

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ასმათ შეყილაძე

მადნეულის სპილენძის მადნის ფლოტაციის პროცესის ოპტიმალური  
მართვის სისტემის დამუშავება

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2013წელი.

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტში  
სამთო-გეოლოგიური ფაკულტეტი  
სამთო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: სრ. პროფესორი როინ ენაგელი

რეცენზენტები: სრ. პროფესორი თეიმურაზ ჯავახიშვილი  
ტმკ მურად ბიწაძე

დაცვა შედგება 2013 წლის "29" ივლისს, 14<sup>00</sup> საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამთო -  
გეოლოგიური ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის #  
სხდომაზე, კორპუსი III, აუდიტორია 209  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა - ფაკულტეტის ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი

ასოც.პროფ. დ.თევზაძე

## შესავალი

სასარგებლო წიაღისეულის გამდიდრების შედეგად მიღებული პროდუქტის თვითღირებულების შემცირება, ხარისხიანი პროდუქციის მიღება, მადნიდან სასარგებლო კომპონენტების კომპლექსური და სრული ამოკრეფა, კონცენტრატის კონდიციურობის უზრუნველყოფა და მამდიდრებელი პროცესების ინტენსიფიკაცია აქტუალურს ხდის გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესების ოპტიმალურ მართვას, მამდიდრებელ ფაბრიკებზე ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ავტომატიზებული სისტემების დამუშავებას და დანერგვას.

ზემოაღნიშნული განსაზღვრავს წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომის აქტუალურობას, რამდენადაც იგი ეძღვნება ფლოტაციის, როგორც სპილენძის მადნის გამდიდრების ძირითადი ტექნოლოგიური პროცესის ოპტიმალური მართვის ხერხის შემუშავებას და შესაბამისი ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურის აგებას.

**თემის აქტუალურობა.** სასარგებლო წიაღისეულის გადამუშავების ეფექტურობის ზრდა ხელს უწყობს მრეწველობის მომიჯნავე დარგების განვითარებას. გამდიდრების შედეგად მიღებული პროდუქტის თვითღირებულების შემცირება, ხარისხიანი პროდუქციის მიღება, მადნიდან სასარგებლო კომპონენტების კომპლექსური და სრული ამოკრეფა, კონცენტრატის კონდიციურობის უზრუნველყოფა და მამდიდრებელი პროცესების ინტენსიფიკაცია აქტუალურს ხდის გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესების ოპტიმალურ მართვას, მამდიდრებელ ფაბრიკებზე ტექნოლოგიური პროცესების მართვის ავტომატიზებული სისტემების დამუშავებას და დანერგვას.

ზემოაღნიშნული განსაზღვრავს წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომის აქტუალურობას, რამდენადაც იგი ეძღვნება ფლოტაციის როგორც სპილენძის მადნის გამდიდრების ძირითადი ტექნოლოგიური პროცესის, ოპტიმიზაციის ხერხის შემუშავებას და შესაბამისი ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურის აგებას.

**სამუშაოს მიზანი.** სპილენძის ფლოტაციის პროცესის საოპტიმიზაციო მათემატიკური მოდელის აგება; პროცესის ოპტიმიზაციის ხერხის შემუშავება; მმართველი სიდიდეების შემაშფოთებელი ზემოქმედებებისაგან ოპტიმალური

დამოკიდებულებების პოვნა, რომელებიც უზრუნველყოფენ დავალებული ხარისხის კონცენტრატის მაქსიმალურ გამოსავალს; პროცესის ოპტიმალური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურის შედგენა; მართვის სისტემის კომპიუტერული მოდელის აგება და კვლევა.

**კვლევის ობიექტი და მეთოდები.** კვლევის ობიექტია მადნეულის მამდიდრებელი ფაბრიკის პირობებში სპილენძის მადნის ფლოტაციური მეთოდით გამდიდრების პროცესი;

ტექნოლოგიური პროცესის განზოგადოებული მათემატიკური მოდელის აგების მიზნით მოხდა არსებული სტატისტიკური მონაცემების დამუშავება ავტომატური და ოპტიმალური მართვის თეორიის ბაზაზე;

მათემატიკური სტატისტიკის უმცირეს კვადრატთა მეთოდის საფუძველზე კომპიუტერული პროგრამა *Matlab*-ის გამოყენებით მოხდა მათემატიკური მოდელის კოეფიციენტების განსაზღვრა;

დამუშავდა პროცესის ოპტიმალური მართვის ხერხი და ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა;

პროცესის ოპტიმიზაცია განხორციელდა წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გრაფიკული ვარიანტის გამოყენებით;

ოპტიმალური მართვის სისტემის გარდამავალი პროცესების კვლევა ჩატარდა კომპიუტერული პროგრამების *Matlab*-ის და *Simulink* –ის გამოყენებით.

**ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე.**

– მადნეულის მამდიდრებელი ფაბრიკის პირობებისათვის შერჩეულია სპილენძის ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი; აგებულია მიზნის და შეზღუდვის ფუნქციები, რომელთა კოეფიციენტები ფაბრიკის ტექნოლოგიური პროცესის შესახებ არსებული სტატისტიკურ მონაცემებზე დაყრდნობით განისაზღვრა უმცირეს კვადრატთა მეთოდზე დაყრდნობით კომპიუტერული პროგრამა *Matlab* -ის გამოყენებით.

– დიდი შიდა სატრანსპორტო დაგვიანების მქონე ფლოტაციის პროცესი განხილულია როგორც კასკადური მართვის ობიექტი, რომელშიც მმართველი ზემოქმედება მოდებულია რამდენიმე,

ერთმანეთისგან დროის ინტერვალით დაძრულ წერტილში და შესაბამის ლოკალურ მართვის სისტემებს შორის არსებობს შიდა უკუკავშირი;

– დასმულია ოპტიმიზაციის ამოცანა და მის გადასაჭრელად გამოყენებულია წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გრაფიკული ვარიანტის მოდიფიკაცია;

– ჩამოყალიბებულია პროცესის მართვის ალგორითმი;

– ნაჩვენებია რეჟიმული სიდიდით შემაშფოთებელი სიდიდის შეცვლის შესაძლებლობა;

- შემუშავებულია პროცესის ოპტიმალური მართვის ხერხი, რომელიც უზრუნველყოფს სპილენძის კონცენტრატის მაქსიმალურ გამოსავალს ბუთილის ქსანტატისა და ამქაფებლის რაოდენობის რეგულირებით;

– მოცემულია ავტომატური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა, რომელიც უზრუნველყოფს მიღებული ოპტიმალური დამოკიდებულებების რეალიზებას.

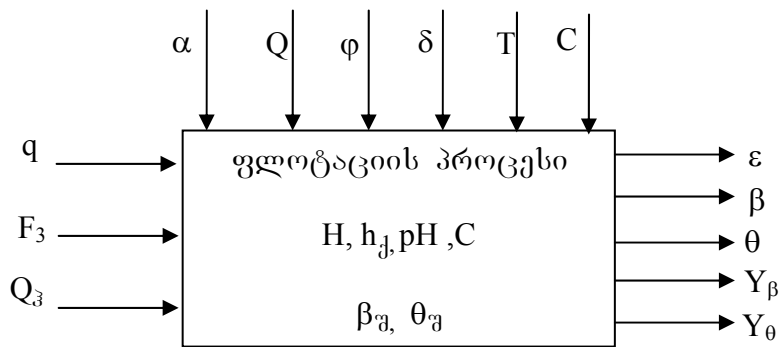
**შედგების გამოყენების სფერო.** სადისერტაციო ნაშრომის შედეგები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სასარგებლო წიაღისეულის ფლოტაციური მეთოდით გამდიდრების ავტომატური მართვის სისტემების დაპროექტების, გამართვის და ექსპლუატაციის დროს.

**დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა** დისერტაცია შეიცავს შესავალს, შვიდ თავს, საერთო დასკვნებს, გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხას (51) და დანართს. სადისერტაციო ნაშრომის მოცულობა შეადგენს 118 გვერდს, მათ შორის 44 ნახაზს და 8 ცხრილს.

## **დისერტაციის შინაარსი**

### **I თავი. ფლოტაციის პროცესის ალბათობითი მოდელი**

ფლოტაციის პროცესი მრავალფაქტორზეა დამოკიდებული, რის გამოც ის მართვის თვალსაზრისით წარმოადგენს რთულ ობიექტს. როგორც მართვის ობიექტი ის შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით. შემაშფოთებელ ზემოქმედებათა შორის შეიძლება გამოვყოთ უმთავრესი: ფლოტაციის პროცესში შემოსული პულპის მოცულობითი ხარჯი, მასში



ნახ.1. ფლოტაცია- ავტომატიზაციის ობიექტი

სასარგებლო კომპონენტის შემცველობა მინერალის ფლოტურობა  $\alpha$ , პულპის სიმკვრივე  $\delta$ , ტემპერატურა  $T$ , და გრანულომეტრული შედგენლობა  $C$ . მმართველი ზემოქმედებებია: რეაგენტების ხარჯი  $q$ ; კუდების გამოღინების ხვრელის ფართი  $F$ ; მიწოდებული ჰაერის ხარჯი  $Q_3$ . პროცესის მართული (გამოსავალი) სიდიდეებია: სასარგებლო კომპონენტის შემცველობა კონცენტრატში  $\beta$  და კუდებში  $Q$ , კონცენტრატის  $\gamma_\beta$  და კუდების  $\gamma_Q$  გამოსავალი. მართულად შეიძლება მივიჩნიოთ აგრეთვე მაჩვენებლები, რომლებიც გამოითვლებიან ჩამოთვლილი სიდიდეებით. ასეთი ფუნქცია არის, მაგალითად, სასარგებლო კომპონენტის ამოკრეფა  $\epsilon$ . ჩამოთვლილის გარდა, ფლოტაციის პროცესი ხასიათდება შიდა, რეჟიმული პარამეტრებით, რომლებიც განსაზღვრავენ გამდიდრების ეფექტურობას. ეს პარამეტრებია: პულპის დონე საფლოტაციო  $H$  კამერაში, ქაფის სისქე პულპის ზედაპირზე  $H_k$ , პულპის მუავიანობა  $PH$ , სასარგებლო კომპონენტის შუალედური შემცველობა ქაფის პროდუქტში  $B_ა$  და კამერის პროდუქტში  $Q_ა$ . ნარჩენი კონცენტრაცია პულპაში  $C$ . ფლოტაციის პროცესის ავტომატური მართვა გულისხმობს მაქსიმალური რაოდენობის დადგენილი ხარისხის კონდიციური პროდუქტის, ანუ კონცენტრატის მიღებას. გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესის მართვის ამოცანა დაიყვანება მმართველი სიდიდეების რეგულირებაზე შემაშფოთებელი სიდიდეების მიხედვით. მართვის

მიზანია ისეთი შედეგების მიღწევა, რომლებიც აკმაყოფილებენ ოპტიმალურობის განსაზღვრულ, შერჩეულ კრიტერიუმს.

მიუხედავად გადასატრელი ამოცანის ხასიათისა და სირთულისა, კრიტერიუმის არჩევა ყოველთვის ემსახურება ერთ საერთო მიზანს – მიღწეული იქნეს ოპტიმალური ეკონომიკური და ტექნოლოგიური მაჩვენებლები.

მამდიდრებელი პროცესების მართვის თვალსაზრისით უპირატესობა უნდა მიენიჭოს ეკონომიკურ კრიტერიუმებს. მაგრამ მამდიდრებელი ფაბრიკების ტექნოლოგიური პროცესების ოპტიმიზაციისათვის ასეთი კრიტერიუმის გამოყენება ყოველთვის არ ხერხდება, მაგალითად, მონაცემთა უკმარისობის გამო. გარდა ამისა, ეკონომიკური მიდგომა სხვებისაგან იმით განსხვავდება, 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) ხარისხზე. თუ ჩავთვლით, რომ ფასები გამომდინარეობს ბაზრის მოთხოვნებიდან, აღნიშნული შეზღუდვებისას შეიძლება ჩამოვყალიბოთ ეკონომიკური კრიტერიუმი მხოლოდ მამდიდრებელი ფაბრიკის მოთხოვნების ბაზაზე. ასეთ კრიტერიუმებში საექსტრემიზაციო მაჩვენებელი შეიძლება იყოს პროდუქციის თვითღირებულება ან მისგან გამომდინარე სხვა სიდიდეები, მაგალითად სასარგებლო მინერალის ამოკრეფა, კონცენტრატის გამოსავალი.

მოყვანილის გამო, მადნეულის მამდიდრებელი ფაბრიკის ფლოტაციის პროცესის ლოკალური მართვის სისტემის აგების დროს მიღებულია ტექნოლოგიური კრიტერიუმი, რომელის მიხედვით კონცენტრატის გამოსავალი  $\gamma$  მიღებულია სამაქსიმიზაციო მაჩვენებლად და კონცენტრატის ხარისხი  $\beta$  კი მაჩვენებლად, რომელიც სტაბილიზებული უნდა იქნეს დავალებულ (მოცემულ) დონეზე. მაშინ ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი შემდგენაირად ჩამოყალიბდება:

$$\gamma \rightarrow \text{extr}; \quad (1)$$

$$\beta = \text{const}. \quad (2)$$

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

$$\gamma = F_1(q_1, q_2, q_3, Q, \alpha), \quad (3)$$

$$\beta = F_2(q_1, q_2, q_3, Q, \alpha). \quad (4)$$

(1)-(4) გამოსახულებების გათვალისწინებით ოპტიმიზაციის ზემოაღნიშნული ამოცანა შემდეგი სახით შეიძლება ჩამოვაყალიბოთ:

$$\gamma = F_1(q_1, q_2, q_3, Q, \alpha) \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$\beta = F_2(q_1, q_2, q_3, Q, \alpha) = \beta_0, \quad (6)$$

სადაც  $\beta_0$  არის  $\beta$  მაჩვენებლის დავალებული (მოცემული) მნიშვნელობა. (5) მიზნის ფუნქციის ექსტრემიზაციის დროს (6) შეზღუდვის ტოლობის გარდა გათვალისწინებული უნდა იქნეს აგრეთვე შეზღუდვები მმართველი სიდიდეებისათვის:

$$q_{1\min} \leq q_1 \leq q_{1\max}, \quad (7)$$

$$q_{2\min} \leq q_2 \leq q_{2\max}, \quad (8)$$

$$q_{3\min} \leq q_3 \leq q_{3\max} \quad (9)$$

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

$$q_1 = f_1(\alpha, Q), \quad (10)$$

$$q_2 = f_2(\alpha, Q) \quad (11)$$

$$q_3 = f_3(\alpha, Q). \quad (12)$$

პროცესის მათემატიკური მოდელი აგებულ იქნა გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესის მაოპტიმიზებელი მეთოდის მიხედვით, რომელიც პროცესს განიხილავს როგორც გასამდიდრებელი მადნის საწისი მდგომარეობიდან (ხარისხით  $\alpha$ ) ბოლო მდგომარეობაში



(ხარისხით  $\beta$ ) ალბათობით თანამიმდევრული გადასვლების ერთობლიობას. გადასვლა ყოველი მდგომარეობიდან შემდეგში ხდება გარკვეული ალბათობით და საწყისი მდგომარეობიდან ბოლო მდგომარეობამდე საჭირო „პირობითი“ გადასვლების რიცხვი მაქსიმალური ალბათობით ხორციელდება მმართველი სიდიდის შესაბამისი მნიშვნელობის დროს. საკითხის ასეთი წარმოდგენის საფუძველზე ჩამოყალიბებულია მამდიდრებელი ფაბრიკების ტექნოლოგიური პროცესების ალბათობითი მოდელი, რომელიც გამოსადეგია შემაშფოთებელ და მმართველ სიდიდეებს შორის ოპტიმალური დამოკიდებულებების მისაღებად. ზემოაღნიშნულის საფუძველზე მიღებულია კონცენტრატის გამოსავლის და ხარისხის ფორმულები

$$\gamma(x) = ax^k e^{-cx}, \quad \beta(x) = \alpha + bx^\psi, \quad \beta(z) = \alpha + b_0 z^{\theta_i}, \quad (13)$$

რომლებიც ასახავენ კონცენტრატის გამოსავლის და ხარისხის დამოკიდებულებას საფლოტაციო მანქანაში (მმართველი სიდიდისაგან)  $Q_i$  და შემაშფოთებელი  $Z$  ზემოქმედებებისაგან. აქ  $i$  არის მანქანის კამერის რიგითი ნომერი, ხოლო  $a, b, b_0, k, c, \psi, \theta_i$  კოეფიციენტები განისაზღვრება ექსპერიმენტულად.

## II თავი. მიზნის ფუნქცია

ზემოთ მოყვანილი ალბათური მოდელებისა და გამოსავლის წყვილი დამოკიდებულების ანალიზის საფუძველზე კონცენტრატის გამოსავლის მრავლობით დამოკიდებულებას მმართველი სიდიდეებისაგან ანუ მიზნის ფუნქციას შეიძლება მივცეთ სახე

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = a q_1^{k_1} q_2^{k_2} q_3^{k_3} e^{-c_1 q_1 - c_2 q_2 - c_3 q_3}. \quad (14)$$

მიზნის ფუნქციის კოეფიციენტების რიცხვითი მნიშვნელობების განსაზღვრა ანალიზური ხერხით არ ხერხდება. ამიტომ საჭიროა ექსპერიმენტული მონაცემების გამოყენება. მადნეულის მამდიდრებელი ფაბრიკიდან აღებული სტატისტიკური მონაცემებს ვამუშავებთ უმცირეს კვადრატთა მეთოდით. უმცირეს კვადრატთა მეთოდს საფუძვლად უდევს უმცირეს კვადრატთა პირობა, რომელიც თხოულობს (14) განტოლებაში

შემაჯავალი 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 იქნას გადახრათა კვადრატების ჯამის მინიმიზაციის პირობა. მდენეულის მამდიდრებელი ფაბრიკიდან აღებული სტატისტიკური მონაცემების კომპიუტერული პროგრამა *Matlab*-ში ამოხსნის შემდეგ მიზნის ფუნქციას აქვს შემდეგი სახე:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 8.38 \cdot 10^{09} q_1^{-3.192} q_2^{-0.29} q_3^{0.4} e^{0.00146q_1 + 0.00033q_2 - 0.027q_3} \quad (15)$$

### III თავი. შეზღუდვის ფუნქცია

აგებულ იქნა კონცენტრატის ხარისხის მრავლობითი დამოკიდებულება მმართველი და შემაშფოთებელი ზემოქმედებებისაგან, ანუ შეზღუდვის ფუნქცია

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = a + 5.71 \cdot 10^{-0.4} q_1^{0.218} q_2^{1.317} q_3^{-0.225} \alpha^{0.268} Q^{0.142} \quad (16)$$

საბოლოოდ, ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი იღებს სახეს: მიზნის ფუნქცია

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 8.38 \cdot 10^{09} q_1^{-3.192} q_2^{-0.29} q_3^{0.4} e^{0.00146q_1 + 0.00033q_2 - 0.027q_3} \quad (17)$$

შეზღუდვის ფუნქცია

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = a + 5.71 \cdot 10^{-0.4} q_1^{0.218} q_2^{1.317} q_3^{-0.225} \alpha^{0.268} Q^{0.142} \quad (18)$$

რეაგენტის ცვალებადობის ზღვრები:

$$2050 \leq q_1 \leq 2250, 300 \leq q_2 \leq 1500, 5.6 \leq q_3 \leq 40. \quad (19)$$

ხოლო მათი საშუალო მნიშვნელობები:

$$q_1=2158.9; q_2=865.9; q_3=20.1. \quad (20)$$

გაგაანალიზოთ მიზნის ფუნქცია (16)  $q_1, q_2$  და  $q_3$  რეაგენტების ხარჯებზე

$\gamma$  გამოსავლის დამოკიდებულება დაეუშვათ, რომ

$q_2 = \bar{q}_2 = 865.9, q_3 = \bar{q}_3 = 20.1$ , მაშინ მიზნის ფუნქცია მიიღებს სახეს:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 8.38 \cdot 10^{09} q_1^{-3.192} 865.9^{-0.29} 20.1^{0.4} \cdot e^{0.00146 q_1 + 0.00033 \cdot 865.9 - 0.027 \cdot 20.1}$$

$$\text{ანუ } \gamma(q_1, q_2, q_3) = 3.0266 \cdot 10^9 q_1^{-3.1918} e^{3.1617q_1}. \quad (21)$$

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

$$\alpha = \bar{\alpha} = 0.356, \quad Q = \bar{Q} = 100.5. \quad (22)$$

ამ დაშვებების გათვალისწინებით კონცენტრატის ხარისხის განტოლებას ექნება სახე:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 0.356 + 5.71 \cdot 10^{-0.4} q_1^{0.218} 865.9^{1.317} 20.1^{-0.225} \cdot 0.356^{0.268} 100.5^{0.142}$$

$$\text{ანუ } \beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 0.356 + 4.66 q_1 0.2177. \quad (23)$$

მიღებული (16) და (17) ფუნქციონალური დამოკიდებულებების საფუძველზე ვაგებთ ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლების  $\beta$  და  $\gamma$ -ს  $q_1$  რეაგენტის ხარჯზე დამოკიდებულების გრაფიკებს. (იხ. ნახ. 2, 2,3,4,5,6,7 და 8). როგორც ნახაზებიდან ჩანს,  $q_1$  რეაგენტის ხარჯის ზრდას მაჩვენებლებზე საპირისპირო გავლენა აქვს–თუ კონცენტრატის ხარისხი იმატებს, მისი გამოსავალი იკლებს. მაშასადამე, ტექნოლოგიური პროცესი უნდა წარიმართოს კონცენტრატის დავალებული ხარისხის მიხედვით. რეაგენტი  $q_1$  არის კირის რქე (არეს რეგულატორი და პირიტის დეპრესორი), რომელიც განსაზღვრავს გასამდიდრებელ პულპაში წყალბადიონების კონცენტრაციას, ანუ pH-ს. მისი სიდიდე დადგენილია პროცესის ტექნოლოგიური რუქით. ამ ერთად თუ განვიხილავთ ნახ.4–ზე მოცემულ სტატიკურ მახასიათებელს pH–სა და  $\beta$ –ს შორის, დავრწმუნდებით, რომ მიზანშეწონილია ავაგოთ pH–ის სტაბილიზაციის სისტემა, რომელიც შემაშფოთებელი ზემოქმედებების ცვალებადობის გათვალისწინებით მოახდენს მისი სიდიდის პროგრამულ დონეზე შენარჩუნებას. ახლა დავუშვათ, რომ  $q_1 = \bar{q}_1 = 2158.9$ ,  $q_3 = \bar{q}_3 = 20.1$ , მაშინ მიზნის ფუნქცია აღიწერება გამოსახულებით:

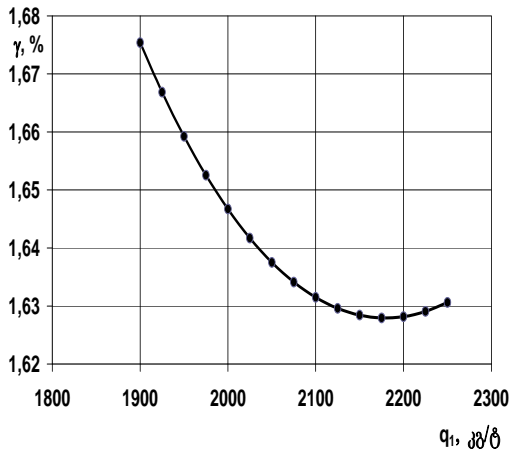
$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 8.38 \cdot 10^{09} 2158.9^{-3.1918} q_2^{-0.29} 20.1^{0.4} \cdot e^{0.00146 \cdot 2158.9 + 0.00033 q_2 - 0.027 \cdot 20.1}$$

$$\text{ანუ } \gamma(q_1, q_2, q_3) = 8.695 q_2^{-0.2903} e^{11.07 q_2}. \quad (24)$$

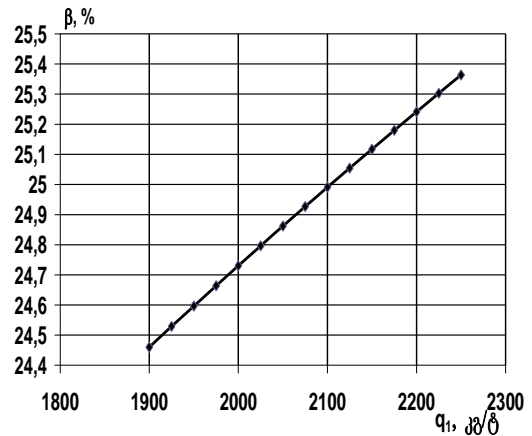
კონცენტრატის ხარისხის განტოლებაში ანალოგიური დაშვებების საფუძველზე მივიღებთ:

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 0.356 + 5.71 \cdot 10^{-0.4} 2158.9^{0.218} q_2^{1.317} 20.1^{-0.225} \cdot 0.356^{0.268} 100.5^{0.142}$$

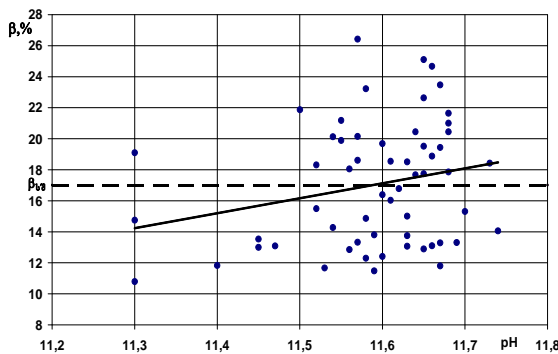
ანუ  $\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 0.356 + 2.17 \cdot 10^{-3} q_2^{1.317}$ . (25)



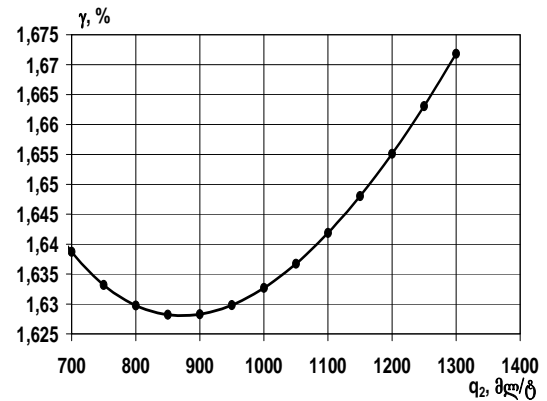
ნახ. 2. დამოკიდებულება  $\gamma = f(q_1)$



ნახ. 3. დამოკიდებულება  $\beta = f(q_1)$



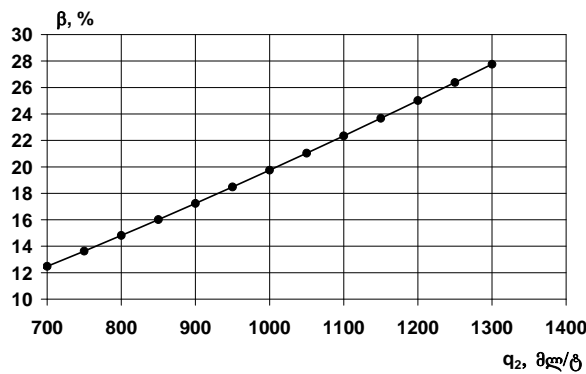
ნახ. 4. დამოკიდებულება  $\beta = f(PH)$



ნახ. 5. დამოკიდებულება  $\gamma = f(q_2)$

ნახაზებზე 2-8 (16) და (17) ფუნქციონალური დამოკიდებულებების საფუძველზე აგებულია ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლების  $Q_2$  რეაგენტის ხარჯზე დამოკიდებულების გრაფიკი.  $Q_2$  რეაგენტის ხარჯის ზრდა იწვევს კონცენტრატის ხარისხის ზრდას. კონცენტრატის გამოსავალი ამ დროს იკლებს  $Q_2$  რეაგენტის (ბუთილის ქსანტატი) ხარჯის საშუალო მნიშვნელობამდე, შემდეგ კი მკვეთრად იმატებს.  $Q_2$  ხარჯის სიდიდეც. ამიტომაც,  $Q_2$ -ის ცვალებადობის უბნის დასადგენად

ვიყენებთ  $\gamma - q_2$  დამოკიდებულებას. ნახ.6-იდან ჩანს, რომ  $\gamma - q_2$  დამოკიდებულება არაწრფივია, აქვს მინიმუმი და  $q_2$ -ის საკმაოდ დიდ ფარგლებში გამოსავალი რჩება მინიმალური. ამავე დროს  $q_{2min} - q_2$  უბანზე რეაგენტის ხარჯის ზრდით გამოსავალი მცირდება, ხოლო  $q_2 - q_{2max}$  უბანზე – მატულობს. ამიტომ ვირჩევთ  $q_2$  რეაგენტისთვის მისი ხარჯის ცვალებადობის უბანს:  $850 \leq q_2 \leq 1300$ .



ნახ. 6. დამოკიდებულება  $\beta = f(q_2)$ ,

და ბოლოს, დაეუშვათ, რომ  $q_1 = \bar{q}_1 = 2158.9$ ,  $q_2 = \bar{q}_2 = 865.9$ . მაშინ მიზნის ფუნქციას ექნება სახე:

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 8.38 \cdot 10^{09} 2158.9^{-3.1918} 865.9^{-0.29} q_3^{-0.2245} \cdot e^{0.00146 \cdot 2158.9 + 0.00033 \cdot 865.9 - 0.027 \cdot q_3}$$

$$\text{ანუ } \gamma(q_1, q_2, q_3) = 0.8441 q_3^{0.3995} e^{-0.5419 q_3} \quad (26)$$

$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 0.356 + 5.71 \cdot 10^{-0.4} 2158.9^{0.218} 865.9^{1.317} q_3^{-0.225} \cdot 0.356^{0.268} 100.5^{0.142}$$

$$\text{ანუ } \beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = 0.356 + 49.6 q_2^{-0.2245} \quad (27)$$

(26) და (27) განტოლებების საფუძველზე ვაგებთ ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლების  $q_3$  რეაგენტის ხარჯზე დამოკიდებულების გრაფიკს.  $q_3$  რეაგენტის ხარჯის ზრდა იწვევს  $\beta$  კონცენტრატის ხარისხის კლებას, დამოკიდებულება არაწრფივია (ნახ. 7), ამიტომაც მაღალი ხარისხის კონცენტრატის მისაღებად სასურველია  $q_3$  რეაგენტის ხარჯის შენარჩუნება  $\bar{q}_3 = q_{3min}$  ფარგლებში.  $\gamma - q_3$  დამოკიდებულება კი ექსტრემალურია (ნახ. 8). ბუნებრივია, გამოსავლის მაქსიმალური მნიშვნელობის შესანარჩუნებლად საჭიროა

$q_3$  რეაგენტის ხარჯი იცვლებოდეს საშუალო მნიშვნელობის მახლობლობაში. გასათვალისწინებელია, რომ სტატისტიკური მონაცემებით მიღებული წერტილების სიმჭიდროვე  $\gamma - q_3$  დამოკიდებულების (ნახ.7) მაქსიმუმის ორივე მხარეს თანაბარია. აქედან გამომდინარე, ტექნოლოგიური პროცესის მაჩვენებლების მაქსიმალურად მაღალი მნიშვნელობების შესანარჩუნებლად საჭიროა  $q_3$  რეაგენტის ხარჯი იცვლებოდეს ფარგლებში:  $6 \leq q_3 \leq 25$ . როგორც მოყვანილი ანალიზიდან ჩანს, მადნეულის მამდიდრებელი ფაბრიკის პირველი სექციის პირობებში ფლოტაციის პროცესის ოპტიმალური მართვისათვის საჭიროა მოვახდინოთ pH-ის სტაბილიზაცია კირის რძის ხარჯის რეგულირებით, ხოლო ბუთილის ქსანტატის (რეაგენტი  $q_2$ ) და T-80-ის (რეაგენტი  $q_3$ ) ხარჯი უნდა იცვლებოდეს ისე, რომ მივიღოთ დასახული ხარისხის სპილენძის კონცენტრატის მაქსიმალური რაოდენობა. ამის შესაბამისად უნდა მოვახდინოთ მიზნის და შეზღუდვის ფუნქციების კორექტირება. შევიტანოთ ორივე ფუნქციაში  $q_1$  რეაგენტის საშუალო მნიშვნელობა  $q_1=2158.9$  და მოვახდინოთ შესაბამისი გარდაქმნები. შედეგად მივიღებთ მიზნის  $\gamma(q_1, q_2, q_3) = 4.51q_2^{-0.29}q_3^{0.4}e^{0.00033q_2-0.027q_3}$  და შეზღუდვის ფუნქციებს  $\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = a + 3.04 \cdot 10^{-0.3} q_2^{1.317} q_3^{-0.225} \alpha^{0.268} Q^{0.142}$  მაშასადამე, მადნეულის საფლოტაციო ფაბრიკის პირობებში ფლოტაციის პროცესისათვის საბოლოოდ დადგენილი იქნა ოპტიმიზაციის კრიტერიუმი, რომელიც მოიცავს: მიზნის ფუნქციის მაქსიმიზაციის მოთხოვნას

$$\gamma(q_1, q_2, q_3) = 4.51q_2^{-0.29}q_3^{0.4}e^{0.00033q_2-0.027q_3} \rightarrow \max \quad (28)$$

შეზღუდვის ტოლობას

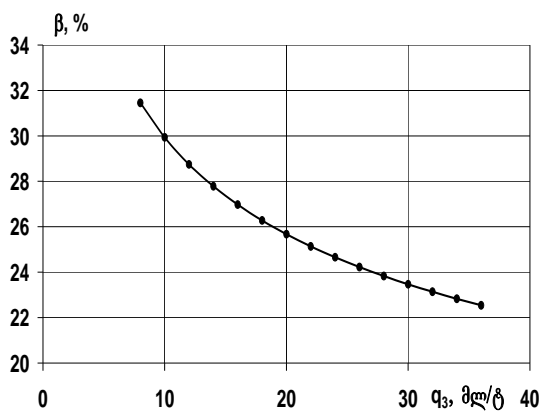
$$\beta(q_1, q_2, q_3, \alpha, Q) = a + 3.04 \cdot 10^{-0.3} q_2^{1.317} q_3^{-0.225} \alpha^{0.268} Q^{0.142} = \beta_0 \quad (29)$$

და რეაგენტების დასაშვები ცვალებადობის ზღვრებს

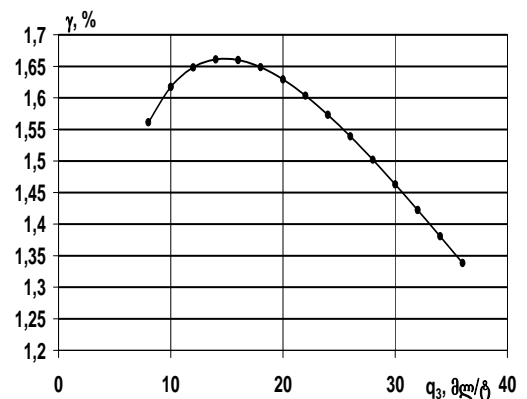
$$850 \leq q_2 \leq 1300, \quad 6 \leq q_3 \leq 25, \quad (30)$$

სადაც  $\gamma$  არის კონცენტრატის გამოსავალი,%;  $\beta$  -კონცენტრატის ხარისხი,%;  $\beta_0$  -კონცენტრატის ხარისხის დავალებული მნიშვნელობა, %;  $\alpha$  - გასამდიდრებელი მადნის ხარისხი (Cu-ის შემცველობა), %;  $Q$  -

გასამდიდრებელი მადნის ხარჯი (მწარმოებლურობა), ტ/სთ;  $q_2, q_3$ - რეაგენტების (შესაბამისად, ბუთილის ქსანტატი და T-80 ზეთის) ხარჯები, მლ/ტ.გავითვალისწინოთ, რომ  $q_2, q_3$  მმართველი სიდიდეებია, ხოლო  $\alpha$  და  $Q$  - შემაშფოთებელი. ზემოაღნიშნულის საფუძველზე კვლევის შედეგში ამოცანა მდგომარეობს გასამდიდრებელი მადნის  $\alpha$  ხარისხზე და მის  $Q$  რაოდენობაზე  $q_2$  და  $q_3$  რეაგენტების ხარჯების ისეთი დამოკიდებულების პოვნაში, რომლებიც უზრუნველყოფენ პროცესის ოპტიმალურობას (28) და (29) დამოკიდებულების შესაბამისად.



ნახ. 7. დამოკიდებულება  $\beta = f(q_3)$



ნახ. 8. დამოკიდებულება  $\gamma = f(q_3)$

#### IV თავი. ფლოტაციის პროცესის ოპტიმიზაცია წრფივი დაპროგრამების მეთოდით

პროცესის ოპტიმიზაცია განხორციელდა წინა თავში განსაზღვრული ოპტიმიზაციის კრიტერიუმის საფუძველზე.(17) გამოსახულებაში რეაგენტების ხარჯები  $q_2, q_3$ , რომლებიც  $\gamma$  კონცენტრატის გამოსავალს მაქსიმუმს ანიჭებენ, იმყოფებიან მათი შესაძლო ცვალებადობის ზღვრებში. აღნიშნულ (19) ზღვრებში  $\gamma$ -ს ეს დამოკიდებულებები მონოტონური ფუნქციებია და ამიტომ, ოპტიმიზაციისათვის შეგვიძლია გამოვიყენოთ წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გრაფიკული ვარიანტი. ძეგნის გრაფიკის ასაგებად

კოორდინატთა სისტემაში აბსცისათა ღერძზე გადავზომოთ  $\beta$ , ხოლო ორდინატთა ღერძზე კი  $\gamma$  გრაფიკის საწყისი წერტილის განსაზღვრისათვის (17) გამოსახულებაში შევიტანოთ მმართველი სიდიდეების საშუალო მნიშვნელობები

$$\bar{q}_2 = 866 \text{ მლ/ტ}, \bar{q}_3 = 20.1 \text{ მლ/ტ}, \quad (30)$$

და სტატისტიკური მონაცემებით დაფიქსირებული შემაშფოთებელი ზემოქმედებების  $\alpha$  და  $Q$ -ს საშუალო მნიშვნელობები:

$$\bar{\alpha} = 0.356\%, \quad \bar{Q} = 100.5 \text{ ტ/სთ} \quad (31)$$

(30) და (31) სიდიდეების ჩასმით (17) და (18)-ში მივიღებთ ძებნის გრაფიკის წერტილებს. (18) და (19) გამოსახულებების გათვალისწინებით  $\gamma$  და  $\beta$  სიდიდეები მიხედვით ღებულობენ მნიშვნელობებს, რომლებსაც შეესაბამება ოპტიმიზაციის გრაფიკზე სათანადო წერტილები. ძებნის პირველ ეტაპზე (17) და (18) გამოსახულებებში ჯერ შევიტანოთ  $\bar{\alpha} = 0.356$ ,  $\bar{Q} = 100.5$ ,  $\bar{q}_3 = 20.1$  და ჩავწეროთ ისინი  $q_2$ -ის მიმართ. სათანადო გარდაქმნებით მივიღებთ:

$$\gamma(q_2) = 8.695 \cdot q_2^{-0.2903} \cdot e^{0.2882 \cdot q_2}; \quad (32)$$

$$\beta(q_2) = 0.3557 + 2.17 \cdot 10^{-3} \cdot q_2^{1.3171}. \quad (33)$$

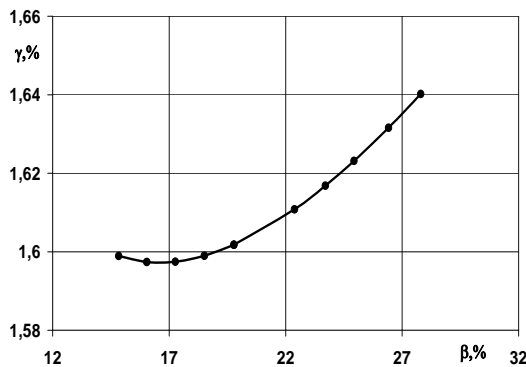
ოპტიუმის მოსაძებნად მორიგეობით ვცვალოთ მმართველი სიდიდეები ნებისმიერი რიგით საზღვრებამდე იმ მიმართულებით, საითაც იზრდება  $\gamma$ . ვცვალოთ  $q_2$   $850 \leq q_2 \leq 1300$  ზღვრებში, ხოლო  $q_3$  დავაფიქსიროთ  $q_3 = 20.1$  სიდიდეზე.  $\gamma$  და  $\beta$ -ს მიღებული მნიშვნელობები და დატანილია ნახ.9-ზე ძებნა განხორციელდა  $q_2$ -ის ცვალებადობით მისი მინიმალური მნიშვნელობიდან (როდესაც  $\gamma=1.5989$ ,  $\beta=14.8345$ ) ზედა საზღვრისკენ. როგორც ვხედავთ, გრაფიკი აღმაგალია და ძებნა შეწყდა  $\beta$ -ს ცვალებადობის ზედა ზღვრიდან გასვლს გამო (ამ შემთხვევაში  $\beta=27.8\%$ ). ამის შემდეგ, (17) და (18) გამოსახულებებში შევიტანოთ  $\bar{\alpha} = 0.356$ ,  $\bar{Q} = 100.5$ ,  $\bar{q}_2 = 866$  და ჩავწეროთ ისინი  $q_3$ -ის მიმართ. სათანადო გარდაქმნებით მივიღებთ:



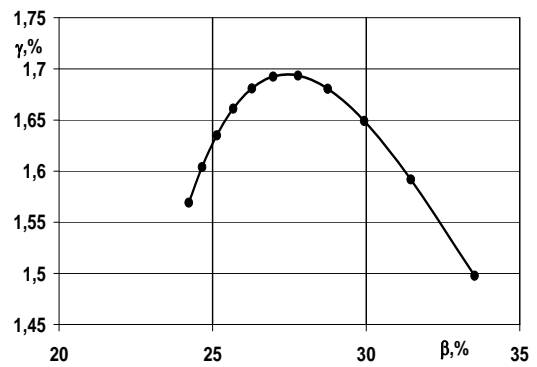
$$\gamma(q_3) = 0.8441 \cdot q_3^{0.3995} \cdot e^{-0.5419 \cdot q_3}, \quad (34)$$

$$\beta(q_3) = 0.3357 + 49.6 \cdot q_3^{-0.2245}.$$

$q_2$  ღაგაფიქსიროთ მის საშუალო სიდიდეზე  $q_2 = 865$  ღა ვცვალოთ  $q_3 = 26$ -ღან  $B_{3\min} = 6$ -მდე. ( ამ მიმართულებით სვლა იწვევს  $\gamma$ -ს ზრღას) ძებნის შედეგები ნახ.30-ზე როგორც ვხეღავთ, გრაფიკს აქვს ექსტრემალური ხასიათი.



ნახ. 9 ოპტიმუმის ძებნის გრაფიკი  $q_2$ -ის ცვალებადობით

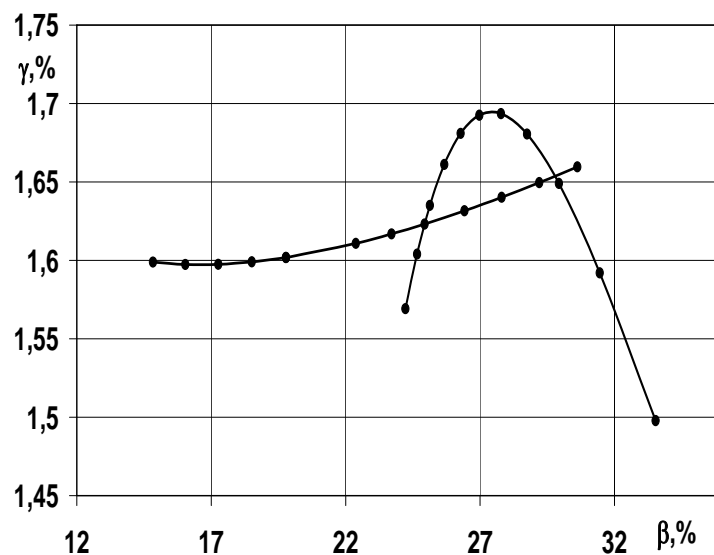


ნახ. 10 ოპტიმუმის ძებნის გრაფიკი  $q_3$ -ის ცვალებადობით

აღმავალ უბანზე ორივე ხარისხოვრივი მაჩვენებელი იმატებს.ერთის მხრივ  $\gamma$  იკლებს ღა, მეორეს მხრივ,  $\beta$  გაღის მისი ცვალებადობის ზეღა ზღვრიღან. ძებნა შეწყღა  $q_3$ -ის ქვეღა ზღვარზე.

მივიღეთ რა ცაღკ-ცაღკე ორივე მმართველი ზემოქმედების მიხედვით პროცესის ხარისხოვრივი მაჩვენებლების ცვალებადობის გრაფიკები, შეგვიძღია გადავიღეთ ოპტიმუმის ძებნის მეორე საფეხურზე. მოვახღინოთ მიღებული გრაფიკების ზედღება, აგებულ იქნა ნახ.11-ზე ნაჩვენები გრაფიკი. როგორც ვხეღავთ,  $q_2$ -ის ღა  $q_3$ -ის ცვალებადობით მიღებული გრაფიკები 1 ღა 2 ერთმანეთს კვეთენ წერტილში 3. ამ წერტილის შემდგომ ორივე გრაფიკის მიხედვით,  $\gamma$  ღა  $\beta$  მაჩვენებელი კი იმატებს, მაგრამ  $\gamma$ -ს მატება  $q_3$ -ის ცვალებადობით უფრო მნიშვნელოვანია. ამიტომ მიზანშეწონიღია  $q_2$ -ის ცვალებადობა

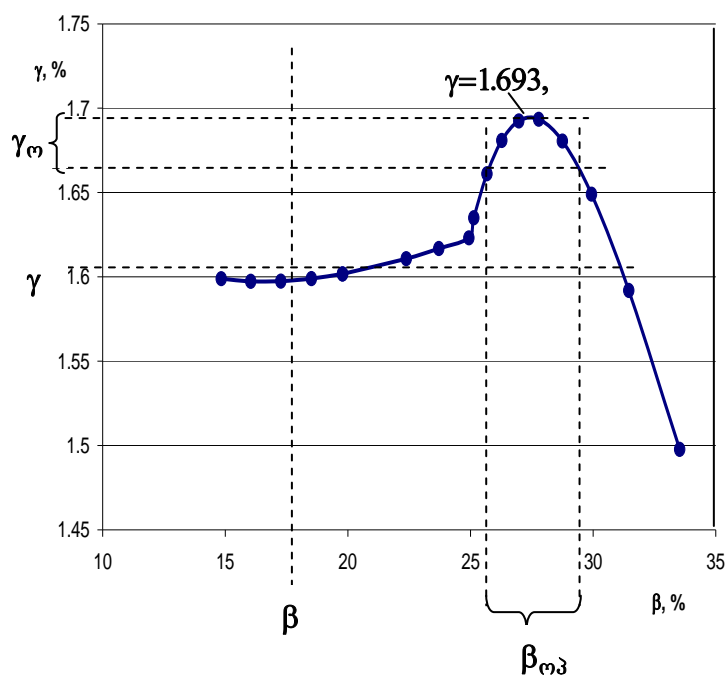
შეწყდეს წერტილში 3, როდესაც  $\gamma = 1.623$  და  $\beta = 24.9$ , ხოლო მმართველ ზემოქმედებებს გააჩნიათ მნიშვნელობები  $q_2 = 1195$   $q_3 = 20.1$ . ამ წერტილის შემდგომ მიზანშეწონილია  $q_2$ -ის დაფიქსირება მიღწეულ დონეზე (ბუთილის ქსანტატის ხარჯი) და მოხდეს მხოლოდ ამქაფებლი T-80 -ის რეგულირება მისი საშუალო მნიშვნელობიდან მინიმუმისკენ. ნახ.11-ზე მოტანილია ოპტიუმის ძეხვის გაერთიანებული გრაფიკი. მასზე დატანილია ფაბრიკის ყოველდღიური მუშაობის ამსახველი სტატისტიკური მონაცემებით განსაზღვრული კონცენტრატის ხარისხისა და მისი გამოსავლის საშუალო მნიშვნელობები -  $\bar{\beta} = 17.01\%$  და  $\bar{\gamma} = 1.6$ . როგორც გრაფიკიდან ჩანს, ოპტიუმის უბანი შემოსაზღვრულია  $\gamma_{opt}$  და  $\beta_{opt}$  სიდიდეების ოპტიმალური მნიშვნელობებით



ნახ.11. ოპტიუმის ძეხვის გრაფიკის ზედღება

ნახ.12-ზე მოტანილია ოპტიუმის ძეხვის გაერთიანებული გრაფიკი. მასზე დატანილია ფაბრიკის ყოველდღიური მუშაობის ამსახველი სტატისტიკური მონაცემებით განსაზღვრული კონცენტრატის ხარისხისა და მისი გამოსავლის საშუალო მნიშვნელობები -  $\bar{\beta} = 17.01\%$  და  $\bar{\gamma} = 1.6$ . როგორც გრაფიკიდან ჩანს, ოპტიუმის უბანი შემოსაზღვრულია  $\gamma_{opt}$  და  $\beta_{opt}$  სიდიდეების ოპტიმალური მნიშვნელობებით.

კერძოდ,  $\gamma_{opt}$  იცვლება 1.66-1.693 ფარგლებში, ხოლო  $\beta_{opt}$  კი 25.7-29%-ის ფარგლებში. ბუნებრივია, ხარისხობრივი მაჩვენებლების გაუმჯობესების მიზნით პროცესი უნდა ვმართოთ ამ უბანზე. კერძოდ, ქსანტოგენატი უნდა მივაწოდოთ 1195მლ/ტ ხარჯით, ხოლო ამქაფებელი T-80 ზეთი კი ვცვალოთ 22-15 მლ/ტ-ის ფარგლებში.



ნახ. 12. ოპტიუმის ძებნის საბოლოო გრაფიკი

როგორც ვხედავთ,  $\gamma$ -ს ექსტრემალური მნიშვნელობაა  $\gamma_g = 1.693$  როდესაც  $\beta = 26.97\%$ .  $\gamma_{opt}$  უბნის მარცხნივ ორივე,  $\gamma$  და  $\beta$  სიდიდე იკლებს.  $\gamma_{opt}$  უბნის მარჯვნივ  $\gamma$  იკლებს, მაგრამ სამაგიეროდ  $\beta$  იმატებს. ბუნებრივია,  $\beta_{opt}$ -ის მარჯვნივ გრაფიკის დაღმავალი უბანი არ განიხილება, რადგან ერთის მხრივ კონცენტრატის გამოსავალი მკვეთრად იკლებს და, მეორეს მხრივ, მისი ხარისხი სცილდება ცვალებადობის ზედა ზღვარს. ზემომოყვანილის საფუძველზე, შეგვიძლია შევადგინოთ პროცესის მართვის კანონები, რომელთა მიხედვითაც მოხდება მმართველი ზემოქმედებების -  $q_2$  და  $q_3$ -რეგულირება შემაშფოთებელი ზემოქმედებების ცვალებადობის შემთხვევაში. ჯერ შევადგინოთ მართვის კანონი ოპტიმიზაციის

გრაფიკის საწყისი უბნისათვის. ამისათვის გამოსახულებაში (17)

ჩავსვათ მნიშვნელობა  $q_3 = 20.1$  და განვსაზღვროთ  $q_2$ :

$$q_2 = 135.95(\beta - \alpha)^{0.759} a^{-0.204} Q^{-0.108} . \quad (35)$$

ჩავსვათ (17) ბუთილის ქსანტატის ხარჯის საშუალო სიდიდე  $q_2 = 1195$  და მოვახდინოთ შესაბამისი გარდაქმნებით მივიღებთ

$$q_3 = 6.69 \cdot 10^6 (\beta - \alpha)^{-4.44} a^{1.19} Q^{0.631} \quad (36)$$

საბოლოოდ მართვის ალგორითმი შემდეგნაირად ჩამოყალიბდება:

საწყის უბანზე მუშაობის დროს  $q_3$  სტაბილიზდება მისი ცვალებადობის ზღვრების ცენტრში  $q_3 = 20.1$ , ხოლო  $q_2$  რეგულირდება (35) კანონით მისთვის დასაშვებ საზღვრებში (18) შეზღუდვების გათვალისწინებით. თუ  $\alpha$ -ს ან  $\beta$ -ს ცვლილება (ან  $\beta_{\text{დ}}$ -ის შეცვლა) მოითხოვს  $q_2$ -ის გასვლას ზედა საზღვრიდან, იგი სტაბილიზდება მის საშუალო მნიშვნელობაზე ( $q_2 = 1195$ ) და იწყება  $q_3$ -ის რეგულირება (35) კანონით მისთვის დასაშვებ საზღვრებში (18) როგორც დავრწმუნდით, წრფივი დაპროგრამების მეთოდი ოპტიმიზაციის ამოცანის გადაწყვეტის საიმედო და მოხერხებული საშუალებაა. კონცენტრატის ხარისხის გასაზრდელად მმართველი სიდიდეების (რეაგენტის ხარჯების) მორიგეობითმა ცვლამ განაპირობა საოპტიმიზაციო გრაფიკის მიხედვით  $\beta$ -ს და  $\gamma$ -ს უფრო მაღალი მნიშვნელობები. ნახ.32-ის მიხედვით შეგვიძლია გავთვალთ, რომ ფლოტაციის პროცესის არსებულ მაჩვენებლებთან შედარებით შემოთავაზებული ოპტიმალური მართვის ხერხი გვაძლევს კონცენტრატის გამოსავალის ზრდას 0.9-ით და ხარისხის მატებას თითქმის 10%-ით.

#### IV თავი. პროცესის ოპტიმიზაცია შემაშფოთებელი ზემოქმედებების ცვალებადობის გათვალისწინებით

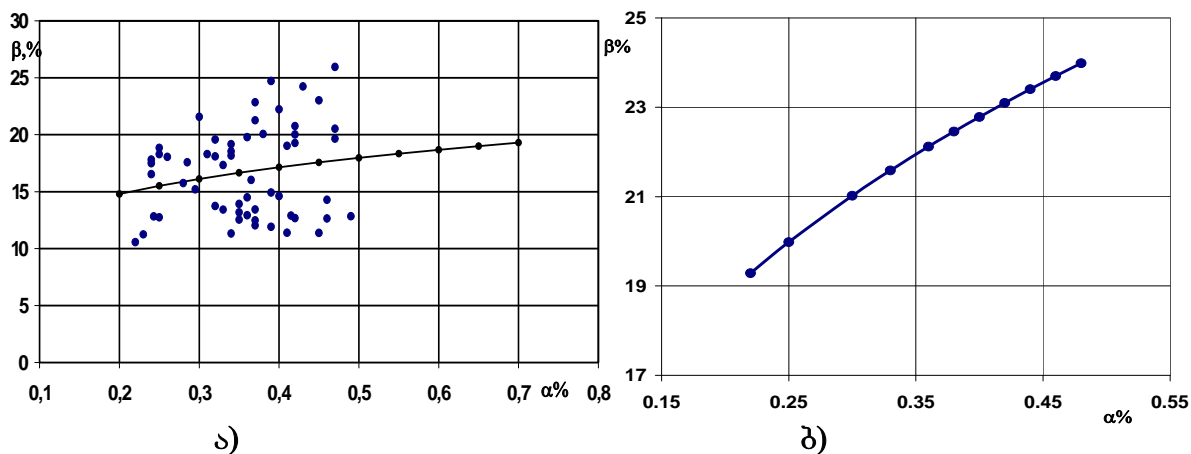
წინა პარაგრაფში, პროცესის ოპტიმიზაციის დროს არ იყო გათვალისწინებული რომ შემაშფოთებელი ზემოქმედებები-გასამდიდრებელი მადნის ხარისხი  $\alpha$  და გასამდიდრებელი მადნის რაოდენობა  $Q$  ცვალებადია და გავლენას ახდენენ პროცესის

მაჩვენებლებზე. შევიტანოთ მმართველი ზემოქმედებების საშუალო და მორიგეობით შემაშფოთებელი ზემოქმედებების საშუალო მნიშვნელობებში, მივიღებთ  $\beta=f(\alpha)$  და  $\beta=f(Q)$  გამოსახულებებს

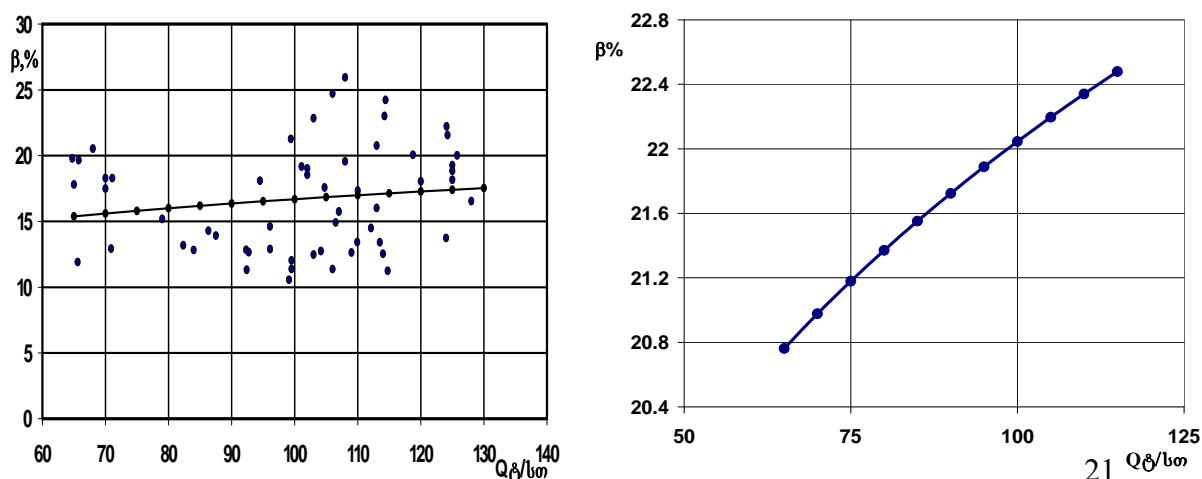
$$\beta(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3, \alpha, \bar{Q}) = \alpha + 22 \alpha^{0.2682} \quad (37)$$

$$\beta(\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3, \bar{\alpha}, Q) = 0.356 + 8.68Q^{0.1416} \quad (38)$$

ნახაზებზე 13ა და 14ა მოცემულია ფლოტაციის პროცესის სტატისტიკური მონაცემების მიხედვით აგებული (37) და (38) ფუნქციების გრაფიკები. ნახაზებზე 13ბ და 14ბ კი იგივე გრაფიკები, აგებული პროცესის ოპტიმიზაციის შედეგებზე დაყრდნობით. თუ შევადარებთ ამ გრაფიკებს, აშკარაა ოპტიმალური მართვით მიღებული ეფექტი- $\alpha$ -ს და  $Q$ -ს ცვალებადობის გათვალისწინებით პროცესი გაცილებით ეფექტურად იმართება და კლებულობს  $\beta$ -ს გაზრდილ მნიშვნელობებს. განვიხილოთ მმართველი ზემოქმედებების შემაშფოთებელი ზემოქმედებებისგან დამოკიდებულებები.



ნახ.13. დამოკიდებულება  $\beta = f(\alpha)$ . ა)-სტატისტიკური მოცენამებით აგებული. ბ) ოპტიმიზაციის შედეგად მიღებული



ნახ. 14 დამოკიდებულება  $\beta = f(Q)$ . ა) სტატისტიკური მონაცემებით აგებული. ბ) ოპტიმიზაციის შედეგად მიღებული

$$q_2 = 135.95(\beta - \alpha)^{0.759} a^{-0.204} Q^{-0.108} \quad (39)$$

$$q_3 = 6.69 \cdot 10^6 (\beta - \alpha)^{-4.44} a^{1.19} Q^{0.631} \quad (40)$$

ამ გამოსახულებებში ჯერ შევიტანოთ  $\beta$  და  $\alpha$ -ს საშუალო მნიშვნელობები. შედეგად მივიღებთ:

$$q_2 = 1419.605 \cdot Q^{-0.108} \quad (41)$$

$$q_3 = 7.369 \cdot Q^{0.631}. \quad (42)$$

იგივე გამოსახულებებში შევიტანოთ  $\alpha$  -ს და  $Q$ -ს საშუალო მნიშვნელობები. სათანადო გარდაქმნებით მივიღებთ:

$$q_2 = 82.63(17.01 - \alpha)^{0.759} \cdot \alpha^{-0.204}, \quad (43)$$

$$q_3 = 1.23 \cdot 10^8 (17.01 - \alpha)^{-4.44} \cdot \alpha^{1.19} \quad (44)$$

მიღებული, ფორმულებით შესაძლებელია დამუშავდეს ფლოტაციის პროცესის ოპტიმალური მართვის ხერხი და აიგოს შესაბამისი მართვის სისტემა. მოყვანილმა ანალიზმა აჩვენა, რომ ოპტიმიზაციის შემდეგ, ისევე როგორც ოპტიმიზაციამდე,  $\alpha$  და  $Q$  -ს ცვალებადობა დიდ გავლენას ახდენს გამდიდრების პროცესის მაჩვენებლებზე. უნდა აღინიშნოს შემდეგი:  $\alpha$  და  $Q$  -შემაშფოთებელ ზემოქმედებებს აქვთ პროცესზე ერთი მიმართულებით გავლენა- ორივე პარამეტრის ზემოქმედებით ხდება კონცენტრატის ხარისხის მატება.

## VI თავი. სპილენძის ფლოტაციის პროცესის ოპტიმალური

### მართვის ხერხი

ტექნოლოგიური პროცესის ავტომატური მართვის ხერხის დამუშავება გულისხმობს მმართველი ზემოქმედებების შემაშფოთებელი ზემოქმედებებისგან დამოკიდებულებების (მართვის კანონების) განსაზღვრას და შესაბამისი მართვის სტრუქტურის შედგენას. მართვის კანონები განისაზღვრა წინა თავში (35) და (36) გამოსახულებების სახით: ამ გამოსახულებებში ჯერ შევიტანოთ  $\beta$  და  $\alpha$ -ს საშუალო მნიშვნელობები. შედეგად მივიღებთ:

$$q_2 = 1419.605 \cdot Q^{-0.108} \quad (45)$$

$$q_3 = 7.369 \cdot Q^{0.631} \quad (46)$$

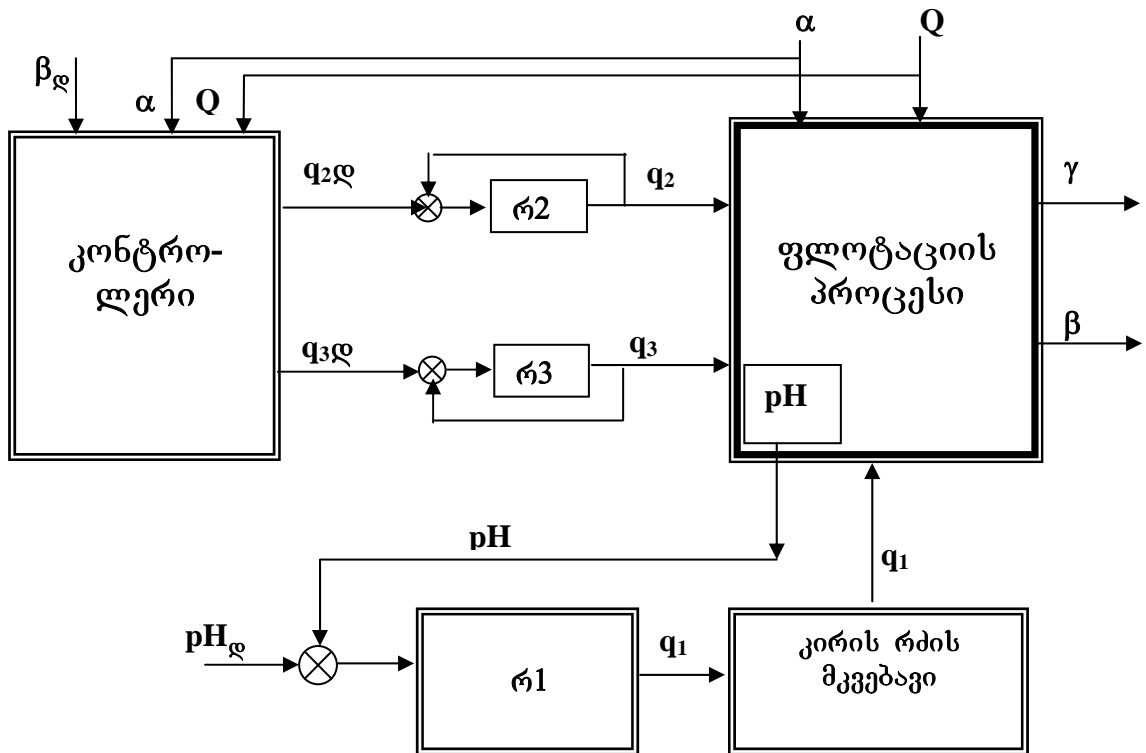
იგივე გამოსახულებებში შევიტანოთ  $\alpha$  -ს და  $Q$ -ს საშუალო მნიშვნელობები. სათანადო გარდაქმნებით მივიღებთ:

$$q_2 = 82.63(17.01 - \alpha)^{0.759} \cdot \alpha^{-0.204}, \quad (47)$$

$$q_3 = 1.23 \cdot 10^8 (17.01 - \alpha)^{-4.44} \cdot \alpha^{1.19} \quad (48)$$

ზემომოყვანილის საფუძველზე მივიღეთ მართვის ხერხი, რომლიც ითვალისწინებს ფლოტაციის პროცესის ოპტიმალურ მართვას რეგულირების სამი კონტურით: პირველი ახდენს ძირითად ფლოტაციაში pH-ის სტაბილიზაციას და მესამე კონტურით ხდება ბუთილის ქსანტატის და T-80 ამქაფებლის ხარჯის რეგულირება, გასამდიდრებელი მასალის ხარისხისა და რაოდენობის მიხედვით.

ნახ.15-ზე მოცემულია (45) - (48) მართვის კანონების შესაბამისი მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა.



ნახ.15 მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა

როგორც ვხედავთ, ფლოტაციის პროცესის ოპტიმალური მართვის სისტემა სამი დამოუკიდებელი, მაგრამ შიდა უკუკავშირით გაერთიანებული სამი სისტემისაგან შედგება.

პირველი ახდენს ძირითად ფლოტაციაში წყალბად-იონების კონცენტრაციის pH-ის სტაბილიზაციას. მართვის სისტემის მეორე და მესამე კონტურით გათვალისწინებულია პროცესში რეაგენტების-ბუთილის ქსანტატის და ამქაფებელი ზეთის ხარჯის რეგულირება შემაშფოთებელი ზემოქმედებების მიხედვით. შემაშფოთებელი ზემოქმედები არიან სპილენძის შემცველობა გასამდიდრებელ მადანში  $\alpha$  და მამდიდრებელი ფაბრიკის I სექციის მწარმოებლურობა საწყისი მადნის მიხედვით Q. ამათგან პირველის- სპილენძის შემცველობის უწყვეტი გაზომვის ტექნიკური საშუალება ამჟამად არ არსებობს. ამიტომ, როგორც სხვა პროცესების შემთხვევაში, ჩვეულებრივ ხდება ასეთი პარამეტრის რომელიმე სხვა ტექნოლოგიური პარამეტრით ირიბი შეფასება. ფლოტაციის პროცესის შემთხვევაში ასეთი პარამეტრია გასამდიდრებელი პულპის სიმკვრივე. რაც შეეხება მეორე შემაშფოთებელ ზემოქმედებას პროცესის მწარმოებლურობას მყარის მიხედვით Q-ს, ის იზომება დაქუცმაცების პირველი სტადიის წისქვილის მკვებავ კონვეიერზე. გასამდიდრებელმა მასალამ მისი რაოდენობის გაზომვის წერტილიდან ძირითად ფლოტაციამდე უნდა გაიაროს რამდენიმე ტექნოლოგიური ოპერაცია. შედეგად ჯამური სატრანსპორტო დაგვიანება არის ისეთი დიდი, რომ ამ სიგნალის ჩართვა ფლოტაციის მართვის სისტემაში არის მიუღებელი.

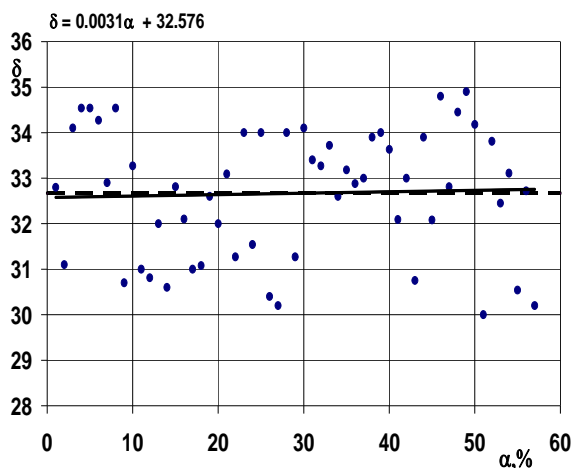
პროცესის შესასვლელზე ორივე შემაშფოთებელი ზემოქმედების შესაფასებლად შეგვიძლია გამოვიყენოთ მოწოდებული პულპის სიმკვრივისა და მისი მოცულობითი ხარჯის სიდიდეები, რომელთა გამზომი საშუალებები ნაჩვენებია პარაგრაფებში (ნახაზები 16-17). ამ მიზნით, პირველ რიგში, დანართის მონაცემების საფუძველზე აგებულია დამოკიდებულება

$$\delta = 27.629 + 1.873\alpha + 0.0435Q \quad (49)$$

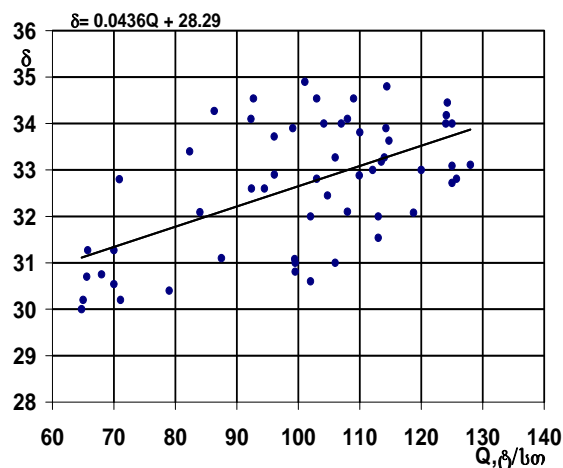
ამ დამოკიდებულების მიხედვით ნახაზებზე 16 და 17-ზე მოტანილია პულპის სიმკვრივის დამოკიდებულებები  $\alpha$ -სა და Q-საგან. ორივე



გრაფიკი გვიჩვენებს რეალურ სურათს- პულპის სიმკვრივე ნაკლებადაა დამოკიდებული სპილენძის შემცველობაზე (გავითვალისწინოთ, რომ მისი შემცველობა მადანში საშუალოდ არის 0.356%), მაგრამ გაცილებით მგრძობიერია მადნის რაოდენობის მიმართ. შესაბამისად პულპის სიმკვრივის სიდიდით შეგვიძლია შევაფასოთ ძირითადი შემაშფოთებელი ზემოქმედებები.

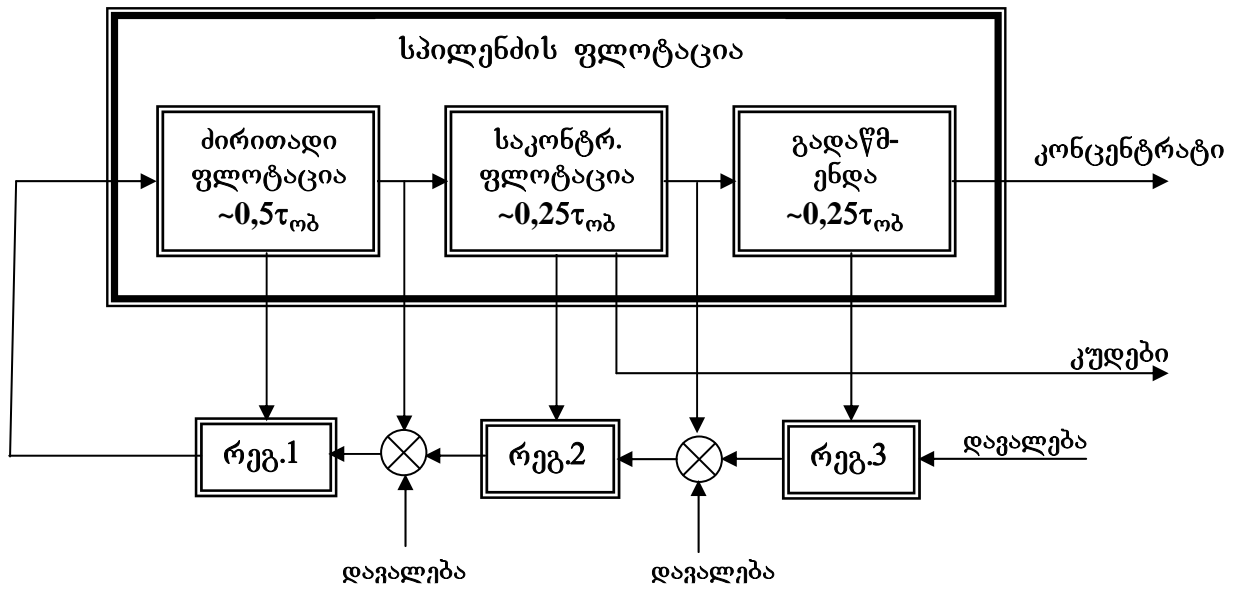


ნახ.16 პულპის სიმკვრივის დამოკიდებულებობა α-ს გან

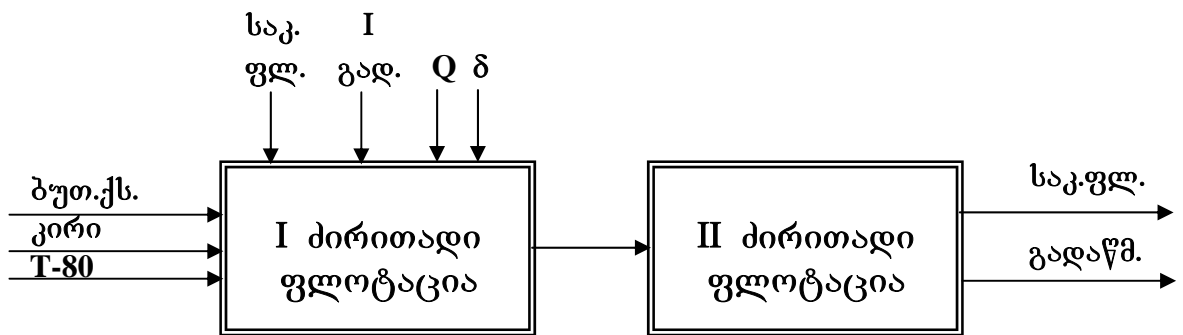


ნახ.17 პულპის სიმკვრივის დამოკიდებულებობა Q-ს გან

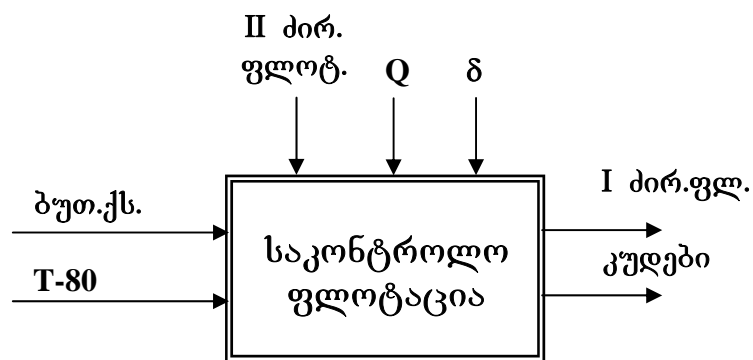
მოყვანილის საფუძველზე სპილენძის ფლოტაციის ოპტიმალური მართვის კასკადური სისტემის ფუნქციურ სტრუქტურას შეიძლება მივცეთ ნახ 18.-ზე მოყვანილი სახე. აქ ცალკე იმართება ძირითადი ფლოტაცია (შიდა დაგვიანებით  $\sim 0,5\tau_{\text{ობ}}$ ), ცალკე საკონტროლო ფლოტაცია (შიდა დაგვიანებით  $\sim 0,25\tau_{\text{ობ}}$ ) და ცალკე სამივე გადაწმენდა (შიდა საერთო დაგვიანებით  $\sim 0,25\tau_{\text{ობ}}$ ). ბუნებრივია გათვალისწინებულია შიდა ტექნოლოგიური კავშირები. ნახ.38-ზე ნახვენები მართვის სისტემა შეიძლება წარმოვიდგინოთ როგორც სამი ურთიერთდაკავშირებული მართვის სისტემის ერთობლიობა: პირველი ახდენს I და II ძირითად ფლოტაციის მართვას ბუთილის ქსანტატის, კირის რძის და T-80-ის რეგულირებით მეორე არეგულირებს საკონტროლო ფლოტაციაში მიწოდებული რეაგენტების ხარჯს



ნახ. 18. სპილენძის ფლოტაციის კასკადური მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა

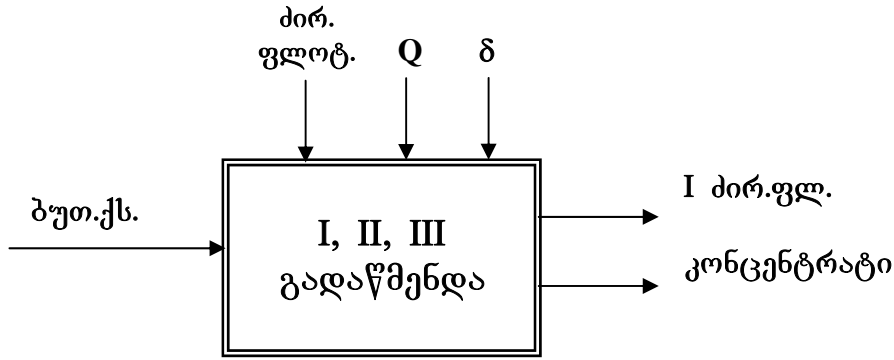


ნახ.19 ძირითად ფლოტაციაში რეაგენტების ხარჯის მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა



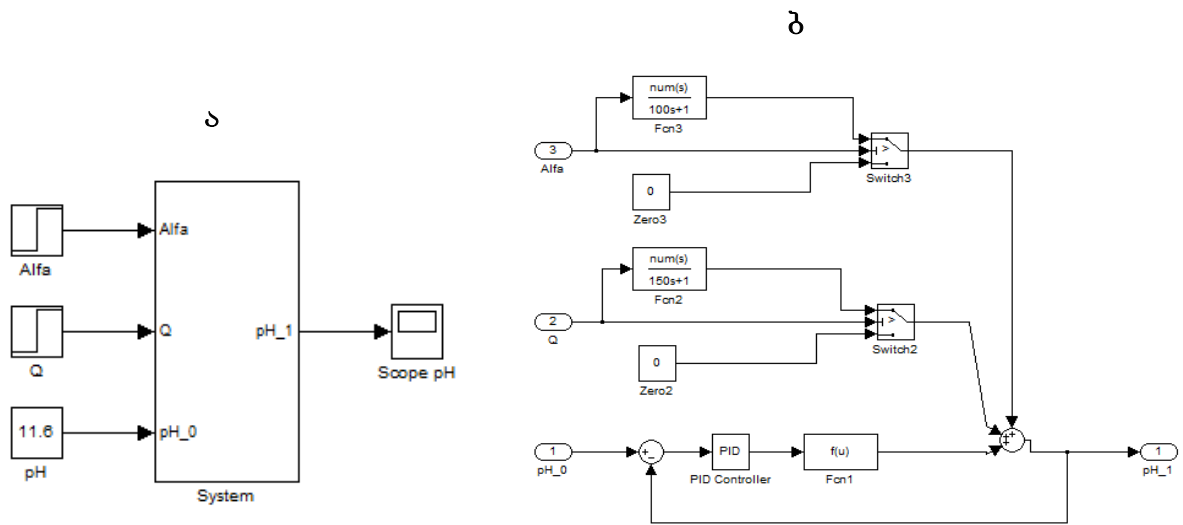
ნახ.20 საკონტროლო ფლოტაციაში რეაგენტების ხარჯის მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა

ხოლო მესამე - გადაწმენდის ოპერაციებს



ნახ. 21 გადაწმენდით ოპერაციებში ბუთილის ქსანტატის ავტომატური რეგულირების სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა

წყალბად-იონების კონცენტრაციის pH-ის სტაბილიზაციის სისტემის კვლევის მიზნით პროგრამა Simulink-ის საშუალებით აგებულ იქნა ნახ.15 მოყვანილი ფუნქციური სტრუქტურის შესაბამისი კომპიუტერული მოდელი (ნახ. 22), რომელიც საშუალებას გვაძლევს დავაკვირდეთ pH-ის სიდიდის სტაბილიზაციას) შემაშფოთებელი ( $\alpha$ ,  $Q$ ) ზემოქმედებების ცვლილების გათვალისწინებით.

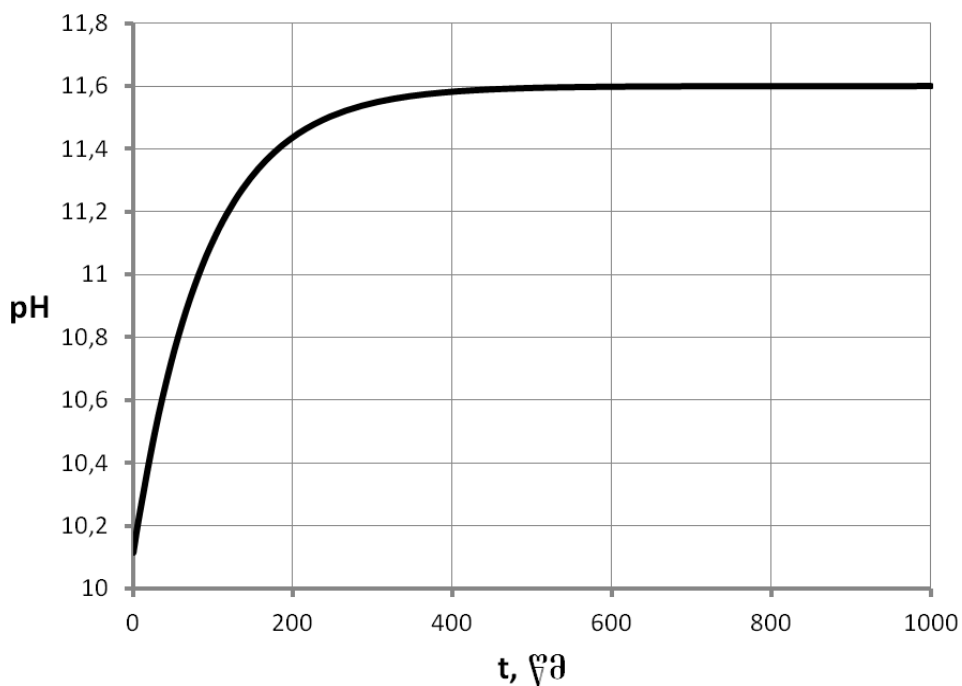


ნახ. 22 სტაბილიზაციის სისტემის კომპიუტერული მოდელი

საკვლევი ობიექტი ნახ. 22.ა-ზე წარმოდგენილია *System* რგოლის სახით, რომლის შესავალი სიდიდეებია: pH-წყალბად-იონების კონცენტრაციის პროგრამული (დავალებული) მნიშვნელობა,  $Q$  -

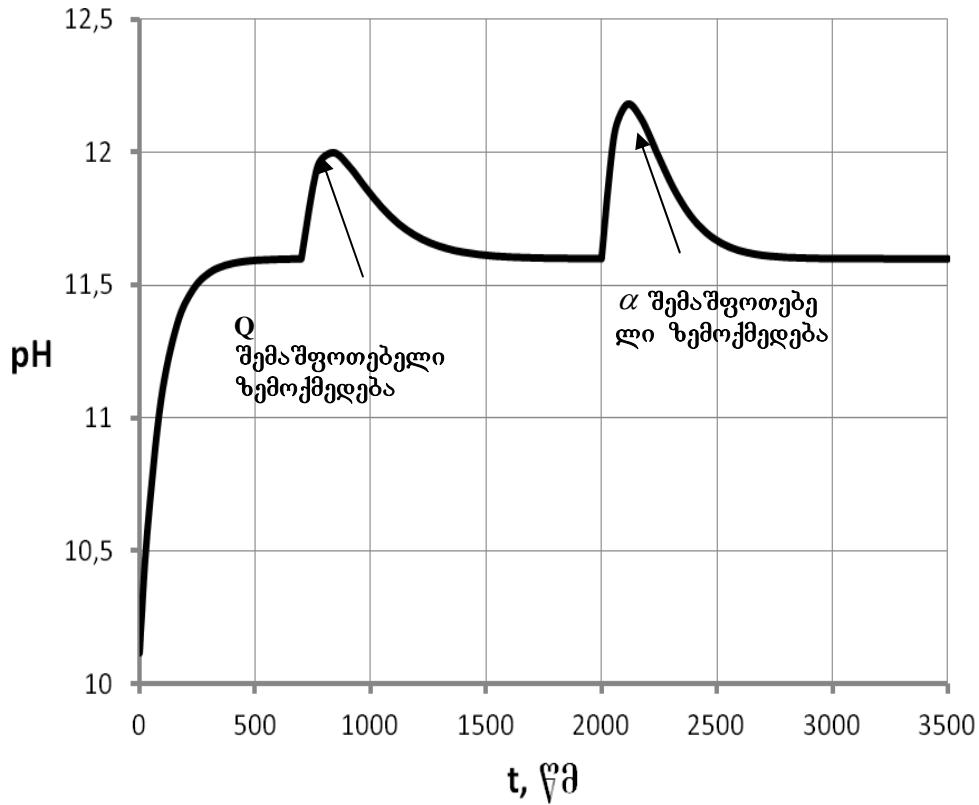
მამდიდრებელი ფაბრიკის I სექციის მწარმოებლურობა საწყისი მადნის მიხედვით,  $a$  – სპილენძის შემცველობა გასამდიდრებელ მადანში.

თავის მხრივ *System* რგოლს აქვს ნახ. 22.ბ-ზე ნაჩვენები სახე. შემდარებელი მოწყობილობა ახდენს pH\_0 დავალებული და pH\_1 ფაქტიურ მნიშვნელობებს შორის სხვაობის (გაუთანხმობის) განსაზღვრას, რომლის მიხედვითაც რეგულატორი (PID Controller) ახდენს მმართველი ზემოქმედების ფორმირებას და შესაბამისად კირის ხსნარი პროცესს მიეწოდება იმ რაოდენობით, რაც საჭიროა გასამდიდრებელ პულპაში წყალბად-იონების კონცენტრაციის პროგრამულ დონეზე შესანარჩუნებლად. აღნიშნულ პროცესს შეესაბამება ნახ. 23 ნაჩვენები გარდამავალი მახასიათებელი.



ნახ.23 სტაბილიზაციის სისტემის გარდამავალი მახასიათებელი

სტაბილიზაციის სისტემაზე ძირითად გავლენას ახდენს ორი შემაშფოთებელი ზემოქმედება: Q - მამდიდრებელი ფაბრიკის I სექციის მწარმოებლურობა საწყისი მადნის მიხედვით და  $a$  – სპილენძის შემცველობა გასამდიდრებელ მადანში. თავდაპირველად ორივე შემაშფოთებელი ზემოქმედების მათი საშუალო სიდიდეებად არის ჩათვლილი (ნახ. 22.ა. რგოლები Zero2 და Zero3).



**ნახ.24 რეგულირების პროცესის გარდამავალი მახასიათებელი**

დროის დაყოვნებით სტაბილიზაციის სისტემაზე ზემოქმედებას იწყებს ჯერ Q, ხოლო შემდეგ  $\alpha$ , რომლებიც ზრდიან გაუთანხმოებას რეალურ და დავალებულ მნიშვნელობას შორის. სტაბილიზაციის სისტემაში შემაჯავალი რეგულატორის პარამეტრები ისეა შერჩეული, რომ შემაშფოთებელი ზემოქმედებების ცვალებადობის მიუხედავად მოხდეს pH სიდიდის შენარჩუნება პროგრამულ მნიშვნელობაზე. რეგულირების პროცესის გარდამავალი მახასიათებელი ნაჩვენებია ნახ.24-ზე. გარდამავალი პროცესის დამყარების შემდეგ pH დაუბრუნდა პროგრამულ სიდიდეს, ხოლო მმართველმა ზემოქმედებებმა შეინარჩუნეს მართვის კანონებით განსაზღვრული მნიშვნელობები.

## დასკვნები

1. შემუშავებულია მადნეულის საბადოს სპილენძის შემცველი მადნის გამდიდრების ტექნოლოგიური პროცესის მათემატიკური მოდელი, რომელიც გამდიდრების მაჩვენებლებს აკავშირებს მმართველ და შემაშფოთებელ სიდიდეებთან, ითვალისწინებს რა ამ პროცესის კანონზომიერებებს;

2. პროცესის ოპტიმიზაციის მიზნით შერჩეულია ტექნოლოგიური კრიტერიუმი, რომლის საფუძველზეც აიგო მიზნისა და შეზღუდვის ფუნქციების მოდელები;

3. აგებულ იქნა ფლოტაციის პროცესის მათემატიკური მოდელი, რომელიც აღწერს კონცენტრატის ხარისხის და გამოსავლის მრავლობით დამოკიდებულებას მიწოდებული რეაგენტების ხარჯისგან და შემაშფოთებელ ზემოქმედებებზე-გასამდიდრებელი მადნის ხარისხზე და მის რაოდენობაზე;

4. ავტომატური მართვის თვალსაზრისით ფლოტაციის პროცესი განხილულ იქნა როგორც კასკადური მართვის ობიექტი, რომელშიც მართვის სისტემის ხარისხობრივი მაჩვენებლების გაუმჯობესების მიზნით აგებულია ლოკალური მართვის სისტემები. ამავე დროს, მმართველი ზემოქმედება მოდებულია პროცესის სხვადასხვა, დროის ინტერვალით დაძრულ წერტილში. ლოკალურ სისტემებს შორის არის შიდა უკუკავშირი;

5. დასმულია ოპტიმიზაციის ამოცანა და მის გადასატრედად გამოყენებულია წრფივი დაპროგრამების მეთოდის გრაფიკული ვარიანტი. ჩამოყალიბებულია პროცესის ოპტიმალური მართვის ალგორითმი;

6. დადგინდა საფლოტაციო კამერებში მიწოდებული რეაგენტების-ბუთილის ქსანტატის და ამქაფებლის რაოდენობის ოპტიმალური მართვის კანონები, რომლებიც ითვალისწინებენ შემაშფოთებელი ზემოქმედებების ცვალებადობას;

7. აგებულ იქნა პროცესის მართვის სისტემის ფუნქციური სტრუქტურა, რომელიც ახდენს პროცესის მართვას შემუშავებული მართვის კანონების მიხედვით;

8. აგებულ იქნა პროცესის მართვის სისტემის კომპიუტერული მოდელი, გამოკვლეულ იქნა მმართველი და მართული სიდიდეების ცვალებადობის ხასიათი გარდამავალი პროცესის დროს;

9. შემუშავებულ იქნა მართვის ხერხი, რომელიც ითვალისწინებს ფლოტაციის პროცესში წყალბად-იონების *PH*-ის სტაბილიზაციას კირის რძის ხარჯის რეგულირებით;

10. შემუშავებულ იქნა მართვის ხერხი, რომელიც გულისხმობს ფლოტაციის პროცესში რეაგენტების ნარჩენი კონცენტრაციის კონტროლს და რეაგენტების ხარჯის შესაბამის რეგულირებას;

11. შემუშავებულ იქნა საფლოტაციო კამერაში პულპის დონის სტაბილიზაციის ხერხი;

12. პროცესის პარამეტრების კონტროლისა და მართვის მიზნით შერჩეულია სხვადასხვა ფირმის თანამედროვე ტექნიკური საშუალებები–სენსორები;

**ნაშრომის აპრობაცია.** სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი საკითხები მოხსენების სახით გაშუქდა 2 სამეცნიერო კონფერენციაზე და ორ თემატურ სემინარზე, შედეგები ასახულია სამ გამოქვეყნებულ სტატიაში.

#### გამოქვეყნებული პუბლიკაციები

1. რ.ენაგელი, ა.შეყილაძე. სპილენძის ფლოტაციის პროცესის მართვის საკითხისათვის. “სამთო ჟურნალი”, №1(24), 2010 წელი, გვ. 58–59.
2. რ.ენაგელი, ა.შეყილაძე, ნ.სამხრაძე. სპილენძის მადნის ფლოტაციის პროცესის მატემატიკური მოდელი.“მეცნიერება და ტექნოლოგიები”, № 4-6, თბილისი, 2012წელი, გვ. 45-49.
3. მ. გამცემლიძე, რ.ენაგელი, ა.შეყილაძე. ფლოტაციის პროცესის მართვის ხერხი. . “სამთო ჟურნალი”, №1(30), 2013 წელი, გვ. 58–59.
4. ა.შეყილაძე. სპილენძის ფლოტაციის პროცესის მართვის საკითხისათვის. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის 78-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. თბილისი 2010წ.
5. ა.შეყილაძე. სპილენძის ფლოტაციის ოპტიმალური მართვის ხერხის შერჩევის თავისებურებანი. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის 79-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია. თბილისი 2011წ.

## **Abstract**

### **Development of a system of optimal control of Madneuli copper ore's flotation process**

The paper reviews the issues of building the optimal management system for Enrichment of Disseminated Copper Ores of Madneuli by Flotation Method.

Increase the efficiency of mineral processing contributes the development of the industry related fields. Reduction of product cost, adopting a quality product, complex and complete separation of useful components from ore, providing concentration conditioning and intensification of enriched process resulting from the enrichment make actual optimal management of technological processes of enrichment, elaboration and development of automated systems of the management of technological processes on enriching plants.

In order to optimize the technological process there is selected criteria which became the base of the development of the mathematical model of the technological process of copper flotation. It connects enrichment parameters to governing and disturbing quantities by considering the regularities of this process.

There has been built a mathematical model of the process there, on the base of which there are received functions of the purpose and restriction. They describe a multiple dependence of concentration quality and solution upon the number of reagents supplied to flotation cameras and disturbing impact, number and quality of the ore to be enriched.

Multiple and pairs analysis of the process let us to elaborate the management method, which considers several systems of local management – lime milk consumption or pH stabilization, regulation of butyl Xanthate and saponification consumption according to disturbing impacts.

The paper deals with the optimization task; technological optimization criterion is chosen which means adoption of maximal quantity of program quality concentrate with consideration of technological restrictions. A graphical version of linear programming method is used to solve this problem.

As a result of the optimization process there is formulated optimal control algorithm and rules of optimal control of reagents flow supplied in the process, which consider variability of disturbing impact. There is conducted continuous control (evaluation) of cooper content and number of ore according to the density of the pulp to be enriched there. There is built a functional structure of the management system; a controller is the main link of it. Solid points in the pulp as well as the content of useful component (cooper) are determined According to pulp density and signals received from sensors of volumetric flow in the first logical block. In the second logical block of the controller there is formatted the rule of optimal management according to the number and quality of the concentrate as well as realization of cascade management system, which means regulation of regents flow in different points considering internal technological transfer delay in flotation machine, which importantly reduces the adverse impact of this delay on quality indicators of transition process of the management system.

Computer program “Simulink” helped us to build a computer model of the process management system. There has been examined the nature of managing and managed values in case of variation of disturbing impacts and assigned concentration quality. Obtained results confirm the findings of the conducted research.