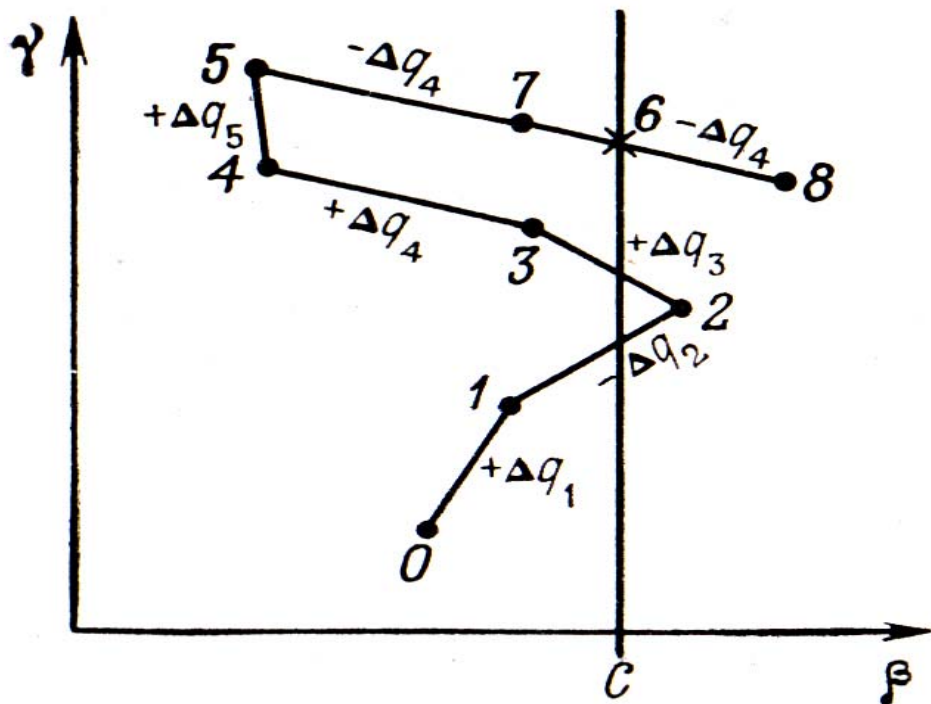
როგორც ვხედავთ, მოდელი წრფივია. ამ ამოცანის მათემატიკური გადაწყვეტის უნივერსალური ხერხია წრფივი დაპროგრამების მეთოდი, რომლის გამოყენებისთვისაც ამოცანას აძლევენ სახეს:

$$\begin{aligned} \max \gamma(q_1 \dots q_n) &= \sum_{i=0}^n a_i q_i; \\ \sum_{i=0}^n b_i q_i &= C; \\ q_i &\leq q_{i \max}; \\ q_i &\geq q_{i \min}. \end{aligned} \tag{5.9}$$

ხელთ წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გამოყენება რთულია. არსებობს წრფივი დაპროგრამების სტანდარტული პროგრამები, თუმცა მხოლოდ ერთი შეზღუდვის პირობებში (5.3) ამოცანა მარტივად შეიძლება გადაწყდეს წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გრაფიკული ხერხით. სწორედ ამ ხერხით არის განხილული გამდიდრების მონომინერალური პროცესის ოპტიმიზაციის ამოცანა [16].

აბსცისათა დერძზე (ნახ. 5.1) გადაზომილია შეზღუდვა  $\beta$ , ორდინატაზე – საოპტიმიზაციო ფუნქცია  $\gamma$ .  $\beta$  დერძზე გადავზომოთ შეზღუდვა  $C$  და გავავლოთ წრფე. სიბრტყეზე ავიღოთ წერტილი  $O$ , რომელიც შეესაბამება ექსპერიმენტის

ცენტრს. შემდეგ ცვლადებს  $Q_i$  თანმიმდევრობით ვაძლევთ ნაზრდებს  $\gamma$ -ს ზრდის მიმართულებით და  $\gamma - \beta$  კოორდინატებში დაგვაქვს სიბრტყეზე  $\gamma$ -ს და  $\beta$ -ს გაზრდილი შედეგები. ტეხილის ბოლო წერტილი მიგვანიშნებს პირველ შედეგზე. ვაგრძელებთ ტეხილის აგებას სხვადასხვა  $Q$ -თვის ისე, რომ არ გამოვდივართ  $Q_i$  ცვლადის დასაშვები დიაპაზონის ზღვრებიდან. ბოლო წერტილია 5, სადაც  $\gamma$  მაქსიმალურია დაბალი  $\beta$ -ს დროს.



ნახ. 5.1. ამოცანის ამოხსნა ექსტრემუმის პირობით მოცემული შეზღუდვების დროს

ნახაზზე ყველაზე დამრეცი მონაკვეთია 3-4, ამიტომ  $\Delta q_4$ -ს მნიშვნელობის შემცირება თავდაპირველად ნულამდე, შემდეგ  $-\Delta q_4$ -მდე მიგვიყვანს შეზღუდვის გარეთ ტეხილის 8 წერტილამდე. ამოხსნა იქნება შეზღუდვის წრფის გადაკვეთა ტეხილთან, წერტილი - 6.

ამოცანის ამოხსნა იქნება:



$$\begin{aligned} \gamma_{\max} &= \gamma_6; \quad q_1 = q_{1\max}; \quad q_2 = q_{2\min}; \\ q_3 &= q_{3\max}; \quad q_4 = q_{40} - k q_4; \quad q_5 = q_{5\max}, \end{aligned} \quad (5.10)$$

სადაც  $k$  განისაზღვრება 6–8 და 8–7 მონაკვეთების ფარდობით.

მიღებული შედეგი გვიჩვენებს  $\beta$  ხაზის გასწვრივ გამოსავლის მკვეთრ ზრდას. როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ეს მეთოდი გამოიყენება წრფივი მოდელირების შემთხვევაში. ჩვენი მოდელი კი არაწრფივია. ამიტომ გავაანალიზოთ  $\gamma$  და  $\beta$  დამოკიდებულებები რეაგენტების  $q_1, q_2, q_3$  ხარჯებისგან.

#### 5.4. ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაცია წრფივი დაპროგრამების მეთოდით

წინა თავში საბოლოოდ დაგადგინეთ ჭიათურის საფლოტაციო ფაბრიკის პირობებში ფლოტაციის პროცესისთვის ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი, რომელიც მოიცავს (4.45), (4.46) და (4.47) გამოსახულებებს.

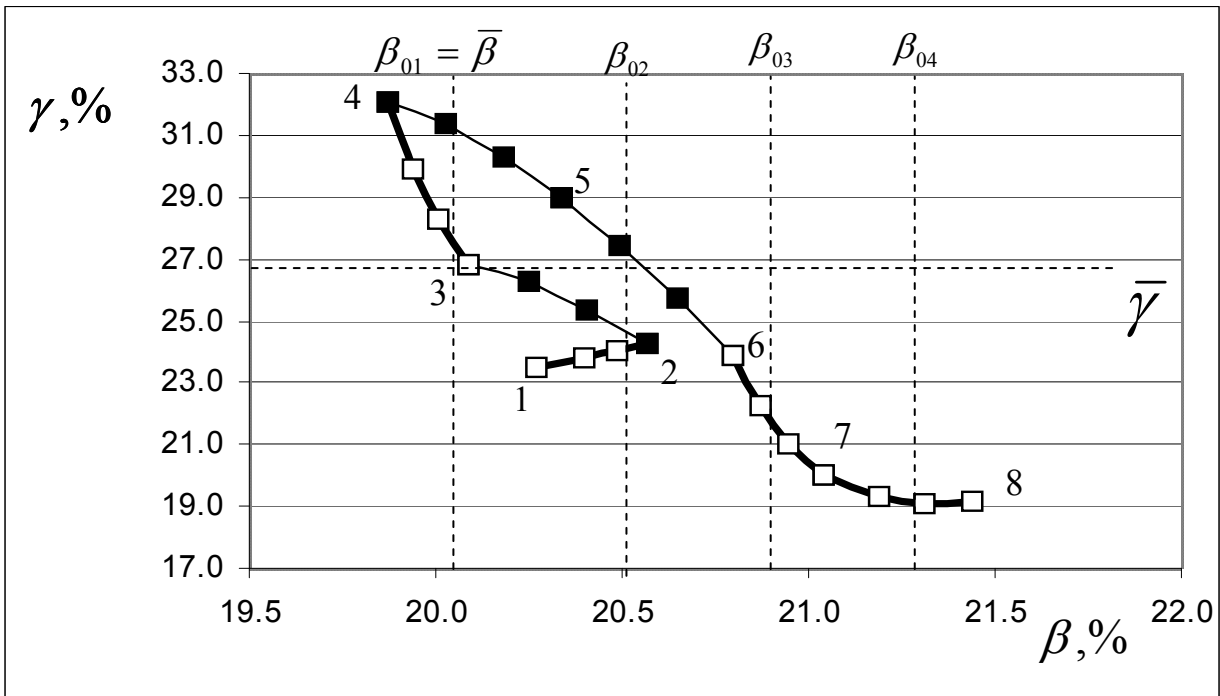
ოპტიმიზაციის ამოცანაა: ვიპოვოთ გასამდიდრებელი მადნის  $\alpha$  ხარისხზე  $q_1, q_2, q_3$  რეაგენტების ხარჯების ოპტიმალური დამოკიდებულება, რომელიც უზრუნველყოფს დავალებული  $\beta_0$  ხარისხის კონცენტრატის მაქსიმალურ  $\gamma$  გამოსავალს (4.45) და (4.46) გამოსახულებების შესაბამისად (4.47) შეზღუდვების პირობებში.

(4.45) გამოსახულების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ  $q_1, q_2, q_3$  რეაგენტების ხარჯების მნიშვნელობები, რომლებიც  $\gamma$  კონცენტრატის გამოსავალს მაქსიმუმს ანიჭებს, გადის მათი შესაძლო ცვალებადობის ზღვრებს გარეთ. აღნიშნულ (4.47) ზღვრებში  $\gamma$ -ს დამოკიდებულება  $q_1$  და  $q_2$ -საგან ატარებს აღმავეალ ხასიათს, ხოლო  $q_3$ -საგან – დაღმავალს. ვისარგებლოთ იმით, რომ ეს დამოკიდებულებები მონოტონური ფუნქციებია და ოპტიმიზაციისთვის გამოვიყენოთ წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გრაფიკული ვარიანტი [16].

გრაფიკი აიგება კოორდინატთა სისტემაში, სადაც აბსცისათა ღერძზე იზომება  $\beta$ , ორდინატთა ღერძზე –  $\gamma$  (ნახ. 5.2). გრაფიკის საწყის წერტილად ვიღებთ წერტილს, რომელიც შეესაბამება მმართველი სიდიდეების ცვალებადობის დასაშვები (4.47) დიაპაზონის ცენტრებს:

$$q_{10} = 6.65; \quad q_{20} = 0.655; \quad q_{30} = 4.7. \quad (5.11)$$

გრაფიკის აგება შეიძლება  $\alpha$ -ს ნებისმიერი მნიშვნელობისთვის. ავირჩიოთ მისი საშუალო მნიშვნელობა. (4.48), (4.49) და (5.11) გამოსახულებების გათვალისწინებით  $\gamma$  და  $\beta$  (4.45) და (4.46) გამოსახულებების შესაბამისად დებულობს მნიშვნელობებს:  $\beta = 20.3\%$ ,  $\gamma = 23.5\%$ , რასაც შეესაბამება ოპტიმიზაციის გრაფიკზე საწყისი წერტილი 1 (ნახ. 5.2).



ნახ. 5.2. ოპტიმიზაციის გრაფიკი

ვცვალოთ მმართველი სიდიდეები ნებისმიერი რიგით საზღვრებამდე იმ მიმართულებით, საითაც იზრდება  $\gamma$  [36, 37]. გრაფიკის უბანი 1–2 შეესაბამება  $q_1$ -ის გაზრდას  $q_{10} = 6.65$ -დან  $q_{1max} = 7$ -მდე. საზღვარზე (წერტილი 2) მიიღწევა:  $\beta = 20.6\%$ ,  $\gamma = 24.3\%$ . უბანი 2–3 შეესაბამება  $q_3$ -ის შემცირებას  $q_{30} = 4.7$ -დან  $q_{3min} = 4.4$ -მდე. საზღვარზე (წერტილი 3) მიიღება:  $\beta = 20.1\%$ ,  $\gamma = 26.8\%$ . უბანი 3–4 შეესაბამება  $q_2$ -ის გაზრდას  $q_{20} = 0.655$ -დან  $q_{2max} = 0.75$ -მდე. საზღვარზე (წერტილი 4) მიიღება:  $\beta = 19.9\%$ ,  $\gamma = 32.1\%$ . როცა  $\alpha = \bar{\alpha}$ , ეს არის  $\gamma$ -ს მაქსიმუმი (4.47) შეზღუდვების პირობებში, სამაგიეროდ მცირეა  $\beta$ . ბუნებრივია, როცა  $\alpha < \bar{\alpha}$ , მაჩვენებლები უარესია, ხოლო,

როცა  $\alpha > \bar{\alpha}$  – უკეთესი. აქვე შევნიშნავთ, რომ ამას გავლენა არა აქვს მართვის ალგორითმზე, რომელიც ქვემოთ იქნება ჩამოყალიბებული.

უბანზე 1–2 ორივე მაჩვენებელი იზრდება. ამიტომ  $q_1$  სტაბილიზდება ზედა საზღვარზე:

$$q_1 = q_{1\max} = 7, \quad (5.12)$$

ხოლო  $\beta$ -ს გასაზრდელად საჭიროა  $q_2$  და  $q_3$  სიდიდეების ცვლა უკუსვლით. დაბრუნებას ვიწყებთ  $q_3$ -ის ცვლით უკუმიმართულებით, რადგან მას გრაფიკის უფრო დამრეცი უბანი შეესაბამება აღმავალ შტოზე (უბანი 2–3). ასეთი სვლა უზრუნველყოფს საოპტიმიზაციო გრაფიკის დაღმავალი შტოს განლაგებას აღმავალი შტოს ზემოდან, რაც, თავის მხრივ,  $\beta$ -ს მოცემული მნიშვნელობების დროს  $\gamma$ -ს უფრო მაღალ მნიშვნელობებს განაპირობებს.

უბანი 4–5–6 შეესაბამება  $q_3$ -ს ზრდას ქვედა საზღვრიდან  $q_{3\min} = 4.4$  ცენტრისკენ  $q_{30} = 4.7$  და შემდეგ ზედა საზღვრისკენ  $q_{3\max} = 5$ . ამ დროს  $q_2$  სტაბილიზდება ზედა საზღვარზე:

$$q_2 = q_{2\max} = 0.75. \quad (5.13)$$

უბანი 6–7–8 შეესაბამება  $q_2$ -ს შემცირებას ზედა საზღვრიდან  $q_{2\max} = 0.75$  ცენტრისაკენ  $q_{20} = 0.655$  და შემდეგ ქვედა საზღვრისკენ  $q_{2\min} = 0.56$ . ამ დროს  $q_3$  სტაბილიზებული უნდა იყოს ზედა საზღვარზე:

$$q_3 = q_{3\max} = 5. \quad (5.14)$$

დავუშვათ, კონცენტრატის ხარისხის დავალებული მნიშვნელობა ექსპერიმენტის დროს მიღებული საშუალო მნიშვნელობის ტოლია, ე.ი.  $\beta_0 = \beta_{01} = \bar{\beta} = 20\%$ , მაშინ ვმუშაობთ შესაბამის წერტილში უბანზე 4-5, სადაც გამოსავლის მნიშვნელობა საგრძნობლად აღემატება მის საშუალო მნიშვნელობას ექსპერიმენტის დროს,  $\gamma(\beta_{01}) > \bar{\gamma} = 26.4\%$ . თუ დავალებას გავზრდით  $\beta_0 = \beta_{02} = 20.5\%$ -მდე, მაშინ შესაბამისად უნდა გაიზარდოს  $q_3$  (უბანი 5-6), მაგრამ აქაც კი  $\gamma(\beta_{02}) > \bar{\gamma} = 26.4\%$ . იმ შემთხვევაში, როცა  $\beta_0 = \beta_{03}$  ან  $\beta_0 = \beta_{04}$ ,  $q_3$

ველარ შეასრულებს დავალებას, იგი ფიქსირდება ზედა საზღვარზე  $q_{3\max} = 5$  და ანალოგიურად მოქმედებაში შედის  $q_2$  სიდიდე.

4–5–6 უბნისთვის, როცა ძალაშია (4.48), (5.12) და (5.13) ტოლობები, (4.46) გამოსახულების შესაბამისად მივიღებთ:

$$q_3 = 0.0235(\beta_0 - \alpha)^{1.15} \alpha^{1.15}. \quad (5.15)$$

6–7–8 უბნისთვის, როცა ძალაშია (4.48), (5.12) და (5.14) ტოლობები, (4.46) გამოსახულების შესაბამისად გვექნება:

$$q_2 = 98 \cdot 10^8 (\beta_0 - \alpha)^{-5} \alpha^{-5}. \quad (5.16)$$

ზემომოყვანილის საფუძველზე პროცესის მართვის ალგორითმი შემდეგნაირად ჩამოყალიბდება:  $q_1$  და  $q_2$  სტაბილიზდება ზედა საზღვრებზე (5.12) და (5.13) ტოლობების შესაბამისად, ხოლო  $q_3$  რეგულირდება (5.15) კანონით მისთვის დასაშვებ საზღვრებში (4.47) შეზღუდვების შესაბამისი გამოსახულებების თანახმად; თუ  $\alpha$ -ს ცვლილება (ან  $\beta_0$ -ის შეცვლა) მოითხოვს  $q_3$ -ს გასვლას ზედა საზღვრის გარეთ, მაშინ  $q_3$  სტაბილიზდება ზედა საზღვარზე და იწყება  $q_2$ -ის რეგულირება (5.16) კანონით მისთვის დასაშვებ საზღვრებში (4.47) შეზღუდვების შესაბამისი გამოსახულებების თანახმად [36, 37].

ახლა ავაგოთ ოპტიმიზაციის გრაფიკი ისე, რომ 4 წერტილიდან, რომელსაც შეესაბამება რეაგენტების შემდეგი ხარჯები:  $q_1 = q_{1\max} = 7$ ,  $q_2 = q_{2\max} = 0.75$ ,  $q_3 = q_{3\min} = 4.4$ , უკუსვლით ვცვალოთ თავდაპირველად  $q_2$ , ხოლო შემდეგ –  $q_3$  რეაგენტი (ნახ. 5.3). ამჯერად ზემოდან პირველი უბანი შეესაბამება  $q_2$ -ის ცვალებადობას  $0.75 \geq q_2 \geq 0.56$  დიაპაზონში, ანუ  $q_2$ -ს შემცირებას ზედა საზღვრიდან  $q_{2\max} = 0.75$  ცენტრისკენ  $q_{20} = 0.655$  და შემდეგ ქვედა საზღვრისკენ  $q_{2\min} = 0.56$ . ამ დროს  $q_3$  სტაბილიზდება ქვედა საზღვარზე:

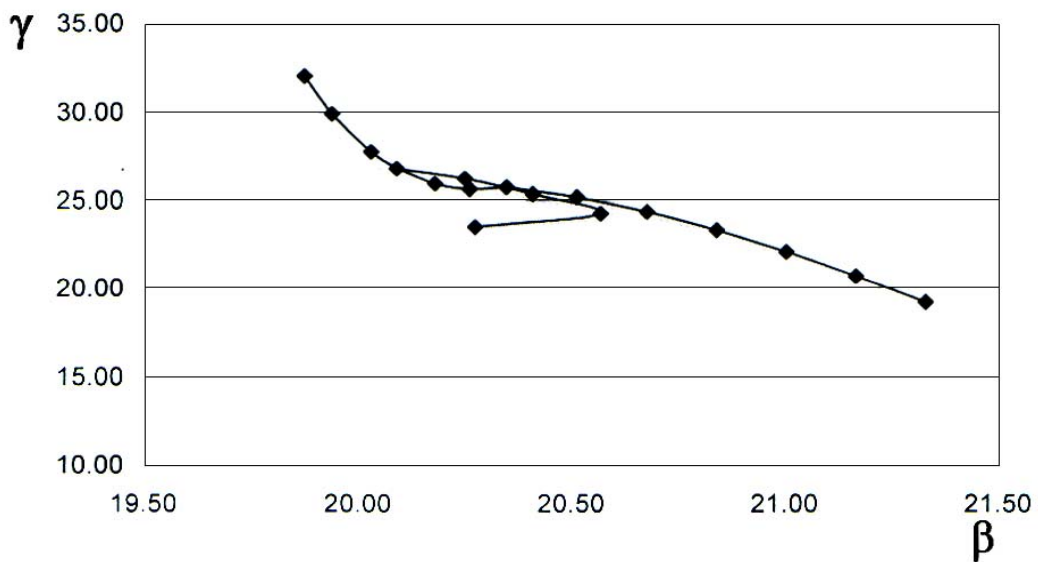
$$q_3 = q_{3\min} = 4.4. \quad (5.17)$$

მეორე (შემდეგი) უბანი შეესაბამება  $q_3$ -ს ცვალებადობას  $4.4 \leq q_3 \leq 5$  ფარგლებში, ანუ ზრდას ქვედა საზღვრიდან  $q_{3\min} = 4.4$  ცენტრისკენ  $q_{30} = 4.7$  და

შემდეგ ზედა საზღვრისკენ  $q_{3max} = 5$ . ამ დროს  $q_2$  სტაბილიზდება ქვედა საზღვარზე:

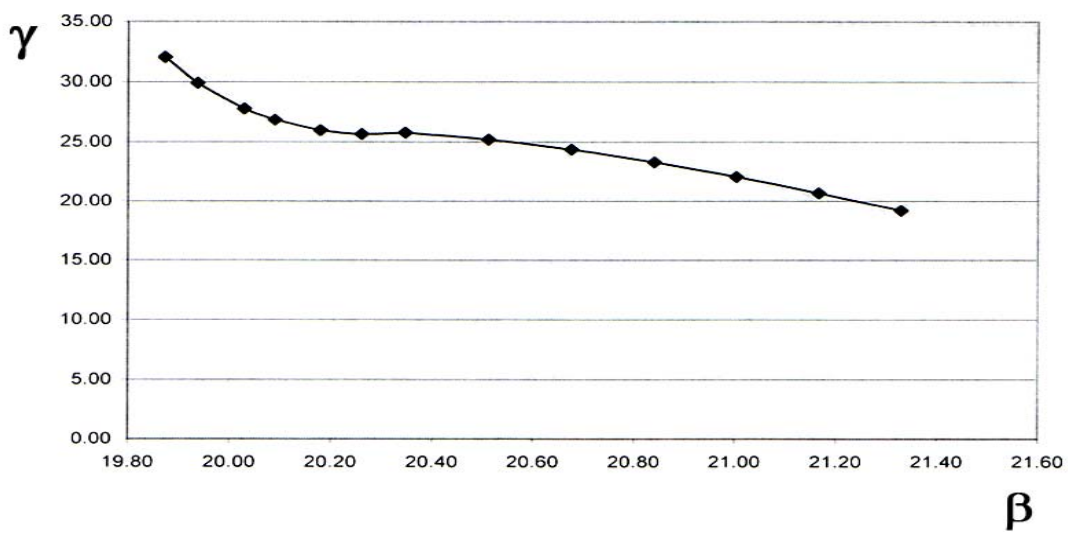
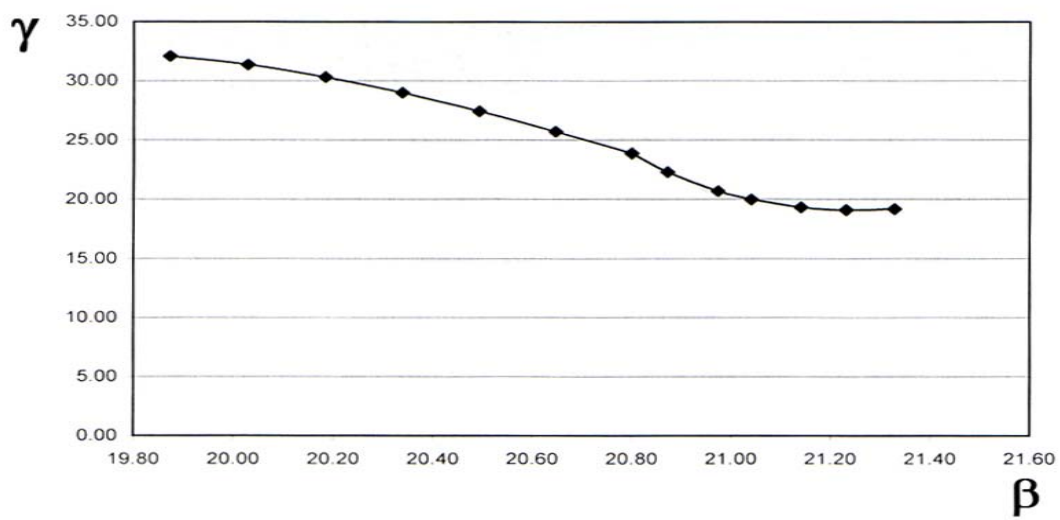
$$q_2 = q_{2min} = 0.56. \quad (5.18)$$

გრაფიკს ექნება ნახ. 5.3-ზე ნაჩვენები სახე. ამ ორი ვარიანტის (ნახ. 5.2 და ნახ. 5.3) უკეთ შედარების მიზნით, სასურველია გრაფიკებს მოვაცილოთ 1–2–3–4 უბნები და განვიხილოთ მხოლოდ 4–5–6–7–8 უბნები. მივიღებთ 5.4 და 5.5 ნახაზებს. მიღებული ორი გრაფიკი გავეართიანოთ ერთ ნახაზად (ნახ. 5.6). ამ ნახაზიდან ნათლად ჩანს, რომ ოპტიმიზაციის შედეგი აშკარად უკეთესია იმ შემთხვევაში, როდესაც უკუსვლას ვიწყებთ  $q_3$  რეაგენტის ხარჯის ზრდით.

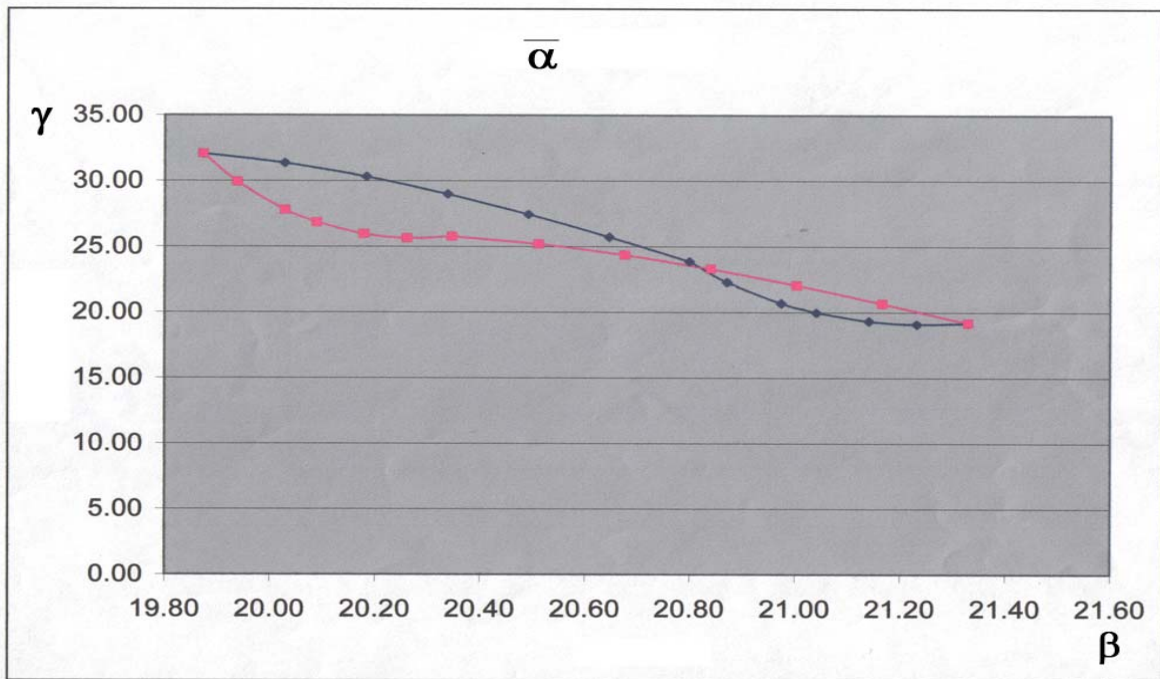


ნახ. 5.3. ოპტიმიზაციის გრაფიკი (უკუსვლა  $q_2$ -ით)

ზემომოყვანილი მსჯელობისას არ იყო გათვალისწინებული, რომ გასამდიდრებელი მადნის ხარისხი  $\alpha$  ცვალებადია და გავლენას ახდენს გამდიდრების პროცესის მაჩვენებლებზე. მაგალითად, ერთი და იმავე  $\beta_0$ -ის დროს  $\alpha$ -ს შემცირება იწვევს  $\gamma$ -ს შემცირებას და პირიქით. თუ ავაგებთ ოპტიმიზაციის გრაფიკებს  $\alpha$ -ს სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს, დავრწმუნდებით, რომ ზემომოყვანილი დასკვნა მმართველი სიდიდეების საზღვრებზე ფიქსირებისა და საზღვრებს შორის რეგულირების შესახებ სამართლიანია ყველა შემთხვევაში.

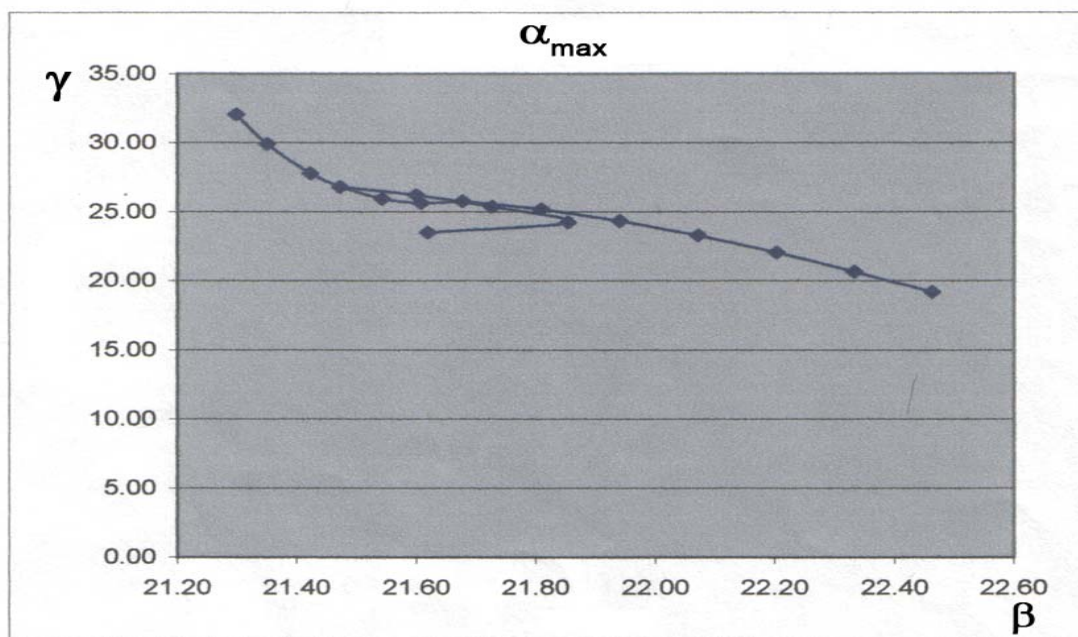
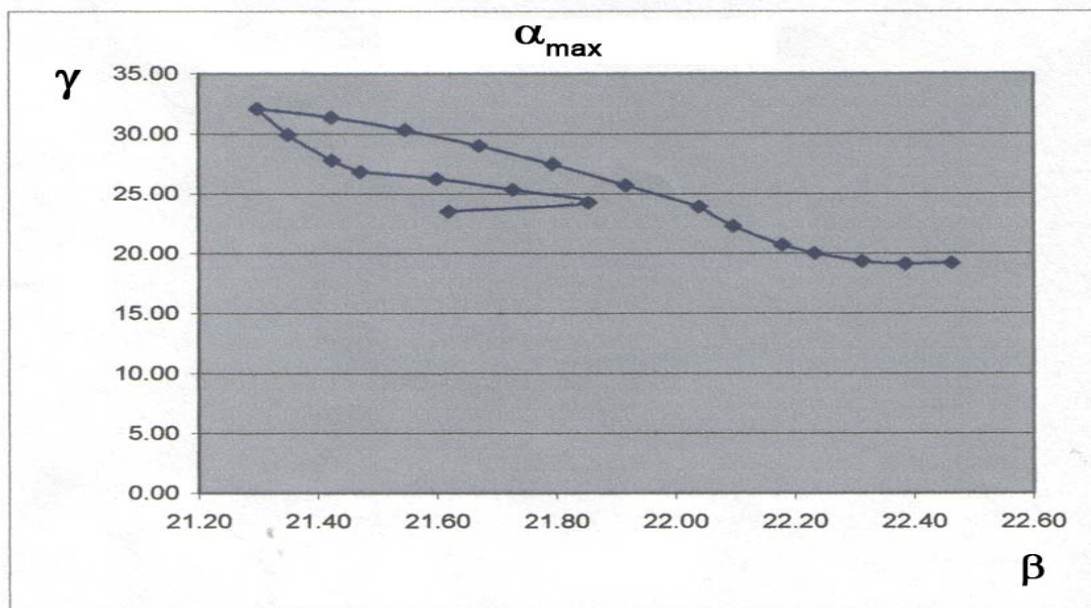


ნახ. 5.4 და 5.5. ოპტიმიზაციის გრაფიკების ზედა შტო



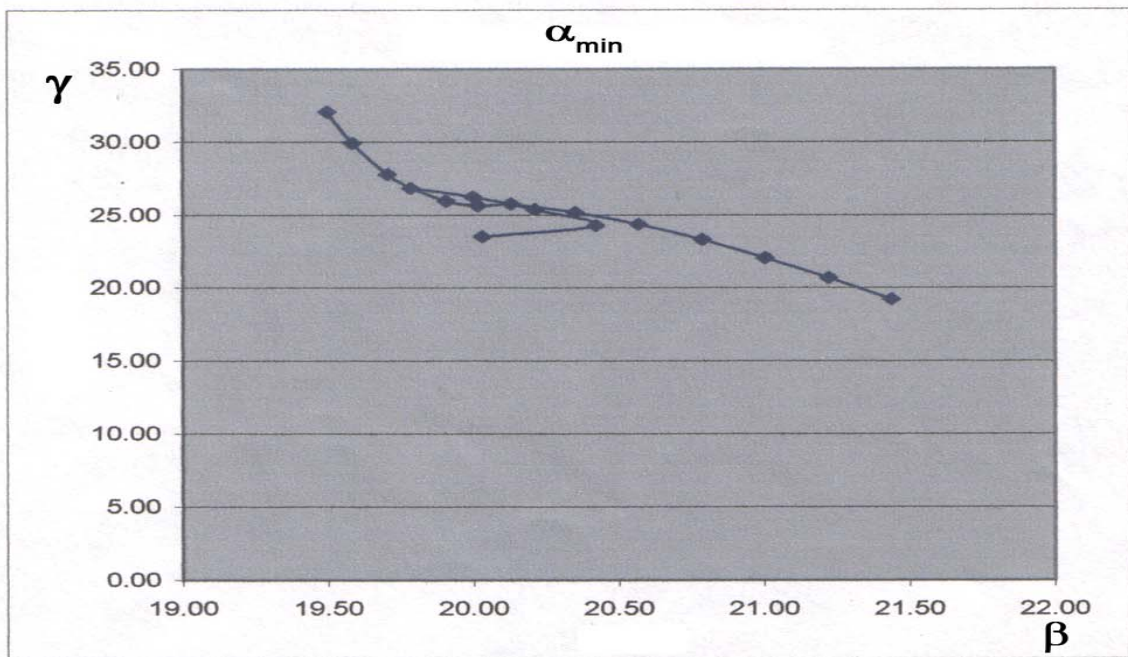
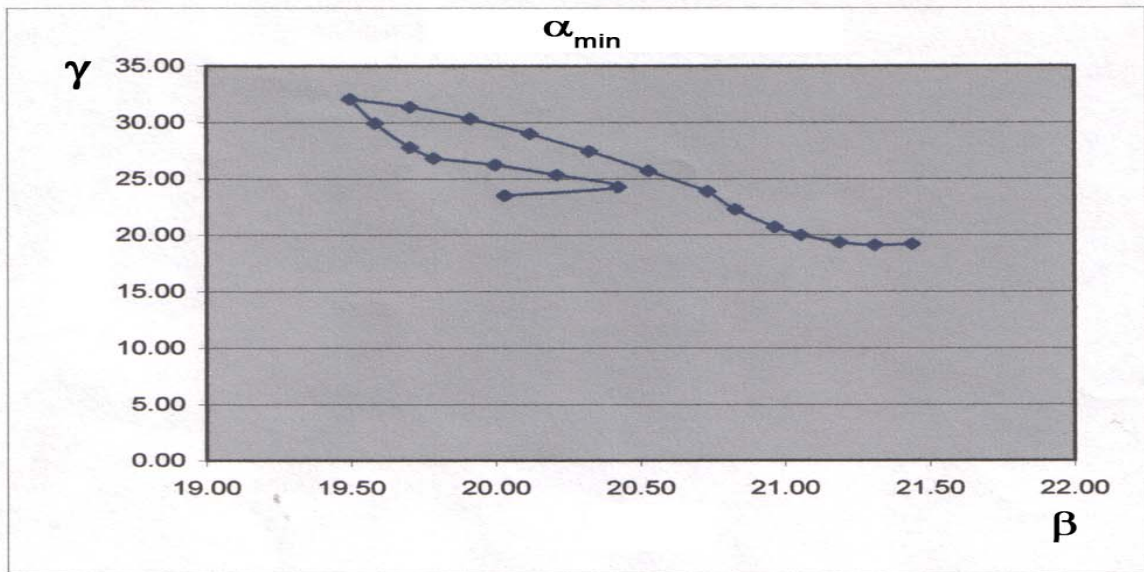
ნახ. 5.6. ოპტიმიზაციის გრაფიკების გაერთიანების შედეგი  $\alpha$ -ს საშუალო მნიშვნელობისათვის

5.7 და 5.8 ნახაზებზე მოცემულია ოპტიმიზაციის გრაფიკები  $\alpha$ -ს მაქსიმალური მნიშვნელობისთვის ( $\alpha = 14$ ), ხოლო 5.9 და 5.10 ნახაზებზე მოცემულია ოპტიმიზაციის გრაფიკები  $\alpha$ -ს მინიმალური მნიშვნელობისთვის ( $\alpha = 10$ ). ამ გრაფიკების გაერთიანების შედეგი  $\alpha$ -ს მაქსიმალური მნიშვნელობისთვის მოცემულია 5.11 ნახაზზე, ხოლო  $\alpha$ -ს მინიმალური მნიშვნელობისთვის – 5.12 ნახაზზე. მიღებული შედეგების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ  $\alpha$ -ს სხვადასხვა მნიშვნელობის დროს ზემომოყვანილი დასკვნა მმართველი სიდიდეების საზღვრებზე ფიქსირებისა და საზღვრებს შორის რეგულირების შესახებ სამართლიანია ყველა შემთხვევაში. მართვის ალგორითმი იგივე რჩება. ოპტიმიზაციის შედეგი აქაც აშკარად უკეთესია იმ შემთხვევაში, როდესაც უკუსვლას ვიწყებთ  $Q_3$  რეაგენტის ხარჯის ზრდით.

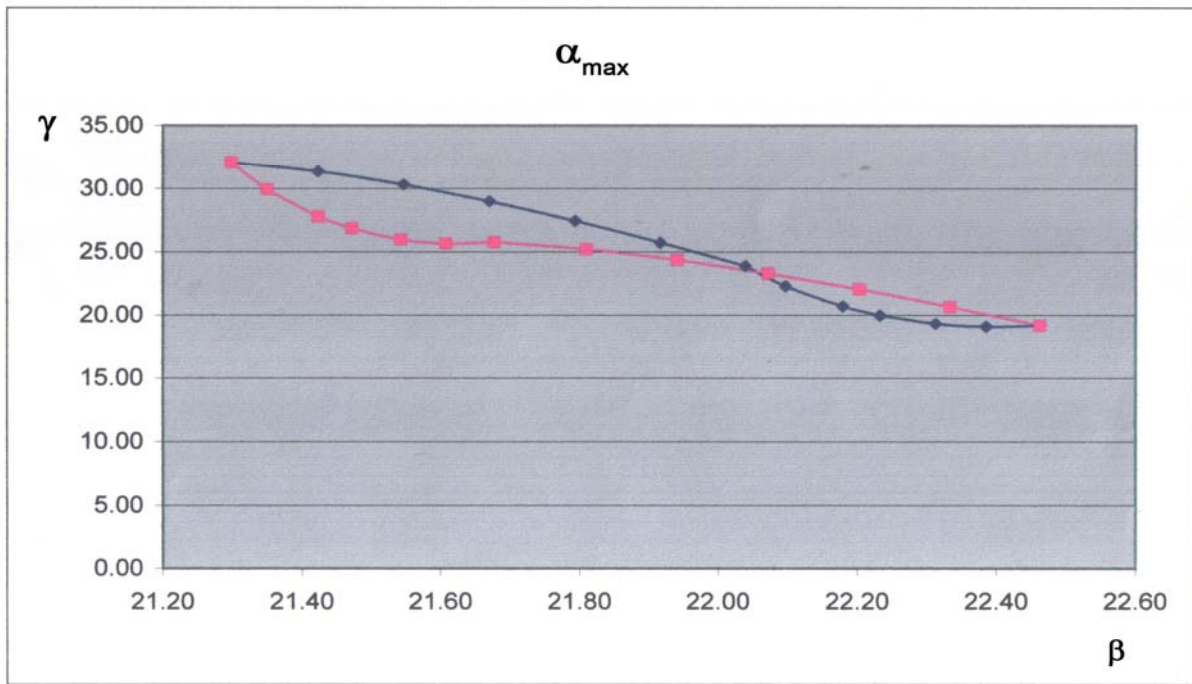


ნახ. 5.7 და 5.8. ოპტიმიზაციის გრაფიკები  $\alpha$ -ს მაქსიმალური მნიშვნელობისათვის

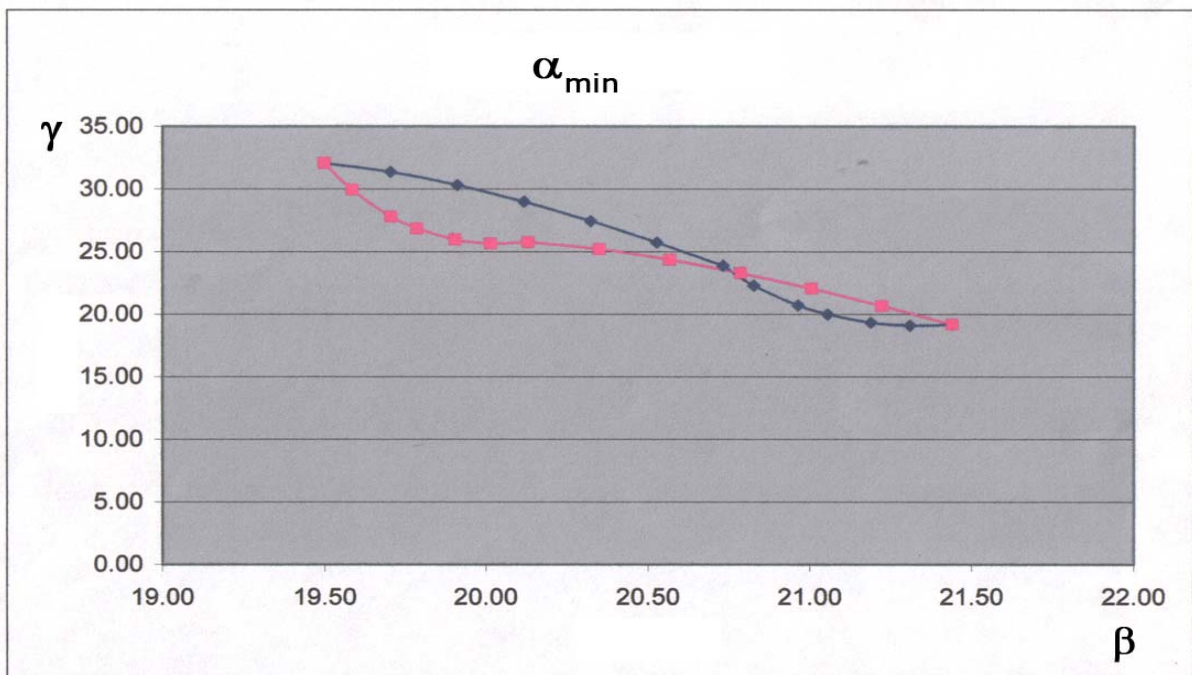




ნახ. 5.9 და 5.10. ოპტიმიზაციის გრაფიკები  $\alpha$ -ს მინიმალური მნიშვნელობისათვის



ნახ. 5.11. ოპტიმიზაციის გრაფიკების გაერთიანების შედეგი  $\alpha$ -ს მაქსიმალური მნიშვნელობისათვის



ნახ. 5.12. ოპტიმიზაციის გრაფიკების გაერთიანების შედეგი  $\alpha$ -ს მინიმალური მნიშვნელობისათვის

უნდა შევნიშნოთ, რომ ოპტიმიზაციის შემდეგ, ისევე როგორც ოპტიმიზაციამდე,  $\alpha$ -ს ცვალებადობა გავლენას ახდენს გამდიდრების პროცესის მაჩვენებლებზე. ერთი და იმავე  $\beta_0$ -ის დროს  $\alpha$ -ს შემცირება იწვევს გამოსავლის შემცირებას და პირიქით,  $\alpha$ -ს გაზრდა იწვევს გამოსავლის გაზრდას.

როგორც დავრწმუნდით, წრფივი დაპროგრამების მეთოდი ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტის საუკეთესო საშუალებაა. კონცენტრატის ხარისხის გასაზრდელად მმართველი სიდიდეების (რეაგენტების ხარჯების) მორიგეობითმა ცვლამ უკუსვლის მიმართულებით განაპირობა საოპტიმიზაციო გრაფიკის დაღმავალი შტოს განლაგება აღმავალი შტოს ზემოდან, რამაც, თავის მხრივ,  $\beta$ -ს მოცემული მნიშვნელობების დროს  $\gamma$ -ს უფრო მაღალი მნიშვნელობები განაპირობა, რაშიც მდგომარეობს ამ მეთოდის არსი (იხ. ნახ. 5.2).

### 5.5. ოპტიმიზაციის შედეგების პროგნოზირება

თუ გავაანალიზებთ ექსპერიმენტით მიღებულ შედეგებს, შევნიშნავთ, რომ შემოსულ გასამდიდრებელ მასალაში მანგანუმის შემცველობა უმთავრესად მერყეობს 10–14 % -ის ფარგლებში. ჩატარებული 98 ცდიდან ამ შუალედზე მოდის 85 ცდის შედეგი. მოვიქცეთ შემდეგნაირად. დავყოთ  $\alpha$ -ს მნიშვნელობები  $\Delta\alpha=0.5$  ბიჯით. თითოეულ შუალედს შევუსაბამოთ ექსპერიმენტის დროს ჩატარებული გაზომვების რაოდენობა ამ შუალედში (f). ეს საშუალებას მოგვცემს მოგვიანებით ვიპოვოთ პროცესის მაჩვენებლები მათი ხვედრითი წილის გათვალისწინებით. საწყის წერტილად ავიღოთ ისევე მე-4 წერტილი. ამ წერტილში რეაგენტების ხარჯის მნიშვნელობებია:

$$\begin{aligned} q_1 &= q_{1\max} = 7; \\ q_2 &= q_{2\max} = 0.75; \\ q_3 &= q_{30} = 4.4. \end{aligned} \tag{5.19}$$

ოპტიმიზაცია განვახორციელოთ ზემომოყვანილი მართვის ალგორითმით, რაც ნიშნავს, რომ  $\alpha$ -ს მნიშვნელობების ცვლილებისას 10-დან 14%-მდე  $q_3$  მიიღებს შესაბამის ცვლად მნიშვნელობებს. ამ დროს  $q_1, q_2$  ფიქსირებულია. რეაგენტების  $q_1, q_2, q_3$  ხარჯების მნიშვნელობების ჩასმით (4.43) და (4.44) გამოსახულებებში მივიღებთ ყოველი  $\alpha$ -ს შესაბამის  $\beta$ -ს და  $\gamma$ -ს მნიშვნელობებს.

საშუალო  $\gamma$  გამოსავლის ანგარიშის დროს გავითვალისწინოთ  $\alpha$ -ს თითოეულ შუალედში მისი მნიშვნელობების სიხშირე.

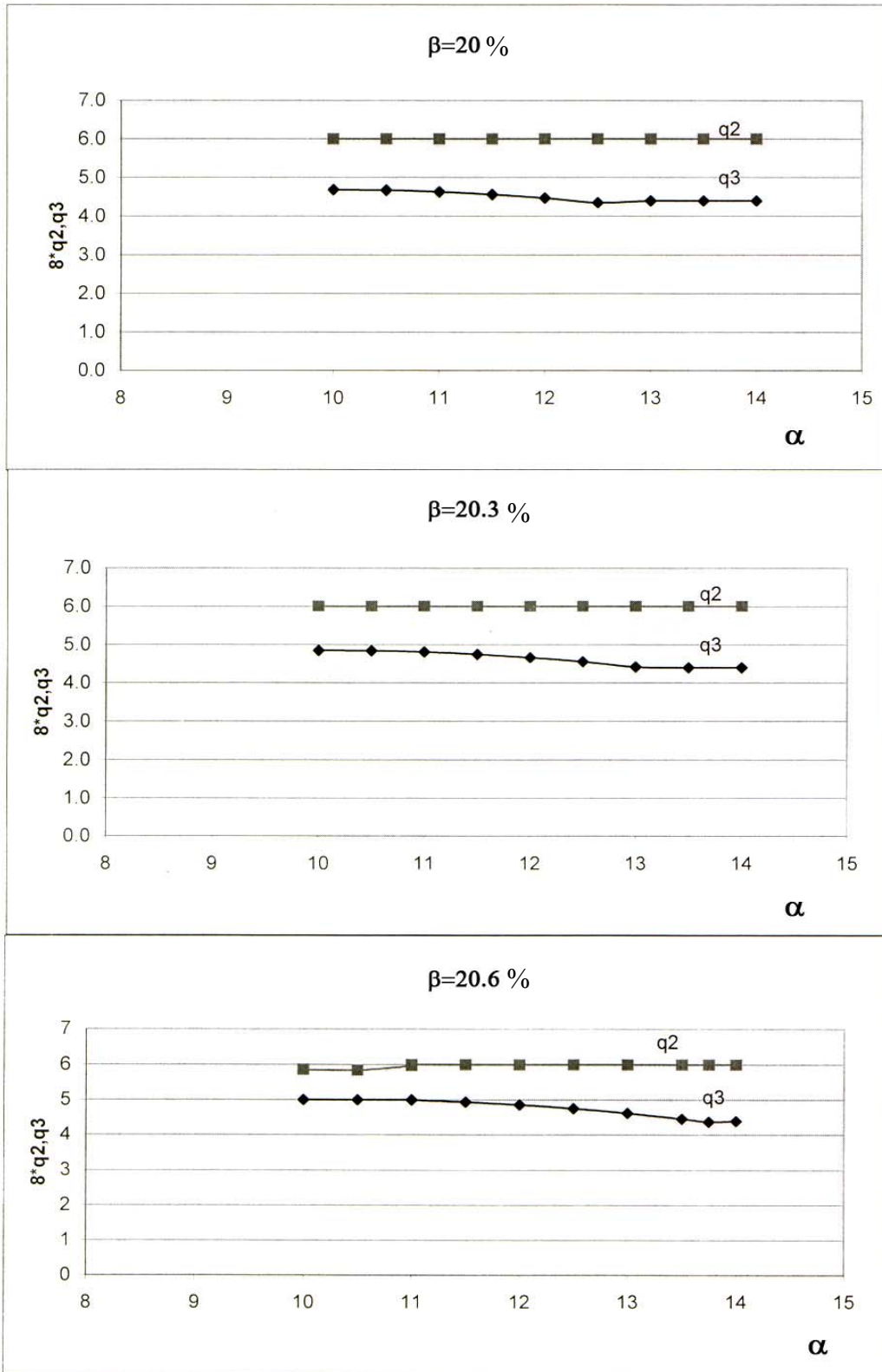
ასეთი ანგარიში ჩავატაროთ კონცენტრატის ხარისხის სამი სხვადასხვა დავალებული მნიშვნელობისთვის: 20, 20.3 და 20.6 მნიშვნელობებისთვის. ანგარიშის შედეგები მოცემულია ცხრილში 5.1.

როგორც ცხრილიდან ჩანს, პროცესის ოპტიმიზაციის შედეგად  $\beta_0=20\%$ -ის შემთხვევაში კონცენტრატის საშუალო გამოსავალი გახდა 30.2%,  $\beta_0=20.3\%$ -ის შემთხვევაში – 29.6%, ხოლო  $\beta_0=20.6\%$ -ის შემთხვევაში – 28.2%, რაც ყველა შემთხვევაში გაცილებით მაღალია ოპტიმიზაციამდე გამოსავლის საშუალო მნიშვნელობაზე ( $\bar{\gamma} = 26.4\%$ );

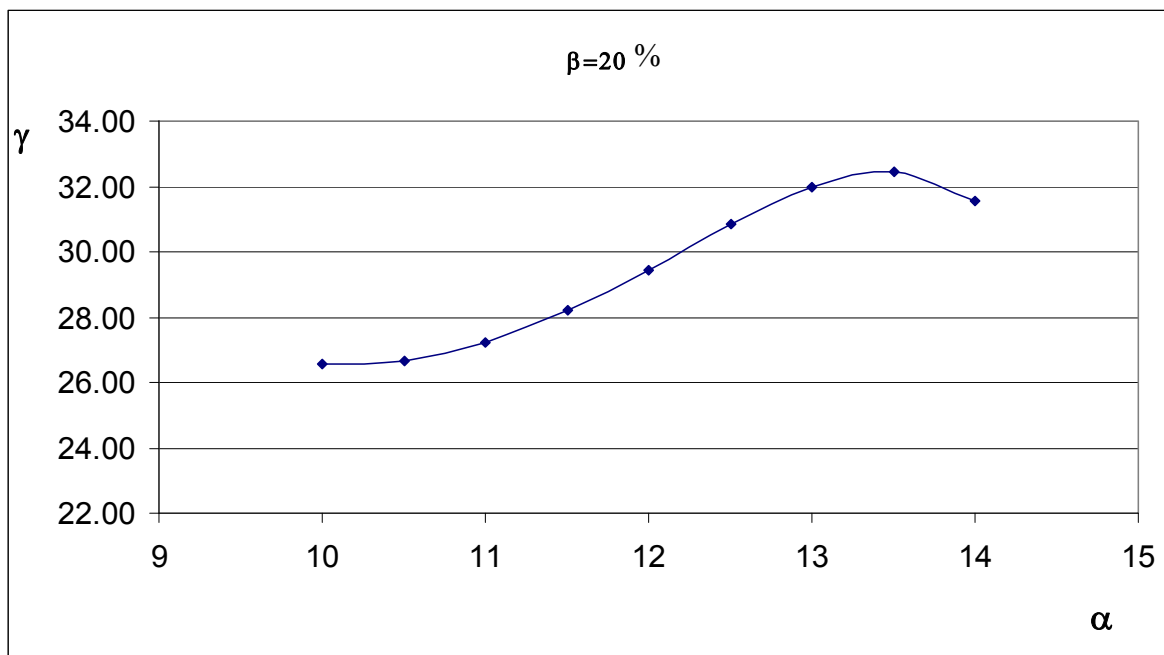
შემოსული მასალის ხარისხზე ( $\alpha$ ) რეაგენტების ხარჯებისა და გამოსავლის დამოკიდებულებების გრაფიკები სხვადასხვა  $\beta_0$ -ის შემთხვევაში მოცემულია 5.13, 5.14, 5.15 და 5.16 ნახაზებზე.

ცხრილი 5.1.

№	$\alpha$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$\beta$	$\gamma$	$\beta_0$	$\Delta\alpha$	f	$\Sigma\gamma_n$
1	10	7	0.75	4.85	19.99	26.58	20.00			
2	10.5	7	0.75	4.85	19.99	26.68	20.00	10-10.5	5	133.4
3	11	7	0.75	4.81	19.99	27.23	20.00	10.5-11	10	272.3
4	11.5	7	0.75	4.75	19.99	28.19	20.00	11-11.5	8	225.52
5	12	7	0.75	4.67	19.99	29.46	20.00	11.5-12	16	471.36
6	12.5	7	0.75	4.55	19.99	30.83	20.00	12-12.5	9	277.47
7	13	7	0.75	4.41	19.99	31.98	20.00	12.5-13	12	383.76
8	13.5	7	0.75	4.25	19.99	32.42	20.00	13-13.5	15	486.3
9	14	7	0.75	4.06	19.99	31.55	20.00	13.5-14	10	315.5
									85	2565.61
									$\gamma_{\text{ბოჭ}}$	30.1836
№	$\alpha$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$\beta$	$\gamma$	$\beta_0$	$\Delta\alpha$	f	$\Sigma\gamma_n$
1	10	7	0.75	4.91	20.28	25.63	20.30			
2	10.5	7	0.75	4.9	20.29	25.68	20.30	10-10.5	5	128.4
3	11	7	0.75	4.87	20.29	26.21	20.30	10.5-11	10	262.1
4	11.5	7	0.75	4.82	20.29	27.19	20.30	11-11.5	8	217.52
5	12	7	0.75	4.73	20.29	28.52	20.30	11.5-12	16	456.32
6	12.5	7	0.75	4.62	20.29	30.05	20.30	12-12.5	9	270.45
7	13	7	0.75	4.48	20.29	31.49	20.30	12.5-13	12	377.88
8	13.5	7	0.75	4.32	20.29	32.36	20.30	13-13.5	15	485.4
9	14	7	0.75	4.13	20.29	32.07	20.30	13.5-14	10	320.7
									85	2518.77
									$\gamma_{\text{ბოჭ}}$	29.6326
№	$\alpha$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$\beta$	$\gamma$	$\beta_0$	$\Delta\alpha$	f	$\Sigma\gamma_n$
1	10	7	0.75	5.01	20.58	23.62	20.60			
2	10.5	7	0.75	5.02	20.59	23.57	20.60	10-10.5	5	117.842
3	11	7	0.75	4.99	20.59	24.03	20.60	10.5-11	10	240.307
4	11.5	7	0.75	4.94	20.59	24.99	20.60	11-11.5	8	199.925
5	12	7	0.75	4.86	20.59	26.40	20.60	11.5-12	16	422.395
6	12.5	7	0.75	4.76	20.59	28.15	20.60	12-12.5	9	253.336
7	13	7	0.75	4.62	20.59	30.02	20.60	12.5-13	12	360.239
8	13.5	7	0.75	4.47	20.59	31.64	20.60	13-13.5	15	474.542
9	14	7	0.75	4.28	20.59	32.42	20.60	13.5-14	10	324.231
									85	2392.82
									$\gamma_{\text{ბოჭ}}$	28.1508

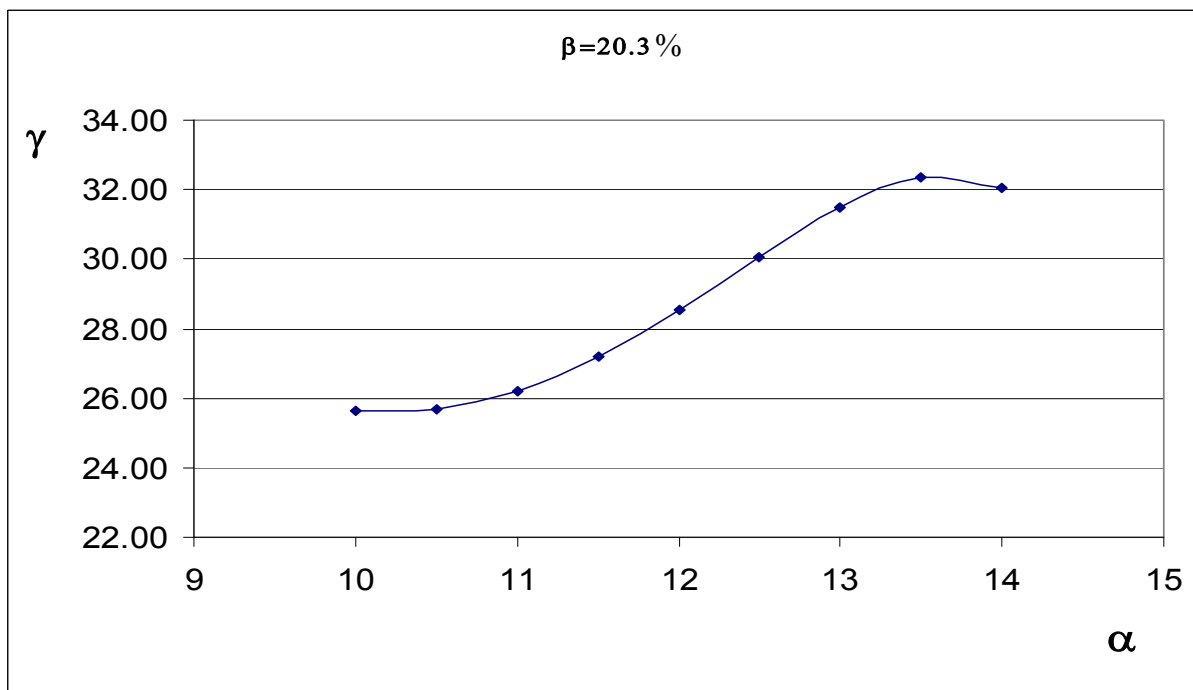


ნახ. 5.13. შემოსული მასალის ხარისხზე რეაგენტების ხარჯის დამოკიდებულებების გრაფიკები სხვადასხვა  $\beta_0$ -ის შემთხვევაში



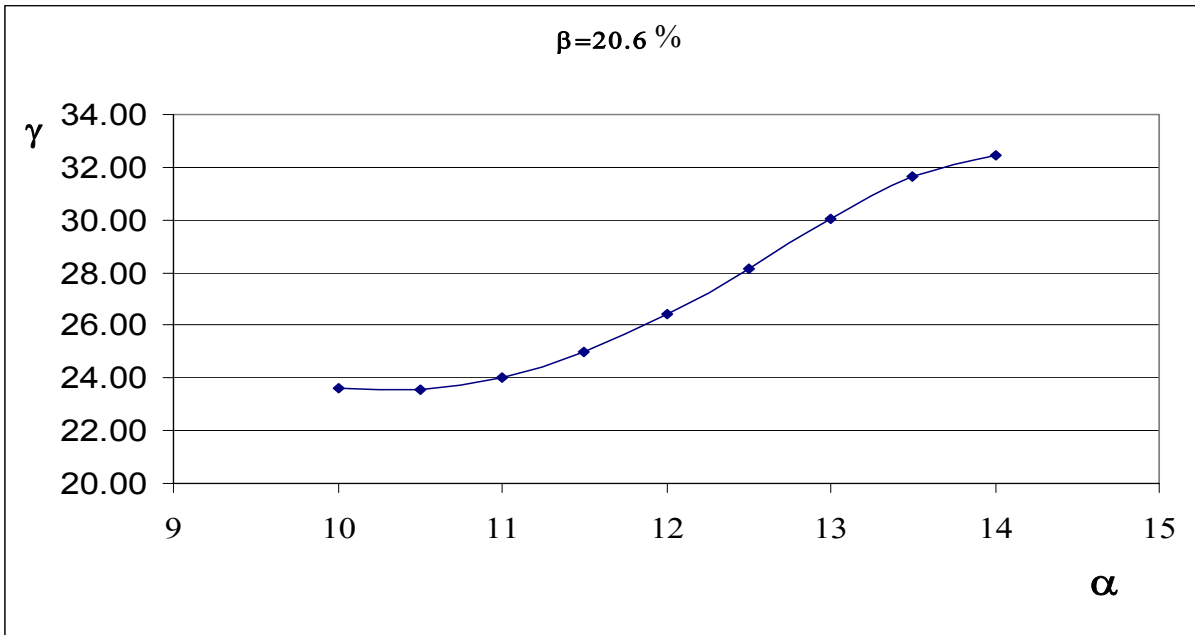
ნახ. 5.14. შემოსული მასალის ხარისხზე გამოსავლის დამოკიდებულების გრაფიკი

$\beta_0 = 20\%$ -ის შემთხვევაში



ნახ. 5.15. შემოსული მასალის ხარისხზე გამოსავლის დამოკიდებულების გრაფიკი

$\beta_0 = 20.3\%$ -ის შემთხვევაში



ნახ. 5.16. შემოსული მასალის ხარისხზე გამოსავლის დამოკიდებულების გრაფიკი  $\beta_0 = 20.6\%$ -ის შემთხვევაში

### 5.6. ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სქემა

წინა პარაგრაფებში აღწერილია ჩვენ მიერ განხილული ფლოტაციის პროცესის მათემატიკური მოდელი. მიღებულია მმართველი სიდიდეების ოპტიმალური დამოკიდებულებები და იმავდროულად შერჩეულია ტექნოლოგიური პროცესის მართვის ხერხი, დამუშავებულია ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციონირების ალგორითმი.

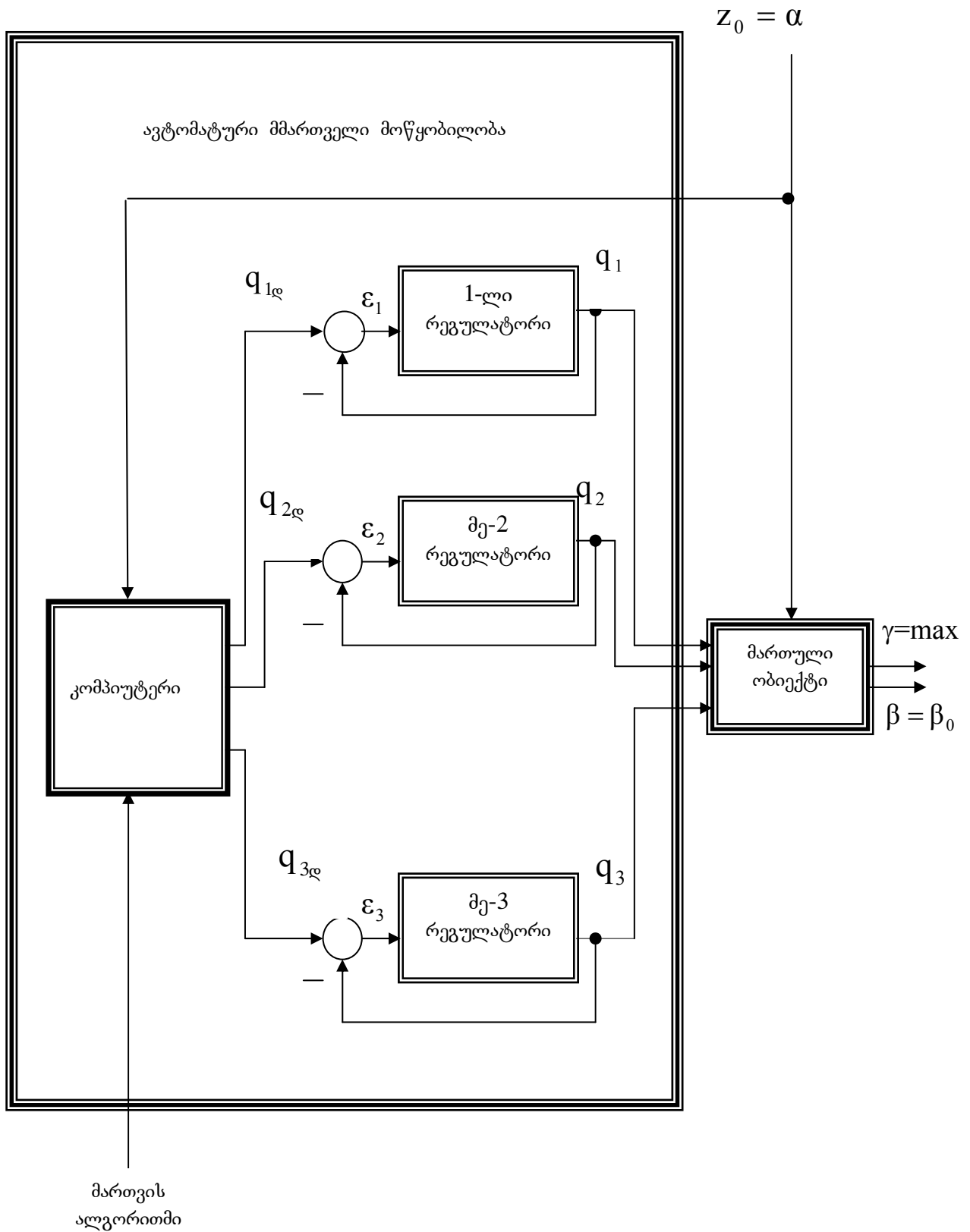
ამის შემდეგ ჩვენი ამოცანაა შევქმნათ ისეთი ავტომატური მართვის სისტემა, რომელიც შეძლებს ზემოთ აღნიშნული მართვის კანონების რეალიზაციას. როგორც ვიცით, ავტომატური მართვის სისტემა არის მართული ობიექტისა და ავტომატური მმართველი მოწყობილობების ერთიანობა. მართული ობიექტი ჩვენს შემთხვევაში არის საფლოტაციო მანქანაში მიმდინარე ფლოტაციის პროცესი. ის მოწყობილობები, რომელიც ახორციელებს ზემოქმედებას მართულ ობიექტზე დასახული მიზნის მისაღწევად, არის ავტომატური მმართველი მოწყობილობა. ავტომატური მართვის სისტემის შესაქმნელად აუცილებელია შევარჩიოთ მმართველი მოწყობილობის ელემენტები. ასეთებია: გადამწოდები, მავალელები, რეგულატორები, შემსრულებელი მექანიზმები და სხვ. ყოველივე ამის შემდეგ



ავტომატური მართვის სისტემა მზად იქნება კონსტრუქციული მონტაჟისა და გამართვითი სამუშაოებისთვის.

ჩვენ ავტომატური მართვის სისტემის ელემენტების კონსტრუქციული შესრულების აღწერისგან თავს შევიკავებთ და შემოვიფარგლებით სისტემის ფუნქციური სქემის შედგენით და მისი აღწერით.

იზომება შემფოთება (ნახ. 5.17) – შემოსულ მასალაში მანგანუმის შემცველობა ( $\alpha$ ). ეს ინფორმაცია მიეწოდება კომპიუტერს, რომელშიც უკვე ჩადებულია მართვის ალგორითმი. ფლოტაციის პროცესში გამოყენებულია სამი რეაგენტი, ამიტომ ჩვენს შემთხვევაში მმართველი სიდიდეც არის სამი და, ამდენად, გვესაჭიროება სამი რეგულატორი. მართვის ალგორითმის შესაბამისად კომპიუტერიდან დავალება მიეწოდება თითოეულ რეგულატორს. რეგულატორში შედის ინფორმაცია მმართველი სიდიდის როგორც რეალური, ასევე დავალებული მნიშვნელობის შესახებ. ამ ორი სიდიდის ალგებრული ჯამის საფუძველზე რეგულატორი მიაწვდის უკვე შედარებულ სიგნალს შემსრულებელ მექანიზმს, რომელიც უზრუნველყოფს რეაგენტების საჭირო რაოდენობით დოზირებას და მიწოდებას სააგიტაციო კასრში.



ნახ. 5.17. ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სქემა

თავი 6. პროცესის მართვა რეჟიმული  
სიდიდის მიხედვით

გარკვეულ შემთხვევებში ზოგიერთი შემაშფოთებელი სიდიდის გაზომვა ტექნოლოგიური პროცესის მიმდინარეობისას არ ხერხდება. მაშინ იგი შეიძლება შევცვალოთ რომელიმე რეჟიმული სიდიდით. რეჟიმული სიდიდე გამოსავალი სიდიდეა. ამ სიდიდეთა ჯგუფს განეკუთვნება სიდიდეები, რომლებიც დამოკიდებულია შესავალ სიდიდეებზე, არ წარმოადგენს ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლებს, მაგრამ ახასიათებს პროცესის მიმდინარეობას, აფასებს მოსალოდნელ შედეგებს და შეიძლება გამოყენებულ იქნას პროცესის მართვისას; მაგალითად, საგების რხევის ამპლიტუდა (დაღეჭვის პროცესისთვის), წისქვილის ხმაური, ცირკულაციური დატვირთვა (დაწვრილმანების პროცესისთვის), ქაფის სიმაღლე (ფლოტაციის პროცესისთვის) და სხვ. ჩვენს შემთხვევაში რეჟიმულ სიდიდედ ვიღებთ ქაფის სიმაღლეს.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, გამდიდრების ტექნოლოგიური ამოცანა ზოგადად შემაშფოთებელი სიდიდეების მიხედვით მმართველი სიდიდეების რეგულირებაზე დაიყვანება. კონცენტრატის ხარისხის ალბათური მოდელებისა და წყვილი დამოკიდებულების ანალიზის საფუძველზე კონცენტრატის ხარისხის მრავლობით დამოკიდებულებას მმართველ და შემაშფოთებელ სიდიდეებზე, ანუ შეზღუდვის ფუნქციას აქვს შემდეგი სახე:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) - \alpha = b q_1^{\psi_1} q_2^{\psi_2} q_3^{\psi_3} \alpha^\theta Q^{\theta_0}, \quad (6.1)$$

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) - \alpha = 6.68 q_1^{0.6785} q_2^{-0.1985} q_3^{0.8734} \alpha^{-1} Q^{-0.0084}. \quad (6.2)$$

მოცემულ შემთხვევაში შემაშფოთებელ სიდიდეს –  $\alpha$  გასამდიდრებელი მადნის ხარისხს – ვანაცვლებთ რეჟიმული სიდიდით –  $h$  ქაფის სიმაღლით [15]. ამ დროს საჭირო ხდება (6.1) გამოსახულებასთან ერთად მეორე გამოსახულების მიღება, რომლის სახეც ასეთია:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, h, Q) - \alpha = a_{01} q_1^{s_1} q_2^{s_2} q_3^{s_3} h^{s_0} Q^{s_{01}}. \quad (6.3)$$

$a_{01}, s_1, s_2, s_3, s_0, s_{01}$  კოეფიციენტების საპოვნელად გამოვიყენოთ უმცირეს კვადრატთა მეთოდი (6.3) გამოსახულების ლოგარითმის მიმართ:

$$\begin{aligned} \ln[\beta(q_1, q_2, q_3, h, Q) - \alpha] = \\ = \ln a_{01} + s_1 \ln q_1 + s_2 \ln q_2 + s_3 \ln q_3 + s_0 \ln h + s_{01} \ln Q. \end{aligned} \quad (6.4)$$

ამ დროს უმცირეს კვადრატთა პირობა (4.11) და (4.12) გამოსახულებების ანალოგიურად იღებს სახეს:

$$f = \sum_{i=1}^n \{ \ln(\beta_i - \alpha_i) - \ln[\beta(q_{1i}, q_{2i}, q_{3i}, h_i, Q_i) - \alpha_i] \}^2 = \min, \quad (6.5)$$

ანუ

$$f = \sum_{i=1}^n [ \ln(\beta_i - \alpha_i) - \ln a_{01} - s_1 \ln q_{1i} - s_2 \ln q_{2i} - s_3 \ln q_{3i} - s_0 \ln h_i - s_{01} \ln Q_i ]^2 = \min \quad (6.6)$$

(6.6) გამოსახულების მიხედვით  $a_{01}, s_1, s_2, s_3, s_0, s_{01}$  კოეფიციენტების მნიშვნელობების საპონენელად შესაბამისი კერძო წარმოებულები უნდა გავუტოლოთ ნულს:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \ln a_{01}} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial s_1} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial s_2} = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial s_3} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial s_0} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial s_{01}} = 0, \end{aligned} \quad (6.7)$$

რის შედეგადაც ვღებულობთ ექვსუცნობიან განტოლებათა სისტემას:

$$\left\{ \begin{aligned}
& n \cdot \ln a_{01} + s_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} + s_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} + s_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} + s_0 \sum_{i=1}^n \ln h_i + \\
& + s_{01} \sum_{i=1}^n \ln Q_i = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i); \\
& \ln a_{01} \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} + s_1 \sum_{i=1}^n (\ln q_{1i})^2 + s_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln q_{1i} + s_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln q_{1i} + s_0 \sum_{i=1}^n \ln h_i \ln q_{1i} + \\
& + s_{01} \sum_{i=1}^n \ln Q_i \ln q_{1i} = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln q_{1i}; \\
& \ln a_{01} \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} + s_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln q_{2i} + s_2 \sum_{i=1}^n (\ln q_{2i})^2 + s_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln q_{2i} + s_0 \sum_{i=1}^n \ln h_i \ln q_{2i} + \\
& + s_{01} \sum_{i=1}^n \ln Q_i \ln q_{2i} = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln q_{2i}; \\
& \ln a_{01} \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} + s_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln q_{3i} + s_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln q_{3i} + s_3 \sum_{i=1}^n (\ln q_{3i})^2 + s_0 \sum_{i=1}^n \ln h_i \ln q_{3i} + \\
& + s_{01} \sum_{i=1}^n \ln Q_i \ln q_{3i} = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln q_{3i}; \\
& \ln a_{01} \sum_{i=1}^n \ln h_i + s_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln h_i + s_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln h_i + s_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln h_i + s_0 \sum_{i=1}^n (\ln h_i)^2 + \\
& + s_{01} \sum_{i=1}^n \ln Q_i \ln h_i = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln h_i; \\
& \ln a_{01} \sum_{i=1}^n \ln Q_i + s_1 \sum_{i=1}^n \ln q_{1i} \ln Q_i + s_2 \sum_{i=1}^n \ln q_{2i} \ln Q_i + s_3 \sum_{i=1}^n \ln q_{3i} \ln Q_i + \\
& + s_0 \sum_{i=1}^n \ln h_i \ln Q_i + s_{01} \sum_{i=1}^n (\ln Q_i)^2 = \sum_{i=1}^n \ln(\beta_i - \alpha_i) \ln Q_i;
\end{aligned} \right. \quad (6.8)$$

ჯამების მნიშვნელობების გათვალისწინებით (6.8) განტოლებათა სისტემა იღებს სახეს:

$$\left\{ \begin{array}{l}
98 \ln a_{01} + s_1 198.6744 - s_2 69.1163 + s_3 158.1396 + \\
\quad + s_0 210.6943 + s_{01} 265.1984 = 221.5475 \\
\ln a_{01} 198.67 + s_1 362.7526 - s_2 124.9679 + s_3 288.6652 + \\
\quad + s_0 384.4201 + s_{01} 483.5710 = 404.1396 \\
\ln a_{01} 69.12 + s_1 124.9679 - s_2 48.7611 + s_3 98.3062 + \\
\quad + s_0 135.1267 + s_{01} 167.4364 = 139.1662 \\
\ln a_{01} 158.14 + s_1 288.6652 - s_2 98.3062 + s_3 231.9339 + \\
\quad + s_0 305.6362 + s_{01} 384.8102 = 323.3256 \\
\ln a_{01} 210.69 + s_1 384.4201 - s_2 135.1267 + s_3 305.6362 + \\
\quad + s_0 426.3528 + s_{01} 514.9697 = 429.3887 \\
\ln a_{01} 265.2 + s_1 483.571 - s_2 167.4364 + s_3 384.8102 + \\
\quad + s_0 514.9697 + s_{01} 649.5052 = 537.5973
\end{array} \right. \quad (6.9)$$

სისტემა ამოხსნილია გაუსის მეთოდით პროგრამა Excel-ში. ვღებულობთ:

$$s_1 = -0.0618; \quad s_2 = 0.0992; \quad s_3 = 0.7032;$$

$$s_0 = 0.123; \quad s_{01} = -0.4252; \quad \ln a_{01} = 1.9848; \quad a_{01} = 7.2774.$$

(6.3) დამოკიდებულება კი იღებს სახეს:

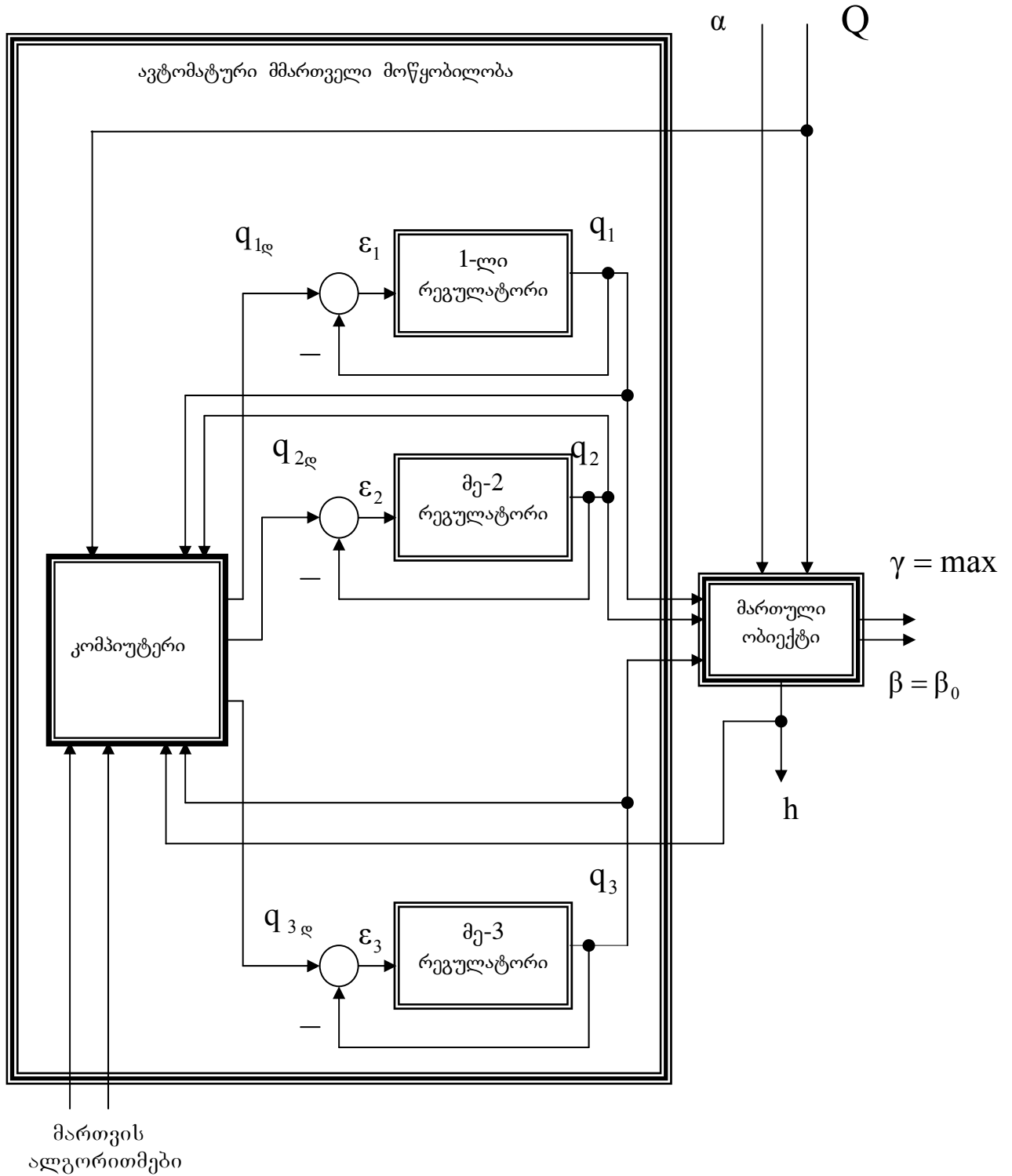
$$\beta(q_1, q_2, q_3, h, Q) - \alpha = 7.2774 q_1^{-0.0618} q_2^{0.0992} q_3^{0.7032} h^{0.123} Q^{-0.4252} \quad (6.10)$$

როგორც ვხედავთ, (6.1) და (6.10) გამოსახულებების მარცხენა მხარეები იდენტურია, რის გამოც შეგვიძლია მათი მარჯვენა მხარეების გატოლება:

$$\begin{aligned}
& 6.68 q_1^{0.6785} q_2^{-0.1985} q_3^{0.8734} \alpha^{-1} Q^{-0.008379} = \\
& = 7.2774 q_1^{-0.0618} q_2^{0.0992} q_3^{0.7032} h^{0.123} Q^{-0.4252} \\
& \alpha = 0.9179 q_1^{0.7403} q_2^{-0.2977} q_3^{0.1702} h^{-0.123} Q^{0.4168} \quad (6.11)
\end{aligned}$$

(5.15) და (5.16) მართვის ალგორითმში  $\alpha$ -ს მიღებული გამოსახულების გათვალისწინებით გადავიანგარიშებთ მმართველი სიდიდეების მნიშვნელობებს.

წინა პარაგრაფში აღწერილი იყო ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სქემა (ნახ. 5.17). კომპიუტერს მიეწოდებოდა ინფორმაცია  $\alpha$ -ს მნიშვნელობის შესახებ. ამჯერად იზომება რეჟიმული სიდიდე  $h$ , ამიტომ მართვის ალგორითმში  $\alpha$  უნდა შეიცვალოს (6.11) გამოსახულებით.



ნახ. 6.1. ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სქემა რეჟიმული სიდიდის გათვალისწინებით

## დასკვნა

ნაშრომში დამუშავებულია გამდიდრების ერთ-ერთი ძირითადი ტექნოლოგიური პროცესის, ფლოტაციის ოპტიმიზაციის ხერხი და აგებულია შესაბამისი ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა. ამ მიზნით ჩატარებულია შემდეგი ექსპერიმენტული და კვლევითი სახის სამუშაოები:

1. ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციისთვის ექსპერიმენტული მონაცემების მისაღებად შემუშავებულია პასიური ექსპერიმენტის დაგეგმვის მეთოდიკა. ფლოტაციის პროცესის მათემატიკური აღწერისთვის დაგეგმილია პასიური ექსპერიმენტი. წინასწარი ექსპერიმენტის საფუძველზე გაანგარიშებულია ავტოკორელაციური და ურთიერთკორელაციური ფუნქციები. დადგენილია ძირითადი ექსპერიმენტისთვის საჭირო პარამეტრები – გაზომვებს შორის დროის ბიჯი და გასაზომ სიდიდეებს შორის დაგვიანების დრო;

2. განხილულია ფლოტაციის პროცესი, როგორც ავტომატური მართვის ობიექტი. შერჩეულია ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი. მიზნის ფუნქციაში შემავალი კოეფიციენტები განსაზღვრულია უმცირეს კვადრატთა მეთოდით. მონაცემები აღებულია ჭიათურის საფლოტაციო ფაბრიკაზე ჩატარებული ექსპერიმენტის შედეგად. ანალოგიურად არის დადგენილი კონცენტრატის ხარისხის განტოლებაში (შეზღუდვის ფუნქციაში) შემავალი კოეფიციენტების რიცხვითი მნიშვნელობებიც;

3. გაანალიზებულია ექსპერიმენტით მიღებული დამოკიდებულებები რეაგენტების ხარჯებსა და გამდიდრების მაჩვენებლებს შორის; შემუშავებულია ფლოტაციის ტექნოლოგიური პროცესის მათემატიკური მოდელი (მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციების მოდულები), რომელიც ერთმანეთთან აკავშირებს, ერთი მხრივ, გამდიდრების მაჩვენებლებს და, მეორე მხრივ, მმართველ და შემაშფოთებელ სიდიდეებს, ითვალისწინებს რა ამ პროცესების კანონზომიერებებს;

4. დასმულია ოპტიმიზაციის ამოცანა. მის გადასაჭრელად გამოყენებულია წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გრაფიკული ვარიანტი იმის გათვალისწინებით, რომ მმართველ სიდიდეებზე გამდიდრების მაჩვენებლების დამოკიდებულება (მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციები) სიდიდეების პრაქტიკული ცვალებადობის ზღვრებში არაწრფივი მონოტონური ფუნქციებია;

5. ჩამოყალიბებულია პროცესის მართვის ალგორითმი, რაც მდგომარეობს გასამდიდრებელი მადნის  $\alpha$  ხარისხზე მმართველი სიდიდეების ( $q_1, q_2, q_3$  რეაგენტების ხარჯების) ოპტიმალური დამოკიდებულებების პოვნაში, რომელიც



უზრუნველყოფს დავალებული  $\beta_0$  ხარისხის კონცენტრატის მაქსიმალურ გამოსავალს;

6. ნაჩვენებია ფლოტაციის პროცესის მართვაში რეჟიმული სიდიდით შემაწვოთებელი სიდიდის შეცვლის შესაძლებლობა;

7. მოცემულია ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა, რომელიც უზრუნველყოფს მიღებული ოპტიმალური დამოკიდებულებების რეალიზაციას;

8. მანგანუმის შლამების ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციის შემოთავაზებული მეთოდი საშუალებას იძლევა მივიღოთ მოცემული ხარისხის კონცენტრატის მაქსიმალური გამოსავალი. ეს მეთოდი შესაძლებელია გამოვიყენოთ სხვა მადნების ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციისთვის.

## ლიტერატურა

1. ი. ბარათაშვილი, ს. მაზმიშვილი, გ. ნაკაიძე, ე. მატარაძე. საზღვარგარეთის მანგანუმის მრეწველობის განვითარების თანამედროვე ტენდენციები და ჭიათურა–ზესტაფონის სამთომეტალურგიული კომპლექსის რეაბილიტაციის გზები. სამთო ჟურნალი. № 2(9), თბილისი, 2002 წ., გვ. 87-90.
2. გ. ლობჯანიძე. საქართველოს სამთო მრეწველობის ეკონომიკური განვითარების ძირითადი ეტაპები. სამთო ჟურნალი. № 1(14), თბილისი, 2005 წ., გვ. 82-88.
3. Авалиани М. Г. Пероксидные марганцевые руды Чиатурского месторождения. Тбилиси, изд. Тбилисского университета, 1987. 113 с.
4. Гавашели А. Б. Марганцевые руды Чиатурско–Сачхерского бассейна. изд. «Сабчота Сакарთველო», Тбилиси, 1989. 141 с.
5. რ. სტურუა. ფლოტაცია. თბილისი. გამომცემლობა “ტექნიკური უნივერსიტეტი”, 2000 წ. 175 გვ.
6. Бедрань Н. Г. , Скоробогатова Л. Н. Переработка и качество полезных ископаемых. М., «Недра», 1986. 266 с.
7. Абрамов А. А. Флотационное обогащение. М., «Недра», 1984.
8. Фишман М. А. Основы обогащения полезных ископаемых. М., Гос. научно-техн. Изд. 1966. 279 с.
9. Справочник по обогащению руд. в 3-х т. Гл. ред. О. С. Богданов. Т. 2. «Основные и вспомогательные процессы», ч. 1. «Основные процессы». М., «Недра», 1974. 448 с.
10. Матвеевко Н. В. Пенная сепарация полезных ископаемых. М., «Недра», 1976. 87 с.
11. მ. ონიანი, გ. ბუცხრიკიძე. ექსპერიმენტის დაგეგმვა ფლოტაციის პროცესის მათემატიკური აღწერისათვის. “სამთო ჟურნალი”, №2(15), 2005 წ., გვ. 82–83.
12. Вентцель. Теория вероятностей. М., Наука, 1969. 576 с.
13. Буцхрикидзе Г. Д. Вопросы формулировки и реализации оптимальных условий обогащения руд. Грузинский технический университет, Тбилиси, 1994. 32 с.
14. მ. ონიანი. ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციის საკითხისათვის. “სამთო ჟურნალი”, №1(3), 1999 წ., გვ. 41-42.

15. გ. ბუცხრიკიძე, მ. ონიანი. ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი და ამოცანები წიაღისეულის გამდიდრების პროცესებისათვის. “სამთო ჟურნალი”, №2(15), 2005 წ., გვ. 79–81.
16. Барский Л. А., Козин В. З. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. Москва, «Недра», 1978. 486 с.
17. Барский Л. А., Плаксин И. Н. Критерий оптимизации разделительных процессов. Москва, «Недра», 1978. 118 с .
18. Барский Л. А., Рубинштейн Ю. Б. Кибернетические методы в обогащении полезных ископаемых. Москва, «Недра», 1970. 312 с.
19. Буцхрикидзе Г. Д. Модель влияния управляющей величины на показатели технологического процесса обогащения. Труды Грузинского политехнического института. Горная электромеханика и автоматика. № 9 (230), Тбилиси, 1980. с. 5-10.
20. Буцхрикидзе Г. Д. Вывод формулы кондиционного продукта. Труды Грузинского политехнического института. Горное дело. №9 (191), Тбилиси, 1976. с. 110-113.
21. Буцхрикидзе Г. Д. Метод оптимизационной идентификации технологических процессов обогащения при многих управляющих параметрах. Известия ВУЗ-ов. Горный журнал. №11, 1980. с. 82-86.
22. მ. ონიანი, გ. ბუცხრიკიძე. ფლოტაციის პროცესის მახასიათებლები. “სამთო ჟურნალი”, №2(5), 2000 წ., გვ. 50-51.
23. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М., изд. «Наука». 1968.
24. Заиденберг И. Ш., Алабян И. М., Смирнов В. В. технологические измерения, моделирование и управление в обогащении полезных ископаемых: Обогащение полезных ископаемых (Итоги науки и техники). М., 1975. Т.9. 155 с.
25. Ветрова Е. Ф. Поиск оптимального режима обратной флотации окисленных кварцитов ЮГОК // Математические методы и ЭВМ в обогащении: Сборник научных трудов НИПИ Механообрчермет. М., Недра, 1971. Выпуск XII. с. 281-283.
26. Козин В. З. Общий метод решения задач оптимизации процессов обогащения при наличии одного ограничения на выходные показатели. Известия вузов. Горный журнал. 1978. №10. с. 149-154.

27. Троп А.Е., Козин В. З., Прокофьев Е.В. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик. Учебник для вузов. 2-е изд., М., Недра, 1986. 303 с.
28. Кочура Е. В., Марюта А. Н., Голод В. С. Моделирование и оптимизация управления качеством железорудного концентрата. Известия вузов. Горный журнал, 1981, №11, с. 127-131.
29. Мелькумов Л. Г. Особенности управления углеобогатительными фабриками и процессами обогащения. Совершенствование организации и управления угольной промышленностью. М., 1984. с. 17-29.
30. Рейзлин А. С. Определение оптимальных реагентных режимов промышленной флотации методами планирования экстремальных экспериментов. Известия вузов. Горный журнал, 1976, №11 с. 167-170.
31. Исследование системы автоматической оптимизации процесса угольной флотации. К. П. Власов, В. И. Калмыков, Ю. С. Прямо и др. Известия вузов. Горный журнал, 1980, №8, с. 110-115.
32. Шупов Л. П. Кибернетика и основные направления исследования в области обогащения железных и марганцевых руд. М., Metallurgia, 1971. с. 10-25.
33. Шупов Л. П. Ройзен В. Г. Математическое описание многопараметрических процессов. Обогащение ред., №2, 1985. с. 42-44.
34. Барский Л. А., Рейзлин А. С. Статистический анализ исходных предпосилок планирования экстремальных экспериментов в условиях промышленной флотации. Известия вузов. Цветная металлургия, 1973, №6. с. 3-6.
35. Пример исследования условий оптимизации процесса обогащения в тяжелой суспензии в конусном сепараторе как квазидетерминированного объекта. В. И. Вертегов, В.А. Кваша, В. М. Аршинский, А. Е. Троп. Труды Свердловского горного института. 1974. в. 114. с. 94-102.
36. მ. ონიანი. ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციის საკითხები. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის 80 წლისთავისადმი მიძღვნილი პროფესორ-მასწავლებელთა ღია საიუბილეო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენციის მოხსენებათა თეზისები. თბილისი, 2002 წ., გვ. 65-66.
37. გ. ბუცხრიკიძე და მ. ონიანი. ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაცია წრფივი დაპროგრამების მეთოდით. "სამთო ჟურნალი", №1(8), 2002 წ., გვ. 48-49.

38. Фихтенгольц Г. П. Основы математического анализа. Том 2. «Наука», Москва, 1968.
39. Лукомский Я. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. М., Госстадиздат, 1961. 375с.
40. გუგუშვილი ა. შ., სალუქვაძე მ. ე., ჭიჭინაძე ბ. კ. ოპტიმალური და ადაპტური სისტემები, სტუ, 1997 წ., 290 გვ.
41. Буцхрикидзе Г. Д. К вопросу построения математической модели процессов обогащения. Тезисы докладов XX Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ГПИ и работников производства. Тбилиси, 1976. II ч. с. 62-63.
42. Буцхрикидзе Г. Д. Об измерении теоретической тесноты связи при статистических зависимостях. Известия вузов. Горный журнал, 1976, №4. с. 125-128.
43. Буцхрикидзе Г. Д. О принципах оптимального управления процессами обогащения при максимизации выхода кондиционного продукта. Горная электромеханика и автоматика: Известия вузов. Горный журнал, 1984. №6. с. 105-107.
44. Буцхрикидзе Г. Д. Прогнозирование эффективности при управлении процессом обогащения по принципу стабилизации управляющего параметра. Горная электромеханика: Труды ГПИ. Тбилиси, 1979. №7(217). с. 21-25.
45. Буцхрикидзе Г. Д. Оптимизация технологических процессов обогатительных фабрик по производительности. Известия вузов. Горный журнал, 1984. №7. с. 106-108.
46. Буцхрикидзе Г. Д. Прогнозирование эффективности оптимального управления технологическими процессами обогащения при максимизации производительности. Горная электромеханика и автоматика: Научные труды ГПИ им. В. И. Ленина. Тбилиси, 1985. №5 (287). с. 5-14.
47. Белокрылецкий В. И. Об эффективности процессов обогащения. Известия вузов. Горный журнал, 1982, №5, с. 110-117.
48. Тюренок Н. Г. Об оценке эффективности обогатительных процессов. Известия вузов. Горный журнал. 1997, №7, с. 172-176.
49. Тихонов О. Н. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках. Учебник для вузов. М., «Недра», 1985, 272с.

50. Тихонов О. Н. Переход от экономического к технологическому критерию оптимальности обогащения минерального сырья. Известия вузов. Горный журнал, 1977, №7, с. 168-171.
51. Завражина Т. Г. Определение типовой логической структуры алгоритма управления процессом флотации. Известия вузов. Горный журнал, 1982, №10, с. 112-117.
52. Завражина Т. Г. Оперативное управление процессом флотации по данным гранулометрического и фазового анализов исходной руды. Известия вузов. Горный журнал, 1979, №9, с. 113-118.
53. Давленов С. Х., Омаров М. Т. Алгоритм определения оптимальных качественно-количественных показателей концентрата и промпродукта. Известия вузов. Горный журнал, 1977, №3, с. 127-131.
54. Вин-Нгок-Данг, Иванов В. А., Абрамов А. А. О вероятностной концепции процесса флотации. Известия вузов. Горный журнал, 1979, №3 с. 154-158.
55. Бунько В.А., Анисимов Н. Т. Управление процессом флотации. Обогащение полезных ископаемых. Киев, №33, 1983. с. 40-43.
56. Венецкий И. Г., Кильдышев Г. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М., Статистика, 1975. 264 с.
57. Буцхрикидзе Г. Д. К теории экстремальных зависимостей процессов обогащения с точки зрения управления. Сборник докладов международной конференции по горной автоматике УСАМС. Острава, ЧССР, 1977. с. 88-96.
58. Буцхрикидзе Г. Д. К вопросу использования показателей тесноты связи для проверки адекватности множественных статистических зависимостей технологических процессов. Сборник докладов международной конференции по горной автоматике УСАМС. Острава, ЧССР, 1977. с. 62-71.
59. Буцхрикидзе Г. Д. Формула факториала для математических моделей процесса обогащения. Горная электромеханика и автоматика: Научные труды ГПИ им. В. И. Ленина. Тбилиси, 1982. №4 (249). с. 5-9,
60. Буцхрикидзе Г. Д. Экстремальные зависимости процессов обогащения с учетом свойств исходной руды. Тезисы докладов XIX научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава ВТУЗ-ов Закавказских республик. Тбилиси, 1977. с. 20-21.
61. Буцхрикидзе Г. Д. Вопросы оптимизации технологических процессов обогащения. Тезисы докладов XXII научно-технической конференции

- профессорско-преподавательского состава ВТУЗ-ов Закавказья. Тбилиси, 1984. с. 58, 59.
62. Буцхрикидзе Г. Д. Линеаризация законов оптимального управления технологическими процессами обогащения. Горная электромеханика и автоматика: Научные труды ГПИ им. В. И. Ленина. Тбилиси, 1983. №2 (259). с.5-8.
63. Буцхрикидзе Г. Д. Некоторые вопросы оптимизирующего управления процессами обогащения. Марганец: Реферативный сборник ГрузНИИНТИ. Тбилиси, 1980. №2(68). с. 18,19.
64. Сеницын И. Н. Методы статистической линеаризации. Автоматика и телемеханика. 1974. №5. с. 82-94.
65. Буцхрикидзе Г. Д. Прогнозирование эффективности оптимизирующего управления технологическими процессами обогащения при многих управляющих параметрах. Известия вузов. Горный журнал, 1980. №11. с.82-86.
66. Гладштейн М., Рыбинск Г., Проектируем устройства на микроконтроллерах. Микропроцессорная техника, радио №11, 2000. с. 20-26.

დანართი №1

წინასწარი ექსპერიმენტის მონაცემები

NN	$Q_{\alpha}$ (ღ/სთ)	$Q_{\beta}$ (ღ/სთ)	$q_1$ (კგ/სთ)	$q_2$ (კგ/სთ)	$q_3$ (კგ/სთ)
1	7.504	0.525	350	260	30
2	7.833	0.61	350	260	30
3	8.865	0.924	350	260	30
4	8.27	1	350	260	30
5	8.882	0.609	360	260	30
6	8.385	1.179	360	260	30
7	6.78	0.801	360	240	30
8	6.465	0.819	360	240	30
9	5.82	0.7	360	240	40
10	6.444	0.822	360	240	40
11	6.162	0.739	360	240	40
12	6.21	0.592	360	240	40
13	7.1	0.725	360	240	40
14	5.5	0.601	360	240	40
15	6.2	0.692	340	240	40
16	6.04	0.604	340	240	40
17	9.24	0.652	340	240	40
18	6.935	0.445	350	240	40
19	6.94	0.672	350	270	40
20	6.6	0.328	350	270	40
21	7.325	0.354	350	270	40
22	7.043	0.498	330	270	40
23	6.501	0.609	330	270	40
24	6.56	0.551	330	270	40
25	7.466	0.328	330	270	40
26	6.34	0.478	330	270	60
27	7.25	0.501	330	270	60
28	7.72	0.521	330	270	60
29	6.69	0.473	330	270	60
30	7.314	0.917	330	280	60
31	6.52	0.939	330	280	60
32	5.32	1.017	330	280	60
33	6.468	0.406	330	280	20
34	7.87	0.485	330	280	20
35	5.734	0.75	330	280	20
36	6.683	0.583	330	280	20