

საქართველოს ტექნიკური  
უნივერსიტეტი

შაკ 66.01

როსტომ გაფრინდაშვილი

ზოგადი ძიშიური ტექნოლოგია

© საგამომცემლო სახლი „ტექნიკური უნივერსიტეტი“, 2008  
ISBN  
<http://gtu.ge/publishinghouse/>

დამტკიცებულია სტუ-ს  
სარედაქციო-საგამომცემლო  
საბჭოს მიერ

თბილისი  
2018

# I თავი შესავალი

## 1.1. ქიმიური ტექნოლოგიის განსაზღვრება

სიტყვა *ტექნოლოგია* ბერძნული წარმოშობისაა - technes – ხელოვნება (ხელოსნობა, მოხერხება), logos – მეცნიერება, სწავლება, ე.ი. სიტყვა *ტექნოლოგიის* პირდაპირი თარგმანია – სწავლება რაიმეს მიღების ხელოვნებაზე, რაღაცის კეთების ცოდნაზე. ამ სიტყვის უკვე გენეზისი განსაზღვრავს *ტექნოლოგიას* როგორც მეცნიერებას (სწავლებას) ხერხების, გადამუშავების პროცესების, დამზადების, წარმოების შესახებ. “ქიმიური ტექნოლოგია” გულისხმობს, ამავე დროს, აუცილებლად ქიმიური გარდაქმნების განხორციელებას, ე.ი. განსაზღვრავს მას როგორც მეცნიერებას (სწავლებას) ქიმიური წარმოების შესახებ.

ქიმიური ტექნოლოგია არის საბუნებისმეტყველო მეცნიერება ნედლეულის პროდუქტად (მოხმარების საგნებად ან წარმოების საშუალებებად) გადამუშავების პროცესების შესახებ, რაც ხორციელდება ქიმიური და ფიზიკურ-ქიმიური ოპერაციების მონაწილეობით ტექნიკურად, ეკონომიკურად და სოციალურად მიზანშეწონილი გზით.

მეცნიერებას, როგორც ცოდნის ცალკეულ დარგს ბუნებაზე, საზოგადოებასა და აზროვნებაზე, უნდა ჰქონდეს შესწავლის ობიექტი, კვლევის მიზანი და კვლევის მეთოდი.

ქიმიურ ტექნოლოგიას აქვს:

*შესწავლის ობიექტი* – ქიმიური წარმოება, რომელიც მოიცავს ნედლეულის პროდუქტად გადამუშავების პროცესებსა და მეთოდებს.

*კვლევის მიზანი* – კაცობრიობისათვის აუცილებელი პროდუქტების ეკონომიური წარმოების შექმნა.

*კვლევის მეთოდები* – ქიმიური წარმოების აპარატებში მიმდინარე მოვლენების მათემატიკური მოდელირება და ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესების სისტემური ანალიზი.

ტექნიკურ ლიტერატურაში ტერმინი “ქიმიური ტექნოლოგია” ხშირად იხმარება აგრეთვე სხვა მნიშვნელობითაც, როგორც სინონიმი ცნებებისა: “გარდაქმნის ხერხი”, “მიღების მეთოდი”. მაგალითად, “ნავთობისა და გაზის ტექნოლოგია” ნიშნავს “ნავთობისა და გაზის გადამუშავების მეთოდებს”, “ხორცისა და რძის ტექნოლოგია” იგივეა რაც “ხორცისა და რძის პროდუქტების წარმოების მეთოდები” და ა.შ.

ქიმიური გარდაქმნა ძირითადი პროცესია არა მარტო ქიმიური და ნავთობქიმიური წარმოებებისათვის. ქიმიური გარდაქმნა საფუძველია სამშენებლო და მჭიდა მასალების, ლითონების, სამედიცინო მრეწველობის და მიკრობიოლოგიური წარმოებების, წვის პროცესებისა ენერგეტიკასა და ტრანსპორტზე, ლუდის, პურისა და საკონდიტრო ნაწარმის ტექნოლოგიაში და სხვ. ეს ნიშნავს, რომ ქიმიური ტექნოლოგიის ზოგად კანონზომიერებებს დარგთაშორისი მნიშვნელობა აქვთ.

## 1.2. ქიმიური წარმოების სტრუქტურა

დავაზუსტოთ ქიმიური ტექნოლოგიის განსახილველი ობიექტი. აღვნიშნეთ, რომ ქიმიური ტექნოლოგიის შესწავლის ობიექტია ქიმიური წარმოება. *ქიმიური წარმოება* პროცესების ერთობლიობაა, რომელიც ხორციელდება შესაბამის აპარატებსა და მანქანებში და მიზნად ისახავს ნედლეულიდან პროდუქტების მიზანშეწონილი მეთოდით მიღებას.

ქიმიურ წარმოებაში ოპერაციების პირველი ჯგუფია ნედლეულის მომზადების სტადიები. უპირატესად ეს ფიზიკური ზემოქმედებებია: დაფქვა, გახსნა, გაცხელება, კონცენტრირება, მინარეგებისაგან გაწმენდა და ა. შ.

ოპერაციების მეორე ჯგუფი ქიმიურ პროცესებს მოიცავს. ნედლეულის მომზადების შემდეგ ტარდება საკუთრივ ქიმიური გარდაქმნა, რის შედეგადაც წარმოიქმნება ნარევი, რომლის ქიმიური შედგენილობა განსხვავდება ამოსავალი ნედლეულის შედგენილობისაგან. ნედლეულის ქიმიური გარდაქმნის პროცესის არსებობა არის იმის ნიშანი, რომ წარმოება ქიმიურია.

ოპერაციათა მესამე ჯგუფია სასარგებლო პროდუქტის გამოყოფა და მინარევებისაგან გაწმენდა. ამ ოპერაციების აუცილებლობა იმითაა გამოწვეული, რომ ქიმიური გარდაქმნების დროს შეიძლება წარმოიქმნას ნედლეულის არასრული გარდაქმნის თანაური ნაერთები, რომელთაგანაც პროდუქტი უნდა გაიწმინდოს.

ოპერაციების სამი ჯგუფი – ნედლეულის მომზადება, ქიმიური გარდაქმნა, პროდუქტის გამოყოფა – ქიმიური წარმოების ძირითადი შემადგენელი ნაწილებია, რომლებიც უზრუნველყოფს ქიმიური წარმოების ძირითადი ამოცანის შესრულებას – პროდუქტის მიღებას.

მრეწველობის განვითარებამ ახალი ამოცანები დაუსახა ყველა წარმოებას. მათი ფუნქციონირების ძირითადი მიზანია არა მარტო პროდუქტის მიღება, არამედ ისეთი ფუნქციის შესრულებაც, როგორცაა ნედლეულის კომპლექსური გამოყენება, გარემოს დაცვა, სათბობენერგეტიკული რესურსების ეკონომია. ქიმიური წარმოება მრავალფუნქციური გახდა. ამიტომ საჭიროა გამოვყოთ, აგრეთვე, ქიმიური წარმოების შემადგენელი ნაწილები, რომლებიც უზრუნველყოფს აღნიშნული დამატებითი, მაგრამ ასევე მნიშვნელოვანი ამოცანების გადაწყვეტას,

ქიმიური წარმოების აპარატების სისტემაში გადამუშავდება ნივთიერებისა და ენერჯის ნაკადები, რომელთაც *ქიმიური წარმოების კომპონენტებს* ვუწოდებთ.

მათ მიეკუთვნება: ნედლეული, ენერჯია, წყალი, პროდუქტები, ნახევარპროდუქტები, ნარჩენები და სხვ.

*ნედლეული* ამოსავალი გადასამუშავებელი ნივთიერებები და მასალებია. დანიშნულების მიხედვით ნედლეული შეიძლება იყოს ძირითადი (ტექნოლოგიური) და დამხმარე. ძირითადი ნედლეული პროდუქტად გარდაიქმნება, დამხმარე კი გამოიყენება წარმოების უზრუნველყოფისათვის.

*ენერჯია*, აგრეთვე, ქიმიური წარმოების უზრუნველყოფისათვის გამოიყენება. შესაძლებელია ქიმიური წარმოების ენერჯის ნაკადების სასარგებლო გამოყენება ე.წ. მეორეული ენერგეტიკული რესურსების სახით.

*წყალი* ქიმიურ მრეწველობაში არის არა მარტო მაცივებელი აგენტი ან თბომატარებელი, არამედ ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ნედლეულიც.

ქიმიური წარმოების *პროდუქტი* შეიძლება იყოს ძირითადი და დამატებითი, ან თანაური.

*ნახევარპროდუქტი* – მოცემული ქიმიური წარმოების პროდუქტია, რომელიც სხვა წარმოებაში ნედლეულად გამოიყენება.

*ნარჩენები* – მოცემულ წარმოებაში წარმოქმნილი ნივთიერებები და მასალებია, რომელთაც სასარგებლო გამოყენება არ აქვთ.

ქიმიური წარმოება რთული სისტემაა. მასში მიმდინარეობს ქიმიური რეაქციები, სითბოს, ნივთიერებისა და იმპულსის გადატანა, მოძრაობა მოლეკულურ დონეზე და აპარატების მასშტაბით, თბური, მასური, ენერგეტიკული, მექანიკური ნაკადებით მიმოცვლა მრავალფეროვან აპარატებსა და მოწყობილობებს შორის.

### 1.3. ქიმიური წარმოების მაჩვენებლები

განვსაზღვრავთ რა ქიმიური ტექნოლოგიის, როგორც მეცნიერების, მიზანს – შექმნას კაცობრიობისათვის აუცილებელი პროდუქტების წარმოების ეკონომიური ხერხები (ქიმიური გარდაქმნების გამოყენებით), აუცილებელია განისაზღვროს წარმოების სრულყოფისა და ეფექტურობის დამახასიათებელი მაჩვენებლები. შეიძლება გამოვყოთ მაჩვენებლების შემდეგი ჯგუფები: ტექნიკური, ეკონომიკური, საექსპლუატაციო და სოციალური.

ტექნიკური მაჩვენებლები ახასიათებს მოცემული საწარმოს ტექნიკურ სრულყოფას. მათ მიეკუთვნება მწარმოებლურობა ანუ სიმძლავრე, ხარჯვითი კოეფიციენტი, მუშაობის ინტენსიურობა, პროდუქტის ხარისხი და სხვ.

საწარმოს მწარმოებლურობა ანუ სიმძლავრე განსაზღვრავს ერთეულ დროში გამომუშავებული პროდუქტის რაოდენობას:

$$\Pi = G/t$$

ჩვეულებრივ, მისი განზომილებაა “ტონა დღე-ღამეში” ან “ათასი ტონა წელიწადში”. თანამედროვე ქიმიურმა საწარმოებმა ასეთ მწარმოებლურობას მიაღწიეს:

|                       |                |
|-----------------------|----------------|
| ამიაკის წარმოება      | 450 ათასი ტ/წ; |
| გოგირდმჟავის წარმოება | 500 ათასი ტ/წ; |
| მეთანოლის წარმოება    | 250 ათასი ტ/წ. |

ხარჯვითი კოეფიციენტი საწარმოს ტექნიკური სრულყოფის მნიშვნელოვანი მაჩვენებელია და განსა-

ზღვრავს ნედლეულისა და ენერჯის დანახარჯებს საწარმოო პროდუქციის ერთეულზე:

$$K_{\text{ხარჯ.}} = G_{\text{ამოს.}}/G,$$

სადაც  $G_{\text{ამოს.}}$  არის ნედლეულის, სათბობის, ენერჯის ხარჯი პროდუქტის წარმოების დროს.

ხარჯვით კოეფიციენტებს შეიძლება ჰქონდეს განზომილება “კგ ნედლეული - ტონა პროდუქტზე”, “მ<sup>3</sup> სათბობი - ტონა პროდუქტზე”, “კვტ.სთ ელექტროენერჯია - ტონა პროდუქტზე” და ა. შ. თუ გავითვალისწინებთ, რომ პროდუქტის ღირებულების ნახევარსა და მეტს შეადგენს დანახარჯები ნედლეულსა და ენერჯიაზე, ნედლეულის მიმართ განსაზღვრული ხარჯვითი კოეფიციენტი ხშირად წარმოების ეფექტურობის განმსაზღვრელი მაჩვენებელია.

პროდუქტის გამოსავალი თეორიული სიდიდიდან აგრეთვე არის პროცესის სრულყოფის მაჩვენებელი და გვიჩვენებს მიღებული პროდუქტის  $G$  რაოდენობის ფარდობას თეორიულ  $G_{\text{თეორ}}$  სიდიდესთან, რომელიც შეიძლება წარმოქმნილიყო იმავე რაოდენობის ნედლეულიდან პროცესის იდეალური ორგანიზაციის დროს:

$$g = G/G_{\text{თეორ}}$$

პროცესის ინტენსიურობა ახასიათებს ცალკეულ აპარატში მისი ორგანიზაციის სრულყოფას. ეს მაჩვენებელი განსაზღვრავს დროის ერთეულში მიღებული პროდუქტის ან მიწოდებული ნედლეულის რაოდენობას შეფარდებულს აპარატის ზომების მახასიათებელ რომელიმე სიდიდესთან ( $V_{\text{აპ}}$  - აპარატის მოცულობა, ან სარეაქციო სივრცე,  $F$  - აპარატის განივი კვეთის ფართობი):

$$I = G/V_{\text{აპ}}$$

ჩვეულებრივ, მისი განზომილებაა “კგ/მ<sup>3</sup>სთ”, “მ<sup>3</sup>/მ<sup>3</sup>სთ”, “კგ/მ<sup>2</sup>სთ” და ა.შ.

პროდუქტის ხარისხი თვისებებისა და მახასიათებლების ნაკრებია, რომელიც პროდუქტის სამომხმარებლო ღირებულებას განსაზღვრავს. აქვე შედის პროდუქტის სისუფთავის მაჩვენებლები, მინარევების შემცველობა, აგრეთვე ქიმიური, ფიზიკური, მექანიკური და სხვა თვისებები. ისინი განისაზღვრება სახელმწიფო და დარგობრივი სტანდარტებით, აგრეთვე მოცემულ პროდუქტზე დადგენილი ტექნიკური პირობებით.

ეკონომიკური მაჩვენებლები ახასიათებს წარმოების ეკონომიკურ ეფექტიანობას და დაწვრილებით შეისწავლება ქიმიური მრეწველობის ეკონომიკის კუროსში. ტექნიკური და ეკონომიკური მაჩვენებლები ურთიერთკავშირშია; ამიტომ ზოგიერთ მათგანს ტექნიკურ-ეკონომიკურ მაჩვენებლებს უწოდებენ. მათ შეიძლება მივაკუთვნოთ საწარმოს სიმძლავრე, ხვედრითი კაპიტალური დანახარჯები, შრომის ნაყოფიერება, პროდუქტის თვითღირებულება, დაყვანილი ხარჯები და სხვ.

კაპიტალური დანახარჯები ან ხვედრითი კაპიტალური დანახარჯები გვიჩვენებს დანახარჯებს მოწყობილობაზე, კომუნიკაციებზე, სამშენებლო ნაწილზე, შეფარდებულს მთლიანად მწარმოებლურობასთან ან წარმოების სიმძლავრის ერთეულთან:

$$K_{\text{ბგ}} = K_{\text{კაპ}} / G.$$

მას აქვს განზომილება “კგ ლითონი 1 ტ პროდუქციაზე წელიწადში”, “ლარი 1 ტ პროდუქციაზე წელიწადში” და სხვა.

შრომის ნაყოფიერება  $\Pi_{\text{შრ}}$  – დროის ერთეულში გამომუშავებული პროდუქტის რაოდენობაა, რომელიც ერთ მომუშავეზე მოდის:

$$\begin{aligned} \Pi_{\text{შრ}} &= G/N_{\text{მუშ}}, \\ \Pi_{\text{შრ}} &= GL/N_{\text{მუშ}}, \end{aligned}$$

სადაც  $N_{\text{მუშ}}$  მოცემული წარმოების მომსახურე პერსონალის რიცხვია,  $L$  – პროდუქტის ერთეულის ფასი.

შრომის ნაყოფიერებას აქვს რაოდენობრივი ან ღირებულებითი გამოხატულება და, შესაბამისად, მისი განზომილებებია “ტონა წელიწადში მომუშავეზე” ან “ლარი წელიწადში მომუშავეზე”.

პროდუქტის თვითღირებულება და დაყვანილი ხარჯები გვიჩვენებს დანახარჯებს პროდუქციის ერთეულზე ფულადი გამოხატულებით.

საექსპლუატაციო მაჩვენებლები ახასიათებს შექმნილი წარმოების, როგორც სამრეწველო ობიექტის, სრულყოფას. მათ მიეკუთვნება: მართვადობა ანუ რეგულირებადობა, მგრძნობიარობა მუშაობის პირობებიდან გადახრების მიმართ, აპარატებისა და მთლიანად წარმოების საიმედოობა, სახანძრო და ფეთქებადუსაფრთხოება.

სოციალური მაჩვენებლები განსაზღვრავს მომსახურე პერსონალის შრომის პირობებსა და წარმოების უვნებლობას გარემოსათვის, მომსახურების უვნებლობას, ავტომატიზაციისა და მექანიზაციის ხარისხს, ეკოლოგიურ უსაფრთხოებას და სხვ.

# II ტავი

## ქიმიური ტექნოლოგიის ძირითადი კანონზოვნიერებები

### 2.1. ცნება ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესის შესახებ

ქიმიურ ტექნოლოგიაში განიხილება ქიმიური და ფიზიკური მოვლენების ერთობლიობა, რომელთა კომპლექსიც შეადგენს ტექნოლოგიურ პროცესს. ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესი, როგორც წესი, შედგება შემდეგი ურთიერთდაკავშირებული პროცესებისაგან (სტადიებისაგან): 1. მორეაგირე კომპონენტების მიწოდება რეაქციის ზონაში; 2. ქიმიური რეაქცია; 3. მიღებული პროდუქტის გამოყვანა რეაქციის ზონიდან.

1. *მორეაგირე კომპონენტების მიწოდება რეაქციის ზონაში* ხდება მოლეკულური დიფუზიით ან კონვექციით. მორეაგირე კომპონენტების ძლიერი არევის დროს ნივთიერების კონვექციურ გადატანას ტურბულენტურ დიფუზიასაც უწოდებენ. ორ- და მრავალფაზიან სისტემებში მორეაგირე კომპონენტების მიწოდება შესაძლებელია აბსორბციით, გაზების ადსორბციით ან დესორბციით, ორთქლის კონდენსაციით, მყარი ნივთიერებების გაღობით ან სითხეებში მათი გახსნით, სითხეების აორთქლებით ან მყარი ნივთიერებების აქროლებით.

2. *ქიმიური რეაქცია* ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესის მეორე ეტაპია. სარეაქციო სისტემაში ჩვეულებრივ ერთდროულად მიმდინარეობს რამდენიმე მიმდევრობითი (ზოგჯერ კი პარალელური) ქიმიური რეაქცია (რომელთა შედეგადაც წარმოიქმნება ძირითადი პროდუქტი), აგრეთვე, რიგი თანაური რეაქციები ამო-

სავალ ნივთიერებებსა და მინარევებს შორის, რომელთა არსებობაც ამოსავალ ნედლეულში გარდაუვალია; ამის შედეგად, გარდა ძირითადისა, წარმოიქმნება თანაური პროდუქტები (რომელთაც გარკვეული მნიშვნელობა აქვთ პრაქტიკული გამოყენებისათვის) და უსარგებლო ნარჩენები.

3. *პროდუქტის გამოყვანა რეაქციის ზონიდან* შეიძლება ისევე განხორციელდეს, როგორც მორეაგირე კომპონენტების მიწოდება - დიფუზიით, კონვექციით და ნივთიერების გადასვლით ერთი ფაზიდან მეორეში.

ტექნოლოგიური პროცესის საერთო სიჩქარე დამოკიდებულია ერთ-ერთი შემადგენელი ელემენტარული სტადიის სიჩქარეზე, რომელიც სხვებზე უფრო ნელა მიმდინარეობს. თუ ყველაზე უფრო ნელა ქიმიური რეაქციები მიმდინარეობს და ისინი განსაზღვრავენ საერთო სიჩქარეს, მაშინ პროცესი მიდის კინეტიკურ არეში; ამ შემთხვევაში ტექნოლოგები მიისწრაფვიან გააძლიერონ სწორედ ის ფაქტორები (ამოსავალი ნივთიერებების კონცენტრაცია, ტემპერატურა, კატალიზატორების გამოყენება და სხვ.), რომლებიც განსაკუთრებით მოქმედებს რეაქციის სიჩქარეზე. თუ პროცესის საერთო სიჩქარეს განსაზღვრავს რეაგენტების მიწოდება რეაქციის ზონაში ან პროდუქტის გამოყვანა, ეს ნიშნავს, რომ პროცესი დიფუზურ არეში მიმდინარეობს. დიფუზიის სიჩქარეს, უპირველესად ადიდებენ არევით (მორეაგირე სისტემის ტურბულიზაციით), ტემპერატურის და კონცენტრაციის გადიდებით, მრავალფაზიანი სისტემების ერთფაზიანად გადაქცევით და სხვ. თუ ტექნოლოგიური პროცესის შემადგენელი ყველა ელემენტის სიჩქარეები შედარებადია, მაშინ პროცესი მიდის გარდამავალ არეში და აუცილებელია ისეთი ფაქტორებით ზემოქმედება, რომლებიც აჩქარებს როგორც დიფუზიას, ასევე რეაქციას, ე. ი. შა-

ჭირია ამოსავალი ნედლეულის კონცენტრაციისა და ტემპერატურის გადიდება.

ქიმიური ტექნოლოგიის ძირითადი კანონზომიერებების ცოდნა არსებითად აადვილებს ისეთი ტექნოლოგიური რეჟიმის გამოვლენას, რომელიც საშუალებას იძლევა პროცესი ჩატარდეს უფრო ეფექტურად, ე. ი. დიდი ინტენსივობით, მაღალხარისხოვანი პროდუქტის დიდი გამოსავლით.

## 2.2. ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესების კლასიფიკაცია

ქიმიური ტექნოლოგიის პროცესები იყოფა, უწინარეს ყოვლისა, ქიმიურ, რომლებიც ქიმიურ რეაქციებს მოიცავენ, და ფიზიკურ პროცესებად. ქიმიური რეაქციები ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესის ყველაზე მნიშვნელოვანი ეტაპია. ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესების კლასიფიკაციის დროს ითვალისწინებენ ქიმიური რეაქციების დაყოფას მარტივ, რთულ-პარალელურ და რთულ-თანამიმდევრულ რეაქციებად. ცალკეული კლასის ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესების აღწერისას რეაქციებს ყოფენ რეაგენტების ურთიერთქმედების ტიპის მიხედვით როგორც ფუძე-მჟავურს (ჰეტეროლიტურს) და ჟანგვა-აღდგენითს (ჰომოლიტურს). ქიმიური რეაქციები და მასაგადაცემის პროცესები შეიძლება იყოს შექცევადი და შეუქცევადი. შესაბამისად, მთლიანად განსხვავდება ტექნოლოგიური პროცესებიც. აუცილებელია გაიყოს კინეტიკურ და დიფუზურ უბანში მიმდინარე პროცესები. პროცესების ამ სახით კლასიფიკაცია ძლიერ რთულდება ჰეტეროგენულ სისტემებში, განსაკუთრებით აირადი ან თხევადი კომპონენტის ნარევის მყარი ფოროვანი მასალის ზედაპირთან ურთიერთქმედებისას. ასეთ პროცე-

სებში, განმსაზღვრელი ეტაპისაგან დამოკიდებულებით, შეიძლება შემდეგი უბნები: გარე-დიფუზური, გარე-დიფუზურიდან შიგა-დიფუზურში გარდამავალი, შიგა-დიფუზური (მყარი მასალის ფორებში), შიგა-გარდამავალი და კინეტიკური. ასეთ უბნებს ყველაზე მეტი მნიშვნელობა აქვთ ჰეტეროგენულ-კატალიზური პროცესებისათვის.

თუ პროცესის მექანიზმი რთულია, მაშინ მისი მიკუთვნება ამა თუ იმ კლასისადმი მიზანმიმართულობით განისაზღვრება. ტექნოლოგიური პროცესების კლასიფიკაციაში დიდი მნიშვნელობა აქვს მათი ოპტიმიზაციისათვის აუცილებელ რეჟიმს. ტექნოლოგიური რეჟიმი ეწოდება ძირითადი ფაქტორების (პარამეტრების) ერთობლიობას, რომელიც მოქმედებს პროცესის სიჩქარეზე, პროდუქტის გამოსავალსა და ხარისხზე. უმრავლესი ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესებისათვის რეჟიმის ძირითადი პარამეტრებია ტემპერატურა, წნევა, კატალიზატორის გამოყენება და მისი აქტივობა, ურთიერთმოქმედი ნივთიერებების კონცენტრაცია, რეაგენტების არევის ხერხი და ხარისხი. ზოგიერთი ტიპის ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესებისათვის პირველხარისხოვანი მნიშვნელობა აქვს რეჟიმის სხვა მაჩვენებლებს, რომლებიც დამახასიათებელი არ არის უმეტესი ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესებისათვის. მაგალითად, ელექტროქიმიური პროცესები ხასიათდება დენის დაბრუნებით და სიმკვრივით, რადიაციულ-ქიმიური - რადიაციის გამოყენებული დონით და სხვ.

ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრები განსაზღვრავს შესაბამისი რეაქტორების კონსტრუირების პრინციპებს. ამ პარამეტრების ოპტიმალურ მნიშვნელობას შეესაბამება აპარატების მაქსიმალური მწარმოებლურობა და პროცესის მომსახურე პერსონალის მაღალი შრომის

ნაყოფიერება. ამიტომ ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრების ხასიათი და მნიშვნელობა საფუძვლად უდევს ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესების კლასიფიკაციას. ტექნოლოგიური რეჟიმის ყველა პარამეტრი ურთიერთდაკავშირებულია და ერთმანეთს განაპირობებს. ერთი რომელიმე პარამეტრის ცვლილება იწვევს რეჟიმის სხვა პარამეტრების ოპტიმალური სიდიდეების მკვეთრ ცვლილებას.

რეაქტორების კონსტრუქციასა და პროცესის სიჩქარეზე ძლიერ გავლენას ახდენს რეაგენტების არევის ხერხი და ხარისხი. თავის მხრივ მორეაგირე მასების არევის ხერხი და ინტენსივობა დამოკიდებულია მათ აგრეგატულ მდგომარეობაზე. სწორედ გადასამუშავებელი ნივთიერებების აგრეგატული მდგომარეობა განსაზღვრავს მათი ტექნოლოგიური გადამუშავების ხერხსა და აპარატების კონსტრუირების პრინციპებს. ამიტომ ქიმიური ტექნოლოგიის ზოგადი კანონზომიერებების შესწავლისას მიღებულია პროცესებისა და მათი შესაბამისი რეაქტორების დაყოფა, უწინარეს ყოვლისა, ურთიერთმოქმედი ნივთიერებების აგრეგატული (ფაზური) მდგომარეობის მიხედვით. ამ ნიშნის მიხედვით ურთიერთმოქმედი ნივთიერებების ყველა სისტემებს და მათ შესაბამის ტექნოლოგიურ პროცესებს ყოფენ ერთგვაროვან, ანუ ჰომოგენურ და არაერთგვაროვან, ანუ ჰეტეროგენულ პროცესებად.

ჰომოგენურს უწოდებენ ისეთ სისტემებს, სადაც ყველა მორეაგირე ნივთიერება ერთ რომელიმე ფაზაში იმყოფება: აირადში, თხევადში ან მყარში. ჰომოგენურ სისტემებში რეაქციები, ჩვეულებრივ, უფრო სწრაფად მიმდინარეობს, ვიდრე ჰეტეროგენულში, მთელი პროცესის მექანიზმი უფრო მარტივია და მისი მართვა ადვილია. ამიტომ პრაქტიკაში ხშირად მიისწრაფვიან

ჰომოგენური პროცესებისაკენ, ანუ გადაჰყავთ მყარი მორეაგირე ნივთიერებები, უკიდურეს შემთხვევაში ერთი მათგანი, თხევად მდგომარეობაში გააღობით ან გახსნით. ამავე მიზნით ატარებენ აირების აბსორბციას ან კონდენსაციას.

ჰეტეროგენული სისტემები ორ ან მრავალრიცხოვან ფაზებს მოიცავს. არსებობს შემდეგი ორფაზიანი სისტემები: აირი-სითხე, აირი-მყარი სხეული, სითხე-სითხე (შეურევადი), სითხე-მყარი სხეული და მყარი სხეული-მყარი სხეული. საწარმოო პრაქტიკაში უფრო ხშირია სისტემები: ა-ს, ა-მ, ს-მ. ხშირად საწარმოო პროცესები მიმდინარეობს მრავალფაზიან ჰეტეროგენულ სისტემებში, მაგალითად, ა-ს-მ, ა-მ-მ, ს-მ-მ, ა-ს-მ-მ და ა. შ. სამრეწველო პრაქტიკაში უფრო გავრცელებულია ჰეტეროგენული პროცესები, ვიდრე ჰომოგენური. ამასთან, როგორც წესი, პროცესის ჰეტეროგენული ეტაპი (მასაგადაცემა) დიფუზური ხასიათისაა, ხოლო ქიმიური რეაქცია მიმდინარეობს აირად ან თხევად არეში. მაგრამ რიგ წარმოებებში მიმდინარეობს ჰეტეროგენული რეაქციები ა-მ, ა-ს, ს-მ სისტემების საზღვარზე და ჩვეულებრივ განსაზღვრავს პროცესის საერთო სიჩქარეს. ჰეტეროგენული რეაქციები მიმდინარეობს, მაგალითად, მყარი ნივთიერებებისა და სითხეების წვის (დაჟანგვის) დროს, ლითონებისა და მინერალების მჟავებსა და ტუტეებში გახსნისას.

ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრების მნიშვნელობათა მიხედვით პროცესები შეიძლება დაიყოს როგორც დაბალ- და მაღალტემპერატურული, კატალიზური და არაკატალიზური, ვაკუუმში, ნორმალურ და მაღალ წნევაზე მიმდინარე, ამოსავალი ნივთიერებების დაბალი და მაღალი კონცენტრაციებით და სხვ.



პროცესების დროში მიმდინარეობის ხასიათის მიხედვით შესაბამისი აპარატები და მათში განხორციელებული პროცესები იყოფა პერიოდულ და უწყვეტ პროცესებად. უწყვეტად მომუშავე რეაქტორებს უწოდებენ გამდინარეს, რადგან მათში განუწყვეტლივ გაედინება მორეაგირე მასების ნაკადები.

ჰიდროდინამიკური რეჟიმის მიხედვით ასხვავებენ რეაქციის პროდუქტებთან მორეაგირე კომპონენტების შერევის ორ ზღვრულ შემთხვევას: სრული შერევა, როცა ტურბულიზაცია იმდენად ძლიერია, რომ რეაგენტების კონცენტრაცია გამდინარე რეაქტორში ერთნაირია აპარატის მთელ მოცულობაში საწყისი ნარევის შეყვანის წერტილიდან პროდუქციული ნარევის გამოსასვლელამდე; იდეალური გამოდევნა – როცა საწყისი ნარევი არ ერევა რეაქციის პროდუქტებს და ლამინარულ ნაკადად გაედინება აპარატის მთელ სიგრძეზე ან სიმაღლეზე. ასეთ რეაქტორებში შეიმჩნევა კონცენტრაციის მუდმივი გრადიენტი აპარატის ყოველ კვეთში და მისი მდოვრე ცვლილება რეაგენტების ნაკადის მიმართულებით, მაშინ როცა სრული შერევის სარეაქციო მოცულობაში საერთოდ არ არის კონცენტრაციის გრადიენტი. სამრეწველო გამდინარე რეაქტორებში არევის ხარისხი ყოველთვის ნაკლებია, ვიდრე სრული შერევის აპარატებში და მეტია ვიდრე იდეალური გამოდევნის აპარატებში. ზოგიერთი ტიპის რეაქტორებში არევის რეჟიმი უახლოვდება ერთ-ერთ ზღვრულ შემთხვევას.

ტემპერატურული რეჟიმის მიხედვით გამდინარე რეაქტორები და მათში მიმდინარე პროცესები იყოფა როგორც იზოთერმული, ადიაბატური და პოლითერმული. იზოთერმულ რეაქტორებში ტემპერატურა მუდმივია მთელ სარეაქციო მოცულობაში, რადგან ეგზოთერმული რეაქციის სითბო გაიყვანება ან თანაბრად

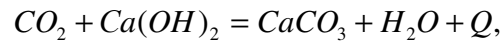
ნაწილდება სარეაქციო მოცულობაში, ხოლო სითბოს დანახარჯები პროცესებზე მთლიანად კომპენსირდება სითბოს მიწოდებით. იდეალური იზოთერმული რეჟიმი შესაძლებელია სრული შერევის რეაქტორებში.

ადიაბატურ რეაქტორებში არ არის სითბოს გამოყვანა ან მიწოდება; მთელი სითბო აკუმულირდება მორეაგირე ნივთიერებათა ნაკადით. იდეალური ადიაბატური რეჟიმი შესაძლებელია მხოლოდ იდეალური გამოდევნის რეაქტორში გარემოდან მისი სრული იზოლაციის დროს. ასეთ რეაქტორებში ნაკადის ტემპერატურა რეაქტორის ღერძის გასწვრივ საწყისი ნივთიერების პროდუქტად გარდაქმნის ხარისხის პირდაპირ- ან უკუ-პროპორციულია

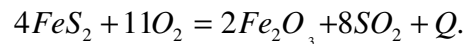
პროგრამულად რეგულირებად (პოლითერმული) რეაქტორებში რეაქციის სითბო მხოლოდ ნაწილობრივ გაიყვანება რეაქციის ზონიდან ან კომპენსირდება მისი მიწოდებით ენდოთერმული პროცესებისათვის. ამის შედეგად ტემპერატურა სარეაქციო მოცულობის სიგრძეზე, ან სიმაღლეზე, ერთნაირად იცვლება. სამრეწველო რეაქტორებს უმეტესად პოლითერმული ტემპერატურული რეჟიმი აქვთ, რაც ზოგჯერ უახლოვდება იზოთერმულ ან ადიაბატურ რეჟიმს. ნივთიერებათა ქიმიურ გარდაქმნებს ამა თუ იმ ზომით თან ახლავს თბური პროცესები. პროცესებს თბური რეჟიმის მიხედვით ყოფენ ეგზო- და ენდოთერმულად. ასეთ დაყოფას განსაკუთრებით დიდი მნიშვნელობა აქვს შექცევადი რეაქციების წონასწორობასა და სიჩქარეზე თბური ეფექტის გავლენის განსაზღვრის დროს. მთელ რიგ წარმოებებში თბური ეფექტი განსაზღვრავს წარმოების ტექნოლოგიურ სქემას და რეაქტორის კონსტრუქციას.

### 2.3. წონასწორობა ტექნოლოგიურ პროცესებში

ქიმიური პროცესები იყოფა შექცევად და შეუქცევად პროცესებად. შეუქცევადი პროცესები მხოლოდ ერთი მიმართულებით მიმდინარეობს. რეაქციები, როგორც წესი, შექცევადია იმ მხრივ, რომ პირობების შესაბამისად ისინი მიმდინარეობს როგორც პირდაპირი, ასევე უკუ მიმართულებით. ტიპურ საწარმოო პირობებში მრავალი ქიმიური რეაქცია პრაქტიკულად შეუქცევადია. ასე, მაგალითად, რეაქცია



აირთა ნარევების  $CO_2$ -საგან კირის რძით გაწმენდის პირობებში, პრაქტიკულად შეუქცევადია. შეუქცევადია მრავალი რთული რეაქცია, რომლებიც რიგი სტადიების ერთობლიობაა, მაგალითად პირიტის გამოწვის რეაქცია

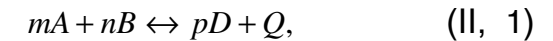


ჰეტეროგენულ სისტემებში შექცევადს უწოდებენ ისეთ პროცესებს, რომლებშიც შესაძლებელია ნივთიერების ან სითბოს გადასვლა როგორც ერთი ფაზიდან მეორეში, ასევე პირიქით.

ყველა შექცევადი ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესი მიისწრაფვის წონასწორობისაკენ, რომლის დროსაც პირდაპირი და უკუპროცესების სიჩქარეები ერთმანეთს უტოლდება. ამის შედეგად ურთიერთმოქმედ სისტემაში კომპონენტების თანაფარდობა უცვლელი რჩება, სანამ არ შეიცვლება გარე პირობები. ტემპერატურის, წნევის ან კონცენტრაციის ცვლილებით კი წონასწორობა ირ-

ღვევა და სისტემაში თავისთავად მიმდინარეობს დიფუზური და ქიმიური პროცესები, რის შედეგადაც აღდგება წონასწორობა ახალ პირობებში.

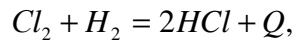
ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრების გავლენა წონასწორობაზე ჰომოგენურ და ჰეტეროგენულ სისტემებში თვისობრივად *ლე-შატელიეს* პრინციპით განისაზღვრება. ამ პრინციპის თანახმად სისტემებში, რომლებიც წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოდის გარე ზემოქმედებით, მიმდინარეობს სისტემის წონასწორობიდან გამომყვანი ზემოქმედების შესუსტებისაკენ მიმართული ცვლილებები. მაგალითისათვის განვიხილოთ *ლე-შატელიეს* პრინციპის გამოყენება სინთეზის ეგზოთერმული რეაქციის მიმართ:



სადაც  $m$ ,  $n$ , და  $p$  არის  $A$ ,  $B$  და  $D$  ნივთიერებების მოლების რაოდენობები;  $Q$  - რეაქციის თბური ეფექტი. აღვნიშნოთ ნივთიერებების მოცულობა  $V$ -თი და ჩავთვალოთ, რომ  $V_A + V_B > V_D$  ე. ი. რეაქცია მიმდინარეობს მოცულობის შემცირებით.

ძირითადი პირობები, რომლებიც გავლენას ახდენს მისაღები პროდუქტის რაოდენობაზე, არის  $t$  ტემპერატურა,  $P$  წნევა და მორეაგირე ნივთიერებების  $C_A$  და  $C_B$  კონცენტრაციები (თანაფარდობანი სარეაქციო მოცულობაში). წონასწორობის მარჯვნივ გადანაცვლებისათვის, ე. ი. პროდუქტის გამოსავლის გასადიდებლად (წონასწორული გამოსავლის გასადიდებლად), *ლე-შატელიეს* პრინციპის თანახმად, აუცილებელია  $t$  ტემპერატურისა და პროდუქტის  $C_D$  კონცენტრაციის შემცირება, ე.ი. პროდუქტის გამოყვანა სარეაქციო ზონიდან, აგრეთვე,  $P$  წნევისა და ამოსავალი ნივთიე-

რეზების  $C_A$  და  $C_B$  კონცენტრაციების გადიდება სარეაქციო ზონაში. ამასთან,  $C_A$ -ს გადიდება ხელს შეუწყობს  $B$  ნივთიერების უფრო სრულ გარდაქმნას და პირიქით. ამ გარემოებას ხშირად იყენებენ მრეწველობაში. ასე, მაგალითად, ქლორწყალბადის სინთეზის დროს ჯამური რეაქციით:



ქლორის არსებობა ქლორწყალბადოვან აირში არასასურველია (ის აჭუჭყიანებს მარილმჟავას), წყალბადის შემცველობა კი გართულებებს არ იწვევს. ამიტომ იყენებენ რა აირთა ნარევის ჭარბი წყალბადით, ღებულობენ პროდუქტს, რომელიც თითქმის არ შეიცავს ქლორს.

სისტემის წონასწორულ მდგომარეობას ახასიათებენ წონასწორობის მუდმივას საშუალებით. იგი იხმარება მოძრავი წონასწორობის რაოდენობრივი განსაზღვრისათვის. ფიზიკურ ქიმიასში წონასწორობის მუდმივა განისაზღვრება როგორც თერმოდინამიკური სიდიდე, მაგრამ მისი გამოყვანა შეიძლება მოქმედ მასათა კანონიდანაც, რომლის თანახმადაც ქიმიური რეაქციის სიჩქარე მოცემულ მომენტში მორეაგირე ნივთიერებათა მოლური კონცენტრაციების ნამრავლის პირდაპირპროპორციულია. ზემოთ მოყვანილი რეაქციისათვის პირდაპირი რეაქციის სიჩქარე

$$u_1 = k_1 [A]^m [B]^n, \quad (II, 2)$$

ხოლო შებრუნებული რეაქციის სიჩქარე

$$u_2 = k_2 [D]^p, \quad (II, 3)$$

სადაც  $k_1$  და  $k_2$  პირდაპირი და შებრუნებული რეაქციების სიჩქარეთა მუდმივებია;  $[A]$ ,  $[B]$  და  $[D]$  - მორეაგირე ნივთიერებების მოლური კონცენტრაციები (ან პარციალური წნევები) მოცემულ მომენტში, ე. ი. დროში ცვლადი სიდიდეები. წონასწორობის  $K$  მუდმივა გამოითვლება როგორც პირდაპირი და შებრუნებული რეაქციების სიჩქარეთა მუდმივების ფარდობა წონასწორობის დროს, ე. ი. როცა  $u_1 = u_2$ :

$$k_1 [A]^m [B]^n = k_2 [D]^p, \quad \text{საიდანაც}$$

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{[D]^p}{[A]^m [B]^n}, \quad (II, 4)$$

სადაც  $[A^*]$ ,  $[B^*]$  და  $[D^*]$  მორეაგირე ნივთიერებების კონცენტრაციები ან პარციალური წნევებია წონასწორობის მდგომარეობაში. აირებისათვის  $K$  შეიძლება გამოისახოს მორეაგირე კომპონენტების  $p$  პარციალური წნევის (მაგალითად ატმოსფეროებში), კომპონენტების  $C$  კონცენტრაციის (მაგალითად მოლი/მ<sup>3</sup>-ში) და, ბოლოს, მოლური  $N$  წილების საშუალებით. შესაბამისად მიიღება წონასწორობის მუდმივები  $K_p$ ,  $K_c$ , და  $K_N$ . ისინი ერთმანეთთან დაკავშირებულია განტოლებებით

$$K_p = K_c (RT)^{\Delta N} \quad \text{და} \quad K_p = K_N P^{\Delta N},$$

სადაც  $P$  არის აირთა ნარევის საერთო წნევა,  $\Delta N$  - რეაქციის შედეგად აირების მოლელების რიცხვის ნაზრდი. მოცემული სამოდულო რეაქციისათვის

$$\Delta N = p - (m + n).$$

წონასწორობის მუდმივას მიღებული განტოლება გამოუსადეგარია  $K$ -ს განსაზღვრისათვის, რადგანაც წონასწორობის კონცენტრაციები ჩვეულებრივ უცნობია და განსაზღვრება ცნობილი ამოსავალი კონცენტრაციებისათვის  $K$ -ს სიდიდის მიხედვით. ცდებით განსაზღვრული წნევისა და ტემპერატურის მიხედვით ანალიზური გზით გამოთვლილი წონასწორობის მუდმივას მნიშვნელობები სხვადასხვა რეაქციისათვის მოცემულია შესაბამის სახელმძღვანელოებსა და ცნობარებში ცხრილებისა და ნომოგრამების სახით. ცდისეული მონაცემებით  $K$ -ს განსაზღვრისათვის მას გამოსატყვევებ პროდუქტის გამოსავლის საშუალებით.

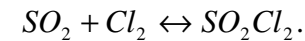
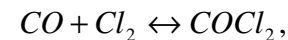
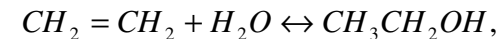
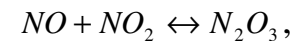
პროდუქტის გამოსავალი ეწოდება ფაქტობრივად მიღებული პროდუქტის  $G_{ფ}$  რაოდენობის შეფარდებას პროდუქტის მაქსიმალურ  $G_{მაქს}$  რაოდენობასთან, რომელიც შეიძლება მიღებულ იქნეს მოცემული ამოსავალი ნივთიერებიდან:

$$x = G_{ფ} / G_{მაქს} \quad (II, 5)$$

ქიმიური რეაქციებისათვის პროდუქტის მაქსიმალური რაოდენობა განისაზღვრება რეაქციის განტოლებით ძირითადი ამოსავალი ნივთიერების მიხედვით. ძირითად ნივთიერებად, როგორც წესი, ითვლება სარეაქციო ნარევის ყველაზე ძვირფასი კომპონენტი, რომელიც, ჩვეულებრივ, სტექიომეტრიულზე ნაკლები რაოდენობისაა. ასე, მაგალითად, სამრეწველო რეაქციისთვის  $2SO_2 + O_2 = 2SO_3$ , ძირითად რეაგენტად თვლიან გოგირდის დიოქსიდს, რადგან მეორე რეაგენტი – ჟანგბადი – ჰაერის შედგენილობაში შედის და ნაკლებად ძვირ-

ფასია. ეს ეხება ჰაერის ჟანგბადით დაჟანგვის ყველა მრავალრიცხოვან რეაქციას, რომელშიც ჟანგბადი ყოველთვის ჭარბი რაოდენობით მონაწილეობს.

წონასწორობულ გამოსავალს  $x_{წონ}$ -ს ჩვეულებრივად ითვლიან წონასწორობის კონსტანტის მნიშვნელობის ცხრილების გამოყენებით. მეორე მხრივ, ცხრილებში მოცემული  $K$ -ს მნიშვნელობები გამოთვლილია იგივე ფორმულებით ექსპერიმენტულად განსაზღვრული პროდუქტის წონასწორობული გამოსავლის საშუალებით. პროდუქტის წონასწორობული გამოსავლის საშუალებით წონასწორობის კონსტანტის გამოსათვლელი ფორმულის სახე განისაზღვრება რეაქციის ტიპით. გამოვიყვანოთ ფორმულა აირებს შორის მიმდინარე  $A + B \leftrightarrow D$  ტიპის რეაქციისათვის. ამ სახით მიმდინარეობს წარმოებაში რიგი რეაქციებისა, კერძოდ აზოტის ოქსიდისა და დიოქსიდის ასოციაცია აზოტმჟავის წარმოებაში, ეთილის სპირტის, ფოსგენის, სულფურილქლორიდის სინთეზები:



თუ აღვნიშნავთ პროდუქტის წონასწორობულ გამოსავალს ერთეულის წილებში  $x$ -ით, ამოსავალი ნივთიერებებისა და პროდუქტის პარციალურ წნევებს აირნარევში  $P_A^*$ ,  $P_B^*$  და  $P_D^*$ -თი, სუფთა აირნარევში ამოსავალი ნივთიერებების სტექიომეტრიული თანაფარდობის დროს წონასწორობის მდგომარეობაში შეიძლება დაიწეროს:

$$P = p_A^* + p_B^* + p_d^*, \quad (II, 6)$$

სადაც  $P$  არის საერთო წნევა. თავის მხრივ წონასწორული გამოსავალი ( $x = x_{წონ}$ ) იქნება:

$$x_{წონ} = \frac{G_D}{G_{მაქს}} = \frac{p_D^*}{P}.$$

(II,6) განტოლების  $P$ -ზე გაყოფით მივიღებთ:

$$\frac{p_A}{P} + \frac{p_B^*}{P} = 1 - x_{წონ} \quad \text{და} \quad \frac{p_A^*}{P} = \frac{p_B^*}{P} = \frac{1 - x_{წონ}}{2}.$$

თავის მხრივ წონასწორობის კონსტანტა

$$K = \frac{[D^*]}{[A^*][B^*]} = \frac{p_D^*}{p_A^* \cdot p_B^*}.$$

თუ ამ განტოლებაში ჩავსვამთ პარციალური წნევების მნიშვნელობებს მივიღებთ:

$$K = \frac{x_{წონ} P}{\left(\frac{1 - x_{წონ}}{2}\right)^2 P^2} = \frac{4x_{წონ}}{(1 - x_{წონ})^2 P}. \quad (II, 7)$$

რეაქციებისათვის, რომელთა განტოლებებიც გამოიხატება მოდელით  $A + B \leftrightarrow 2D$ , მაგალითად, ქლორწყალბადის სინთეზის, აზოტის ოქსიდის დიმერის დაჟანგვისათვის  $N_2O_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO_2$ , შეიძლება აგრეთვე დაიწეროს:

$$x_{წონ} = \frac{p_D^*}{P}, \quad \frac{p_A^*}{P} = \frac{1 - x_{წონ}}{2}, \quad \frac{p_B^*}{P} = \frac{1 - x_{წონ}}{2}$$

$$K = \frac{(p_D^*)^2}{p_A^* p_B^*} = \frac{x_{წონ}^2 P^2}{\left(\frac{1 - x_{წონ}}{2}\right)^2 P^2} = \frac{4x_{წონ}^2}{(1 - x_{წონ})^2}. \quad (II, 8)$$

ამრიგად, შეიძლება მივიღოთ განტოლებები, რომლებიც აკავშირებს  $K$ -სა და  $x$ -ს ნებისმიერი შექცევადი რეაქციისათვის. თუ მიღებულ განტოლებებს ამოვხსნით  $x$ -ის მიმართ, შეიძლება დავადგინოთ, რომ ლე-შატელიეს პრინციპის თანახმად, პირველ შემთხვევაში გამოსავალი იზრდება წნევის გადიდებით, ხოლო მეორე შემთხვევაში მასზე არ არის დამოკიდებული. მოყვანილი ტოლობები, რომლებიც რეაქციის სიჩქარეს ან წონასწორობას გამოსატყავს, მართებულია იდეალურ აირებსა ან უსასრულოდ განზავებულ სითხეებს შორის მიმდინარე მარტივი რეაქციებისათვის. პრაქტიკულ პირობებზე გადასვლის დროს საჭიროა მორეაგირე კომპონენტების აქროლადობისა და აქტივობის გათვალისწინება.

$K$ -ს გამოსათვლელად ხშირად იყენებენ ტექნიკურ ცნობარებსა და ფიზიკური ქიმიის სახელმძღვანელოებში მოცემულ სტანდარტულ ცხრილებს, სადაც სტანდარტულ მდგომარეობაში მოცემულია წარმოქმნის სითბოები (სითბომემცველობის ცვლილება)  $q_r$ , ან  $\Delta H$  (ჯ/მოლი),  $\Delta Z$  იზობარულ-იზოთერმული პოტენციალის ცვლილება და  $S$  აბსოლუტური ენტროპიები  $25^\circ\text{C}$  ტემპერატურასა და 1 ატმ წნევაზე. ასე, მაგალითად,

$$\lg K_p = \frac{\Delta Z}{19,1T}, \quad \text{ან} \quad \lg K_p = \frac{T\Delta S - \Delta H}{19,1T}.$$

მაგრამ ამ ფორმულების მიხედვით გამოთვლისათვის აუცილებელია პროცესის მექანიზმის ახსნა, ე. ი. რეაქციის არა ჯამური, არამედ ჭეშმარიტი განტოლების ცოდნა. წონასწორობის  $K$  კონსტანტის ტემპერატურაზე დამოკიდებულება გამოიხატება იზობარის განტოლებით:

$$\frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{q}{RT^2}, \quad (II,9)$$

რომელიც გამოიყენება  $T_2$  ტემპერატურაზე უცნობი  $K_{p_2}$  წონასწორობის კონსტანტის განსაზღვრისათვის  $T_1$ -ზე ცნობილი  $K_{p_1}$ -სა და მუდმივ წნევაზე ცნობილი რეაქციის  $q$  თბური ეფექტის მიხედვით:

$$\lg \frac{K_{p_2}}{K_{p_1}} = \frac{q}{2,3R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

სადაც  $R = 8,3$  ჯ/მოლი.გრად არის აირების მუდმივა. თუ ჩავსვამთ მის მნიშვნელობას, მივიღებთ:

$$\lg \frac{K_{p_2}}{K_{p_1}} = \frac{q(T_2 - T_1)}{19,1T_1T_2}. \quad (II, 10)$$

განტოლებები მიღებულია  $q$ -ს მუდმივი მნიშვნელობისათვის განსაზღვრულ  $T_1$  ტემპერატურაზე, ამიტომ მათი გამოყენება შეიძლება ისეთ ტემპერატურულ ინტერვალში, რომელიც  $q$ -ს მცირე ცვლილებას შეესაბამება. ტემპერატურის მნიშვნელოვანი ცვლილების დროს  $K$ -ს გამოსათვლელად იყენებენ განტოლებას:

$$\lg K_p = \frac{q^0}{2,3RT} \pm \frac{\Delta a_0}{R} \lg T \pm \frac{\Delta a_1}{4,6R} T \pm \frac{\Delta a_2}{13,8R} T^2 \pm K_1, \quad (II, 11)$$

სადაც  $\Delta a_0, \Delta a_1, \Delta a_2$ , ნერნსტის თბური განტოლების კოეფიციენტებია, რომლებიც სხვადასხვა რეაქციებისათვის მოცემულია საცნობარო ლიტერატურაში. იმის გამო, რომ  $\Delta a_0, \Delta a_1, \Delta a_2$  კოეფიციენტების მნიშვნელობები ძალიან მცირეა, ტექნიკური გაანგარიშებებისათვის ხშირად იყენებენ გამარტივებულ ფორმულას:

$$\lg K_p = \frac{a}{T} \pm K_1 \quad \text{სადაც} \quad a = \frac{q^0}{2,3R}, \quad ( "+" \text{ ეგზოთერმული, ხოლო } "-" \text{ ენდოთერმული რეაქციებისათვის}).$$

ჰეტეროგენულ პროცესებში წონასწორობა, რომელიც განსაზღვრავს წონასწორულ გამოსავალს, დამოკიდებულია წნევაზე, ტემპერატურასა და ურთიერთმოქმედი ნივთიერებების კონცენტრაციაზე. ქიმიური წონასწორობის კონსტანტებს ჰეტეროგენული სისტემების ყველა ფაზაში ითვლიან ზემოთმოყვანილი განტოლებებით. ფაზათაშორის წონასწორობას საზღვრავენ ნივთიერების განაწილების კანონისა და ფაზათა წესის საფუძველზე.

## 2.4. ქიმიურ-ტექნოლოგიური სისტემები

### 2.4.1 ქიმიური წარმოება როგორც რთული სისტემა

რეალური ქიმიური წარმოება არის მრავალრიცხოვანი ურთიერთდაკავშირებული ტექნოლოგიური აპარატების ერთობლიობა, რომელთა დანიშნულებაა

ნედლეულის გადამუშავება მოხმარების პროდუქტებად და წარმოების საშუალებებად. ეს რთული კომპლექსია, რომელშიც მრავალ შემთხვევაში აპარატების მუშაობის ოპტიმალური პარამეტრები ერთმანეთს არ ემთხვევა. მაგალითად, გოგირდმუავის წარმოება შედგება თანამიმდევრული ეტაპებისაგან, რომელთა ტემპერატურული, და აგრეთვე ჰიდროდინამიკური პირობები სხვადასხვაა:

1. აღმადნის გამოწვა ხდება 700°C-ზე მაღალ ტემპერატურაზე მდულარე ფენიან ღუმელებში (რეჟიმი ახლოსაა სრულ შერევისთან).

2. ნამწვი აირი იწმინდება დაახლოებით 30°C-ზე წყობურიან სვეტებსა (რეჟიმი ახლოსაა იდეალურ გამოდენასთან) და ელექტროფილტრებში.

3. გოგირდის დიოქსიდი იუანგება ტრიოქსიდად 400-600°C-ზე საკონტაქტო აპარატებში, მაგალითად თაროვანში, რომელიც შეიძლება განვიხილოთ როგორც უჯრედოვანი მოდელი.

4. გოგირდის ანჰიდრიდი შთაინთქმება წყლით 50°C-ზე წყობურიან სვეტებში.

შესაბამისად, მთელი წარმოების ოპტიმალური ფუნქციონირება არ შეიძლება იყოს ყოველი აპარატის მუშაობის პირობების ადიტიური ფუნქცია. აქედან გამომდინარე, ტექნოლოგიური პროცესის ცალკეული ელემენტების გამოკვლევასთან ერთად აუცილებელია მთელი ქიმიურ-ტექნოლოგიური სისტემის (ქტს) შესწავლა. ქიმიურ-ტექნოლოგიური სისტემა არის ტექნოლოგიური ნაკადებით ურთიერთდაკავშირებული აპარატების ერთობლიობა, რომელიც მოქმედებს როგორც ერთი მთლიანი და სადაც ხორციელდება ტექნოლოგიური ოპერაციების განსაზღვრული თანამიმდევრობა – ნედლეულის მომზადება ქიმიური გარდაქმნისათვის, ქიმიური გარდაქმნა, მიზნობრივი პროდუქტების გამოყოფა და გაწმენდა.

ყოველი ტექნოლოგიური ოპერაცია მიმდინარეობს ცალკეულ აპარატებში, რომლებიც ქტს-ის ელემენტებია. ქტს-ის კვლევისათვის დამახასიათებელია, რომ ამ დროს არ შეისწავლება ელემენტების შინაგანი თვისებები და სტრუქტურა, ანალიზდება მათი მხოლოდ ისეთი თვისებები, რომლებიც განსაზღვრავს მის ურთიერთკავშირს ქტს-ის სხვა ელემენტებთან და მოქმედებს მთლიანად სისტემის თვისებებზე.

სისტემის მდგომარეობა დამოკიდებულია ქტს-ის კონსტრუქციულ პარამეტრებსა და ტექნოლოგიურ რეჟიმზე.

ქიმიურ-ტექნოლოგიური სისტემის კონსტრუქციული პარამეტრებია სისტემის ელემენტების გეომეტრიული მახასიათებლები – მოცულობა, დიამეტრი, სიმაღლე და ა. შ. ქტს-ის ტექნოლოგიური რეჟიმის პარამეტრები მაჩვენებლების ერთობლიობაა ელემენტის შიგნით, რომლებიც მოქმედებს ტექნოლოგიური პროცესის სიჩქარეზე, პროდუქტის გამოსავალსა და ხარისხზე; მათ მიეკუთვნება რეაგენტების კონცენტრაცია, ტემპერატურა, კატალიზატორის აქტივობა, ნაკადის ჰიდროდინამიკა. ქტს-ის პარამეტრებზე დამოკიდებულია მისი ფუნქციონირება, რაც განისაზღვრება ეფექტურობის მაჩვენებლის – რეალიზებული პროდუქციის – რაოდენობით, პროდუქციის ხარისხით, საექსპლუატაციო და კაპიტალური დანახარჯების მიხედვით.

ამასთან, უნდა აღინიშნოს, რომ ქტს-ის მაჩვენებლებზე უეჭველად მოქმედებს მისი ცალკეული ელემენტების მაჩვენებლები, რომლებშიც ერთდროულად მიმდინარეობს ფიზიკური და ქიმიური პროცესები. პროცესებისა და მათი შესაბამისი აპარატების მიმდევრობით აღწერას ეწოდება ქტს-ის ტექნოლოგიური სქემა.

მიღებულია ქტს-ის ტექნოლოგიური სქემების ორ ძირითად ჯგუფად დაყოფა: 1) ღია ჯაჭვიანი; 2) ციკლური (ცირკულაციური, წრიული, ჩაკეტილი).

ღია ჯაჭვიანი სქემა შედგება აპარატებისაგან, რომლებშიც მორეაგირე კომპონენტები ან ერთ-ერთი ურთიერთმოქმედი ფაზა მხოლოდ ერთჯერ გაივლის. თუ ერთ აპარატში გარდაქმნის ხარისხი მცირეა, მიმდევრობით დგამენ რამდენიმე ერთტიპურ აპარატს, მაგალითად, რეაქტორების ბატარეას.

აირადი ფაზის მიხედვით ღია ჯაჭვიანი პროცესის მაგალითია ნიტროზული აირების მჟავური აბსორბციის განყოფილების ტექნოლოგიური სქემა ატმოსფერულ წნევაზე სუსტი აზოტმჟავის წარმოებაში. ღია ჯაჭვიანი სქემით აგებენ წარმოებებს, რომლებიც მოიცავს პროდუქტის საკმაოდ მაღალი გამოსავლით მიმდინარე შექცევად და შეუქცევად პროცესებს. თუ კი ერთ აპარატში პროდუქტის გამოსავალი შეადგენს 4-5%-ს (სპირტების სინთეზი) ან 20%-მდე (ამიაკის სინთეზი) და მორეაგირე ნარევი შეიცავს მინარევებს მხოლოდ უმნიშვნელო რაოდენობით (ჩვეულებრივ ინერტულს), მაშინ მიზანშეწონილია წარმოების აგება ციკლური სქემით.

ციკლური სქემა ითვალისწინებს ერთსა და იმავე აპარატში ყველა ტექნოლოგიური მასების ან ერთ-ერთი ფაზის (ჰეტეროგენულ პროცესებში) მრავალჯერად დაბრუნებას ამოსავალი ნივთიერების მოცემული გარდაქმნის ხარისხის მიღწევამდე. ციკლური სქემების ტიპური მაგალითებია ამიაკის, სპირტების, ძრავის სათბობის სინთეზის სქემები და სხვ. ყველა ასეთ წარმოებაში აპარატში ერთ ციკლში მიიღწევა მცირე გარდაქმნის ხარისხი, მაგრამ მორეაგირე ნარევი პროდუქტის გამოყოფის შემდეგ მრავალჯერ ცირკულირებს აპარატში თითქმის პრაქტიკულად სრულ გარდაქმნამდე. საცირკულაციო ნარევის განუწყვეტლივ ემატება ამოსავალი მასალების ისეთი ახალი რაოდენ-

ობა, რომელიც შეესაბამება მის ხარჯს ერთ ციკლში წარმოქმნილ პროდუქტზე, დანაკარგების გათვალისწინებით. რამდენადაც პროცესში იხარჯება მხოლოდ ძირითადი ამოსავალი კომპონენტები, ცირკულირებულ ნარევი გროვდება ის ბალასტური მინარევები, რომლებსაც ამოსავალი ნარევი შეიცავს. მათ მოსაშორებლად პერიოდულად ციკლიდან გამოჰყავთ საცირკულაციო აირნარევის რაღაც ნაწილი. ციკლურ სქემებს განსაკუთრებული ეკონომიკური და ეკოლოგიური მნიშვნელობა აქვთ, რადგანაც წარმოებაში მათი განხორციელება იძლევა მავნე გამონატყორცნების მკვეთრად შემცირების საშუალებას.

ჰეტეროგენულ პროცესებში ხშირად იყენებენ კომბინირებულ სქემებს, რომლებშიც ერთ-ერთი მორეაგირე ფაზა გადის მიმდევრობით შეერთებული აპარატების რიგში და მისი დარჩენილი ნაწილი გამოიტყორცნება, ხოლო მეორე ფაზა ცირკულირებს სქემის ზოგიერთ აპარატში. მაგალითად, კოქსის აირის გადამუშავების დროს ორთქლაირის ნარევი გადის მიმდევრობით ღია ჯაჭვიანი სქემის ყველა აპარატში, ხოლო გამაცივებელი და სააბსორბციო ხსნარები ცირკულირებს ცალკეულ აპარატებში.

### III თავი

#### ჰომოგენური პროცესები

##### 3.1. ჰომოგენური ქიმიური პროცესების დახასიათება

ჰომოგენური, ე. ი. ერთგვაროვან არეში (თხევადი ან აირადი ნარევი, რომელთაც არ აქვთ სისტემის ნაწილაკების ერთმანეთისაგან გამოყოფი ზედა-

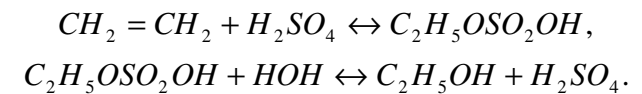


პირი) მიმდინარე პროცესები, შედარებით იშვიათად გვხვდება მრეწველობაში. წმინდა ჰომოგენური სისტემის მიღება ძნელია. ნებისმიერი ნივთიერება შეიცავს მეორე ფაზაში მყოფი სხვადასხვა მინარევების კვალს. მაგალითად, 1 მლ დისტილირებული წყალი შეიცავს 20000-დან 30000-მდე მტვრის ნაწილაკს.

მრავალი სამრეწველო პროცესისათვის (უანგვა, წვა და სხვ.) ჰაერი ჰომოგენურ არედ ითვლება, პლატინის კატალიზატორზე ამიაკის დაუანგვის პროცესისათვის კი იგივე ჰაერი ჰეტეროგენული გარემოა მასში მტვრის, წყლის წვეთებისა და სხვ. შემცველობის გამო. მრეწველობაში გამოყენებული ამოსავალი ნედლეული ყოველთვის შეიცავს მინარევებს, რომლებიც ხშირად მოქმედებს პროცესის მსვლელობაზე როგორც კატალიზატორები ან ინჰიბიტორები. ამიტომ მხოლოდ პირობითად შეიძლება ჩავთვალოთ ჰომოგენურად ის საწრმოო პროცესები, რომლებიც აირად ან თხევად ფაზაში მიმდინარეობს. საზღვარი ჰომოგენურსა და ჰეტეროგენულ სისტემებს შორის გადის კოლოიდებსა და წმინდა აეროზოლებზე, რომლებსაც მიკროჰეტეროგენულ სისტემებს უწოდებენ. და თუმცა არ შეიძლება მკვეთრი საზღვრის პოვნა, ერთი მხრივ, ჰეტეროგენულ ტივტივარებსა და კოლოიდურ ხსნარებს, ხოლო მეორე მხრივ კოლოიდურ და ჭეშმარიტ ხსნარებს შორის, მაინც პირობითად შეიძლება ამ დაყოფის ჩატარება დისპერსიული ფაზის ნაწილაკების ზომების მიხედვით. უხეში დისპერსიული სისტემები (სუსპენზიები, ემულსიები), რომლებიც შეიძლება მივაკუთნოთ ჰეტეროგენულებს, შეიცავს 0,1 მკ-ზე მეტი დიამეტრის ნაწილაკებს. კოლოიდურ სისტემაში ნაწილაკების ზომა მერყეობს 1 მმკ-დან 0,1 მკ-მდე. ჭეშმარიტი ხსნარები კი (მოლეკულური და მონოდისპერსიული სისტემები), რომელთაც მიეკუთვნება მარილების, მჟავების, ტუტეებისა და სხვა ხსნარები, შეიცავს 1 მმკ-ზე მცირე ზომის ნაწილაკებს,

კოლოიდური ნაწილაკების ზომების მოლეკულუ-ბამდე შემცირება აახლოებს მაქსიმალურად განვითარებულ ზედაპირიან მიკროჰეტეროგენულ კოლოიდურ ხსნარებს ჭეშმარიტთან, ე. ი. ისინი შეიძლება ჩაითვალოს ჰომოგენურ სისტემებად, მაშინ როცა სუსპენზიები (თიხა, მღვრიე წყალი, კირის რძე და სხვ.) და ემულსიები (ზეთის უწვრილესი წვეთები წყალში) უკვე ჰეტეროგენულ სისტემებს მიეკუთვნება. ჰომოგენურ სისტემებში რეაქციები, როგორც წესი, გაცილებით სწრაფად მიმდინარეობს, ვიდრე ჰეტეროგენულში. გულმოდგინედ არევის დროსაც კი ორ ურთიერთუხსნარ სითხეში ურთიერთმოქმედ ნივთიერებათა მოლეკულების შეჯახებათა რიცხვი გაცილებით მცირეა, ვიდრე ჰომოგენურ სისტემებში. ჰომოგენურად მიმდინარე პროცესების განხორციელება და მართვა ადვილდება. ამიტომ მრავალი სამრეწველო ჰეტეროგენული პროცესი რომელიმე ეტაპის სახით შეიცავს ჰომოგენურ ქიმიურ სტადიას (რეაქციას) აირად ან თხევად ფაზაში.

სისტემის ჰომოგენიზაციისათვის მრეწველობაში ხშირად აირებს შთანთქავენ ან ორთქლს ათხევადებენ, მყარ მასალებს ხსნიან ან ალღობენ და ამ გზით დებულობენ თხევად გარემოს, რომელშიც უფრო სწრაფად მიმდინარეობს რეაქციები. ზოგჯერ სითხეებს აორთქლებენ ან გამოყოფენ მათგან საჭირო კომპონენტებს და რეაქციას ატარებენ აირად ფაზაში. ასე, მაგალითად, ეთილენის გოგირდმჟავური ჰიდრატაციის დროს პროცესი იწყება გოგირდმჟავით ეთილენის ფიზიკური აბსორბციით, შემდეგ კი თხევად ფაზაში ჰომოგენურად ხორციელდება ეთილგოგირდ-მჟავის წარმოქმნა და მისი შემდგომი ჰიდროლიზი:

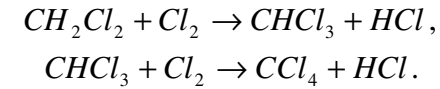
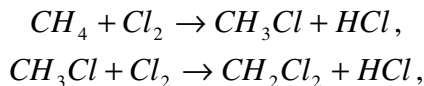


ასე გარდება სინთეზის (ასოციაცია, პოლიმერიზაცია, მიმოცვლა, მიერთება, ჩანაცვლება), დაშლის (დეპოლიმერიზაცია, კრეკინგი) და მრავალი სხვა რეაქცია.

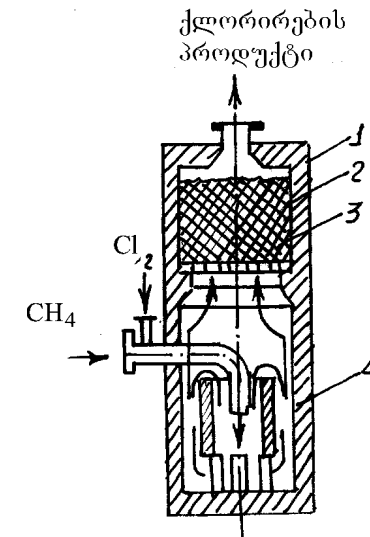
### 3.2. ჰომოგენური პროცესები აირად ფაზაში

აირად ფაზაში მიმდინარე ჰომოგენურ პროცესებს ფართოდ იყენებენ ორგანულ ნივთიერებათა ტექნოლოგიაში. ამ პროცესების განსახორციელებლად ორგანულ ნივთიერებებს აორთქლებენ და შემდეგ მათ ორთქლს ამუშავებენ ამა თუ იმ აირადი კომპონენტით: ქლორით, გოგირდის დიოქსიდით, ჟანგბადით (ჰაერით), აზოტის ოქსიდებით და სხვ. ფართოდ გამოიყენება ორთქლფაზოვანი პიროლიზი (მეთანის კრეკინგი აცეტილენად ან ეთილენად, პროპანისა – ეთილენად და პროპილენად და სხვ.), რომელშიც დაშლის ქიმიური რეაქციები ორთქლის ფაზაში ხორციელდება. ნახშირწყალბადების ან მათი ნაწარმების ქლორირება ხორციელდება ორგანული გამსხნელების, შხამქიმიკატებისა და ორგანული სინთეზის სხვა მრავალფეროვანი პროდუქტების მისაღებად. გამოყენებული ინციირების საშუალებების ნიხედვით ასხვავებენ ქლორირების თერმულ, ფოტოქიმიურ და კატალიზურ მეთოდებს. აქედან პირველი ორი ჰომოგენურია, ხოლო მესამე – ჰეტეროგენული.

თერმული ქლორირების დროს აქტივაციის ენერგია დაახლოებით 84 კჯ/მოლ-ია. პროცესი ხორციელდება 250-400°C-ზე. რაც ნაკლებად რეაქციისუნარიანია ნახშირწყალბადი, მით უფრო მეტი ტემპერატურაა საჭირო. მეთანის ქლორირების დროს, მისი წყალბადატომების მიმდევრობითი ჩანაცვლებით მიიღება ოთხი ნაწარმის ნარევი:



პროცესის პირობების, ამოსავალი ნივთიერებების თანაფარდობის, ქლორირების რეჟიმის ცვლით, შესაძლებელია რეაქციის წარმართვა ამა თუ იმ ქლორწარმოებულის უპირატესი წარმოქმნის მიმართულებით; ასე, მაგალითად, ქლორინი მეთილი და მეთილენი მიიღება მეთანის დიდი სიჭარბის დროს ( $CH_4:Cl_2 = 3 \div 8 :1$ ) 400–450°C-ზე. ქლორირებას ატარებენ კამერული ტიპის სპეციალურ რეაქტორში (ნახ. III.1), რომლის ფოლადის კორპუსი ამოგებულია შამოტის აგურით. საწვავი აირით (მეთანისა და ჰაერის ნარევი) აპარატის წინასწარი გაცხელების შემდეგ, რის შედეგადაც ამონაგები და წყობური აგროვებს სითბოს, კერამიკული მილით, რომლის ბოლოც ჩაშვებულია შიგა კერამიკულ ცილინდრში, მიეწოდება ასევე წინასწარ 120-250°C-მდე გაცხელებული ამოსავალი აირადი ნარევი. რეაქციის პროდუქტები გამოჰყავთ აპარატის ზედა ნაწილიდან და აგზავნიან გასაყოფად.



ნახ. III.1. აპარატი მეთანის ქლორირებისათვის: 1 – ფოლადის გარსაცმი; 2 – შამოტის ამონაგები; 3 – წყობური (ფაიფურის რგოლები); 4 – შიგა კერამიკული ცილინდრი.

მრეწველობაში იყენებენ ორსტადიურ პროცესს. პირველად, აირად ფაზაში, მეთანის თერმული ქლორირებით ლებულობენ  $CH_3Cl$ -სა და  $CH_2Cl_2$ -ს, ხოლო შემდეგ ფოტოქიმიური თხევადფაზური ქლორირებით პროცესი მიჰყავთ  $CHCl_3$ -ისა და  $CCl_4$ -ის წარმოქმნამდე.

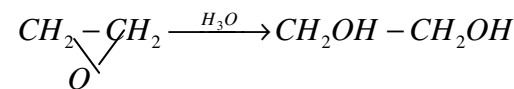
ნახშირწყალბადების ფოტოქიმიური ქლორირება დიდი სიჩქარით ხორციელდება დაბალ ტემპერატურაზე. რეაქცია ჯაჭვური მექანიზმით მიმდინარეობს თხევად ან აირად ფაზაში და ხშირად მისი მიმართულება სხვა არის ვიდრე თერმული ქლორირებისა. ფოტოქიმიური ქლორირების ენერგია გაცილებით მცირეა და 42-63 კჯ/მოლ-ს უდრის. ამ დროს რეაქციის სიჩქარე და აქტიური ნაწილაკების კონცენტრაცია განისაზღვრება მხოლოდ გამოსხივების ინტენსივობით და არ არის დამოკიდებული ტემპერატურაზე.

სულფოქლორირებას, ე. ი. ნაჯერ ნახშირწყალბადებზე გოგირდის დიოქსიდისა და ქლორის ერთდროულ მოქმედებას ( $RH + SO_2 + Cl_2 \rightarrow R-SO_2-Cl + HCl$ ) იყენებენ გამრეცხი საშუალებების წარმოებისათვის. ეს არის ტიპური ჯაჭვური რეაქცია, რომლის სელექციურად წარმართვა სულფოქლორიდის წარმოქმნის მიმართულებით, ხერხდება ულტრაიისფერი სინათლის ზემოქმედებით.

### 3.3. ჰომოგენური პროცესები თხევად ფაზაში

თხევად ფაზაში მიმდინარე მრავალრიცხოვანი პროცესებიდან ჰომოგენურს შეიძლება მივაკუთვნოთ მჟავის წყალ-ხსნარის ტუტის წყალხსნარით ნეიტრალიზაციის პროცესები მინერალური მარილების ტექნოლოგიაში, მათი ურთიერთქმედების საწყის პერიოდში, მყარი მარილის წარმოქმნამდე; მაგალითად ამონიუმის სულფატის მიღება ამიაკიანი წყლისა და გოგირდმჟავის ურთიერთქმედებით. ასეთივე პრინციპით

მიმდინარეობს ხსნარებში ზოგიერთი მიმოცვლითი რეაქციები ( $KCl + NaNO_3 \leftrightarrow KNO_3 + NaCl$ ), ზოგიერთი რთული ეთერის წარმოქმნა, ეთილგოგირდმჟავის, იზოპროპილსულფატის, ალკილქლორიდებისა და სხვათა ჰიდროლიზის პროცესები. თხევად ფაზაში ტარდება ბენზოლსულფომჟავის ტუტოვანი ლლობა ფენოლის წარმოქმნით, ეთილენგლიკოლის მიღება ეთილენის ჟანგის ჰიდრატაციით:



თხევად ფაზაში ლებულობენ სპირტებისაგან მარტივ და რთულ ეთერებს; მაგალითად, ეთილსულფატი იშლება მეორე სპირტით:



### 3.4. ჰომოგენური პროცესების ძირითადი კანონზომიერებები

განვიხილოთ ქიმიური ტექნოლოგიის კანონზომიერებანი ჰომოგენურ პროცესებთან მიმართებაში, ე. ი. მორეაგირე ნივთიერებების კონცენტრაციის, წნევის, ურთიერთარევის გავლენა აირად და თხევად არეში მიმდინარე პროცესების სიჩქარეზე. ჰომოგენური პროცესები, როგორც წესი, მიმდინარეობს კინეტიკურ არეში, ე. ი. პროცესის საერთო სიჩქარე განისაზღვრება ქიმიური რეაქციის სიჩქარით, ამიტომ რეაქციებისათვის დადგენილი კანონზომიერებანი მართებულია საერთოდ აირად და თხევად ფაზაში მიმდინარე მთელი პროცესისათვის.

კინეტიკის თვალსაზრისით ქიმიური რეაქციების კლასიფიცირება შეიძლება მოლეკულურობის, ე. ი. ქიმიური გარდაქმნის ელემენტარულ აქტში ერთდროულად მონაწილე მოლეკულების რიცხვისა და რეაქციის რიგის მიხედვით. რეაქციის რიგი უდრის მორე-

აგრე ნივთიერებათა კონცენტრაციების ხარისხის მაჩვენებლების ჯამს მის კინეტიკურ განტოლებაში. უმეტესად რეაქციის რიგი არ ემთხვევა მის მოლეკულურობას. მოლეკულურობის მიხედვით რეაქციები შეიძლება იყოს მონომოლეკულური, ბიმოლეკულური და ა. შ., ხოლო რიგის მიხედვით – პირველი, მეორე და ა. შ., წილადური, ნულოვანი ან უარყოფითი რიგისა.

*მონომოლეკულურებს (ერთმოლეკულურებს) მიეკუთვნება:*

$A \rightarrow D$  ტიპის შიგამოლეკულური გადაჯგუფების რეაქციები, მაგალითად, იზომერიზაცია, ინვერსია და  $A \rightarrow D + D''$  ტიპის დაშლის რეაქციები. მაგალითების სახით შეიძლება მოვიყვანოთ დიაზომეთანის დაშლა  $CH_3N_2CH_3 \rightarrow C_2H_6 + N_2$ , ეთანის კრეკინგი  $C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + H_2$ .

*ბიმოლეკულურია (ორმოლეკულური) რეაქციები, რომლებშიც ელემენტარული აქტი სორციელდება ამოსავალი ნივთიერებების ორი ერთსახელა (2A) ან სხვადასხვა (A+B) მოლეკულის შეხვედრის შედეგად. ბიმოლეკულური შეიძლება იყოს:*

ა) მიერთების  $A + A \rightarrow AA$ ,  $A + B \rightarrow AB$  და

დაშლის რეაქციები  $2A \rightarrow D + D''$ ;

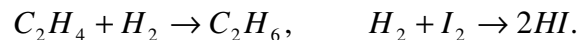
ბ) ჩანაცვლების ან მიმოცვლის რეაქციები

$A + BB^* \rightarrow AB + B^*$ ;

გ) ორმაგი მიმოცვლის რეაქციები:

$AA^* + BB^* \rightarrow AB + A^*B^*$ .

მიერთების ბიმოლეკულურ რეაქციებს მიეკუთვნება ატომის ან რადიკალის მიერთება უჯერი ნაერთის მოლეკულასთან და ნაჯერი მოლეკულების ასოციაცია, მაგალითად:

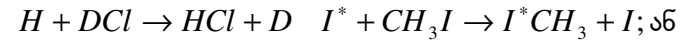


ასოციაციის გზით ხდება აზოტის ორი მოლეკულის შეერთება:



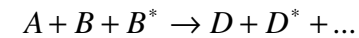
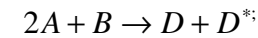
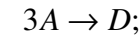
და აგრეთვე დიენების შეერთება ალდეჰიდებთან და ოლეფინებთან.

ჩანაცვლების ან მიმოცვლის რეაქციებს მიეკუთვნება ატომებისა და რადიკალების მრავალრიცხოვანი რეაქციები სხვადასხვა მოლეკულებთან, კერძოდ იზოტოპური მიმოცვლის რეაქციები:

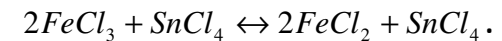


ურთიერთქმედება რადიკალებსა ( $C_2H_5^* + C_2H_5^* + C_2H_6 + C_2H_4$ ) და მოლეკულებს შორის ( $NO + N_2O \rightarrow NO_2 + N_2$  ან  $NO_2 + CO \rightarrow NO + CO_2$ ) და სხვ.

*ტრიმოლეკულური (სამმოლეკულური) რეაქციები, სადაც ერთმანეთს ხვდება და ქიმიურად ურთიერთქმედებს სამი მოლეკულა, შეიძლება იყოს მიერთების, მიმოცვლის (მაგალითად, იზოტოპური მიმოცვლის) და რეკომბინაციის რეაქციები:*



ასევე მიმდინარეობს რკინისა (III) და კალის (II) ქლორიდების ურთიერთქმედება წყალხსნარში:



სამი მოლეკულის ერთდროულად შეჯახება ძალიან იშვიათად ხდება, მეტადრე აირად ფაზაში. ზემოთ ჩამოთვლილი ყველა ტიპის რეაქციას შეესაბამება თავისი კინეტიკური განტოლება, რომელიც რეაგენტების კონცენტრაციას აკავშირებს დროსთან. რეაქციის რიგი მის მოლეკულურობას მხოლოდ მარტივი რეაქციებისათვის ემთ-

ხვევა, რომლებიც ერთი მიმართულებით მიმდინარეობს და ერთ ქიმიურ ეტაპს შეიცავს. ქიმიური რეაქციის სიჩქარის დამოკიდებულება ტემპერატურისაგან ძლიერ იზრდება რეაქციის რიგის გადიდებისას. ამოსავალი ნივთიერებების კონცენტრაციის გადიდებით რეაქციის სიჩქარე მით უფრო მეტად იზრდება წონასწორული გამოსავლის მიღწევამდე, რაც მაღალია რეაქციის რიგი.

განვიხილოთ ზოგიერთი კინეტიკური განტოლება პერიოდულად და იდეალური გამოდენის აპარატებში მიმდინარე პროცესებისათვის. პირველი რიგის შეუქცევადი რეაქციის სიჩქარე პროპორციულია მორეაგირე ნივთიერების მიმდინარე კონცენტრაციისა. თუ აღვნიშნავთ  $a, b, b'$ -ით, შესაბამისად,  $A, B, B'$  ნივთიერებათა საწყის კონცენტრაციებს,  $x$ -ით ამოსავალი ნივთიერებების კონცენტრაციების შემცირებას რეაქციის დაწყებიდან  $\tau$  დროის შუალედში და  $k$ -თი რეაქციის სიჩქარის კონსტანტას, მაშინ პირველი რიგის რეაქციის სიჩქარე იქნება:

$$u = \frac{dx_1}{d\tau} = k_1(a - x_1), \quad (III.1)$$

საიდანაც ინტეგრირების შემდეგ მივიღებთ:

$$k_1 = \frac{2,3}{\tau} \lg \frac{a}{a - x_1}. \quad (III.2)$$

ტექნოლოგიური ანგარიშებისათვის უფრო მოსახერხებელია რეაქციის სიჩქარე გამოისახოს ამოსავალი ნივთიერების გარდაქმნის ხარისხის მიხედვით (იხ. II თავი):

$$u = \frac{dx}{d\tau} = k(1 - x). \quad (III.3)$$

$$k = \frac{2,3}{\tau} \lg \frac{1}{1 - x}. \quad (III.4)$$

პირველი რიგის რეაქციის ტიპის მიხედვით მიმდინარეობს რადიოაქტიური დაშლის რეაქციები, იზომერების ურთიერთგარდაქმნა და სხვ. რთული მოლეკულების დაშლისა და იზომერიზაციის რეაქციები აირებსა და სხნარებში ( $A \rightarrow D$ ), და აგრეთვე სხნარებში მიმდინარე ზოგიერთი ბიმოლეკულური რეაქცია (ჰიდროლიზი, კეტო-ენოლური ტაუტომერია და სხვ.) პირველი რიგის რეაქციებია. მრავალი რთული კატალიზური პროცესის სიჩქარე, რომლებშიც განმსაზღვრელია ერთი ეტაპი (მაგალითად, აქტიური კომპლექსის დაშლა პროდუქტის წარმოქმნით) აგრეთვე პირველი რიგის განტოლებებით აღიწერება, თუმცა სტექიომეტრიული განტოლებების მიხედვით ისინი ბი- და ტრიმოლეკულურ რეაქციებს უნდა მივაკუთნოთ.

მეორე რიგის რეაქციის სიჩქარე მორეაგირე ნივთიერებათა კონცენტრაციების ნამრავლის პროპორციულია:

$$u = \frac{dx_1}{d\tau} = k_1(a - x_1)(b - x_1), \quad (III.5)$$

100

საიდანაც:

$$k_1 = \frac{2,3}{\tau(a - b)} \lg \frac{a(b - x_1)}{b(a - x_1)}. \quad (III.6)$$

თუ მორეაგირე ნივთიერებების საწყისი კონცენტრაციები ერთმანეთის ტოლია, ე. ი.  $a = b$ , მაშინ (III.5) და (III.6) განტოლებები შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$u = \frac{dx_1}{d\tau} = k_1(a - x_1)^2, \quad (III.7)$$

და შესაბამისად:

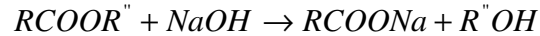
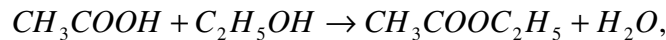
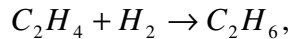
$$k_1 = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{x_1}{a(a-x_1)}. \quad (\text{III.8})$$

გამოვსახავთ რა პროცესის სიჩქარეს გარდაქმნის ხარისხით, მივიღებთ:

$$u = \frac{dx}{d\tau} = k(1-x)^2, \quad (\text{III.9})$$

$$k = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{1-x}. \quad (\text{III.10})$$

მეორე რიგის რეაქციების ტიპის მიხედვით ურთიერთქმედებენ მარტივი მოლეკულები აირად გარემოში, მიიღება და ისაპნება რთული ეთერები ხსნარებში:



მეორე რიგის რეაქციის ტიპის მიხედვით მიმდინარეობს ფორმალდეჰიდის დაჟანგვის რეაქცია წყალბადის ზეჟანგით, ბრომის ურთიერთქმედება ცხიმოვან მჟავებთან, ამინების გარდაქმნა დიაზონაერთებად და სხვ.

მესამე რიგის რეაქციებს, მათი მცირე სიჩქარის გამო, ნაკლებად იყენებენ სამრეწველო პრაქტიკაში.

ვიხილავთ რა ჰომოგენური პროცესების სიჩქარის განტოლებებს, შეიძლება მივუთითოთ იმ საერთო ხერხებზეც, რომლებიც ხელს უწყობს თხევად და აირად გარემოში მიმდინარე პროცესების ინტენსიფიკაციას. (III.1)-(III.10) განტოლებებიდან ჩანს, რომ რეაქციის სიჩქარე მაქსიმალურად არის დამოკიდებული იმ რეაგენტებზე, რომლებიც უმეტესი რაოდენობით შედის რეაქციის განტოლებაში. ამასთან, მრავალმოლეკულური რეაქციების სიჩქარე კონცენტრაციის გადიდებით უფრო სწრაფად იზრდება, ვიდრე დაბალი რიგის რეა-

ქციებისა. ამიტომ კონცენტრირების, ნედლეულის გამდიდრების დროს აუცილებელია რეაქციის რიგის გათვალისწინება; მაგალითად, ამოსავალი ნივთიერებების კონცენტრაციის ორჯერ გადიდება მეორე რიგის რეაქციის სიჩქარეს ოთხჯერ ადიდება.

## IV თავი

### ჰეტეროგენული არაკატალიზური პროცესები

#### 4.1. შესავალი

ჰეტეროგენული ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესები დაფუძნებულია სხვადასხვა ფაზაში მყოფი რეაგენტების ქიმიურ ურთიერთქმედებაზე. სამრეწველო ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესების უმრავლესობა ჰეტეროგენულებს მიეკუთვნება. ჰეტეროგენული პროცესების დიდი მრავალფეროვნება აძნელებს მათ კლასიფიკაციას. მიღებული კლასიფიკაციის შესაბამისად, არაკატალიზური ჰეტეროგენულ პროცესებს ჰყოფენ რეაგენტების ფაზური მდგომარეობის მიხედვით. ამ ნიშნის მიხედვით ჰეტეროგენული პროცესები შეიძლება მიმდინარეობდეს **ა-ს** (აირი-სითხე), **ს-მ** (სყთხე-მყარი), **ა-მ** (აირი-მყარი) და სხვ. სისტემებში.

ჰეტეროგენული პროცესების მექანიზმი უფრო რთულია, ვიდრე ჰომოგენურისა, რადგანაც სხვადასხვა ფაზაში მყოფი რეაგენტების ურთიერთქმედებას წინ უსწრებს მათი მიწოდება ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე და მასაცვლა ფაზათა შორის. ამიტომ არაკატალიზური ჰეტეროგენული პროცესების სიჩქარე, როგორც წესი, ნაკლებია, ვიდრე ჰომოგენური პროცესებისა. ჰეტეროგენული პროცესი არის ურთიერთდაკავშირებული ფიზიკურ-ქიმიური მოვლენებისა და ქიმიური რეაქციების ერთობლიობა.

მრავალი ჰეტეროგენული პროცესი არ არის დაკავშირებული ქიმიურ რეაქციასთან და მხოლოდ ფიზიკურ-ქიმიურ მოვლენებზეა დაფუძნებული. ასეთ პროცესებს მიეკუთვნება, მაგალითად, აორთქლება შედგენილობის შეუცვლელად, კონდენსაცია, გამოხდა, გახსნა და ექსტრაჰირება თუ მათ თან არ ახლავს ქიმიური რეაქცია, კრისტალიზაცია ჰიდრატაციის გარეშე და სხვ. ქიმიური ჰეტეროგენული პროცესები ქიმიურ რეაქციებს მოიცავს როგორც მის ერთ-ერთ სტადიას, რომელიც მიმდინარეობს ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე ან ერთ-ერთ ფაზაში მასში რეაგენტების გადანაცვლების შემდეგ.

ჰეტეროგენული პროცესების სიჩქარე ხასიათდება პროდუქტის ფაქტობრივი გამოსავლით ან კინეტიკურ განტოლებაში პროცესის სიჩქარის კოეფიციენტით. პროდუქტის ფაქტობრივი გამოსავალი დამოკიდებულია როგორც ქიმიურ, რომლებიც რეაქციის სიჩქარეზე მოქმედებს, ასევე ფიზიკურსა და ჰიდროდინამიკურ ფაქტორებზე, რომლებიც მასაგადაცემის სიჩქარეზე ახდენს გავლენას. ქიმიური ფაქტორებია რეაქციათა სიჩქარეების კონსტანტები. ფიზიკურსა და ჰიდროდინამიკურ ფაქტორებს მიეკუთვნება ფაზათაშორისი ზედაპირის სიდიდე, დიფუზიის კოეფიციენტი და რეაგენტებისა და რეაქციის პროდუქტების სხვა ფიზიკური თვისებები, აპარატების გეომეტრიული პარამეტრები, სისტემის ტურბულენტურობაზე მოქმედი ფაქტორები.

ჰეტეროგენული პროცესები, რომელთაც თან ახლავს ქიმიური რეაქცია შეიძლება იყოს სამი ტიპის: 1) როდესაც რეაქცია მიმდინარეობს ფაზათა გამყოფ ზედაპირზე, რომელიც დამახასიათებელია მყარი ფაზის მონაწილეობით მიმდინარე პროცესებისათვის: **მ-ს, მ-ა, მ-ს-ა** და სხვ.; 2) როდესაც რეაქცია მიმდინარეობს ერთ-ერთი ფაზის მოცულობაში, მეორე ფაზიდან მასში ნივთიერების გადატანის შემდეგ. ასეთი პროცესები ყველაზე უფრო გავრცელებულია და შეიძლება მიმდინარეობდეს **ა-ს, ს-ს** (შეურევადი), **მ-ს, ა-ს-მ** და სხვა სისტემებში ნებისმიერი ფაზის მონაწილეობით; 3) როდესაც რეაქცია მიმდინარეობს ახლად წარმოქმნილი ფაზის ზედაპირზე; რეაქციის ეს ტიპი შესაძლებელია მყარი

ფაზების ურთიერთქმედების პროცესებისათვის. თუ ჰეტეროგენული პროცესი კინეტიკურ უბანში მიმდინარეობს, მაშინ პირველი ორი აღნიშნული ტიპისათვის მართებულია ჰომოგენური პროცესების კინეტიკის კანონები. ამასთან პროცესის სიჩქარეს განსაზღვრავს ქიმიური რეაქციის სიჩქარე. დიფუზურ უბანში მიმდინარე ჰეტეროგენული პროცესების კინეტიკისათვის დამახასიათებელია აქტივაციის პირობითი ენერჯის შედარებით მცირე მნიშვნელობები და პროცესის სიჩქარეზე ტემპერატურის შედარებით ნაკლები გავლენა. ამ დროს პროცესის სიჩქარეზე განსაკუთრებით ძლიერ მოქმედებს სისტემის ტურბულენტაცია (რეაგენტების ურთიერთარევა).

ჰეტეროგენული პროცესებისათვის ყველაზე უფრო დამახასიათებელია დიფუზური უბანი. მაგრამ ნაკადების ტურბულენტაციისა და ფაზათა შეხების ზედაპირის განვითარების თანამედროვე ინტენსიური ხერხების გამოყენებით შესაძლებელია პროცესის გადაყვანა დიფუზურიდან კინეტიკურ უბანში. მეორე მხრივ, ტემპერატურის გადიდებით ჰეტეროგენული პროცესი შეიძლება კინეტიკურიდან გარედდიფუზურ უბანში გადავიდეს.

## 4.2. აირი-სითხე (ა-ს) სისტემა

პროცესები, რომლებიც ემყარებიან აირადი და თხევადი რეაგენტების ურთიერთქმედებას, ფართოდ გამოიყენება ქიმიური და მისი მოსაზღვრე მრეწველობის დარგებში. ასეთ პროცესებს მიეკუთვნება აირების აბსორბცია და დესორბცია, სითხეების აორთქლება, თხევადი ნარეგების გამოხდა (დისტილაცია, რექტიფიკაცია), სითხეების პიროლიზი, პროცესები პროდუქტების აორთქლებით, აირადი მოლეკულების ასოციაცია სითხეების წარმოქმნით და სხვ. ქიმიურ ჰეტეროგენულ პროცესებში **ა-ს** რეაქციები ძირითადად თხევად ფაზაში მიმდინარეობს, ამასთან რეაქციას წინ უსწრებს აირადი რეაგენტის მიწოდება დიფუზიითა და სითხეში გახსნით. **ა-ს** სისტემისათვის ყველაზე უფრო დამახასიათებელია აბსორბციული და დესორბციული პროცესები.

აბსორბცია ეწოდება აირის ან აირთა ნარევის კომპონენტის სითხით შთანთქმას ხსნარის წარმოქმნით. თუ აბსორბციას თან ახლავს ქიმიური რეაქციები თხევად ფაზაში, მაშინ ასეთ პროცესს *ქიმიურ შთანთქმას* უწოდებენ.

*დესორბცია* – აბსორბციის შებრუნებული პროცესი – არის სითხიდან მასში გახსნილი აირის გამოყოფა. ტექნიკაში დესორბციას ზოგჯერ გადადენას უწოდებენ. დესორბციის (გადადენის) დროს ხსნარიდან კომპონენტები აირში გადადის სითხის გაცხელებით ან მასში ინერტული აირის ან ორთქლის გატარებით.

წონასწორობა **ა-ს** სისტემაში ხასიათდება ფაზათა შორის კომპონენტების განაწილების კანონით და ქიმიური რეაქციების წონასწორობის კონსტანტით.

აბსორბციული წონასწორობა შეიძლება გადანაცვლებული იქნეს აირის ხსნადობის გადიდების მხარეს ტემპერატურის შემცირებით (რის შედეგადაც მცირდება აირის წონასწორობის დრეკადობა ხსნარის ზედაპირზე) და შთანთქმელი კომპონენტის კონცენტრაციის ან საერთო წნევის გადიდებით.

### 4.3. აირი-მყარი (ა-მ) სისტემა

აირადი და მყარი რეაგენტების (**ა-მ**) მონაწილეობით მიმდინარე ყველაზე უფრო ტიპური ტექნოლოგიური პროცესებია აირების ადსორბცია მყარ ადსორბენტებზე და ადსორბირებული აირების დესორბცია, აირადი ფაზის კომპონენტების რეაქციები მყარ კატალიზატორებზე, მყარი ნივთიერებების აქროლება და ორთქლის კონდენსაცია, მყარი სათბობის პიროლიზი და სხვ. **ა-მ** სისტემებისათვის ყველაზე უფრო დამახასიათებელია მყარი ნივთიერებების გამოწვის სხვადასხვა სახეები.

*გამოწვას* უწოდებენ მაღალტემპერატურულ ქიმიურ-ტექნოლოგიურ პროცესს მყარი და აირადი რეაგენტების მონაწილეობით. მყარი მასალების გამოწვისას შეიძლება მიმდი-

ნარეობდეს სხვადასხვაგვარი პროცესები, მათ შორის აქროლება, პიროლიზი, დისოციაცია და კალცინაცია სხვა ქიმიურ რეაქციებთან ერთად. რეაქცია შეიძლება მიმდინარეობდეს მყარ ფაზაში, მყარი და აირადი ფაზების კომპონენტებს შორის და, ბოლოს, აირად ფაზაში. გამოწვის პროცესში არაიშვიათად მყარი მასალა ღლევა; ჩნდება თხევადი ფაზა, რომელიც აგრეთვე ურთიერთქმედებს სხვა ფაზებთან. ერთ-ერთი ძირითადი ფიზიკურ-ქიმიური მოვლენა, რომელიც ხდება მყარი მასალების გამოწვის დროს, არის მათი თერმული დისოციაცია, ე. ი. მოლეკულების დაშლა. მყარი ნივთიერებების დაშლას, ჩვეულებრივ, თან ახლავს აირადი პროდუქტების: ნახშირორჟანგის, გოგირდის დიოქსიდის, წყლის ორთქლისა და სხვ. წარმოქმნა. დისოციაციის ერთ-ერთი სახეა კალცინაცია, ე. ი. კონსტიტუციური (ჰიდრატების სახით შეკავშირებული) წყლისა და ნახშირორჟანგის მოცილება.

მყარი მასალების გამოწვის დროს აირადი ფაზა წარმოიქმნება აქროლების, დისოციაციის ან მყარ ფაზაში მიმდინარე სხვა რეაქციების ხარჯზე. ზოგჯერ გამოწვა მიჰყავთ ისეთი აირების მონაწილეობით, რომლებიც შეიცავს ჟანგბადს, ნახშირჟანგს, ქლორს და სხვ. გამოწვაზე მიწოდებული აირის (შებენის) შედგენილობაზე დამოკიდებულებით აირსა და მყარ მასალას შორის სხვადასხვა რეაქციები მიმდინარეობს. ამ რეაქციების ტიპის მიხედვით გამოწვა შეიძლება იყოს ჟანგვითი ან აღდგენითი. ჟანგვითი გამოწვის მაგალითია ლითონების სულფიდური მადნების გამოწვის პროცესი, ხოლო აღდგენითი გამოწვისა – თუჯის გამოდნობა რკინის მადნებიდან კოქსის საშუალებით.

*ადსორბცია* არის აირის, ორთქლის ან გახსნილი ნივთიერებების ხსნარებიდან შთანთქმა მყარი ან თხევადი სხეულებით (სორბენტებით). ადსორბცია მჭიდროდ დაკავშირებულია ზედაპირულ მოვლენებთან. ასხვავებენ ფიზიკურ ადსორბციას, რომლის დროსაც არ ხდება ქიმიური ურთიერთქმედება და ქიმიურ შთანთქმას (ქემოსორბცია), რომელსაც თან ახლავს ზედაპირული ქიმიური ნაერთების წარ-



მოქმნა ადსორბენტისა ადსორბატთან. აირებისა და ორთქლის ადსორბციას ხშირად იყენებენ დესორბციასთან ერთად ადსორბენტის რეგენერაციისა და სორბირებული აირის სუფთა სახით მისაღებად.

მყარ სხეულებზე აირის ადსორბციას დიდი მნიშვნელობა აქვს ჰეტეროგენული კატალიზური პროცესებისათვის. ამ დროს კატალიზატორის ზედაპირზე მიმდინარე ადსორბციულ-დესორბციული მოვლენები კატალიზური აქტის მნიშვნელოვანი სტადიებია.

#### 4.4. სითხე-მყარი (ს-მ) სისტემა

მყარი და თხევადი რეაგენტების მონაწილეობით მიმდინარე პროცესები მრავალი ქიმიური წარმოების საფუძველია. ასეთ პროცესებს მიეკუთვნება მყარი მასალების გახსნა და ხსნარებიდან კრისტალიზაცია, ექსტრაქციონი და გამოტუტვა, მყარი სხეულების გაღობა და ნაღობებიდან კრისტალიზაცია, თხევადი მონომერების პოლიმერიზაცია მყარი პოლიმერის წარმოქმნით, კოაგულაცია კოლოიდურ სისტემებში, მყარი ნაწილაკების სითხეში დისპერჰირება, სითხეში გახსნილი ნივთიერებების ადსორბცია და მათი დესორბცია, იონმიმოცვლა სითხეებსა და იონმიმოცვლით ფისებს შორის, კატალიზი თხევად ფაზაში მყარ კატალიზატორზე და სხვ.

მყარი ნივთიერებების სითხეში გახსნა შეიძლება დაიყოს როგორც ფიზიკური და ქიმიური. ფიზიკური გახსნა, რომლის დროსაც მხოლოდ კრისტალური გისოსი ირღვევა, შექცევადია, ე. ი. შესაძლებელია გახსნილი ნივთიერების უკუგამოკრისტალება. ქიმიურ შეუქცევად გახსნას თან ახლავს ისეთი სახის ურთიერთქმედება გახსნილ ნივთიერებასა და გამხსნელს, ან ხსნარში არსებულ აქტიურ ქიმიურ ნივთიერებებს შორის, რომლის დროსაც იცვლება გახსნილი ნივთიერების ბუნება და მისი გამოკრისტალება საწყისი სახით შეუძლებელია. ტექნიკაში ყველაზე მეტი გამოყენება აქვს მყარი ნივთიერებების შერჩევით გახსნას – ექსტრაქციონსა და გამოტუტვას. *ექსტრაქციონს ანუ ექსტრაქციას უწოდებენ*

მყარი ან თხევადი ნარევის გაყოფას გამხსნელებით, რომლებშიც ნარევის კომპონენტები სხვადასხვანაირად იხსნება. მყარ ნივთიერებებს ნარევიდან აქსტრაქციონს ორგანული გამხსნელებით, მინერალური მჟავებით, ტუტეებითა და წყლით. გამოტუტვის დროს გამხსნელად ხშირად იყენებენ წყალსა და საციკულაციო წყალხსნარებს (თუთქებს). გახსნის, ექსტრაქციონის, გამოტუტვის პროცესებს ხშირად თან ახლავს *ხსნარებიდან კრისტალიზაცია*, ე. ი. ხსნარიდან გახსნილი მყარი ნივთიერებების, მათი ჰიდროქსიდების ან ხსნარში მიმდინარე ქიმიური რეაქციების შედეგად წარმოქმნილი ახალი ნაერთების გამოყოფა. კრისტალიზაციას იყენებენ ნივთიერებების გამოსაყოფად ხსნარებიდან, და აგრეთვე ამ ნივთიერებების გასასუფთავებლად. წყალხსნარებიდან მყარი ნივთიერებების (მაგალითად მარილების) კრისტალიზაციისათვის იყენებენ ხსნარების გადაჯერების სხვადასხვა ხერხებს, რომელთაგან ყველაზე უფრო გავრცელებულია პოლითერმული და იზოთერმული კრისტალიზაციის მეთოდები:

*პოლითერმული კრისტალიზაცია* ხორციელდება ნაჯერი ხსნარების გაცივებით და გამოიყენება ისეთი ნივთიერებებისათვის, რომელთა ხსნადობა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე.

*იზოთერმული კრისტალიზაცია* ხორციელდება მუდმივ ტემპერატურაზე და გამოიყენება ისეთი ნივთიერებების გამოსაყოფად, რომელთა ხსნადობა, ძირითადად, კონცენტრაციაზე დამოკიდებული, ხოლო ტემპერატურის გავლენით თითქმის არ იცვლება. ზოგჯერ კრისტალიზაციას ატარებენ ხსნარში ძირითადი გახსნილი კომპონენტის ხსნადობის შემამცირებელი ნივთიერების შეტანით. ასეთი ტიპის კრისტალიზაციას *გამომარილები* ეწოდება.

წყალხსნარებიდან მარილების კრისტალიზაციის უმარტივეს შემთხვევაში მყარი მარილის წონასწორული გამოსავლის გადიდება შეიძლება მიღწეულ იქნეს ხსნარში მარილის კონცენტრაციის გადიდებით, გამხსნელის აორთქლებით ან ხსნარის გაცივებით მისი ხსნადობის შესამცირებლად. მართლთა სისტემების კომპონენტებად დაყოფისა და მათი მაქსი-

მალური წონასწორული გამოსავლის შესატყვის პირობებს არჩევენ ხსნადობის დიაგრამების საშუალებით. ასე, მაგალითად, კალიუმის ძირითადი სასუქის – კალიუმის ქლორიდის – ბუნებრივი მინერალიდან – სალვინიტიდან ( $KCl \cdot NaCl$ ) – წარმოება დაფუძნებულია კალიუმისა და ნატრიუმის ქლორიდების ხსნადობის სხვადასხვა კოეფიციენტზე. სისტემა  $KCl \cdot NaCl \cdot H_2O$  ხსნადობის დიაგრამა (ნახ. IV.2) გვიჩვენებს ამ მარილების გაყოფის საშუალებას  $KCl$ -ის მაღალ ტემპერატურაზე გახსნით და გაცივებისას მისი შემდგომი კრისტალიზაციით. ხსნადობის დიაგრამის შესაბამისად, სილვინიტიდან  $KCl$ -ის მიღების ციკლური პროცესის პრინციპული სქემა შემდეგი ძირითადი ოპერაციებისაგან შედგება:

1) სილვინიტიდან  $KCl$ -ის გამოტუტვა დედახსნარით  $105-115^{\circ}C$ -ზე. ამ დროს ხსნარში გადადის მხოლოდ  $KCl$ ,  $NaCl$  კი რჩება მყარ ფაზაში; 2) ცხელი თუთქის გამოყოფა  $NaCl$ -ისა და ფუჭი ქანის მყარი ნაშთისაგან; 3)  $NaCl$ -ითა და  $KCl$ -ით გაჯერებული ხსნარის გაცივება  $115$ -დან  $25^{\circ}C$ -მდე. ამ დროს კრისტალდება  $KCl$ ,  $NaCl$  კი თითქმის მთლიანად რჩება ხსნარში; 4)  $KCl$ -ის კრისტალების მოცილება  $NaCl$ -ითა და  $KCl$ -ით გაჯერებული დედა ხსნარისაგან  $25^{\circ}C$ -ზე და  $KCl$ -ის კრისტალების შრობა; 5) დედახსნარის გაცხელება  $115^{\circ}C$ -მდე და სილვინიტის ახალი ულუფის გამოტუტვა მისი საშუალებით. ხსნადობის დიაგრამების საშუალებით ანგარიშობენ ხსნარის წონასწორულ შედგენილობებსა და გამოყოფილი მყარი ფაზის რაოდენობებს და ირჩევენ ოპერაციების ყველაზე უფრო ეფექტურ ციკლს, რომლის დროსაც მიიღწევა პროდუქტების ყველაზე დიდი გამოსავალი.

## V თავი

### კატალიზური პროცესები

#### 5.1. კატალიზის მნიშვნელობა და გამოყენება

კატალიზი არის ქიმიური რეაქციების დაჩქარების ყველაზე ეფექტური და რაციონალური საშუალება. კატალიზური პროცესები მრეწველობაში დიდი მასშტაბით გამოიყენება, ამასთან მათი გამოყენების არე პროგრესულად იზრდება. ქიმიური მრეწველობის მიერ უკანასკნელ წლებში ათვისებული წარმოებების 90% კატალიზურია. კატალიზური რეაქციები ქიმიისა და თერმოდინამიკის ზოგად კანონებს ემორჩილება, მაგრამ კატალიზატორების გამოყენება მნიშვნელოვნად ადვილებს რიგი ქიმიური რეაქციების პრაქტიკულ განხორციელებას. კატალიზატორების თანაობისას ეს რეაქციები ათასჯერ და მილიონჯერ ჩქარდება, მიმდინარეობს უფრო დაბალ ტემპერატურაზე, რაც ხელსაყრელია ეკონომიკურად. რავალი სამრეწველო პროცესის განხორციელება მხოლოდ კატალიზატორების გამოყენებით გახდა შესაძლებელი.

კატალიზი გამოიყენება ძირითადი ქიმიური მრეწველობის უმნიშვნელოვანესი პროდუქტების – წყალბადის, ამიაკის, გოგირდისა და აზოტის მჟავების – მისაღებად. ანსაკუთრებით დიდი და მრავალფეროვანია კატალიზის გამოყენება ორგანულ ნივთიერებათა ტექნოლოგიაში, უწინარეს ყოვლისა ორგანულ სინთეზებში – დაჟანგვის, ჰიდრირების, დეჰიდრირების, ჰიდრატაციის, დეჰიდრატაციის და სხვ. როცესებში. კატალიზატორების დახმარებით ღებულობენ ძირითად ნახევარპროდუქტებს პოლიმერების სინთეზისათვის. მაღალმოლეკულური ნაერთების უშუალო მიღება მონომერების პოლიმერიზაციითა და პოლიკონდენსაციით, ასევე კატალიზატორების მონაწილეობით ხორციელდება. კატალიზატორების გამოყენებაზე დაფუძნებული ნავთობპროდუქტების გადამუ-

შაგების მრავალი მეთოდი: კატალიზური კრეკინგი, რიფორმონგი, ნახშირწყალბადების ალკილირება, იზომერიზაცია, არომატიზაცია. ძრავის თხევად სათბობს მყარი სათბობიდან კატალიზატორების დახმარებით ლებულობენ.

## 5.2. კატალიზის არსი და სახეები

კატალიზს უწოდებენ ქიმიური რეაქციების ალგზნებას ან მათი სიჩქარეების ცვლილებას განსაკუთრებული ნივთიერებების – კატალიზატორების – ზემოქმედებით, რომლებიც მონაწილეობს რეაქციაში, შედის რა შუალედურ ქიმიურ ურთიერთქმედებაში რეაგენტებთან, მაგრამ კატალიზური აქტის შემდეგ აღიდგენს ქიმიურ შემადგენლობას.

კატალიზატორები სხვადასხვა ნივთიერებებია: აირები, თხევადი და მყარი სხეულები. რეაგენტებისა და კატალიზატორების ფაზური მდგომარეობის მიხედვით კატალიზური პროცესებს ორ ძირითად ჯგუფად ჰყოფენ: ჰომოგენურად და ჰეტეროგენურად. განსაკუთრებულ ჯგუფად უნდა გამოიყოს მიკროჰეტეროგენული, კერძოდ ფერმენტაციული კატალიზური პროცესები.

ჰომოგენური კატალიზის დროს კატალიზატორი და მორეაგირე ნივთიერებები ერთ – აირად ან თხევად – ფაზაში იმყოფება. ჰეტეროგენული კატალიზის დროს რეაგენტი და კატალიზატორი სხვადასხვა ფაზაშია. მიკროჰეტეროგენული კატალიზური პროცესი მიმდინარეობს ხსნარებში, სადაც კატალიზატორები კოლოიდური ნაწილაკების სახით იმყოფება. ფერმენტაციული კატალიზის დროს, რომელიც მცენარეულ და ცხოველურ უჯრედებში მიმდინარეობს, კატალიზატორებია კოლოიდურად გახსნილი ცილოვანი ნაწილაკები – ფერმენტები. თუ კატალიზატორის თანაობისას რეაქცია ჩქარდება, ამ მოვლენას დადებით კატალიზს უწოდებენ, რაც ხშირად გაიგივებულია საერთოდ კატალიზის ცნებასთან. ხშირად იყენებენ ქიმიური რეაქციების შემანელებელ და დამაუსრუტებელ ნივთიერებებს – ანტიკატალიზატორებსა და

ინჰიბიტორებს; ამ მოვლენას უარყოფითი კატალიზი ეწოდება. სამრეწველო პრაქტიკაში დადებით კატალიზს განუზომლად დიდი მნიშვნელობა აქვს, ვიდრე უარყოფითს. დადებითი კატალიზის არსი ძირითადად ერთნაირია მისი ყველა სახისათვის, მაგრამ ყველა მათგანს აქვს განმასხვავებელი თავისებურებაც. ზოგად შემთხვევაში კატალიზატორების დამაჩქარებელი მოქმედება პრინციპულად განსხვავდება ქიმიური რეაქციების მაინტენსიფიცირებელი სხვა ფაქტორების – ტემპერატურის, წნევის, რადიაციული ზემოქმედების, სინათლის სხივებისა და სხვ. – მოქმედებისაგან. ტემპერატურის გადიდება, მაგალითად, აჩქარებს რეაქციას მორეაგირე მოლეკულების ენერგეტიკული დონის ამაღლებით, მათი აქტივაციით გარედან მიწოდებული სითბოს ხარჯზე. კატალიზატორების მოქმედებით რეაგენტების ენერგეტიკული დონე არ იცვლება; იგი არ ანაცვლებს მარტივი რეაქციების წონასწორობას, არამედ მხოლოდ აჩქარებს წონასწორობის დამყარებას მოცემულ ტემპერატურაზე; ამდენად კატალიზი არის ქიმიური რეაქციების ინტენსიფიკაციის რბილი საშუალება, რომელსაც არ აქვს მაღალი ტემპერატურებისა და წნევების გამოყენებისათვის დამახასიათებელი შეზღუდვები.

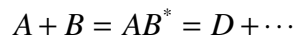
კატალიზატორების დამაჩქარებელი მოქმედება მდგომარეობს ქიმიური რეაქციის აქტივაციის ენერჯის დაწევაში სარეაქციო გზის შეცვლის შედეგად ან რეაქციის ჯაჭვიური მექანიზმით განხორციელებით

კატალიზატორის ზემოქმედებით სარეაქციო გზის შეცვლისას რეაქცია მიმდინარეობს რიგი ელემენტარული სტადიების გავლით, რომლებიც ნაკლებ აქტივაციის ენერჯის მოითხოვს, ვიდრე იგივე რეაქცია კატალიზატორის გარეშე. რეაქციის სიჩქარე მით მეტია, რაც ნაკლებია აქტივაციის  $E$  ენერჯია და ექსპონენციალური დამოკიდებულების შედეგად:

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (V.1)$$

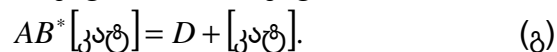
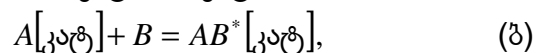
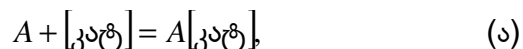
რეაქციის სიჩქარე მნიშვნელოვნად იზრდება აქტივაციის ენერჯის მცირე შემცირების დროსაც კი.

განვიხილოთ სარეაქციო სისტემის ენერგეტიკული სურათი, მაგალითად,  $A + B = D + \dots$  ტიპის ბიმოლეკულური რეაქციისათვის, რომელიც უკატალიზატოროდ შემდეგი  $\text{scq-miT}$  მიმდინარეობს:



აქტიური  $AB^*$  კომპლექსის წარმოქმნის გზით.

კატალიზატორის თანაობისას რეაქცია მიდის სხვა გზით, რამდენიმე ელემენტარული სტადიის გავლით:



V.1. ნახაზზე ნაჩვენებია მორეაგირე სისტემის ენერჯის ცვლილება უკატალიზატოროდ და კატალიზატორის მონაწილეობით მოცემული რეაქციისათვის. თუ  $E$  არის არაკატალიზური რეაქციის აქტივაციის ენერჯია,  $E_s$  კატალიზური რეაქციის აქტივაციის ენერჯია,  $e_1$  და  $e_2$  კი შუალედური (ა) და (ბ) სტადიების აქტივაციის ენერჯიები, მაშინ, როცა  $E_s < E$  კატალიზი დადებითია. კატალიზური რეაქციებისთვის, რომლებშიც  $k_0$  არ იცვლება არაკატალიზურთან შედარებით, კატალიზატორის დამაჩქარებელი მოქმედება იზომება მისი  $A$  აქტივობით, რომელიც განისაზღვრება კატალიზური და არაკატალიზური რეაქციების სიჩქარეების  $k_s$  და  $k$  კონსტანტების ფარდობით:

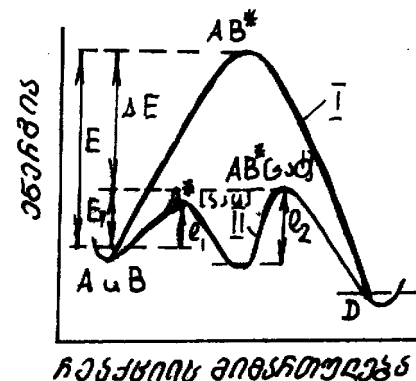
$$A = \frac{k_s}{k} = \frac{e^{-\left(\frac{E_s}{RT}\right)}}{e^{-\left(\frac{E}{RT}\right)}} = e^{\frac{\Delta E}{RT}}, \quad (\text{V.2})$$

სადაც  $\Delta E$  არის კატალიზური რეაქციის აქტივაციის ენერჯის შემცირება არაკატალიზურთან შედარებით:

$$\Delta E = E - E_s \quad (\text{V.3})$$

კატალიზატორის გამოყენებას შეუძლია მნიშვნელოვნად შეამციროს აქტივაციის ენერჯია, რაც იწვევს რეაქციის სიჩქარის კოლოსალურ გადიდებას. თუ, მაგალითად  $\Delta E = 41800$  ჯ/მოლ-ს, მაშინ  $600\text{K}$ -ზე კატალიზური რეაქციის სიჩქარე მეტი იქნება არაკატალიზურის სიჩქარეზე

$$A = e^{\frac{41800}{8.3 \cdot 600}} = 4 \cdot 10^3 - \text{ჯერ.}$$



ნახ. V.1. მორეაგირე სისტემის ენერჯის ცვლილება არაკატალიზური (I) და კატალიზური (II) რეაქციების დროს.

ამრიგად, ახალი სარეაქციო გზის აღმოჩენისას კატალიზატორი არის პროცესის აქტიური მონაწილე, ამასთან ეს მონაწილეობა გამოინატება მორეაგირე ნივთიერებებთან უმდგრადი შუალედური ნაერთების – აქტიური კომპლექსების – წარმოქმნაში, რომელთა დაშლის შედეგად კატალიზატორი აღდგება. სამრეწველო კატალიზატორების პრაქტიკული ქცევა დაკავშირებულია მათ ძირითად ტექნოლოგიურ მახასია-

თებლებთან, როგორცაა: აქტივობა, მწარმოებლურობა, "ანთების" ტემპერატურა, შერჩევითი მოქმედება (სელექციურობა), მექანიკური და ქიმიური მდგრადობა, მოწამლვა და სხვ. კატალიზატორის ძირითადი მახასიათებელია მისი A აქტივობა, ე. ი. დამაჩქარებელი მოქმედების ზომა მოცემული რეაქციის მიმართ. რაც აქტიურია კატალიზატორი, მით უფრო დაბალ ტემპერატურაზე შეიძლება პროცესის ჩატარება, რაც იძლევა მნიშვნელოვან ეკონომიკურ და ტექნოლოგიურ უპირატესობებს, როგორცაა, მაგალითად, შექცევადი ეგზოთერმული რეაქციების წონასწორული და ფაქტობრივი გამოსავლის გადიდება, თანაური პროდუქტების რაოდენობის შემცირება, ნედლეულის ხარჯვითი კოეფიციენტების დადაბლება, პროდუქტის ხარისხის გაუმჯობესება.

აირადი რეაგენტებისათვის "ანთების" ტემპერატურა, ე. ი. რეაგენტების ის მინიმალური ტემპერატურა, რომლის დროსაც კატალიზატორი საკმაოდ ადიდება რეაქციის სიჩქარეს, დამოკიდებულია მყარი კატალიზატორის აქტივობაზე.

ჰომოგენური და ჰეტეროგენული კატალიზის დროს მიმდინარე კატალიზური რეაქციები რეაგენტებთან კატალიზატორის ურთიერთქმედების პრინციპის მიხედვით ორ ძირითად კლასად იყოფა: ჟანგვა-აღდგენითი (ჰომოლითური) და ფუძე-მჟავური (ჰეტეროლითური) ურთიერთქმედება.

ელექტრონული ჟანგვა-აღდგენითი კატალიზის ზოგადი მექანიზმი მდგომარეობს ელექტრონების მიმოცვლაში კატალიზატორსა და რეაგენტებს შორის, რაც აადვილებს ელექტრონულ გადასვლებს მორეაგირე მოლეკულებში. ჩვეულებრივი, იონური ფუძე-მჟავური კატალიზის მექანიზმი მდგომარეობს კატალიზატორსა და მორეაგირე მოლეკულებს შორის პროტონების ან იონების (კატიონებისა და ანიონების) მიმოცვლაში. წარმოქმნილი შუალედური დამუხტული კომპლექსები არამდგრადია და იშლება, ან რეაგირებს სხვა მოლეკულასთან. ორივე შემთხვევაში კატალიზატორი აღდგება.

სხვადასხვა კატალიზატორებს შეუძლიათ დააჩქარონ მხოლოდ ერთი რეაქცია ან რეაქციათა ჯგუფი, ე. ი. კატალიზატორებს აქვთ ინდივიდუალური ან ჯგუფური სპეცი-

ფიკურობა, რაც განსაკუთრებით დამახასიათებელია ბიოკატალიზატორების – ფერმენტებისათვის.

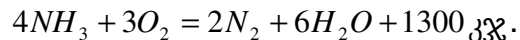
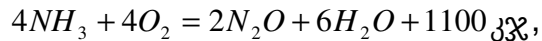
ჟანგვა-აღდგენითი რეაქციებისათვის ტიპური კატალიზატორებია გარდამავალი ლითონები, ან ლითონების სულფიდები და ოქსიდები (ნახევარგამტარები), ხოლო ფუძე-მჟავური კატალიზური პროცესებისათვის – მჟავებისა და ფუძეების ხსნარები, ფუძეებითა და მჟავებით გაჟღენთილი მყარი ინერტული ნივთიერებები, იონური კრისტალები ან იონური გელები.

ერთსა და იმავე კატალიზატორებს მრავალი რეაქციის დაჩქარება შეუძლიათ. ასე, მაგალითად, პირველი კლასის რეაქციებისათვის უნივერსალური კატალიზატორებია პლატინა და რკინა, რომლებიც აჩქარებენ როგორც დაჟანგვას, ისე ჰიდრირებას, მეორე კლასის რეაქციებისათვის კი – წყალბადის იონები – ჰიდროლიზის, ჰიდრატაციის, იზომერიზაციის, პოლიკონდენსაციის რეაქციების დამაჩქარებლები. რთულ, მრავალკომპონენტურ კატალიზატორებს შეუძლიათ ერთდროულად დააჩქარონ როგორც ჟანგვა-აღდგენითი, ისე ფუძე-მჟავური რეაქციები. შერჩევითი (სელექციური) კატალიზი არის კატალიზური პროცესი, რომლის დროსაც კატალიზატორი რამდენიმე შესაძლო რეაქციიდან აჩქარებს მხოლოდ ერთს – მიზნობრივს.

შერჩევითი კატალიზატორების გამოყენებით შეიძლება ერთი და იგივე ამოსავალი ნივთიერებიდან სხვადასხვა პროდუქტის მიღება. კატალიზატორის ნატიფი შერჩევითობის მაგალითად ერთი და იგივე ტიპის რამდენიმე შესაძლო პარალელური რეაქციის დროს, შეიძლება მოვიყვანოთ ამიაკის დაჟანგვა აზოტის ოქსიდამდე პლატინის კატალიზატორზე. პლატინის თანაობისას რეაქცია პრაქტიკულად სრულად (ოპტიმალური რეჟიმის პირობებში) წამის მეთასედ წილებში ასე მიმდინარეობს:



მაშინ, როცა თერმოდინამიკურად უფრო ხელსაყრელი რეაქციები:

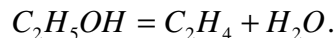


არ ჩქარდება პლატინის კატალიზატორით და ამიტომ ჩაიხშობა.

ეთილის სპირტის დეჰიდრირებით სპილენძის ოქსიდის ან თუთიის კატალიზატორზე მიიღება აცეტალდეჰიდი:



ხოლო ალუმოსილიკატის თანაობისას მიმდინარეობს სპირტის დეჰიდრატაცია ეთილენის წარმოქმნით:



განსაკუთრებით მაღალინდივიდუალური სპეციფიკურობა და დიდი აქტივობა აქვთ ბუნებრივ მაღალმოლეკულურ კატალიზატორებს - ფერმენტებს. თუ არაორგანული კატალიზატორების სპეციფიკურობა მჭიდროდ რეაქციის ტიპის მიმართ (მაგალითად, ნიკელის კატალიზური აქტივობა ჰიდრირების რეაქციებში, მიუხედავად იმისა, თუ რომელი ნივთიერება უნდა დაჰიდრირდეს) ფერმენტები თავის აქტივობას ამჟღავნებენ უკვე კონკრეტულად ამა თუ იმ ნივთიერების მიმართ; მაგალითად, ფერმენტი საქარაზა იწვევს მხოლოდ საქაროზის ჰიდროლიზს და არ ეკარება სხვა შაქრებს და ა. შ.

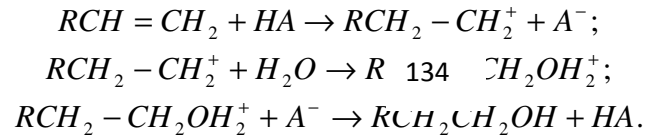
### 5.3. ჰომოგენური და ჰეტეროგენული კატალიზი

ჰომოგენური კატალიზი შეიძლება მიმდინარეობდეს აირად ან თხევად ფაზაში. მისი მექანიზმი მდგომარეობს რეაგენტებსა და კატალიზატორს შორის იმავე ფაზაში (აირად ან თხევად) არამდგრადი შუალედური ნაერთების წარმოქმნაში, რომელთა დაშლის შედეგადაც კატალიზატორი რეგენერირდება. ჰეტეროგენული კატალიზური რეაქციებისაგან განსხვავებით, ჰომოგენურის დროს, რიგ შემთხვევაში, შეიძლება შუალედური ნაერთების აღმოჩენა ანალიზით.

ხსნარებში კატალიზატორებია ლითონების იონები ( $Me^+, Me^{+2}$ ), მჟავები ( $H^+$  -ის კატიონი), ფუძეები ( $OH^-$  -ის ანიონი) და აგრეთვე ნივთიერებები, რომლებიც ხელს უწყობს თავისუფალი რადიკალების წარმოქმნას.

ხსნარებში ფუძე-მჟავური (იონური) კატალიზის მექანიზმი იმაში მდგომარეობს, რომ კატალიზატორებსა და რეაგენტებს შორის მიმდინარეობს პროტონების გაცვლა, რასაც თან ახლავს შიგამოლეკულური გარდაქმნები. მჟავური კატალიზის დროს პროტონი (ან დადებითი იონი) გადადის თავდაპირველად კატალიზატორიდან რეაგენტის მოლეკულისაკენ, ფუძოვანი კატალიზის დროს კი - დასაწყისში კატალიზატორი არის პროტონის აქცეპტორი ან ანიონის დონორი რეაგენტის მოლეკულის მიმართ. კატალიზური რეაქციის შემდგომ სტადიაში პროტონი გადაადგილდება უკუმიმართულელებით და კატალიზატორი აღიდგენს თავის შედგენილობას. კატალიზატორების აქტივობა ფუძე-მჟავური ურთიერთქმედების დროს იზრდება მათი დისოციაციის კონსტანტის ზრდასთან ერთად.

ასეთნაირად მიმდინარეობს ჰიდრატაციის, დეჰიდრატაციის, ჰიდროლიზის, ეთერიფიკაციის, ხსნარებში პოლიკონდენსაციის რეაქციები. ხსნარებში მიმდინარე ფუძე-მჟავური კატალიზის მაგალითია სპირტების მიღება ოლეფინების ჰიდრატაციით, რაც მჟავებით ( $HA$ ) კატალიზდება:



აირფაზურ ჰომოგენურ კატალიზს შედარებით იშვიათად იყენებენ. მისი მაგალითებია გოგირდის დიოქსიდის დაჟანგვა აზოტის ოქსიდებით გოგირდმჟავის კამერულ ან კომპურ წარმოებაში, მეთანის დაჟანგვა ფორმალდეჰიდად, რაც აზოტის ოქსიდებით ჩქარდება, ნახშირჟანგის დაჟანგვა დიოქსიდად წყლის ორთქლის თანაობისას და სხვ. აირფაზური კატალიზი შეიძლება განხორციელდეს მოლეკულური ან რადიკალური ჯაჭვური მექანიზმით

ჰომოგენური კატალიზის რადიკალური მექანიზმი შესაძლებელია როგორც აირად, ასევე თხევად ფაზაში. კატალიზატორი მუშაობს როგორც ინიციატორი, რომელიც რეაქციას წარმართავს ჯაჭვური მექანიზმით. დაჩქარება მიიღწევა თვით რეაქციის პროცესში ენერგიით მდიდარი ნაწილაკების – თავისუფალი რადიკალების წარმოქმნით. ასეთი მექანიზმით მიმდინარეობს ზოგიერთი ჟანგვითი რეაქციები აირებში, პოლიმერიზაცია თხევად ფაზაში და სხვ. რადიკალური აირფაზური რეაქციის ტიპური მაგალითია აზოტის ოქსიდების მოქმედებით ალკანების, კერძოდ მეთანის ფორმალდეჰიდად დაჟანგვა.

ტემპერატურის, წნევისა და არევის გავლენა ჰომოგენურ-კატალიზურ რეაქციებზე ჰომოგენური პროცესების ზოგადი კინეტიკური კანონზომიერებების ანალოგიურია. ჰომოგენური კატალიზის ძირითადი ნაკლია საბოლოო პროდუქტისა და კატალიზატორის გაყოფის სიძნელე (სითხის ან აირისა), რის შედეგადაც კატალიზატორის ნაწილი შეუქცევადად იკარგება, ხოლო პროდუქტი მისგან ჭუჭყიანდება. ჰეტეროგენული კატალიზის დროს აირადი და თხევადი სარეაქციო ნარევი ადვილად გამოეყოფა მყარ კატალიზატორს (უმეტეს შემთხვევაში იგი გადის კატალიზატორის მფილტრავ

ფენაში); და ეს არის ჰეტეროგენული კატალიზის ფართოდ გავრცელების ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მიზეზი.

ჰეტეროგენული კატალიზი მრეწველობაში უფრო ფართოდ გამოიყენება ვიდრე ჰომოგენური. ფაზური ნიშნის მიხედვით ცნობილია ჰეტეროგენული კატალიზის სხვადასხვა სახეები; გამოიყენება თხევადი კატალიზატორები, რომლებიც აჩქარებს რეაქციებს შეურევად სითხეებსა და სითხეებსა და აირებს შორის, და მყარი კატალიზატორები, რომლებიც სითხეებსა და აირებს ან აირად რეაგენტებს შორის მიმდინარე რეაქციებს აჩქარებს. კატალიზური რეაქციების უმრავლესობა არის რეაქციები აირად რეაგენტებს შორის მყარი კატალიზატორის მონაწილეობით.

ჰეტეროგენული კატალიზის, ისევე როგორც ჰომოგენურის დროს, რეაქცია ჩქარდება ახალი სარეაქციო გზის აღმოჩენით, რომელიც ნაკლებ აქტივაციის ენერგიას მოითხოვს. სარეაქციო გზის ცვლილება ხდება მორეაგირე ნივთიერებების შუალედური ქიმიური ურთიერთქმედებით კატალიზატორთან. ამ შემთხვევაში შუალედური ნაერთები წარმოიქმნება კატალიზატორის ზედაპირზე; ისინი ცალკე ფაზას არ წარმოქმნიან და მათი აღმოჩენა ქიმიური ანალიზით არ შეიძლება.

ჟანგვა-აღდგენითი (ელექტრონული) კატალიზის დროს კატალიზატორებია ელექტროდების გამტარები – ლითონები – და ნახევარგამტარები (ძირითადად ლითონების ოქსიდები). ცდებით მიღებული მონაცემები გვიჩვენებს, რომ ყველაზე მეტი კატალიზური აქტივობა ახასიათებთ ელემენტთა პერიოდული სისტემის დიდი პერიოდების ლითონებს. ესენია ძირითადად I, VI, VII და VIII ჯგუფის ლითონები: სპილენძი, ვერცხლი, ქრომი, მოლიბდენი, ვოლფრამი, ურანი, რკინა, კობალტი, ნიკელი, პლატინა, პალადიუმი და სხვ. ყველა ეს ლითონები გარდამავალი ელემენტებია შეუვსებელი  $d$  ელექტრონული გარსით და აქვთ რიგი თვისებები, რომლებიც ხელს უწყობს კატალიზურ აქტივობას: ცვალებადი დაჟანგულობის ხარისხი, კომპლექსწარმოქმნისადმი მიდრეკილება, ელექტრონის გამოსვლის შედარებით მცირე მუშაობა და სხვ. მიახლოებითი განხილვით ლითონებზე კატალიზი დაფუძნე-

ბულია რეაგენტების აქტივირებულ ადსორბციაზე კატალიზატორის ზედაპირით, რასაც თან ახლავს ელექტრონების დონორულ-აქცეპტორული გადასვლები ლითონის  $d$  გარსში და უკუმიმართულებით, რეაქციის ტიპისაგან დამოკიდებულებით. მაგრამ ამ გადასვლებით არ ამოიწურება კატალიზური აქტის მთელი ურთულესი არსი.

ფუძე-მჟავურ (იონურ) კატალიზურ პროცესებს მიეკუთვნება ჰიდრატაციის, დეჰიდრატაციის, ამინირების, იზომერიზაციის, ალკილირებისა და სხვა რეაქციები. ამ რეაქციებისათვის კატალიზატორებად იყენებენ მყარ მჟავეებს ან ფუძეებს, რომელთაც მხოლოდ იონური გამტარობა აქვთ. მჟავურ კატალიზატორებს მიეკუთვნება ფოროვან სარჩულზე დაფენილი მცირედაქროლადი მჟავეები ( $H_3PO_4$ ,  $H_2SO_4$ ), მჟავე მარილები (ფოსფატები, სულფატები) და აგრეთვე ანიონის გაცემის უნარის მქონე ნივთიერებები (ალუმინსილიკატები, ნაწილობრივ  $Al$ -ის,  $Si$ -ის,  $W$ -ის ჰიდრატირებული ოქსიდები, ლითონების ჰალოგენიდები).

იონური ჰეტეროგენული კატალიზის მექანიზმი ჰომოგენური ფუძე-მჟავურის ანალოგიურია, ე. ი. დაიყვანება იონების (კათიონების ან ანიონების) გაცვლაზე კატალიზატორსა და რეაგენტების მოლეკულებს შორის. კატალიზისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს აქტიურ ცენტრებს, ე. ი. კატალიზატორის ზედაპირის უბნებს, რომელთაც გადიდებული აქტივობა აქვთ. ეს არის ზედაპირის გეომეტრიული არაერთგვაროვნებანი: პიკები, კუთხეები, კრისტალების წიბოები ან ზედაპირის მიკროსტრუქტურული დეფექტები. აქტიური ცენტრები შეიძლება განვიხილოთ როგორც ზედაპირთან ყველაზე ნაკლებად დაკავშირებული, ელექტრონული ან პროტონული მიმოცვლისათვის ყველაზე ხელსაყრელ პირობებში მყოფი ატომთა ჯგუფები უჯერი სავალენტო ბმების არსებობის გამო. რეაგენტების ადსორბცია პირველად ხდება აქტიურ ცენტრებზე. რეაქციის სიჩქარე დამოკიდებულია არა მარტო კომპონენტების კონცენტრაციაზე აირად ფაზაში, არამედ კატალიზატორის ზედაპირზე მათ ადსორბციულ წონასწორობაზეც. რამდენადაც რეაქციის პროდუქტები იკავებს აქტიური ცენტ-

რების ნაწილს, ისინი ამუხრუჭებენ რეაქციას. მყარ კატალიზატორებს ამზადებენ და იყენებენ, როგორც წესი, მცირე ფოროვანი მარცვლების, აბების, გრანულების სახით. ამასთან ფორების შიგა ზედაპირი შეიძლება ასჯერ და ათასჯერ აღემატებოდეს გარე ზედაპირს.

მყარი ფოროვანი კატალიზატორების კატალიზური აქტივობა განისაზღვრება როგორც მათი ქიმიური შედგენილობით, ასევე ფოროვანი სტრუქტურით. ფოროვან სტრუქტურაში გულისხმობენ მარცვლების ფორმის, ფორების ზომის, მოცულობისა და მარცვლების შიგა ზედაპირის ერთობლიობას. კატალიზატორის აქტივობა პროპორციულია რეაგენტებისათვის მისაწვდომი ზედაპირისა, მაგრამ წვრილდისპერსიული კატალიზატორების შიგა ზედაპირი შეიძლება საკმაოდ სრულად ვერ გამოვიყენოთ დიფუზური დამუხრუჭების გამო.

ჰეტეროგენული კატალიზის პროცესი მყარ ფოროვან კატალიზატორზე შემდეგი ელემენტარული სტადიებისაგან შედგება: 1) მორეაგირე ნივთიერებების დიფუზია ნაკადის გულიდან კატალიზატორის მარცვლების ზედაპირისაკენ; 2) რეაგენტების დიფუზია კატალიზატორის ფორებში; 3) აქტივირებული ადსორბცია (ქემოსორბცია) კატალიზატორის ზედაპირზე ზედაპირული ქიმიური ნაერთების – გააქტივიებული კომპლექსების – რეაგენტი-კატალიზატორის წარმოქმნით; 4) ატომთა გადაჯგუფება ზედაპირული კომპლექსების – პროდუქტი-კატალიზატორის – წარმოქმნით; 5) პროდუქტის დესორბცია კატალიზატორის ზედაპირიდან; 6) პროდუქტის დიფუზია კატალიზატორის მარცვლის ფორებიდან; 7) პროდუქტის დიფუზია კატალიზატორის მარცვლის ზედაპირიდან ნაკადის გულში.

ჰეტეროგენული კატალიზური პროცესის საერთო სიჩქარე განისაზღვრება ცალკეული სტადიების შეფარდებითი სიჩქარით და შეიძლება მათგან ყველაზე ნელით ლიმიტირდებოდეს.

ჰეტეროგენული კატალიზური პროცესებისათვის სპეციფიკური ტექნოლოგიური რეჟიმის უმნიშვნელოვანესი პარა-



მეტრია საკონტაქტო აპარატებში შემავალი სარეაქციო ნარევის სისუფთავე, მასში კატალიზატორის მომწამვლელი ნივთიერებების არარსებობა.

კატალიზატორის მოწამვლა არის აქტივობის ნაწილობრივი ან სრული დაკარგვა კონტაქტურ შხამებად წოდებული ნივთიერებების მცირე რაოდენობის მოქმედების შედეგად. კონტაქტური შხამები, ჩვეულებრივ, შედის მინარევების სახით ამოსავალ ნივთიერებებში. აქტივობის დაკარგვა ხდება აქტიური ცენტრების ნაწილობრივი ან სრული გამოთიშვის შედეგად. მოწამვლის მექანიზმი სპეციფიკურია მოცემული შხამისა და კატალიზატორისათვის და მრავალფეროვანია. ეს ხდება კატალიზატორის ზედაპირზე შხამის ქიმიური ურთიერთქმედების შედეგად კატალიზურად არააქტიური ნაერთის წარმოქმნით, კატალიზატორის აქტიურ ცენტრებზე შხამის აქტივირებული ადსორბციით, შხამის ან მისი ნაწარმების კრისტალიზაციით კატალიზატორის ზედაპირზე.

მოწამვლა შეიძლება იყოს შექცევადი ან შეუქცევადი. შექცევადი მოწამვლის დროს კატალიზატორის აქტივობა მცირდება მხოლოდ შემავალ ნარევეში შხამის შემცველობის დროს. თუ ამ დროს განახლდება კატალიზატორზე სუფთა ნარევის მიწოდება კატალიზატორისა და შხამის ნაერთი დაიშლება, ადსორბირებული შხამი აქროლდება და განიდევენება რეაქციის პროდუქტებთან ერთად. შეუქცევადი მოწამვლა მუდმივია. მოწამვლულ კატალიზატორს გამოტვირთავენ აპარატიდან და ცვლიან ახლით ან ატარებენ მის რეგენერაციას საკონტაქტო მასიდან შხამის ან კატალიზატორის ექსტრაქციით.

შხამების მოქმედება სპეციფიკურია მოცემული კატალიზატორისა და რეაქციისათვის. შხამებისადმი ყველაზე უფრო მგრძობიარეა ლითონური კატალიზატორები, განსაკუთრებით კეთილშობილი ლითონები. პლატინის კატალიზატორისათვის, რომელიც ფართოდ გამოიყენება დაჟანგვის პროცესებში, შხამებია გოგირდწყალბადი და სხვა გოგირდოვანი ნაერთები, დარიშხანის ნაერთები, ფოსფორწყალბადი,  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Sn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$  და სხვა ლითონები. ოქსიდური

ნახევარგამტარი კატალიზატორები ნაკლებად მგრძობიარენია შხამებისადმი.  $V_2O_5$ -ის საფუძველზე დამზადებული კატალიზატორისათვის შხამებია დარიშხანისა და სელენის ნაერთები. მოწამვლისაგან კატალიზატორების დასაცავად სარეაქციო ნარევეს წინასწარ წმენდენ კონტაქტური შხამებისაგან.

## 5.4. მყარი კატალიზატორების თვისებები და მათი დამზადება

სამრეწველო კატალიზატორები, ჩვეულებრივ, არ არის ინდივიდუალური ნივთიერებები. ისინი, როგორც წესი, რთული ნარევებია, რომელთაც საკონტაქტო მასას უწოდებენ. საკონტაქტო მასაში შემავალი ზოგი ნივთიერება საკუთრივ კატალიზატორია, ხოლო ზოგი აქტივატორი და სარჩული.

აქტივატორებს ან პრომოტორებს უწოდებენ ძირითადი კატალიზატორის აქტივობის ამამალლებელ ნივთიერებას. მაგალითად, გოგირდმჟავის წარმოებაში გამოყენებულ ვანადიუმის საკონტაქტო მასაში ძირითადი კომპონენტის – ვანადიუმის ხუთჟანგის – აუცილებელი გამააქტივებელი დანამატებია ტუტე ლითონების ოქსიდები. დანამატების გამააქტივებელი მოქმედების მექანიზმი რთულია და მრავალ შემთხვევაში ნათელი არ არის. აქტივაცია შეიძლება მოხდეს დანამატების კატალიზატორთან ქიმიური ურთიერთქმედების შედეგად გადიდებული კატალიზური აქტივობის მქონე პროდუქტების წარმოქმნის გამო; ზოგჯერ აქტივატორი ადიდებს კატალიზურად აქტიური ნივთიერების ზედაპირს ან ამალლებს მის თერმომედეგობას, ზოგჯერ კი იცავს საკონტაქტო შხამების ზემოქმედებისაგან.

სარჩულებს ან ტრეგერებს უწოდებენ თერმომედეგ, ინერტულ, ფოროვან ნივთიერებებს, რომლებზედაც ხსნარებიდან დალექვით ან სხვა ხერხით აფენენ კატალიზატორს. ეს ადიდებს კატალიზატორის ზედაპირს, აძლევს საკონტაქტო მასას ფოროვან სტრუქტურას, ადიდებს მის მექანიკურ სიმ-

ტკიცეს, იცავს აქტიურ ზედაპირს შეცხოებისა და გად-  
კრისტალებისაგან, და აგრეთვე აიაფებს საკონტაქტო მასას.  
სარჩული შეიძლება მოქმედებდეს, აგრეთვე, როგორც აქტი-  
ვატორი. სარჩულებად იყენებენ ფოროვან, ინერტულ მასა-  
ლებს, როგორცაა პემზა, სილიკაგელი, კერამიკა, კაოლინი,  
ნახშირი, ცეოლითები და სხვ.

კატალიზატორების დამზადებისას აუცილებელია ტექ-  
ნოლოგიით წაყენებული მოთხოვნების გათვალისწინება.  
სამრეწველო კატალიზატორები უნდა იყოს საკმაოდ აქტიური  
მოცემული რეაქციისათვის, რაც შეიძლება მდგრადი საკონ-  
ტაქტო მზამების მოქმედებისადმი, შედარებით იაფი და ჰქონ-  
დეს საკონტაქტო აპარატებში ექსპლუატაციისათვის აუცილე-  
ბელი ფიზიკური თვისებები: მექანიკური სიმტკიცე, თერმომე-  
დეგობა, განსაზღვრული სითბოგამტარობა და სხვ.

აქტიური კატალიზატორების დასამზადებლად, ძირი-  
თადად, შემდეგ მეთოდებს იყენებენ:

1. ჰიდროჟანგების ან კარბონატების დალექვა მათი  
მარილების ხსნარებიდან სარჩულთან ერთად ან მის გარეშე  
საკონტაქტო მასის შემდგომი ფორმირებით, გავარვარებითა  
და, საჭიროების შემთხვევაში, აღდგენით (დალექილი კატალი-  
ზატორები).

2. კატალიზატორის, აქტივატორისა და სარჩულის  
(ზოგჯერ მჭიდა ნივთიერებების) მშრალი ფხვნილების ერ-  
თობლივი დაწნება შემდგომი გავარვარებითა და აღდგენით.

3. ფოროვანი სარჩულის გაჟღენთვა კატალიზატორისა  
და აქტივატორის შემცველი ხსნარით, შემდგომი გამოშრო-  
ბით, გავარვარებითა და აღდგენით. ასეთი ტიპის კატალი-  
ზატორებს მიეკუთვნება ლითონური, ოქსიდური, მარილო-  
ვანი, მჟავური და ფუძე კატალიზატორები.

4. რამდენიმე ნივთიერების შელლობა ერთ-ერთი მათ-  
განის შემდგომი გამოტუტვით (ჩონჩხური კატალიზატორები)  
ან ლითონების აღდგენა ოქსიდებიდან წყალბადით. ასე ამზა-  
დებენ ნიკელის ჩონჩხურ კატალიზატორს ჰიდრირებისათვის;  
ნიკელისა და ალუმინის შენაღობიდან ალუმინს გამოტუ-  
ტავენ ნატრიუმის ტუტით.

ფუძე-მჟავური რეაქციების ამორფულ კატალიზატო-  
რებს ამზადებენ კომპონენტების თანადალექვით, მაგალითად  
გელების კოაგულაციით. საკონტაქტო მასებს წნეხავენ აბების,  
მარცვლების ან გრანულების სახით. ზოგჯერ კატალიზა-  
ტორს ამზადებენ უწვრილესი ბადეების სახით, რომელიც  
იქსოვება სხვადასხვა ლითონების შენადნობებისაგან (პლატინა-  
პალადიუმ-როდიუმის ბადეები ამიაკის დასაჟანგავად).

## VI თავი

### ფოტოქიმიური, რადიაციულ-ქიმიური, ბიოქიმიური, პლაზმურ-ქიმიური პროცესებისა და ულტრაბგერის გამოყენება ქიმიურ ტექნოლოგიაში

ფოტო-, რადიაციულ- და ბიოქიმიური პროცესები  
ჩვეულებრივი კატალიზური პროცესების მსგავსია ქიმიური  
რეაქციების დაჩქარების მხრივ, რომლებიც ამ აღმზნების  
ზემოქმედებით სულ სხვა გზით მიმდინარეობს, ვიდრე ამგ-  
ზნებლების გარეშე მოლეკულების ურთიერთმოქმედებისას.

ფოტოქიმიურს უწოდებენ სინათლის მოქმედებით  
გამოწვეულ ან დაჩქარებულ რეაქციებს. რეაქციის აგზნების  
ან დაჩქარებისათვის აუცილებელი ენერგია რეაგენტებთან  
მიიყვანება ელექტრომაგნიტური რხევების სახით. ოტოქიმი-  
ური რეაქციების ელემენტარული მექანიზმი მდგომარეობს  
მორეაგირე ნივთიერებების მოლეკულების გააქტივებაში ფო-  
ტონების შთანქმისას. სინათლის შთანქმისას იცვლება მო-  
ლეკულის სტრუქტურა; ატომების გარე გარსების ელექტრო-  
ნები, რომლებიც ქიმიურ ბმას ახორციელებს, აღიგზნება და  
მოლეკულა ხდება უნარიანი ქიმიური გარდაქმნების მიმართ.  
ფოტოქიმიურ რეაქციებს შეიძლება ჰქონდეს სხვადასხვა ხა-  
სიათი და იყოფა ორ ძირითად ჯგუფად. პირველ ჯგუფს  
მიეკუთვნება რეაქციები, რომელთაც თერმოდინამიკურად უნა-

რი აქვს თავისთავად მიმდინარეობდეს მოცემულ პირობებში. ამ რეაქციებისათვის სინათლე და სხვა ელექტრომაგნიტური რხევები ასრულებს ამგზნების, ინიციატორის როლს. ჩვეულებრივ მათ ჯაჭვური ხასიათი აქვთ; სინათლის შთამთქმელი მოლეკულები დისოცირდება და გააქტივებული ატომები ან ატომთა ჯგუფები არის ინიციატორები მეორეული ქიმიური რეაქციებისათვის.

ფოტოქიმიური რეაქციების მეორე ჯგუფი არის რეაქციები, რომლებსაც მოცემულ პირობებში თერმოდინამიკურად არ შეუძლია მიმდინარეობდეს თავისთავად, და რომელთა ჩატარებისთვისაც აუცილებელია გარეგანი ენერჯის განუწყვეტელი ხარჯვა. ეს ენერჯია მიიყვანება ელექტრომაგნიტური რხევების სახით. ამ შემთხვევაში გარდაქმნილი ნივთიერების რაოდენობა პირდაპირ პროპორციულია შთანთქმული სინათლის ენერჯის რაოდენობისა.

ორივე ტიპის ფოტოქიმიური რეაქციები მიმდინარეობს ბუნებაში და გამოიყენება მრეწველობაში. ფოტოქიმიურ რეაქციებს მიეკუთვნება, მაგალითად, ქიმიურ მრეწველობაში გამოყენებული ნახშირწყალბადებისა და სხვა ნივთიერებების ქლორირების პროცესები, ზოგიერთი პოლიმერების სინთეზები (პოლისტიროლის), პარაფინების სულფოქლორირება და სხვ. მეორე ტიპის ფოტოქიმიურ რეაქციებს მიეკუთვნება, მაგალითად, ფოტოსინთეზის ბუნებრივი პროცესი, ე. ი. ნახშირწყლების სინთეზი ჰაერის ნახშირორჟანგიდან მცენარეებში მზის სინათლის მოქმედებით, რომელსაც შთანთქავს მცენარის პიგმენტი – ქლოროფილი.

სინათლის მოქმედებით განხორციელებული ქიმიური პროცესების განსაკუთრებული ჯგუფია *ფოტოკატალიზური* რეაქციები, რომლებშიც სინათლე შთანთქმება არა მორეაგირე ნივთიერებებით, არამედ ფოტოქიმიური რეაქციის დამაჩქარებელი კატალიზატორით. ასეთი ტიპის რეაქციები მიმდინარეობს, როგორც წესი, აირად ან თხევად რეაგენტებს შორის მყარი კატალიზატორის ზედაპირზე კატალიზატორისა და სინათლის ენერჯის ჯამური მოქმედების შედეგად. დასხივებით აღიგზნება ელექტრონები კატალიზატორის ზედაპირ-

ზე, ე. ი. ელექტრონების ნაწილი თავისუფლდება და მათი კონცენტრაცია იზრდება ზედაპირთან, რაც ხელს უწყობს რეაქციის ენერგეტიკული ბარიერის გადალახვას. ფოტოკატალიზატორებად იხმარება ზოგიერთი ნახევარგამტარები (თუთიის, კადმიუმის, კალის ოქსიდები).

*რადიაციულ-ქიმიური* რეაქციები მიმდინარეობს მალალი ენერჯის მაიონებული გამოსხივების შედეგად, როგორცაა მალალი სინშირის ელექტრომაგნიტური რხევები (რენტგენის სხივები და  $\chi$  ნაწილაკები) და მალალი ენერჯის ნაწილაკები ( $\alpha$  და  $\beta$  ნაწილაკები, აჩქარებული ელექტრონები, ნეიტრონები, რადიოაქტიური დაყოფის "ნამსხვრევები"). გამოსხივების წყაროდ იყენებენ იზოტოპურ დანადგარებს (ხანგრძლივცოცხალი რადიოაქტიური იზოტოპების გამოყენებით, მაგალითად კობალტ-60-ის), ბირთვულ რეაქტორებს, ნაწილაკების ამაჩქარებლებს და სხვ.

მაიონებული გამოსხივების მოქმედების მექანიზმი განსხვავდება კატალიზისა და სინათლის სხივების მოქმედებისაგან. მორეაგირე სისტემაში მალალი ენერჯის გამოსხივების გავლისას ენერჯია გადაეცემა რეაგენტებს, რასაც თან ახლავს მოლეკულების იონიზაცია და ელექტრონული აღგზნება. რეაგენტების მოლეკულების უშუალო აღგზნების გარდა ამ დროს ხდება ელექტრონების მოწყვეტა ატომთა შიგა გარსებიდან და ენერჯია გადაეცემა ამოგლეჯილ ელექტრონებს. მეორეული ელექტრონები, თავის მხრივ, ასრულებს მოლეკულების აქტივაციის ან იონიზაციის აქტს.

ქიმიურ პროცესებზე მალალი ენერჯის გავლენის გამოკვლევა მრავალი მიმართულებით მიმდინარეობს, კერძოდ კატალიზის სფეროში. ამ გზით შეიძლება კატალიზატორების, განსაკუთრებით ნახევარგამტარების, აქტივობისა და შერჩევითობის ფართო ზღვრებში ცვლილება და რეგულირება. დაწყებულია მრავალი რადიაციული ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესის სამრეწველო განხორციელება. ასეთ პროცესებს მიეკუთვნება, პირველ რიგში, ჯაჭვური (ან ჯაჭვურის მახლობელი) მექანიზმით მიმდინარე და გამოსხივებით ინიცირებული ორგანული სინთეზის რეაქციები – ქლორი-

რება, სულფირება, სულფოქლორირება, ორმაგ ბმებთან მიერთება, დაჟანგვა და სხვ. მრეწველობაში ათვისებული პროცესია, მაგალითად, ეთილბრომიდის სინთეზი ეთილენტან *HBr*-ის პირდაპირი მიერთებით  $\chi$  სხივების მოქმედებით. სამრეწველო რადიაციული ქიმიის განსაკუთრებით მნიშვნელოვანი დარგია პოლიმერების მრავალფეროვანი გარდაქმნები, კერძოდ, კაუჩუკის ვულკანიზაცია. რადიაციული ქიმიური გარდაქმნების დროს იცვლება პოლიმერების თვისებები და სტრუქტურა, რაც გამოიყენება მათი ტექნოლოგიური თვისებების გასაუმჯობესებლად. მრეწველობაში ითვისებენ პოლიმერების, კერძოდ პოლიეთილენის, რადიაციული მოდიფიცირების პროცესებს; სამრეწველო დანერგვის სტადიაშია რადიაციულ-ქიმიური სინთეზების მთელი რიგი: ეთილენის, ტეტრაფტორეთილენის, აკრილამიდისა და ზოგიერთი სხვა მონომერის პოლიმერიზაცია.

გამოსხივების გავლენით მრავალი რეაქცია ახალი პროდუქტების წარმოქმნით მიმდინარეობს. ნახშირჟანგის ჰიდრირების ფართოდ ცნობილი რეაქციები გამოსხივების გავლენით შეიძლება მივიყვანოთ ფორმალდეჰიდის წარმოქმნამდე მისი შემდგომი კონდენსაციით უმაღლეს შაქრებად. განსაკუთრებით პერსპექტიულია კომპლექსური ქიმიურ-ენერგეტიკული დანადგარების შექმნა, რომლებიც ერთდროულად აწარმოებს ელექტროენერგიასა და ქიმიურ პროდუქტებს. სპეციალიზებულ ქიმიურ-ბირთვულ რეაქტორში რადიოაქტიური დაყოფის "ნამსხვრევების" კინეტიკური ენერგია შეიძლება უშუალოდ გამოვიყენოთ ენდოთერმული ქიმიური რეაქციების განსახორციელებლად.

კატალიზური რეაქციები დამახასიათებელია ცოცხალი ბუნებისათვისაც და მიმდინარეობს ცხოველური ორგანიზმებისა და მცენარეების უჯრედებში. ეს *ბიოქიმიური* პროცესებია. მათი უმრავლესობა კატალიზურია. ცოცხალი მატერია ფლობს მაღალაქტიურ, ნატიფ და სელექციურ ბიოლოგიურ კატალიზატორებს, რომლებიც თავისი ეფექტურობით განუზომლად აღემატება ქიმიურ ტექნოლოგიაში გამოყენებულს. მაგალითად, ცოცხალი ორგანიზმი ბოჭავს ატმოსფერულ

აზოტს ნაერთის სახით ნიადაგის ტემპერატურასა და ატმოსფერულ წნევაზე. მრეწველობაში კი ატმოსფერული აზოტის ფიქსირება (ამიაკის სინთეზი) ხერხდება დიდი ენერგეტიკული დანახარჯების შედეგად (რამდენიმე ასეული ატმ. წნევისა და ასეულობით გრადუს ტემპერატურაზე). ამის მიზეზია ამიაკის სამრეწველო სინთეზის კატალიზატორის შედარებით მცირე აქტივობა. ბიოლოგიური კატალიზატორებია ორგანიზმში დასინთეზებული ფერმენტები (ანუ ენზიმები) და ჰორმონები, აგრეთვე გარედან შეყვანილი ვიტამინები.

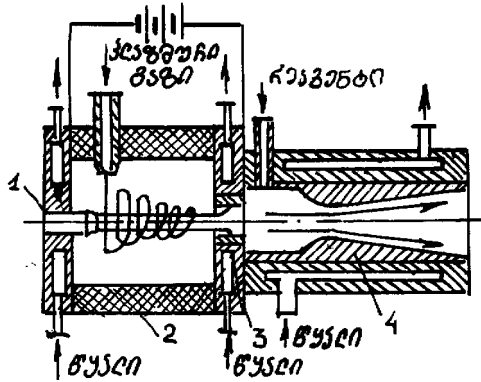
ცოცხალ ბუნებაში განხორციელებული კატალიზის პრინციპების გამოყენება საშუალებას მოგვცემდა ახლებურად გარდაგვექმნა ქიმიური მრეწველობის მთელი რიგი დარგები. ბიოქიმიური პროცესების ტექნიკური გამოყენების პერსპექტივაშია ატმოსფერული აზოტის ფიქსაციის, ცილებისა და ცხიმების სინთეზის პრობლემები, ჰაერის აუზის ნახშირორჟანგის გამოყენება ორგანული სინთეზისათვის.

ამჟამად მრეწველობა იყენებს დუღილის სხვადასხვა ფორმებს სპირტების, აცეტონისა და ორგანული მჟავების მისაღებად, ცილოვანი საკვები საფუარის ბიოლოგიურ სინთეზს, ჩამდინარე წყლების ბიოლოგიურ გაწმენდასა და სხვ. ყველა ეს პროცესი მიმდინარეობს სხვადასხვა სახის მიკროორგანიზმების მონაწილეობით, მაგრამ მცირე სიჩქარით. ამიტომ აპარატურა ამჟამად ცნობილი ბიოლოგიური პროცესების ჩასატარებლად გამოირჩევა დიდი ზომებით და წარმოადგენს ერთმანეთთან შეერთებული რეზერვუარებისა და საწდომების ბატარეას.

მიმდინარეობს გამოკვლევები ფერმენტული კატალიზის მოდელირებისათვის სინთეზური ორგანული კატალიზატორების კატალიზური თვისებების საფუძველზე, რომლებიც შედგენილობითა და აღნაგობით ფერმენტებზე ნაკლებად რთულია, მაგრამ გარკვეული ზომით იმეორებს მათ კატალიზურ მოქმედებას. ასეთ კატალიზატორებს მიეკუთვნება, მაგალითად, ორგანული ნახევარგამტარები, კერძოდ ხელა-

ტური პოლიმერები, რომლებიც ლითონებთან შინაგან კომპლექსებს წარმოქმნის და სხვ.

დიდ შესაძლებლობებს ქმნის ქიმიური ტექნოლოგიისათვის პლაზმურ-ქიმიური პროცესების გამოყენება. პლაზმა არის მატერიის მდგომარეობა; იგი იონიზებული აირია, რომელიც შეიცავს დამუხტულ ნაწილაკებს: თავისუფალ ელექტრონებსა და აირის იონებს. იონიზაციის გამო პლაზმა ელექტროგამტარია. პლაზმა ელექტრონეიტრალურია (კვაზინეიტრალური), რამდენადაც იონების დადებითი და ელექტ



ნახ. V.3 პლაზმური ჭავლის გამომყოფი რკალური პლაზმოტრონის სქემა:

1 - კათოდი; 2 - იზოლატორი; 3 - ანოდი; 4 - საქშენი.

ტრონების უარყოფითი მუხტები საშუალოდ ურთიერთნეიტრალდება.

პლაზმური მდგომარეობა აღიძვრება მაღალი ტემპერატურის დროს, რომელიც წარმოიქმნება ელექტრორკალში, მექანიკურ და ელექტრომაგნიტურ დარტყმით მიღებში, მაღალი სიხშირის აირადი განმუხტვისას, ბირთვული რეაქციების დროს და სხვ.

ქიმიურ ტექნოლოგიაში გამოიყენება დაბალტემპერატურული პლაზმა, რომელიც მიიღება გენერატორებში (პლაზმოტრონებში): ელექტრორკალურში - ელექტრული რკალის საშუალებით. ან ინდუქციურში - მაღალი სიხშირის აირადი

განმუხტვის გზით. დაბალტემპერატურულად ითვლება პლაზმა, რომლის ტემპერატურა  $10^3-10^5 K$ -ის რიგისაა. ასეთ პლაზმაში კიდევ არსებობს არადისოცირებული მოლეკულები, მაგრამ ძირითადად მასში შედის აირის იონები და თავისუფალი რადიკალები. პლაზმაში მოლეკულები და თავისუფალი რადიკალები სხვადასხვა რეაქციებში შედის. ამასთან მკვრივ, წონასწორულ პლაზმაში რეაქციები მიმდინარეობს, ძირითადად, მაღალი ტემპერატურის გამაქტივებელი მოქმედების ხარჯზე. გაიშვითებულ არაწონასწორულ (მაღალიონიზებულ) პლაზმაში ქიმიური რეაქციების მექანიზმი რადიაციული და ფოტოქიმიური რეაქციების ანალოგიურია.

პლაზმურ-ქიმიური პროცესების შესაძლებლობები და მიმართულება განუსაზღვრელია. მაღალიონიზებულ პლაზმაში შეიძლება წავიდეს ისეთი რეაქციები, რომელთა განხორციელება სხვა პირობებში შეუძლებელი იქნებოდა, მაგალითად, დამძიმებული იონების ( $H_3^+$ ,  $CH_5^+$ ,  $Ar_2^+$ ), მეტასტაბილური უარყოფითი იონების ( $H^-$ ,  $P^-$ ,  $B^-$ ) და აგრეთვე თავისუფალი რადიკალების მონაწილეობით.

სამრეწველო განხორციელებისათვის დამუშავებულია მრავალი ტექნოლოგიური პროცესი დაბალტემპერატურული პლაზმის გამოყენებით. ესენია მარტივი ან კონსტრუქციული რეაქციები, რომელთათვისაც პროდუქტის წონასწორული გამოსავალი მაქსიმალურია მაღალი ტემპერატურის დროს. მათ მიეკუთვნება აზოტის ოქსიდის პირდაპირი სინთეზი ჰაერიდან, აცეტილენის მიღება მეთანისა და ბენზინისაგან, ციანწყალბადის მიღება აზოტისა და ნახშირწყალბადებისაგან, ფთორის მრავალგვარი ნაერთების სინთეზები, ნახშირწყალბადების აირფაზური დაჟანგვა და სხვ. მაღალიონიზებული არაწონასწორული პლაზმის გამოყენებით განხორციელებულ რეაქციებს მიეკუთვნება, მაგალითად, ინერტული აირების იონური ნაერთების მიღება, რეაქციები მყარი ან თხევადი ფაზების ზედაპირზე (მაგალითად, პოლიმერის ზედაპირის აქტივაცია) და მრავალი სხვა ქიმიური რეაქცია.

აზოტის ოქსიდის სინთეზი ჰაერიდან მაღალი ძაბვის ელექტრორკალის საშუალებით განხორციელდა ჯერ კიდევ

1904 წელს, მაგრამ მაღალი ღირებულებისა და არასაკმაო დამუშავების გამო ამ პროცესმა ვერ გაუწია კონკურენცია უფრო იაფ და ტექნიკურად სრულყოფილ ამიაკის სინთეზს. მომავალში ატმოსფერული აზოტის უშუალო შეკავშირება **NO**-დ პლაზმოტრონების გამოყენებით, უნდა აღმოჩნდეს უფრო მარტივი და ეკონომიური, ვიდრე აზოტის სასუქების მიღების მრავალსტადიური პროცესი ამიაკის სინთეზით, მისი დაჟანგვით, შემდეგ აზოტმჟავის მიღებითა და ა. შ.

აცეტილენის მიღება პლაზმურ-ქიმიური მეთოდით შეიძლება ასევე უფრო ეფექტური გახდეს, ვიდრე არსებული მეთოდები (მაგალითად, მეთანის ჟანგვითი პიროლიზი). აცეტილენის გამოსავალი უფრო მაღალია და თვითღირებულება დაბალი.

ორივე განხილული პროცესი მოითხოვს რეაქციის ზონაში რეაგენტების დაყოფნების მცირე დროს, რაც მიიღწევა პლაზმის ჭავლის დიდი სიჩქარით და რეაქციის პროდუქტების წრთობით, ე. ი. სწრაფი გაცივებით.

პლაზმურ-ქიმიური პროცესების აპარატურა წარმოადგენს პლაზმოტრონისა და რეაქტორის შერწყმას. რეაგენტები მიეწოდება ან განმუხტვის ზონაში (პლაზმოტრონისა და რეაქტორის შეთავსება) ან მაღალტემპერატურულ პლაზმაში განმუხტვის ზონის გარეთ (პლაზმურჭავლიანი რეაქტორები). ამჟამად ქიმიური პროცესებისათვის უფრო გავრცელებულია სხვადასხვა ტიპის ელექტროორკალური, ჭავლური პლაზმოტრონები, მაგრამ უკვე გამოიყენება ინდუქციურიც.

V.3. ნახაზზე მოყვანილია რკალური პლაზმურჭავლური რეაქტორის პრინციპიული სქემა, რომელიც გამოყოფს პლაზმის ჭავლს. ასეთი ტიპის პლაზმოტრონებისათვის დამახასიათებელია კათოდისა და ანოდის კორპუსს შიგნით განლაგება და ჭავლის გამოსვლა რეაქტორში. პლაზმოტრონი არის ცილინდრული კამერა ვოლფრამის კათოდითა და სპილენძის რგოლური ანოდით, რომლის გავლითაც რეაქტორში გამოედინება პლაზმური ჭავლი. პლაზმის ჭავლის ასაჩქარებლად რეაქტორში დაყენებულია საქშენი. პლაზმოტრონის ელექტროდები და კორპუსი ცივდება წყლით.

ბოლო ხანებში ქიმიურ მრეწველობაში სულ უფრო ნშირად იყენებენ ულტრაბგერის, ე. ი. ულტრაბგერითი სიხშირის დიაპაზონის დრეკადი რხევების მოქმედებას ქიმიურ პროცესებზე. ეს ფიზიკური მეთოდი გამოიყენება, ძირითადად, ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესების ფიზიკური სტადიების განსახორციელებლად, მაგალითად, სითხეების (მსათ შორის ნადნობების) გამტვერვისათვის, თხევადი და მყარი ნივთიერებების დისპერჰირებისათვის ემულსიებისა და სუსპენზიების მისაღებად, აეროზოლების კოაგულაციისა და შრობისათვის, კრისტალწარმოქმნის მართვისათვის, კერძოდ, მილგაყვანილობის კედლებზე კრისტალწარმოქმნის შესამცირებლად და სხვ.

ულტრაბგერის გამოყენება ცვლის აგრეთვე ზოგიერთი რეაქციის მიმდინარეობის სიჩქარეს (ჟანგვა-აღდგენითი რეაქციები ხსნარებში, პოლიმერიზაცია ხსნარებსა და ნადნობებში, ჰიდროლიზი და სხვ.).

ულტრაბგერის მოქმედების მექანიზმი უწინარეს ყოვლისა მდგომარეობს დასამუშავებელ გარემოზე დრეკადი რხევების მექანიკურ და სპეციფიკურ ზემოქმედებაში. ქიმიურ აპარატებში, თხევად და აირად გარემოში იყენებენ საშუალო და მაღალი ინტენსივობის ულტრაბგერით რხევებს 1-5 ვტ/სმ<sup>2</sup> და მეტ ინტერვალში. ასეთი ინტენსივობის ტალღების გავლის შედეგად გარემოს თვისებები და ჰეტეროგენული რეაქციების მსვლელობა ამ გარემოში იცვლება, ძირითადად, მეორეული ეფექტების, კავიტაციის, რადიაციული წნევისა და ბგერითი ქარის შედეგად.

## VII თავი

### ნედლეული და ენერჯია ქიმიურ მრეწველობაში

ნედლეული ტექნოლოგიური პროცესის ერთ-ერთი ძირითადი ელემენტია, რომელიც მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს პროცესის ეკონომიურობას, წარმოების ტექნიკასა და პროდუქციის ხარისხს. *ნედლეულს* უწოდებენ სამრეწველო პროდუქტების წარმოებაში გამოყენებულ ბუნებრივ მასალებს.

სამრეწველო პროდუქციისა და, კერძოდ, ქიმიური პროდუქციის ასორტიმენტის ზრდის გამო წარმოიშობა ახალი სახის ნედლეულის აუცილებლობა. ნედლეულის მოპოვების, მომზადების, გამდიდრების ტექნიკის განვითარება იძლევა ისეთი ახალი სახის ნედლეულის, სასარგებლო წიაღისეულის გამოყენების საშუალებას, რომელიც სასარგებლო კომპონენტებს შედარებით მცირე რაოდენობით შეიცავს. მრიგად, ქიმიური მრეწველობის ნედლეულის ბაზა განუწყვეტლივ ფართოვდება. მრავალი წარმოების ამოსავალი მასალა არის ნედლეული, რომელმაც უკვე განიცადა სამრეწველო გადამუშავება; ასეთ ნედლეულს *ნახევარპროდუქტს* (ნახევარფაბრიკატს ან ძირითად მასალას) უწოდებენ. ძოგიერთი ქიმიური წარმოება ნედლეულად იყენებს სხვა წარმოების ნარჩენებსა და თანაურ პროდუქტებს.

## 7.1. ნედლეულის დახასიათება და მარაგი

ქიმიური მრეწველობის ნედლეულს სხვადასხვა ნიშნის მიხედვით აჯგუფებენ. წარმოშობის მიხედვით ნედლეულს ყოფენ როგორც *მინერალური, მცენარეული და ცხოველური*. უფრო მეტია მინერალური ნედლეული, ე. ი. დედამიწის ქერქიდან მოპოვებული სასარგებლო წიაღისეული. გრევატული მდგომარეობის მიხედვით ასხვავებენ მყარ, თხევად (ნავთობი, მარილხსნარები, წყალი) და აირად (ჰაერი, ბუნებრივი აირი) ნედლეულს. შედგენილობის მიხედვით ნედლეული იყოფა ორგანულად და არაორგანულად. ინერალური ნედლეული, თავის მხრივ, იყოფა მადნეულ, არამადნეულ და საწვავ ნედლეულად.

მადნეულ მინერალურ ნედლეულს უწოდებენ ისეთი ლითონების შემცველ მთის ქანებს ან მინერალურ აგრეგატებს, რომელთა ამოღება ტექნიკურად შესაძლებელია და ეკონომიკურად ხელსაყრელი. მაგალითად, რკინა შედის მაგნიტურ რკინაქვაში  $Fe_3O_4$ -ის, წითელ რკინაქვაში  $Fe_2O_3$ -ის, მურა რკინაქვაში  $Fe(OH)_3$ -ის სახით და სხვ. სპილენძის მადნები, ჩვეულებრივ შეიცავს სპილენძის გოგირდოვან

ნაერთებს  $Cu_2S$ -ს,  $CuS$ -ს,  $FeCuS_2$ -ს და სხვ. გარდა ძირითადი ლითონების შემცველი მინერალებისა მადნებს ყოველთვის აქვს მინარევები. იმ მანარევებს, რომლებსაც წარმოებაში არ იყენებენ პროდუქტების მისაღებად, ფუჭ ქანებს უწოდებენ.

მადნებს, რომლებიც შეიცავს რამდენიმე ლითონს ამოღებისათვის საკმარისი რაოდენობით, *პოლიმეტალურს* უწოდებენ. მათ მიეკუთვნება, მაგალითად, რამდენიმე ფერადი ლითონის შემცველი მადნები: სპილენძ-თუთიისა, ტყვიათუთია-ვერცხლისა და სხვ.

არამადნეულს (ან არალითონურს) უწოდებენ ყველა არაორგანულ ნედლეულს, რომელსაც იყენებენ ქიმიური, სამშენებლო და სხვა არალითონური მასალების წარმოებაში, მაგრამ არ წარმოადგენს ლითონების მიღების წყაროს. რამადნეული ნედლეულის დიდი ნაწილი ასევე შეიცავს ლითონებს (მაგალითად, ლითონების სულფატები და ფოსფატები, ალუმინსილიკატები და სხვ.).

საწვავ მინერალურ ნედლეულს, ე. ი. ორგანულ წიაღისეულს: ნახშირს, ტორფს, საწვავ ფიქლებს, ნავთობს, ბუნებრივ აირს და სხვ. იყენებენ როგორც ენერგეტიკულ სათბობს ან ქიმიურ ნედლეულს.

საჭიროა აღინიშნოს მოყვანილი კლასიფიკაციის პირობითობა, რადგან საწვავი წიაღისეული არ არის ტიპური მინერალი.

ყველაზე საერთო და გავრცელებული სახის ნედლეულია ჰაერი და წყალი. მშრალი ჰაერი შეიცავს 78 მოც.%  $N_2$ -ს, 21 მოც.%  $O_2$ -ს, 0,94 მოც.%  $Ar$ -ს, 0,03 მოც.%  $CO_2$ -ს, უმნიშვნელო რაოდენობით – წყალბადს, მეთანს, ნეონს, ჰელიუმს, კრიპტონსა და ქსენონს. გარდა ამისა ჰაერში ცვალებადი რაოდენობით არის წყლის ორთქლი, მტვერი და აირადი გამაჭუჭყიანებლები. ჰაერის ჟანგბადს ფართოდ იყენებენ ჟანგვის (მაგალითად, სათბობის) პროცესებისათვის, აზოტს – ამიაკის სინთეზისათვის. ჰაერს იყენებენ როგორც მაცივებელ აგენტს წყლისა და სხვა სითხეების გასაცივებლად შხეფმაცივებში და აირებისათვის -

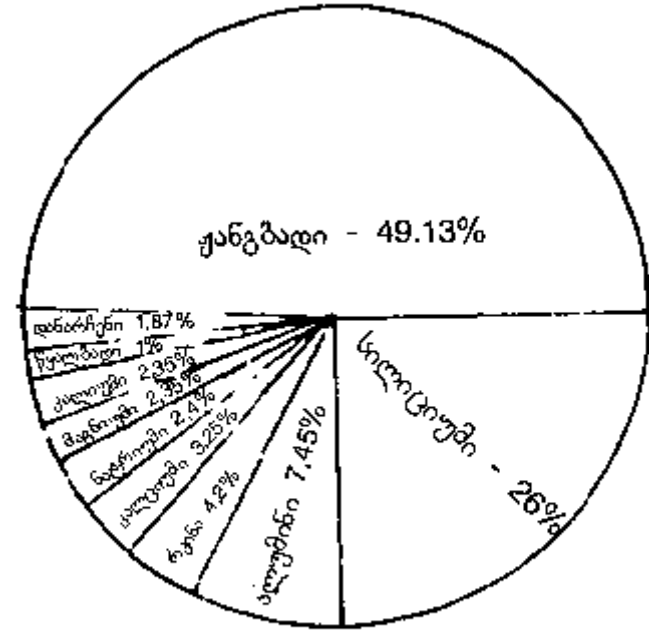
თბომცვლელელებში. გაცხელებულ ჰაერს იყენებენ აირებისა და სითხეების გასაცხელებლად.

მცენარეულ და ცხოველურ ნედლეულს (მერქანი, ბამბა, ზეთები და ცხიმები, რძე, ტყავი, მატყლი და სხვ.) ამუშავებენ კვების (საკვები ნედლეული) ან საყოფაცხოვრებო და სამრეწველო დანიშნულების პროდუქტებად (ტექნიკური ნედლეული). ზოგიერთ წარმოებაში საკვებ ნედლეულს იყენებენ ტექნიკური პროდუქტების მისაღებად, და პირიქით, ტექნიკურ პროდუქტებს გადაამუშავებენ კვების პროდუქტებად. სხვადასხვა ელემენტებისა და ნივთიერებების ნედლეულად გამოყენება დამოკიდებულია მათ ღირებულებაზე, დედამიწის ქერქში შემცველობაზე, მოპოვების ხელმისაწვდომობასა და იმ ნაერთების ხასიათზე, რომლებშიც შედის მოცემული ელემენტი. ყველა ეს მაჩვენებელი შეფარდებითია და დროის მიხედვით იცვლება.

ნედლეულის ღირებულება წარმოებისათვის დამოკიდებულია ტექნიკის განვითარების დონეზე. მაგალითად, მრავალ იშვიათ ლითონს ადრე არ იყენებდნენ, ბოლო წლებში კი განსაკუთრებით ძვირფასი და შეუცვლელი გახდა ნახევარგამტარების ტექნიკაში, როგორც შენადნობების დანამატები და სხვ. რამდენიმე ათეული წლის წინ ურანი დამამძიმებელი გადანაყარი იყო რადიუმის მიღების დროს, დღეს კი იგი ატომური ენერგეტიკის საფუძველია. კალიუმის ქლორიდი გასულ საუკუნეში გამოუყენებელი ნარჩენი იყო სილვინიტიდან ( $KCl \cdot NaCl$ ) ნატრიუმის ქლორიდის გამოყოფის დროს. ამჟამად სილვინიტის დამუშავებით მიღებული კალიუმის ქლორიდი ამოსავალი მასალაა კალიუმის მარილებისა და მინერალური სასუქების წარმოებაში.

ძირითადი ელემენტების შემცველობა დედამიწის ქერქში მოცემულია 7.1 ნახაზზე. როგორც ამ ნახაზიდან ჩანს, ცხრა ელემენტი შეადგენს დედამიწის ქერქის მასის 98%-ზე მეტს. სიცოცხლისათვის ისეთი მნიშვნელოვანი ელემენტი, როგორიცაა ნახშირბადი, მხოლოდ 0,35%-ს შეადგენს და დედამიწის ქერქში შემცველობის მიხედვით მე-11 ადგილზეა; 76 ელემენტი, ტყვიის, ვერცხლისწყლისა და დარი-

შხანის ჩათვლით, დედამიწის ქერქში მხოლოდ 0,06%-ის რაოდენობით შედის.



ნახ. 7.1 დედამიწის ქერქის ელემენტარული შემადგენლობა.

ნედლეულის მოპოვების ხელმისაწვდომობა განისაზღვრება, ძირითადად, საბადოს გეოგრაფიული განლაგებით, სასარგებლო ნივთიერების კონცენტრაციით მის ბუდობებში და ნედლეულის მიწის წიაღში ჩაწოლის სიღრმით. აგალითად, ტიტანი გაბნეულია დედამიწის ქერქში და განეკუთნება იშვიათ ლითონებს, თუმცა მისი შემცველობა დედამიწის ქერქში (0,61%) ორჯერ მეტია ნახშირბადის შემცველობაზე. ტიტანისაგან განსხვავებით, ნახშირბადი კონცენტრირებულია ხელმისაწვდომ მცენარეულ, ცხოველურ ობიექტებში და განსაკუთრებით სათბობისა და კარბონატების მძლავრ საბადოებში. დედამიწის ზედაპირზე ნედლეული უთანაბროდაა განაწილებული, ამიტომ მრავალი სახელმწიფო არ არის უზ-



რუნველყოფილი უმნიშვნელოვანესი სახის ნედლეულით. მაგალითად, ევროპის დიდ სახელმწიფოებს: გერ-ს, იტალიასა და საფრანგეთს აქვთ მეტად შეზღუდული რესურსები ისეთი მნიშვნელოვანი და სტრატეგიული ნედლეულისა, როგორცაა ნავთობი, ბუნებრივი აირი, გოგირდშემცველი ნაერთები, აზბესტი, რკინა, ქრომი, ნიკელი, სპილენძი და სხვ.

მინერალური ნედლეულის მსოფლიო მოპოვება XX საუკუნის პირველ ნახევარში 3,4-ჯერ გაიზარდა, ხოლო მეორე მსოფლიო ომის წლებში მრავალი სასარგებლო წიაღისეული მოპოვებული იყო უფრო მეტი, ვიდრე კაცობრიობის მთელი ისტორიის პერიოდში. წიაღისეულის მსოფლიო მოპოვებამ 2000 წელს თითქმის 13-ჯერ გადააჭარბა 1950 წლის დონეს. ამავე დროს სასარგებლო წიაღისეულის მრავალი საბადო იფიჭება. ყოველ ათწლეულში აუცილებელი ხდება სულ უფრო ძნელადმისაწვდომი და მიზნობრივი კომპონენტით ღარიბი მინერალური ნედლეულის მოპოვება და გადამუშავება. რამდენადაც ქიმიურ მრეწველობაში ნედლეული შეადგენს პროდუქციის თვითღირებულების 60-70%-ს, მისი სწორი შერჩევა და რაციონალური, ეკონომიური გამოყენება ქიმიური ტექნოლოგიის ერთ-ერთი მთავარი ამოცანაა. ნედლეულის პრობლემის განვითარების უმნიშვნელოვანესი ტენდენციებია: 1) უფრო იაფი სახის ნედლეულის გამოძებნა და გამოყენება; 2) კონცენტრირებული ნედლეულის გამოყენება (ნედლეულის გამდიდრება); 3) ნედლეულის კომპლექსური გამოყენება; 4) საკვები ნედლეულის შეცვლა არასაკვებით და მცენარეულისა – მინერალურით. ნედლეულის რაციონალური შერჩევისა და გამოყენების ყველა ეს მიმართულება ურთიერთდაკავშირებულია. მაგალითად, საკვები ნედლეულის მინერალურით შეცვლა ამავე დროს მისი მკვეთრი გაიაფების საშუალებაა.

## 7.2. ნედლეულის გამდიდრების პრინციპები

ქიმიური წარმოებები, როგორც წესი, მიისწრაფვიან გამოიყენონ რაც შეიძლება კონცენტრირებული ნედლეული; ეს იძლევა პროცესების ინტენსიფიცირებისა და ნაკლები დანახარჯებით უკეთესი ხარისხის პროდუქციის მიღების საშუალებას. კონცენტრირებული ნედლეულის საშუალებით შეიძლება ზოგ პროცესებში შევამციროთ სათბობის ხარჯი მორეაგირე მასათა გასაცხელებლად, სხვა პროცესებში კი უფრო ეფექტურად გამოვიყენოთ რეაქციის სითბო, მაგალითად ორთქლის მისაღებად. ბუნებრივ ნედლეულში სასარგებლო კომპონენტების შემცველობა ხშირად არ არის საკმარისი მისი ეფექტური გამოყენებისათვის, ამიტომ ნედლეულს წინასწარ ამდიდრებენ, ე. ი. ადიდებენ მასში სასარგებლო კომპონენტის შემცველობას, ან ყოფენ რამდენიმე ნაწილად, რომლებიც სხვადასხვა წარმოების ნედლეულებია. მოპოვების ადგილზევე ნედლეულის გამდიდრებისას მცირდება გადამუშავების ადგილამდე ტრანსპორტირების ხარჯები სასარგებლო კომპონენტის კონცენტრაციის გადიდების პროპორციულად. ნედლეულის გამდიდრება აუცილებელია, რადგანაც კონცენტრირებული ნედლეულის მაღალი ბუნებაში თანდათან იფიჭება, მრეწველობა იძულებულია გამოიყენოს ღარიბი ნედლეული და სასარგებლო კომპონენტი გამოყოს დიდი რაოდენობის ფუჭი ქანებიდან, რომლებიც ჯერჯერობით გამოუყენებელია. ნედლეულის მოპოვების ადგილებზე ხშირად აგებენ დიდ გამამდიდრებელ ფაბრიკებს, რომლებიც კომპლექსურად იყენებს ნედლეულის გამდიდრების სხვადასხვა მეთოდს. გამდიდრების მეთოდები პრინციპულად განსხვავდება მყარი მასალების, სითხეებისა და აირებისათვის (თხევადი და აირადი ნედლეულისათვის გამდიდრებას კონცენტრირებას უწოდებენ). განვიხილოთ ისინი თანამიმდევრობით.

მყარი მინერალური ნედლეული იმყოფება დედამიწის ქერქში მთის ჯიშების შემადგენლობაში, რომლებიც წარმოადგენს მეტად თუ ნაკლებად მუდმივი შედგენილობის მინერალებს. მინერალებს უწოდებენ ბუნებაში არსებულ ფიზიკურად განკერძოებულ ნივთიერებებს ან მათ ნარევს. ითვლიან 2500-ზე მეტ მინერალს, რომლებიც მოიცავენ ორგანულ და არაორგანულ ნივთიერებებს. ერთი და იგივე ელემენტი შეიძლება სხვადასხვა მინერალების შედგენილობაში შედიოდეს. მყარი ნედლეულის მექანიკური გამდიდრების მეთოდები დაფუძნებულია მთის ქანების შემადგენელი მინერალების სხვადასხვა ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებზე, ხოლო ქიმიური გამდიდრების მეთოდები, რომლებიც დამყარებულია მყარი ნედლეულის შემადგენელი კომპონენტების განსხვავებულ ქიმიურ თვისებებზე (ჟანგვადობა, რეაქციის უნარი სხვადასხვა რეაგენტების მიმართ) სპეციფიკურია და ძირითადად კონკრეტული წარმოებების აღწერისას განიხილება. თერმული გამდიდრების მეთოდები დამყარებულია ნედლეულის კომპონენტების განსხვავებულ დნობისა და დაშლის ტემპურატურაზე; თერმული გამდიდრების მეთოდი შედარებით იშვიათად გამოიყენება.

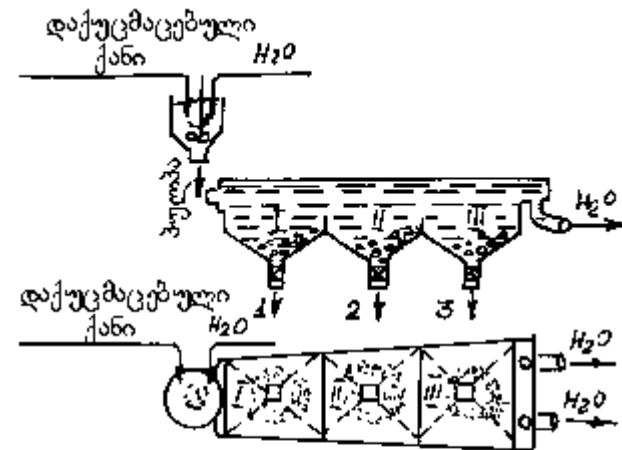
გამდიდრებისათვის მთის ქანებს აქუცმაცებენ ისე, რომ დაირღვეს კავშირი ფუჭ ქანებსა და სხვადასხვა მინერალების მარცვლებს შორის, რომელთაც შემდგომ ყოფენ სხვადასხვა მეთოდებით. ამასთან, მიიღება ორი ან რამდენიმე ფრაქცია. მთის ქანის ერთი რომელიმე სასარგებლო კომპონენტით გამდიდრებულ ფრაქციას (ან რამდენიმე ფრაქციას) კონცენტრირება ეწოდება; ფრაქციებს, რომლებიც მოცემულ წარმოებაში ჯერ კიდევ გამოუყენებელი მინერალების, ე. ი. ფუჭი ქანებისაგან შედგება, კუდებს უწოდებენ

მყარი მასალების გამდიდრებისათვის, ძირითადად, ნექანიკური მეთოდები გამოიყენება: გაცრა (გაცხაურება), გრაფიტაციული გაყოფა, ელექტრომაგნიტური და ელექტროსტატიკური სეპარაცია და ფლოტაცია. გამამდიდრებელ ფაბრიკებში მიმდევრობით იყენებენ გამდიდრების რამდენიმე

მეთოდს, მაგალითად, გაცხაურებას, ელექტრომაგნიტურ და გრაფიტაციულ სერსებს.

მასალების გაბნევა მათი ნაწილაკების სიმსხოს მიხედვით, როგორც გამდიდრების მეთოდი, გამოიყენება თუ ქანი შედგება მტკიცე (ბლანტი) და არამტკიცე (მსხვრევადი) მინერალებისაგან; ეს უკანასკნელი უფრო ადვილად იფუჭება, ვიდრე მტკიცე მინერალები და გაბნევის დროს გადის საცრის ხვრელებში. მაგალითად, ასე გამოიყოფა ფოსფორიტი ფუჭ ქანს. მინერალური ნედლეულის გაბნევას გაცხაურებას უწოდებენ, ხოლო გამოყენებულ ლითონის საცრებს – ცხაურებს. მასალის გატარება შეიძლება რამდენიმე ცხაურში, რომელთა ხვრელები თანდათანობით ვიწროვდება და მიიღება რამდენიმე ფრაქცია. გაბნევა გამოიყენება აგრეთვე მეტად თუ ნაკლებად ერთგვაროვანი (შედგენილობის მიხედვით) მასალის დასახარისხებლად მარცვლების სიმსხოს მიხედვით (საცრული კლასიფიკაცია); მაგალითად, ასე ყოფენ ნახშირსა და კოქსს რამდენიმე ფრაქციად.

გრაფიტაციული გამდიდრება (სველი ან მშრალი) ემყარება სითხის ან აირის ნაკადში, ან ცენტრიდანული ძალის მოქმედებით სხვადასხვა სიმკვრივის ან სიმსხოს

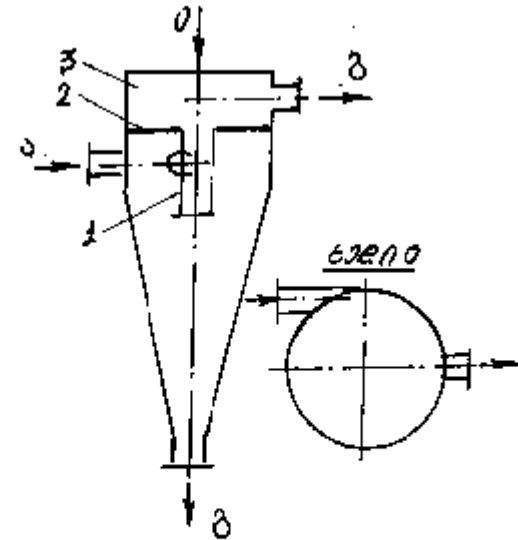


ნახ. 7.2 სველი გრაფიტაციული გამდიდრების პრინციპული სქემა: I, II, III - დამლექავი კამერები; 1 - მძიმე (მსხვილმარცვლოვანი) ფრაქცია; 2 - საშუალო ფრაქცია; 3 - მსუბუქი (წვრილმარცვლოვანი) ფრაქცია.

ნაწილაკების ვარდნის განსხვავებულ სიჩქარეს. ამ მეთოდით (ისევე როგორც გაბნევით) შეიძლება ისეთი მასალების გაყოფა, რომლებიც მნიშვნელოვნად განსხვავდება სიმკვრივით ან სიმტკიცით. სველ გამდიდრებას უფრო ხშირად წყლის ნაკადში ატარებენ. თუ წყალს შეუძლია გახსნას ან გააფუჭოს გასამდიდრებელი მასალა, მაშინ იყენებენ სხვა რომელიმე ინერტულ სითხეს ან მშრალი გამდიდრების ხერხს. მშრალი გამდიდრებისათვის საჭიროა უფრო წმინდად დაქუც-მაკებული მასალა, ვიდრე სველისათვის. მშრალ გამდიდრებას ატარებენ, ჩვეულებრივ, ჰაერის ნაკადში ან, იშვიათად, იყენებენ ინერტულ აირს. გრავიტაციულ ხერხს ფართოდ იყენებენ ნედლეულის გასამდიდრებლად სილიკატური მასალების, მინერალური მარილების წარმოებებსა და მეტალურგიაში. ნაწილაკების დალექვაზე დაფუძნებული სველი გრავიტაციული გამდიდრების სქემა მოცემულია 7.2 ნახაზზე. სარევიანი ავზიდან წყალში შერეული დაქუცმაკებული მასალა ტივტივარის სახით მიეწოდება ვერტიკალური ტიხრებით სამ დამლექავ კამერად გაყოფილ საწდომს. ყოველი კამერის ძირა ნაწილი აღჭურვილია ბუნკერით. ყველაზე მძიმე და მსხვილი ნაწილაკები სწრაფად ილექება I კამერაში, საშუალონი - II-ში, ხოლო მსუბუქნი - III კამერაში; ბოლოს, ქანის ყველაზე მსუბუქი და წმინდა ნამცეცები საწდომიდან გაყვება წყალს. პრინციპში შეიძლება ნებისმიერი რაოდენობის ფრაქციების მიღება დამლექავი კამერების რაოდენობის მიხედვით. უმარტივეს შემთხვევაში ერთ კამერაში ათავისუფლებენ ძვირფას მინერალს არამკვრივი ფუჭი ქანისაგან (მაგალითად, თიხისა და ლამისაგან), რომელიც წყალს მიაქვს სიმღვრივის სახით. ასეთ ხერხს განლექვა ეწოდება.

ძალიან ეფექტურია ცენტრიდანული ჰიდრაულიკური კლასიფიკატორების გამოყენება. ცენტრიდანული ძალის მოქმედებაზე დაფუძნებული კლასიფიკატორის მაგალითია ჰიდროციკლონი. ამ აპარატში ხდება სუსპენზიის (ტივტივარის) გაყოფა ორ ნაკადად, რომელთაგან ერთი შეიცავს

უფრო მსხვილ, მძიმე ფრაქციას, ხოლო მეორე - მსუბუქ, წვრილ, შეტივტივებულ ნაწილაკებს.



ნახ. 7.3 ჰიდროციკლონის სქემა:

1 - ცენტრალური (ლამის) მილი; 2 - ტიხარი; 3 - გადმოსასხმელი კამერა; ა- გასაყოფი სუსპენზიის შესასვლელი; ბ - მსუბუქი (წვრილმარცვლოვანი) ფრაქციის გამოსასვლელი; გ - მძიმე ფრაქციის (გამკვრივებული სუსპენზიის) გამოსასვლელი.

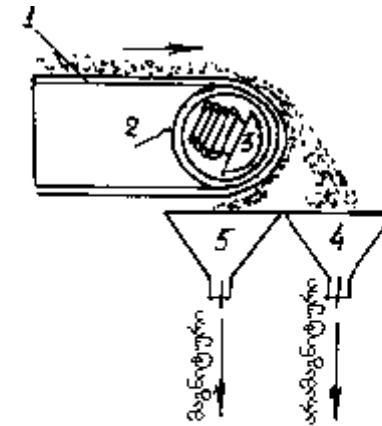
ჰიდროციკლონს (ნახ. 7.3) აქვს კონუსური და ცილინდრული ნაწილები. გასაყოფი ტივტივარი წნევით მიეწოდება ცილინდრულ კორპუსს გვერდითი მილტუჩით მხების მიმართულებით. ნაკადის ბრუნვისას ჰიდროციკლონში მძიმე ნაწილაკები ცენტრიდანული ძალით განიტყორცნება კედლებისაკენ, მოძრაობს სპირალური ტრაექტორიით და მიემართება აპარატის ქვედა ნაწილისაკენ გამკვრივებული პულპის სახით. სითხის ძირითად ნაწილში შეტივტივებული წვრილი, მსუბუქი ნაწილაკები მოძრაობს შიგა სპირალურ ნაკადში, ადის ცენტრალური (ლამის) მილით გადმოსასხმელ

კამერაში და გამოდის იქიდან წმინდა ტივტივარის ნაკადის სახით. ციკლონის გამყოფი მოქმედების რეგულირება შეიძლება ცენტრალური მილის ჩაშვების სიმაღლისა და მსხვილი ფრაქციის მოსაცილებელი ციკლონის გამოსასვლელი ნაწილის კვეთის ცვლილებით. ამ აპარატებს აქვს უფრო მაღალი მწარმოებლურობა და, შესაბამისად, ნაკლები გაბარიტები, ვიდრე კლასიფიკატორებს, რადგანაც ცენტრისკენული აჩქარება ჰიდროციკლონში მრავალჯერ აღემატება სიმძიმის ძალის აჩქარებას ნაწილაკის დაღეჟვის დროს. ჰიდროციკლონების მწარმოებლურობა განისაზღვრება ემპირიული ფორმულით აპარატში გამავალი სუსპენზიის მოცულობის მიხედვით:

$$L = 0,94d_{\text{ფ}}d_{\text{ლ}}\sqrt{P}, \quad (7.1)$$

სადაც  $L$  არის გასაყოფი სუსპენზიის მოცულობითი ხარჯი, მ<sup>3</sup>/სთ;  $d_{\text{ფ}}$  – შესასვლელი მილის დიამეტრი, სმ;  $d_{\text{ლ}}$  – ცენტრალური (ლამის) მილის დიამეტრი, სმ;  $P$  - ჭარბი წნევა შესასვლელი მილის წინ.

ელექტროსტატიკური სეპარატორების დანიშნულებაა სხვადასხვა ელექტროგამტარობის მქონე მასალების გაყოფა. მათი მოწყობილობის პრინციპი ისეთივეა, რაც მაგნიტურისა, მაგრამ მაგნიტის ნაცვლად დაყენებულია ელექტროდი, რომელიც მიერთებულია ელექტროდენის გამმართველის უარყოფით პოლუსთან. მაღალი ელექტროგამტარობის მქონე მინერალების ნაწილაკები იმუნტება უარყოფითად და განიტყორცნება მოშორებულ ბუნკერში, ხოლო დიელექტრიკები ცვივა ტრანსპორტიორის ლენტის ქვეშ მოთავსებულ ბუნკერში. ასე შეიძლება განცალკევდეს ელექტროგამტარი მადნები დიელექტრიკული ქანებისაგან (კირქვა, სილიკატები და სხვ.).



ნახ. 7.4 ელექტრომაგნიტური სეპარატორის სქემა:  
 - ტრანსპორტიორის ლენტი; 2 - ტრანსპორტიორის დოლი; 3 - ელექტრომაგნიტი;  
 4, 5 - ბუნკერები.

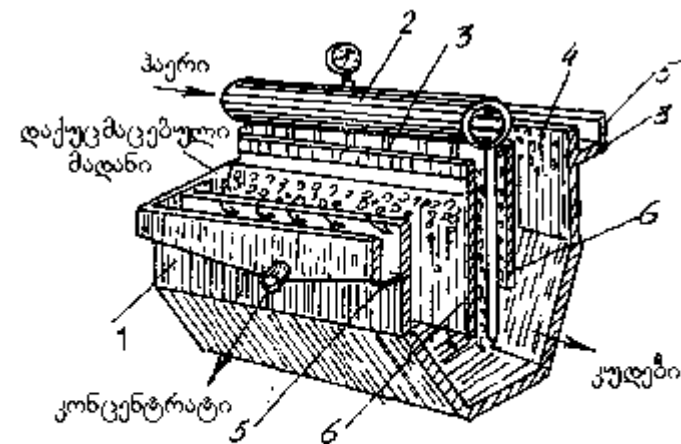
ფლოტაცია ნედლეულის გამდიდრების ერთ-ერთი ყველაზე უფრო გავრცელებული ხერხია, რომელსაც დიდი მასშტაბებით იყენებენ. გამამდიდრებელ ფაბრიკებში ფლოტაციური მეთოდით ყოფენ პოლიმეტალურ სულფიდურ მადნებს რამდენიმე ფრაქციად, აცალკევებენ აპატიტს ნეფელინისაგან, ლებულობენ გოგირდის კონცენტრატს მისი მადნიდან, ამდიდრებენ ქვანახშირებს და მრავალრიცხოვან მინერალებს სხვადასხვა მარილების წარმოებაში. ფლოტაცია დამყარებულია მინერალების წყლით სხვადასხვა დასველებალობაზე.



ნახ. 7.5 დასველების გავლენა

მინერალების დასველებადობის ძირითადი მაჩვენებელია დასველების კიდურა  $\Theta$  კუთხის სიდიდე, რომელიც წარმოიქმნება მყარი ზედაპირის დასველების პერიმეტრის, ე. ი. მყარი სხეული-სითხე-ჰაერის გამყოფი ხაზოვანი ზედაპირის გასწვრივ. 7.5 ნახაზზე ნაჩვენებია მდგომარეობა სამი ფაზის – მყარი-სითხე-ჰაერის – საზღვარზე. არადასველებად ნაწილაკთან (1) სითხე წარმოქმნის ბლაგვ  $\Theta$  კუთხეს, ხოლო დასველებადთან (2) – მახვილს. ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები ცდილობს სითხის დონის გასწორებას, რის შედეგადაც არადასველებადი (ჰიდროფობური) ნაწილაკი ამოტივტივდება (ამოცურდება) სითხიდან, ხოლო დასველებადი (ჰიდროფილური) მასში იძირება. რაც უფრო მცირეა ნაწილაკი, მით მეტია მისი ზედაპირის ფარდობა მოცულობასთან (და მასასთან) და მით მეტად იგრძნობა დასველება. ამიტომ ფლოტაციას წინ უძღვის მინერალების დაქუცმაცება ნაწილაკების ზომით 0,1-0,3 მმ-ის ზღვრებში. წვრილი ჰიდროფობური ნაწილაკები ამოცურდება ზედაპირზე სიმკვრივისაგან დამოუკიდებლად. ამრიგად ფლოტაციის დროს არაიშვიათად ამოტივტივდება სასარგებლო მინერალების უფრო მძიმე ჰიდროფობური ნაწილაკები, ფუჭი ქანის უფრო მსუბუქი ნაწილაკები კი იძირება, რამდენადაც ისინი მაინც წყალზე მძიმეა.

ფლოტაციის დასაჩქარებლად იყენებენ სხვადასხვა ტექნოლოგიურ ხერხებს. მყარი დაქუცმაცებული მასალის წყალნარევში ატარებენ ჰაერს წვრილი ბუშტების სახით. წყლისა და ყოველიბუშტის



ნახ. 7.6 ჰაერამრევნიანი ფლოტაციის მანქანა:  
 1 - საცირკულაციო კამერა; 2 - ჰაერის კოლექტორი; 3 - ჰაერის მილაკები; 4 - ქაფის ფენა; 5 - ლარი კონცენტრატისათვის; 6 - ტიხარი.

საზღვარზე მიმდინარეობს უკვე განხილული მოვლენები (იხ. ნახ. 7.6). შედეგად ბუშტები, ამოდის რა წყალში, თან წარიტაცებს ჰიდროფობურ ნაწილაკებს. რაც მეტია მინერალის ნაწილაკის ჰიდროფობურობა (არადასველებადობა) და კიდურა  $\Theta$  კუთხე, მით მეტია ნაწილაკზე ბუშტის მიწებების პერიმეტრი და მისი ამოტივტივების ალბათობა.

ნაწილაკების ამოტივტივების შედეგად წყლის ზედაპირზე წარმოიქმნება ე. წ. მინერალიზებული ქაფის ფენა, რომელიც სავსეა ჰიდროფობური მინერალის ნაწილაკებით; სხვა, უფრო დასველებადი მინერალების ნაწილაკები კი რჩება პულპის მოცულობაში შეტივტივებულ მდგომარეობაში და თანდათანობით ეშვება ძირს. მაგრამ მოძრავი ქაფი,

რომელიც შეიქმნა მხოლოდ ჰიდროდინამიკური პირობების (ბარბოტაჟის) ხარჯზე, ადვილად ირღვევა, მისი ბუშტები სწრაფად ერთდება. გარდა ამისა მინერალებს იშვიათად აქვთ ბუნებრივი ფლოტირების უნარი, ე. ი. როგორც წესი მცირედ განსხვავდება დასველების უნარის მიხედვით. ამიტომ ფლოტაციის ხელსაყრელი პირობების შესაქმნელად პულპაში შეჰყავთ სხვადასხვა ფლოტაციური რეაგენტები. ჰაერის ბუშტების მდგრადობის გასადიდებლად და პულპის ზედაპირზე მათგან სტაბილური ქაფის წარმოსაქმნელად მასში უმატებენ ქაფწარმომქმნელებს, ე. ი. ზედაპირულად აქტიურ ნივთიერებებს, რომლებიც ბუშტების ზედაპირზე წარმოქმნის ადსორბციულ აფსკს. ქაფწარმომქმნელად იყენებენ ფიჭვის ზეთს, ქვანახშირის ფისის ზოგიერთ ფრაქციას, მერქნის კუპრს და სხვ.

ცალკეული მინერალების ჰიდროფობურობის ასამაღლებლად პულპაში შეჰყავთ კოლექტორები (შემგროვებლები), ე. ი. ნივთიერებები, რომლებიც ადსორბირდება ერთ, რომელიმე მინერალზე, ფარავს რა მის ზედაპირს ჰიდროფობური აფსკით და არ ადსორბირდება სხვაზე. შედეგად ჰიდროფობური ნაწილაკები გროვდება ბუშტების ზედაპირზე და ამოტივტივდება. ფლოტორეაგენტ-კოლექტორების გამოყენება იძლევა რთული მინერალური ნედლეულის სელექციურად ფლოტაციის საშუალებას, ე. ი. შეიძლება მიმდევრობით გამოიყოს კონცენტრატების ამოტივტივებული ფრაქციები.

გასაყოფ ქანში შემავალი სხვა მინერალების ჰიდროფილურობის გასადიდებლად პულპაში უმატებენ ჩამსშობებს, რომლებიც ახშობს ამოტივტივების შესაძლებლობას. გამოსაყოფი მინერალისაგან დამოკიდებულებით შემგროვებლედ იხმარება ოლეინის მჟავა, ნაფტენური მჟავები და ასიმეტრიული სტრუქტურის სხვა ორგანული ნივთიერებები, რომელთაც

აქვთ მცირე პოლარული და დიდი არაპოლარული ნაწილები. ადსორბციის დროს პოლარული ჯგუფები შერჩევითად მაგრდება მინერალის ზედაპირზე, არაპოლარულები კი ორიენტირდება წყლის მხარეს და ქმნის ჰიდროფობურ გარსს. ზედაპირულად აქტიური რეაგენტების – ქაფწარმომქმნელებისა და შემგროვებლების – გამოყენება მკვეთრად ცვლის ზედაპირულ დაჭიმულობას და დასველების კიდურა Θ კუთხეს, ე. ი. გადაანაცვლებს წონასწორობას ფაზათა საზღვარზე და ადიდება ფლოტაციური პროცესის სინქარეს. ჩამსშობებად იყენებენ სხვადასხვა ელექტროლიტებს, რომელთაც შეუძლია გააძლიეროს მხოლოდ გარკვეული მინერალების ჰიდროფილურობა: კირს, სულფიტებს, ციანმარილებს და სხვ. განმეორებითი ფლოტაციის დროს, რასაც ატარებენ პირველი ფლოტაციისას ჩაძირული მინერალების გასაყოფად, იყენებენ ჩამსშობების მოქმედების გამანეიტრალებელ ნივთიერებებს – აქტივატორებს, მაგალითად, გოგირდმჟავას. ხშირად პულპაში უმატებენ რგულატორებს (სულფატებს, სოდას და სხვ.), რომლებიც ხელს უწყობს სხვა ფლოტაციური რეაგენტების ზემოქმედებას.

ამრიგად, ატარებენ რა კომპლექსური ნედლეულის, მაგალითად. პოლიმეტალური გოგირდოვანი მადნების, სელექციურ (შერჩევით) ფლოტაციას, ქაფთან ერთად მიმდევრობით დებულობენ ამოტივტივებული კონცენტრატების რიგს, რის შედეგადაც წყლის ქვეშ რჩება ფუჭი ქანი – ფლოტაციური კუდი. ამასთან, ფლოტაციური რეაგენტების საერთო ხარჯი დიდი არ არის და 1 ტ ქანზე 100 გ-ს არ აღემატება.

თერმული გამდიდრება ემყარება ნარეგში შემავალი მინერალების განსხვავებულ ღებობადობას. გაცხელებისას ადვილდობადი მასალები გამოედინება ქანიდან გამდნარი სახით. ასე აღნობენ გოგირდს ქანიდან, რომელიც, ძირითადად, შედგება შედარებით ძნელდნობადი

კირქვისა და სხვა მინერალებისაგან; ასე აცალკევებენ ბიტუმს არაორგანული მინარევებისაგან.

გამდიდრების ქიმიური მეთოდები ემყარება რეაგენტების გამოყენებას, რომლებიც შერჩევითად ხსნის ნარევის შემადგენელ ერთ ნივთიერებას, ან წარმოქმნის ერთ-ერთ მათგანთან ლლობის, აორთქლების, დალექვის ან სხვა გზით ადვილად გამოსაყოფ ნაერთებს. ქიმიური გამდიდრების პროცესებს მიაკუთვნებენ აგრეთვე მინერალების გამოწვას კარბონატების დასაშლელად, ორგანული მინარევების ამოწვას და სხვა პროცესებს, რომლებიც ადიდებს პროდუქტში სასარგებლო კომპონენტის კონცენტრაციას. ყველა ამ ოპერაციას ატარებენ არა გამამდიდრებელ ფაბრიკებში, არამედ ნედლეულის ქიმიურად გადამამუშავებელ ქარხნებში.

სითხეები, უფრო მეტად ხსნარები, კონცენტრირდება გამხსნელის აორთქლებით, ხსნარის გაჯერებით სასარგებლო კომპონენტით და, ბოლოს, რომელიმე კომპონენტის (მინარევის) ნალექში (კრისტალიზაცია) ან აირად ფაზაში გამოყოფით (დესორბცია, მინარევების აორთქლება). თხევადი ნარევების გასაყოფად იყენებენ აგრეთვე თხევადფაზურ ექსტრაქციას.

წყლის აორთქლებას ხშირად იყენებენ მინერალური მარილებისა და ტუტეების წარმოებაში, ფერად მეტალურგიაში, ძნელადაქროლადი მყავების (გოგირდის, ფოსფორის, ორგანული) კონცენტრირებისათვის. ბუნებრივი მარილ-ხსნარების კონცენტრირებისათვის აორთქლებენ წყალს (ზაფხულში) ან გამოყინავენ მას (ზამთარში). ნავთობის გადამამუშავებისას სპირტების, ეთერების, ანილინისა და სხვა მრავალი ორგანული პროდუქტის წარმოებაში იყენებენ დისტილაციასა და რექტიფიკაციას, როცა ნარევიდან აორთქლდება (შემდგომო კონდენსაციით) უფრო ძვირფასი კომპონენტი (პროდუქტი), ხოლო თხევად ფაზაში რჩება ნაკლებადღირებული, მაღალმდულარე კომპონენტები (მძიმე ნახშირწყალბადები, წყალი და სხვ.)

თხევადფაზური ექსტრაქცია (ან ექსტრაჰირება) მდგომარეობს თხევადი ნარევის ზოგიერთი კომპონენტის შერჩევით ხსნადობაში. შედეგად ლებულობენ ორ თხევად

ფაზას: ამონაწვლილი კომპონენტების ხსნარსა და ნარევის დარჩენილ ნაწილს. ეს მეთოდი ფართოდ გამოიყენება ორგანულ ნივთიერებათა ტექნოლოგიაში.

აირნარევებს ცალკეულ კომპონენტებად ძირითადად შემდეგი ხერხებით ყოფენ: 1) აირების მიმდევრობითი კონდენსაციით შეკუმშვის ან გაცივების გზით; 2) აირების მიმდევრობითი აორთქლებით მათი წინასწარ გათხევადებული ნარევებიდან; 3) აბსორბციულ-დესორბციული და 4) ადსორბციულ-დესორბციული მეთოდებით.

### 7.3. საკვები ნედლეულის შეცვლა არასაკვებით და მცენარეულისა - მინერალურით

ორგანული ქიმიის მიღწევები იძლევა მრავალი ძვირფასი პროდუქტის მეტად მრავალფეროვანი ნედლეულიდან მიღების საშუალებას. მაგალითად, ეთილის სპირტი, რომელიც უზარმაზარი რაოდენობით იხმარება სინთეზური კაუჩუკის, ხელოვნური ბოჭკის, პლასტიკური მასების, ფეთქებადი ნივთიერებების, ეთერებისა და სხვა წარმოებებში, შეიძლება მივიღოთ საკვები პროდუქტებიდან (მარცვლეული, კარტოფილი, შაქრის ჭარხალი), მერქნის ჰიდროლიზით და ეთილენის ჰიდრატაციით. ეთილენი კი, თავის მხრივ, მიიღება ბუნებრივი აირების, ნავთობისა და სხვა სახის სათბობის ქიმიური გადამამუშავებით. სპირტის წარმოებაში საკვები ნედლეულის გამოდევნა თავდაპირველად დაიწყო მერქანმა. 1 ტ მერქნიდან ჰიდროლიზის შედეგად მიიღება 160 კგ-მდე ეთილის სპირტი, რაც ცვლის 1,6 ტ კარტოფილს ან 0,6 ტ მარცვლეულს. ჰიდროლიზური სპირტის წარმოება უფრო იაფი ჯდება, ვიდრე მისი მიღება საკვები ნედლეულიდან. კომპლექსური ქიმიური გადამამუშავების დროს მერქანი გამოიყენება საკვები ნედლეულის ნაცვლად, აგრეთვე, გლიცერინის, საკვები შაქრის, საკვები საფუარების, ძმრის, ლიმონის, რძის მჟავებისა

და სხვა პროდუქტების მისაღებად. განსაკუთრებით ფართოდ განვითარდა სინთეზური სპირტის წარმოება ეთილენის პირდაპირი ჰიდრატაციით. მცენარეული ნედლეული იდევნება მინერალური ნედლეულის პრაქტიკულად ამოუწურავი მარაგით. ნავთობის აირებიდან მიღებული სინთეზური სპირტის თვითღირებულება სამჯერ ნაკლებია საკვები ნედლეულიდან მიღებულზე. ძლიერ ვითარდება აგრეთვე კაუჩუკის წარმოება ნავთობის თანამგზავრი აირების ბუტან-ბუტილენის ფრაქციის გამოყენებით, ამიტომ ეთილის სპირტმა დაჰკარგა დომინირებული მნიშვნელობა სინთეზური კაუჩუკის წარმოებაში. აირებისა და ნავთობის გადამუშავების პროდუქტებიდან ამჟამად დებულობენ აგრეთვე გლიცერინს, ძმარმჟავასა და ცხიმებს გამრეცხი საშუალებების წარმოებისათვის. ამით იზოგება დიდი რაოდენობით საკვები ნედლეული და მიიღება უფრო იაფი პროდუქცია.

მცენარეული და ცხოველური ნედლეული, ძირითადად უკვე გამოდევნილია მინერალურით სინთეზური საღებრების, ლაქების, მრავალი სამკურნალო პრეპარატის, პლასტიკური მასების უმრავლესობის, სურნელოვანი ნივთიერებებისა და რიგ სხვა წარმოებაში. მცენარეული ნედლეული იდევნება ბუნებრივი აირების, ნავთობისა და ქვანახშირისაგან მიღებული ნივთიერებებით კაუჩუკის, ქიმიური ბოჭკოს, სპირტების, ორგანული მჟავების, გამრეცხი საშუალებების წარმოებაში; რიგშია არასაკვები ნივთიერებებიდან კვების ძირითადი პროდუქტების – სახამებლის, შაქრის და, ბოლოს, ცილების შემადგენელი ნაწილების - სინთეზის საკითხი. ბიოქიმიური გარდაქმნებით ახლა უკვე დებულობენ ნავთობგადამამუშავებელი და ცელულოზა-ქაღალდის მრეწველობის ნარჩენებიდან ცილოვან საფუარს პირუტყვის საკვებად. საკვები ნედლეულის – მცენარეულისა და ცხოველურის – მინერალურით შეცვლას მივყავართ ნედ-

ლეულის ბაზის მნიშვნელოვანი გაფართოებისა და მისი გაიაფებისაკენ, რაც თავისთავად ამცირებს ძირითად საწარმოო მაჩვენებელს – ქიმიური პროდუქციის თვითღირებულებას.

## 7.4. წყალი ქიმიურ მრეწველობაში

ქიმიური მრეწველობა წყალს იყენებს ძალიან დიდი რაოდენობით და მეტად სხვადასხვაგვარი მიზნებისათვის. ეს აიხსნება წყლის მნიშვნელოვანი თვისებების კომპლექსით, მისი ხელმისაწვდომობითა და გამოყენების მოხერხებულობით. ქიმიურ წარმოებებს, ჩვეულებრივ, წყლის წყაროების ახლოს აშენებენ. წყლის გამოყენება ქიმიურ წარმოებებში უაღრესად მრავალფეროვანია. ზოგ წარმოებაში იგი ნედლეული ან რეაგენტია, რომელიც უშუალოდ მონაწილეობს ძირითად ქიმიურ რეაქციებში, მაგალითად, სხვადასხვა მეთოდით წყალბადის წარმოებაში, შესაბამისი აირებიდან და წყლიდან გოგირდისა და აზოტის მჟავების მიღებისას, სოდის, ნატრიუმის, კალიუმის, კალციუმისა და სხვა ჰიდროქსიდების წარმოებაში, ჰიდროლიზისა და ჰიდრატაციის სხვადასხვა რეაქციებში. ზოგიერთ წარმოებაში წყალი კი არ მოიხმარება, არამედ წარმოიქმნება ძირითადი რეაქციის შედეგად, მაგალითად, ფისზედა წყალი ქვანახშირის კოქსისასა და ხის, ტორფისა და სხვა სახის სათბობის მშრალი გამოხდის დროს; წყალი გამოიყოფა სათბობის წვის დროს, ამიაკის და სხვა წყალბადშემცველი ნაერთების ჟანგვისას.

ქიმიური, მეტალურგიული, კვებისა და მსუბუქი მრეწველობის მრავალ წარმოებაში წყალი გამოიყენება როგორც მყარი, თხევადი და აირადი ნივთიერებების გამხსნელი. ხშირად მას იყენებენ აირებისა და მყარი მასალების მექანიკური გარეცხვისათვის, რომლებსაც იგი აცლის ჭუჭყს. ფხვიერი მასალების ფლოტაციით ან სხვა სველი მეთოდებით გამდიდრების დროს წყალს იყენებენ მათი პულპირებისა და ქიმიური დამუშავებისას. ყველა ჩამოთვლილ მაგალითებში



წყალი გამოიყენება უშუალოდ ტექნოლოგიური მიზნებისათვის. გაცილებით დიდი რაოდენობით გამოიყენება წყალი, როგორც სითბოს გადამტანი: წყლით აცივებენ ეგზოთერმული რეაქციის შედეგად გაცხელებულ მორეაგირე მასებს. წყლის ორთქლი ან ცხელი (არაიშვიათად გადახურებული) წყალი გამოიყენება ურთიერთმოქმედი ნივთიერებების გასაცხელებლად, პროცესის დასაჩქარებლად, ან ენდოთერმულ პროცესში დასარჯული სითბოს კომპენსაციისათვის. მორეაგირე მასებსა და წყალს შორის თბოცვლისათვის იყენებენ მრავალგვარ თბომცვლელებს, მაცივრებსა და მაცხელებლებს, რომლებშიც სითბო ზოგჯერ გადაიცემა წყლისა და მასალების უშუალო შეხებით, უფრო ხშირად კი კედლების საშუალებით თხევად ან აირად მორეაგირე მასებზე. თანამედროვე ქიმიური წარმოებები წყალს უზარმაზარი რაოდენობით ხარჯავენ, რაც დიდი კომბინატებისათვის დღე-ღამეში მილიონ კუბურ მეტრებით განისაზღვრება. წყლის ხარჯვითი კოეფიციენტი შეადგენს: ამიაკისათვის - 1500 მ<sup>3</sup>/ტ, ვისკოზური აბრეშუმისათვის - 2500 მ<sup>3</sup>/ტ-ს, კონტაქტური გოგირდმჟავისათვის - 50 მ<sup>3</sup>/ტ-ს და სხვ. ამ წყლის უმეტესი ნაწილი (ძირითადად ტექნიკური) გაცივების ან გაწმენდის შემდეგ შეიძლება კვლავ დაბრუნდეს იმავე წარმოებაში; მას საბრუნო წყალი ეწოდება.

წყალი არის მრავალი მყარი, თხევადი და აირადი ნივთიერების კარგი გამხსნელი, ამიტომ ბუნებრივი წყალი, ჩვეულებრივ, სხვადასხვა მინარევებს შეიცავს. მიღებულია ბუნებრივი წყლების დაყოფა სამ ჯგუფად, რომლებიც ძლიერ განსხვავდება ერთმანეთისაგან მინარევების შემცველობითა და სხვა მახასიათებლებით.

*ატმოსფერული წყალი* – წვიმისა და თოვლის წყალი – ხასითდება მინარევების, ძირითადად, ხსნადი აირების, ჟანგბადის, ნახშირორჟანგის, და აგრეთვე გოგირდწყალბადის, აზოტის ოქსიდების, გოგირდის ჟანგბადნაერთებისა და ორგანული ნივთიერებების შედარებით მცირე შემცველობით, რომლებიც აჭუჭყიანებს ატმოსფეროს სამრეწველო რაი-

ონებში. ატმოსფერული წყალი თითქმის არ შეიცავს გახსნილ მარილებს, კერძოდ კალციუმისა და მაგნიუმის მარილებს.

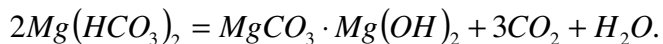
*ზედაპირული წყლები* – მდინარეების, ტბების, ზღვის წყლები – გარდა ატმოსფერულ წყლებში შემავალი მინარევებისა, შეიცავს მრავალგვარ ნივთიერებებს; თითქმის ყოველთვის შეიცავს კალციუმის, მაგნიუმის, ნატრიუმის, კალიუმის კარბონატებს, სულფატებსა და ქლორიდებს უმცირესი რაოდენობიდან დაწყებული სრულ გაჯერებამდე. ზღვის წყალში წარმოდგენილია ელემენტების თითქმის მთელი ტაბულა ძვირფასი და რადიოაქტიური ლითონების ჩათვლით. წყალს, რომლის 1 კგ 1 გ-ზე ნაკლებ მარილებს შეიცავს, მტკნარი ეწოდება, ხოლო თუ 1 გ-ზე მეტს – მარილიანი.  $Ca^{2+}$  და  $Mg^{2+}$  იონების შემცველობის მიხედვით, რომლებიც ორთქლის ქვაბებში, სარეაქციო აპარატებსა და თბომცვლელებში ნალექს (მინადულს) წარმოქმნის, ასხვავებენ რბილ ( $Ca^{2+}$  და  $Mg^{2+}$  3 მგ.ეკვ./დმ<sup>3</sup>-მდე), ზომიერად ხისტ (3-6 მგ.ეკვ./დმ<sup>3</sup>-მდე) და ხისტ (6 მგ.ეკვ./დმ<sup>3</sup>-ზე მეტი) წყალს.

*მიწისქვეშა წყლები* – არტეზიული ჭაბურღილების, ჭების, წყაროების, ჰეიზერების წყლები – ხასიათდება გახსნილი მარილების შემცველობის მრავალფეროვნებით, რაც დამოკიდებულია იმ ნიადაგებისა და მთის ქანების შედგენილობასა და სტრუქტურაზე, რომლებშიც გაიჟონება ატმოსფერული და ზედაპირული წყალსაცავების წყლები, წარმოქმნის რა მიწისქვეშა წყალსაცავებს. ნიადაგებისა და მთის ქანების მფილტრავი უნარი განაპირობებს მიწისქვეშა წყლის დიდ გამჭვირვალობასა და მათში ორგანული წარმოშობის მინარევების არარსებობას. ქიმიური წარმოებებისათვის უნიკალური ნედლეულია სხვადასხვა მარილებით გაჯერებული მიწისქვეშა მინერალური წყლები. მაგალითად, ნატრიუმის ქლორიდით გაჯერებული მინერალური წყლები არის ნედლეული სოდის, ნატრიუმის ტუტისა და ქლორის წარმოებისათვის. მიწისქვეშა წყლებიდან ღებულობენ აგრეთვე იოდიდებს, ბრომიდებსა და სხვა მარილებს.

წყლის ხარისხი განისაზღვრება მისი ფიზიკური და ქიმიური მახასიათებლებით, როგორცაა გამჭვირვალობა, ფერი, სუნი, ტემპერატურა, საერთო მარილშემცველობა, სიხისტე, ჟანგადობა და მჟავიანობა (ტუტიანობა). ეს მაჩვენებლები მიუთითებს ამა თუ იმ მინარევების არსებობას ან არარსებობას.

საერთო მარილშემცველობა ახასიათებს წყალში მინერალური და ორგანული მინარევების არსებობას. მათ რაოდენობას (მგ/დმ<sup>3</sup>) საზღვრავენ 1 ლ წყლის აორთქლებით და მყარი ნაშთის 110°C-ზე მუდმივ წონამდე გამოშრობით მიღებული მშრალი ნალექის მისხედვით. მშრალი ნაშთის მუქ-წითელ ვარვარებამდე გაცხელებით, მასათა სხვაობის მიხედვით, შეიძლება ცალკე განისაზღვროს მინერალური და ორგანული ნივთიერებების რაოდენობა. უმეტესი წარმოებებისათვის წყლის ძირითადი ხარისხობრივი მაჩვენებელია სიხისტე, გაპირობებული წყალში კალციუმისა და მაგნიუმის მარილების შემცველობით. სიხისტე გამოიხატება 1 დმ<sup>3</sup> წყალში  $Ca^{2+}$ -სა და  $Mg^{2+}$ -ის იონების მილიგრამ-ეკვივალენტებში, ე. ი. სიხისტის ერთეულად მიღებულია 20,04 მგ/დმ<sup>3</sup>  $Ca^{2+}$ -ის ან 12,16 მგ/დმ<sup>3</sup>  $Mg^{2+}$ -ის იონების შემცველობა. განასხვავებენ სამი სახის სიხისტეს: დროებითს, მუდმივსა და საერთოს.

დროებითი (კარბონატული) სიხისტე გაპირობებულია წყალში კალციუმისა და მაგნიუმის ბიკარ-ბონატების არსებობით, რომლებიც წყლის ადულებისას გარდაიქმნება უხსნად კარბონატებად და გამოიყოფა მკვრივი ნალექის (მინადულის) სახით:



მუდმივ (არაკარბონატულ) სიხისტეს იწვევს წყალში კალციუმისა და მაგნიუმის ყველა ისეთი სახის მარილების შემცველობა, რომლებიც ადუ-

ლებისას გახსნილ მდგომარეობაში რჩება. დროებითი და მუდმივი სიხისტის ჯამს *საერთო სიხისტეს* უწოდებენ. სიხისტის მიხედვით მიღებულია ბუნებრივი წყლების შემდეგი კლასიფიკაცია:

|  |             |       |                |       |             |
|--|-------------|-------|----------------|-------|-------------|
| $Ca^{2+}$ -ის და $Mg^{2+}$ -ის რაოდ. წყალში, მგ.ეკვ./დმ <sup>3</sup> . | 0-1,5       | 1,5-3 | 3-6            | 6-10  | >10         |
| წყლის სიხისტის კლასი   | ძლიერ რბილი | რბილი | ზომიერად სისტი | სისტი | ძლიერ სისტი |

წყლის ჟანგადობა გაპირობებულია მასში ორგანული მინარევებით და განისაზღვრება კალიუმის პერმანგანატის მილიგრამების რიცხვით, რომელიც 1 ლ წყლის ჭარბ  $KMnO_4$ -თან 10 წთ-ის განმავლობაში დუდილის დროს იხარჯება.

წყლის რეაქცია – მისი მჟავიანობის ან ტუტიანობის ხარისხი – ხასიათდება წყალბადიონების კონცენტრაციით და განისაზღვრება ინდიკატორებით. ბუნებრივი წყლების რეაქცია ახლოსაა ნეიტრალურთან, pH მერყეობს 6,8-7,3-ის საზღვრებში. საბრუნავი წყლის რეაქცია დამოკიდებულია წარმოების ხასიათზე.

წყალში მინარევების შემცველობა რეგლამენტირდება შესაბამისი სტანდარტებით. მინარევების მავნეობა დაკავშირებულია მათ ქიმიურ შედგენილობასა ან დისპერსიულ მდგომარეობასთან, და აგრეთვე, ამ წყლის მომხმარებელი წარმოების ხასიათთან. მსხვილ-დისპერსიული მექანიკური ტივტივარები ანაგვიანებს მილგაყვანილობასა და აპარატურას, ამცირებს მათ მწარმოებლურობას, წარმოქმნის საცობებს, რომლებსაც შეუძლია ავარიის გამოწვევა. კოლოიდური ნაწილაკების სახით არსებული მინარევები ანაგვიანებს ელექტროლიზირების დიაფრაგმებს, იწვევს წყლის აქაფებას და მის გადასროლას ქვაბებსა და აპა-

რატებში. დიდი ზარალი მოაქვს წყალში გახსნილ მარილებსა და აირებს, რომლებიც წარმოქმნის მინადულებს და შლის ლითონების ზედაპირს კოროზიის შედეგად

სამრეწველო წყალმომარაგება წარმოადგენს ოპერაციათა კომპლექსს, რომელიც უზრუნველყოფს წყლის გაწმენდას, მისგან მოლეკულურად გახსნილი, კოლოიდურ და შეტივტივებულ მდგომარეობაში მყოფი მანე მინარევების მოცილებას. წყალმომარაგების ძირითადი ოპერაციებია: შეტივტივებული მინარევებისაგან გაწმენდა დაწდომითა და გაფილტვრით, დარბილება, ცალკეულ შემთხვევებში გაუმარილოება, ნეიტრალიზაცია, დეაირაცია და გაუსნებოვნება.

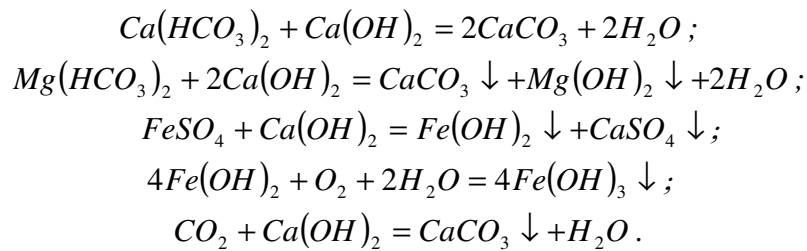
დაწდომის პროცესი იძლევა წყლის გაკამკამების საშუალებას მისგან მსხვილდისპერსიული შეტივტივებული მინარევების მოცილების შედეგად, რომლებიც სიმძიმის ძალის მოქმედებით ილექება საწდომის ფსკერზე. წყლის დაწდომის პროცესს ატარებენ უწყვეტად მოქმედ საწდომ, დაბეტონებულ რეზერვუარებში. სრული გაკამკამებისა და გაუფრულების მისაღწევად საწდომიდან დეკანტირებულ წყალს უტარებენ კოაგულაციას შემდგომი გაფილტვრით. კოაგულაცია ჰეტეროგენული სისტემების გაყოფის მაღალეფექტური პროცესია, კერძოდ, წყლიდან თიხის უმცირესი ნაწილაკებისა და ცილოვანი ნივთიერებების გამოსაყოფად. კოაგულაციას ახორციელებენ გასაწმენდ წყალში მცირე რაოდენობით  $Al_2(SO_4)_3$  -ის,  $FeSO_4$  -ის და ზოგიერთი სხვა ნივთიერების შეტანით, რომლებსაც კოაგულანტებს უწოდებენ. ამ პროცესის ფიზიკურ-ქიმიური არსი გამარტივებული სახით იმაში მდგომარეობს, რომ კოაგულანტი, ადსორბირდება რა დამუხტული კოლოიდური ნაწილაკის ზედაპირზე, ანეიტრალებს მის მუხტს. ეს იწვევს ცალკეული ნაწილაკების შეერთებას (კოაგულაციას) და ნალექის წარმოქმნას. რაც მეტია კოაგულანტის იონის მუხტი

( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ), მით ნაკლებია ელექტროლიტის ხარჯი კოაგულაციაზე. ურყოფითი მუხტის მქონე თიხოვანი კოლოიდური ნაწილაკების კოაგულაციისათვის (ბუნებრივ წყლებში) უფრო ხშირად იყენებენ ალუმინის ნაერთებს – სულფატებს ან შაბებს. ამავე დროს ნალექის ზედაპირზე ადსორბირდება ორგანული ნაერთები, რის შედეგადაც წყალი უფერულდება.

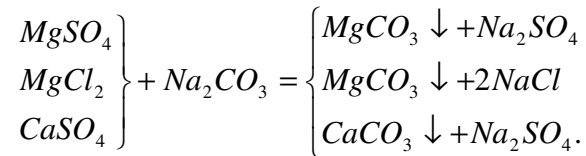
წყლის გაფილტვრა სუსპენზიისაგან გასაწმენდად, ჩვეულებრივ, დაწდომის შემდეგი პროცესია. ხშირად იყენებენ ინერტული მფილტრაჟი მასალის, მაგალითად, სილისფენიან ფილტრებს.

წყლის დარბილება ითვალისწინებს სიხისტის გამომწვევი კალციუმისა და მაგნიუმის მარილების მოცილებას. მრეწველობაში იყენებენ დარბილების სხვადასხვა მეთოდებს, რომელთა არსიც მდგომარეობს რეაგენტების საშუალებით  $Ca^{2+}$  და  $Mg^{2+}$  იონების უხსნარ და ადვილად მოსაცილებელ ნაერთებად შეკავშირებაში. გამოყენებული რეაგენტების მიხედვით ასხვავებენ კირის (ჩამქრალი კირი), სოდის (კალციინირებული სოდა), ნატრონულ (ნატრიუმის ტუტე) და ფოსფატურ (ტრინატრიფოსფატი) ხერხებს. ქიმიური მეთოდებიდან ყველაზე ეკონომიურია დარბილების კომბინირებული ხერხის გამოყენება, რომელიც ითვალისწინებს დროებითი და მუდმივი სიხისტის მოცილებას და, აგრეთვე,  $CO_2$ -ის შეკავშირებას, რკინის იონების მოცილებას, ორგანული და სხვა მინარევების კოაგულაციას. ასეთი მეთოდი ფოსფატურთან კომბინირებული კირ-სოდის მეთოდი, რაც უფრო სრულ დარბილებას უზრუნველყოფს. პროცესის ქიმიზში შემდეგი რეაქციებით გამოიხატება:

1. ჩამქრალი კირით დამუშავება დროებითი სიხისტისა და რკინის იონების მოსაშორებლად და  $CO_2$ -ის შესაკავშირებლად:

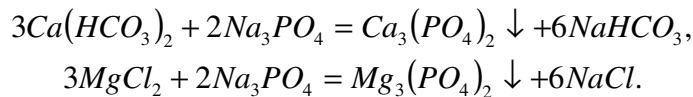


2. კალციონირებული სოდით დამუშავება მუდმივი სიხისტის მოსაცილებლად:



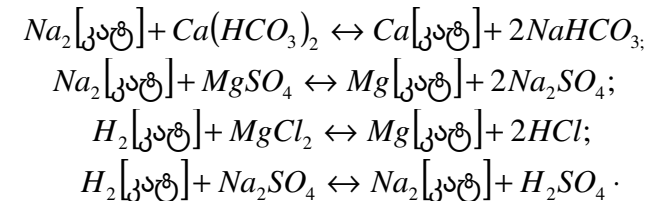
კირ-სოდის მეთოდი იძლევა მხოლოდ უხეში დარბილების საშუალებას, 0,3 მგ.ეკვ/დმ<sup>3</sup>-მდე.

3. ტრინატრიფოსფატით დამუშავება ( $Ca^{2+}$  და  $Mg^{2+}$  იონების უფრო სრული დალექვა, დაახლოებით 0,03 მგ.ეკვ/დმ<sup>3</sup>-მდე):

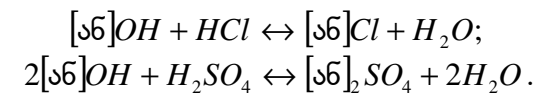


კალციუმისა და მაგნიუმის ფოსფატების ხსნადობა უაღრესად მცირეა, რაც განსაზღვრავს ფოსფატური მეთოდის მაღალ ეფექტურობას. ნიშნულთან ეკონომიკურ ეფექტს იძლევა ქიმიური მეთოდების შეთავსება ფიზიკურ-ქიმიურთან, ე. ი. იონმიმოცვლითთან. წყლის დარბილების იონმიმოცვლითი მეთოდის არსი მდგომარეობს წყლიდან  $Ca^{2+}$ -ისა და  $Mg^{2+}$ -ის იონების მოცილებაში იონიტების საშუალებით,

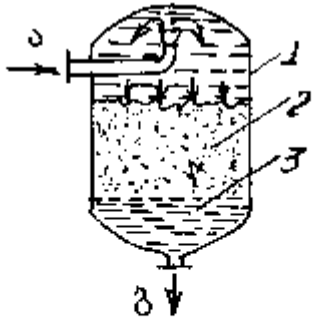
რომელთაც უნარი აქვთ თავისი იონები გაცვალონ წყალში შემავალ იონებზე. ასხვავებენ კატიონური და ანიონური მიმოცვლის პროცესებს. შესაბამისად, იონიტებს უწოდებენ *კატიონიტებსა და ანიონიტებს*. კატიონიტებად იყენებენ  $H^+$ -ის,  $Na^+$ -ის ან  $NH_4^+$ -ის იონებიანი აქტიური ჯგუფების შემცველ სულფონახშირს ან მაღალმოლეკულურ ფისებს. დარბილების კატიონურ პროცესს საფუძვლად უდევს კატიონების – ნატრიუმისა და წყალბადის იონების – კალციუმისა და მაგნიუმის იონებზე მიმოცვლის რეაქციები. ნატრიუმის იონების მიმოცვლას *Na-კატიონირება* ეწოდება, ხოლო წყალბადის იონებისას – *H-კატიონირება*:



ამგვარადვე გამოყოფენ წყლიდან სხვა ლითონების იონებსაც. ანიონიტებია  $OH^-$ -ის,  $HCO_3^-$ -ის ან  $CO_3^{2-}$ -ის იონებიანი აქტიური ჯგუფების შემცველი მაღალმოლეკულური ნივთიერებები. გაატარებენ რა ანიონიტების ფენაში ლითონების იონებისაგან კატიონტური პროცესით წინასწარ გაწმენდილ წყალს, აცილებენ მისგან ანიონებსაც, რომელთა შემცველობაც არ არის დასაშვები მოცემული პროცესისათვის გათვალისწინებულ წყალში:



მოყვანილი რეაქციები გვიჩვენებს, რომ იონმი-  
მოცვლით ხერხს შეუძლია უზრუნველყოს წყლის  
დარბილება და გაუმარილოება, ე.ი. წყლიდან არა  
მარტო სიხისტის გამომწვევი, არამედ ყველა მარილის  
სრული მოცილება. იონმიმოცვლითი პროცესი შექცე-  
ვადია და გაჯერებული იონიტების მიმოცვლითი უნა-  
რის აღდგენისათვის ატარებენ რეგენერაციის პრო-  
ცესს. *Na*-კატიონიტების რეგენერაციას ახორციელებ-  
ენ სუფრის მარილის ხსნარით, ხოლო *H*-კატიო-  
ნიტებისას – მინერალური მუავების ხსნარებით.  
ანიონიტების რეგენერაციას ატარებენ ტუტების, ნატ-  
რიუმის კარბონატის ან ბიკარბონატის ხსნარებით.



ნახ. 7.7 . კატიონიტური ფილტრის სქემა:  
1 - კორპუსი; 2 - კატიონიტის ფენა; 3 - თალღა-  
ქებიანი ზისოსი; ა - წყლის და სარეგენერაციო  
ხსნარის შესასვლელი; ბ - დარბილებული წყლის  
და სარეგენერაციო ხსნარის გამოსასვლელი.

ნეიტრალიზაციას ძირითადად იყენებენ საბრუ-  
ნავი წყლის დასამუშავებლად, რომელიც საწარმოო  
პროცესებში ანიონებით ჭუჭყიანდება; ნეიტრალიზაცი-  
ისათვის იყენებენ კირს ან სოდას.

წყლის დეაირაცია ისეთი მანე, კოროზიის გა-  
მომწვევი აირებისაგან, როგორცაა  $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$ ,  
ხორციელდება აერირებით, ე. ი. ჰაერის წყალთან შე-  
ხებით შხეფმაცივრებში, ან მისი გაშხეფებით. იყენებენ

ქიმიურ რეაგენტებსაც, მაგალითად,  $H_2S$ -ს ჟანგავენ  
ქლორით, ჟანგბადის მოსაცილებლად წყალში უმა-  
ტებენ აღმდგენლებს, მაგალითად, ნატრიუმის სულ-  
ფიტს.

წყლის გაუსნებოვნება (დეზინფექცია) ხორცი-  
ელდება ქლორირებით, ოზონირებით. ქიმიურ საწარ-  
მოებში სპეციალური გაუსნებოვნება იშვიათად გამო-  
იყენება.

წყლის სრული გაწმენდა – გაუმარილოება, და  
აგრეთვე, ნაწილობრივი დეაირაცია და გაუსნებოვნება  
– მიიღწევა მისი გამოხდით. დისტილირებული წყალი  
ფართოდ გამოიყენება სუფთა პროდუქტების წარმოე-  
ბასა და ლაბორატორიულ პრაქტიკაში.

წარმოებაში გამოყენების დროს წყალი, ჩვეუ-  
ლებრივ, ცხელდება, ამიტომ საბრუნავ წყალს  
აცივებენ სპეციალურ წყალსატევებში (გუბურებში),  
აუზებში გაშხეფებით, წყობურიან შხეფმაცივრებში  
გამაცივებელი ჰაერის შემხვედრად ჩამოდინებით.

წყალმომზადების აღწერილი მეთოდები ამა თუ  
იმ ზომით შეიძლება გამოვიყენოთ საწარმოთა  
ჩამდინარე წყლების გაწმენდის დროსაც, რომელიც  
დიდი რაოდენობით კვლავ ბრუნდება წარმოებაში  
ხელმეორედ გამოყენებისათვის. ჩამდინარე წყლების  
მანე მოქმედებისაგან გარემოს დაცვის პრობლემის  
ყველაზე რადიკალური გადაწყვეტა მდგომარეობს  
ჩაკეტილი ჩაუმდინარი ციკლების შექმნაში.

## 7.5. ქიმიური მრეწველობის ენერგეტიკა

ქიმიურ მრეწველობაში მიმდინარეობს მრავალი  
პროცესი, რომლებიც დაკავშირებულია ენერგიის  
გამოყოფასა, დახარჯვასა ან ურთიერთგარდაქმასთან.  
ენერგია იხარჯება არა მარტო უშუალოდ ქიმიური

რეაქციის ჩატარებაზე, არამედ დამხმარე ოპერაციებზეც, როგორცაა მასალების ტრანსპორტირება, დამსხვრევა, გაფილტვრა, აირების შეკუმშვა და სხვ. ამა თუ იმ ქიმიური წარმოების ენერგოტევადობის მაჩვენებელია ენერჯის ხარჯი მიღებული პროდუქციის ერთეულზე. ენერჯის ხარჯი სამრეწველო პრაქტიკაში განისაზღვრება პროდუქციის წონით ან მოცულობით ერთეულზე დახარჯული კილოვატსაათების, კილოჯო-ულების ან სათბობის (ტონა, კილოგრამი, კუბური მეტრი) რაოდენობით: კვტ.სთ/ტ, კვ/კგ, ტ/ტ, კგ/მ<sup>3</sup> და სხვ. ენერჯის ხარჯი სხვადასხვა ქიმიური პროდუქტების მიღებაზე ერთნაირი არ არის. არის წარმოებები, რომლებიც გამოირჩევა დიდი ენერგოტევადობით და შედარებით მცირე ენერჯის მომხმარებელი წარმოებები. ზოგიერთ საწარმოში ჭარბობს ეგ-ზოთერმული რეაქციები, რომელთა სითბოც გამოიყენება სასაქონლო ორთქლის მისაღებად; ეს ამცირებს ენერჯის ხარჯს. ასეთია, მაგალითად გოგირდმჟავის წარმოება.

ამა თუ იმ ქიმიურ წარმოებაში გამოყენებული ენერჯის ძირითადი სახეები დამოკიდებულია ტექნოლოგიური პროცესის ხასიათზე. ყველაზე უფრო ხშირად იყენებენ ელექტრულ და თბურ ენერჯიას.

ელექტროენერჯია ქიმიურ მრეწველობაში გამოიყენება ელექტროქიმიური (ხსნარებისა და ნალღობების ელექტროლიზი), ელექტროთერმული (ღღობა, გაცხელება, სინთეზები მაღალ ტემპერატურაზე) და ელექტრომაგნიტური პროცესებისათვის. ქიმიურ მრეწველობაში გამოიყენება ისეთი პროცესები, რომლებიც დაკავშირებულია ელექტროსტატიკური მოვლენებით სარგებლობასთან (მტვრისა და ნისლეების დალექვა, ნახშირწყალბადების ელექტროკრეკინგი და სხვ.). ფართოდ სარგებლობენ ქიმიურ ტექნოლოგიაში ელექტროენერჯის მექანიკურად გარდაქმნით, რაც აუცილებელია ისეთი ფიზიკური ოპერაციებისათვის, როგო-

რიცაა დამსხვრევა, დალექვა, შერევა, ცენტრიფუგირება, ვენტილატორების, კომპრესორების, ტუმბოების მუშაობა და სხვ. ქვემოთ მოყვანილია ელექტროენერჯის საშუალო ხარჯი ზოგიერთი ქიმიური პროდუქტის წარმოებაზე:

| პროდუქტი                    | ენერჯის ხარჯი, კვტ.სთ/ტ. |
|-----------------------------|--------------------------|
| ალუმინი                     | 16000-20000              |
| მაგნიუმი                    | 17500-18000              |
| კალციუმის კარბიდი, 80%-იანი | 2700-3200                |
| სინთეზური ამიაკი            | 3000-3500                |
| ფოსფორი                     | 13000-20000              |
| ქლორი                       | 2300-3500                |
| გოგირდმჟავა                 | 60-100                   |
| ამონიუმის სულფატი           | 30-70                    |
| ამონიუმის გვარჯილა          | 7-15                     |
| სუპერფოსფატი                | 2-10                     |

თბური ენერჯია ქიმიურ მრეწველობაში გამოიყენება მეტად მრავალფეროვანი ფიზიკური პროცესების განსახორციელებლად, რომელთაც არ ახლავს ქიმიური რეაქციები (გაცხელება, შრობა, აორთქლება, დისტილაცია და სხვ.) და რეაგენტების გასაცხელებლად რეაქციების ჩატარებისას. ამასთან თბომატარებლად გამოიყენება სათბობის წვით მიღებული საცეცხლის აირები, წყლის ორთქლი, ბირთვული ენერჯია და სხვ.

ბოლო წლებში ქიმიურ მრეწველობაში თანდათანობით ფეხს იკიდებს რადიაციულ-ქიმიური პროცესები, რომლებშიც რადიოაქტიური გამოსხივების გავლენით მიმდინარეობს პოლიმერიზაციისა და მრავალი ორგანული ნაერთის წარმოქმნის რეაქციები (იხ, V თავი). ატომური ენერჯეტიკის შემდგომი განვითარება ატომური ენერჯის მშვიდობიანი მიზნები-

სათვის გამოყენებით არის თანამედროვეობის უმნიშვნელოვანესი ამოცანა.

სინათლის ენერჯია უკანასკნელ ხანს სულ უფრო მეტად გამოიყენება ქიმიურ მრეწველობაში ფოტოქიმიური რეაქციების რეალიზაციისათვის, ელემენტებიდან ქლორწყალბადის სინთეზის, ორგანული ნაერთების ჰალოგენირებისა და სხვა პროცესებისათვის. ფოტოქიმიური მოვლენები, რომლებშიც სინათლის ენერჯია ელექტროენერჯიად გარდაიქმნება, გამოიყენება ტექნოლოგიური პროცესების ავტომატური მართვისა და კონტროლისათვის.

ქიმიური საწარმოების განლაგება, რომლებიც ენერჯიის მოხმარების დიდი მასშტაბებით გამოირჩევა, დამოკიდებულია იაფი სათბობისა და ელექტროენერჯიის არსებობაზე. ამასთან დაკავშირებით საჭიროა აღინიშნოს ადგილობრივი ნედლეულის სახეების როლი, რომლებიც, როგორც წესი, შემოტანილზე იაფი ჯდება, თუმცა ხშირად დიდ მანძილზე მიღგაყვანილობით ტრანსპორტირებული აირის გამოყენება უფრო რენტაბელურია, ვიდრე ადგილობრივი სათბობით სარგებლობა.

## 7.6. წყალბადი

ატმოსფერული ჰაერის ძირითადი გამაჭუჭყიანებელია გამონახობლქვი, რომელიც წარმოიქმნება სამრეწველო-ენერგეტიკულ ობიექტებზე (თეც და სხვ.) და საავტომობილო ძრავებში. ენერგეტიკის, მრეწველობისა და ტრანსპორტის განვითარებას თან ახლავს ატმოსფეროში ისეთი მავნე ნივთიერებების გამონახობლქვის ზრდა, როგორცაა გოგირდის დიოქსიდი, აზოტისა და ნახშირბადის ოქსიდები, ნახშირწყალბადები. გამოთვლილია, რომ 1975-1980 წლების პერიოდში აირადი გამონახობლქვის რაოდენობა ატმო-

სფეროში 30%-ით გაიზარდა, ამასთან შესაბამისად გაიზარდა ჰაერის გაჭუჭყიანებით გამოწვეული ეკონომიკური ზარალი, რაც ყოველწლიურად ათეულობით მილიარდ დოლარს შეადგენს.

მრავალი სპეციალისტის (ენერგეტიკოსებისა და ქიმიკოს-ტექნოლოგების) აზრით მომავლის ყველაზე პერსპექტიული ეკოლოგიური სათბობი არის წყალბადი. ჰაერში წყალბადის წვის დროს ერთადერთი მავნე კომპონენტი წვის პროდუქტებში შეიძლება იყოს აზოტის ოქსიდები  $NO_x$ ; მაგრამ  $NO_x$  -ის რაოდენობა დამოკიდებულია ჰაერის მიწოდების რეგულირებაზე, რომლის დიდი სიჭარბე იწვევს წყალბადის წვის პროდუქტში – წყლის ორთქლში – აზოტის ოქსიდების თითქმის სრულ გაქრობას.

წყალბადს მიიხნევენ უნივერსალურ ენერგოშემცველად, რომელსაც შეუძლია იმუშაოს ენერჯიის გადამცემად ატომური რეაქტორიდან მრავალფეროვან მომხმარებლებზე, როცა შეუძლებელია ატომური სათბობის ენერჯიის უშუალოდ გამოყენება. წყალბადის, როგორც ეკოლოგიურად სუფთა სათბობისა და ენერგოშემცველის უპირატესობანი შემდეგია: 1) წვის პროდუქტებში ნაცრის,  $SO_2$  -ის,  $CO_2$  -ის,  $CO$  -ს და ატმოსფეროს სხვა გამაჭუჭყიანებლების არარსებობა; 2) წყალბადის მიღების წყარო შეიძლება იყოს წყალი – იაფი ნედლეული, რომლის მარაგი ამოუწურავი და აღდგენადია, რადგანაც წვის დროს წყალბადი კვლავ გარდაიქმნება წყლად; 3) მოლეკულური წყალბადის წვის სითბო, რომელიც 125510 კჯ/კგ-ს შეადგენს, თითქმის ოთხჯერ მეტია ვიდრე ნახშირისა (32800 კჯ/კგ); 4) შესაძლებელია წყალბადის ტრანსპორტირება ნებისმიერ მანძილზე არსებული მიღგაყვანილობით, თხევადი სახით შენახვა ან ჰიდრიდების სახით აკუმულირება; 5) წყალბადის გამოყენება არსებულ საავიაციო და საავტომობილო ძრავებში არ გამოიწვევს მათ მნიშვნელოვან ცვლილებებს; ეს ეხება

წყალბადის გამოყენებას საყოფაცხოვრებო გამათბობელ დანადგარებსა და ხელსაწყოებში; 6) წყალბადი არის ქიმიური მრეწველობის, მეტალურგიის, ნავთობგადამუშავების, მყარი სათბობის გადამუშავების, ძირითადად, აღდგენისა და ჰიდრირების პროცესების ნედლეული. წყალბადი ძირითადი ამოსავალი რეაგენტი იხსნის დიდმასშტაბური წარმოებისათვის, როგორცაა ამიაკისა და მეთანოლის სინთეზი.

მაგრამ წყალბადის წარმოება არსებული მეთოდებით იმდენად ძვირია, რომ მისი გამოყენება სატრანსპორტო და, მით უფრო, ენერგეტიკულ სათბობად სრულებით არარაციონალურია. ამიტომ ამუშავებენ წყალბადის მსხვილმასშტაბური წარმოების პრინციპულად ახალ მეთოდებს. გარდა ამისა წყალბადის, როგორც ენერგოშემცველისა და სათბობის გამოყენების დროს წარმოიშობა სხვადასხვა გართულებები: 1) წყალბადის სიმკვრივე 8-ჯერ ნაკლებია ბუნებრივი აირისაზე, ამიტომ მისი მოცულობითი სითბოტევადობა 3,3-ჯერ ნაკლებია; ეს ძირითადი წინააღმდეგობაა წყალბადის გამოსაყენებლად სატრანსპორტო ძრავებში. არსებულ ჰიდრიდებში წყალბადის წილი ჰიდრიდის მასის 2%-ს არ აღემატება და ავტომობილის ბენზოსაცავის ეკვივალენტი 700-900 კგ ჰიდრიდს შეადგენს. მუშავდება წყალბადის მეტი შემცველობის ჰიდრიდების მიღების მეთოდები; 2) წყალბადი უფრო ფეთქებადსააშიშია, ვიდრე ბუნებრივი აირი: ჰაერთან ის წარმოქმნის ფეთქებადსაშიში ნარევეს კონცენტრაციათა მნიშვნელოვნად დიდ ინტერვალში (4-75%); 3) წყალბადის გათხევადების ტემპერატურა ატმოსფერულ წნევაზე (-253°C) ნაკლებია, ვიდრე ბუნებრივი აირისა (მეთანისათვის -165°C). გარდა ამისა თხევადი სახით შენახვისას შესაძლებელია წყალბადის გადინება.

რამდენადაც ჯერჯერობით წყალბადის ღირებულება მეტია, ვიდრე ნავთობპროდუქტებისა, მისი დანერგვა ნავთობპროდუქტების შემცველად, ალბათ,

დაიწყება საავტომობილო სათბობში დანამატის სახით. წყალბადის დამატება 5-10%-ის რაოდენობით მნიშვნელოვნად ამცირებს ავტოტრანსპორტის მანევრაციონაბოლქვს და ამავე დროს ადიდებს ძრავის ეკონომიურობას. ამჟამად ნავთობის იმპორტიორ ზოგ ქვეყნებში გათვალისწინებულია საავტომობილო ბენზინში მეთანოლის დამატება ნავთობპროდუქტების მოხმარების შემცირების მიზნით. თავის მხრივ მეთანოლის მიღება შეიძლება მყარი სათბობის გადამუშავების დროს წარმოქმნილი სინთეზ-აირიდან.

ყოველივე ზემოთქმულის შემდეგ, აქ ალბათ, უპირიანი იქნებოდა წყალბადის მიღების მეთოდების განხილვა, მაგრამ რამდენადაც ეს მეთოდები საკმაოდ ცნობილია და დაწვრილებით განიხილება არაორგანულ ნივთიერებათა ტექნოლოგიის სპეციალურ კურსებში, ჩვენ შევჩერდებით წყალბადის მიღების მხოლოდ ერთ მეთოდზე, რომელიც პერსპექტივაში იაფი წყალბადის მიღებას ითვალისწინებს – ეს არის წყალბადის მიღების თერმოქიმიური მეთოდი.

წყალბადის მიღების თერმოქიმიური მეთოდი ითვალისწინებს წყლის დაშლას თბური ენერგიის გამოყენებით, რომლის მიღებასაც ვარაუდობენ ჰელიუმის მაცივრებიანი ატომური რეაქტორებიდან გამოსული ჰელიუმის სითბოს ხარჯზე. წყლის თერმული დაშლისათვის აუცილებელი სითბოს თეორიული  $Q_{\infty}$  რაოდენობა შეიძლება განისაზღვროს

$$Q_{\infty} = E / \eta_3 = \Delta G^0 / \eta_3$$

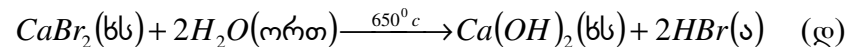
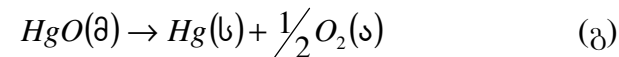
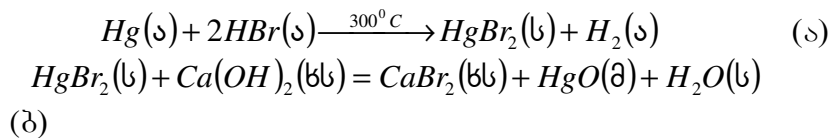
ტიპის ფორმულებით, სადაც  $E$  არის  $T_1$  ტემპერატურის მქონე სითბოს წყაროდან ართმეული თბური ენერგია;  $\Delta G^0$  - თავისუფალი ენერგიის ცვლილება წყლის დაშლის დროს;  $\eta_3$  - კარნოს ციკლის მქც,



რომელიც ხორციელდება ზედა  $T_1$  ტემპერატურასა და გარემოს  $T_2$  ტემპერატურას შორის.

წყლის პირდაპირი თერმული დაშლა ცნობილი  $H_2O \leftrightarrow H_2 + \frac{1}{2} 2O_2 + \Delta H$  რეაქციის მიხედვით შეუძლებელია, რადგან ამისათვის საჭირო ტემპერატურაზე ( $\approx 1000^\circ C$ ) რეაქციის წონასწორობის კონსტანტა შეადგენს  $1,48 \cdot 10^{-6}$ -ს, რაც შეესაბამება სარეაქციო ნარევიში  $O_2$ -სა და  $H_2$ -ის პარციალურ წნევას არა უმეტეს 0,1 პა (10 ატმ<sup>რ</sup>).

წყალბადის მიღების ამ მეთოდის პრაქტიკული განხორციელება შესაძლებელია მხოლოდ წყლის უშუალოდ დაშლის რეაქციის შეცვლით ისეთი რამდენიმე რეაქციისაგან შემდგარი თერმოქიმიური ციკლით, რომელთაც აქვთ პრაქტიკული მიზნებისათვის საკმარისი წონასწორობის კონსტანტის მნიშვნელობები. შესწავლილი და რეკომენდებულია მრავალი თერმოქიმიური ციკლი წყლის დასაშლელად ისეთ ტემპერატურებზე, რომლებიც არ აღემატება ბირთვული რეაქტორიდან გამომავალი თბომატარებლის ტემპერატურას (თბური რეაქტორების ნარჩენი სითბოს გამოყენების დროს). დამუშავებულ თერმოქიმიურ ციკლებში შუალედურ ნივთიერებებს – ჰალოგენებს, VI ჯგუფის ელემენტებს (გოგირდს), II ჯგუფის ლითონებს ( $Mg, Ba, Ca$ ) - აქვთ დიდი თვისობა წყალბადის ან ჟანგბადის მიმართ. ქვემოთ მოყვანილია ისეთი რეაქციების თერმოქიმიური ციკლის მაგალითი, რომელთა შედეგია წყლის დაშლა წყალბადად და ჟანგბადად:

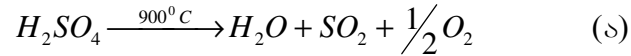


მთლიანად წყლის თერმოქიმიური დაშლა ჩაკეტილი ციკლია, რადგანაც ყველა ამოსავალი რეაგენტი გამოეყოფა რეაქციის პროდუქტებს და ბრუნდება ციკლში, წყლის გარდა, რომელიც იხარჯება წყალბადისა და ჟანგბადის წარმოქმნაზე. რეაქციის მაქსიმალური ტემპერატურა (დ რეაქცია) არ აღემატება  $700^\circ C$ -ს და შეიძლება უზრუნველყოფილი იქნეს თბომატარებლით, რომლის ტემპერატურა ბირთვული რეაქტორიდან გამოსასვლელში  $800-900^\circ C$ -ის დონეზე იქნება.

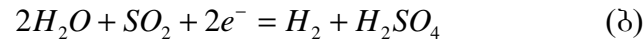
ჯერჯერობით მრეწველობაში არცერთი თერმოქიმიური ციკლი არ არის განხორციელებული და არ არის განსაზღვრული ციკლების მქკ და დანახარჯები წყალბადის თერმოქიმიური მეთოდით წარმოებაზე, ე. ი. არ არის გაკეთებული ამ მეთოდის ეკონომიკური შეფასება. მაგრამ გაანგარიშებები გვიჩვენებს, რომ წყალბადის თერმოქიმიური მიღების მეთოდის მქკ ბირთვული რეაქტორის ნარჩენი თბური ენერჯის გამოყენებისას უფრო მაღალია, ვიდრე წყლის ელექტროლიზის დროს და 40-45%-ს შეადგენს.

წყლიდან წყალბადის წარმოების კომბინირებული მეთოდი ემყარება პროცესის თერმოქიმიური და ელექტროქიმიური სტადიების კომბინირებას. მიაჩნიათ, რომ კომბინირებულ მეთოდს შეუძლია შეათავსოს ორივე მეთოდის ღირსებები: ელექტროქიმიური მეთოდი ყველაზე კარგად არის ათვისებული, მარტივია მისი აპარატურული გაფორმება, ხოლო თერმოქიმიური უფრო ეკონომიურია, მაგრამ იგი ჯერ კარგად არ არის ათვისებული და ძნელია სამრეწველო რეალიზაციისათვის. მაგალითისათვის, მოვიყვანოთ წყლიდან წყალბადისა და ჟანგბადის მიღების გოგირდმჟავური

კომბინირებული მეთოდი. ეს ორსაფეხურიანი პროცესია: პირველი საფეხური თერმოქიმიურია, რომელიც 900°C-ზე კატალიზატორზე მიმდინარე ენდოთერმული რეაქციაა:



მეორე საფეხური ელექტროქიმიური პროცესია, რომელიც ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე ხორციელდება ( $\approx 25^\circ C$ -ზე):



(ბ) რეაქცია პრაქტიკულად მხოლოდ ელექტროლიზური ხერხით შეიძლება განხორციელდეს, რადგან მისი წონასწორობის მუდმივა და წყალბადის თეორიული გამოსავალი მეტისმეტად მცირეა.

(ბ) რეაქციისათვის გამოანგარიშებული დაშლის თეორიული ძაბვა ნაკლებია, ვიდრე წყლის პირდაპირი ელექტროლიზისათვის; იგი შეადგენს 0,17 ვ-ს, მაშინ, როცა პირდაპირი ელექტროლიზის დროს იგი 1,23 ვ-ია. ჯამურმა მქკ-მა 35-37% უნდა შეადგინოს. კომბინირებული სისტემისათვის ენერჯის წყაროდ შეიძლება გამოყენებული იქნეს აიროვანი ბირთვული რეაქტორი, რომელიც პროცესის თერმოქიმიურ საფეხურს ნარჩენი თბური ენერჯით მოამარაგებს, ხოლო ელექტროქიმიურს – ელექტროენერჯით.

სპეციალისტებს მიაჩნიათ, რომ თერმოქიმიური და ელექტროქიმიური პროცესების კომბინირება წყლიდან წყალბადის დიდმასშტაბური წარმოების ყველაზე პერსპექტიული მიმართულებაა.

## 7.7. მეურნეობის ქიმიზაცია და სიცოცხლის უზრუნველყოფის პირობები

ქიმიზაცია ეწოდება მეურნეობაში ქიმიური მეთოდების, პროცესებისა და მასალების დანერგვას. მრეწველობის სხვადასხვა დარგებში ქიმიური მეთოდების ფართოდ დანერგვა იძლევა წარმოების უფრო რაციონალურად მართვის, ნედლეულის ყველა შემადგენელი ნაწილის გამოყენების, მავნე ნივთიერებებით გარემოს გატუჭყიანების გარეშე უნარჩენოდ მუშაობის, ძირითადი პროდუქტის თვითღირებულების შემცირებისა და, ბოლოს, ახალი მასალების მიღების საშუალებას. წარმოების ქიმიზაცია ქიმიური პროგრესის მნიშვნელოვანი მიმართულებაა.

ქიმიზაციას უზარმაზარი მნიშვნელობა აქვს კაცობრიობის სიცოცხლის უზრუნველყოფისათვის და, უწინარეს ყოვლისა, კვების პროდუქტებით დაკმაყოფილებისათვის, რაც, პირველ რიგში, გამოიხატება მინერალური სასუქებით სოფლის მეურნეობის მომარაგებაში. მინერალურ სასუქებზე სოფლის მეურნეობის მოთხოვნის დაკმაყოფილებასთან ერთად მატულობს მცენარეებისა და ცხოველების ზრდის სტიმულატორების როლი. ქიმიკოსების წინაშე დგება ისეთი სტიმულატორების დამუშავების ამოცანა, რომლებიც საშუალებას მოგვცემს წელიწადში რამდენიმე მოსავალი ავიღოთ. მაგრამ დედამიწის მოსახლეობის პროგრესულ ზრდასა და მიწათმოქმედებისათვის ვარგისი სავარგულების შეზღუდულობასთან დაკავშირებით წარმოიშვა სინთეზური და ხელოვნური საკვების მიღების აუცილებლობა. უკვე დიდი ხანია ცხოველთა საკვების ფოსფორის ნაერთებით შესავსებად გამოიყენება საკვები პრეციპიტატი  $CaHPO_4$  და კარბამიდი  $CO(NH_2)_2$ , როგორც ორგანიზმში ცილის სინთეზის წყარო.

უკანასკნელ ხანებში დაიწყო ცილოვანი პრეპარატების ფართო სამრეწველო წარმოება მიკრობიოლოგიური სინთეზით, რომლებშიც ნორმალურ (ბუნებრივ) ტემპერატურაზე მოქმედ კატალიზატორებად იყენებენ ფერმენტებს. ნედლეულად, უპირატესად, იყენებენ ნავთობიდან მიღებულ პარაფინებს, სპირტებსა და ორგანულ მჟავებს. სათბობად გამოყენებული ნავთობი რომ შეიცვალოს ენერჯის სხვა წყაროებით, მისი რესურსები პრაქტიკულად ამოუწურავი იქნებოდა საკვებისა და მაღალმოლეკულური ნაერთების წარმოებისათვის. მიკრობიოლოგიური სინთეზისათვის ნავთობის მსოფლიო მოპოვების მხოლოდ 4%-ის გამოყენებით შეიძლება დედამიწის მთელი მოსახლეობის უზრუნველყოფა ცილის რაციონით, მაგრამ ამჟამად იწარმოება მხოლოდ ცხოველების საკვებისათვის დასამატებლად ვარჯისი ცილები. მიმდინარეობს ბიოლოგიური სინთეზის საშუალებით ატმოსფერული აზოტის საწარმოო შეკავშირების გზების ძიება. ამჟამად კვების მრეწველობა უკვე ფართოდ იყენებს დუდილის მეთოდებს სპირტებისა და ორგანული მჟავების მისაღებად.

საკვები პროდუქტების წარმოების ქიმიზაციის უმაღლესი საფეხური იქნება ცილოვანი პრეპარატების ქიმიური სინთეზი. ახლა უკვე მუშავდება მრავალი ამინომჟავის ორგანული სინთეზის მეთოდები, რომელთა ნაკრები შეძლებს ნაწილობრივ შეცვალოს საკუთრივ ცილოვანი პრეპარატები. დადგენილია, რომ ადამიანის საკვებში ამინომჟავების დამატება ადიდებს მცენარეული ცილების ათვისებადობას. ზოგიერთი რთული ცილების სინთეზი, რომლებიც ასეულობით ამინომჟავურ ნაშთებს შეიცავს, უკვე შესაძლებელია ლაბორატორიულ პირობებში. მუშავდება ცილებისა და შაქრების ბალახებიდან, ბოსტნეულისა და მერქნის ნარჩენებიდან, წყალმცენარეებიდან მიღების მეთოდები.

ქიმიურად გადაწყვეტილია მერქნიდან პიდროლიზური შაქრისა და სპირტის წარმოება, თუმცა მას ჯერ კიდევ არ შეუძლია შეცვალოს შაქრის წარმოება ჭარხლისა და ლერწმისაგან. მომავალში დედამიწის მოსახლეობის უზრუნველყოფა საკვებით სავსებით შესაძლებელია ქიმიური მეთოდებისა და მასალების საფუძველზე, ე. ი. ქიმიზაციის გზით.

ქიმიზაცია აუცილებელი და სავალდებულო ხდება კაცობრიობის სიცოცხლისა და მოღვაწეობის ყველა ასპექტში. განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია ამ მიმართებით მაღალმოლეკულური ნაერთები პლასტმასის ნაკეთობათა, რეზინის, ქიმიური ბოჭკოების, ლაქების, საღებრების, წებოებისა და სხვათა სახით. თანამედროვე მანქანათმშენებლობა, განსაკუთრებით სატრანსპორტო, დიდი რაოდენობით იყენებს მაღალმოლეკულური ნაერთებისაგან დამზადებულ ნაკეთობებს; ამასთან ამ უკანასკნელთა როლი განუწყვეტლივ გაიზრდება ლითონების წილის შესაბამის შემცირებასთან ერთად, უწინარეს ყოვლისა იმიტომ, რომ მოთხოვნილებები კონსტრუქციულ მასალებზე პროგრესულად იზრდება, ლითონების გამოსადნობი მადნების მარაგები კი სულ უფრო და უფრო მცირდება. უცილებელი გახდა ხელოვნური და ქიმიური ბოჭკოების, პლასტმასებისა და სხვა პოლიმერული მასალების გამოყენება ტანსაცმლის, ფეხსაცმლის და სხვა საოჯახო მოხმარების საგნების დასამზადებლად, რადგანაც შეუძლებელი შეიქნა მოსახლეობის მოთხოვნილებების დაკმაყოფილება სასოფლო-სამეურნეო ტექნიკური კულტურებისა და მეცხოველეობის პროდუქციის ხარჯზე. სინთეზური სამკურნალო პრეპარატები და საღებრები უფრო მრავალმხრივი მოქმედებისაა, ვიდრე ბუნებრივი. გარდა ამისა ისინი, როგორც წესი, ბუნებრივზე იაფია და ამიტომ დომინირებენ ხმარებაში.

მოთხოვნილება სუფთა მტკნარ წყალზე მსხვილ დასახლებულ რეგიონებში ამჟამად ემყარება ბუნებრივი წყლების გაწმენდისა და გაუსნებოვნების ქიმიურ მეთოდებს. დედამიწის მრავალ რაიონში მდინარეებისა და ტბების მტკნარი წყლები უკვე არ არის საკმარისი და ქიმიკოსები წყვეტენ ზღვებისა და ოკეანეების წყლის გამტკნარების პრობლემებს, გამოყოფენ რა ამასთან ერთად ლითონების, მათ შორის ძვირფასი ლითონების, ქლორიდებს, სულფატებსა და კარბონატებს. სათბობის, მეტალურგიული, კვების, მსუბუქი, ცელულოზა-ქაღალდის და მრეწველობის სხვა დარგების (ქიმიურის ჩათვლით) და, აგრეთვე, ენერგეტიკული სადგურების ჩამდინარე წყლებს წმენდენ ფიზიკურ-ქიმიური და წმინდა ქიმიური ხერხებით.

კაცობრიობის არსებობის უზრუნველყოფა მოიცავს სუფთა ჰაერისა და ერთ სულ მოსახლეზე ენერგომომარაგების პრობლემებს. ორივე ეს პრობლემა კომპლექსურად გადაწყდება ქიმიისა და ქიმიური ტექნოლოგიის მეთოდებით წყალბადური ენერგეტიკის განხორციელების გზით. ამჟამად თბური ენერგეტიკული დანადგარები და სატრანსპორტო ძრავების გამონაბოლქვი აირები აჭუჭყიანებს ატმოსფეროს გოგირდისა და აზოტის ოქსიდებით, ნახშირწყალბადების არასრული წვის პროდუქტებით და, აგრეთვე, მტვრით. წყალბადსა ან მეთანოლზე, როგორც საწვავზე, გადასვლისას ერთდროულად წყდება ატომური რეაქტორების გამოუყენებელი სითბოსა და დედამიწის წიაღის სითბოს უტილიზაციის პრობლემა. მეორე მხრივ მიიღება სუფთა გამონაბოლქვი აირები. ჯერჯერობით კი წარმოებათა გამონაბოლქვი აირები უნდა გაიწმინდოს მაგნე მინარეგებისაგან, და ეს კეთდება ქიმიური მეთოდების, კატალიზის, აბსორბციისა და ადსორბციის გამოყენებით.

## სარჩევი

|   |     |
|---|-----|
| <b>I თავი. შესავალი</b> . . . . .   | 3   |
| 1.1. ქიმიური ტექნოლოგიის განსაზღვრება . . . . .                           | 3   |
| 1.2. ქიმიური წარმოების სტრუქტურა . . . . .                                | 5   |
| 1.3. ქიმიური წარმოების მანვენებლები . . . . .                             | 9   |
| <br>  |     |
| <b>II თავი ქიმიური ტექნოლოგიის ძირითადი კანონზომიერებები</b> . . . . .    | .13 |
| 2.1. ცნება ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესის შესახებ . . . . .                 | .13 |
| 2.2. ქიმიურ-ტექნოლოგიური პროცესების კლასიფიკაცია . . . . .                | .16 |
| 2.3. წონასწორობა ქიმიურ-ტექნოლოგიურ პროცესებში . . . . .                  | .22 |
| 2.4. ტექნოლოგიური პროცესების სიჩქარე . . . . .                            | .37 |
| 2.5. პროცესის სიჩქარის გადიდების ხერხები . . . . .                        | .58 |
| 2.6. ქიმიურ-ტექნოლოგიური სისტემები . . . . .                              | .81 |
| 2.6.1. ქიმიური წარმოება როგორც რთული სისტემა . . . . .                    | .81 |
| 2.6.2. ქიმიურ-ტექნოლოგიური სისტემის მოდელური . . . . .                    | .85 |
| 2.6.3. ქიმიურ-ტექნოლოგიური სისტემის სქემების გამოსახვის ხერხები . . . . . | .87 |

**III თავი. ჰომოგენური პროცესები** . . . . . 90

3.1. ჰომოგენური ქიმიური პროცესების დახასიათება . . . . .90

3.2. ჰომოგენური პროცესები აირად ფაზაში . . . . . 93

3.3. ჰომოგენური პროცესები თხევად ფაზაში . . . . . 96

3.4. ჰომოგენური პროცესების ძირითადი კანონზომიერებები . . . . . 97

**IV თავი. ჰეტეროგენული არაკატალიზური პროცესები** . . . . . 106

4.1. შესავალი . . . . . 106

4.2. აირი-სითხე სისტემა (-ს) . . . . . 111

4.3. აირი-მყარი სისტემა . . . . .114

4.4. სითხე-მყარი სისტემა . . . . . 116

**V თავი. კატალიზური პროცესები** . . . . . 124

5.1. კატალიზის მნიშვნელობა და გამოყენება . . . . .124

5.2. კატალიზის არსი და სახეები . . . . . 125

5.3. ჰომოგენური და ჰეტეროგენული კატალიზი . . . . . 135

5.4. მყარი კატალიზატორების თვისებები და მათი დამზადება . . . . . 144

5.5. ფოტოქიმიური, რადიაციულ-ქიმიური, ბიოქიმიური, პლაზმურ-ქიმიური პროცესებისა და ულტრაბგერის გამოყენება ქიმიურ ტექნოლოგიაში . . . . . 147

**VI თავი. ქიმიური რეაქტორები** . . . . . 158

6.1. ქიმიური რეაქტორების თეორიის ამოცანები . . . . . 158

6.2. ამოსავალი დებულებები რეაქტორების გაანგარიშებისათვის . . . . . 159

6.3. რეაქტორების მატერიალური ბალანსის განტოლება . . . . . 161

6.4. რეაქტორების კლასიფიკაცია . . . . . 165

6.5. პერიოდული მოქმედების რეაქტორები . . . . .165

6.5.1. იდეალური შერევის პერიოდული მოქმედების რეაქტორები . . . . . 166

6.6. უწყვეტი მოქმედების რეაქტორები . . . . . 172

6.6.1. იდეალური გამოდევნის რეაქტორები . . . . . 173

6.6.2. უწყვეტი მოქმედების იდეალური შერევის რეაქტორი . . . . .184

6.7. იდეალური შერევისა და იდეალური გამოდევნის რეაქტორების შედარება . . . . .189

6.8. იდეალური შერევის რეაქტორების კასკადი . . . . . 193

**VII თავი. სხვადასხვა თბური რეჟიმით მომუშავე რეაქტორები** . . . . .199

7.1. შესავალი . . . . .199

7.2. რეაქტორის თბური ბალანსის განტოლება . . . . . 201

7.3. ადიაბატური რეაქტორები . . . . . 206

7.3.1. პერიოდული მოქმედების ადიაბატური რეაქტორი . . . 206

7.3.2. უწყვეტი მოქმედების ადიაბატური რეაქტორები . . . 209

7.3.2.1. ადიაბატური იდეალური გამოდევნის რეაქტორი . . 209

7.3.2.2. უწყვეტი მოქმედების იდეალური შერევის ადიაბატური რეაქტორი . . . . . 213

7.4. იზოთერმული რეაქტორები . . . . . 215

7.5. პოლიტროპული რეაქტორები . . . . . 217

**VIII თავი. რეაქტორების მოწყობილობა** . . . . .219

8.1. რეაქტორები ჰომოგენური პროცესებისათვის . . . . . 219

8.2. რეაქტორები ჰეტეროგენული არაკატალიზური პროცესებისათვის . . . . . 229

8.3. რეაქტორები კატალიზური პროცესებისათვის . . . . . 252

**IX თავი. ნედლეული და ენერჯია ქიმიურ მრეწველობაში** . . . . . 277

9.1. ნედლეულის დახასიათება და მარაგი . . . . . 277

9.2. ნედლეულის გამდიდრების პრინციპები . . . . . 284

9.3. საკვები ნედლეულის შეცვლა არასაკვებით და მცენარეულისა – მინერალურით . . . . . 305

9.4. წყალი ქიმიურ მრეწველობაში . . . . . 307

9.5. ქიმიური მრეწველობის ენერგეტიკა . . . . .322

9.5.1. წყალბადი . . . . .328

9.6. მეურნეობის ქიმიზაცია და სიცოცხლის უზრუნველყოფის პირობები . . . . .335

