

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თ ი ნ ა თ ი ნ   რ ი გ ი შ ვ ი ლ ი

წარმოების ნარჩენი აირების გოგირდის  
დიოქსიდისგან გაწმენდა მანგანუმის ინფილტრაციული მადნებით

05. 17. 01. – არაორგანულ ნივთიერებათა ტექნოლოგია

დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ა

ტექნიკის მეცნიერებათა  
კანდიდატის სამეცნიერო ხარისხის  
მოსაპოვებლად

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: ტ. მ. დ., პროფესორი   ლ. გვასალია

ტ. მ. დ., პროფესორი   მ. მჭედლიშვილი

თბილისი

2006 წელი

## ს ა რ ჩ ე ვ ი

შესავალი.

**თავი I. ლიტერატურული მიმოხილვა.**

1.1 ზოგადი ცნობები ატმოსფეროს მდგომარეობის შესახებ.

1.2. ატმოსფეროს გოგირდის დიოქსიდით დაბინძურების ძირითადი წყაროები.

1.3. ნარჩენი აირების გოგირდის დიოქსიდისგან გაწმენდის მეთოდების მიმოხილვა.

1.3.1. აირების  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის სველი მეთოდები.

1.3.2. აირების  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის მშრალი მეთოდები.

1.4. აბსორბციის პროცესის მექანიზმი.

**თავი 2. კვლევის ობიექტებისა და მეთოდების მიმოხილვა.**

2.1. საკვლევი ობიექტის ზოგადი დახასიათება

2.2. მანგანუმის მადნის შერჩევა ნარჩენი აირების

$\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის მიზნით.

2.3 ჭიათურის მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის მოკლე დახასიათება.

2.4. ანალიზის მეთოდების და გამოყენებული ხელსაწყოების აღწერა.

**თავი 3. ექსპერიმენტული ნაწილი.**

3.1. ლაბორატორიული დანადგარის სქემა და გოგირდის დიოქსიდის განსაზღვრის მეთოდოლოგია.

3.2. ზოგიერთი ფაქტორის გავლენა მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირიდან  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის პროცესზე.

3.2.1 აბსორბციის პროცესზე ტემპერატურის გავლენა სხვადასხვა მოცულობითი სიჩქარეებისას.

3.2.2.  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის ხარისხის ტემპერატურაზე და პროცესის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების შესწავლა.

3.3. ნარჩენი აირების SO<sub>2</sub>-გან მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით გაწმენდის ოპტიმიზაცია.

3.4. მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირის SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის პროცესის კინეტიკის შესწავლა.

3.4.1 პროცესის მაღლიმიტირებელი სტადიის დადგენა..

3.4.2. მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხის ტემპერატურაზე და პროცესის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების დადგენა.

3.5 დაწვრილმანების ხარისხის გავლენის შესწავლა მანგანუმის ამოწვლილვის და SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის ხარისხზე.

3.6. მყარი:თხევადი თანაფარდობის გავლენა მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხზე.

3.7. ნამუშევარი სუსპენზიის და ხსნარის აორთქლება-კრისტალიზაციით მიღებული მანგანუმის სულფატის ქიმიური ანალიზი.

3.8. მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის პრინციპული ტექნოლოგიური სქემა.

**დასკვნები.**

**გამოყენებული ლიტერატურა.**

## **შ ე ს ა ვ ა ლ ი**

**თ ე მ ი ს ა ქ ტ უ ა ლ ო ბ ა :** სამრეწველო და საყოფაცხოვრებო საქმიანობით გამოწვეული ეკოლოგიური პრობლემა კაცობრიობისთვის ნომერ პირველ გლობალურ პრობლემად არის მიჩნეული. უახლოეს წარსულში გლობალური დათბობის შესახებ მსოფლიოს წამყვანი სამეცნიერო ცენტრების მიერ გაკეთებულ პროგნოზებს აშკარად გაუსწრეს მოვლენებმა და უკვე დღეს, სახეზე გვაქვს გლობალური დათბობის პირველი ნიშნები. სამრეწველო და საყოფაცხოვრებო საქმიანობით გარემოზე და მათ შორის ატმოსფერულ ჰაერზე მავნე ზემოქმედებამ მნიშვნელოვანი ასახვა პოვა როგორც დედამიწის მცენარეთა საფარის, ისე ადამიანთა ჯანმრთელობის მდგომარეობაზე. მნიშვნელოვნად შეიცვალა კლიმატი, გახშირდა ახალ-ახალი

დაავადებების გამოვლინება, მკურნალობის არსებულ მეთოდებს აღარ ემორჩილება ადრე კონტროლს დაქვემდებარებული ბევრი ცნობილი დაავადება, სწრაფი ტემპით იზრდება სიმსივნის სხვადასხვა ფორმით დაავადებულ ადამიანთა რიცხვი.

მომწამვლელი ნივთიერებებით ატმოსფეროს დამაბინძურებლებს შორის, თავისი მოცულობით, პირველი ადგილი უკავია გოგირდის დიოქსიდს. კარგად არის ცნობილი მისი მავნე ზემოქმედება დედამიწის ფლორასა და ფაუნაზე. ატმოსფეროში არნახული მასშტაბებით გატყორცნილი  $\text{SO}_2$  მჟავე წვიმების ერთ-ერთი ძირითადი მიზეზია, რომლებიც საფრთხეს უქმნიან არა მარტო ცოცხალ გარემოს, არამედ სამრეწველო და სამოქალაქო კონსტრუქციებს – იწვევენ მათ რღვევას და საექსპლუატაციო ვადების მნიშვნელოვნად შემცირებას. რომ არაფერი ვთქვათ არასრული ტექნოლოგიით გოგირდშემცველი წიაღისეულის გადამუშავებისას ატმოსფეროში გამავალი  $\text{SO}_2$ -ის რაოდენობაზე, მარტო თბოელექტრო-ცენტრალების ნამწვ აირებთან ერთად ატმოსფეროში გატყორცნილი  $\text{SO}_2$ -ის წლიური რაოდენობა 260 მლნ ტონას აჭარბებს. ეს ციფრი ორჯერ და მეტად აღემატება მსოფლიო მასშტაბით წარმოებულ გოგირდმჟავაზე დახარჯული  $\text{SO}_2$ -ის მოცულობას. იმის გამო, რომ დღემდე ვერ მოიძებნა ისეთი ალტერნატიული ნედლეული, რომელიც არსებითად შეამცირებდა მყარი, თხევადი თუ აირადი ნახშირბადოვანი სათბობის ენერგიის წყაროდ გამოყენებას, და რომელიც ყოველთვის შეიცავს გოგირდნაერთებს, დღის წესრიგიდან არ მოხსნილა  $\text{SO}_2$ -ით ატმოსფეროს გაჭუჭყიანების პრობლემა.

წარმოების ნარჩენი და ნამწვი აირების  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის მეთოდების უმრავლესობა ვერ უზრუნველყოფს აირის  $\text{SO}_2$ -გან ფაქიზ გაწმენდას; რიგ შემთხვევებში გამოიყენება გამწმენდი რეაგენტები, რომლებიც თვითონ არიან გარემოს მიმართ საფრთხის მატარებლები. ბევრი მათგანის სრული რეგენერაცია ან გაწმენდის შედეგად მასში აკუმულირებული გოგირდის უტილიზაცია შეუძლებელია, რაც დამატებით საფრთხეს უქმნის დედამიწაზე სასიცოცხლო გარემოს შენარჩუნებას.

აღნიშნულიდან გამომდინარე მიზანშეწონილია შეირჩეს აირების  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის ისეთი მეთოდები და გამწმენდი მასები, რომლებიც უზრუნველყოფენ აირების ფაქიზ გაწმენდას ერთი მხრივ და უნარჩენო ტექნოლოგიით აირში არსებული გოგირდის დიოქსიდის სასარგებლო კომპონენტად გარდაქმნას მეორე მხრივ. ამასთან

მიზანშეწონილია გამწმენდ მასად ადვილად ხელმისაწვდომი და იაფი რეაგენტების გამოყენება.

**ს ა მ უ შ ა ო ს მ ი ზ ა ნ ი :** პრობლემის გადასაჭრელად მიზნად დავისახეთ შეგვესწავლა ჭიათურის საბადოს მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირების SO<sub>2</sub>-გან ფაქიზი გაწმენდის პროცესი. დაგვედგინა, გაწმენდისას, მანგანუმის სულფატის მონოჰიდრატის ფორმით წყალში ხსნად ფორმაში გადასული მანგანუმის ამოწვლილვის შესაძლებლობა. დასახული მიზნის მისაღწევად საჭირო გახდა რიგი კომპლექსური საკითხების გადაწყვეტა: ჭიათურის საბადოს მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის ქიმიური და ნაწილობრივ ფაზური შედგენილობის გამოკვლევა, მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირების გაწმენდის ხარისხზე მოქმედი ფაქტორების გამოვლენა, გაწმენდის მაღალ ხარისხთან ერთად მანგანუმის მაღალი ხარისხით ამოღების პროცესზე მოქმედი ფაქტორების დადგენა და მისი რეკომენდაცია წარმოებაში დასანერგად.

**კ ვ ლ ე ვ ი ს მ ე თ ო დ ე ბ ი :** სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოების შესრულებისას გამოყენებულია კვლევის შემდეგი მეთოდები და აპარატურა:

- დერივატოგრაფია უნგრული წარმოების Q-1500 Q დერივა-ტოგრაფზე;
- ფოტოკოლორიმეტრია;
- ატომ-აბსორბციული განსაზღვრა (AS-3Karl Zeiss Jena);
- ქიმიური ანალიზის მოცულობითი და წონითი მეთოდები;
- მზა პროდუქტის შედგენილობის სახელმწიფო სტანდარტით გათვალისწინებული განსაზღვრის მეთოდები.

#### **მეცნიერული სიახლე:**

- პირველად შესწავლილია მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირების SO<sub>2</sub>-გან ფაქიზი გაწმენდის პროცესი;
- დადგენილია აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის ხარისხზე მოქმედი ფაქტორები;
- შესწავლილია აირებიდან ინფილტრაციული მადნის სუსპენ-ზიით გოგირდის დიოქსიდის აბსორბციის პროცესის კინეტიკა;
- დადგენილია, რომ მანგანუმის მადნებით აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის დროს შესაძლებელია ერთდროულად მანგანუმის სულფატის მონოჰიდრატის მიღება.

**ნ ა შ რ ო მ ი ს პ რ ა ქ ტ ი კ უ ლ ი ღ ი რ ე ბ უ ლ ე ბ ა :** მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის გამოყენებით შესაძლებელი გახდება წარმოების ნარჩენი და ნამწვი აირების გოგირდის დიოქსიდისგან ფაქიზი გაწმენდა. გაწმენდასთან ერთად შესაძლებელი გახდება აირებში არსებული გოგირდის დიოქსიდის უტილიზაცია და მისგან, მსოფლიო ბაზარზე მნიშვნელოვანი მოთხოვნილების მქონე პროდუქტის – მანგანუმის სულფატის მონოჰიდრატის მიღება. აირების გაწმენდის შემოთავაზებული ტექნოლოგია საინტერესოა იმიტაც, რომ გამწმენდი მასა არ მოითხოვს წინასწარ მექანიკურ თუ ქიმიურ გამდიდრებას.

**ნ ა შ რ ო მ ი ს ა პ რ ო ბ ა ც ი ა :** დისერტაციაში მოტანილი ძირითადი შედეგები მოხსენებული და განხილულია:

– მეხუთე რესპუბლიკურ კონფერენციაზე ქიმიაში (ქ. თბილისი, 2004).

– თეორიულად ორიენტირებულ ქიმიკოსთა II რესპუბლიკურ სამეცნიერო სემინარზე (ქ. თბილისი, 2005).

**პ უ ბ ლ ი კ ა ც ი ე ბ ი :** დისერტაციის ძირითადი მასალების მიხედვით გამოქვეყნებულია 3 სამეცნიერო შრომა და 2 სამეცნიერო კონფერენციის თეზისი.

**დ ი ს ე რ ტ ა ც ი ი ს ს ტ რ უ ქ ტ უ რ ა და მ ო ც უ ლ ო ბ ა :** სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, სამი თავის, დასკვნების და ციტირებული ლიტერატურის სიისგან, რომელიც შეიცავს 122 დასახელებას. სამუშაო წარმოდგენილია 118 ნაბეჭდ გვერდზე; მოიცავს 9 ნახაზს, 14 ცხრილს.

## **თავი I. ლიტერატურული მიმოხილვა**

### **ზოგადი ცნობები ატმოსფეროს**

#### **მდგომარეობის შესახებ**

დღეისთვის ქიმიური და ნავთობგადამამუშავებელი მრეწველობის, ტრანსპორტის სწრაფ განვითარებასთან ერთად ხორციელდება გარემოს ძლიერი დაბინძურება მავნე ნივთიერებებით, რაც იწვევს გარემოში არსებულ კანონზომიერებათა და ბუნების ცალკეულ ეკოლოგიურ ფაქტორთა შორის საუკუნეთა

მანძილზე ჩამოყალიბებულ თანაფარდობათა დარღვევას, ეს კი აძნელებს ბიოსფეროს სტაბილიზაციას [1-4].

ატმოსფერო ჟანგბადით ივსება ფოტოსინთეზის შედეგად. ტყეების გაჩეხვა, გაუდაბნობა, ამცირებს მწვანე საფარს და შესაბამისად ჟანგბადის გამოყოფასაც. ამასთანავე შეიქმნა ჟანგბადის გამომყოფი პროდუცენტების – მსოფლიო ოკეანეების ფიტოპლანქტონის რეალური და მნიშვნელოვანი შემცირების საშიშროება [5-8].

ჟანგბადის შემცირება შესაბამისად იწვევს ატმოსფეროში ნახშირორჟანგის დაგროვებას, რაც გამოიხატება პლანეტაზე საშუალო წლიური ტემპერატურის მატებაში [9-11].

საგანგაშოა მსოფლიო ოკეანეთა ნავთობითა და ნავთობპროდუქტებით დაბინძურება, მისი საერთო ზედაპირის 11/5 უკვე დაფარულია, რაც იწვევს ჰიდროსფეროს და ატმოსფეროს შორის აირად და წყალ მიმოცვლის დარღვევას [12-14].

ოზონის ხვრელის გაზრდით მზის სითბოს და სინათლესთან ერთად ჩვენ ვლბულობთ დიდი რაოდენობით სხვადასხვა გამოსხივებას, რომლისგანაც ზარალდება როგორც ცხოველთა სამყარო, ისე ადამიანები. ოზონის ხვრელის დარღვევა ხორციელდება სამრეწველო მავნე აირად ნარჩენთა ზემოქმედებით [15-17].

უკანასკნელ ათწლეულებში შეინიშნება “ფერადი” წვიმა, რომელიც თანაბრად უარყოფითად მოქმედებს როგორც ადამიანთა ჯანმრთელობაზე, ისე მცენარეთა სამყაროზე.

ამრიგად, ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს საკითხს წარმოადგენს ადამიანის საარსებო გარემოს დაბინძურებისგან დაცვა.

ატმოსფეროს გაჭუჭყიანებისგან დაცვის სხვადასხვა მეთოდების გამოყენების ეფექტურობა მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული ატმოსფეროს სხვადასხვა მინარევებით გაჭუჭყიანების დონეების და წყაროთა ცოდნაზე.

ატმოსფეროს გაჭუჭყიანების წყარო ორი სახისაა: ბუნებრივი და ხელოვნური (ანთროპოგენური)[18]. პირველს მიეკუთვნება ვულკანების მიერ ფერფლის და აირების ამოფრქვევა, ტყის და ველების ხანძრები, მარილებით გაჯერებული ზღვის შხეფები და ნისლი, ეროზირებული ნიადაგის მტვერი, უდაბნოთა წვრილი ქვიშა, კოსმოსური მტვერი და ა.შ.

მეორე წყაროს განეკუთვნება: მრეწველობა, საყოფაცხოვრებო ნარჩენები, ტრანსპორტი, ქიმიური ნარჩენები, რადიაციული ფონის ამაღლება. დღეისთვის ცნობილია, რომ ყველაზე უფრო მეტად ჰაერს აბინძურებს სამრეწველო წარმოება, კერძოდ, საწარმოების მიერ გამოყოფილი ნარჩენი აირები [19-20]. ამ მხრივ გამოირჩევა მეტალურგიული წარმოება.  $\text{SO}_2$ -ით ჰაერის გაჭუჭყიანების მნიშვნელოვანი წყაროა აგლომერაციული საწარმოები. კოქსოქიმიური საწარმო ჰაერს აჭუჭყიანებს მტვრით და აქროლადი ნაერთებით, ხოლო ფერადი მეტალურგიის გამონაყოფი აირები შეიცავს ტოქსიკურ მტვრისებურ ნივთიერებებს[21-25].

თბოელექტროცენტრალები და საქვაზე დანადგარები სათბობის წვის შედეგად ატმოსფეროში გამოყოფენ ნამწვ აირებს. გაჭუჭყიანების რაოდენობა დამოკიდებულია საწვავის ხარისხზე და სათბობის გამოსაყენებელ დანადგარზე. ქვანახშირის წარმოებაში გაჭუჭყიანების წყაროა ფუჭი ქანების ნაყარი და ტერიკონიკები, რომელთა შიგნითაც მიმდინარეობს თვითწვის ხანგრძლივი პროცესი. პირიტისა და ნახშირის წვის შედეგად გამოიყოფა გოგირდის დიოქსიდის და ნახშირბადის ჟანგეულები და ფისოვან ნივთიერებათა გამოხდის პროდუქტები [26-30].

ნავთობმომპოვებელი, ნავთობგადამამუშავებელი და ნავთობ- ქიმიური მრეწველობათა აირები დიდი რაოდენობით შეიცავს ნახშირწყალბადებს, გოგირდწყალბადს და სხვა არასასიამოვნო სუნის მქონე აირებს. ნავთობგადამამუშავებელ ქარხნებში მავნე აირთა გამოყოფა ძირითადად ხდება მოწყობილობათა არასრული ჰერმეტიზაციის შედეგად [31-34].

ქიმიურ საწარმოთა მავნე გამონაყოფებს წარმოადგენს ნახშირჟანგი, აზოტის ჟანგეულები, გოგირდის დიოქსიდი, ამიაკი, გოგირდწყალბადი, გოგირდნახშირბადი, ქრომის და ფთორის ნაერთები და ა.შ [35].

ცემენტის და საშენ მასალათა საწარმოები ატმოსფეროს აბინძურებენ მტვრით.

სასოფლო რაიონებში ძირითადი დაბინძურების წყარო არის მეცხოველეობის და მეფრინველეობის ფერმები, ხორცის დამზადების სამრეწველო კომპლექსები, ენერგეტიკული და თბური საწარმოები. ატმოსფეროს გაჭუჭყიანების წყაროებს მიეკუთვნება აგრეთვე პესტიციდების შესანახი საწყობები და მინდვრები, რომლებიც უნდა დამუშავდნენ მზამქიმიკატებით და სასუქებით [36].

რადიაქტიული ნივთიერებებით ატმოსფეროს დაბინძურება ხდება მათი მოპოვების, გადამუშავების და გამოყენების დროს [37].

როგორც აღვნიშნეთ, ატმოსფეროს დაბინძურება ასევე ხდება ტრანსპორტის გამონაბოლქვი აირებით. მანქანის გამონაბოლქვი აირი შეიცავს კანცეროგენულ ბენზოპირინს, ალდეჰიდებს. ბენზინში ტეტრაეთილტყვიის დამატებისას, რომელიც აქროლადობის გასაზრდელად ემატება, ავტომობილები გამონაბოლქვის სახით გამოყოფენ ტყვიის ოქსიდს, ქლორიდს, ნიტრატს, სულფატს [38-42].

ატმოსფეროს დაბინძურება არის პირველადი და მეორადი. პირველადს წარმოადგენს ქიმიური ნივთიერებები, რომლებიც უშუალოდ ხვდებიან ჰაერში. მეორადი დამაბინძურებლები წარმოიქმნება პირველადი დამაბინძურებლების გარდაქმნის შედეგად, ასევე მათი ჟანგბადთან, ოზონთან, ამიაკთან და წყალთან შეერთებით ულტრაიისფერი დასხივების შედეგად, უფრო ხშირად მეორადი დამაბინძურებლები უფრო მეტი ტოქსიკურობით ხასიათდებიან, ვიდრე პირველადი.

ატმოსფეროში არსებული პიროგენური ნივთიერებები არათანაბრადაა განაწილებული. უმეტეს ადგილას მათი რაოდენობა ზღვრულ დასაშვებ ნორმებს ცილდება. ამასთანავე ზოგიერთი ნივთიერების მცირე კონცენტრაციაც კი ძალიან მომწამვლელია.

მსოფლიოს მრავალი ქალაქისთვის (ლონდონი, ლოს-ანჯელესი, ტოკიო, რომი და სხვა) ნამდვილ უბედურებად იქცა ტოქსიკური ნისლი – სმოგი, რომელიც მძიმედ აზიანებს თვალებს და ფილტვებს, იწვევს ძლიერ დაავადებებს და სიკვდილსაც კი.

სმოგის წარმოქმნის საწინდარია ქალაქის თავზე ჰაერის ძლიერი გაჭუჭყიანება, მაგრამ სმოგის წარმოსაქმნელად სხვა ბუნებრივი პირობებია კიდევ საჭირო – სუსტი ქარი, ჰაერის შეკავება, ნისლი, მაღალი ტენიანობა ქმნის საშიშ მდგომარეობას [44, 45].

ატმოსფერული ჰაერის დაბინძურებისგან რადიკალური დაცვის რეალური გზებია: მავნე გამონაბოლქვების შემცირება ატმოსფეროში, წარმოებაში უნარჩუნო ტექნოლოგიური პროცესების დანერგვა, ტექნოლოგიური აირების გაწმენდის ეფექტური საშუალებების გამოყენება და ა.შ.

## 1.2. ატმოსფეროს გოგირდის დიოქსიდით დაბინძურების ძირითადი წყაროები

SO<sub>2</sub>-ის შემცველი ნარჩენი აირებით ატმოსფეროს დაბინძურების ძირითადი წყაროებია: მეტალურგიული წარმოება (შავი და ფერადი), თბოენერგეტიკული დანადგარები, სადაც იწვის გოგირდშემცველი სათბობი და ასევე ქიმიური მრეწველობა.

SO<sub>2</sub>-ის შემცველი ნარჩენი აირების შედარებით მნიშვნელოვან წყაროს წარმოადგენს სპილენძსადნობი წარმოება [46]. დღეისთვის სპილენძის მნიშვნელოვან ნაწილს ადნობენ გოგირდოვანი მადნისგან, რომელშიც გოგირდის შემცველობა 10-15-ჯერ აღემატება სპილენძის შემცველობას. სპილენძს ადნობენ გოგირდოვანი მადნიდან ძირითადად ორი მეთოდით - ვატერჟაკეტული და არეკვლითი დნობით.

ვატერჟაკეტული დნობისას ნატეხ მადანს, რომელიც ძირითადად შედგება ორგოგირდოვანი რკინისა და მხოლოდ 3.8%-მდე სპილენძის გოგირდოვანი ნაერთისგან, გამოწვავენ ვატერჟაკეტულ ღუმელში.

ვატერჟაკეტულ ღუმელში თითქმის მთელი გოგირდი იწვის და გამოიყოფა SO<sub>2</sub>-ის ნარჩენი აირის სახით, გოგირდის მცირე ნაწილი რჩება შტეინში, რომელსაც ღუმელიდან უშვებენ გამდნარი სახით და ახდენენ შტეინის ჰაერით გაქრევას კონვექტორში, რის შედეგადაც იწვის ნარჩენი გოგირდი და მიიღება ე.წ. შავი სპილენძი. 85%-მდე გოგირდი გადადის ვატერჟაკეტულ აირში და 7-10% კონვექტორულში. გოგირდის დანარჩენი (5-8%) გადადის შლამში და მტვერში.

ვატერჟაკეტულ აირში SO<sub>2</sub>-ის შემცველობა დამოკიდებულია მადანში გოგირდის შემცველობაზე და აირის აღების ადგილზე.

სპილენძის დნობის მეორე მეთოდი არის არეკვლითი დნობა. ამ მეთოდის გამოყენებისას დაწვრილმანებული მადანი წინასწარ განიცდის ფლოტაციურ გამდიდრებას. მიღებულ სპილენძის კონცენტრატს 30-40% გოგირდის შემცველობით, სპილენძის გამოყოფის მიზნით გამოწვავენ მექანიკურ ღუმელებში. ნამწვი აირი შეიცავს 5-7% გოგირდის დიოქსიდს და 8-12% O<sub>2</sub>-ს.

ღუმლიდან გამომავალი ნამწვი აირის ტემპერატურაა 600-700°C. არეკვლითი ღუმელებიდან აირში გადასული გოგირდის დიოქსიდის რაოდენობა შეადგენს მთელი გოგირდის 5%-ს.

მეტალური თუთია მიიღება გოგირდოვანი თუთიის მადნისგან, რომელიც შეიცავს სხვა მეტალებსაც (სპილენძი, ტყვია). მადანი განიცდის ფლოტაციურ გამდიდრებას.

მიღებულ თუთიის კონცენტრატში გოგირდის შემცველობა 26-33%. ასეთ კონცენტრატს გამოწვავენ მექანიკურ ღუმელებში, რომელიც ისევეა მოწყობილი როგორც კოლჩედანის გამოწვისას.

თუთიის საწარმოს აირები გადამუშავდებიან გოგირდმჟავად.

თუთიის წარმოებისას მიღებულ გამავალ აირში გოგირდის დიოქსიდის შემცველობა ნაკლებია, ვიდრე სპილენძის წარმოებისას.

იმ შემთხვევაში, როცა საჭიროა წვრილმანი ნატეხი მასალის მიღება, მაშინ მას შეაცხოვენ ე.წ. აგლომერაციულ მანქანებში.

აგლომერაციულ მანქანებში შეგვიძლია მივიღოთ სხვადასხვა შედგენილობის აირი. შედარებით კონცენტრირებული გოგირდოვანი აირი მიიღება გამოწვის დასაწყისში ერთ კამერაში, უფრო განზავებული-მეორეში, ხოლო კიდევ უფრო განზავებული მესამე კამერაში.

თუთიის კონცენტრატის გამოწვისას აგლომერაციული მანქანის აირში  $\text{SO}_2$ -ის შემცველობა ასეთია

კონცენტრირებული აირი \_ 4-6%

საშუალოდ განზავებული \_ 0.5-3%

ძალიან განზავებული \_ 0.4%-მდე

აირის ტემპერატურაა 200 - 250°C.

ტყვიის გამოდნობისთვის გოგირდოვანი ტყვიის კონცენტრატს გამოწვავენ აგლომერაციულ ლენტში, შემდეგ შახტურ ღუმელში.

შახტური ღუმელის აირი შეიცავს დაახლოებით 0.5%  $\text{SO}_2$ -ს.

ნიკელის წარმოებისას გოგირდის მადნიდან გოგირდის ძირითადი მასა იწვის კონვერტორში. დანარჩენი აგრეგატებიდან მიიღება შედარებით უფრო განზავებული გოგირდოვანი აირი.

ცალკეულ აპარატებში აირში  $\text{SO}_2$ -ის პროცენტული შემცველობა მოცემულია ცხრილში <sup>11</sup>

ცხრილი №1

ღუმლის ტიპი	SO <sub>2</sub> -ის შემცველობა, %
ვატერჟაკეტულ ღუმელში	0.65-1.35
ძირითად კონვერტორში	3.0-12
არეკვლით ღუმელში	0.2-0.35
გამოწვის ღუმელში	0.55-2.2
ელექტროღუმელში	3.5

SO<sub>2</sub>-ის შემცველი ნარჩენი აირები მიიღება ასევე სხვა მეტალთა მაგ: დარიშხანის, მოლიბდენის, ვერცხლისწყლის, კობალტის და ა.შ. გამოდნობისას, თუმცა ასეთი წყაროს მნიშვნელობა მცირეა.

სამრეწველო საწარმოებიდან ატმოსფეროში გატყორცნილი აირები SO<sub>2</sub>-ს შეიცავენ განსხვავებული რაოდენობით. აირებს 5-7%-მდე SO<sub>2</sub>-ის შემცველობით ეწოდებათ მდიდარი აირები, რომლებიც შეიძლება უშუალოდ გამოვიყენოთ გოგირდმჟავის წარმოებაში (მაგ: ფერადი მეტალურგიის აირები). აირებს, 4%-მდე SO<sub>2</sub>-ის შემცველობით ეწოდებათ ღარიბი. მათ მიეკუთვნება სპილენძსადნობი ქარხნის ამრეკლ ღუმელებში მიღებული აირები, ასევე შავი და ფერადი მეტალურგიის აგლომერაციული გამოწვის აირები (0.5-2.5%). ამ ჯგუფს მიეკუთვნება აგრეთვე ნამწვი აირები 0.3-0.5% SO<sub>2</sub>-ის შემცველობით, რომლებიც მიიღება გოგირდშემცველი სათბობის წვისას.

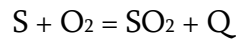
დღეისთვის ატმოსფეროს SO<sub>2</sub>-ით დაბინძურების ძირითადი წყაროა თბოელექტროსადგურები. თბოელექტროსადგურების ნამწვი აირებიდან ატმოსფეროში ყოველწლიურად ხვდება დაახლოებით 262 მლნ. ტ SO<sub>2</sub> და 1,2 მლნ. ტ NO<sub>x</sub> [47-49]. თბოელექტროსადგურებში ნამწვი აირები მიიღება საცეცხლეში სხვადასხვა ტიპის სათბობის წვისას. სათბობი სამი სახისაა: მყარი, თხევადი და აირადი. მათში გოგირდი არის ორგანული, პირიტული და სულფატური სახით.

მყარ სათბობში გოგირდი სულფიდური სახითაა, რომელიც შედის რკინის კოლჩედანის შემადგენლობაში (FeSO<sub>2</sub>) და სხვა გოგირდოვან ნაერთებში.

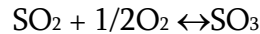
აირად საწვავში გოგირდი იმყოფება გოგირდწყალბადის, ნაწილობრივ გოგირდნახშირბადის და სხვა ორგანული ნაერთების სახით.

ნავთობში განსაზღვრულია დაახლოებით 250 ინდივიდუალური გოგირდის ნაერთები. ამ ნაერთებში არსებული გოგირდი მიეკუთვნება ორგანულს.

სათბობის წვისას მასში არსებული გოგირდი იჟანგება ძირითადად გოგირდის დიოქსიდის წარმოქმნით



ძალიან მცირე რაოდენობით წარმოიქმნება გოგირდის ტრიოქსიდი. თერმოდინამიკური წონასწორობა  $SO_2$  და  $SO_3$ -ს შორის განისაზღვრება რეაქციით:



გამოკვლევების შედეგებიდან ირკვევა, რომ სათბობში არსებული გოგირდის 98-99% გარდაიქმნება  $SO_2$ -ად, ხოლო 1%-მდე  $SO_3$ -ად.

ნამწვ აირებში  $SO_2$ -ის შემცველობა დამოკიდებულია სათბობის ხარისხზე და მასში გოგირდის შემცველობაზე. სხვადასხვა სათბობში გოგირდის შემცველობა მერყეობს ფართო ზღვრებში. მაგ: თხევად სათბობში 0.05-0.015-დან (ნავთი) 3.5%-მდე (მაზუთი); ქვანახშირში 0.5-დან 6%-მდე; ანთრაციტში-2%-მდე და ა.შ.

ნარჩენი აირები  $SO_2$ -ის მცირე შემცველობით მიიღება ასევე სხვადასხვა საწარმოებიდანაც. მაგ: გოგირდმჟავის წარმოების კონტაქტური აირები, რომლებიც მიიღება გოგირდმჟავის წარმოებისას საკონტაქტო აპარატში  $SO_2$ -ის  $SO_3$ -ად გარდაქმნისას და  $SO_3$ -ის შთანთქმისას, რადგანაც არცერთი პროცესი სრულყოფილად არ ხორციელდება.

მინის წარმოების ნარჩენი აირები. მინის წარმოებაში სოდას ეკონომიის მიზნით ცვლიან ნატრიუმის სულფატით. მინის ხარშვის პროცესში ნატრიუმის სულფატიდან გოგირდი გადადის ნარჩენ აირში  $SO_2$ -ის სახით. თუ სოდის 50-70%-ს ნატრიუმის სულფატით შევცვლით, მაშინ ნარჩენ აირში  $SO_2$ -ის შემცველობა აღწევს 0.25-0.3%-ს.

ასევე გარკვეული რაოდენობის გოგირდის დიოქსიდს შეიცავს ულტრამარინის საწარმოს ნარჩენი აირები. აირები  $SO_2$ -ს შეიცავს 1-2%-მდე და გოგირდწყალბადს – მინარევის სახით და ა.შ [50].

### 1.3. ნარჩენი აირების გოგირდის დიოქსიდისგან გაწმენდის მეთოდების მიმოხილვა

სამრეწველო და ნარჩენი აირების გოგირდის დიოქსიდისგან გაწმენდის მეთოდების შერჩევა დამოკიდებულია გასაწმენდი აირის ტემპერატურაზე,

ტენიანობაზე, თვითონ აირში გოგირდის დიოქსიდის კონცენტრაციაზე, ასევე აირში სხვა მინარევების არსებობაზე, ადგილობრივ პირობებზე. მეთოდის არჩევისას აუცილებელია მხედველობაში მივიღოთ წარმოების მასშტაბი, ადგილობრივი ნედლეულის არსებობა, რომელიც საჭიროა მშთანთქმელი ხსნარის მოსამზადებლად და გაწმენდის შედეგად მიღებული პროდუქტის მოთხოვნილება.

არსებობს აირების გოგირდის დიოქსიდისგან გაწმენდის სველი და მშრალი მეთოდები.

### 1.3.1. აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის სველი მეთოდები

აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის სველი მეთოდები იყოფა სამ ძირითად ჯგუფად [51-54]:

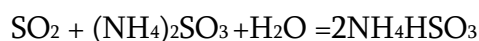
1) ამიაკური მეთოდები – აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდისას ერთდროულად მიიღება ამონიუმის სულფიტი და ბისულფიტი, რომლებიც გამოიყენება როგორც სასაქონლო პროდუქტი, ან შლიან მჟავით მაღალკონცენტრული SO<sub>2</sub>-ის და შესაბამისი მარილის წარმოქმნით.

2) ნეიტრალიზაციის მეთოდი – ამ დროს მიიღება სულფიტი და სულფატი.

3) კატალიზური მეთოდი – დაფუძნებულია SO<sub>2</sub>-ის დაჟანგვაზე კატალიზატორის არსებობისას განზავებული გოგირდმჟავის მიღებით.

1) აირების გაწმენდა SO<sub>2</sub>-გან ამიაკური მეთოდით [55].

ამიაკური მეთოდით ნარჩენი აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდა ეფუძნება 25-30°C ტემპერატურაზე SO<sub>2</sub>-ის ამონიუმის სულფიტ-ბისულფიტის წყალხსნართან ურთიერთქმედებაზე რეაქციის განტოლებებით:



გოგირდის დიოქსიდის მშთანთქმელად ამიაკური წყლის გამოყენებას სხვა მშთანთქმელებთან შედარებით (მწვავე ნატრიუმი, სხვადასხვა ტუტე წყალხსნარები) ახასიათებს თავისებურება, რაც ამიაკის აქროლადობაში გამოიხატება.

თუ  $\text{SO}_2$ -ის შემცველ აირს გავატარებთ ამიაკურ წყალში, მაშინ გახსნილი ამიაკის ნაწილს წარიტაცებს გამავალი აირი და აირად ფაზაში შთანთქმულ გოგირდის დიოქსიდთან მისი ურთიერთქმედებით წარმოიქმნება ნისლი. თუ პირიქით,  $\text{SO}_2$ -ის წყალხსნარს დავამატებთ აირად ამიაკს, მაშინ  $\text{SO}_2$ -ის და  $\text{NH}_3$ -ის თანაფარდობაზე დამოკიდებულებით ხსნარში წარმოიქმნება  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  და  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$ ; სანამ ამიაკის წნევა ხსნარზე მცირეა ნისლი არ წარმოიქმნება.

გოგირდის დიოქსიდის და ამიაკის წნევა ხსნარზე საშუალო და მჟავა მარილების კონცენტრაციათა თანაფარდობაზე დამოკიდებულებით მნიშვნელოვან ზღვრებში იცვლება. საჭიროა ისე შეირჩეს ეს თანაფარდობა, რომ  $\text{SO}_2$ -ის და  $\text{NH}_3$ -ის პარციალური წნევები იყოს უმნიშვნელო და ასეთი ხსნარით უკვე შესაძლებელია  $\text{SO}_2$ -ის შთანთქმა ამიაკის დანაკარგის გარეშე.

თუ ხსნარს ამიაკს დავამატებთ მუდმივად ისეთი თანაფარდობით, რომ საშუალო და მჟავა მარილების თანაფარდობა იცვლებოდეს სასურველ ზღვრებში, მაშინ  $\text{SO}_2$ -ის შთანთქმის შედეგად მარილების საერთო შემცველობა გაიზრდება და შეიძლება ნაჯერი ხსნარის და აგრეთვე კრისტალური ამონიუმის სულფატის მიღება.

ყოველივე ზემოთქმულიდან გამომდინარე აირთა ნარევიდან  $\text{SO}_2$ -ის შთანთქმისათვის იყენებენ არაპირდაპირ ამიაკურ წყალს, არამედ განსაზღვრული თანაფარდობის მქონე  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$  და  $\text{NH}_4\text{HSO}_3$  ხსნარს.

ასევე ამიაკის დანაკარგის თავიდან ასაცილებლად აბსორბერში ტემპერატურა არ უნდა აღემატებოდეს  $35^\circ\text{C}$ -ს.

მიღებული ამონიუმის ბისულფიტი განიცდის დაშლას – მჟავურ, ავტოკლავერ-ციკლური ან არაციკლური მეთოდებით.

ამიაკურ-მჟავური მეთოდი არის შედარებით ეკონომიური, მაგრამ საჭიროებს დეფიციტური პროდუქტის – ამიაკის ხარჯს. ასე მიღებული მარილი და გოგირდის დიოქსიდის სასაქონლო პროდუქტი ყოველთვის ვერ აკომპენსირებს გაწმენდაზე გაწეულ ხარჯს.

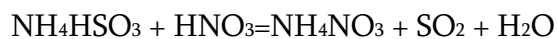
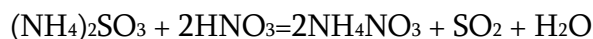
ამონიუმის ბისულფიტის დაშლა ხორციელდება გოგირდის, აზოტის ან ფოსფორის მჟავებით და წარმოიქმნება სასაქონლო გოგირდის დიოქსიდი და ამონიუმის მარილი.

ამიაკურ-გოგირდმჟავური მეთოდით ამონიუმის ბისულფიტის ხსნარი, რომელიც შეიცავს მცირე რაოდენობით სულფიტს, მუშავდება გოგირდმჟავით 100% SO<sub>2</sub>-ის და ამონიუმის სულფიტის წარმოქმნით რეაქციის განტოლებით:



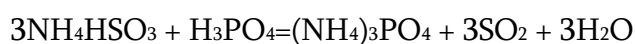
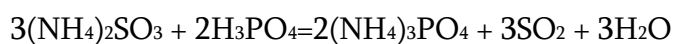
მიღებული SO<sub>2</sub>-ის დაახლ. 50% გადამუშავდება გოგირდმჟავად და უკან ბრუნდება ციკლში ბისულფიტის დასაშლელად, ხოლო დანარჩენი 50% შეიძლება გადამუშავდეს გოგირდად, გოგირდმჟავად ან გამოყენებულ იქნას თხევადი SO<sub>2</sub>-ის მისაღებად. დანადგარების ნორმალური მუშაობის აუცილებელ პირობას წარმოადგენს აირების წინასწარი გაწმენდა. აირში გოგირდმჟავის ნისლის არსებობას მივყავართ ამონიუმის სულფატის აეროზოლის წარმოქმნამდე, რომლის დაჭერა ძნელია აბსორბერებში და ელექტროფილტრებზე. ამიტომ წინასწარ უნდა განხორციელდეს აირების გაწმენდა გოგირდმჟავის ნისლის და წვეთებისგან ელექტროფილტრებზე.

ამიაკურ-აზოტმჟავური მეთოდი. ნარჩენი აირების გაწმენდა SO<sub>2</sub>-გან წარმოებს სულფიტ-ბისულფიტის ხსნარით, რომლის შემდეგაც მიღებული ხსნარი იშლება აზოტმჟავით რეაქციათა განტოლებების მიხედვით:

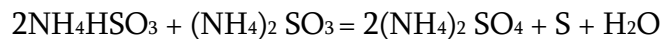


ამ რეაქციების შედეგად მიიღება სასაქონლო SO<sub>2</sub> და ამონიუმის გვარჯილა, რომელიც გამოიყენება სასუქად.

ამიაკურ-ფოსფორმჟავური მეთოდი. ამ მეთოდის გამოყენებისას წარმოიქმნება ფოსფორის სასუქები და SO<sub>2</sub>, რომლის გადამუშავება შესაძლებელია გოგირდმჟავად. ამონიუმის სულფიტ-ბისულფიტის დაშლა ფოსფორმჟავით ხორციელდება რეაქციათა განტოლებებით:



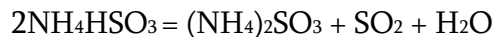
ამიაკურ-ავტოკლავური მეთოდი. გოგირდის დიოქსიდი აბსორბირდება ამონიუმის სულფიტ-ბისულფიტის ხსნარით. ხსნარში მარილის განსაზღვრული კონცენტრაციის მისაღწევად მას შლიან. ამიაკურ-მჟავური მეთოდისგან განსხვავებით სულფიტ-ბისულფიტის ხსნარის დაშლა წარმოებს მჟავით, ხოლო გახურება ხდება ავტოკლავში 140-150°C-მდე. ამონიუმის მარილის დაშლა მჟავა არეში ხორციელდება რეაქციის განტოლებით:



სამრეწველო აირებისთვის, რომლებიც არ შეიცავენ ამიაკს, ამ მეთოდის გამოყენება მოითხოვს დიდი რაოდენობით ამიაკის ხარჯს, ვიდრე მჟავური მეთოდისას.

ამ მეთოდით მიღებული ამონიუმის სულფატი და გოგირდი გამოიყენება როგორც სასაქონლო პროდუქტები.

ამიაკურ-ციკლური მეთოდი. ციკლური მეთოდით ბისულფიტის ხსნარი განიცდის გახურებას, რის შედეგადაც მიიღება სულფიტი და 100% SO<sub>2</sub>, სულფიტით გამდიდრებული ხსნარი კვლავ ბრუნდება ციკლში შთანთქმისათვის



ამონიუმის სულფიტი ნაწილობრივ იჟანგება ნარჩენ აირებში არსებული ჟანგბადით ამონიუმის სულფატამდე და გროვდება საცირკულაციო ხსნარში. ხსნარიდან სულფატის ნაწილის გამოყოფისთვის ხსნარი უწყვეტად ან პერიოდულად გამოიყვანება ციკლიდან, აორთქლებენ სულფატის კრისტალების გამოყოფის მიზნით, ხოლო ხსნარი კვლავ ბრუნდება ციკლში.

ფერადი მეტალურგიის ნარჩენი აირების ციკლური მეთოდით გაწმენდისთვის, რომელიც ყოველთვის შეიცავს სელენს და დარიშხანს, აუცილებელ პირობას წარმოადგენს ამ ელემენტებისგან აირების გულმოდგინე გაწმენდა, რადგან მათი არსებობისას შესაძლებელია ხსნარის თვითდაშლა თაბაშირ-სულფიტის, ტრიტიონატის, ამონიუმის სულფატის და გოგირდის წარმოქმნით. მაგრამ აირის სელენისგან გაწმენდისას ასევე შესაძლებელია სელენის ბისულფიტის ხსნარში ნაწილობრივი მოხვედრა, ამიტომ პროდუქტის თვითდაშლის კონცენტრაციის

შეზღუდვისთვის საჭიროა ციკლიდან ხსნარის ნაწილის გამოყვანა. უფრო მიზანშეწონილია გამოსული ხსნარი გადამუშავდეს სულფატად და გოგირდად ავტოკლავური მეთოდით.

ამრიგად, ციკლური მეთოდით ნარჩენი აირების გაწმენდისას მიიღება 100% SO<sub>2</sub> და ამონიუმის სულფატი. გაწმენდის პროცესში ამიაკის დანაკარგი ანაზღაურდება მისი დამატებით.

ამიაკური მეთოდის განხილული ვარიანტებიდან უფრო მიზანშეწონილია ციკლური მეთოდის გამოყენება, რადგანაც საშუალებას იძლევა ამიაკის მინიმალური დანახარჯით მივიღოთ 100% SO<sub>2</sub>.

ამიაკური მეთოდი გამოიყენება იმ სამრეწველო აირების გასაწმენდად, რომლებიც გოგირდის დიოქსიდს შეიცავენ არანაკლებ 0,2%-სა, გაწმენდის შემდეგ აირში SO<sub>2</sub> რჩება 0.03-0.05%-მდე შემცველობით. ამ მეთოდით უფრო გულმოდგინე გაწმენდა მიზანშეწონილია, რადგანაც მნიშვნელოვნად რთულდება გაწმენდის ტექნოლოგიური სქემა და იზრდება დანახარჯები, მათ შორის ხარჯვის კოეფიციენტი, ორთქლის ხარჯი ხსნარის რეგენერაციაზე და სხვა.

ამიაკური მეთოდის გამოყენებისას, SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის შემდეგ აირები აუცილებელია გაცივდეს 30-35°C-მდე. ნამწვი აირებისთვის, რომლებიც დიდი რაოდენობით გაიტყორცნება ელექტროსადგურებიდან ეს პროცესი რთულდება. ამიაკურ მეთოდს გააჩნია შემდეგი უპირატესობები:

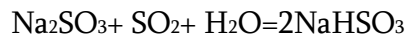
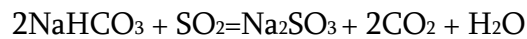
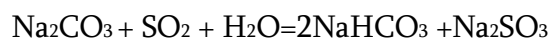
ტექნოლოგიური სქემა მარტივია; დანადგართა ექსპლოატაცია არ იწვევს სადგურზე ტვირთბრუნვის გაზრდას; ყველა პროცესი მიმდინარეობს თხევად ფაზაში, რაც ავტომატური რეგულირების საშუალებას იძლევა და მომსახურე პერსონალის რაოდენობაც დიდი არ არის.

მაგრამ ამ მეთოდს ნაკლოვანებებიც გააჩნია: ტექნოლოგიური პროცესი საჭიროებს მჭიდრო კონტროლს ამიაკის დანაკარგის თავიდან ასაცილებლად; თითქმის ყველა რგოლურ ტექნოლოგიურ პროცესში აირებს და სითხეს აქვს მჟავა რეაქცია, რაც იწვევს აპარატურის ანტიკოროზიული მასალისგან დამზადების აუცილებლობას; ნამწვი აირის გაწმენდის ხარისხი SO<sub>2</sub>-გან ლიმიტირდება ტექნოლოგიური პროცესით და დამოკიდებულია ატმოსფერულ პირობებზე, გარემო

ჰაერის ტემპერატურაზე და ტენიანობაზე; ნამწვი აირების გაწმენდის შემთხვევაში ყველა ნაგებობა აუცილებელია განთავსდეს ელექტროსადგურის ტერიტორიაზე.

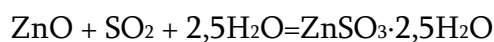
2) აირების გაწმენდა  $\text{SO}_2$ -ის ნეიტრალიზაციით [56-61].

სოდის მეთოდი დაფუძნებულია  $\text{SO}_2$ -ის სოდის ხსნარით შთანთქმაზე. ბისულფიტის წარმოქმნის პროცესი რამოდენიმე სტადიად მიმდინარეობს, წარმოიქმნება ბიკარბონატი და სულფიტი

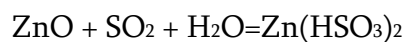


აირში 0,3%-ზე ნაკლები გოგირდის დიოქსიდის შემცველობისას  $\text{SO}_2$ -ის სასაქონლო პროდუქტად მიღება გამწვანებულია, რადგანაც პარალელურად მიმდინარეობს  $\text{NaHSO}_3$ -ის დაჟანგვა თხევად ფაზაში. ამ შემთხვევაში ხსნარი აუცილებლად უნდა გაჯერდეს  $\text{SO}_2$ -ით.

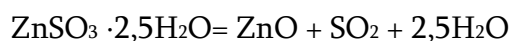
თუთიის მეთოდი. ამ მეთოდით აირიდან  $\text{SO}_2$  შთანთქმება თუთიის ოქსიდის სუსპენზიით. ეს პროცესი ხორციელდება რეაქციათა განტოლებებით:



აირში  $\text{O}_2$ -ის მაღალი კონცენტრაციისას



წარმოქმნილი თუთიის სულფიტი წყალში უხსნადია და სითხიდან მისი კრისტალები ნალექის სახით გამოიყოფა ფილტრაციით ან ცენტრიფუგირებით, შემდეგ გამოაშრობენ და გამოწვავენ  $350^\circ\text{C}$  ტემპერატურაზე. თუთიის სულფიტი იმლება



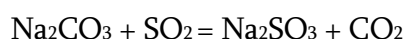
თუთიის ოქსიდი ბრუნდება მშთანთქმელ ციკლში, ხოლო  $\text{SO}_2$  გამოიყოფა პროდუქტის სახით. ამ მეთოდის ღირსება ისაა, რომ გაწმენდის პროცესი შესაძლებელია ჩატარდეს  $200-250^\circ\text{C}$  ტემპერატურაზე, უარყოფითი მხარე –

წარმოიქმნება თუთიის სულფატი, რომლის რეგენერაცია ეკონომიურად გაუმართლებელია, რადგანაც საჭიროა მისი სისტემიდან უწყვეტად გამოყვანა და ექვივალენტური რაოდენობის თუთიის ოქსიდის დამატება. შესაძლებელია თუთიის სულფატის სხვადასხვა მეთოდით გადამუშავება.

- ა) თუთიის სულფატის მზა პროდუქციის და თხევადი SO<sub>2</sub>-ის სახით გამოშვება;
- ბ) მხოლოდ თხევადი SO<sub>2</sub>-ის მზა სახით გამოშვება;
- გ) გოგირდმჟავის მიღება.

შედარებით უფრო მარტივია პირველი მეთოდი და იმ შემთხვევაში გამოიყენება, თუ შესაძლებელია თანამდევი პროდუქტის – თუთიის სულფატის რეალიზაცია. მეორე მეთოდი მოითხოვს დამატებით აპარატურას თუთიის სულფატის რეგენერაციისათვის მისი ჟანგბადით და კირის რძით დამუშავებისას. გამოყოფილი თუთიის ოქსიდი ბრუნდება სისტემაში მშთანთქმელი ხსნარის მოსამზადებლად. მესამე ვარიანტის მიხედვით თუთიის სულფატი განიცდის თერმულ დისოციაციას ღუმელში ჭარბი ჟანგბადის არსებობისას და ამასთანავე ლებულობენ აირს, რომელიც გოგირდმჟავის მისაღებად გამოიყენება.

სოდა-თუთიის მეთოდი. ამ მეთოდის ღირსებაა არააქროლადი ქემოსორბენტების გამოყენება, რომელთაც მაღალი შთანთქმითი უნარი გააჩნია. ამ მეთოდის გამოყენება შესაძლებელია ნებისმიერი SO<sub>2</sub>-ის კონცენტრაციის აირის გასაწმენდად. SO<sub>2</sub>-ის სოდის ხსნარით აბსორბციისას მიიღება ნატრიუმის სულფიტი და ბისულფიტი

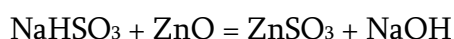


ნატრიუმის ჰიდროქსიდით აბსორბციისას ასევე წარმოიქმნება სულფიტ-ბისულფიტური ხსნარები.

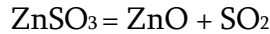
აირები შედიან რეაქციაში სულფიტთან და ბისულფიტთან, რის შედეგადაც ბისულფიტის შემცველობა იზრდება



წარმოქმნილი ხსნარი ურთიერთქმედებს თუთიის ოქსიდთან

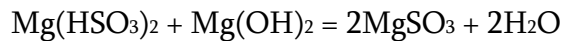
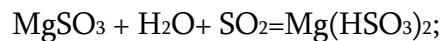
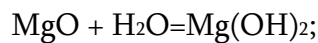


მიღებულ თუთიის სულფიტს გამოწვავენ



გოგირდის დიოქსიდს გადაამუშავებენ გოგირდმჟავად ან გოგირდად, ხოლო თუთიის ოქსიდი ბრუნდება ციკლში.

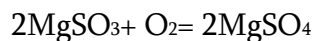
მაგნეზიტური მეთოდი. ამ შემთხვევაში გოგირდის დიოქსიდის შთანთქმა ხდება მაგნიუმის ოქსიდ-ჰიდროქსიდით. ქემოსორბციის პროცესში წარმოიქმნება წყალში ცუდად ხსნადი მაგნიუმის სულფიტი. აბსორბერში მიმდინარეობს შემდეგი რეაქციები:



მაგნიუმის სულფიტის წყალში ხსნადობა შეზღუდულია, მისი სიჭარბისას ნალექში იყოფა  $\text{MgSO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  და  $\text{MgSO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  სახით.

კრისტალური მაგნიუმის სულფიტი მიემართება საშრობში და გამოწვავზე, სადაც  $1000-1100^\circ\text{C}$  ტემპერატურაზე, წარმოიქმნება  $\text{SO}_2$  და მაგნიუმის ოქსიდი. მაგნიუმის ოქსიდი ბრუნდება ციკლში, ხოლო  $\text{SO}_2$  გადაამუშავდება გოგირდმჟავად.

მაგნიუმის სულფიტის ნაწილი ჟანგბადის მოქმედებით იჟანგება სულფატამდე:



საწყის მომენტში თითქმის მთელი შთანთქმული გოგირდის დიოქსიდი იჟანგება  $\text{MgSO}_4$ -ის წარმოქმნით.  $\text{SO}_4^{2-}$  იონის დაგროვების შედეგად დაჟანგვა ნელდება და დაგროვებას იწყებს  $\text{MgSO}_3$ .  $0.2-0.3\%$   $\text{SO}_2$ -ის შემცველი აირის გაწმენდისას იჟანგება საშუალოდ შთანთქმული  $\text{SO}_2$ -ის  $15\%$ , დასაჟანგი  $\text{SO}_2$ -ის რაოდენობა იზრდება ხსნარის სიმჟავის გაზრდით. ეს იმით აიხსნება, რომ უფრო მჟავა ხსნარებში შესაძლებელია დიდი რაოდენობით რკინის იონების არსებობა, რომელიც კატალიზურად მოქმედებს.

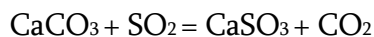
მაგნიუმის სულფატს არ შეუძლია  $\text{SO}_2$ -ის შთანთქმა, ხოლო მისი დაშლისთვის მაღალი ტემპერატურაა საჭირო ( $1200-1300^\circ\text{C}$ ), ამიტომ  $\text{MgSO}_4$ -ის შესამცირებლად ხსნარში უმატებენ  $0,005-0,01\%$  ინჰიბიტორს *n*-ფენილდიამინს. როცა მაგნიუმის სულფატის შემცველობა ხსნარში აღწევს  $120-160$  გ/ლ, სულფიტის დაჟანგვა მცირდება.

საწვავი ღუმელიდან გამომავალ აირში SO<sub>2</sub>-ის კონცენტრაცია 13%-მდეა. ეს აირი 7%-მდე განზავების შემდეგ შეიძლება გამოვიყენოთ კონტაქტური მჟავის მისაღებად.

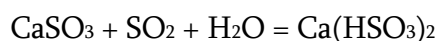
მაგნიზიტური მეთოდის ღირსებაა: წინასწარი გაციების გარეშე მაღალი ტემპერატურის მქონე აირების გაწმენდა; რეკუპერაციით პროდუქტის სახით გოგირდმჟავის მიღება; ქემოსორბენტი არადეფიციტურია და იაფი; გაწმენდის მაღალი ეფექტურობა; აირის გაწმენდის პროცესში არ წარმოიქმნება ძლიერ აგრესიული ნივთიერებები, ამიტომ პროცესში გამოყენებული აპარატები დამზადებულია არამჟავაგამძლე მასალისგან.

ხოლო ნაკლოვანებებია: რთული ტექნოლოგიური სქემა; მაგნიუმის სულფატის გამოწვისას არასრული დაშლა; რეგენერაციისას მაგნიუმის ოქსიდის მნიშვნელოვანი დანაკარგი; მაგნიუმის სულფატის შრობაზე და დაშლაზე სათბობის მნიშვნელოვანი დანახარჯი და ა.შ.

კირქვის მეთოდი. ეს მეთოდი ემყარება აირიდან კირის ან კირქვის სუსპენზიით SO<sub>2</sub>-ის შთანთქმაზე. კირით ან კირქვით SO<sub>2</sub>-ის შთანთქმა მიმდინარეობს რეაქციათა განტოლებებით:

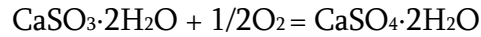
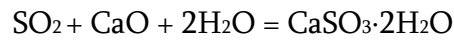
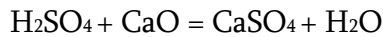


მშრალ მდგომარეობაში კირთან და კირქვასთან SO<sub>2</sub>-ის ურთიერთქმედება ხორციელდება ნელა მხოლოდ კალციუმის სულფიტის წარმოქმნამდე. წყლის არსებობისას პროცესი გაცილებით სწრაფად მიმდინარეობს და საბოლოო პროდუქტად მიიღება მჟავა მარილი:

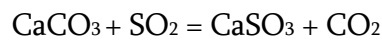


გოგირდმჟავას წარმოების ნარჩენ აირებში, გარდა SO<sub>2</sub>-ისა, შედის გოგირდმჟავას ნისლი, რომლის ძირითადი რაოდენობის დაჭერა ხდება ელექტროფილტრებზე,

მაგრამ დაახ.10% მაინც რჩება აირში, რომელიც შედის სკრუბერში. სკრუბერში მიმდინარეობს  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -ის ურთიერთქმედება  $\text{CaO}$ -სთან

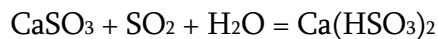


გასაწმენდ აირში შემავალი ნახშირბადის დიოქსიდი ნაწილობრივ დაიჭირება კირის რძით. წარმოქმნილი კალციუმის კარბონატი რეაქციაში შედის  $\text{SO}_2$ -თან კალციუმის სულფიტის წარმოქმნით

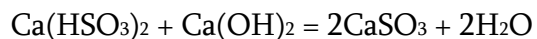


ამრიგად, ნარჩენ აირებში გოგირდის და ნახშირბადის დიოქსიდების თანაარსებობისას გოგირდის დიოქსიდის სრულ აბსორბციამდე ნახშირბადის დიოქსიდის აბსორბცია კალციუმის ოქსიდით ან სხვა რომელიმე მყარი მშთანთქმელით, ქიმიური რეაქციის გზით გამორიცხულია.

არასაკმარისი კირქვის დროს შესაძლებელია კარგად ხსნადი კალციუმის ბისულფიტის წარმოქმნა.



კირის რძის სუსპენზიის დამატებისას ბისულფიტი ისევ გადადის სულფიტში.

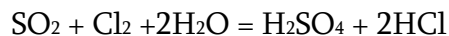


კალციუმის სულფიტი და სულფატი ცუდად იხსნებიან წყალში და ილექებიან შლამის წარმოქმნით – პროცესის მყარი ნარჩენი. ხსნარის 6.4-ზე ნაკლები  $\text{pH}$ -ის შენარჩუნებით შეიძლება გავზარდოთ დაჟანგვის ხარისხი, რადგანაც სულფიტი უკეთ ხსნადია მჟავა ხსნარში.

კალციუმის მარილის ნალექი ზოლური მინარევით ხსნარში დაიყვანება ამ თანაფარდობამდე ს:მ=4:1. ნალექის ნაწილი გამოიტანება ციკლიდან და მიდის ნაყარზე, ან უხეში გაუწყლოების შემდეგ ტრანსპორტირდება სველი შლამის სახით. უნდა აღვნიშნოთ, რომ წყალსატევში მოხვედრილი კალციუმის სულფატი ამცირებს წყალში გახსნილი  $\text{O}_2$ -ის რაოდენობას. აირების ზოლისგან წმინდა გაწმენდისას მიღებული შლამი შეიძლება გამოვიყენოთ სამშენებლო მასალის მისაღებად.

კირქვის მეთოდი მარტივია ექსპლოატაციისას, მაგრამ გააჩნია ნაკლოვანებები, რაც აძნელებს მის გამოყენებას. ესენია: მაღალი საექსპლოატაციო ხარჯი, ტრანსპორტის მაღალი ხარჯი - სველი შლამის გამოტანა დაკავშირებულია დიდ სიძნელეებთან, საკუთარი კირქვის კარიერის ორგანიზაციის აუცილებლობა და კირქვის ღუმელის აშენება, ნარჩენის გამოყენება შესაძლებელია მხოლოდ სამშენებლო მასალათა წარმოებისთვის.

**ქლორის მეთოდი** – გოგირდის დიოქსიდის ქლორით დაჟანგვისას წყალხსნარში მიიღება გოგირდმჟავა და მარილმჟავა



რეაქცია მიდის უპირატესად თხევად ფაზაში გახსნილ  $\text{SO}_2$  –სა და ქლორს შორის. რეაქციის გარემოს შესაქმნელად გამოიყენება მჟავა. მჟავის კონცენტრაციის გაზრდით რეაქცია ნელდება და 60%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  შემცველობისას საერთოდ წყდება, რადგანაც უარესდება  $\text{SO}_2$  და  $\text{Cl}_2$  ხსნადობა. რეაქცია მიმდინარეობს ჩვ. ტემპერატურაზე, მაგრამ ჩქარდება ტემპერატურის  $90^\circ\text{C}$ -მდე გაზრდით. მიღებული განზავებული მჟავათა ნარევი შეიძლება აორთქლდეს შემავალი აირის სითბოს ხარჯზე. ამიტომ ქლორწყალბადი შეიძლება გამოიხადოს და ცალკე მივიღოთ მარილმჟავა. მჟავათა კონცენტრაცია დამოკიდებულია შემავალი აირის ტემპერატურაზე და მის ტენიანობაზე. შესაბამისი პირობების შექმნით შესაძლებელია 70%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  შემცველი გოგირდმჟავის და 28-30%  $\text{HCl}$  შემცველი მარილმჟავის მიღება.

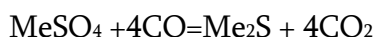
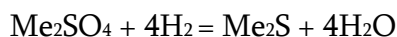
პროცესი მიმდინარეობს შემდეგი სახით:  $\text{SO}_2$ -ის შემცველ აირს უმატებენ ქლორს და ნარევს უშვებენ მიმდევრობით სამ კოშკში. პირველში მიმდინარეობს გოგირდმჟავის აორთქლება, მეორეში – 30-40%  $\text{H}_2\text{SO}_4$  შემცველ გარემოში წარმოიქმნება გოგირდის და ქლორის მჟავები, ხოლო მესამეში – ქლორწყალბადი შთაინთქმება წყლით. მეორე და მესამე კოშკს შორის თავსდება ფილტრი გოგირდმჟავის წვეთების და ნისლის დასაჭერად.

ამ მეთოდის ნაკლოვანებაა ის, რომ პირველ რიგში თითოეული მჟავა მიიღება მეორეს მიწარევის თანაობისას და მეორე, იშვიათად არის ერთდროულად ქლორი და გამავალი აირები საკმარისი სისუფთავით და ტემპერატურით. უმეტესად გამავალი აირები დამტვრიანებულია, მათი გაწმენდისათვის საჭიროა გარეცხვა და გაციება, ამ შემთხვევაში კი განზავებული მჟავა მიიღება.

**გამდნარი მარილებით აბსორბცია.** მაღალ ტემპერატურებზე აირის გასაწმენდად გამოიყენება შემდეგი შედგენლობის ტუტე მეტალთა კარბონატების ევტექტიკური ნარევი (%):  $\text{LiCO}_3$ -32;  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -33;  $\text{K}_2\text{CO}_3$ -35; ნარევის დნობის წერტილია  $397^\circ\text{C}$ . ამ ნარევით 0,3-დან 3%-მდე შემადგენლობის აირის გაწმენდისას მიიღწევა 99%-იანი გაწმენდა.

$\text{SO}_2$ -ის აბსორბცია ხორციელდება მეტალთა კარბონატებით, სულფიტების და სულფატების წარმოქმნით. რეაქციათა სიჩქარე ძალიან მაღალია, ამიტომ პროცესი ლიმიტირდება  $\text{SO}_2$ -ის გადატანის სიჩქარით.

სულფატების აღდგენა ხდება მეტალთა სულფიდებამდე, აღდგენისთვის გამოიყენება გენერატორული აირი, ხოლო პროცესი ტარდება  $600^\circ\text{C}$ .

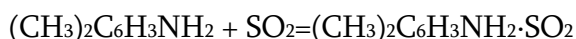


აღდგენის რეაქციები ნელა მიმდინარეობს. რეგენერაციის სტადიაზე  $425^\circ\text{C}$ -ზე სულფიდები რეაგირებენ  $\text{CO}_2$ -თან და წყალთან



მიღებული მდნარი მარილები კვლავ ბრუნდებიან პროცესში. რეგენერაციის რეაქტორიდან გამომავალი აირი შეიცავს 30%  $\text{H}_2\text{S}$ -ს, ნახშირბადის ოქსიდს და წყალს. მას გადაამუშავებენ კლაუსის მეთოდით გოგირდის მისაღებად.

**არომატული ამინებთან აბსორბცია.** ფერადი მეტალურგიის ნარჩენი აირების  $\text{SO}_2$ -გან გასაწმენდად გამოიყენება ქსილიდინის ან დიმეთილანილინის ხსნარები.  $\text{Q}$ -ქსილიდინი და წყალი ჩვეულებრივ არ ერევიან ერთმანეთს, მაგრამ ქსილიდინის ურთიერთქმედებით  $\text{SO}_2$ -თან წარმოიქმნება გარკვეული რაოდენობით წყალში ხსნადი ქსილიდინსულფატი



დესორბციის შემდეგ მიღებული  $\text{SO}_2$  მცირე რაოდენობით შეიცავს ქსილიდინს. მას რეცხავენ წყლით და უშვებენ შემდგომი გადამუშავებისთვის. აირში  $\text{SO}_2$ -ის დაბალი კონცენტრაციისას პროცესი არაეკონომიურია ქსილიდინის დანაკარგის გამო.

ქსილიდინისგან განსხვავებით დიმეთილანილინის შემთხვევაში გამოიყენება არა მისი წყალთან ნარევი, არამედ სუფთა სახით. 3 და 5%-იანი  $\text{SO}_2$ -ის შემცველი აირების გასაწმენდად ქსილიდინის და დიმეთილანილინის ერთნაირი შთანთქმითი უნარი გააჩნიათ. უფრო დაბალი კონცენტრაციის აირის გასაწმენდად მეტი შთანთქმითი უნარი გააჩნია ქსილიდინს, ხოლო მაღალი კონცენტრაციის აირის გასაწმენდად – დიმეთილანილინს.

შესწავლილია კომბინირებული მეთოდით მანგანუმის კარბონატული მედნებით გამავალი აირების გაწმენდა და მანგანუმის კარბონატის მიღება[62]. მშთანთქმელ მასად გამოიყენება მანგანუმის კარბონატული მადნის და შლამის „პეროფის“ სუსპენზია, ასევე მანგანუმის ჟანგეული მადნის ნატეხები(57% მანგანუმის შემცველობით), რომელიც მოთავსებულია სკრუბერში წყობურის სახით.

უშუალოდ მანგანუმის კარბონატული მადნის სულფატიზაცია გოგირდის დიოქსიდით იძლევა არადადამკმაყოფილებელ შედეგს, საჭიროა მადნის წინასწარი გამოწვა  $600^\circ\text{C}$ -ზე. ამ შემთხვევაში მანგანუმის ამოღების ხარისხი შეადგენს 87%-ს. გამოტუტვის ოპტიმალური ტემპერატურაა  $15-20^\circ\text{C}$ .

საფეხუროვან რეჟიმში პროცესის ჩატარებისას მიიღწევა ერთის მხრივ მაღალი ხარისხით აირის  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდა და მეორეს მხრივ – 45-50გ/ლ მანგანუმის შემცველი ხსნარის მიღება. ასეთი ხსნარი შეიძლება გამოვიყენოთ ელექტროლიტური მანგანუმის დიოქსიდის და ზოგიერთი მანგანუმის მარილის მისაღებად.

ლაბორატორიული მონაცემების საფუძველზე არსებული მეთოდი შემოწმებულ იქნა რაჭის სამთო-მეტალურგიული კომბინატის ნამწვ აირებზე.

მშთანთქმელად გამოყენებული იყო მყ:თხ=1:8 თანაფარდობის სუსპენზია, აირის მოცულობითი სიჩქარე  $1000 \text{ სთ}^{-1}$ , ნამწვ აირში  $\text{SO}_2$ -ის საშუალო შემცველობა იყო 1.4%, ხოლო მტვრის სახით  $\text{As}_2\text{O}_3$  შემცველობა 0.2-0.3 გ/მ<sup>3</sup>.

აირის გაწმენდის ხარისხი შლამით „პეროფი“ შეადგენს 91.76%, მანგანუმის კარბონატული მადნით – 91.67%, ხოლო ჟანგეული მადნით – 99.1%-ს.

დამუშავებული სუსპენზიიდან მიღებული მანგანუმის კარბონატის სპექტრული ანალიზით დადგენილია, რომ მანგანუმის კარბონატი არ შეიცავს დარიშხანს.

### 3) აირების გაწმენდა კატალიზური მეთოდებით

კატალიზურ მეთოდებს მიეკუთვნება ის მეთოდები, რომლებიც უზრუნველყოფენ უტილიზირებული SO<sub>2</sub>-ის უშუალო გადამუშავებას გოგირდმჟავად. ცნობილია კატალიზური გაწმენდის მეთოდის რამოდენიმე სახესხვაობა, რომლებიც ერთმანეთისგან განსხვავდება გამოყენებული კატალიზატორის ბუნებით და მექანიზმით. ესენია: პიროლიზური, ოზონ-კატალიზური, რკინის, თხევად-კონტაქტური და ა.შ.

პიროლიზური მეთოდით აირის გაწმენდა დაფუძნებულია თხევად ფაზაში ჟანგბადით SO<sub>2</sub>-ის დაჟანგვაზე კატალიზატორის-პიროლუზიტის არსებობისას. ხსნარში 0,025-0,03% MnO<sub>2</sub>-ის არსებობისას პროცესი მიმდინარეობს ძალიან დიდი სიჩქარით. კატალიზატორის შემცველობის გაზრდა დიდ ეფექტს არ იწვევს, რადგანაც ამ შემთხვევაში პროცესი განისაზღვრება ჟანგბადის გახსნის სიჩქარით, ხოლო კატალიზატორის უფრო მცირე შემცველობისას პროცესი განისაზღვრება დაჟანგვის რეაქციის სიჩქარით.

SO<sub>2</sub>-ის დაჟანგვის კატალიზური მექანიზმის შესწავლისას დადგინდა, რომ ჟანგბადის არსებობისას დაბალი ვალენტობის მანგანუმი Mn<sup>2+</sup> იჟანგება Mn<sup>3+</sup>-მდე, ერთდროულად მიმდინარეობს SO<sub>2</sub>-ის ინდუქციური დაჟანგვა



შემდეგ Mn<sup>3+</sup> ჟანგავს SO<sub>2</sub>-ს, თვითონ კვლავ გადადის Mn<sup>2+</sup>-ში.

ამ მეთოდით მუშაობისას აუცილებელია აირიდან ზოლის გულმოდგინე გამოყოფა, რადგანაც გაწმენდის პროცესში წარმოქმნილი გოგირდმჟავა გამოტუტავს ზოლიდან რკინის და ალუმინის მარილებს. გარდა ამისა, არასრული წვის პროდუქტის არსებობა, როგორცაა ფენოლი, იწვევს კატალიზატორის მოწამვლას.

რკინის იონები აძლიერებს კატალიზატორის აქტივობას, ხოლო სპილენძის კი პირიქით, ამცირებს. თუთიის, ქრომის, ნიკელის და ტუტე მეტალების იონები არ ცვლიან პიროლუზიტის კატალიზურ მოქმედებას.

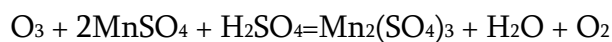
რეალური აირების პიროლუზიტური მეთოდით გაწმენდისას დადგენილია, რომ ხსნარის მჟავიანობის გაზრდა იწვევს გაწმენდის პროცესის თანდათანობით შემცირებას, ხოლო როცა გოგირდმჟავის კონცენტრაცია მიაღწევს 20%-ს, გაწმენდის პროცესი პრაქტიკულად წყდება. ეს იმით აიხსნება, რომ ხსნარში  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -ის არსებობა ამცირებს ჟანგბადის ხსნადობას და არღვევს პროცესის წრიულ მექანიზმს.

პროცესის მაღალი სიჩქარე შეიძლება შევინარჩუნოთ პროცესში  $\text{Mn}^{3+}$  ახალი პორციის შეტანით ან  $\text{Mn}^{2+}$  დაჟანგვის სიჩქარის გაზრდით. პრაქტიკულ პირობებში შეუძლებელია განუწყვეტლივ კატალიზატორის ახალი პორციის შეტანა, ამიტომ აუცილებლობას წარმოადგენს კატალიზატორის რეგენერაციის პროცესის დაჩქარება  $\text{Mn}^{2+}$  დაჟანგვის გზით.

ამ მეთოდით აირების გაწმენდა  $\text{SO}_2$ -გან რეკომენდებულია იმ შემთხვევაში, თუ შესაძლებელია სუსტი გოგირდმჟავის ადგილზე გამოყენება.

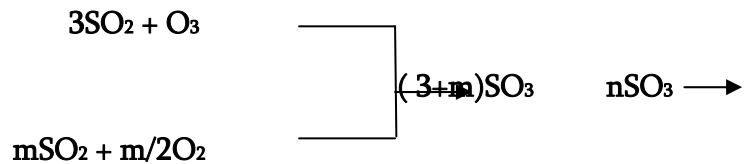
**ოზონ-კატალიზური მეთოდი.** ამ მეთოდის ღირსება არის მარტივი ტექნოლოგიური სქემა და შედარებით მაღალკონცენტრირებული გოგირდმჟავის (60%-მდე) მიღების შესაძლებლობა. ოზონ-კატალიზური მეთოდი პიროლუზიტური მეთოდის გაგრძელებაა და მისგან იმით განსხვავდება, რომ  $\text{Mn}^{2+}$ -ის დაჟანგვა  $\text{Mn}^{3+}$ -მდე ხორციელდება ოზონ-ჰაერის ნარევით.

ოზონი უფრო ძლიერი მჟანგავია, ვიდრე ჟანგბადი, ამიტომ მას ძლიერ მჟავა არეშიც კი შეუძლია  $\text{Mn}^{2+}$  დაჟანგვა. გარდა ამისა, ოზონი შლის კატალიზურ შხამებს (ფენოლი). დაჟანგვა მიმდინარეობს რეაქციის განტოლებით:

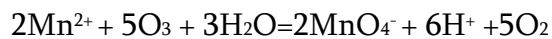


მჟავა არეს მნიშვნელოვანი გაზრდით ოზონით მანგანუმის დაჟანგვა ძნელდება, ამიტომ აუცილებელია თხევად ფაზაში ოზონის კონცენტრაციის გაზრდა, რასაც მივყავართ მის არამწარმოებლურ დანაკარგთან.

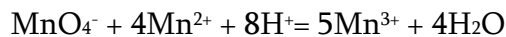
ოზონ-მჟავური მეთოდის შემდგომმა განვითარებამ აჩვენა, რომ შესაძლებელია ოზონით  $\text{SO}_2$ -ის პირდაპირი დაჟანგვა  $\text{SO}_3$ -მდე, რომელიც შექცევადი პროცესია



SO<sub>2</sub>-ის კატალიზური დაჟანგვის პროცესი ხორციელდება შემდეგი სქემის მიხედვით: მჟავა არეში Mn<sup>2+</sup> იონი იჟანგება ოზონით Mn<sup>7+</sup>-მდე



ამასთან სწრაფად მყარდება წონასწორობა

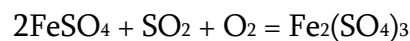


წარმოქმნილი Mn<sup>3+</sup> იონი მონაწილეობს SO<sub>2</sub>-ის ჟანგბადით ჟანგვის წრიულ პროცესში, რომელიც მჟავაში ხსნადია.

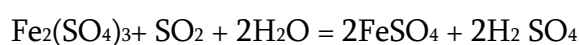
SO<sub>2</sub>-ის მაქსიმალური შთანთქმა ხორციელდება თუ გოგირდმჟავის კონცენტრაცია 40%-ზე ნაკლებია, გოგირდმჟავის კონცენტრაციის გაზრდა 60%-მდე იწვევს SO<sub>2</sub>-ის შთანთქმის შემცირებას.

რკინის მეთოდი ამ მეთოდით SO<sub>2</sub>-ის დაჟანგვა ხდება ჟანგბადით წყლიან გარემოში რკინის იონების არსებობისას, რომლის შედეგადაც მიიღება ან რკინის (III) სულფატი, ან გოგირდმჟავა (დამოკიდებულია აირის ხსნართან ურთიერთშეხების პირობაზე და რკინის იონის შემცველობაზე).

თუ აპარატის მოწყობილობა უზრუნველყოფს ჟანგბადის კარგად გახსნას წარმოიქმნება რკინის (III) სულფატი განტოლების თანახმად



ხოლო თუ ჟანგბადი ცუდად იხსნება და ასევე რკინის იონების შემცველობა არასაკმარისია რკინის (III) სულფატი ურთიერთქმედებს SO<sub>2</sub>-თან გოგირდმჟავას წარმოქმნით



ამ შემთხვევაში FeSO<sub>4</sub> ჟანგბადის გადამტანის როლს ასრულებს გოგირდის დიოქსიდის ჟანგვის პროცესში გოგირდმჟავამდე.

რეაქციის მიმართულების გადახრა გოგირდმჟავის წარმოქმნის მხარეს უზრუნველყოფს ასევე აირში  $\text{SO}_2$ -ის ფარდობითი შემცველობის გაზრდაც. გოგირდმჟავას წარმოქმნის პროცესისათვის ოპტიმალურია რკინის შემცველობა იყოს  $\sim 20\text{ გ/ლ}$ .

დადგენილია, რომ როგორც რკინის, ისე მანგანუმის კატალიზატორზე ეფექტური დაჟანგვისათვის საჭიროა ჰაერის მნიშვნელოვანი სიჭარბე(თანაფარდობა  $\text{SO}_2:\text{O}_2=1:4$ ), რადგანაც ჰაერის ჟანგბადი გამოიყენება არა უმეტეს 25%-სა.

რკინის კატალიზატორზე გოგირდმჟავის წარმოქმნის მაქსიმალური სიჩქარეა დაახლ. 2%-საათში და დაახლ. 4%-საათში მანგანუმის კატალიზატორზე. მეთოდის ნაკლი მდგომარეობს იმაში, რომ ამ დროს მიიღება გაჭუჭყიანებული მჟავა, რომელიც ხასიათდება შეზღუდული გამოყენებით.

თხევად-კონტაქტური მეთოდით  $\text{SO}_2$ -ის დაჟანგვა ხდება თხევად ფაზაში კატალიზატორის ზედაპირზე მაგ: გააქტივებულ ნახშირზე. 20%  $\text{SO}_2$ -ის და 80% ჰაერნარევის  $20^\circ\text{C}$  გააქტივებული ნახშირით გაწმენდისას დადგენილია, რომ საწყის პერიოდში მჟავის წარმოქმნის რეაქცია მიმდინარეობს სწრაფად,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -ის კონცენტრაციის გაზრდით პროცესი ნელდება, ხოლო 40%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -ის კონცენტრაციისას დაჟანგვა პრაქტიკულად წყდება.

$\text{H}_2\text{SO}_4$ -ის კონცენტრაციის გაზრდით მჟავის წარმოქმნის სიჩქარის შემცირება და შესაბამისად  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის სიჩქარის შემცირება გამოწვეულია იმით, რომ მაღლიმიტირებელ სტადიად გვევლინება აირის დიფუზია კატალიზატორის ზედაპირისკენ თხევადი აფსკის გავლით. მჟავა არეში აფსკის შეღწევადობა გოგირდის დიოქსიდისთვის და ჟანგბადისთვის მცირდება გოგირდმჟავის სიბლანტის გაზრდით და მასში აირების ხსნადობის შემცირებით. კატალიზატორის ზედაპირის წყლით გარეცხვის შემდეგ კვლავ აღიდგენს თავის აქტიურობას. აღსანიშნავია აგრეთვე, რომ  $\text{SO}_2$ -ის 0,7%-ზე დაბალი შემცველობისას გაწმენდის პროცესი ნაკლებ ეფექტურია.

ამრიგად, თხევად-კონტაქტური მეთოდით შეუძლებელია მაღალი კონცენტრაციის გოგირდმჟავის მიღება, ასევე აუცილებელია კატალიზატორის პერიოდული რეგენერაცია.

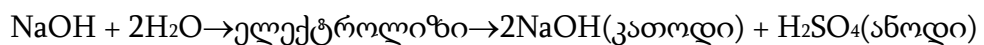
### 1.3.2. აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის მშრალი მეთოდები

სოდა-ალუმინური მეთოდი ხორციელდება სორბენტის შეტივტივებულ და უძრავ ფენაზე[62]. SO<sub>2</sub>-ის შემცველი ნაწივი აირი შედის 315°C CO რეაქტორში ნატრიუმის ალუმინატით. აირის ურთიერთქმედებით სორბენტთან წარმოიქმნება ნატრიუმის სულფატი და ალუმინის ოქსიდი. სორბენტის რეგენერაცია ხორციელდება 650-780°C აღმდგენი აირის დამატებით, რომელიც მიიღება გაზოილის გაზიფიკაციით ან ბუნებრივი აირის კონვერსიით. ამრიგად სულფატური გოგირდი აღდგება გოგირდწყალბადის წარმოქმნით, რომელიც გამოიყენება კლაუსის მეთოდით გოგირდის მისაღებად, ხოლო რეგენერაციული სორბენტი ბრუნდება ციკლში. SO<sub>2</sub>-ის ამოღების ხარისხი შეადგენს 90%-ს.

ოქსიდ-მანგანუმის მეთოდი დაფუძნებულია ორთქლისგან გაწმენდილი ცხელი აირის ურთიერთქმედებაზე მანგანუმის ოქსიდის Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ფხვნილთან აბსორბერში 130-330°C ტემპერატურაზე MnSO<sub>4</sub>-ის წარმოქმნით. ადსორბენტს ამუშავებენ ამიაკით ან NaOH-ის ხსნარით



MnO იჟანგება ჰაერის ჟანგბადით Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-მდე, გამოაშრობენ და ბრუნდება პროცესში, ხოლო ნატრიუმის სულფატის ხსნარს აორთქლებენ სასაქონლო პროდუქტის გამოყოფამდე ან განიცდის ელექტროლიზს, რის შედეგადაც NaOH რეგენერირდება და წარმოიქმნება განზავებული გოგირდმჟავა, რომელიც შეიძლება გამოვიყენოთ, როგორც სასაქონლო პროდუქტი



პროცესის ძირითადი ნაკლოვანებაა ტექნოლოგიის სირთულე და ელექტროენერგიის დიდი ხარჯი. გარდა ამისა, სუფთა H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-ის მიღება Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-ის ელექტროლიზისას ძალიან რთული და ძვირადღირებული ტექნოლოგიაა.

პეროქსიდული მეთოდი [63,64]. აირების გაწმენდის ეს მეთოდი ემყარება გოგირდის დიოქსიდის თხევად ფაზაში დაქანგვას წყალბადის პეროქსიდის თანაობისას



დადგენილია, რომ  $\text{SO}_2$ -გან აირების 100% გაწმენდა შესაძლებელია ძალიან განზავებული წყალბადის პეროქსიდის ხსნარის გამოყენებისას. მიღებული გოგირდმჟავის კონცენტრაციის გაზრდით და  $\text{SO}_2$ -ის საწყისი კონცენტრაციის შემცირების შედეგად გაწმენდისას რეაქციის სიჩქარე პრაქტიკულად არ იცვლება. მეთოდის ნაკლოვანებაა ძვირადღირებული წყალბადის პეროქსიდის გამოყენება.

ოქსიდ-სპილენძიანი მეთოდი დაფუძნებულია ალუმინის ოქსიდზე დაფენილი სპილენძის ოქსიდის სორბენტის გამოყენებაზე [65].  $\text{SO}_2$ -ის სპილენძის ოქსიდთან ურთიერთქმედებისას, ჟანგბადის არსებობისას, მიიღება სპილენძის სულფატი ( $300^\circ\text{C}$  ტემპერატურაზე). სორბენტის რეგენერაცია ხდება ამიაკით  $450^\circ\text{C}$ -ზე. წარმოქმნილი გოგირდის დიოქსიდი (38%) გადამუშავდება, ხოლო აღდგენილი სორბენტი ბრუნდება ციკლში. მეთოდის ნაკლია პროცესის სირთულე, გაწმენდის დაბალი ხარისხი და შედარებით ძვირადღირებული ნაერთის – ამიაკის მნიშვნელოვანი ხარჯი.

#### 1.4. აბსორბციის პროცესის მექანიზმი

სამრეწველო აირები ყოველთვის დაბინძურებული არიან მავნე ნივთიერებებით, ამიტომ მათი გაწმენდა საჭიროა როგორც ტექნოლოგიური, ისე სანიტარული თვალსაზრისით. სამრეწველო აირების გაწმენდა მავნე ნივთიერებებისგან წარმოებს სამი ძირითადი მეთოდით [66]:

- 1) სითხით აბსორბცია;
- 2) მყარი მშთანთქმელით ადსორბცია;
- 3) კატალიზური გაწმენდა.

ქიმიურ მრეწველობაში აბსორბციის მეთოდს იყენებენ მზა პროდუქტის მისაღებად აირის სითხით შთანთქმისას, აირთა ნარევის დაყოფისთვის მისგან ერთი ან რამდენიმე ძვირფასი კომპონენტის გამოსაყოფად, აირების მინარევებისგან გასაწმენდად და ა. შ.

აბსორბციის მეთოდი ხასიათდება უწყვეტობით, პროცესის უნივერსალურობით და ეკონომიურობით. ასევე უნდა გავითვალისწინოთ, რომ აბსორბციის მეთოდით გაწმენდის მაღალი ხარისხის მისაღწევად საჭიროა განხორციელდეს მრავალსაფეხურიანი გაწმენდა. აბსორბციის მეთოდით აირის გაწმენდისას ასევე

მიიღება მნიშვნელოვანი მოცულობის ნარჩენი (შლამი), რომელიც ექვემდებარება შემდგომ გადამუშავებას (რეგენერაციას). ასევე თხევადი მშთანთქმელების გამოყენებისას აირის ტემპერატურა საჭიროა შემცირდეს აბსორბენტის ტემპერატურამდე [67-68].

განასხვავებენ ორი სახის აბსორბციას: ფიზიკურს და ქიმიურს (ქემოსორბცია) [69-70]. ფიზიკური აბსორბციისას აირების გახსნას არ ახასიათებს ქიმიური რეაქცია.

მრეწველობაში გამოსაყენებელი აბსორბენტი უნდა აკმაყოფილებდეს შემდეგ მოთხოვნებს: საკმარისად მაღალი შთანთქმითი უნარი გამოსაყოფი კომპონენტის მიმართ; მაღალი აბსორბციული ტევადობა; ადვილად განიცდიდეს რეგენერაციას; ქონდეს მაღალი სელექტიურობა გამოსაყოფი კომპონენტის მიმართ; დაბალი აქროლადობა; ახასიათებდეს საკმარისი კინეტიკური თვისებები და თერმოქიმიური მდგრადობა; არ იწვევდეს აპარატურის კოროზიას და გამოყენებისას იყოს ხელმისაწვდომი და იაფი.

აბსორბციისთვის უმეტესად გამოიყენება წყალი, არაორგანულ ნივთიერებათა წყალხსნარები, ასევე მცირედ აქროლადი ორგანული გამხსნელები.

აბსორბციის პროცესის ეფექტურობა მნიშვნელოვანი ხარისხით დამოკიდებულია მასაგადაცემის კოეფიციენტზე, პროცესის მამოძრავებელ ძალაზე და საკონტაქტო ფაზის ზედაპირზე [71].

$$M = K_y \Delta y_{\text{ს.შ.}} F \quad \text{ან} \quad M = K_x \Delta x_{\text{ს.შ.}} F$$

სადაც,  $x_{\text{ს.შ.}}$  და  $y_{\text{ს.შ.}}$  – აირის აირად და თხევად ფაზაში აირის საშუალო კონცენტრაცია;

$M$  – ერთი ფაზიდან მეორეში დროის ერთეულში გადასული კომპონენტის მასა;

$K$  – მასაგადაცემის ზედაპირული კოეფიციენტი;

$F$  – საკონტაქტო ფაზის ზედაპირი;

$\Delta$  – საშუალო მამოძრავებელი ძალა.

მასაგადაცემის კოეფიციენტი არის მასაგადაცემის კოეფიციენტის ადიტიური სიდიდე თხევად და აირად ფაზაში. მაგ: მასაგადაცემის კოეფიციენტი, აირად ფაზაში გამოსახული კომპონენტის კონცენტრაციით აღიწერება განტოლებით

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x}$$

სადაც:  $\beta_y$  და  $\beta_x$  – შესაბამისად მასაგადაცემის კოეფიციენტებია თხევად და აირად ფაზაში;

$m$  –განაწილების კოეფიციენტი.

პროცესის საშუალო მამოძრავებელ ძალას საზღვრავენ როგორც მასაგადაცემის მამოძრავებელი ძალის საშუალო ინტეგრალურ სიდიდეს აბსორბერის შესასვლელში და გამოსასვლელში თუ წონასწორობის ხაზი აღიწერება მრუდით, ან როგორც საშუალო ლოგარითმული სიდიდით, თუ წონასწორობის ხაზი – წრფეა:

$$\Delta y_{\text{საშ.}} = \frac{y_{\text{საშ.}} - y_K}{\int_{y_K}^{y_H} \frac{d_y}{y - y^*}} \quad \text{ან} \quad \Delta y_{\text{საშ.}} = \frac{\Delta y_{\text{მაღ.}} - \Delta y_{\text{დაბ.}}}{\lg \left( \frac{\Delta y_{\text{მაღ.}}}{\Delta y_{\text{დაბ.}}} \right)}$$

სადაც,  $y_H$  და  $y_K$  –აირად ფაზაში კომპონენტის სრული წილი აპარატის შესასვლელში და გამოსასვლელში;

$y_{\text{მაღ.}}$  და  $y_{\text{დაბ.}}$  –მასაგადაცემის უდიდესი და უმცირესი მამოძრავებელი ძალა.

ნებისმიერ თხევად-აირად სისტემებში აბსორბციის მექანიზმის გამოკვლევისას დიდ სიძნელეს იწვევს აბსორბციის კინეტიკის გაშიფვრა [72-76]. კერძოდ, აირად და თხევად ფაზაში ნივთიერების დიფუზიის ადექვატური აღწერა. ნივთიერების გადატანა ფაზათა შიგნით ხორციელდება მოლეკულური, კონვექციური და ტურბულენტური დიფუზიით. უძრავ გარემოში გადატანა მიმდინარეობს მხოლოდ მოლეკულური დიფუზიის გზით, ხოლო მოძრავ ფენაში – მოლეკულური და კონვექციური დიფუზიით. ტურბულენტური მოძრაობისას გადატანა ხორციელდება

ტურბულენტური დიფუზიის გზით, ხოლო მოლეკულური დიფუზია უმნიშვნელოა და შეიძლება უგულვებელვყოთ [77-78].

ნივთიერების გადატანის ცნობილი მოდელები (უიტმენ-ლუისის, ხიგბის, დანკვერტის და სხვათა მოდელები) არა მხოლოდ ძნელად განსახორციელებელია მათემატიკური განტოლებების სირთულის გამო, არამედ მათში არ არის გათვალისწინებული პროცესზე მოქმედი მრავალი ფაქტორი [79]. აბსორბციის პროცესზე მოქმედებს დიფუზიის კოეფიციენტი, აირის და სითხის ფიზიკური თვისებები, პროცესის თერმოდინამიკური პარამეტრები, კომპონენტის კონცენტრაცია, მასაგადაცემის მიმართულება, ვიზრაცია, პულსაცია და ა.შ.

დიფუზიის კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის გამოიყენება სხვადასხვა ავტორთა ფორმულები: არნოლდის ფორმულას ასეთი სახე აქვს:

$$D_{20} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{A \cdot B \sqrt{\mu} \left( V_A^{1/3} + V_B^{1/3} \right)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M} + \frac{1}{M_B}}$$

სადაც,  $\mu$  - არის გამხსნელის სიბლანტე, მპა/წმ;

A და B – დიფუზირებული ნივთიერების და გამხსნელის შესწორების კოეფიციენტები, აირებისათვის A=1, წყლისთვის=4.7;

წყალხსნარებისთვის რეკომენდებულია ოტმერის და ტაიკერის ფორმულა

$$D = \frac{14 \cdot 10^{-9}}{V_A^{0.6} \cdot \mu_B^{1.1}}$$

ასევე უილკის და ჩენგის

$$D = \frac{7.4 \cdot 10^{-12} \cdot (\varphi_m)^{1/2} \cdot T}{V_A^{0.6} \cdot \mu}$$

და შეიბლის

$$D = \frac{8.2 \cdot 10^{-12} \cdot T}{V_A^{0.6} \cdot \mu} \cdot \left( 1 + \left( \frac{3V_B}{V_A} \right)^{2/3} \right)$$

სადაც,  $\mu$  -არის გამხსნელის სიბლანტე სამუშაო ტემპერატურაზე, მკა/სთ;  
 $M$  –გამხსნელის მოლური მასა;  
 $\phi$ –შესწორების კოეფიციენტი არაასოცირებული სითხისათვის,  
წყლისთვის  $\phi = 2,6$ .

ტემპერატურა მოქმედებს მასაგაცემის კოეფიციენტზე ფიზიკური თვისებების ცვლილების შედეგად. აირადი ფაზისთვის ტემპერატურის მომატებით იზრდება  $D_v$  და  $\mu_v$ , ხოლო  $\rho_v$  პროპორციულია  $1/T$ ; თხევად ფაზაში ტემპერატურის მომატებით იზრდება  $D_{თხ}$  და მცირდება  $\nu_{თხ}$ , ამიტომ  $\beta_{თხ}$  იზრდება. ტემპერატურის გავლენა მასაგაცემის  $K_y$  კოეფიციენტზე განისაზღვრება ფარდობის ტემპერატურული დამოკიდებულებით  $m/\beta_x$ , ტემპერატურის მომატებით იზრდება  $m$  და  $\beta_x$ .

სააბსორბციო კომპონენტის კონცენტრაცია გავლენას ახდენს ფაზათა ფიზიკურ თვისებებზე და მათსადაშე მასაგაცემის კოეფიციენტზე. კომპონენტის კონცენტრაცია ზოგჯერ მოქმედებს საკონტაქტო ზედაპირის აქტიურ ზომებზე. თუ ფაზათა წონასწორობის მუდმივა შესამჩნევად იცვლება თხევადი ფაზის კონცენტრაციით, მაშინ უკანასკნელი გავლენას მოახდენს მასაგაცემის  $K_v$  კოეფიციენტზე.

სისტემაში აირი-სითხე მასაგაცემაზე ამ ფაქტორთა მრავალი გამოკვლევა ურთიერთსაწინააღმდეგოა და არაერთმნიშვნელოვანი, ამიტომ აბსორბციის მექანიზმის ახსნისათვის ძირითად წინა პირობას წარმოადგენს ფაზათა წინააღმდეგობის ადიტიური მდგომარეობა. ამისთვის იყენებენ  $\beta_y$  და  $\beta_{x\text{კოეფიციენტებს}}$ . ამ სიდიდეების უშუალო გაანგარიშება შეუძლებელია, ამიტომ საზღვრავენ ემპირიული გზით , ან მასაგაცემის კრიტერიალური განტოლებათა დახმარებით, რომლებიც მიღებულია მსგავსებათა თეორიის საფუძველზე.

აირის გაწმენდის აბსორბციული პროცესის კონკრეტული გაანგარიშებისას კრიტერიალურ დამოკიდებულებას წარმოადგენენ ხარისხობრივი ფუნქციის სახით. შესაბამისი კრიტერიუმის და მსგავსებათა სიმპლექსის განტოლების კოეფიციენტის და ხარისხის მაჩვენებელს საზღვრავენ ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავების შედეგად. დღეისთვის არსებობს გაანგარიშების მრავალრიცხოვანი პროგრამები ეგმ-

ზე აბსორბციული პროცესებისთვის, განსხვავებული თხევად აირადი სისტემებისთვის.

მასაგადაცემის პროცესის ჩამოყალიბებისთვის კრიტერიალური დამოკიდებულება შეიძლება წარმოვადგინოთ ასეთი სახით:

$$Nu = f(Re, Pr, \Gamma_1, \Gamma_2 \dots)$$

სადაც,  $Nu = \beta l / D$  – არის ნუსელტის დიფუზიის კოეფიციენტი;

$Re = w l \rho / \mu$  – რეინოლდსის კრიტერიუმი;

$Pr = V / D$  – პრანდტლის დიფუზიის კრიტერიუმი;

$\Gamma_1$  და  $\Gamma_2$  – მსგავსებათა გეომეტრიული სიმპლექსები;

$\beta$  – მასაგადაცემის კოეფიციენტი;

$D$  – მოლეკულური დიფუზიის კოეფიციენტი;

$W$  – ნაკადის საშუალო სიჩქარე, მ/სთ;

$\rho$  – ნაკადის სიმკვრივე, კგ/მ<sup>3</sup>;

$\mu$  – ნაკადის დინამიური სიბლანტე, პა/სთ;

$V$  – ნაკადის კინეტიკური სიბლანტე, მ<sup>2</sup>/სთ;

$l$  – განმსაზღვრელი გეომეტრიული ზომა.

აბსორბციის მასაგადაცემის ძირითადი განტოლების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ სხვა დანარჩენ თანაბარ პირობებში აირის სითხეში გახსნის სიჩქარე დამოკიდებულია აირით აბსორბენტის გაჯერების ხარისხზე. მაშასადამე, აირის გაწმენდისას აბსორბციის პროცესის ეფექტურობის გაზრდის ერთ-ერთი მეთოდი არის სწორედ აბსორბენტის შერჩევა.

ამასთანავე, ფიზიკური აბსორბციის პროცესში აბსორბენტის არჩევის შესაძლებლობა შედარებით შეზღუდულია მათი დაბალი სელექტიურობის და სხვა მრავალ მიზეზთა გამო. ასეთ შემთხვევაში გაწმენდის ალტერნატიულ მეთოდად შეიძლება გამოვიყენოთ ქემოსორბცია, რომელიც საშუალებას იძლევა აირთა ნაკადიდან კომპონენტის უფრო სრული გამოყოფისა და მათი უტილიზაციისას მივიღოთ მოცემული შედგენილობის პროდუქტი.

აბსორბციის კინეტიკის აღწერისას, რომელიც ქიმიური რეაქციით ხასიათდება, იკვლევენ ქიმიურ რეაქციათა კინეტიკურ კანონზომიერებებს, როგორც თხევად

(ძირითადად), ასევე აირად ფაზაში. ამიტომ თხევად ფაზაში მიმდინარე ქიმიური რეაქციის აბსორბციის დაჩქარებისთვის ითვალისწინებენ ან მასაგადაცემის კოეფიციენტის გაზრდას, როგორც ფიზიკური აბსორბციის შემთხვევაში, ან მამოძრავებელი ძალის გაზრდას, თუ ჩავთვლით მასაგადაცემის კოეფიციენტს ისეთივეს, როგორც ფიზიკური აბსორბციისას.

გაანგარიშების ორივე მეთოდი ერთმანეთთან დაკავშირებულია დამოკიდებულებით

$$W_A = \beta_{Tx} \cdot F \Delta_{Tx} = \beta_{Tx} \cdot F(\Delta_{Tx} + \delta)$$

სადაც,  $\beta_{Tx}$  – ფიზიკური აბსორბციისას თხევად ფაზაში მასაგადაცემის კოეფიციენტი;

$\beta_{Tx}^I$  – ქემოსორბციისას თხევად ფაზაში მასაგადაცემის კოეფიციენტი;

$\Delta_{Tx} - C_{xs} - C$  მამოძრავებელი ძალა ფიზიკური აბსორბციისას;

$\delta$  – სიდიდე, რომელიც გვიჩვენებს მამოძრავებელი ძალის გაზრდას თხევად ფაზაში ქიმიური რეაქციის მიმდინარეობისას.

ეს დამოკიდებულება შეგვიძლია წარმოვადგინოთ ასეთი სახითაც:

$$\chi = \beta_{Tx}^I / \beta_{Tx} = 1 + \delta \Delta_{Tx}$$

სადაც,  $\chi$  – თხევად ფაზაში აბსორბციის დაჩქარების კოეფიციენტია.

ქიმიური რეაქციისას დანკვერტსმა და კინგმა წამოიწყეს არცთუ უმედეგო მცდელობა  $\chi$  კოეფიციენტის გამოყენებისა მასაგადაცემის მექანიზმის განსაზღვრისათვის, რის შედეგადაც გამოყვანილ იქნა აბსორბციის კინეტიკის შესაბამისი განტოლება, რომელიც თან ახლავს შეუქცევად  $m, n$  რიგის რეაქციებს.

ნაწილობრივ, აფსკური მოდელისთვის ნივთიერების გადატანა დადგენილია  $\chi$ -ის დამოკიდებულებით დიფუზურ მახასიათებელზე განსხვავებული სიჩქარის რეაქციებისას.

$R \ll 1$  არეში – რეაქციის სიჩქარე დაბალია რეაქციის სიჩქარესთან შედარებით  $\chi=1$  ე.ი. აბსორბციაზე გავლენა უმნიშვნელოა და პროცესი შეესაბამება ფიზიკურ აბსორბციას.

$M \gg R \gg 1$  არეში -  $\chi$  თითქმის არ არის დამოკიდებული  $M$ -ზე, რადგანაც  $\chi \approx R$  (ჩქარი რეაქციები),  $\beta_{Tx}$  კოეფიციენტი არ არის დამოკიდებული  $\beta_{Tx}$ .

$M \gg R$  არეში -  $\chi$  თითქმის არ არის დამოკიდებული  $R$ -ზე (წამიერი რეაქციები) და უახლოვდება ( $R \rightarrow \infty$ ) მაქსიმუმს  $\chi_\infty = M$ .

## თავი 2.

### კვლევის ობიექტებისა და მეთოდების მიმოხილვა

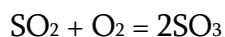
#### 2.1. საკვლევი ობიექტის ზოგადი დახასიათება

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ წარმოების ნარჩენ აირებში გოგირდის დიოქსიდის შემცველობა მეტწილად ზღვრულ დასაშვებ ნორმებს აღემატება.

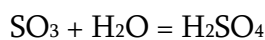
გოგირდის დიოქსიდი მიეკუთვნება ერთ-ერთ ყველაზე უფრო ტოქსიკურ ნივთიერებას, რომელიც უარყოფით, მავნე ზემოქმედებას ახდენს ადამიანზე, გარემომცველ ბუნებაზე, ფლორაზე, ფაუნაზე.

მცენარეთა ნორმალური ზრდა-განვითარება ირღვევა, თუ ჰაერი შეიცავს 0.0002%-ზე მეტ  $SO_2$ -ს. განსაკუთრებულ როლს თამაშობს ჰაერში არსებული ტენის რაოდენობა. ტენის მომატებისას მცენარის სახეობისგან დამოუკიდებლად, მათ მიერ გოგირდის დიოქსიდის ამთვისებლობა სწრაფად იზრდება. გოგირდის დიოქსიდის მავნე ზემოქმედების მიმართ ყველაზე უფრო მგრძნობიარენი არიან პარკოსნები, მარცვლოვანი კულტურები და წიწვოვანი მცენარეები. ხეხილს ნაკლები მიდრეკილება გააჩნია დიოქსიდის ზემოქმედებაზე.

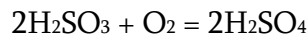
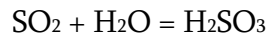
ატმოსფეროში გოგირდის დიოქსიდის ხანგრძლივობა განსაზღვრულია, რადგანაც მონაწილეობას ღებულობს სხვადასხვა რეაქციებში (ფოტოქიმიური, კატალიზური და სხვა), იჟანგება და წარმოქმნის სულფატებს. ნაწილობრივ  $SO_2$  ფოტოქიმიური დაჟანგვის შედეგად გარდაიქმნება  $SO_3$ -ად



რომელიც რეაგირებს ატმოსფეროში არსებულ წყლის ორთქლთან გოგირდმჟავის აეროზოლის წარმოქმნით



SO<sub>2</sub>-ის ძირითადი ნაწილი ტენიან გარემოში – ჰაერში წარმოქმნის მჟავა ჰიდრატს SO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O, თანდათანობით იჟანგება სულფატამდე.



და მჟავა წვიმის სახით ბრუნდება დედამიწაზე.

იმ შემთხვევაში, თუ SO<sub>2</sub> აჭარბებს ზღვრულ დასაშვებ ნორმებს, ხდება როგორც მცენარეთა, ისე ცხოველების დაავადება. ყველაზე უფრო მგრძნობიარენი არიან ფრინველები და შინაური ცხოველები.

გოგირდის დიოქსიდის მავნე ზემოქმედება ცოცხალ ორგანიზმზე შეინიშნება განსაკუთრებით ცუდ ატმოსფერულ პირობებში, ატმოსფეროს ინვერსიული მდგომარეობისას ღრუბლების წარმოქმნის მომენტში და “სმოგის დროს”, როცა ჰაერში გარდა

SO<sub>2</sub>-სა არსებობს სხვა დამაბინძურებლები – ავტომობილთა გამონაბოლქვი აირები.

ადამიანს შეუძლია გაძლოს ხუთი კვირა საკვების გარეშე, ხუთი დღე წყლის გარეშე, მაგრამ მხოლოდ ხუთი წუთი ჰაერის გარეშე. ცხადია, რომ მცირე რაოდენობით ჰაერის დაბინძურებამაც კი შეიძლება სერიოზული ზიანი მიაყენოს ადამიანის ჯანმრთელობას. ადამიანის ორგანიზმზე მავნე ზემოქმედება იწყება ჰაერში 0.5მგ/მ<sup>3</sup> კონცენტრაციისას; ხოლო SO<sub>2</sub>-ის შემდგომი მატებით მავნე ზემოქმედება იზრდება და შეიძლება ლეტალური შედეგიც კი გამოიწვიოს.

გოგირდის დიოქსიდით ატმოსფეროს დაბინძურების შედეგი მაშინვე არ შეიმჩნევა, თანდათანობით იჩენს თავს. გოგირდის დიოქსიდის მიმართ უფრო მგრძნობიარენი არიან ბავშვები, მოხუცები, ავადმყოფები, განსაკუთრებით ისინი ვისაც მიდრეკილება აქვთ სასუნთქ-ორგანოთა და გულ-სისხლძარღვთა დაავადებისკენ.

ჰაერის დაბინძურებამ გოგირდის დიოქსიდით შეიძლება გამოიწვიოს შემდეგი სახის დაავადებები: ზედა სასუნთქი გზების კატარი, ფილტვების ემფიზემა, ანგიना, ფარანგიტი, ბრონქების პნევმონია, ასთმა, ტონზილიტი, ფილტვების ტუბერკულოზი და კიბო.

გარდა ცოცხალ ბუნებაზე და ადამიანებზე ზემოქმედებისა გოგირდის დიოქსიდი უარყოფით გავლენას ახდენს ლითონურ ნაკეთობებზე, იწვევს მათ კოროზიას, არღვევს რკინა-ბეტონის კონსტრუქციებს. ცემენტის შედგენილობაში შემავალ უხსნად კალციუმის და მაგნიუმის კარბონატებთან  $\text{SO}_2$ -ის ურთიერთქმედებისას მომატებული ტენიანობისას წარმოიქმნება ხსნადი სულფატები და ჩამოირეცხება წყლით.

## 2.2. მანგანუმის მადნის შერჩევა ნარჩენი აირების $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის მიზნით

ჭიათურა-საჩხერის აუზის მანგანუმის მადნები გენეტიკური ნიშან-თვისებების მიხედვით შეიძლება დავყოთ შემდეგ კატეგორიებად[80-83]:

- 1) პირველადი დანალექი ქანები;
- 2) მეორადი მადნები;
- 3) ინფილტრაციული მადნები;
- 4) მეტამორფირებული მადნები.

1) პირველადი დანალექი ქანები წარმოდგენილი არიან ორი გენეტიკური ტიპით და ხასიათდებიან შემდეგი ძირითადი თვისებებით:

- a) მანგანუმის ჟანგეული მადნები – მადნის ეს ტიპი წარმოიქმნა წყლის აუზში მჟანგავ გარემოში, ჟანგბადის აქტიური მოქმედების პირობებში. ისინი ძირითადად შედგებიან ფსილომელანისგან ( $n\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), პიროლუზიტის ( $\text{MnO}_2$ ) და მანგანიტისგან ( $\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). ასეთი სახის მადანს დიდი სამრეწველო მნიშვნელობა გააჩნია, როგორც მეტალურგიული, ისე ქიმიური მრეწველობისთვის. ეს მადანი ბალანსირებული მარაგის 44%-ს შეადგენს.
- b) მანგანუმის კარბონატული მადნები – მადნის ეს ტიპი წარმოიქმნა ღრმა წყლების აუზში ქიმიური დალექვის საფუძველზე, ჟანგბადის ნაკლებობის და ორგანული ნივთიერებების დაშლის პირობებში ნახშირორჟანგის გამოყოფით. ასეთი მადნები ძირითადად შედგებიან მანგანოკალციტის

$[(\text{Ca}, \text{Mn})\text{CO}_3]$ , კალციუმიანი როდოხროზიტის  $[(\text{Mn}, \text{Ca})\text{CO}_3]$  და როდოხროზიტისგან  $(\text{MnCO}_3)$ . სამრეწველო მასშტაბით კარბონატული მადნები იკავებენ მეორე ადგილს და მანგანუმის ბალანსირებული მარაგის 40%-ს შეადგენენ.

2) მეორადი მანგანუმის მადნები წარმოდგენილი არიან ასევე ორი ძირითადი სახესხვაობით, შემდეგი მახასიათებლებით:

ა) დაჟანგული მანგანუმის მადნები. ისინი წარმოიქმნა კარბონატული მადნების და ზოგჯერ პირველადი ჟანგეული მადნის დაჟანგვის შემთხვევაში. ეს მადნები შედგებიან შემდეგი მინერალებისგან: ვერნადიტის  $(\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ , ფსილომელანის  $(n\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ , პიროლუზიტის  $(\text{MnO}_2)$  და რანსეინიტისგან  $[\text{m}(\text{Mn}, \text{Ca})\text{OMnO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ . მათ მესამე ადგილი უკავიათ და ბალანსირებული მარაგის 14%-ს შეადგენენ.

ბ) კალციტიზირებული ჟანგეული მანგანუმის მადნები (“მწვარი”). ასეთი მადნები ჰიდროთერმული ხსნარების მანგანუმის პირველად ქიმიურად დალექილ ჟანგეულ მადნებზე ზეგავლენის შედეგად წარმოიქმნებიან. ისინი ძირითადად შედგებიან პიროლუზიტის  $(\text{MnO}_2)$ , რანსეინიტის  $[\text{m}(\text{Mn}, \text{Ca})\text{OMnO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$  და კალციტისგან  $[(\text{Ca}, \text{Mn})\text{CO}_3]$ . გავრცელების მხრივ კი მთელი მადნის 4%-ს არ აღემატება.

3) ინფილტრაციული მანგანუმის მადნები. მადნის ეს ტიპი წარმოიქმნება მანგანუმის ჰიდროჟანგებით კაჟმიწა ქანების გაჟღენთვის და აგრეთვე კვარცის ქვიშების შეცემენტების ნიადაგზე. მისი ძირითადი მინერალებია: ფსილომელანი  $(n\text{MnO} \cdot \text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ , ვერნადიტი  $(\text{MnO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$ , და პიროლუზიტი  $(\text{MnO}_2)$ . (უფრო ვრცლად იხილეთ გვ.56)

4) მეტამორფირებული მანგანუმის მადნები ბაზალტური მაგმის მანგანუმის პირველად ქიმიურად დალექილ ჟანგეულ მადნებზე კონტაქტური მეტამორფიზმის ზეგავლენის შედეგად წარმოიქმნებიან. ისინი შედგებიან ბრაუნიტის  $(\text{Mn}_2\text{O}_3)$ , გაუსმანიტის  $(\text{Mn}_3\text{O}_4)$  ტეფროიტის  $(\text{Mn}_2\text{SiO}_4)$  ნარევთან ერთად, ბუსტამიტისგან

$[(\text{Mn},\text{Ca})\text{SiO}_3]$  და იშვიათად ალაბადინისგან ( $\text{MnS}$ ). ჭიათურა–საჩხერის აუზში ასეთი მადნები ფართო გავრცელებას არ პოვენ.

ჭიათურის მანგანუმის მადნებს მარაგის და ხარისხის მიხედვით მსოფლიოში ერთ-ერთი პირველი ადგილი უჭირავს, მაგრამ მათი მარაგი უსაზღვრო არ არის, რადგან მათზე მოთხოვნულება ძალიან დიდია.

დღეისთვის მანგანუმით მდიდარი (პეროქსიდული) მადნების მარაგი საკმაოდ შემცირდა, ამიტომ შეიქმნა არსებული ღარიბი მადნების გამოყენების საჭიროება. მრეწველობაში ასეთი მადნების გამოყენებისთვის აუცილებელია მათი წინასწარი გამდიდრება. გამდიდრებისთვის კი გამოიყენება მხოლოდ ქიმიური მეთოდები, რადგან მექანიკური და ფლოტაციის მეთოდები მადნებიდან და შლამებიდან მანგანუმის სრული ამოღების საშუალებას არ იძლევიან.

№2 ცხრილში მოცემულია ჭიათურის მანგანუმის ღარიბი მადნების ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები [84-87].

ცხრილი №2

ჭიათურის მანგანუმის ღარიბი მადნების ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები

№	მადნის ტიპი	წინაღობა კუმშვისადმი კგ/სმ <sup>2</sup>	სიმკვრივე კგ/მ <sup>3</sup>	ნაყარი წონა კგ/მ <sup>3</sup>	სიმაგრე
1.	ინფილტრაციული მადანი	335	1.95–2.2	1.9–2	2–6
2.	მადანი “მწვარი”	“ – ”	2.73–3.46	1.32–2.48	6–7
3.	ფოროვანი მადანი	135	1.95–2.1	1.85–1.9	2–4
4.	კარბონატული მადანი	285–626	2.75–2.85	2.0–2.5	3.5–4.5

ლიტერატურული მონაცემების მიხედვით გოგირდის ნაერთების მიმართ დიდი აქტიურობით გამოირჩევა მანგანუმის ინფილტრაციული მადანი [88-93]. დღეისთვის მანგანუმის მადნების მიმართ წაყენებული მოთხოვნების შესაბამისად მანგანუმის ინფილტრაციული მადანი მიკუთვნებულია არაკონდიციურ მადნებს და მისი მარაგი შეადგენს არანაკლებ 6 მლნ ტონას.

აირების გოგირდის დიოქსიდისგან გასაწმენდად შევირჩიეთ მანგანუმის ინფილტრაციული მადანი, რომელიც არაკონდიციურადაა მიჩნეული და გაწმენდის პროცესში ვითვალისწინებთ არა მხოლოდ აირის მაღალი ხარისხით გაწმენდის

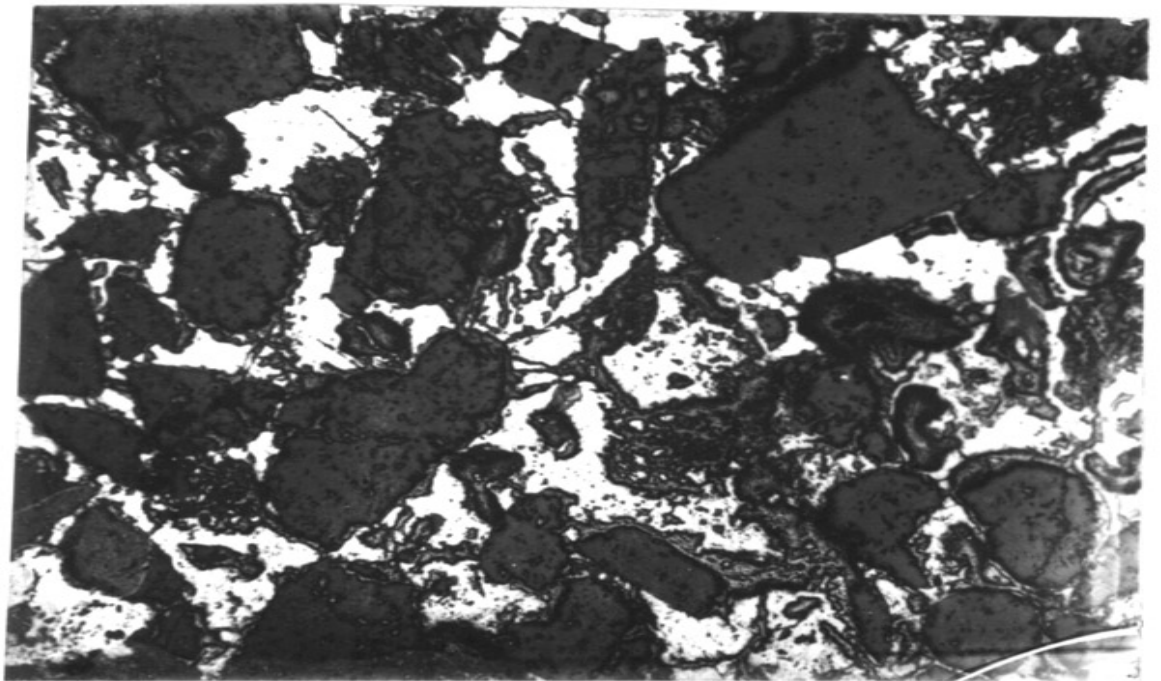
მიღწევას, არამედ აგრეთვე მადნიდან მანგანუმის მაქსიმალურად ამოწვლილვას და მინარევებისაგან თავისუფალი პროდუქტის – მანგანუმის სულფატის მონოჰიდრატის მიღებას. ეს უკანასკნელი დიდი მოთხოვნილებით სარგებლობს მსოფლიო ბაზარზე.

### 2.3 ჭიათურის მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის მოკლე დახასიათება

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ ინფილტრაციული მადანი წარმოადგენს მანგანუმის ჰიდროჟანგებით გაჟღენთილ კაჟოვან ქანს და მისი სიმაგრე იცვლება 2-დან 6-მდე.

გავაშელის მონაცემებით [94-95] ეს მადნები წარმოიქმნენ ღია ფერის კაჟიანი ქვიშაქვის მანგანუმის ჰიდროჟანგების გაჟღენთვით.

ნახაზზე №1 წარმოდგენილია ამ მადნის მიკროსტრუქტურა, საიდანაც კარგად ჩანს მასალაში ფუჭი და მადნის ქანების განაწილება. მადნის მიკროსკოპული ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ინფილტრაციული მადნის ქანი შედგება კაჟიანი ქვიშაქვისგან დიდი რაოდენობით მტვრისებრი გამონაყოფებით, შეცემენტებული მადნის მასალით. მასში მადნის მასალა - მანგანუმი იმყოფება ძირითადად პიროლუზიტის და ფსილომელანის ნაერთის სახით.



ნახ.1. შუქრუთის ინფილტრაციული მადნის მიკროსტრუქტურა  
(გადიდებული - 90)

მართალია, შემაცემენტებული ნივთიერება არის მანგანუმი, მაგრამ ხშირად შეინიშნება ისეთი შემთხვევა, როცა კვარცი ნაწილობრივ ჩანაცვლებულია მადნის მასალაში და მის გარშემო ფუჭი ქანის შუა შრეებია.

რადგანაც მადანში არსებული ფუჭი ქანი ძირითადად მტვრისებრ მდგომარეობაშია, იგი მჭიდროდაა დაკავშირებული მადნის მასალასთან და ჯერჯერობით არ მოიპოვება ისეთი მექანიკური გამდიდრების მეთოდი, რომელიც ვარგისია ინფილტრაციული მადნისთვის.

ასეთი მადანი მექანიკურ გამდიდრებას ნაკლებად ემორჩილება, რადგანაც მადნის დაწვრილმანებისას მანგანუმის მარცვალი არ თავისუფლდება კვარცის და კალციტისგან, ამიტომ არ განიცდის გამდიდრებას და მთლიანად მიდის ნაყარის სახით. მანგანუმის შემცველობა ამ მადანში 8-დან 25%-მდეა, მაგრამ ჭიათურაში ძირითადად მოიპოვება ისეთი მადნები, რომლებშიც მანგანუმი არის 14-20% ზღვრებში. ასეთი შედგენილობის მქონე მანგანუმის მადნები მოიპოვება “შუქრუთის”, “მერვეის” და “ახალი ითხვისის” მადაროებში. მადნის ძირითადი შემადგენელი კომპონენტია კაჟმიწა, რომლის შემცველობა მერყეობს 36-დან 50%-მდე.

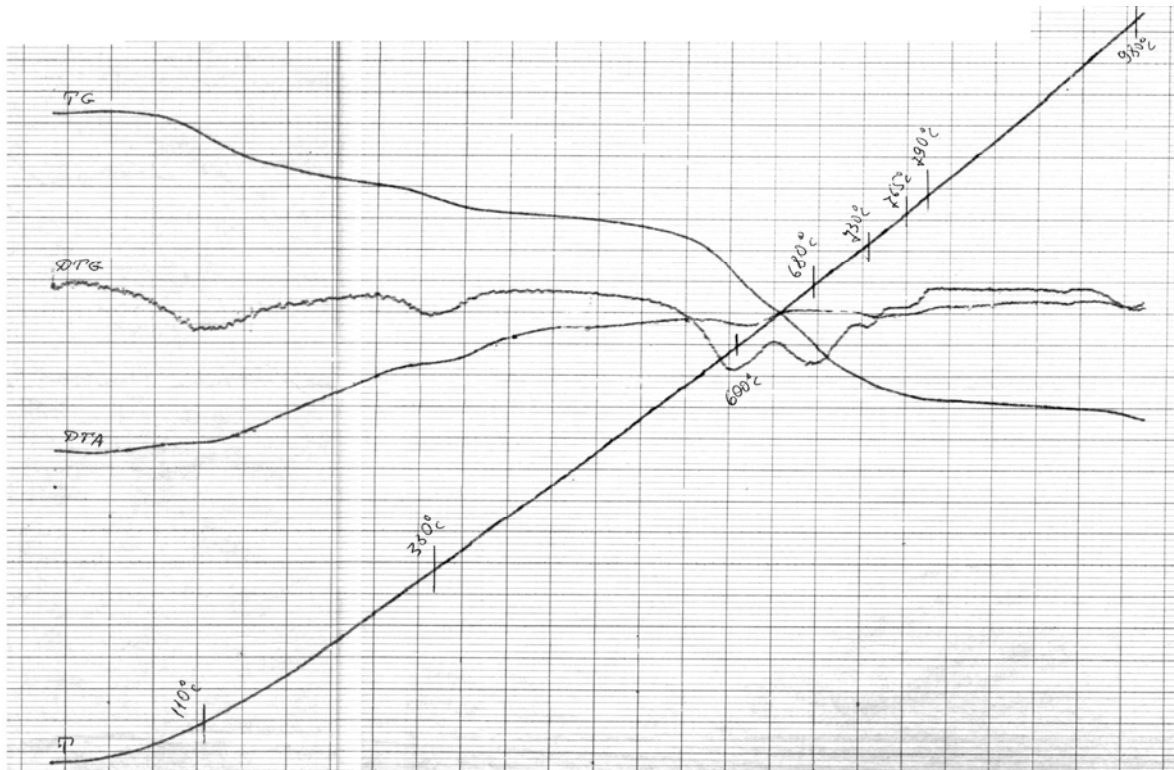
ჩატარებულია მადნის თერმული კვლევა. კერძოდ, გადაღებულია დერივატოგრამა (ხალსაწყო – დერივატოგრაფი Q-1500D) გარემოს ტემპერატურიდან 1000°C-მდე დიაპაზონში. იხ. ნახ. 2

მადნის თერმოგრაფიული შესწავლა გვიჩვენებს, რომ 110°C-ზე (მასის დანაკარგით 3.46%) შეინიშნება ენდოფექტი, რაც გამოწვეულია ნიმუშში ტენის არსებობასთან. აგრეთვე ენდოფექტი 330°C-ზე (მასის დანაკარგით 1.43%), რომელიც შეიძლება დაკავშირებული იყოს მადანში არსებულ ჰიდრატირებული პერმანგანატის არსებობასთან ან მანგანუმის ჰიდრატთან.

ამასთანავე ტემპერატურულ შუალედში 550-790°C ადგილი აქვს რამოდენიმე ენდოფექტს (საერთო მასის დანაკარგით 8.85%), ვფიქრობთ, რომ ადგილი უნდა ჰქონდეს  $MnO_2$ -ის დაშლას.

980°C-ტემპერატურისას შეინიშნება მცირე ენდოფექტი, რაც შეძლება მივაკუთვნოთ  $Mn_2O_3$ -ის გადასვლას  $Mn_3O_4$ -ში.

ნახ.2. მანგანუმის მადნის დერივატოგრამა



#### 2.4. ანალიზის მეთოდებისა და გამოყენებული ხელსაწყოების აღწერა

ექსპერიმენტისთვის აღებულ შუქრუთის მანგანუმის ინფილტრა-ციულ მადანში ჩვენს მიერ განსაზღვრულია მადნის შემადგენელი ძირითადი ელემენტები. იხ. ცხრილი №3.

მადანში არსებული და ხსნარში გადასული მანგანუმის რაოდენობის განსაზღვრა ხორციელდებოდა ფოტოკოლორიმეტრული მეთოდით.

**ფოტოელექტრული კოლორიმეტრია.** ფოტოკოლორიმეტრული განსაზღვრისთვის გამოყენებული იქნა KΦK – 2 ტიპის ფოტოკოლორიმეტრი. ხელსაწყო განკუთვნილია კოლორიმეტრული კვლევისთვის და სხვადასხვა ხსნარის რაოდენობითი ანალიზისთვის. KΦK – 2 ტიპის ფოტოკოლორიმეტრის დანიშნულებაა შუქფილტრების საშუალებით 315-980 ნმ დიაპაზონის ტალღის სიგრძის კონკრეტულ

უბანზე განსაზღვროს ხსნარის ოპტიკური სიმკვრივე და შუქგატარების კოეფიციენტი. ოპტიკური სიმკვრივის გაზომვის ზღვრებია 0-დან 2-მდე, ხოლო შუქგატარების კოეფიციენტის – 1-დან 100%-მდე.

ხსნარში ნივთიერების კონცენტრაციის განსაზღვრისთვის აუცილებელია შემდეგი თანმიმდევრობის დაცვა:

- შუქფილტრის და კიუვეტის შერჩევა;
- მოცემული ნივთიერებისთვის საკალიბრო მრუდის აგება;
- საკვლევი ხსნარის ოპტიკური სიმკვრივის გაზომვა და ხსნარში ნივთიერების კონცენტრაციის განსაზღვრა.

საკვლევ ხსნართან მუშაობის დროს შუქფილტრების შერჩევა ხდება შემდეგნაირად: ყველა შუქფილტრის გამოყენებით ატარებენ ხსნარის ოპტიკური სიმკვრივის გაზომვას. მიღებული მონაცემების საფუძველზე აგებენ მრუდს, სადაც ჰორიზონტალურ ღერძზე იზომება ტალღის სიგრძე, ხოლო ვერტიკალურზე ხსნარის ოპტიკური სიმკვრივის შესაბამისი მნიშვნელობები. საკვლევ ხსნართან მუშაობისთვის ამოირჩევა ის შუქფილტრი, რომელიც ამ ხსნარისთვის იძლევა ოპტიკური სიმკვრივის მაქსიმალურ მნიშვნელობას.

კიუვეტების წინასწარი შერჩევა წარმოებს ვიზუალურად ხსნარის შეფერილობის ინტენსივობის შესაბამისად. მუქი გამჭირვალე ხსნარების შემთხვევაში მუშაობენ კიუვეტებით, რომელთა სამუშაო სიგრძე 1-5 მმ-ია, გამჭირვალე ხსნარებთან მუშაობისას კი გამოიყენება კიუვეტები 20-50 მმ სამუშაო სიგრძით.

საკვლევ ხსნართან მუშაობისთვის საბოლოოდ ის კიუვეტი შეირჩევა, რომელიც ამ ხსნარისთვის იძლევა ოპტიკური სიმკვრივის დაახლოებით 0.3-0.5 მნიშვნელობას.

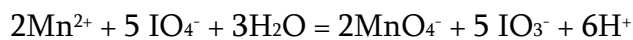
ნივთიერების კონცენტრაციის განსაზღვრისთვის აუცილებელია ამ ნივთიერებისთვის საკალიბრო მრუდის აგება. ამისთვის ამზადებენ განსასაზღვრავი ნივთიერების ცნობილი კონცენტრაციის მთელ რიგ სტანდარტულ ხსნარებს, რომელთა ფარგლებში იმყოფება საანალიზო ნივთიერების მოსალოდნელი კონცენტრაცია.

სათანადო შუქფილტრის და კიუვეტის შერჩევის შემდეგ აწარმოებენ ამ სტანდარტული ხსნარების ოპტიკური სიმკვრივის განსაზღვრას. ოპტიკური სიმკვრივის გაზომვის შემდეგ აგებენ საკალიბრო მრუდს, რისთვისაც აბცისაზე

გადაზომავენ ხსნართა ცნობილი კონცენტრაციების სათანადო სიდიდეებს, ხოლო ორდინატაზე ამ კონცენტრაციათა შესაბამის ოპტიკურ სიმკვრივეებს.

მრუდის აგება გვაძლევს შესაძლებლობას განვსაზღვროთ საკვლევ ხსნარში საანალიზო ნივთიერების უცნობი კონცენტრაცია. ამისთვის გაიზომება უცნობი კონცენტრაციის მქონე ხსნარის ოპტიკური სიმკვრივე იგივე სიდიდის კიუვეტში იმავე შუქფილტრით, რომლითაც მიღებულია საკალიბრო მრუდი. მიღებული ოპტიკური სიმკვრივის მნიშვნელობით მოიძებნება მრუდზე ხსნარის კონცენტრაცია შემდეგნაირად: საკალიბრო მრუდის გრაფიკის ორდინატაზე მოიძებნება მიღებული ოპტიკური სიმკვრივის მნიშვნელობა, საიდანაც ვპოულობთ ამ წერტილის შესაბამის პროექციას ჯერ მრუდზე, შემდეგ კი აბცისაზე, რაც შეესაბამება საკვლევ ხსნარში საანალიზო ნივთიერების კონცენტრაციას.

**მანგანუმის განსაზღვრა ფოტოკოლორიმეტრული მეთოდით [96-99].** პერმანგანატ-იონის კოლორიმეტრია ეს არის ერთდროულად ზუსტი, სპეციფიური და მგრძნობიარე მეთოდი. მანგანუმს ჟანგავენ პერიოდატით  $\text{MnO}_4^-$  - იონამდე



ხსნარს უმატებენ ფოსფორმჟავას, რომელიც ხელს უშლის მანგანუმის ჟანგეულების, მანგანუმის პერიოდატის ან იოდატის და რკინა (III) პერიოდატის დალექვას, აუფერულებს ხსნარს რკინის (III)-იონის შეფერილობისგან და ხელს უშლის წარმოქმნილ მანგანუმმჟავის დაშლას.

ხსნარი, რომელიც მიიღება პერიოდატით დაჟანგვისას მდგრადია განუსაზღვრელი, ხანგრძლივი დროით. რკინის (III) პერიოდატი უხსნადია კონც. აზოტმჟავაში, მაგრამ იხსნება გოგირდმჟავაში და ფოსფორმჟავაში. დიდი რაოდენობით რკინის არსებობისას შესაძლებელია გამოვიყენოთ ერთ-ერთი ამ ორი მჟავადან, მაგრამ უკეთესია ფოსფორმჟავის გამოყენება, რადგან იგი უზრუნველყოფს რკინა (III)-ის მარილების ხსნადობას.

მანგანუმის განსაზღვრას ხელს უშლის ქლორის-იონები, ამიტომ მას აცილებენ გოგირდმჟავის დამატებით და შემდგომ მისი აორთქლებით  $\text{SO}_3$ -ის თეთრი ბოლის გაჩენამდე.

განსაზღვრის მსვლელობა: ანალიზისთვის იღებენ 0,5 გრ წონაკს და ათავსებენ 100 მლ მოცულობის ჭიქაში. ხსნიან 5 მლ კონცენტრირებული მარილმჟავით. თავიდან გახსნა წარმოებს სუსტი გახურებისას, შემდეგ დუღილით სითხის მუქი შეფერილობის გადასვლამდე ღია ყვითელ შეფერილობაში. ხსნარს ამატებენ 2 მლ კონც. გოგირდმჟავას და ადუღებენ  $\text{SO}_3$ -ის თეთრი კვამლის გაჩენამდე. ხსნარს აციებენ, გადააქვთ 500 მლ მოცულობის მზომ კოლბაში და ავსებენ ჭდეშდე გამოხდილი წყლით. ამის შემდეგ ხდება მანგანუმის განსაზღვრა ფოტოკოლორიმეტრული მეთოდით. 50 მლ საანალიზო ხსნარს ათავსებენ 100 მლ-იან საზომ კოლბაში, ამატებენ 10 მლ კონცენტრირებულ გოგირდმჟავას ან 15-20 მლ კონც. აზოტმჟავას და 5-10 მლ კონც. ფოსფორმჟავას. ხსნარში ათავსებენ 0.3-0.4 გრ კალიუმის პერიოდატის კრისტალებს, აცხელებენ  $90^\circ\text{C}$ -ზე და აყვანებენ 5-10 წუთის განმავლობაში. (კალიუმის პერიოდატით დაჟანგვა ძალიან სწრაფად მიმდინარეობს ცხელ ხსნარში გოგირდმჟავის თანაობისას). ხსნარს აციებენ ოთახის ტემპერატურამდე, შეავსებენ 100 მლ-მდე გამოხდილი წყლით, აურევენ და განსაზღვრავენ ხსნარის ოპტიკურ სიმკვრივეს ფოტოკოლორიმეტრზე 50 მმ სამუშაო სიგრძის მქონე კიუვეტებში მწვანე შუქფილტრის ( $\lambda=525$  ნმ) გამოყენებით. შესადარებელი ხსნარის მომზადება წარმოებს ანალოგიურად, მხოლოდ საკვლევი ხსნარის ნაცვლად გამოიყენება გამოხდილი წყალი.

მანგანუმის სტანდარტული ხსნარების მომზადება და მათი ოპტიკური სიმკვრივის განსაზღვრას აწარმოებენ ისევე, როგორც საანალიზო ხსნარების. სტანდარტული ხსნარების შეფერვის ინტენსივობის მიხედვით აგებენ საკალიბრო მრუდს.

საკვლევი ხსნარებში მანგანუმის შემცველობის განსაზღვრისათვის საკალიბრო მრუდზე პოულობენ მანგანუმის რა რაოდენობას შეესაბამება მოცემული საკვლევი ხსნარისთვის ფოტოკოლორიმეტრზე მიღებული ანათვალი. მანგანუმის პროცენტული შემცველობა გამოითვლება ფორმულით.

$$\text{Mn \%} = \frac{C \cdot 500 \cdot 100}{V \cdot g}$$

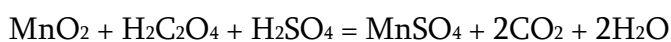
სადაც, C – არის საკალიბრო მრუდზე ნაპოვნი მანგანუმის რაოდენობა, გრ;

V – საანალიზოდ აღებული ხსნარის მოცულობა, მლ;

g – საანალიზოდ აღებული წონაკი, გრ.

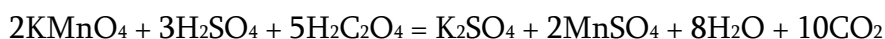
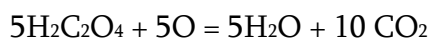
MnO<sub>2</sub>-ის განსაზღვრა ოქსალატური მეთოდით: განსაზღვრის მეთოდი დაფუძნებულია ყველა ვალენტობის მქონე მანგანუმის შესაძლებლობაზე გოგირდმჟავურ გარემოში აღმდგენელის მოქმედებით გადავიდეს მანგანუმის ორვალენტიან ნაერთში, რაზეც იხარჯება აღმდგენელის ექვივალენტური რაოდენობა. აღმდგენელი ემატება ჭარბი რაოდენობით, რომელიც უკუიტიტრება კალიუმის პერმანგანატით. აღმდგენელად გამოიყენება მჟაუნმჟავა [100].

მანგანუმის აღდგენა მჟაუნმჟავით მიმდინარეობს რეაქციის განტოლებით:



ამ მეთოდის გამოყენებისას არ შეიძლება 80°C ტემპერატურაზე მეტად გახურება, რათა არ მოხდეს მჟაუნმჟავის დაშლა.

განსაზღვრის მსვლელობა: მადნის 0,5 გრ წონაკს ათავსებენ 500 მლ მოცულობის კონუსურ კოლბაში, რომელშიც წინასწარ მოთავსებულია 1 გრ მჟაუნმჟავა და ამატებენ 100 მლ განზ. გოგირდმჟავას (1 : 7), კოლბის შიგთავსს კარგად აურევენ, რათა თანაბრად განაწილდეს მადნის წონაკი კოლბის მთელ მოცულობაში. აფარებენ საათის მინას და აცხელებენ ნელა სანამ არ გაქრება მუქად შეფერილი ნაწილაკები. მთელი წონაკის გახსნის შემდეგ ცხელ ხსნარს სწრაფად ტიტრავენ კალიუმის პერმანგანატის წინასწარ ცნობილი კონცენტრაციის ხსნარით მდგრადი (20 წმ-ის განმავლობაში) ვარდისფერი შეფერილობის წარმოქმნამდე. ამ დროს იტიტრება ის ჭარბი მჟაუნმჟავა, რომელიც არ შევიდა რეაქციაში:



მანგანუმის ოქსიდის შემცველობას ანგარიშობენ ფორმულით:

$$\% \text{MnO}_2 = \frac{T_{\text{KMnO}_4/\text{MnO}_2} \cdot (V_1 - V_2) \cdot 100}{g}$$

სადაც,  $T_{\text{KMnO}_4 / \text{MnO}_2}$  - ის ტიტრი,  $\text{MnO}_2$ -ის მიმართ, გრ;

$V_1$  - სატიტრაციო ხსნარის  $\text{KMnO}_4$ -ის რაოდენობა მლ-ში,

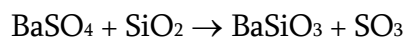
რომელიც დაიხარჯა 1გრ  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ -ის გატიტვრაზე.

$V_2$ - სატიტრაციო ხსნარის  $\text{KMnO}_4$ -ის რაოდენობა მლ-ში,

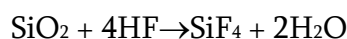
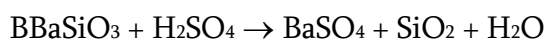
რომელიც დაიხარჯა სინჯის გატიტვრაზე;

$g$  - მადნის წონაკი, გრ.

$\text{SiO}_2$ -ის განსაზღვრა წონითი მეთოდით [101]. ჟანგეული მანგანუმის მადანი ყოველთვის შეიცავს მნიშვნელოვანი რაოდენობით  $\text{SiO}_2$ -ს, როგორც თავისუფალი სახით, ისე სხვადასხვა სილიკატების სახით. საერთოდ  $\text{SiO}_2$ -ის შემცველობის განსაზღვრისთვის საჭიროა მადანში შემავალი სილიკატების სრული დაშლა. ეს ხორციელდება შეცხობით ან შელღობით უწყლო სოდასთან. ამასთანავე სილიციუმ-მჟავას ნაწილი გამოილექება ნალექის სახით, ხოლო ნაწილი რჩება ხსნარში კოლოიდის ფორმით. ასევე შეიცავს ბარიუმს, ამიტომ  $\text{SiO}_2$ -ის განსაზღვრისას მცირე რაოდენობით ბარიუმის სულფატი გადადის ხსნარში და მცირედ აჭუჭყიანებს სილიციუმმჟავას ნალექს. მიღებული სილიციუმმჟავას ნალექს გაფილტრავენ და გამოწვანებენ. სილიციუმმჟავას განსაზღვრისას ფთორწყალბადმჟავის და გოგირდმჟავის ნარევით ნალექის დამუშავებისას, რომელიც შეიცავს ბარიუმის სულფატს მივყავართ ძლიერ შემცირებულ შედეგებამდე, რადგანაც სილიციუმმჟავის გაუწყლოებისათვის საჭიროა  $1000^\circ\text{C}$ -ზე მაღალი ტემპერატურა, თუმცა ასეთ მაღალ ტემპერატურაზე მიმდინარეობს  $\text{SO}_3$ -ის ნაწილობრივი დანაკარგი რეაქციის განტოლებით:



ნალექის შემდგომი დამუშავებისას ფთორწყალბადმჟავით ბარიუმის სილიკატი კარგავს  $\text{SiO}_2$ -ს და წარმოიქმნება ბარიუმის სულფატი რეაქციით:



შესაბამისად  $\text{SO}_3$ -ის დანაკარგი იწვევს ცდომილებას, ამიტომ უხსნადი ნალექის გამოწვას ახდენენ არაუმეტეს  $1000^\circ\text{C}$ -ზე, რადგანაც ამ ტემპერატურაზე ბარიუმის

სულფატის შესამჩნევი დაშლა არ ხდება და სილიციუმმჟავის გაუწყლობა მიმდინარეობს დამაკმაყოფილებლად.

გამოწვის შემდეგ ნალექს ამუშავენ ფთორწყალბადმჟავას და გოგირდმჟავას ნარევით და წონიან ბარიუმის სულფატის ნალექს, ხოლო სხვაობით პოულობენ  $\text{SiO}_2$ -ის შემცველობას.

განსაზღვრის მსვლელობა: 1 გრ მადანს ათავსებენ 250 მლ მოცულობის ჭიქაში, ამატებენ 20 მლ მარილმჟავას და აცხელებენ წონაკის სრულ გახსნამდე, რაზეც მიუთითებს მუქად შეფერილი ნაწილაკების გაქრობა. შემდეგ ხსნარს ამატებენ 5-6 მლ გოგირდმჟავას (1 : 1), ამის შემდეგ ხსნარს აორთქლებენ  $\text{SO}_3$ -ის კვამლის წარმოქმნამდე. ჭიქას აციებენ, ამატებენ 50 მლ წყალს და აცხელებენ ყველა ხსნადი მარილის გახსნამდე. უხსნად ნალექს აყოვნებენ და ფილტრავენ მჭიდრო ფილტრზე. ნალექს ჩარეცხავენ განზავებული გოგირდმჟავით (2 : 1000), ფილტრს ნალექით აშრობენ და გამოწვავენ პლატინის ტიგელში. გამომწვარ უხსნად ნალექს შეაღებენ 2-3 გრ უწყლო სოდასთან ერთად (20 წთ,  $1000^\circ\text{C}$ ), შემდეგ ნალღობს გამოტუტავენ ცხელი წყლით.

მიღებულ ხსნარს ფილტრავენ მჭიდრო ფილტრზე, ჩარეცხავენ ცხელი სოდის 1%-იანი ხსნარით 4-5-ჯერ. გარეცხილ ფილტრს გადაიტანენ იმავე ტიგელში, სადაც მოხდა შეღებვა, ნალექს გააშრობენ და გამოწვავენ. ნალექს ხელმეორედ შეაღებენ სოდასთან ერთად. შეერთებული სოდის ფილტრატს შეამჟავებენ მარილმჟავითი  $\text{CO}_2$ -ის გამოყოფის შეწყვეტამდე, უმატებენ 10-15 მლ მჟავას სიჭარბით და აორთქლებენ სიმშრალემდე.

მშრალ ნალექს დანამავენ 5-10 მლ მარილმჟავით, განაზავებენ 50-70 მლ ცხელი წყლით, აცხელებენ ადუღებამდე და ნალექს ფილტრავენ.  $\text{SiO}_2$ -ის ნალექს ჩარეცხავენ 3-4-ჯერ ცხელი განზავებული მარილმჟავით (1 : 4), შემდეგ ცხელი წყლით ხსნადი მარილების გამოყოფამდე. ფილტრს სილიციუმის მჟავას ნალექით გამოწვავენ პლატინის ტიგელში და აწონიან. ნალექის სისუფთავის შემოწმებისთვის მას ამუშავენ მღღობი მჟავით და გოგირდმჟავით, მეორედ გამოწვავენ და აწონიან.

$\text{SiO}_2$ -ის შემცველობას ანგარიშობენ ფორმულით:

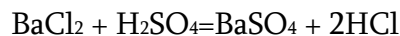
$$\% \text{SiO}_2 = \frac{(a - \delta) \cdot 100}{g}$$

სადაც, a- არის ნალექის წონა HF -ით დამუშავებამდე, გრ;

ბ - ნალექის წონა HF -ით დამუშავების შემდეგ, გრ;

გ - წონაკი, გრ.

**ბარიუმის ოქსიდის განსაზღვრა:** ბარიუმის ოქსიდის რაოდენობრივი განსაზღვრა ხდება მარტივი, მაგრამ ზუსტი მეთოდით [102]. მეთოდი დაფუძნებულია მცირედხსნადი ბარიუმის სულფატის გოგირდმჟავით დალექვაზე, რომელიც შეიცავს მცირე რაოდენობით მარილმჟავას. რეაქცია მიმდინარეობს ასეთი სახით:



**განსაზღვრის მსვლელობა:** 1გრ წონაკს ათავსებენ 200 მლ მოცულობის ჭიქაში და ხსნიან 20 მლ მარილმჟავაში. აცხელებენ მუქად შეფერილი ნაწილაკების გაქრობამდე. შემდეგ ხსნარს ამატებენ 3-4 მლ განზ. გოგირდმჟავას (1:1) და ხსნარს აცხელებენ  $\text{SO}_3$ -ის გამოყოფამდე. ჭიქას აციებენ და ფრთხილად განაზავებენ ცივი წყლით 75-100 მლ მოცულობამდე. მიღებულ ხსნარს ადუღებენ მანამ, სანამ ნალექი მთლიანად არ გამოიყოფა. ჭიქას ტოვებენ თბილ ადგილას მთელი ღამის განმავლობაში. ხსნარს ფილტრავენ, ფილტრს რეცხავენ განზ. გოგირდმჟავით (1:1000) 5-6-ჯერ. ნალექს გამოწვავენ, ხოლო შემდეგ ამატებენ რამოდენიმე წვეთ გოგირდმჟავას(1:1) და 5-8 მლ ფთორწყალბადმჟავას. ხსნარს აორთქლებენ სიმშრალემდე და შეაღებენ 3 გრ ნატრიუმის კარბონატთან.

ნალღობი გადააქვთ ჭიქაში, აზავებენ 50 მლ-მდე, აცხელებენ და ფილტრავენ. ნალექს ჩარეცხავენ 1%-ანი ცხელი ნატრიუმის კარბონატის ხსნარით, რის შემდეგაც ფილტრატს ინახავენ მასში სხვა ელემენტების განსაზღვრისთვის, ხოლო ფილტრს აშრობენ და გამოწვავენ 600-700°C-ზე.

გამომწვარი ნალექი გადააქვთ ჭიქაში, ამატებენ 10 მლ მარილმჟავას და აორთქლებენ სიმშრალემდე. მშრალ ნალექს დანამავენ 1 მლ მარილმჟავით და ხსნიან 100-150 მლ ცხელი წყლით.

მიღებულ ხსნარს აცხელებენ ადუღებამდე და ლექავენ ბარიუმს 5 მლ გოგირდმჟავის ფრთხილად დამატებისას. კარგად გაფილტვრის მიზნით საჭიროა ბარიუმის სულფატის დალექვის შემდეგ ხსნარი გამოყოფილ ნალექთან ერთად გაჩერდეს 12 სთ-ის განმავლობაში თბილ ადგილას. შემდეგ ხსნარს ფილტრავენ

ლურჯ ფილტრზე. ნალექი სრულად გადააქვთ ჭიქიდან ფილტრზე და რეცხავენ მცირე პორციებით ცივი განზ. გოგირდმჟავით (1:1000) ქლორ-იონზე რეაქციის შეწყვეტამდე (სინჯი  $\text{AgNO}_3$  ხსნარით).

გარეცხილ ფილტრს ათავსებენ პლატინის ტიგელში, გამოაშრობენ და გამოწვავენ  $800-900^\circ\text{C}$ -ზე 30წთ-ის განმავლობაში. გამოწვას იმეორებენ მუდმივ წონამდე მიყვანამდე.

BaO-ს პროცენტულ შემცველობას ანგარიშობენ ფორმულით:

$$\% \text{BaO} = \frac{a \cdot 0.657 \cdot 100}{g}$$

სადაც, a-არის გამომწვარი  $\text{BaSO}_4$ -ის წონა, გრ;

0.657-  $\text{BaSO}_4$ -იდან BaO-ზე გადამყვანი კოეფიციენტი;

g-წონაკი, გრ.

#### კალციუმისა და მაგნიუმის განსაზღვრა გატიტრის მეთოდით:

კალციუმისა და მაგნიუმის განსაზღვრას ახდენენ კომპლექსომეტრული მეთოდით, რომელიც დამყარებულია აღნიშნულ ნივთიერებათა კათიონების ურთიერთქმედებაზე ზოგიერთი ორგანულ (კომპლექსონად წოდებულ) რეაქტივთან. კომპლექსონად გამოიყენება კომპლექსონ III ანუ ტრილონ “ზ” [103].

$\text{Ca}^{2+}$ -იონების განსაზღვრას აწარმოებენ ტრილონ “ზ” საშუალებით ინდიკატორ მურექსიდის თანაობისას ტუტე არეში ( $\text{pH}=12$ ).

$\text{Ca}^{2+}$ -იონები მურექსიდთან წარმოქმნის სუსტად დისოცირებად ნაერთებს, ხოლო ტრილონ “ზ”-თან (გატიტრის მომენტში) კიდევ უფრო ნაკლებად დისოცირებად (მდგრად) ნაერთებს, ვიდრე მურექსიდთან. ტრილონ “ზ” მას შემდეგ რაც ხსნარში არსებულ კალციუმის ყველა იონს შებოჭავს, იწყებს კომპლექსიდან ( $\text{Ca}^{2+}$  ინდიკატორი) კალციუმის იონების ამოკრეფას და შესაბამისად ხსნარი იძენს ინდიკატორის ფერს (იასამნისფერს).

კალციუმის და მაგნიუმის ჯამური განსაზღვრისთვის გატიტრას აწარმოებენ ისევ ტრილონ “ზ”-ს საშუალებით შესაბამის  $\text{pH}$ -ზე. ბუფერად გამოიყენება ამიაკური ხსნარი, ინდიკატორი ქრომოგენ შავი. ამ შემთხვევაში ტრილონ “ზ” ბოჭავს ხსნარში არსებული კალციუმისა და მაგნიუმის ყველა იონს, ხოლო შემდეგ იწყებს  $\text{Mg}^{2+}$ -

იონების ამოკრეფას კომპლექსონიდან (ქრომოგენ შავი +  $Mg^{2+}$ -იონი). ხსნარი იძენს ლურჯ ფერს.  $Mg^{2+}$ -იონებს საზღვრავენ პირველი და მეორე გატიტვრას შორის სხვაობით.

განსაზღვრის მსვლელობა. კალციუმისა და მაგნიუმის ოქსიდების განსაზღვრისთვის სილიციუმმჟავას მოცილების შემდეგ დარჩენილ ფილტრატს აორთქლებენ, გადააქვთ 250 მლ-იან კოლბაში და ავსებენ ჭდეშდე გამოხდილი წყლით. კალციუმის განსაზღვრისთვის საანალიზო ხსნარიდან აიღებენ 25 მლ ხსნარს, ამატებენ 50-100 მლ წყალს, 5-6 მლ 1N NaOH-ის ხსნარს, 5-6 წვეთ მურექსიდს და ტიტრავენ ვარდისფერის იასამნისფერში გადასვლამდე.

კალციუმს  $CaCO_3$ -ზე გადათვლით ანგარიშობენ ფორმულით:

$$\%CaCO_3 = \frac{V \cdot K \cdot 250 \cdot 100 \cdot 0.00504}{m \cdot 25}$$

სადაც, V-არის გატიტვრაზე დახარჯული ტრილონ “ბ”-ს რაოდენობა, მლ;

K- ხსნარის შესწორების კოეფიციენტი;

0.00504 –  $CaCO_3$ -ის რაოდენობა, რომელსაც შეიცავს 1მლ 0.1N ტრილონ

„ბ“-ს ხსნარი;

m –მშრალი ნიმუშის წონა, გრ.

$Ca^{2+}$  და  $Mg^{2+}$  საერთო რაოდენობის განსაზღვრისთვის საანალიზო ხსნარის 25 მლ გადააქვთ 250 მლ კონუსურ კოლბაში, უმატებენ 10 მლ ამონიუმის ბუფერულ ხსნარს, 5-6 წვეთ ინდიკატორს ქრომოგენ შავს (ან ლურჯს) და ტიტრავენ 0.1 N ტრილონ “ბ”-ს ხსნარით ჟოლოსფერი წითელიდან ლურჯ ფერში გადასვლამდე.

მაგნიუმის რაოდენობას  $MgCO_3$ -ზე გადათვლით ანგარიშობენ ფორმულით:

$$G_{MgCO_3} = \frac{(V - V_1) \cdot K \cdot 0.004216 \cdot 250 \cdot 100}{m \cdot 25}$$

სადაც, V-არის ტრილონ “ბ”-ს რაოდენობა, რომელიც დაიხარჯა ქრომოგენშავის დამატებისას, მლ;

$V_1$ -ტრილონ “ბ”-ს რაოდენობა, რომელიც დაიხარჯა მურექსიდის დამატებისას, მლ;

0,004216 –  $MgCO_3$ -ის რაოდენობა, რომელსაც შეიცავს 1მლ 0.1N ტრილონ „ბ“-ს ხსნარი;

K - ტრილონ „ბ“-ს ხსნარის შესწორების კოეფიციენტი;

m - მშრალი ნიმუშის წონა, გრ.

**ალუმინის ოქსიდის განსაზღვრა [104]:** მადნის გახსნა მიმდინარეობს SiO<sub>2</sub>-ის განსაზღვრის ანალოგიურად (იხ.გვ.65). სილიციუმმჟავის მოცილების შემდეგ დარჩენილ ფილტრატს ათავსებენ 250 მლ მოცულობის საზომ კოლბაში. ანალიზისთვის იღებენ 25 მლ-ს, კოლბაში აგდებენ კონგოს პატარა ნაჭერს, ამატებენ 30%-იან NaOH-ის ხსნარს კონგოს გაწითლებამდე და ამატებენ 25-30 მლ 20% სეგნეტის მარილის ხსნარს. ეს უკანასკნელი ბოჭავს სამვალენტიან მეტალებს ხსნად კომპლექსურ ნაერთებად. შემდეგ ამატებენ 5-10 წვეთ ფენოფთალეინის ხსნარს და ანეიტრალებენ 0.1N NaOH-ის ხსნარით მდგრადი ვარდისფერი შეფერილობის წარმოქმნამდე, ტუტის ჭარბ რაოდენობას კვლავ ანეიტრალებენ 0.1N HCl-ის წვეთით.

ნეიტრალურ ხსნარს ბიურეტიდან ემატება 1მლ 25% KF და 5-10 წვეთი ფენოფთალეინი. გააკეთებენ რა პირველ ანათვალს ბიურეტიდან, ტიტრავენ ხსნარს HCl-ით გაუფერულებამდე. KF-ის დამატებას ახდენენ მანამ, სანამ უკანასკნელი წვეთის დამატება აღარ გამოიწვევს ხსნარის შეფერვას. ამის შემდეგ იღებენ 0.1N HCl-ის უკანასკნელ ანათვალს. პარალელურად ატარებენ ყრუ ცდას.

ალუმინის ოქსიდის რაოდენობას ანგარიშობენ ფორმულით;

$$\%Al_2O_3 = \frac{a \cdot K \cdot T \cdot V}{V_1 \cdot g}$$

სადაც, a-არის 0.1N HCl-ის ხსნარის რაოდენობა, რომელიც დაიხარჯა გატიტვრაზე, მლ;

K - 0.1N HCl-ის შესწორების კოეფიციენტი;

V - გამოსაკვლევი ხსნარის მთელი მოცულობა, მლ;

V<sub>1</sub> - საანალიზოდ აღებული ხსნარის მოცულობა, მლ;

g - საანალიზოდ აღებული მადნის რაოდენობა, გრ;

T – HCl-ის ხსნარის ტიტრი Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ის მიმართ.

**რკინის განსაზღვრა:** მეთოდი ემყარება II და III ვალენტიანი რკინის სულფოსალიცილმჟავის ყვითელი კომპლექსური ნაერთის წარმოქმნაზე ტუტე

გარემოში (pH=8-12) და შეფერილი ხსნარის ფოტოკოლორიმეტრულ განსაზღვრაზე [105].

განსაზღვრის მსვლელობა: 0.2 გრ მადნის წონაკს ათავსებენ 100 მლ მოცულობის ჭიქაში, ასველებენ წყლით და ხსნიან 5 მლ მარილმჟავით თანაბარი გაცხელებისას. მიღებული ხსნარს ამატებენ 30-40 მლ ცხელ განზავებულ მარილმჟავას (1:50) და ფილტრავენ საშუალო ფილტრზე, ჩარეცხავენ 4-5-ჯერ თბილი მარილმჟავით (1:50) და რამოდენიმეჯერ გამოხდილი წყლით.

ფილტრს ნალექით ათავსებენ პლატინის ტიგელში, გამოწვავენ 500-600°C-ზე. ტიგელში ნალექს ასველებენ წყლით, ამატებენ 3-4 წვეთ განზავებულ გოგირდმჟავას (1:1), 5-6 მლ ფთორწყალბადმჟავას და ალღობენ 650-700°C-ზე გამჭვირვალე ნალღობის მიღებამდე. ტიგელს ნალღობით აციებენ, ათავსებენ 100 მლ მოცულობის კოლბაში და ნალღობს ხსნიან 25-30 მლ განზავებულ მარილმჟავაში(1:4). მიღებულ ხსნარს ფილტრავენ საშუალო ფილტრზე და ჩარეცხავენ 4-5-ჯერ ცხელი წყლით. ფილტრატს აერთებენ, აორთქლებენ 100-150 მლ-მდე, აციებენ და გადააქვთ მზომ 200 მლ მოცულობის კოლბაში, შეავსებენ ჭდემდე და კარგად აურევენ.

ანალიზისთვის 5 მლ ხსნარი გადააქვთ 100 მლ მოცულობის კოლბაში, ამატებენ 100 მლ ჰიდროქსილამინ ჰიდროქლორიდის ხსნარს, 30 მლ სულფოსალიცილის მჟავას და ამიაკს (განზავებული 1:1) ყვითელი ფერის წარმოქმნამდე და 5 მლ-ს სიჭარბით. ხსნარს ავსებენ ჭდემდე წყლით და ურევენ. ოპტიკურ სიმკვრივეს ზომავენ ფოტოკოლორიმეტრზე 430-480 ნმ ტალღის სიგრძის ინტერვალში. შესადარებელ ხსნარად იყენებენ წყალს.

წინასწარ აგებულ საკალიბრო მრუდზე პოულობენ რკინის რა რაოდენობას შეესაბამება მოცემული საკვლევი ხსნარისთვის ფოტოკოლორიმეტრზე მიღებული ანათვალი.

რკინის პროცენტულ შემცველობას  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -ზე გადათვლით ანგარიშობენ ფორმულით:

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{a \cdot 100 \cdot 200 \cdot 2.8516}{g \cdot V}$$

სადაც, a-არის რკინის ნაპოვნი რაოდენობა, გრ;

g- საანალიზოდ აღებული წონაკი, გრ;

V- საანალიზოდ აღებული ხსნარის მოცულობა, მლ;

2.8516 -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -ზე გადამყვანი კოეფიციენტი.

ცხრილში <sup>13</sup> მოცემულია მანგანუმის მადნის შემადგენელი ძირითადი კომპონენტები (%).

ცხრილი №3

მანგანუმის მადნის შემადგენელი ძირითადი კომპონენტები (%).

$\Sigma \text{ Mn}$	$\text{MnO}_2$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{BaO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
20	10.31	47.23	4.2	1.00	2.31	5.07	5.73

### თავი 3. ექსპერიმენტული ნაწილი

#### 3.1. ლაბორატორიული დანადგარის სქემა და გოგირდის დიოქსიდის განსაზღვრის მეთოდიკა

აირის გოგირდის დიოქსიდისგან მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით გაწმენდის ტექნოლოგიური სქემა მოცემულია ნახ.3-ზე.

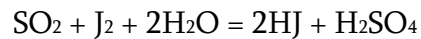
გოგირდის დიოქსიდი ბალონიდან (1) განსაზღვრული სიჩქარით დრექსელის (3) გავლით მიეწოდება შემრევს (5), სადაც ხდება ჰაერთან მისი შერევა. ჰაერი მიეწოდება კომპრესორიდან (2).

შემრევში მიღებული განსაზღვრული კონცენტრაციის აირნარევი მიეწოდება რეაქტორს (6), რომელშიც წინასწარ მოთავსებულია მანგანუმის მადნის სუსპენზია. აირთა სიჩქარის რეგულირება ხდება სარეგულირებელი ვენტილებისა და რეომეტრების (4) საშუალებით. რეაქტორში შემავალ და გამავალ აირში გოგირდის დიოქსიდის კონცენტრაციის განსაზღვრა წარმოებს იოდომეტრული მეთოდებით [106-107].

გოგირდის დიოქსიდის შემცველობის განსაზღვრას დიდი მნიშვნელობა აქვს პროცესის რეგულირებისთვის.  $\text{SO}_2$ -ის კონცენტრაცია აირნარევი ისაზღვრება იოდომეტრული მეთოდით. ამ მიზნით რეაქტორში შესვლამდე აირნარევი მიეწოდება ქილას (8), რომელშიც მოთავსებულია 100 მლ გამოხდილი წყალი, 1 მლ 0.1

N იოდის ხსნარი და 1 მლ სახამებელი. ქილა (8) დაკავშირებულია ასპირატორთან (7), რომელიც აღჭურვილია მანომეტრით.

ანალიზის დაწყებამდე ასპირატორს ავსებენ წყლით, შეუდგამენ მზომ ცილინდრს და ალებენ ონკანს (11), საიდანაც მიეწოდება ქილას (8), აქ გოგირდის დიოქსიდი შედის რეაქციაში იოდთან



ხოლო აირის დანარჩენი ნაწილი მიდის ასპირატორში. ქილაში (8) აირის გატარების სიჩქარე უნდა იყოს ისეთი, რომ 1 წმ-ში გადიოდეს 2-3 ბუშტი. ანალიზის მსვლელობისას საჭიროა ქილის (8) დროგამოშვებით შენჯღრევა. აირს ატარებენ იოდის ხსნარის გაუფერულებამდე. ამის შემდეგ კეტავენ ონკანებს (10,11) და როცა ასპირატორიდან შეწყდება წყლის დენა ონკანს (11) კეტავენ და აითვლიან გამოდენილი წყლის რაოდენობას.

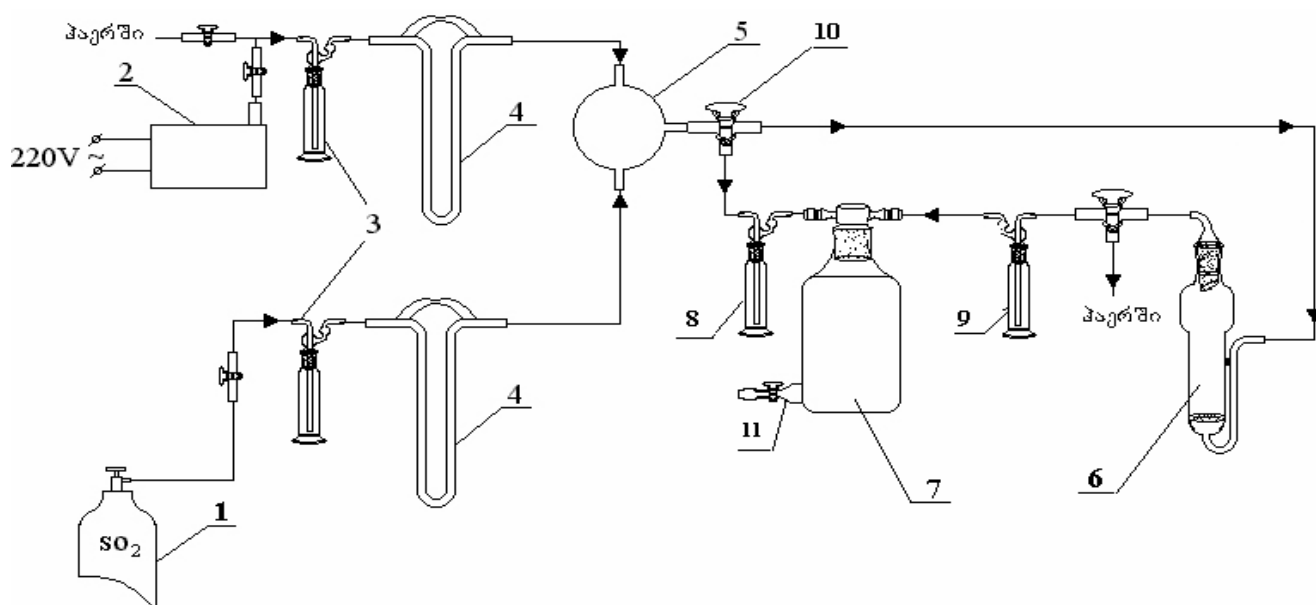
1 მლ 0.1 N იოდის ხსნარს შეესაბამება 1.095 მლ  $\text{SO}_2$ , ხოლო  $\text{SO}_2$ -ის პროცენტულ შემცველობას ანგარიშობენ ფორმულით:

$$a = \frac{1.095 \cdot n \cdot 100}{V + 1,095 \cdot n}$$

სადაც,  $n$  - აირის ალებული იოდის ხსნარის მოცულობა, მლ;

$V$  – გამოდენილი წყლის მოცულობა, მლ.

რეაქტორიდან გამომავალ აირში გოგირდის დიოქსიდის კონცენტრაციის განსაზღვრას ახორციელებენ ანალოგიურად, იმ განსხვავებით, რომ მშთანთქმელ ხსნარად ამ შემთხვევაში გამოყენებულია იოდის სანტინორმალური ხსნარი (0.01N).



**ნახ.3.** 1-SO<sub>2</sub>-ის ბალონი, 2-ჰაერის კომპრესორი, 3-დრექსელები, 4-რეომეტრები, 5-შემრევი, 6-რეაქტორი, 7-ასპირატორი, 8,9-ქილები, 10,11-ონკანები.

### 3.2. ზოგიერთი ფაქტორის გავლენა მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირიდან SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის პროცესზე

#### 3.2.1 ტემპერატურის გავლენა აბსორბციის პროცესზე სხვადასხვა მოცულობითი სიჩქარეებისას

მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით SO<sub>2</sub>-ის აბსორბცია რთული ჰეტეროგენული პროცესია, რომელშიც ერთდროულად მონაწილეობას ღებულობს სამ სხვადასხვა აგრეგატულ მდგომარეობაში მყოფი რეაგენტი. SO<sub>2</sub>-გან აირების გაწმენდის ჯამური პროცესი, რომელიც გამოისახება რეაქციით:



ფორმალურად შეიძლება მივაკუთვნოთ სისტემას: მყარი-აირი, მაგრამ რეალურად პროცესი გაცილებით რთულად მიმდინარეობს. მანგანუმის ინფილტრაციული

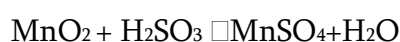
მადანი ჰიდროფილური მინერალია და მორეაგირე ნივთიერებათა ფაზათა გამყოფ ზედაპირად გვევლინება არა სისტემა: მყარი-აირი, არამედ მყარი-თხევადი. იმის გათვალისწინებით, რომ გოგირდის დიოქსიდი წყალში კარგი ხსნადობით ხასიათდება, მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის პროცესი შეიძლება დავყოთ შემდეგ სტადიებად:

1. SO<sub>2</sub>-ის აბსორბცია წყლით;
2. წყალში გახსნილი SO<sub>2</sub>-ის დიფუზია ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე;
3. SO<sub>2</sub>-ის და MnO<sub>2</sub>-ის ქიმიური ურთიერთქმედების პროცესი MnSO<sub>4</sub>-ის წარმოქმნით.
4. რეაქციის პროდუქტის (MnSO<sub>4</sub>) მოწყვეტა მყარი ფაზის ზედაპირიდან და მისი გადასვლა ხსნარის მოცულობაში.

პროცესის პირველ სტადიას ვერ მივაკუთვნებთ წმინდა ფიზიკურ პროცესს. ცნობილია, რომ [108] წყალში გახსნილი SO<sub>2</sub> ერთდროულად არსებობს როგორც გოგირდოვანმჟავას H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>-ის, ისე SO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O-ს ფორმაში, სადაც n იცვლება 2-დან 4-მდე. როგორც ერთ, ისე მეორე ფორმაში გოგირდის დიოქსიდის წყალთან ნაერთი თხევად ფაზაში იმყოფება.

მეორე და მეოთხე სტადიები დიფუზური პროცესებია და ემორჩილება დიფუზიის კანონებს.

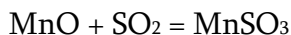
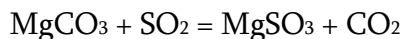
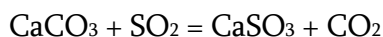
მესამე სტადია ქიმიური პროცესია. SO<sub>2</sub>-ის და MnO<sub>2</sub>-ის ურთიერთქმედების პროცესი უფრო მიზანშეწონილია გამოსახოს რეაქციებით:



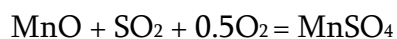
ან



მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის ქიმიური შედგენილობის გათვალისწინებით შესაძლებელია ადგილი ჰქონდეს რეაქციებს:

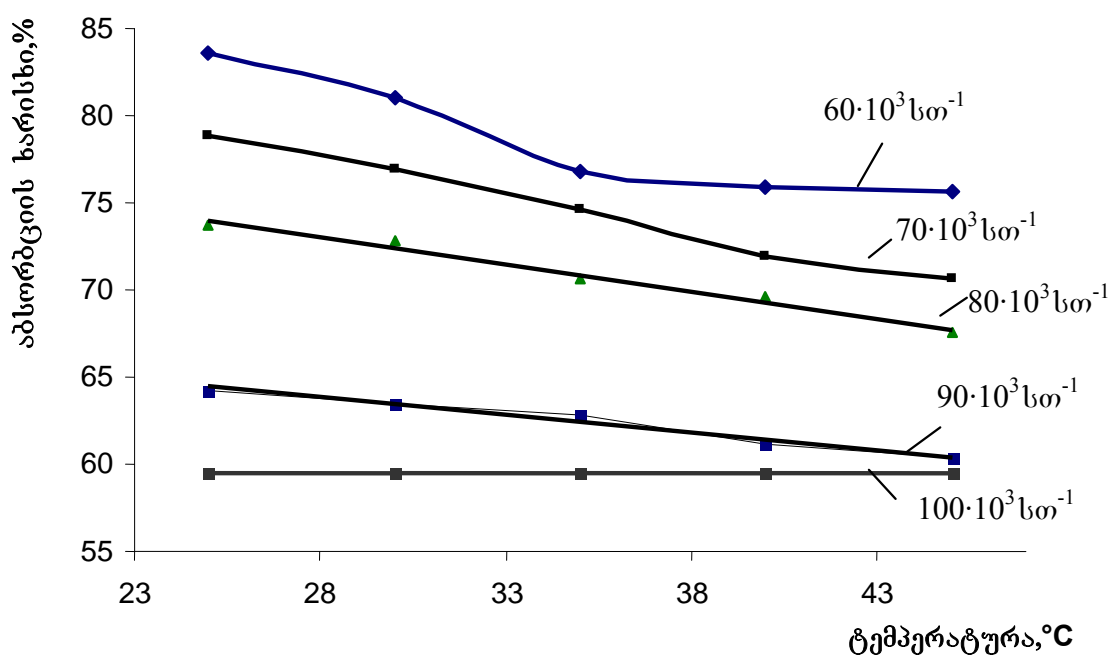


სავარაუდოა აგრეთვე გოგირდის დიოქსიდის კატალიზური დაჟანგვის შედეგად ადგილი ჰქონდეს რეაქციას



SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის ჯამური პროცესის სიჩქარის მაღალიმიტირებელ სტადიად ითვლება ყველაზე დაბალ სიჩქარით მიმდინარე პროცესი.

ჩვენს მიერ შესწავლილია მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით 25-45°C ტემპერატურულ ინტერვალში SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის პროცესი აირის სხვადასხვა მოცულობითი სიჩქარეებისას. შედეგები წარმოდგენილია ნახ.4-ზე.



ნახ.4. აბსორბციის ხარისხის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება აირის სხვადასხვა მოცულობითი სიჩქარეებისას

როგორც შედეგები უჩვენებენ აბსორბციის ხარისხი უკუპროპორციულ დამოკიდებულებაშია აირის მოცულობით სიჩქარესთან. პირველი სურათიდან ასევე ირკვევა, რომ პროცესის ტემპერატურის ცვლილებით აბსორბციის ხარისხის ცვლილების ხასიათი, აირის სხვადასხვა მოცულობით სიჩქარეზე, ერთმანეთისგან მკვეთრად განსხვავდება. ასე მაგალითად,  $80 \cdot 10^3$  და  $90 \cdot 10^3 \text{ სთ}^{-1}$  მოცულობით სიჩქარეებზე  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის ხარისხი წრფივ დამოკიდებულებაშია ტემპერატურასთან. უფრო დაბალ სიჩქარეებზე ტემპერატურის გაზრდით აბსორბციის ხარისხი სწრაფად მცირდება, შემდეგ კი უმნიშვნელოდ იცვლება. ვვარაუდობთ, რომ აბსორბციის ხარისხის ცვლილების ასეთი ხასიათი განპირობებულია შემდეგი ფაქტორებით:

შედარებით დაბალ მოცულობით სიჩქარეებზე და დაბალ ტემპერატურაზე გოგირდის დიოქსიდის აბსორბციის ხარისხი მაღალია. აბსორბციის ხარისხის მაღალი მნიშვნელობა მიიღწევა ერთი მხრივ სითხეში აირის დაბალი ფიქტიური სიჩქარით და მეორე მხრივ დაბალი ტემპერატურით [109]. ტემპერატურის გაზრდა ორ ურთიერთსაწინააღმდეგო გავლენას ახდენს  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის ხარისხზე. კერძოდ, ტემპერატურის გაზრდით სწრაფად მცირდება  $\text{SO}_2$ -ის წონასწორული კონცენტრაცია აირში, რაც უარყოფითად აისახება აბსორბციის ხარისხზე, მეორე მხრივ იზრდება  $\text{MnO}_2$ -ის  $\text{SO}_2$ -თან ქიმიური ურთიერთქმედების სიჩქარე, რაც დადებითად მოქმედებს აბსორბციის ხარისხის მნიშვნელობაზე. ვფიქრობთ, რომ დაბალ ტემპერატურებზე  $\text{SO}_2$ -ის დიფუზიის სიჩქარე მნიშვნელოვნად ჭარბობს ქიმიური რეაქციის სიჩქარეს, რის გამოც მცირდება  $\text{SO}_2$ -ის კონცენტრაციის გრადიენტი ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე: სითხე-მყარი. უფრო მაღალ ტემპერატურებზე ( $35-45^\circ\text{C}$ )  $\text{SO}_2$ -ის გახსნის სიჩქარე უტოლდება ქიმიური რეაქციის სიჩქარეს, რის გამოც  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის ჯამური სიჩქარე პრაქტიკულად უცვლელი რჩება. მაღალ მოცულობით სიჩქარეებზე აირის სუსპენზიასთან კონტაქტის დრო შემცირებულია. ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე აირი-სითხე შენარჩუნებულია კონცენტრაციის გრადიენტის მაღალი მნიშვნელობა, რაც ასახვას ჰპოვებს აბსორბციის ხარისხის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდზე.

ჩვენს მიერ გამოთვლილია აბსორბციის ფარდობითი სიჩქარის მნიშვნელობები პროცესის დაწყებიდან 3 წთ-ის შემდეგ სხვადასხვა ტემპერატურაზე აირის

სხვადასხვა მოცულობითი სიჩქარეებისას. სიჩქარის გამოთვლა წარმოებდა ფორმულით:

$$V = \frac{V_a \cdot \eta \cdot 1000 \cdot 64 \cdot C_{SO_2}}{100 \cdot V_s \cdot 22.4 \cdot 100} \text{ გ/ლ}\forall\text{სთ}$$

სადაც,  $V_a$ - აირის აირის სიჩქარე, ლ/სთ (ნ.პ.);

$\eta$ -აბსორბციის ხარისხი, %;

$V_s$ -სუსპენზიის მოცულობა, ლ;

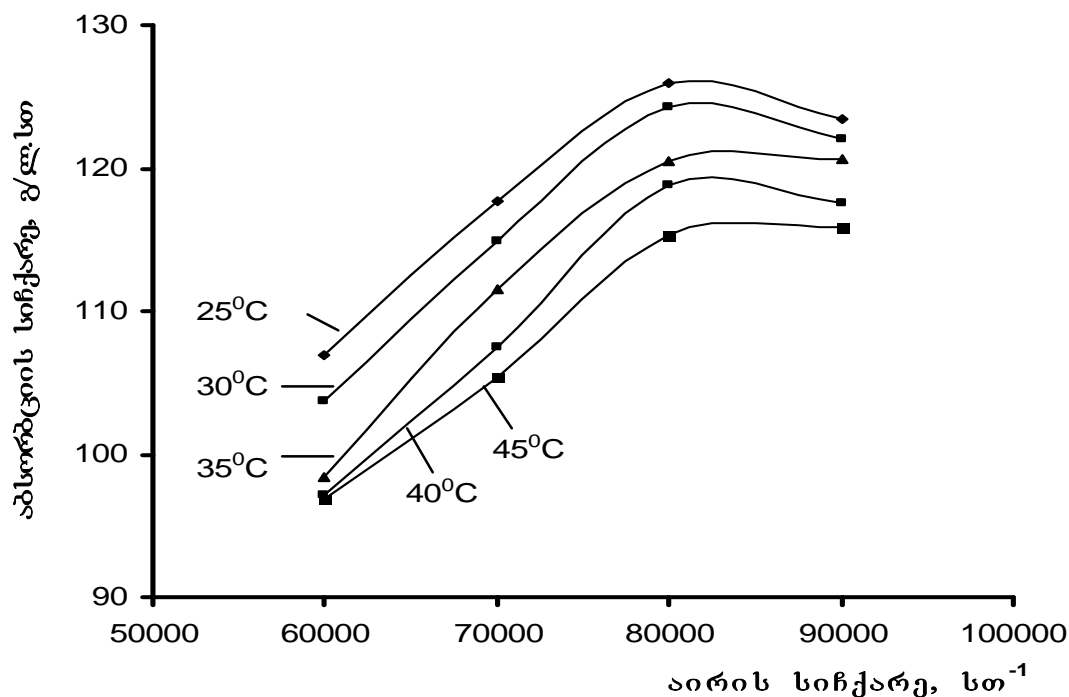
$C_{SO_2}$ -გოგირდის დიოქსიდის კონცენტრაცია საწყის ნარევეში, (% მოც.).

შედეგები წარმოდგენილია ნახ.5-ზე.

მიღებული მრუდების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ აირის სიჩქარის გაზრდით აბსორბციის მოჩვენებითი სიჩქარე ჯერ იზრდება, აღწევს მაქსიმუმს და შემდეგ კლებულობს, რაც გამოწვეულია შემდეგი მიზეზებით:

აირის დაბალ სიჩქარეებზე დროის ერთეულში გატარებული

$SO_2$ -ის რაოდენობა მცირეა, რის გამოც სისტემა: აირი-სითხე შორს არის წონასწორობისგან. დროის ერთეულში შთანთქმული  $SO_2$ -ის რაოდენობა აირის სიჩქარის გაზრდით იზრდება. გარკვეული სიჩქარის შემდეგ, აირის სითხესთან ფიქტიური შეხების დროის შემცირების შედეგად  $SO_2$ -ის მნიშვნელოვანი ნაწილი ვერ ასწრებს სითხესთან კონტაქტს, რაც უარყოფით ასახვას ჰქონდა აბსორბციის ჯამურ პროცესზე.



ნახ.5.  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის მოზენებითი სიქარის აირის  
მოცულობით სიქარეზე დამოკიდებულების მრუდები პროცესის სხვადასხვა  
ტემპერატურაზე

მრუდების ანალიზი ასევე გვიჩვენებს, რომ ტემპერატურის გაზრდით აბსორბციის სიქარე მნიშვნელოვნად მცირდება. შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით აირებიდან  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის საწყის სტადიაზე მალიმიტირებელ ფაქტორად გვევლინება არა  $\text{MnO}_2$ -ის და  $\text{SO}_2$ -ის ურთიერთქმედების სიქარე, არამედ სითხით  $\text{SO}_2$ -ის ფიზიკური აბსორბციის სიქარე.

### 3.2.2. $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის ხარისხის ტემპერატურაზე და პროცესის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების შესწავლა

გოგირდის დიოქსიდის აბსორბციის ხარისხის ტემპერატურაზე და პროცესის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების დადგენა ხორციელდებოდა შემდეგი პირობებისას: აირში  $\text{SO}_2$ -ის კონცენტრაცია იყო – 0.3%; ფარდობა მყარი:თხევადი=1:5, ხოლო აირის სიქარე – 160 ლ/სთ.

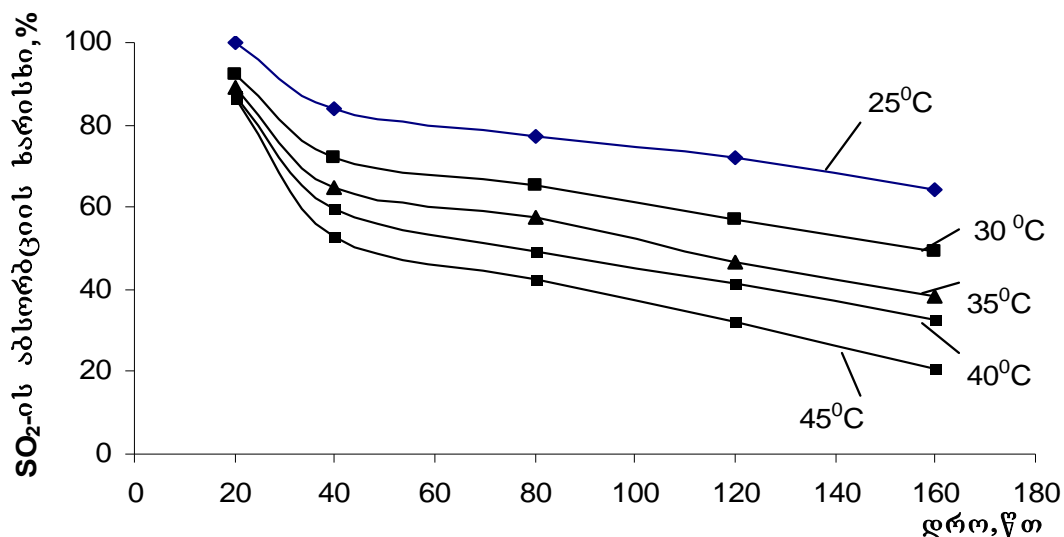
ექსპერიმენტის შედეგები მოცემულია ცხრილში №4 და ნახ.6-ზე.

გამავალ აირში SO<sub>2</sub>-ის შემცველობის (%) ტემპერატურაზე და პროცესის  
ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების ცხრილი

ტემპერატურა °C დრო, წთ	25	30	35	40	45
20	0	0.02	0.0323	0.0398	0.0411
40	0.01	0.084	0.104	0.121	0.142
80	0.049	0.104	0.126	0.158	0.168
120	0.084	0.128	0.143	0.176	0.206
160	0.098	0.152	0.176	0.204	0.237

ცხრილიდან და ნახაზიდან კარგად ჩანს, რომ როგორც ტემპერატურის, ისე დროის გაზრდით SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის ხარისხი მცირდება. მაგ. 25°C-ზე, გარკვეული პერიოდის განმავლობაში რეაქტორიდან გამავალ აირში SO<sub>2</sub> არ შეინიშნება, გარკვეული დროის შემდეგ კვალის სახითაა, ხოლო 80 წთ-ზე ზღვრული დასაშვები ნორმის ზღვარზე იმყოფება, შემდეგ კი სწრაფად იზრდება.

ჩავთვალოთ, რომ აბსორბციის ხარისხის შემცირება და შესაბამისად, რეაქტორიდან გამავალ აირში ნარჩენი გოგირდის დიოქსიდის კონცენტრაციის პროგრესული ზრდა განპირობებული უნდა ყოფილიყო სუსპენზიაში არსებული აქტიური მანგანუმის კონცენტრაციის მნიშვნელოვანი შემცირებით. მიზანშეწონილად მიგვაჩნია, რომ გაწმენდის მაღალი ხარისხის შენარჩუნებასთან ერთად მანგანუმის მაქსიმალურად ხსნად ფორმაში გადასვლის უზრუნველსაყოფად პროცესი უნდა განხორციელდეს ორ სტადიად.



ნახ.6.  $\text{SO}_2$ -ის აბსორბციის ხარისხის (%) ტემპერატურაზე და პროცესის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების მრუდები

### 3.3. ნარჩენი აირების $\text{SO}_2$ -გან მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით გაწმენდის ოპტიმიზაცია

აირის გოგირდის დიოქსიდისგან მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით გაწმენდის პროცესის პრაქტიკული განხორციელებისთვის საჭიროა განისაზღვროს ოპტიმალური პირობები გამწმენდი მასის გოგირდის დიოქსიდთან ურთიერთქმედებისთვის. ამ პირობების დადგენისთვის საჭიროა რეაქციის სიჩქარეზე მოქმედი ზოგიერთი ფაქტორის, კერძოდ ტემპერატურის, მოცულობითი სიჩქარის და საწყის აირნარევში  $\text{SO}_2$ -ის ერთდროული ცვლილების შესწავლა.

აირნარევის  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის ოპტიმალური რეჟიმის (ზემოთ მოცემული ფაქტორთა ერთდროული ცვლილებისას) დადგენისთვის გამოვიყენეთ ექსპერიმენტის დაგეგმვის მათემატიკური მეთოდი [110-112]. გამოკვლევების ძირითად დონედ აღებული იქნა შემდეგი კოორ- დინატები: აირნარევში  $\text{SO}_2$ -ის კონცენტრაცია – 0.5%; ტემპერატურა – 30°C; აირნარევის მოცულობითი სიჩქარე – 14000 სთ<sup>-1</sup>.

გაწმენდის პროცესის აღწერისთვის ვისარგებლეთ 2<sup>n</sup> ტიპის სრული ფაქტორული ექსპერიმენტით, რომლის დაგეგმვის პირობები და მატრიცა მოცემულია ცხრილებში №5 და №6.

ცხრილი №5

ექსპერიმენტის დაგეგმვის პირობები

ფაქტორები	+1	0	-1	ვარიაციის ინტერვალი
ტემპერატურა, °C	40	30	20	10
აირნარევის მოცულობითი სიჩქარე, სთ <sup>-1</sup>	16000	14000	12000	2000
KSO <sub>2</sub> -ის კონცენტრაცია, %	0.7	0.5	0.3	0.2

დაგეგმვის მატრიცა წარმოადგენს ვარიებადი ფაქტორების კოდირებული მნიშვნელობების ცხრილს და მოიცავს ფაქტორების დონეთა ვარიაციის შესაძლო კომბინაციებს. ნატურალური ცვლადებიდან კოდირებულ ცვლადებზე გადასვლა ხორციელდებოდა შემდეგი ფორმულების გამოყენებით:

$$X' = \frac{Z_{\max} - Z}{\Delta Z}; \quad X'' = \frac{Z_{\min} - Z}{\Delta Z};$$

სადაც,  $Z_{\max}$  – არის ფაქტორის მაქსიმალური მნიშვნელობა;

$Z_{\min}$  – ფაქტორის მინიმალური მნიშვნელობა;

$Z$  – ძირითადი დონე;

$\Delta Z$  – ვარიაციის ინტერვალი.

ცდის შედეგები მოცემულია ცხრილში 16.

სადაც,  $Y_1, Y_2$  – არის პარალელურ ცდებში აირნარევის გაწმენდის ხარისხის მნიშვნელობები.

$\bar{Y}$  – აირნარევის გაწმენდის ხარისხის საშუალო მნიშვნელობა.

ცხრილი №6

დაგეგმვის მატრიცა კოდირებულ ცვლადებში

№	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	$\bar{Y}$	S <sup>2</sup>
---	----------------	----------------	----------------	----------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	--	----------------	----------------	-----------	----------------

1	+	-	-	-	+	+	+	-	97.4	95.55	96.475	1.7112
2	+	+	-	-	-	-	+	+	93.028	94.56	93.794	1.1735
3	+	-	+	-	-	+	-	+	92.6	91.12	91.86	1.095
4	+	+	+	-	+	-	-	-	91.8	89.6	90.7	2.42
5	+	-	-	+	+	-	-	+	77.36	79.44	78.4	2.163
6	+	+	-	+	-	+	-	-	76.33	75.207	75.76	0.6305
7	+	-	+	+	-	-	+	-	73.53	72.58	73.055	0.4512
8	+	+	+	+	+	+	+	+	69.38	71.6	70.49	2.464

2<sup>n</sup> ტიპის სრული ფაქტორული ექსპერიმენტის მონაცემთა საფუძველზე განისაზღვრა წრფივი რეგრესიული განტოლების კოეფიციენტები კოდირებულ ცვლადებში და მიღებულ იქნა შემდეგი განტოლება:

$$Y = 83.81781 - 1.12969X_1 - 2.29156X_2 - 9.38944X_3 + 0.19843X_1X_2 - 0.16944X_1X_3 - 0.3643X_2X_3 - 0.18181 X_1X_2X_3$$

რეგრესიის განტოლების კოეფიციენტების შეფასება მოხდა სტიუდენტის კრიტერიუმის მიხედვით, რის შემდეგ განტოლებამ მიიღო შემდეგი სახე:

$$Y = 83.81781 - 1.12969X_1 - 2.29156X_2 - 9.38944X_3$$

მიღებული განტოლების ადექვატურობა შემოწმდა ფიშერის  $F_8=0.32$  და კოხრენის  $G_8=0.216577$  კრიტერიუმებით. მათი გამოთვლილი მნიშვნელობები ნაკლები აღმოჩნდა 95%-იანი რწმუნების ალბათობის ცხრილურ მნიშვნელობებზე

( $G_{\text{თ}}=0.6798$ ,  $F_{\text{თ}}=11.3$  ), რაც იმაზე მიუთითებს, რომ მიღებული განტოლება ადეკვატურად აღწერს პროცესს.

სტიუდენტის კრიტერიუმით რეგრესიის განტოლების კოეფიციენტთა შეფასებამ ცხადყო, რომ სამივე ფაქტორის შემცირება დადებით ზემოქმედებას ახდენს აირნარევის  $\text{SO}_2$ -გან მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით გაწმენდის ხარისხზე.

აირნარევის  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის ხარისხის ამაღლების მიზნით გამოყენებულ იქნა სწრაფი დაღმასვლის მეთოდი  $\text{SO}_2$ -ის კონცენტრაციის, ტემპერატურის და მოცულობითი სიჩქარის შემცირებით. შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში <sup>17</sup>.

როგორც ცხრილიდან ჩანს აირნარევის  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდის მაქსიმალური ხარისხი – 99,7% მიღწეულია მე-12 ცდაზე, რომლის პარამეტრებია:  $\text{SO}_2$ -ის კონცენტრაცია - 0,2%; ტემპერატურა - 15°C; აირნარევის მოცულობითი სიჩქარე - 11000სთ<sup>-1</sup>, რის შემდეგაც ცდების ჩატარება შევწყვიტეთ.

#### ცხრილი №7

##### ცდის პირობები და ექსპერიმენტის შედეგები

ვარიების ინტერვალი და ფაქტორთა დონეები	$X_1(t)$	$X_2(v)$	$X_3(c)$	YY, %
ძირითადი დონე	30	14000	0.5	
ვარიების ინტერვალი	10	2000	0.2	
რეგრესიის კოეფიციენტები $b_i$	-1.12969	-2.2915	-9.3892	
ნამრავლი $b_i \forall x_i$	11.2	5000	2	
ბიჯი	5	1000	0.1	
ცდა 9	30	14000	0.5	92.224
10	25	13000	0.4	94.35
11	20	12000	0.3	97.476

12	15	11000	0.2	99.7
----	----	-------	-----	------

### 3.4. მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირის SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის პროცესის კინეტიკის შესწავლა

#### 3.4.1. პროცესის მალიმიტირებელი სტადიის დადგენა

პროცესში მყარი ნივთიერებების მონაწილეობისას რეაქციის განხორციელება მრავალ ფაქტორზეა დამოკიდებული და რამდენიმე სტადიად მიმდინარეობს. ასევე უნდა აღვნიშნოთ, რომ პროცესზე მოქმედი მალიმიტირებელი ფაქტორი შეიძლება სხვადასხვა იყოს და ამ ფაქტორის სახეობა დამოკიდებულია თვით პროცესის მიმდინარეობის მექანიზმზე. რეაქცია შეიძლება მიმდინარეობდეს დიფუზურ ან კინეტიკურ უბანში. ბუნებრივია ყველაზე ნელა მიმდინარე სტადია განსაზღვრავს პროცესის სიჩქარეს და ამის დადგენა საკმაოდ რთულია.

მალიმიტირებელი სტადიის დადგენა შესაძლებელია სხვადასხვა ხერხით. იმის დასადგენად, თუ რომელ უბანში (კინეტიკური, დიფუზური) მიმდინარეობს პროცესი, ჩავატარეთ როგორც მათემატიკური, ისე ექსპერიმენტული გათვლები.

პროცესის კინეტიკის შესწავლისას დავუშვით, რომ მოცემულ პირობებში ხსნარი გაჯერებულია SO<sub>2</sub>-ით და ამდენად პირველი სტადია (SO<sub>2</sub>-ის აბსორბცია წყლით) გავლენას ვერ მოახდენს პროცესზე.

მათემატიკური გათვლებისთვის გამოვიყენეთ ურთიერთ- კონკურენტული მათემატიკური მოდელები. მალიმიტირებელი საფეხურის დადგენის მიზნით, H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>-სა (თხევადი) და MnO<sub>2</sub>-ის (მყარი) ურთიერთქმედების ჰეტეროგენული პროცესის მათემატიკურ მოდელებად გამოვიყენეთ არაკატალიზური ჰეტეროგენული რეაქციების კინეტიკური განტოლებები [117-119 ]:

$$\tau_i = \frac{X_B^0 R}{6M \cdot D \cdot X_A^0} \cdot \{ (M-1) \cdot [1 - 3(1 - X_{Bi})^{3/2} + 2(1 - X_{Bi})] + 6 \cdot \left[ \frac{1 - (1 - X_{Bi})^{1/3}}{(1 - X_{Bi})^{1/3}} + \ln(1 - X_{Bi})^{1/3} \right] \} \quad (1)$$

$$\tau_i = \frac{X_B^0 R}{M \cdot K \cdot X_A^0} \cdot \left\{ (M-1) \cdot [1 - (1 - X_{Bi})^{1/3}] + 0.5 \cdot \left[ \frac{1}{(1 - X_{Bi})^{2/3}} - 1 \right] \right\} \quad (2)$$

სადაც,  $X_A^0$  და  $X_B^0$  –  $SO_2$ -ის და  $MnO_2$ -ის საწყისი კონცენტრაციებია ხსნარში (მოლი/ლ) და მყარ მასაში (მოლი/დმ<sup>3</sup>);

$K$  – პროცესის პირობითი სიჩქარის მუდმივა;

$D$  – დიფუზიის კოეფიციენტი;

$M$  –  $SO_2$ -ის და  $MnO_2$ -ის საწყისი მოლური ფარდობა;

$X_{Bi}$  –  $MnO_2$ -ის კონცენტრაცია  $\tau_i$  დროში;

$R$  – მარცვლის საშუალო რადიუსი, მ.

$D$ -ს მნიშვნელობა გამოთვლილი იქნა უილკის და ჩენგის ცნობილი ფორმულით:

$$D_{AB} = 7.4 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{(\Phi \cdot M_B)^{1/2} \cdot T}{\eta_B \cdot V_A^{0.6}}$$

სადაც,  $\Phi$  – გამხსნელის ასოციაციის კოეფიციენტი,

წყლისთვის ტოლია 2,6;

$M_B$  – გამხსნელის (წყლის) მოლური მასა;

$\eta_B$  – გამხსნელის სიბლანტე, სნპ;

$V_A$  – გახსნილი ნივთიერების მოლური მოცულობა, ნორმალურ ტემპერატურაზე, დუდილის პირობებში;

$T$  – პროცესის ტემპერატურა, K.

ხოლო  $K$  და  $D$  მნიშვნელობები სხვადასხვა ტემპერატურებზე გავიანგარიშეთ უმცირეს კვადრატთა მეთოდით.

„ $X_B - \tau$ “ დამოკიდებულების ყოველ მრუდს ვამუშავებდით კონკურენტული მოდელებით (1) და (2), რომლებიც აღწერდნენ ჰეტეროგენული პროცესის სხვადასხვა მაღიმიტერებელ საფეხურებს – (1) დიფუზიის პროცესს, (2) ქიმიურ რეაქციას მარცვლის ზედაპირზე. ამა თუ იმ მაღიმიტერებელი საფეხურის არჩევის კრიტერიუმად ვიღებდით სტანდარტულ გადახრებს ექსპერიმენტულ და

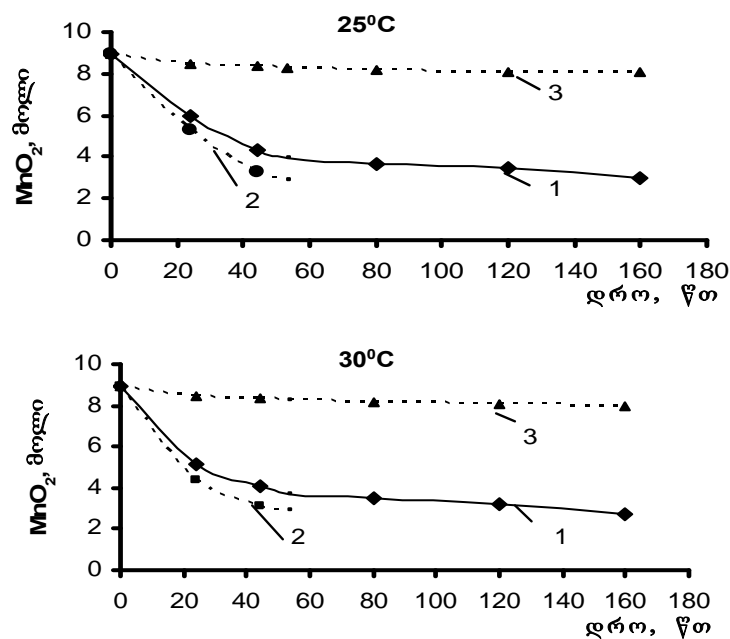
მოდელებით გამოთვლილ მნიშვნელობებს შორის. (1) და (2) არაწრფივი განტოლებები ამოხსნილი იქნა იტერაციული მეთოდით კომპიუტერის საშუალებით, ამისთვის დამოკიდებულებები (1) და (2) წარმოვადგინეთ  $X_B=F(\tau)$  სახით:

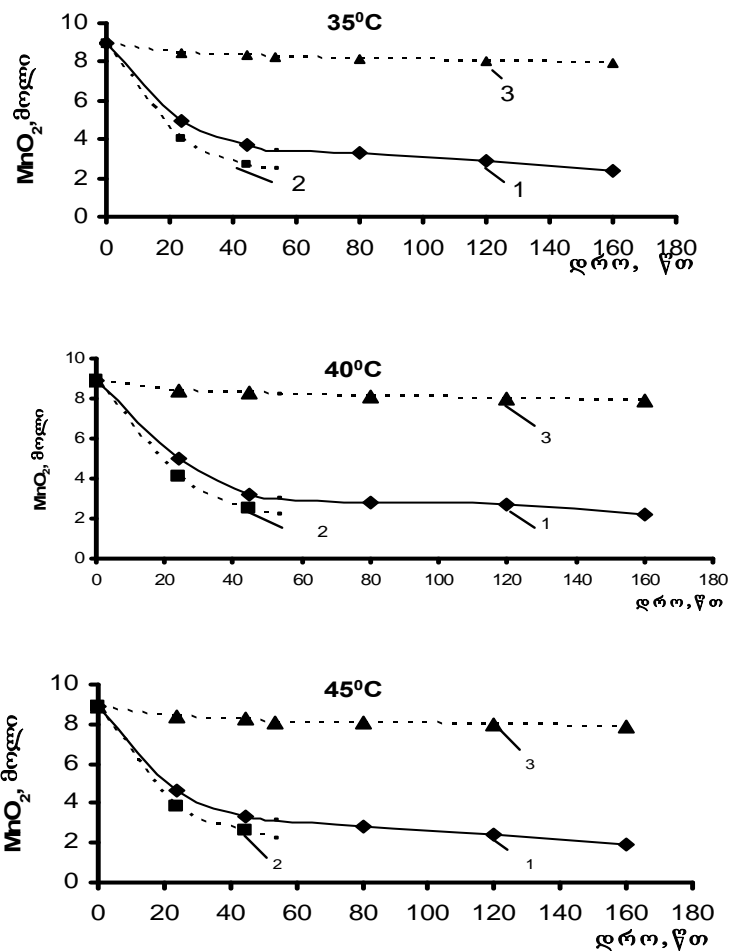
$$X_{Bi} = -\frac{X_B^0}{2} + \frac{3}{2} \cdot X_{Bi}^{2/3} \cdot X_B^{01/3} - 3 \frac{X_B^0}{M-1} \cdot \left[ \left( \frac{X_B^0}{X_{Bi}} \right)^{1/3} - 1 + \ln \left( \frac{X_{Bi}}{X_B^0} \right)^{1/3} \right] + \frac{3M \cdot D \cdot X_A^0}{(M-1) \cdot R^2} \cdot \tau_i \quad (3)$$

$$X_{Bi} = \left[ X_B^{01/3} + \frac{X_B^0 \cdot X_{Bi}^{-2/3} - X_B^{01/3}}{2(M-1)} - \frac{M \cdot K \cdot X_A^0 \cdot X_B^{01/3}}{(M-1) \cdot R} \cdot \tau_i \right] \quad (4)$$

ანგარიშის შედეგები წარმოდგენილია ნახ.7-ზე.

როგორც ვხედავთ (4) განტოლებით გამოთვლილი შედეგები საკმაოდ კარგად ემთხვევა ექსპერიმენტულ შედეგებს (განსაკუთრებით პირველი 40 წუთის განმავლობაში), რაც მიუთითებს იმაზე, რომ პროცესის მაღლიმიტერებელი საფეხური არის ქიმიური რეაქცია და პროცესი მიმდინარეობს კინეტიკურ უბანში.





ნახ.7. 1 - ექსპერიმენტით გამოთვლილი მრუდი, 2 - (4) მოდელით გამოთვლილი მრუდი, 3 - (3) მოდელით გამოთვლილი მრუდი

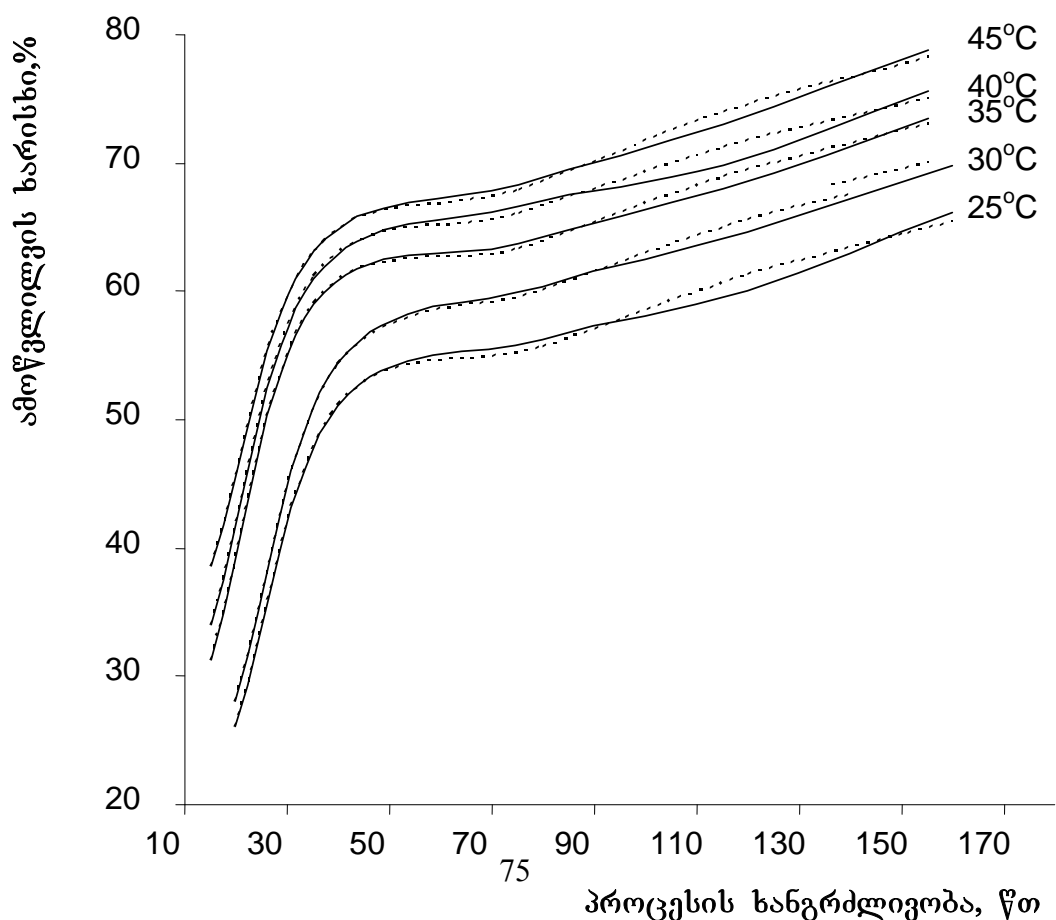
### 3.4.2. მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხის ტემპერატურაზე და პროცესის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების დადგენა

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით წარმოების ნარჩენი და ნამწვი აირების გაწმენდა გოგირდის დიოქსიდისგან რთული ჰეტეროგენული პროცესია, რადგანაც პროცესში ერთდროულად მონაწილეობს მორეაგირე ნივთიერებების როგორც აირადი, ისე თხევადი და მყარი ფაზები. მადანში ოქსიდურ ფორმაში მყოფ მანგანუმთან  $SO_2$ -ის ურთიერთქმედება მიმდინარეობს მყარი და თხევადი ფაზების გამყოფ ზედაპირზე. ამ უკანასკნელის ხვედრითი ზედაპირი და მისი მდგომარეობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს აირების  $SO_2$ -გან გაწმენდის ქიმიურ პროცესზე.

მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდისას ჩვენ ვითვალისწინებთ არა მხოლოდ აირის მაღალი ხარისხით გაწმენდის მიღწევას, არამედ აგრეთვე მანგანუმის მაქსიმალურად ამოწვლილვას მადნიდან.

პროცესის კინეტიკის შესწავლის მიზნით მიზანშეწონილად ჩავთვალეთ შეგვესწავლა ტემპერატურის და პროცესის ხანგრძლივობის გავლენა მანგანუმის ხსნად ფორმაში გადასვლის ხარისხზე; პროცესზე მოქმედი ისეთი პარამეტრები, როგორებიცაა: საწყის აირში SO<sub>2</sub>-ის კონცენტრაცია, აირის მოცულობითი სიჩქარე და ფარდობა – მყარი:თხევადი დატოვებული იქნა უცვლელად. კვლევები წარმოებდა მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის დაწვრილმანებულ ნიმუშზე ფრაქციით – 0.5მმ. აღნიშნულ პირობებში პროცესის კინეტიკის ფაქიზი გამოკვლევა შეუძლებელია სუსპენზიის შემადგენელი მყარი ფაზის პოლიდისპერსულობის გამო, აქვს დადებითი მხარეც: ამ პირობებში მიღებული შედეგები საკმაოდ მიახლოებულია რეალურთან.

ექსპერიმენტები ტარდებოდა ნახევრად გამჭოლ ლაბორატორიულ დანადგარზე (ნახ.3), რომლის დროსაც სარეაქციო არეში უწყვეტად მიეწოდებოდა SO<sub>2</sub>-ის მიმართ



უცვლელი შედგენილობის აირი, ხოლო მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზია იმყოფებოდა სტაციონალურ რეჟიმში. ექსპერიმენტის შედეგები მოცემულია მე-8 ცხრილში და ნახ.8-ზე (უწყვეტი წირები).

ნახ.8. მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხის პროცესის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების კინეტიკური მრუდები  
ფარდობა მყარი : თხევადი = 1 : 5; აირის სიჩქარე–160 ლ/სთ.

ცხრილი 8

მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხის ტემპერატურაზე და პროცესის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების ცხრილი

ტემპერატურა, დრო, წთ	25°C		30°C		35°C		40°C		45°C	
	ექსპ.	გამ.	ექსპ.	გამ.	ექსპ.	გამ.	ექსპ.	გამ.	ექსპ.	გამ.
20	26,04	26,04	28,125	28,12	30,729	30,73	33,333	33,33	38,02	38,02
40	51,04	51,12	54,466	54,22	58,333	58,39	60,416	60,5	62,49	62,55
80	56,249	55,62	60,416	59,98	63,12	62,68	65,98	65,32	67,7	67,26
120	60,05	61,32	64,583	65,47	67,42	68,32	69,23	70,57	72,395	73,29
160	66,14	65,42	69,79	69,29	72,916	72,41	75,05	74,29	78,125	77,62

მიღებული შედეგები გვიჩვენებენ, რომ სხვადასხვა ტემპერატურაზე პროცესის ჩატარებისას მანგანუმის ინფილტრაციული მადნიდან მანგანუმის ხსნად ფორმაში გადასვლის ხარისხის ცვლილების ხასიათი ყველა ტემპერატურაზე ერთნაირია და

პროცესის დაწყებიდან გარკვეული დროის შემდეგ აღგილი აქვს პროცესის მნიშვნელოვან დამუხრუჭებას. გარდაქმნის ხარისხის პროცესის ხანგრძლივობასთან დამოკიდებულების მათემატიკური აღწერის მიზნით, მიღებული ექსპერიმენტული მონაცემების დამუშავება ვაწარმოეთ კომპიუტერული პროგრამის – SPSS-ის მე-13 ვერსიით, რამაც საშუალება მოგვცა დაგვედგინა, რომ სურ.8-ზე წარმოდგენილი კინეტიკური მრუდები შეიძლება აღვწეროთ განტოლებით

$$Y=b_0+b_1/x+b_2/x^2+b_3/x^3$$

სადაც, Y არის მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხი;

X – პროცესის ხანგრძლივობა;

$b_0, b_1, b_2, b_3$  – ემპირული განტოლების კოეფიციენტები.

ქვემოთ მოცემულია (ცხრილში №9) SPSS – კომპიუტერული პროგრამით მიღებული ემპირიული განტოლებები, რომლებიც ასახავენ ინფილტრაციული მადნიდან მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხის დამოკიდებულებას დროზე პროცესის სხვადასხვა ტემპერატურაზე, ხოლო მიღებული ემპირიული განტოლებების ადეკვატურობის შემოწმების შედეგები წარმოდგენილია ნახ.8-ზე (პუნქტირით შესრულებული წირები).

ცხრილი 9

სხვადასხვა ტემპერატურაზე მიღებული ემპირიული განტოლებების  
კოეფიციენტების მნიშვნელობები

25°C	$Y=83,899-3796,094/x+146017,4/x^2-1864810/x^3$
30°C	$Y=89,033-3399,937/x+125362,1/x^2-1610557/x^3$
35°C	$Y=91-3835.463/x+14881.2/x^2-195631/x^3$
40°C	$Y=90.983-3420.618/x+130749.8/x^2-1707984/x^3$

45°C	$Y=97.087-3994.205/x+152747.9/x^2-1929836/x^3$
------	--

როგორც ნახ.8-დან ჩანს, ემპირული პრაქტიკულად სრულ თანხვედენაშია ექსპერიმენტული მონაცემებით აგებულ მრუდებთან რაც იმაზე მიუთითებს, რომ მიღებული ემპირული ფორმულები ადეკვატურად აღწერენ პროცესს.

ნახ.8-ზე წარმოდგენილი მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხის ცვლილების ხასიათი გვიჩვენებს აგრეთვე, რომ აირის გოგირდის დიოქსიდისგან გაწმენდის პირველ წუთებში ამოწვლილვის ხარისხი წრფივ დამოკიდებულებაშია დროსთან და შეიძლება გამოისახოს განტოლებით

$$\alpha = \kappa \cdot \tau$$

სადაც,  $\alpha$ -არის მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხი, %;

$\tau$ -პროცესის ხანგრძლივობა, წთ;

$\kappa$ - პროცესის პირობითი სიჩქარის მუდმივა, რომელიც წარმოადგენს მრუდების წრფივი ნაწილის დახრის კუთხის ტანგენს აბცისათა ღერძთან.

სიჩქარის მუდმივას ნაპოვნი მნიშვნელობები სხვადასხვა ტემპერატურაზე მოცემულია ცხრილში №10

როგორც ცნობილია, სიჩქარის მუდმივას დამოკიდებულება ტემპერატურაზე აღიწერება არენიუსის განტოლებით [113-115]:

$$K = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

განტოლებაში შემავალი სიდიდეების: პროპორციულობის კოეფიციენტის (დაჯახებათა ფაქტორის) –  $K_0$ -ის და აქტივაციის ენერგიის –  $E$ -ს გამოთვლა ვაწარმოეთ კომპიუტერული პროგრამის დახმარებით უმცირეს კვადრატთა მეთოდით [116]. შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში №10.

ამრიგად, მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირებიდან  $SO_2$ -ის გაწმენდის პროცესის სიჩქარის მუდმივას ტემპერატურისგან დამოკიდებულების ფორმულის სახე იქნება:

$$K=459.876 \cdot e^{-\frac{181.615}{RT}}$$

აქტივაციის ენერგიის მიღებული მაღალი მნიშვნელობა ადასტურებს, რომ მოცემულ პირობებში პროცესის ჩატარებისას მანგანუმის ხსნად ფორმაში გადასვლის ხარისხის განმსაზღვრელ ფაქტორად გვევლინება ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე მიმდინარე ქიმიური რეაქციის სიჩქარე.

ცხრილი №10

არენიუსის განტოლების კოეფიციენტების და მადნიდან მანგანუმის ამოწვლილვის პროცესის სიჩქარის მოჩვენებითი მუდმივას ექსპერიმენტული და ემპირული მნიშვნელობების ცხრილი

N = 5						
T °,K	K <sub>ექსპ.</sub>	1/T,K	(1/T,K)^2	LOG(K)	LOG(K)*1/T	გამოთ.
298	1.294	0,003356	1,13E-05	0,263901544	0,000886	1.2509
303	1.412	0,0033	1,09E-05	0,340748793	0,001125	1.44
308	1.541	0,003247	1,05E-05	0,429181635	0,001393	1.605
313	1.694	0,003195	1,02E-05	0,510425544	0,001631	1.735
318	1.951	0,003145	9,89E-06	0,642380064	0,00202	1.844
		0,016242	5,28E-05	2,186637579	0,007054	0,007054
		D	F	E1	H	
M=6,130956712 P=1752,713161 E=181.615 კჯ/მოლი/მოლი - აქტივაციის ენერგია						

### 3.5. დაწვრილმანების ხარისხის გავლენის შესწავლა მანგანუმის ამოწვლილვის და SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის ხარისხზე

პროცესებში მყარი ფაზის მონაწილეობისას განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება მორეაგირე ნივთიერების დაწვრილმანებას. დაწვრილმანების ხარისხის გაზრდით ქიმიური პროცესების დაჩქარება რიგ შემთხვევაში განპირობებულია არა მხოლოდ ნივთიერებათა დაწვრილმანების შედეგად მორეაგირე ნივთიერებების შეხების ზედაპირის გაზრდით, არამედ აგრეთვე კრისტალურ გისოსზე გამოწვეული მექანიკური ზემოქმედების შედეგად მყარი ფაზის ზედაპირის გააქტივებით. მექანოქიმიური [120-122] თეორიის თანახმად, მექანიკური ზემოქმედების შემდეგ ნაწილაკის ზედაპირზე ადგილი აქვს ნივთიერების კრისტალური სტრუქტურის და ზედაპირული ფენების ენერგეტიკული მდგომარეობის შეცვლას.

ჩვენს მიერ შესწავლილია მადნის დაწვრილმანების ხარისხის გავლენა მანგანუმის ამოწვლილვის და SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის ხარისხზე შემდეგი პირობებისთვის: აირში SO<sub>2</sub>-ის კონცენტრაცია–0.3%; ტემპერატურა–25°C; აირის სიჩქარე – 160ლ/სთ; თანაფარდობა მყარი:თხევადი=1:5.

შედეგები მოცემულია ცხრილში №11.

როგორც მოსალოდნელი იყო დაწვრილმანების ხარისხის გაზრდით მანგანუმის ამოღების ხარისხი და SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის ხარისხი იზრდება.

ცხრილი №11

მადნის გრანულომეტრული შედგენილობის გავლენა მანგანუმის ამოწვლილვის და SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის ხარისხზე

	ფრაქცია 3+2			ფრაქცია -2+1			ფრაქცია -1+0.5			ფრაქცია -0.5		
დრო,წთ	20	40	80	20	40	80	20	40	80	20	40	80

Mn %	8.33	13.54	19.79	11.46	17.7	25	12.5.	18.75	29.16	26.04	51.04	56.25
SO <sub>2</sub>	71.05	54.5	52.03	79.04	59.486	55.54	86.218	63.166	59.03	100	96.504	83.41

### 3.6. მყარი:თხევადი თანაფარდობის გავლენა მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხზე

მყარი:თხევადი თანაფარდობის გავლენა მანგანუმის ამოღების ხარისხზე შევისწავლეთ შემდეგი პირობებისას: ტემპერატურა - 25°C; აირნარევში SO<sub>2</sub>-ის კონცენტრაცია – 0.3%; აირნარევის სიჩქარე -160ლ/სთ;

მიღებული შედეგები მოცემულია ცხრილში №12

ცხრილი №12

მყარი:თხევადი თანაფარდობის გავლენა მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხზე

თანაფარდობა დრო,წთ	1 : 3	1 : 4	1 : 5	1 : 6	1 : 7	1 : 9
20	28.385	29.385	29.385	30.5	31.249	31.249
40	52.86	52.86	52.320	53.64	53.64	53.64
80	67.48	67.48	67.59	66.666	68.749	68.749

მიღებული შედეგებიდან ირკვევა, რომ ჩვენს მიერ შესწავლილ ინტერვალში თანაფარდობის ცვლილება გავლენას არ ახდენს მანგანუმის ამოღების ხარისხზე. სასურველია რაც შეიძლება დაბალი თანაფარდობის ალება, რათა შესაძლებელი იყოს მაღალკონცენ- ტრირებული ხსნარის მიღება.

### 3.7. ნამუშევარი სუსპენზიის და ხსნარის აორთქლება-კრისტალიზაციით მიღებული მანგანუმის სულფატის ქიმიური ანალიზი

აირების მავნე მინარევებისგან გაწმენდის პროცესები მეტწილად არაეკონომიურია, რის გამოც ხშირად წარმოებები თავს არიდებენ გამწმენდი დანადგარების მოწყობას და არჩევენ მათზე საჯარიმო სანქციებზე დათანხმებას. ამდენად ისეთი გამწმენდი დანადგარის მოწყობა, რომელიც უზრუნველყოფს გაწმენდის მაღალი ხარისხის მიღწევასთან ერთად ბაზარზე მოთხოვნილების მქონე პროდუქტის მიღებას ხელს უწყობს საწაროს დაინტერესებას. ამით იყო განპირობებული ჩვენს მიერ გამწმენდ მასად მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის გამოყენება. ინფილტრაციული მადნის გამოყენება საინტერესო იყო იმითაც, რომ იგი მიეკუთვნება არაკონდიციურ მადნებს და მინიმალური იქნება მასზე გაწეული ხარჯები.

მე-13 და მე-14 ცხრილებში მოცემულია სუსპენზიის გაფილტვრით მიღებული ხსნარის და მისი აორთქლება-კრისტალიზაციით მიღებული მანგანუმის სულფატის ქიმიური შედგენილობები.

ცხრილი №13

მიღებული ფილტრატის შემადგენელი ძირითადი კომპონენტები

MMn SO <sub>4</sub> , გრ/ლ	CaO, გრ/ლ	MMgO, გრ/ლ	FFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , გრ/ლ
30	0.54	0.139	<0.05

ცხრილი №14

ხსნარის აორთქლება-კრისტალიზაციით მიღებული პროდუქტის ქიმიური  
შედგენილობა

MMn SO <sub>4</sub> , %	CaO, %	MMgO, %	FFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %
97,4	1,51	—	0,09

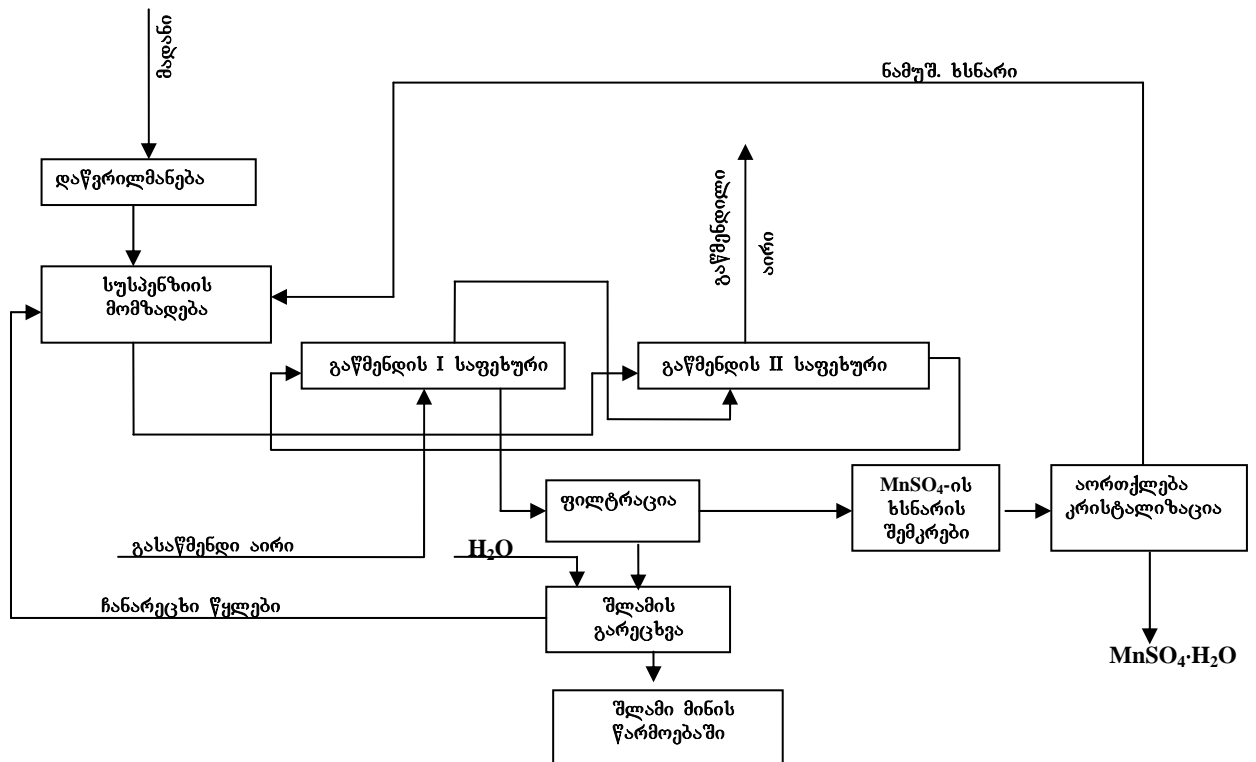
მიღებული შედეგები გვიჩვენებენ, რომ მანგანუმის სულფატთან ერთად ხსნარში მინარევების სახით გვაქვს მაგნიუმის და კალციუმის სულფატები. აქვე აღვნიშნავთ, რომ ხსნარის მაღალი ხარისხით გაწმენდა კალციუმის და მაგნიუმის ნაერთებისგან არ არის საჭირო; ცნობილია, რომ ავტოკლავური მეთოდით კრისტალიზაციისას კალციუმის და მაგნიუმის სულფატების თანაარსებობა დადებით გავლენას ახდენს ხსნარიდან მანგანუმის სულფატის გამოკრისტალებაზე.

### 3.8. მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით აირების SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდის პრინციპული ტექნოლოგიური სქემა

ჩვენს მიერ შემუშავებულია მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით SO<sub>2</sub>-ის გაწმენდის პრინციპული ტექნოლოგიური სქემა, რომელიც მოცემულია ნახ.9-ზე და შემდეგი სტადიებისგან შედგება:

1. მადნის დაწვრილმანება და სუსპენზიის მომზადება;
2. მანგანუმის სუსპენზიით აირის SO<sub>2</sub>-გან გაწმენდა;
- 3 ფილტრაცია და ხსნარის გაწმენდა მინარევებისგან;
4. ხსნარის აორთქლება-კრისტალიზაცია და მზა პროდუქტის MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O მიღება;

**ნახ.9 აირების გოგირდის დიოქსიდისგან ფაქიზი გაწმენდის პრინციპული**



## ს ა ე რ თ ო დ ა ს კ ვ ნ ე ბ ი

1. არსებული ლიტერატურის კრიტიკული ანალიზის საფუძველზე ჩვენს მიერ დადგენილია, რომ წარმოების ნარჩენი და ნამწვი აირების  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდა წარმატებით შეიძლება განხორციელდეს მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით; აირების  $\text{SO}_2$ -გან გაწმენდასთან ერთად შესაძლებელია მანგანუმის არაკონდიციური მადნიდან მანგანუმის სულფატის მონოჰიდრატის მიღება.
2. შესწავლილია მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირების გოგირდის დიოქსიდისგან ფაქიზი გაწმენდის პროცესი.
3. დადგენილია, რომ პროცესის ტემპერატურის გაზრდით, ყველა დანარჩენ თანაბარ პირობებში, მნიშვნელოვნად მცირდება აბსორბციის ხარისხი.
4. ექსპერიმენტის მათემატიკური დაგეგმვის მეთოდით დადგენილია პროცესზე მოქმედი პარამეტრების – ტემპერატურის, აირში  $\text{SO}_2$ -ის კონცენტრაციის და მოცულობითი სიჩქარის ოპტიმალური მნიშვნელობები. დადგენილია, რომ

აბსორბციის მაქსიმალური ხარისხის მისაღწევად საჭიროა დაცული იყოს პირობები:  $\text{SO}_2$  -ის კონცენტრაცია - 0,2%; ტემპერატურა -  $15^\circ\text{C}$ ; აირნარევის მოცულობითი სიჩქარე -  $11000\text{სთ}^{-1}$ .

5. დადგენილია, რომ სუსპენზიაში აქტიური მანგანუმის მნიშვნელოვანი შემცირება უარყოფითად მოქმედებს პროცესის სიჩქარეზე. გაწმენდის ხარისხის მაღალი ხარისხის შენარჩუნების მიზნით საჭიროა პერიოდულად სუსპენზიის განახლება მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის ახალი ულუფით ან ორი და მეტსაფეხურიანი გამწმენდი სისტემის მოწყობა.

6. მიღებულია ემპირული ფორმულები, რომლებიც ასახავენ მანგანუმის ამოწვლილვის ხარისხის დამოკიდებულებას პროცესის ხანგრძლივობაზე.

7. ექსპერიმენტული მონაცემების ბაზაზე მიღებული კინეტიკური მრუდების კონკურენტული მოდელებით დამუშავების შედეგად დადგენილია, რომ აბსორბციის პროცესი წმინდა კინეტიკურ უბანში მიმდინარეობს და პროცესის მალიმიტირებელ ფაქტორად გვევლინება არა  $\text{SO}_2$ -ის დიფუზია ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე მყარი-თხევადი, არამედ ქიმიური რეაქცია.

8. დადგენილია, რომ გაწმენდის პროცესში მიღებული ხსნარის აორთქლება-კრისტალიზაციით პროდუქტის სახით მიიღება მანგანუმის სულფატი. ნამუშევარი სუსპენზიის გაფილტვრისას დარჩენილი შლამები შეიძლება გამოყენებული იქნას მინის წარმოებაში.

9. შემოთავაზებულია მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირების გოგირდის დიოქსიდისგან ფაქიზი გაწმენდის პროცესის პრინციპული ტექნოლოგიური სქემა.

## გ ა მ о ყ ე ნ ბ უ ლ ი ლ ი ტ ე რ ა ტ უ რ ა

1. Защита атмосферного воздуха от загрязнения. [www. Ssga.ru](http://www.Ssga.ru)
2. Журнал “Экология производства”, [www.ekoindustry.ru](http://www.ekoindustry.ru)
3. А.С. Сокрлов, А.А. Фролов. Экологические проблемы развития промышленного производство. Ж. Экология, «Наука», 2005, №1, ст. 49.

5. Э.В. Васильева, Е.Н. Наумова. Состав атмосферы и последствия загрязнения климатических ресурсов. Автореферат диссертации, Санкт. Петербург, 2002 г.
6. О.М. Черп, В.А. Виниченко и др. Экологическая оценка и экологическая экспертиза, М., 2001, ст.309.
7. С.П. Хромов, М.А. Петросяну. Метеорология и климатология. 4-е изд: перераб. и доп-и; изд-во МГУ, 1994, ст. 520.
8. Т.А. Акимова, В.В. Хаскин, Основы экоразвития. Учебное пособие. М. изд-во Российской Экономической академии, им. Г.В. Плеханова, 1994, ст.312.
- 9.Защита биосферы от загрязнения ,[www.rus-lib.ru](http://www.rus-lib.ru)
- 10.Атмосфера.[www.refcity.ru](http://www.refcity.ru)
- 11.ვ. ერისთავი, ლ. არხიშოვა, რ. აღასანიძე. ატმოსფეროს დაცვა. დამხმარე სახელმძღვანელო, თბილისი, 1982, გვ. 64.
12. Коротин А.Н., Никишов В.Ф., Горинов О.И. Охрана окружающей среды в промышленной теплотехнике: Учебное пособие. – Иваново: Изд. ИЭИ, 1985. – 80 с.
13. Охрана окружающей среды в нефтеперерабатывающей и химической промышленности, под редакцией д-ра техн. наук проф. Е.Н. Мокого, Львов, 1989, ст. 160.
- 14.А.Н. Родонов, В.А. Клушин, Н.С. Торочешников. Техника защиты окружающей среды. М. «Химия», 1989.
15. Кароль И.Л. Современная глобальная проблема атмосферного озона // Глобальные экологические проблемы на пороге XXI века: Материалы конф. — М., 1998. Ст. 238—250.
16. Современные проблемы атмосферного озона.[www.lib.metmat.ru](http://www.lib.metmat.ru).
17. А.Х.Хриагин, С.П.Перов, Современные проблемы атмосферного озона на XII Международном симпозиуме. Физика атмосферы и океана, 1977,№2
18. Г.В. Стадницкий, А.Н. Родионов. Экология. М. Высшая школа. 1988, ст. 272.
19. Т.М. Троцкая, И.Е. Кузнецов. Защита воздушного бассейна от загрязнений вредными веществами химических предприятий. М. Химия, 1979, ст. 344.
20. Н.С. Торочешников, А.Н. Родинов и др. Техника защиты окружающей среды, Москва, «Химия», 1981, ст.368.

- 21.Э.Рышка, ds, М. Металлургия, 1979, ст.238.
22. И.П. Добровольский, И.Я. Чернявский, А.Н. Абызов, Ю.Е. Козлов Проблемы утилизации промышленных отходов. [www.lib.csu.ru](http://www.lib.csu.ru).16.01.2001
23. Химическое загрязнение среды промышленностью.[www.libonline.ru](http://www.libonline.ru)
23. М.Я. Юдашкин. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии. Металлургия, 1984. – 320 с.
25. Г.М. Гордон, Пылеулавливание и очистка газов в цветной металлургии. М. Металлургия, 1977
26. Н.А. Лавров, Э.Н. Розенфельд, Г.П. Хаустович. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. М. Металлургия, 1981, ст. 240.
27. М.А. Стырикович. Энергетика и окружающая среда, Теплоэнергетика, 1975, №4, ст. 2-5.
28. Рихтер Л.А. Тепловые электростанции и защита атмосферы. М. Энергия, 1975. ст. 310.
29. Энергетика и окружающая среда.[www.energo.ru](http://www.energo.ru). 20.07.2005
30. Теплоэнергетика и окружающая среда.[www.erudition.ru](http://www.erudition.ru)
31. В.М. Эльтерман. Охрана окружающей среды на химических и нефтехимических предприятиях. М. Химия, 1985, ст. 160.
32. Гиалаев Р.Н. Современные методы утилизации сернокислотных отходов нефтепереработки и нефтехимии, М. 1973.
33. Л.Ф. Петряшин, Г.Н. Лысяный, Б.Г. Тарасов. Охрана природы в нефтяной и газовой промышленности. Львов, 1984.
34. Я.Г. Соркин. Безотходное производство в нефтеперерабатывающей промышленности. М. 1983.
- 35.И.Е. Кузнецов, Т.М. Троцкая. Защита воздушного бассейна от загрязнения вредными веществами химических предприятия. М. Химия. 1979,340
36. Н.Н. Мелников, А.И.Волков, О.А.Короткова. Пестициды и окружающая среда, М. Химия, 1977,ст.240
- 37.М.Г. Габриелова, М.М. Морозова. Производство неорганических ядохимикатов. М. Химия, 1964, ст.327

38. Атмосфера воздух, его загрязнение и охрана. [www.ecosystema.ru](http://www.ecosystema.ru). 28.05.2006
39. Экология. Атмосферный воздух. [www.referatfrom.ru](http://www.referatfrom.ru)
40. Г.А. Ефимов, Ю.М. Ларкин. Транспорт и охрана окружающей среды, М. Знание, 1975, ст.62.
41. Ю.М. Ансеров, Д.В. Дурнев. Машиностроение и охрана окружающей среды, Л. Машиностроение, 1979, ст.1979.
42. Н.С. Буренин. К оценке выбросов автотранспорта в атмосферу, Труды ГГО, 1979, вып. 436. ст.102-110.
43. Н.П. Галкин, В.А. Зайцев, М.Б. Серегин. Улавливание и переработка фторсодержащих газов, М. Атомиздат, 1975.
44. Г. Прутахер. Роль природных и антропогенных загрязнений в образовании облаков и осадков. В. Кн. Химия нисшей атмосферы. М. Мир, 1976.
45. მ. ციციშვილი, გ. ერქომაიშვილი. აეროზოლური დაჭუჭყიანებისაგან ატმოსფეროს დაცვა. დამხმარე სახელმძღვანელო, თბილისი, 2006, (გამომცემლობა «მერმისი 2005»), გვ. 310.
46. З.Н. Розенкоп. Извлечение двуокиси серы из газов, М. Госхимиздат, 1952, ст.193.
47. Д.Я. Борщов, А.Н. Валиков. Защита окружающей среды при эксплуатации котлов малой мощности, М. Стройиздат, 1987, ст. 156.
48. Д.А. Водолажский, Разработка методики расчета очистки продуктов сгорания от оксидов серы, Донецк, 2002.
49. С.О. Родионов. Сжигание топлива с минимальным содержанием выбросов серы. Таллин. 1980
50. Балабеков, Л.Ш. Балтабаев. Очистка газов в химической промышленности, М. Химия, 1991.
51. Н.Г. Вилесов, С.А. Зальцман, О.Г. Еремин. получение серы из отходящих газов жидкофазными способами. М. ЦНИИ цветмет. экономики и информации, 1979, Вып. 8, ст.68.
52. В. Страус. Промышленная очистка газов, Москва, Химия, 1981, ст.616.
53. Очистка газообразных промышленных выбросов [www.sochindex.ru](http://www.sochindex.ru)
54. Очистка газообразных промышленных выбросов. [www.naturalistu.ru](http://www.naturalistu.ru)

55. Экология - очистка дымных газов от серы. [www. edg.fromru.com](http://www.edg.fromru.com)
56. Ю.И. Бродский, Р.Н. Балычева, М. Бродецкая. Современные методы очистки дымовых газов от сернистого ангидрида и их экономика, 1973.
57. А.Л. Коуль, Ф.С. Ризенфельд. Очистка газа, Москва, изд-во Недра, 1968, ст.398.
58. Очистка и рекуперация промышленных выбросов, под. ред. В.Ф.Максимова, 2-е изд. М. Лесная промышленность, 1981, ст.640.
59. Н.Ю.Бродский. Экономическая эффективность очистки дымовых газов от сернистого ангидрида. Хим. и. нефт. машиностроение. 1984. №2.
60. Очистка технологических газов , под. ред. Т.А. Семеновой, москва, изд-во Химия, 1977.
61. Р.А. Дидидзе, В.Т. Чагунава, С.А. Кипшидзе. Очистка выхлопных газов от сернистого ангидрида с получением  $MnCO_3$ , Переработка марганцевых и полиметаллических руд Грузии, „Мецниереба“, 1974, ст. 220, вып.2
62. Н.Г. Вилесов, В.Г. Большунов. Утилизация промышленных сернистых газов, Киев, Наукова Думка, 1990, ст.134.
63. О.Г. Еремин и Добросельская. Способы улавливания и утилизации слабо концентрированных серных газов, 1971.
64. Методы улавливания сернистого ангидрида из дымовых газов с применением твердых сорбентов, 1971, Киев.
65. Методы очистки промышленных газовых выбросов [www.doklad.ru](http://www.doklad.ru).
66. В.В. Белоусов. Теоретические основы процессов газоочистки, 1968.
67. В.М. Рамм. Абсорбция газов. Москва изд-во. Химия. 1976, ст.656.
68. В.М. Рамм. Абсорбция газов. Москва, Химия, 1966, ст. 768.
69. П.В. Данквертс. Газо-жидкостные реакции. Пер. с.англ. М. «Химия», 1973, ст.296.
70. Ю.В. Аксельрод. Газо-жидкостные хемосорбционные процессы, М. «Химия», 1989, ст. 240.
71. Т. Хобер. Массопередача и абсорбция, Ленинград, Химия, 1964, ст. 480.
72. П. Барре. Кинетика гетерогенных процессов, М. изд. «Мир», ст. 400.
73. Е.Н. Еремин. Основы химической кинетики в газах и растворах, изд. Московского Университета, 1971, ст. 384.

74. Б. Дельман. Кинетика гетерогенных реакций, Москва, изд-во «Мир», 1972, ст. 554.
75. А.И. Лушпа. Основы химической термодинамики и кинетики химических реакции, изд. Машиностроение, Москва, 1984, ст. 240.
76. В.Н. Кондратьев, Е.Е. Никитин, Кинетика и механизм газофазных реакции, Москва, изд. «Наука», 1974, ст. 558.
77. Ф.А. Франк-каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Москва, изд-во Наука, 1967.
78. В.К. Егерев. Диффузионная кинетика в неподвижных средах, 1970.
79. М.Х. Карапетьянц. Введение в теорию химических процессов, Москва, Высшая школа, 1981, ст. 334.
80. Химическое обогащение бедных руд и шламов марганца, Тбилиси, изд. Мецниереба, 1976.
81. Е.Я. Роде. Кислородные соединения марганца, Москва, изд. Академии Наук, 1952.
82. А.Г. Бетехтин. Промышленные марганцевые руды, изд. Академии Наук, 1946.
83. А.К. Лаврухина, Л.В. Юкина. Аналитическая химия марганца, М. изд. Наука, 1974, ст. 224.
84. Физико-химические свойства марганцевых шлаков. Алма-ата, изд. Наука, ст. 232.
85. Физико-химические основы металлургии марганца, М. 1977.
86. Р. Джанашвили, М. Кекелидзе. Изучение некоторых физических свойств марганца, 1968.
87. Н.Я. Бучукури. „Очистка горючих газов от сернистых соединений марганцевой инфильтрационной руды“, Автореферат, Тбилиси, 1976.
88. В.Т. Чагунава. Исследования по применению марганцевых контактов в химической промышленности. Изд. Мецниереба, Тбилиси, 1965.
89. Я.Г. Бучукури. К вопросу химического обогащения марганцевых шламов, Сооб. АН ГССР т. ХУШ, №2, 1957.
90. Труды Тбилисского Химического Инст. АН ГССР, т. 1. 1933.
91. А. Салли. Марганец. 1959.
92. Обогащение марганцевых шламов, Тбилиси, Изд. Грузинского филиала, АН ГССР, 1940.

93. И.Н. Джапаридзе, Н.В. Келбакиани, Г.Н. Цицлашвили. Сульфитный способ обогащения марганцевых шламов и бедных марганцевых руд. Переработка марганцевых и полиметаллических руд Грузии. Тбилиси, изд. Мецниереба, 1970.
94. А.В. Гавашели. Марганцевые руды Чиатура-сачхерского бассейна. Тбилиси. Сабчота Сакартвело, 1969.
95. ა.ვ. გავაშელი. ჭიათურა-საჩხერის მანგანუმის აუზის მადნის წყობა და მისი სამრეწველო შეფასება, თბილისი, 1959.
96. В.Ф. Гиллебранд, Г.Э. Ландель, Г.А.Брайт, Д.И. Гофман. Практическое руководство по неорганическому анализу, Москва, изд-во Химия, 1966, ст.1073.
97. Г. шарло. Методы аналитической химии, Москва, издательство Химия, ст.976.
98. Ю.С.Ляликов, В.Н. Сакунов, Н.С. Ткаченко. Анализ железных и марганцевых руд. Металлургиздат, 1954. ст.272.
99. ГОСТ 22772.2-96, (ИСО 4298-84). Методы определения марганца.
100. ГОСТ 22772.3-96, (ИСО 312-86). Методы определения двуокиси марганца.
101. ГОСТ 22772.5-90, (ИСО 5890-81 СТ СЭВ 1205-89). Методы определения двуокиси кремния.
102. ГОСТ 27309-87. (СТ СЭВ 5500-86). Методы определения окиси бария.
103. ГОСТ 24937-81, (СТ СЭВ 1207-78). Методы определения окиси кальция и окиси магния.
104. М.Е. Позин. Руководство к практическим занятием по технологии неорганических веществ. Ленинград, Химия, Ленинградское отделение. 1980, ст.368.
105. ГОСТ 22772.4-96, (ИСО 7990-85). Методы определения общего железа.
106. ბ. კობინაშვილი, თ. ივანოვა. პრაქტიკული სამუშაოები ტექნიკურ ანალიზში“, გამომცემლობა „განათლება 1979.
107. М.Е. Позин, Б.А. Копылев. „Руководство к практическим занятиям по технологии неорганических веществ“, Изд. „Химия“, 1968.
108. Л.А. Николаев. „Общая и неорганическая химия“. М. „Просвещение“, 1974.
109. В.В. Налимов, Н.А. Чернова. „Статистические методы планирования экстремальных экспериментов“, М. „Наука“, 1965, ст.340.
110. С.Н. Саутин. Планирование. Химия. Ленинградское отделение, 1975, ст.48.

111. С.А. Анхазарова, В.В.Кафаров. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. Москва, высшая школа, 1975, ст.576.
112. Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон. „Современная общая химия“. 2-я часть. Перевод с английского.М. „Мир“, 1969.
113. თ.რიგიშვილი; მ. მჭედლიშვილი; ლ. გვასალია. „გამავალი აირების SO<sub>2</sub>-გან მანგანუმის ინფილტრაციული მადნით გაწმენდის პროცესის ოპტიმიზაცია“, საქართველოს ქიმიური ჟურნალი, №6. 2005.
114. თ.რიგიშვილი; მ. მჭედლიშვილი; ლ. გვასალია. „ზოგიერთი ფაქტორის გავლენა მანგანუმის ინფილტრაციული მადნის სუსპენზიით აირიდან SO<sub>2</sub>-ის აბსორბციის პროცესზე“, ივ. ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის შრომები, „ქიმია“, №362, 2006.
115. Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд, „Свойства газов и жидкостей“, пер. с английского. Л. Химия, 1982, ст.592.
116. „Общие основы химической технологии“ ,Изд.„Химия“, 1977.
117. Г.М. Панченков, В.П.Лебедев, „Химическая кинетика и катализ“, изд.„Химия“, 1974, ст.592.
118. Л.М.Батунер, М.Е.Позин, „Математические методы в химической технике“, Изд.„Химия“,1971, ст.824.
119. Бретшнаидер С., „Общие основы химической технологии“, изд. „Химия“, 1977, ст, 503.
120. Г. В. Ушаков, Г. З.Есипов. „Теоретические основы химической технологии“, Т.14, №3, 1982.
121. Химия Твердого состояния. Под. редакцией В.Гарнера, М. изд. Иностранной литературы, Москва, 1961, ст.544.
122. В.Б. Алексовский. Химия твердых веществ, М. Высшая школа, 1978.