

თამაზ მეგრელიძე, ზურაბ ჯაფარიძე, გივი გოლეთიანი,  
გივი გუგულაშვილი, გიორგი ბერუაშვილი

## საკვები პროდუქტების წარმოების პროცესები და აპარატები

თბილისი - 2017

სახელმძღვანელოში განხილულია საკვები პროდუქტების წარმოების და სიცივის მიღების ტექნოლოგიური პროცესების და შესაბამისი მანქანა-აპარატების მუშაობის თეორიული საფუძვლები, ტექნოლოგიური პროცესებისა და აპარატების გაანგარიშების მეთოდები.

სახელმძღვანელო განკუთვნილია “კვების ინდუსტრიის ინჟინერიის და ტექნოლოგიის“ ბაკალავრიატის საგანმანათლებლო პროგრამის სპეციალობის სტუდენტებისათვის. იგი შეიძლება გამოიყენონ აღნიშნული სპეციალობის მაგისტრატურის და დოქტორანტურის სტუდენტებმა, აგრეთვე კვებისა და სამაცივრო საწარმოებთან დაკავშირებულმა ინჟინერ-ტექნიკურმა პერსონალმა.

სახელმძღვანელო მთლიანად გადამუშავებული და არსებითად შევსებულია. მეორე გამოცემაში გასწორებულია შემჩნეული უზუსტობანი.

რეცენზენტები: პროფ. ქ. არჩვაძე;  
პროფ. რ. მელქაძე.

სახელმძღვანელო ავტორთა კოლექტივის მიერ:

- |                |             |
|----------------|-------------|
| თ. მეგრელიძე   | – თავი 1; 2 |
| ზ. ჯაფარიძე    | – თავი 6    |
| გ. გოლეთიანი   | – თავი 3    |
| გ. გუგულაშვილი | – თავი 4    |
| გ. ბერუაშვილი  | – თავი 5    |

## შესავალი

საკვები პროდუქტების წარმოების პროცესების და აპარატების კურსი შეისწავლის კვების პროდუქტების წარმოების დამახასიათებელ საერთო ტექნოლოგიურ პროცესებს; შეისწავლება ტექნოლოგიური პროცესების ფიზიკურ-ქიმიური არსი, საკვები პროდუქტების წარმოების პროცესებში გამოყენებული მანქანების და აპარატების გაანგარიშების მეთოდთა და მათი მუშაობის რეჟიმის ძირითადი პარამეტრები.

პროცესი არის მდგომარეობის ცვლილება, რომელიც მიმდინარეობს ბუნებაში, წარმოებას ან ლაბორატორიაში. ბუნებაში მიმდინარე პროცესებისაგან განსხვავებით წარმოებაში მიმდინარეობს ხელოვნური პროცესი, რომელიც ემსახურება გარკვეული ტექნოლოგიური მიზნის განხორციელებას.

ნედლეულიდან მზა პროდუქციის მიღების პროცესს ტექნოლოგიური პროცესი ეწოდება. ტექნოლოგია არის ფიზიკის, ქიმიის, მექანიკის, ბიოლოგიის და სხვა მეცნიერებათა კანონების გამოყენებით ადამიანისათვის საჭირო სასარგებლო პროდუქციის მიღების წესებისა და მეთოდების ერთობლიობა. ტექნოლოგია ქმნის ნედლეულის გადამუშავების მეთოდებსა და საშუალებებს.

მიუხედავად კვების პროდუქტების მრავალფეროვნებისა, მათი მიღება ხშირად დაკავშირებულია ერთი და იმავე ტიპის პროცესების ჩატარებასთან, მაგალითად, გაცხელება, გაცივება, შერევა, გაფილტვრა, შრობა და სხვა, რომლებიც საერთოა მრავალი კვების საწარმოსათვის.

მოცემული კურსის თეორიული საფუძველია ფიზიკის, ფიზიკური ქიმიის, მექანიკის, ჰიდრომექანიკის, თბური, მასაგადაცემის, ბიოქიმიის ძირითადი კანონების გამოყენება საკვები პროდუქტის წარმოების პროცესების შესწავლისას. აღნიშნული კანონების საფუძველზე ხდება ტექნოლოგიური პროცესის წონასწორობის პირობების დადგენა, ამ პროცესის მიმდინარეობის კანონზომიერებისა და სიჩქარის განსაზღვრა, მატერიალური და ენერგეტიკული ბალანსების შედგენა. ყოველივე აღნიშნული კი, თავის მხრივ, წარმოადგენს ტექნოლოგიური პროცესის წარმართვისათვის საჭირო მანქანებისა და აპარატების მუშაობის რეჟიმის პარამეტრების დადგენის საფუძველს.

პროცესისა და აპარატის გასაანგარიშებლად აუცილებელია იმ თვისებების ცოდნა, რომლებზედაც დამყარებულია აღნიშნული გაანგარიშებები. გადასამუშავებელი პროდუქტების თვისებები დამოკიდებულია მათ აგებულებაზე, ფიზიკურ და ქიმიურ შედგენილობაზე, მათში სხვადასხვა კომპონენტის

ხარისხობრივ და რაოდენობრივ შემცველობაზე, პროდუქტზე მოქმედ ტემპერატურაზე, ფარდობით ტენიანობაზე, წნევაზე და სხვა ფაქტორებზე.

ნედლეულისა და პროდუქტების ძირითად ტექნიკურ თვისებებს მიეკუთვნება სტრუქტურულ-მექანიკური, თბოფიზიკური და ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები. სტრუქტურულ-მექანიკური თვისებები ახასიათებს პროდუქტის რღვევის ზღვრულ დაძაბულობას, დენადობას, გაფილტვრისადმი სტრუქტურულ წინააღმდეგობას და ა.შ. თბოფიზიკური თვისებები ახასიათებს პროდუქტის თბოშემცველობას, თბოგამტარობას და ტემპერატურაგამტარობას. ფიზიკურ-ქიმიური თვისებები კი ახასიათებს მოცემული პროდუქტის ხსნადობას სხვადასხვა სითხეში, ზედაპირულ დაჭიმულობას, დიფუზიას, აორთქლების უნარს და ა.შ.

აღნიშნული ფაქტორები განაპირობებს მანქანისა და აპარატის ფიზიკურ ზომებს, მათი მუშაობის რეჟიმს, დასამზადებლად გამოყენებულ მასალას, მწარმოებლურობას და სხვ.

ნედლეულისა და პროდუქტის მრავალი ტექნიკური თვისება საკმაოდ კარგადაა შესწავლილი და წარმოდგენილი შესაბამის საცნობარო და სპეციალურ ლიტერატურაში. მაგრამ ჯერ კიდევ მრავალი პროდუქტი (განსაკუთრებით ახალი, თანამედროვე პროდუქტი) არსებობს, რომელთა მონაცემების შესწავლა მომავლის საქმეა.

წარმოდგენილ სახელმძღვანელოში განხილულია ის ძირითადი პროცესები, რომლებიც დამახასიათებელია თანამედროვე საკვები პროდუქტის წარმოების ტექნოლოგიებისათვის. აქ მოკლედაა განხილული პრაქტიკულად ყველა ძირითადი მექანიკური, ჰიდრომექანიკური, თბოგადაცემის, მასაგადაცემის და სხვა პროცესები, რომელთა შესწავლა დაეხმარება სტუდენტს სხვა სპეციალური კურსების კარგად ათვისებაში.

# I თავი. ტექნოლოგიური პროცესების ძირითადი ცნებები

## 1.1. საკვები პროდუქტის წარმოების ძირითადი პროცესების კლასიფიკაცია

საკვები პროდუქტების მისაღები პროცესების შემდეგი ძირითადი ჯგუფები არსებობს:

**ჰიდროდინამიკური პროცესები**, რომელთა სიჩქარე განისაზღვრება ჰიდროდინამიკის კანონებით. მათ მიეკუთვნება სითხეში ან აირში შეწონილი ნაწილაკების დალექვა სიმძიმის, ცენტრიდანული ან ელექტრული ველის ძალების მოქმედებით; სითხის ან აირის გაფილტვრა მყარი მინარევისაგან წნევითა სხვაობის გავლენით; გადაადგილება თხევად არეში; ფხვიერი მასალის ფსევდოგათხევადება და სხვა;

**თბური პროცესები**, რომელთა სიჩქარე განისაზღვრება თბოგადაცემის კანონებით. აღნიშნულ ჯგუფს მიეკუთვნება გაცხელება, აორთქლება, გაცივება, გაყინვა და კონდენსაცია;

**თბომასაგადაცემის პროცესები**. ამ პროცესების დროს ორი ან მეტი ფაზა უშუალოდ ეხება ერთმანეთს და ფაზების კონტაქტის შედეგად კომპონენტი გადადის ერთი ფაზიდან მეორეში ან პირიქით. ასეთ მოვლენას მასაგადაცემას უწოდებენ, იგი ძირითადად დიფუზიური პროცესია. მასაგადაცემის სიჩქარე განისაზღვრება ნივთიერების ერთი ფაზიდან მეორეში გადასვლის ანუ მასის გადაცემის სიჩქარით. დიფუზიურ პროცესებს მიეკუთვნება აბსორბცია, რექტიფიკაცია, ექსტრაქცია, კრისტალიზაცია, სუბლიმაცია, აღსორბცია, შრობა და სხვ.

**ქიმიური და ბიოქიმიური პროცესები** დაკავშირებულია კვების პროდუქტების გადამუშავებისა და ცივად შენახვის პროცესში ნივთიერების გარდაქმნასთან და მათი ფიზიკური, ქიმიური და თბოფიზიკური თვისებების შეცვლასთან. ამ პროცესების სიჩქარე განისაზღვრება ტექნოლოგიური პროცესების კინეტიკის კანონზომიერებებით.

**მექანიკურ პროცესებს** მიეკუთვნება მყარი მასალების დანაწევრება–დაქუცმაცება, დაჭრა, გახეხვა, ფხვიერი მასალების კლასიფიკაცია და მათი შერევა, მასალების წნევით დამუშავება, დრეკად-ბლანტი სტრუქტურის პროდუქტის პლასტიფიკაცია, დაყალიბება და სხვ.

## 12. საკვები პროდუქტის წარმოების ძირითადი ტექნოლოგიური პროცესების კინეტიკური კანონზომიერებანი

ტექნოლოგიურ პროცესებს საფუძვლად უდევს კინეტიკური კანონზომიერებანი, რომელთა ცოდნის გარეშე შეუძლებელია მანქანების და აპარატების ძირითადი პარამეტრების გაანგარიშება. ჰიდრომექანიკური, თბური და მასაგადაცემის პროცესებისათვის კინეტიკური კანონზომიერებანი შეიძლება გამოისახოს საერთო კანონით: პროცესის სიჩქარე მამოძრავებელი ძალის პირდაპირპროპორციული და წინააღმდეგობის უკუპროპორციულია.

სითხისა და აირის ნაკადის აპარატში მოძრაობისათვის გვაქვს

$$\frac{V}{F\tau} = \frac{\Delta p}{R_1} = K_1 \Delta p \quad \text{მ/წმ}, \quad (1.1)$$

სადაც  $V$  - გადინებული სითხის ან აირის მოცულობაა, მ<sup>3</sup>;

$F$  - აპარატის ცოცხალი კვეთის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

$\tau$  - პროცესის ხანგრძლივობა, წმ;

$\Delta p$  - წნევის ვარდნა აპარატში - ჰიდროდინამიკური პროცესის მამოძრავებელი ძალა, პა;

$R_1$  - აპარატის ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა, პა.წმ/მ;

$K_1$  - პროცესის სიჩქარის კოეფიციენტი - ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობის შებრუნებული სიდიდე,  $K_1 = 1/R_1$ , მ/პა.წმ.

სითბოს მოძრაობისათვის (გადატანისათვის) გვაქვს

$$\frac{Q}{F\tau} = \frac{\Delta T}{R_2} = K_2 \Delta T, \quad \text{ჯ/მ}^2 \text{ წმ}, \quad (1.2)$$

სადაც  $Q$  - გადასაცემი სითბოს რაოდენობაა, ჯ;

$F$  - თბოგადაცემის ზედაპირის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

$\tau$  - პროცესის ხანგრძლივობა, წმ;

$\Delta T$  - არეების ტემპერატურებს შორის სხვაობა - თბური პროცესების მამოძრავებელი ძალა,  $K$ ;

$R_2$  - თერმული წინააღმდეგობა, მ<sup>2</sup> წმ  $K$ /ჯ;

$K_2$  - სითბოს გადაცემის კოეფიციენტი - თერმული წინააღმდეგობის

შებრუნებული სიდიდე,  $K_2 = 1/R_2$ , ჯ/მ<sup>2</sup> წმ  $K$

ნივთიერების ერთი ფაზიდან მეორეში გადასატანად გვაქვს

$$\frac{M}{F\tau} = \frac{\Delta C}{R_3} = K_3 \Delta C, \text{ კგ/მ}^2 \text{ წმ}, \quad (1.3)$$

სადაც  $M$  ერთი ფაზიდან მეორეში გადატანილი ნივთიერების რაოდენობაა, კგ;

$F$  – ფაზების საკონტაქტო ზედაპირის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

$\tau$  – პროცესის ხანგრძლივობა, წმ;

$\Delta C$  – ფაზებში ნივთიერებათა კონცენტრაციებს შორის სხვაობა – მასაც-  
ვლის პროცესის მამოძრავებელი ძალა, კგ/მ<sup>3</sup>;

$R_3$  - მასაგადაცემის წინააღმდეგობა, წმ/მ;

$K_3$  – მასაგადაცემის კოეფიციენტი - მასაგადაცემის წინააღმდეგობის  
შებრუნებული სიდიდე,  $K_3 = 1/R_3$ , მ/წმ.

ქიმიური გარდაქმნებისათვის გვაქვს შემდეგი დამოკიდებულება:

$$\frac{M}{V\tau} = K_4 f(C), \text{ კგ/მ}^3 \text{ წმ}, \quad (1.4)$$

სადაც  $M$  ტექნოლოგიური პროცესის დროს რეაქციაში შესული ნივთიერების  
რაოდენობაა, კგ;

$V$  – ნარევის მოცულობა, მ<sup>3</sup>;

$\tau$  – პროცესის ხანგრძლივობა, წმ;

$K_4$  – ტექნოლოგიური პროცესის სიჩქარის კოეფიციენტი, 1/წმ;

$f(C)$  – რეაქციაში მონაწილე ნივთიერებათა კონცენტრაციის ფუნქცია (პრო-  
ცესის მამოძრავებელი ძალა), კგ/მ<sup>3</sup>.

სხვადასხვა პროცესის სიჩქარის კოეფიციენტების სიდიდე ძირითადად  
დამოკიდებულია მასალის ნაკადის სიჩქარეზე. ამიტომ ყველა კინეტიკური  
კანონზომიერების შედგენი დაფუძნებულია მასალის ნაკადის მოძრაობის  
კანონებზე.

რეალური აირის და სითხის მოძრაობის კანონების შესწავლა საშუალებას  
იძლევა არა მარტო ავითვისოთ ეს კანონები, არამედ შევისწავლოთ ისეთი  
რთული ტექნოლოგიური პროცესები, როგორცაა თბო- და მასაგადაცემა.

### 1.3. ნედლეულისა და პროდუქციის ზოგიერთი ფიზიკური თვისება

იმისათვის, რომ ჩავატაროთ პროცესისა და აპარატის გაანგარიშებები,  
საჭიროა გადასამუშავებელი ნედლეულისა და პროდუქციის ფიზიკური  
თვისებების ცოდნა.

გადასამუშავებელი მასალის თვისებები დამოკიდებულია მის აგებულებაზე, მასში ცალკეული კომპონენტების ხარისხობრივ და რაოდენობრივ შემცველობაზე, მოქმედ ტემპერატურაზე, წნევაზე და სხვა ფაქტორებზე.

ნედლეულისა და პროდუქციის ფიზიკურ თვისებებს მიეკუთვნება სტრუქტურულ-მექანიკური, თბოფიზიკური და ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები. აღნიშნული თვისებები მნიშვნელოვნად განსაზღვრავს აპარატის ზომებსა და კონსტრუქციას, მის დასამზადებლად გამოყენებულ მასალებს, მუშაობის რეჟიმსა და მწარმოებლურობას.

ნედლეულისა და პროდუქციის მრავალი ფიზიკური თვისება მოყვანილია შესაბამის საცნობარო და სპეციალურ ლიტერატურაში, თუმცა შეიძლება ითქვას, რომ მრავალი პროდუქტი ჯერ კიდევ შეუსწავლელია და მათთვის ტექნიკური გაანგარიშებების ჩატარებამდე საჭირო მონაცემების მისაღებად აუცილებელია წინასწარი ცდების ჩატარება.

სტრუქტურულ-მექანიკურ თვისებებს მიეკუთვნება რღვევის ზღვრული დაძაბულობა (ფხვიერი და დრეკად-ბლანტი მასალებისათვის), სიბლანტე (სითხის, აირისა და პლასტიკური მასისათვის), ფილტრაციისადმი სტრუქტურული წინააღმდეგობა (ნალექისა და ფოროვანი მასისათვის) და ა.შ.

მასალის სტრუქტურა და აგებულება მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მისი დაქუცმაცებისა და შემდგომი გადამამუშავების პროცესებზე. მაგალითად, ცხოველური წარმოშობის ქსოვილებს არ გააჩნიათ მკვეთრად გამოყოფილი გარსი. მათ შედგენილობაში უჯრედებთან ერთად შედის ბოჭკოების ფორმის სტრუქტურები ან საერთოდ მასა სტრუქტურის გარეშე. მცენარეული ნედლეულისათვის კი დამახასიათებელია ფორმა და ხშირად, მკვრივი გარსაცმი. მყარი მასალის ძირითადი მექანიკური თვისებებია მისი სიმტკიცე, დრეკადობა და პლასტიკურობა.

მასალის **სიმტკიცე** ეწოდება დატვირთვის სიდიდეს, რომელზედაც ხდება მისი დარღვევა. **დრეკადობა** და **პლასტიკურობა** ხასიათდება შესაბამისი დრეკადი ან პლასტიკური დეფორმაციის სიდიდით.

ფხვიერი და ფოროვანი მასალები ხასიათდება აგრეთვე მოცულობითი მასითა და ფორიანობით.

თავისუფლად დაყრილი მასალის **მოცულობით**  $\rho_a$  მასას იგივე განზომილება ( $\text{კგ/მ}^3$ ) აქვს, რაც მყარი ნაწილაკების  $\rho_s$  **სიმკვრივეს**, მაგრამ იგი მოიცავს მასალის მთლიან მოცულობას თავისი ფორების ჩათვლით და განისაზღვრება ფორმულით:

$$\rho_a = \rho_b(1 - \varepsilon),$$

სადაც  $\varepsilon$  – ფორიანობაა, რომელიც ახასიათებს ფხვიერი ან ფოროვანი მასალის შემკვრივების ხარისხს. იგი წარმოადგენს სიცარიელის მოცულობის შეფარდებას მასალის მოცულობასთან. ნაყარი მასალისათვის, რომელიც შედგება არაერთგვაროვანი ფორმის ნაწილაკებისაგან,  $\varepsilon = 0,38 - 0,42$ .

მასალა ხასიათდება აგრეთვე მოცულობითი წონით ( $\gamma$ ), რომელიც ფაქტობრივად არის ნივთიერების ერთეული მოცულობის წონა

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ ნ/მ}^3,$$

სადაც  $G = mg$  ნივთიერების წონაა, ნ; ხოლო  $V$  - მისი მოცულობა, მ<sup>3</sup>.

ნივთიერების კონცენტრაცია გამოისახება მასური ან მოცულობითი წილებით ან პროცენტებით ანუ კომპონენტის მასის ან მოცულობის შეფარდებით ნარევის მასასთან ან მოცულობასთან.

$$C = \frac{M_i}{V}, \text{ კგ/მ}^3 \text{ ან } C = \frac{M_i}{M}, \text{ კგ/კგ (გ/კგ და ა.შ).}$$

სადაც  $C$  - ნარევის კონცენტრაციაა;  $M_i$  - ნარევიში  $i$ -ური კომპონენტის მასა;  $V$  - ნარევის მთლიანი მოცულობა;  $M$  - ნარევის მთლიანი მასა.

ხსნარში ნივთიერების კონცენტრაციას განსაზღვრავენ აგრეთვე მოლური წილობით ან პროცენტობით, რაც წარმოადგენს მოცემული კომპონენტის კილომოლების შეფარდებას ხსნარის კილომოლების საერთო რაოდენობასთან.

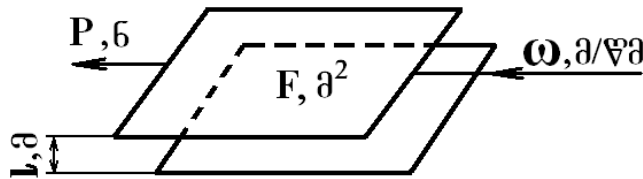
სიბლანტე არის სითხისა და აირის დამახასიათებელი ძალზე მნიშვნელოვანი მაჩვენებელი, რომელიც დიდ გავლენას ახდენს მათი მოძრაობის რეჟიმზე, ფილტრაციის, დალექვის, შერევის, სითბოს და მასის გადაცემის პროცესებზე. თავის მხრივ, სიბლანტის კოეფიციენტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია ხსნარის კონცენტრაციაზე, მინარევების შემცველობასა და ხსნარის ტემპერატურაზე.

ჰიდროდინამიკაში მიღებულია, რომ იდეალური (არაბლანტი) სითხე წინააღმდეგობას არ უწევს ხახუნის ძალებს, რეალურ სითხეში კი წარმოიქმნება ძალა, რომელიც ეწინააღმდეგება სითხის (აირის) ურთიერთშემხები ფენების გარდობით გადაადგილებას და მიმართულია ფენების გასწვრივ. ასეთ შემთხვევაში ვამბობთ, რომ სითხე ბლანტია.

თუ განვიხილავთ სითხის თარაზულად მდებარე ორ ფენას  $F$  (სურ. 1.1) და ვიცით, რომ ამ ფენებს შორის მანძილია  $l$ , ფენათა ერთმანეთის მიმართ გადაადგილების სიჩქარე კი –  $\omega$ , მაშინ წინაღობის ძალა გამოისახება ნიუტონის ფორმულით

$$P = \mu F \frac{d\omega}{dl},$$

ე.ი. შინაგანი ხახუნის ძალა ( $P$ ) პირდაპირპროპორციულია სიბლანტის კოეფიციენტის ( $\mu$ ), გადაანაცვლებული სითხის ფენათა ფართობისა ( $F$ ) და ფარდობითი სიჩქარის ცვლილების ანუ სიჩქარის გრადიენტისა  $\left(\frac{d\omega}{dl}\right)$ , რომელიც უდრის სიჩქარის დიფერენციალს სითხის ფენათა შორის ერთეულ მანძილზე.



სურ. 1.1. სიბლანტის ფიზიკური არსის სქემა

წინა განტოლებიდან სიბლანტის კოეფიციენტი უდრის

$$\mu = \frac{P}{F \frac{d\omega}{dl}} \quad \text{ნ.წმ/მ}^2 \quad \text{ანუ} \quad \text{პა.წმ.}$$

ასეთ სიბლანტეს ეწოდება **დინამიკური სიბლანტე** და მის საზომ ერთეულად მიღებულია **პუაზი**. თუ  $F = 1 \text{ მ}^2$ ,  $dl = 1 \text{ მ}$ ,  $d\omega = 1 \text{ მ/წმ}$ , მაშინ  $\mu = P$ .

აქედან გამომდინარეობს, რომ სიბლანტის კოეფიციენტი (პუაზი) არის ისეთი სითხის სიბლანტე, სადაც 1 ნიუტონი ძალა ერთიმეორისაგან 1 მ დაშორებულ  $1 \text{ მ}^2$  ფართობის სითხის ფენებს 1 მ/წმ სიჩქარით გადაანაცვლებს.

ტექნიკაში გამოიყენება აგრეთვე კინემატიკური სიბლანტე, რომელიც წარმოადგენს დინამიკური სიბლანტის ფარდობას სიმკვრივესთან

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} \quad \text{მ}^2/\text{წმ.}$$

კინემატიკური სიბლანტის ერთეულს ეწოდება სტოქსი, ხოლო სტოქსის მესამედ ნაწილს – სანტისტოქსი.

მასალების თბოფიზიკურ თვისებებს წარმოადგენს თბოტევადობა, თბოშემცველობა, თბოგამტარობა და ტემპერატურაგამტარობა.

**თბოტევადობა** (აღინიშნება ლათინური ასოთი  $C$ ) არის ფიზიკური სიდიდე რომელიც განისაზღვრება სხეულის მიერ მიღებული უსასრულოდ მცირე  $dQ$  რაოდენობის სითბოს შეფარდებით მისი ტემპერატურის შესაბამის  $dT$  ნაზრდთან

$$C = \frac{dQ}{dT}.$$

ერთეულთა საერთაშორისო სისტემაში თბოტევადობის განზომილებაა ჯ/კ.

**კუთრი სითბოტევადობა** ეწოდება ერთგვაროვანი ნივთიერების ერთეული მასის თბოტევადობას, ე.ი.

$$c = \frac{C}{M},$$

სადაც  $M$  – ნივთიერების მასაა.

ნივთიერების რაოდენობა შეიძლება გაიზომოს კილოგრამით, კუბიკური მეტრობით და მოლობით. შესაბამისად, იმაზე დამოკიდებულებით, თუ რომელ რაოდენობრივ ერთეულთან არის შეფარდებული თბოტევადობა, განასხვავებენ მასურ ( $C = \text{ჯ/კგK}$ ), მოცულობით ( $C' = \text{ჯ/მ}^3 \text{K}$ ) და მოლურ თბოტევადობას.

მასურ კუთრ თბოტევადობას ( $C$ ) მარტივად უწოდებენ კუთრ თბოტევადობას. ეს არის სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც საჭიროა ნივთიერების ერთეული მასის  $1^\circ\text{C}$ -ით გასათბობად. მისი განზომილებაა ჯ/(კგK).

**თბოშემცველობა.** ნივთიერების მასის ერთეულის  $t_1^0$ -დან  $t_2^0$ -მდე გათბობის დროს იხარჯება სითბო ( $Q$ ), რომელიც გამოისახება შემდეგი განტოლებით

$$Q = c(t_2 - t_1), \text{ ჯ}$$

სადაც  $c$  - ნივთიერების თბოტევადობაა.

ნივთიერების **თბოგამტარობა** არის ენერგიის გადატანის პროცესი სხეულის უფრო მეტად ცხელი ნაწილებიდან ნაკლებად ცხელი ნაწილაკებისაკენ, რომელიც ხორციელდება სხეულის ნაწილაკების (ატომების, მოლეკულების, ელექტრონების და სხვ.) ქაოსური მოძრაობით.

თბოგამტარობას უწოდებენ აგრეთვე სხეულის მიერ სითბოს გატარების უნარის რაოდენობრივ მახასიათებელს. სხეულის მიერ სითბოს გატარების რაოდენობრივი უნარი ხასიათდება **თბოგამტარობის კოეფიციენტით**. ეს მახასიათებელი ტოლია ერთეული სიგრძის და ერთეული ფართობის მასალის ერთგვაროვან ნიმუშში ერთეულ დროში გამავალი სითბოს რაოდენობის, ტემპერატურის ერთეული სხვაობის დროს. თბოგამტარობის კოეფიციენტი დამოკიდებულია ნივთიერების ფიზიკურ მდგომარეობაზე, შედგენილობაზე, მოცულობით მასაზე, ტენიანობასა და ტემპერატურაზე. მისი განზომილებაა ვტ/(მ K).

**ტემპერატურაგამტარობის** კოეფიციენტი ახასიათებს სხეულის ტემპერატურული ველის სხვადასხვა წერტილში ტემპერატურის გათანაბრების სიჩქარეს. ერთნაირ პირობებში ის სხეული გაცივდება ან გაცხელდება უფრო

სწრაფად, რომლის ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტიც მეტია. ეს კოეფიციენტი დამოკიდებულია მასალის ტენიანობაზე ტემპერატურათა გარკვეულ ინტერვალში. არსებობს ზღვარი (ჰიგროსკოპიული წერტილი), რომლის შემდეგაც ტენიანობის მომატება უკვე აღარ იწვევს ტემპერატურაგამტარობის ცვლილებას. საკვები პროდუქტისათვის ტენიანობის აღნიშნული ზღვარი ძალზე მცირეა. ამიტომ ხშირ შემთხვევაში საჭირო ხდება სპეციალური ცდების ჩატარება ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტის მასალის ტენიანობაზე დამოკიდებულების დასადგენად. თუ ცნობილია მასალის თბოგამტარობა ( $\lambda = \text{ვტ/მ. K}$ ) და მოცულობითი თბოტევადობა ( $C' = \text{ჯ/მ}^3 \cdot \text{K}$ ), მაშინ ტემპერატურაგამტარობის კოეფიციენტი შესაძლებელია განისაზღვროს ფორმულით:

$$a = \frac{\lambda}{C'} \quad \text{მ}^2/\text{წმ.}$$

**თბოგადაცემა და თბოგაცემა.** თბოგადაცემა არის ორ სითბოს მატარებელს შორის თბოცვლა მათი გამყოფი მყარი კედლის გავლით. თბოგადაცემა მოიცავს თბოგაცემას უფრო ცხელი არიდან კედელზე, კედლის თბოგამტარობას და თბოგაცემას კედლიდან უფრო ცივ არეში. მაგალითად, ოთახის გამათბობელი რადიატორი ხასიათდება ფიზიკური სიდიდეების ერთობლიობით: თბოგაცემის კოეფიციენტი ცხელი წყლიდან რადიატორის კედელზე, სითბოს დანაკარგები მისი გავლისას რადიატორის ლითონის ზედაპირში (დამოკიდებულია კედლის სიქეზე და მის თბოგამტარობაზე) და თბოგაცემის კოეფიციენტი რადიატორის ცხელი კედლიდან ოთახში არსებულ ჰაერში.

**თბოგადაცემა** არის სხეულის შინაგანი ენერჯის ცვლილების პროცესი მექანიკური მუშაობის შესრულების გარეშე.

**თბოგაცემა** არის კონვექციური თბოცვლა ორი ფაზის გამყოფ ზღვარზე. წინა მაგალითის მიხედვით ცხელი რადიატორის ზედაპირი გადასცემს სითბოს ოთახის ჰაერს. იგი ხასიათდება თბოგაცემის კოეფიციენტით.

მასალების ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებს მიეკუთვნება მათი ხსნადობა, ზედაპირული დაჭიმულობა, დიფუზიის, აორთქლების კოეფიციენტები და სხვა. ამ სიდიდეთა მნიშვნელობებს, ჩვეულებრივ, პოულობენ საცნობარო და სპეციალურ ლიტერატურაში.

#### 14. ტექნოლოგიური პროცესების შესწავლა მსგავსების თეორიის გამოყენებით

საკვები პროდუქტის საწარმოთა ტექნოლოგიური პროცესები ძალზე რთულია. მათი მათემატიკური აღწერისათვის საჭიროა რთული დიფერენციალური განტოლებების შედგენა, რომლებიც, როგორც წესი, მიახლოებით ასახავენ აღნიშნული პროცესების მიმდინარეობას. ამიტომ დგება პროცესის ცდების მეშვეობით შესწავლის აუცილებლობის საკითხი. ექსპერიმენტულად პროცესის სრულყოფილი შესწავლა შესაძლებელია მხოლოდ ცდების ჩატარების და მათი შედეგების დამუშავების თეორიის არსებობის პირობებში. ასეთია მსგავსების თეორია, რომელიც დაფუძნებულია წარმოდგენილი პროცესების მსგავსებაზე. ის უპასუხებს შეკითხვას, როგორ უნდა იყოს ორგანიზებული ცდა და მიღებული შედეგების დამუშავება, რათა ისინი დასაბუთებულად გავრცელდეს ცდების პირობებისაგან განსხვავებულად მიმდინარე პროცესებზე.

თეორიული გზით გამოყვანილი ტექნოლოგიური პროცესების აღმწერი დიფერენციალური განტოლებები, მსგავსების თეორიიდან გამომდინარე, გარდაიქმნება განზოგადებულ (კრიტიკიალურ) განტოლებებად, რომლებიც საბოლოოდ ცდების მონაცემების საფუძველზე იღებენ საანგარიშო სახეს. მსგავსების თეორიის საფუძვლები ფართოდ გამოიყენება მრავალი პროცესის შესასწავლად.

პროცესების მსგავსებაზე წარმოდგენა საშუალებას იძლევა: 1. დადგინდეს ექსპერიმენტული მუშაობის ისეთი პირობები, როდესაც მოთხოვნილი ცდების რაოდენობა და მატერიალური დანახარჯები იქნება მინიმალური; 2. განისაზღვროს საჭირო ცდების უმცირესი რაოდენობა და სწორად დამუშავდეს მიღებული შედეგები; 3. დადგინდეს ჩატარებული ცდით მიღებული შედეგების გავრცელების არე.

აღნიშნულიდან შეიძლება დავასკვნათ, რომ პროცესების წარმოდგენილი მსგავსება საჭიროა არა მარტო მკვლევარისათვის, არამედ სათანადო მოწყობილობის კონსტრუქტორისათვისაც.

შესასწავლი პროცესის მიმდინარეობის აღმწერი დიფერენციალური განტოლებების კვლევის განსაკუთრებული ფორმის საფუძველზეა აგებული მსგავსების თეორია. დიფერენციალური განტოლებების შედგენისას განიხილება პროცესის მიმდინარეობის ელემენტარული მოცულობა დროის მცირე მონაკვეთში. დიფერენციალურ განტოლებას არ შეუძლია არსებითად აღწეროს რომელიმე ერთეული პროცესი. ის აღწერს ერთგვაროვანი პროცესების სიმრავლეს

რაოდენობის გარეშე. პროცესის განსაკუთრებულობა გამოიხატება ერთეულების შერჩევით. მათ მიეკუთვნება: 1. მოცულობის ფორმა და გეომეტრიული ზომები, რომელშიც მიმდინარეობს პროცესი; 2. მუშა არის ფიზიკური თვისებები, რომლებიც მნიშვნელოვანია განსახილველი პროცესისათვის; 3. სასაზღვრო პირობები, მუშა არის და სხეულის ურთიერთქმედება, შემზღველი მოცულობა, რომელშიც მიმდინარეობს პროცესი; 4. სისტემის საწყისი მდგომარეობა ანუ მისი მდგომარეობა პროცესის შესწავლის დაწყების მომენტში.

ცდების ჩატარებისას შესასწავლი პროცესი მიმდინარეობს აპარატში, რომელსაც აქვს კონკრეტული ზომები და ფორმა, რომლებიც განაპირობებენ განსაზღვრულ ფიზიკურ თვისებებს გარკვეულ ზღვრულ და საწყის პირობებში. ცდებით მიღებული მონაცემები ცალსახად შეესაბამება კონკრეტულ პირობებს და იძლევა საკითხის პრაქტიკულ გადაწყვეტას ცალკეული პროცესისათვის ზუსტად ისევე, როგორც დიფერენციალური განტოლების რიცხვითი ამონახსენი კონკრეტული სიდიდეებისათვის.

მსგავსების თეორია საშუალებას იძლევა ცალკეული ცდების შედეგები გავრცელდეს განსახილველი კლასის მსგავსი პროცესების განსაზღვრულ ჯგუფზე ცალსახობის მოცემული განსაკუთრებული პირობების მიხედვით. ეს საშუალებას იძლევა მოდელის ცდების მონაცემები გადატანილ იქნეს მსგავს საწარმოო ობიექტებზე.

მსგავსი პროცესებიდან ამგვარად გამოყოფილი ჯგუფი ან ცალკეული პროცესები იმდენად მსგავსია ერთმანეთის, რომ ისინი შეიძლება განხილულ იქნეს, როგორც ერთიანი პროცესი მიმდინარე პარამეტრების ცვლილებით, რომლებიც განსხვავებულია მხოლოდ მასშტაბით.

მსგავსების ცალსახა პირობები მოიცავს გეომეტრიულ მსგავსებას, დროით მსგავსებას, ზღვრული და საწყისი პირობების მიხედვით მსგავსებას.

აპარატების ან სისტემების (რომლებშიც მიმდინარეობს შესასწავლი პროცესი) გეომეტრიული მსგავსება შენარჩუნებულია იმ შემთხვევაში, თუ ორივე შესადარებელი აპარატის ყველა შესაბამისი ზომების თანაფარდობა წარმოადგენს მუდმივ სიდიდეს, ამავე დროს შესაბამისი კუთხეების სიდიდეები უნდა იყოს ტოლი (სურ. 1.1,ა).

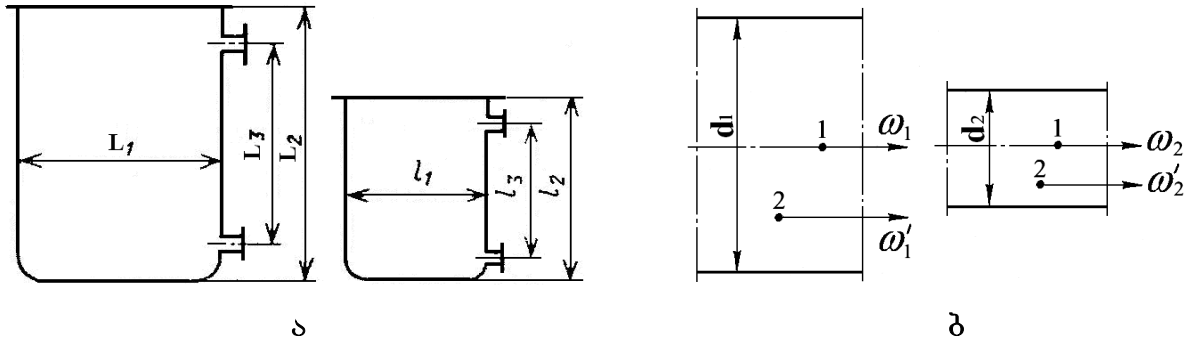
ასეთი გეომეტრიული მსგავსება გამოიხატება შემდეგი თანაფარდობით

$$\frac{l_1}{L_1} = \frac{l_2}{L_2} = \frac{l_3}{L_3} = \dots = K_1,$$

სადაც  $l_1, l_2, l_3, \dots$  პირველი აპარატის მახასიათებელი ზომებია;

$L_1, L_2, L_3 \dots$  – მეორე აპარატის მახასიათებელი ზომები;

$K_1$  – წრფივი (გეომეტრიული) გარდამქმნელი მამრავლი, რომელიც ინარჩუნებს მუდმივ მნიშვნელობას ორი მსგავსი აპარატისათვის. მესამე მსგავს აპარატზე გადასვლისას აღნიშნული გარდამქმნელი მამრავლი იღებს სხვა მნიშვნელობას.



სურ. 1.1. პროცესების მსგავსების მაგალითები:

ა- გეომეტრიულად მსგავსი აპარატები; ბ- კინეტიკური მსგავსება

სურ. 1.1,ბ-ზე თუ  $d_1$  და  $d_2$  დიამეტრების მქონე მილებში სითხის მოძრაობის სიჩქარეები მსგავსია, მაშინ მილების დერძის გასწვრივ  $\omega_1$  და  $\omega_2$  სიჩქარეთა ფარდობა ტოლია  $\omega_1^1$  და  $\omega_2^1$  სიჩქარეთა ფარდობის მილების მსგავს 1 და 2 წერტილებში

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{\omega_1^1}{\omega_2^1} .$$

დროითი მსგავსება შენარჩუნებულია იმ შემთხვევაში, თუ ორი სხვადასხვა პროცესის მიმდინარეობის დროითი ინტერვალი ტოლია. მსგავსი პროცესების დროით ინტერვალად ითვლება დროის შუალედი, რომლის განმავლობაში მთავრდება პროცესების ანალოგიური სტადიები.

დროითი მსგავსება გამოისახება შემდეგი თანაფარდობით:

$$\frac{\tau_1^{11}}{\tau_1^1} = \frac{\tau_2^{11}}{\tau_2^1} = \frac{\tau_3^{11}}{\tau_3^1} = \dots = K_\tau .$$

პროცესის დროის მსგავსებას უწოდებენ დროის ერთგვაროვნებას. პროცესის მიმდინარეობის ერთ–ერთ სახეს წარმოადგენს **სინქრონული პროცესი**. ესაა დროის ერთგვაროვნების კერძო შემთხვევა (როდესაც  $K_\tau = 1$ ). ასეთ შემთხვევაში დროის მონათესავე მომენტები ერთმანეთს ემთხვევა.

ფიზიკური მსგავსების შემთხვევაში, მოცემული სისტემის სხვადასხვა წერტილში პროცესის დამახასიათებელი ყველა ფიზიკური პარამეტრის ფარდობა

მსგავსი სისტემის პარამეტრებთან მუდმივი სიდიდეა დროის ერთსა და იმავე მომენტებში, მაგალითად, თუ ერთი სისტემის სიმკვრივე, სიბლანტე და ტემპერატურა არის  $\rho_1$ ;  $\mu_1$  და  $t_1$ , ხოლო მეორე სისტემის  $\rho_2$ ;  $\mu_2$  და  $t_2$ , მაშინ

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = K_\rho; \quad \frac{\mu_1}{\mu_2} = K_\mu; \quad \text{და} \quad \frac{t_1}{t_2} = K_t.$$

აქაც  $K_\rho$ ;  $K_\mu$  და  $K_t$  მცვავეების კონსტანტებია ანუ სამასშტაბო მამრავლები.

**ფიზიკური სიდიდეების არეს** უწოდებენ აპარატის მთელ მოცულობაში ამ სიდიდეების მყისი მნიშვნელობების გავრცელების ზონას.

ფიზიკური სიდიდეების მსგავსების არე შენარჩუნებულია, თუ აპარატის მეზობელ წერტილებში მსგავსი პროცესები მიმდინარეობს დროის ერთსა და იმავე მომენტებში და მათი თანაფარდობები მუდმივი სიდიდეებია.

**ზღვრული პირობების მსგავსება** განისაზღვრება იმით, რომ პროცესში მონაწილე სისტემების საზღვარზე მსგავსი წერტილებისათვის დროის მსგავს მომენტებში მახასიათებელი სიდიდეების მნიშვნელობათა თანაფარდობები მუდმივია.

**საწყისი პირობების მსგავსება** ნიშნავს, რომ პროცესის შესწავლის დაწყების მომენტში მანქანის ან აპარატის მთელ მოცულობაში ყველა ფიზიკური სიდიდისათვის დაცულია მსგავსი არეები. სხვადასხვა პროცესი ერთმანეთისაგან განსხვავდება ინდივიდუალური ნიშნებით. თუ ყველა ინდივიდუალური ნიშანი მსგავსია, მაშინ პროცესებიც მსგავსია ანუ მსგავსი პროცესები წარმოადგენს სხვადასხვა მასშტაბით მიმდინარე ერთ პროცესს, რამდენადაც მსგავსი პროცესების ინდივიდუალური ნიშნებიც მხოლოდ მასშტაბით განსხვავდებიან.

ორი მსგავსი პროცესის ცვლადებს შორის განსხვავება განპირობებულია პროცესის თავისებურებებით და ისინი განსხვავდებიან მხოლოდ გარდაქმნის მუდმივი მამრავლით. მსგავსი პროცესები მიეკუთვნება ერთ კლასს და აღიწერება ერთი და იმავე დიფერენციალური განტოლებებით და ამყარებს ფუნქციურ დამოკიდებულებას პროცესისათვის მნიშვნელოვან ცვლადებს შორის.

უგანზომილებო რიცხვს, რომელიც გამოსახავს მოცემული და მსგავსი სისტემის ერთგვაროვანი სიდიდეების ფარდობას, უწოდებენ **ინვარიანტს  $i=idem$**  (იგივეა). თუ ინვარიანტი გამოსახულია მარტივი ერთგვაროვანი სიდიდეებით, მაშინ მას უწოდებენ **სიმპლექსს**, ხოლო, თუ იგი შედგენილია განსხვავებული სიდიდის ფარდობებისაგან, მას უწოდებენ **კრიტერიუმს**.

კრიტერიუმს, სათანადო დარგში მომუშავე მეცნიერის პატივსაცემად აღნიშვნავენ ამა თუ იმ გვარის პირველი ორი ასოთი, მაგალითად, მექანიკურ მსგავსებას განსაზღვრავს ნიუტონის კრიტერიუმი ( $Ne$ ).

პროცესებისა და აპარატების შესასწავლად გამოიყენება მსგავსების შემდეგი კრიტერიუმები:

მექანიკური პროცესების მსგავსების კრიტერიუმია ნიუტონის კრიტერიუმი

$$Ne = \frac{f\ell}{m\omega^2}, \quad (1.8)$$

სადაც  $f$  არის ძალა,  $\ell$  - მანძილი,  $m$  - მასა და  $\omega$  - სიხქარე.

ჰიდრომექანიკური მსგავსების კრიტერიუმია რეინოლდსის კრიტერიუმი – ( $\omega$ ) სიხქარის, ( $l$ ) სიგრძის (მილისათვის დიამეტრის) და ( $\rho$ ) სიმკვრივის ნამრავლის შეფარდება ( $\mu$ ) სიბლანტესთან

$$Re = \frac{\omega l \rho}{\mu} = \frac{\omega l}{\nu},$$

სადაც  $\mu$  ნაკადის დინამიკური სიბლანტეა;

$\nu$  - ნაკადის კინემატიკური სიბლანტე ( $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ).

რეინოლდსის კრიტერიუმი ახასიათებს სითხის ან აირის ნაკადის მოძრაობის რეჟიმს:

როდესაც  $Re < 2320$  ნაკადის მოძრაობა ლამინარულია;

როდესაც  $2320 < Re < 10000$  ნაკადის მოძრაობის რეჟიმი გარდამავალია;

როდესაც  $Re > 10000$  ნაკადის მოძრაობა ტურბულენტურია.

თუ ორ სხვადასხვა ნაკადში რეინოლდსის კრიტერიუმები ტოლია, მაშასადამე, ამ ნაკადების მოძრაობები მსგავსია. აღნიშნულიდან გამომდინარეობს, რომ ნაკადების მოძრაობები შეიძლება მსგავსი იყოს სხვადასხვა დიამეტრის მილებში, ამ მილებში განსხვავებული სითხეების ან აირების განსხვავებული სიხქარით მოძრაობისას, მაგრამ მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუ ამ ნაკადების კრიტერიუმები ტოლია. აღნიშნულ მილებში ნაკადების მოძრაობები მსგავსი იქნება იმ შემთხვევაშიც, თუ ამ ნაკადებში ტოლი იქნება წნევის, სიმძიმის, ხახუნის და ინერციის ძალების თანაფარდობები.

ეილერის კრიტერიუმი ამყარებს დამოკიდებულებას ნაკადის ( $\Delta P$ ) წნევას, ( $\rho$ ) სიმკვრივესა და მის ( $\omega$ ) სიხქარეს შორის

$$Ei = \frac{\Delta P}{\rho \omega^2}.$$

**ფრუდის კრიტერიუმი** ახასიათებს სიმძიმის ძალის ზემოქმედებას მსგავს ნაკადებში

$$Fr = \frac{\omega^2}{gl},$$

სადაც  $g$  სიმძიმის ძალის აჩქარებაა, მ/წმ<sup>2</sup>.

**არქიმედეს კრიტერიუმი** ახასიათებს ნაკადის სხვადასხვა ნაწილში სითხის სიმკვრივეთა განსხვავებით განპირობებულ ბლანტი ხახუნისა და ამწევი ძალის ურთიერთქმედებას

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1},$$

სადაც  $\nu$  სითხის კინემატიკური სიბლანტეა, მ<sup>2</sup>/წმ;  $\rho_1$  და  $\rho_2$  - ნაკადის ორ წერტილში სითხის სიმკვრივე, კგ/მ<sup>3</sup>.

**ნუსელტის კრიტერიუმი** ახასიათებს ნაკადსა და კედელს შორის თბოგადაცემის პროცესს

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda},$$

სადაც  $\alpha$  თბოგადაცემის კოეფიციენტი, ჯ/(კგK),

$\lambda$  - ნაკადის თბოგამტარობა, ჯ/(მK).

**პრანდტლის კრიტერიუმი** ახასიათებს ნაკადის ფიზიკურ თვისებებს

$$Pr = \frac{C\mu}{\lambda} = \frac{\nu}{a},$$

სადაც  $C$  ნაკადის სითბოტევადობაა, ჯ/(კგK),

$a$  - ნაკადის ტემპერატურაგამტარობა, ჯ/(კგK).

**გრასჰოფის კრიტერიუმი** ახასიათებს სითხის მოძრაობის რეჟიმს თავისუფალი კონვექციის პირობებში

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t,$$

სადაც  $\beta$  მოცულობითი გაფართოების კოეფიციენტი,

$\Delta t$  - სითხის ფენების ტემპერატურებს შორის სხვაობა, °C.

რადგან მსგავსების ყველა კრიტერიუმი უგანზომილებოა, ამიტომ მათში შემაჯავლი ყველა სიდიდე შეიძლება ჩაისვას ნებისმიერ, მაგრამ ერთსა და იმავე განზომილებათა სისტემაში.

## II თავი. ჰიდროდინამიკური პროცესები

საკვები პროდუქტების წარმოების პროცესში ხშირად მიიღება არაერთგვაროვანი ნარევი, რომელიც შემდგომში საჭიროებს შემადგენელი კომპონენტების ერთმანეთისაგან გამოყოფას. ამ გამოყოფას შეიძლება ჰქონდეს სხვადასხვა მიზანი. კერძოდ, შეიძლება საჭირო იყოს თხევადი ან აირადი ფაზის გასუფთავება მათში შეწონილი მინარევებისაგან ან აირად, ან თხევად ფაზაში შეწონილი ღირებულ პროდუქტების გამოყოფა. ხშირად მიზანი შეიძლება საპირისპიროც იყოს: სხვადასხვა აგრეგატული მდგომარეობის ნივთიერებათაგან უნდა მივიღოთ ერთგვაროვანი ნარევი. როგორც პირველი, ისე მეორე ამოცანის გადაწყვეტა ხდება ჰიდროდინამიკურ კანონზომიერებებზე დაყრდნობით.

ჰიდროკინეტიკას უწოდებენ ჰიდროდინამიკის ნაწილს, რომელიც აღგენს დალექვისა და ფილტრაციის პროცესების კინეტიკური კანონზომიერებების თეორიულ საფუძვლებს.

### 2.1. თხევადი არაერთგვაროვანი სისტემებისა და ჰიდრომექანიკური პროცესების კლასიფიკაცია

თხევადი არაერთგვაროვანი ნარევების და სისტემების თვისებები დამოკიდებულია მათ შედგენილობასა და ფაზების მახასიათებლებზე. არაერთგვაროვანი სისტემა შედგება მინიმუმ ორი ფაზისაგან: შიგა (დისპერსიული) ფაზისაგან, რომელიც იმყოფება წვრილად დაქუცმაცებულ მდგომარეობაში და გარე ფაზისაგან, რომლის ნაწილაკები გარს ეკვრიან დისპერსული ფაზის ნაწილაკებს.

თხევადი არაერთგვაროვანი სისტემებია:

**სუსპენზია** – სისტემა, რომელიც შედგება სითხისაგან და მასში შეწონილი მყარი ნაწილაკებისაგან. მყარი ნაწილაკების ზომების მიხედვით განასხვავებენ: უხეშ (ნაწილაკების ზომები  $>100$  მკმ), წმინდა (ნაწილაკების ზომები  $100-0,1$  მკმ) და კოლოიდურ (ზომები  $0,1$  მკმ და ნაკლები) სუსპენზიებს;

**ემულსია** – სისტემა, რომელიც შედგება სითხისაგან და მასში განაწილებული სხვა ისეთი სითხისაგან, რომელიც არ იხსნება ძირითად სითხეში.

**ქაფი** – სისტემა, რომელიც შედგება სითხისა და მასში განაწილებული აირის ბუშტულებისაგან.

ძირითად ჰიდროდინამიკურ პროცესებს მიეკუთვნება დალექვა, ფილტრაცია, მყარი მასალების ფსევდოგათხევადება და თხევად გარემოში შერევა.

## 2.2. ჰიდრომექანიკური პროცესების მატერიალური ბალანსი

ჰიდრომექანიკური პროცესების მიმდინარეობის შედეგს ერთ შემთხვევაში შეიძლება წარმოადგენდეს არაერთგვაროვანი ნარევის გაყოფა, ხოლო მეორე შემთხვევაში – ნარევის წარმოქმნა ცალკეული ფაზებისაგან.

განვიხილოთ ნარევის გაყოფის პროცესი. დავუშვათ არაერთგვაროვანი გასაყოფი სისტემა შეიცავს  $a$  ნივთიერების უწყვეტ ფაზას და მასში დისპერსირებულ  $b$  ნივთიერებას. შემოვიღოთ აღნიშვნები: საწყისი ნარევის რაოდენობა –  $G_{საწ.}$ , საწყის ნარევაში  $b$  ნივთიერების შემცველობა –  $X_{საწ.}$ , საბოლოო (გასუფთავებული) პროდუქტის რაოდენობა –  $G_{საბ.}$ , საბოლოო პროდუქტში  $b$  ნივთიერების მასური წილი –  $X_{საბ.}$ , ნალექის რაოდენობა –  $G_{ნაღ.}$ , ნალექში  $b$  ნივთიერების მასური წილი –  $X_{ნაღ.}$ ,  $a$  პროდუქტის სიმკვრივე –  $\rho_a$ ,  $b$  პროდუქტის სიმკვრივე –  $\rho_b$ .

დანაკარგების გათვალისწინების გარეშე მატერიალური ბალანსი შეიძლება შემდეგი სახით წარმოვადგინოთ:

ყველა პროდუქტისათვის

$$G_{საწ.} = G_{საბ.} + G_{ნაღ.} \quad 2.1.$$

დისპერსირებული (შეწონილი) პროდუქტებისათვის

$$G_{საწ.} X_{საწ.} = G_{საბ.} X_{საბ.} + G_{ნაღ.} X_{ნაღ.} \quad 2.2.$$

(2.1) და (2.2) განტოლებების ერთობლივი ამოხსნით  $G_{საბ.}$  და  $G_{ნაღ.}$  სიდიდეების მიმართ, შეგვიძლია განვსაზღვროთ საბოლოო პროდუქტის ( $G_{საბ.}$ ) და ნალექის ( $G_{ნაღ.}$ ) რაოდენობები

$$G_{საბ.} = G_{საწ.} \frac{X_{ნაღ.} - X_{საწ.}}{X_{ნაღ.} - X_{საბ.}},$$

$$G_{ნაღ.} = G_{საწ.} \frac{X_{საწ.} - X_{საბ.}}{X_{ნაღ.} - X_{საბ.}}.$$

(2.1) და (2.2) ტოლობები ამავე დროს შერევის პროცესსაც გამოსახავს. (2.2) განტოლების ანალოგიურად ადვილად შეიძლება განისაზღვროს მიღებულ ნარევაში შეწონილი ნივთიერების კონცენტრაცია

$$X_{შეწ.} = \frac{G_1 X_1 + G_2 X_2}{G_1 + G_2},$$

სადაც  $G_1$  და  $G_2$  შესარევი პროდუქტების რაოდენობებია;

$X_1$  და  $X_2$  - ამ პროდუქტებში შეწონილი ნივთიერებების მასური შემცველობა;  
 $G_1 + G_2$  - მიღებული ნარევის რაოდენობა.

### 2.3. დალექვა

დალექვა არის თხევადი ან აირისებური არაერთგვაროვანი სისტემიდან მყარი ნაწილაკების გამოყოფის პროცესი. დალექვის არსი არის ის, რომ აპარატში უძრავი ან ნელი სიჩქარით მოძრავი არაერთგვაროვანი სისტემა სიმძიმის ძალის ზეგავლენით იყოფა შემადგენელ ნაწილებად.

არაერთგვაროვანი ეწოდება სისტემას, რომელიც შედგება საკუთარი გამოყოფი ზედაპირის მქონე ორი ან მეტი ფაზისაგან და მექანიკურად შეიძლება მათი განცალკევება ერთმანეთისაგან. ნებისმიერი ბინარული არაერთგვაროვანი სისტემა შედგება შიგა (დისპერსირებული) ფაზისაგან და გარე ფაზისაგან, რომელშიც იმყოფებიან დისპერგირებული ფაზის ნაწილაკები.

არაერთგვაროვანი (დისპერსიული) სისტემების გაყოფა ხორციელდება დალექვით, გაფილტვრით, გარეცხვით, აგრეთვე ცენტრიდანული ძალების ზემოქმედებით.

#### 2.3.1. დალექვა სიმძიმის ძალით

სიმძიმის ძალით ანუ გრავიტაციულ დალექვას იყენებენ მტვრის, სუსპენზიების და ემულსიების გასაყოფად. ეს პროცესი ვერ უზრუნველყოფს წვრილდისპერსიული ნაწილაკების გამოყოფას და ხასიათდება მცირე სიჩქარით. ამიტომ მას უპირატესად იყენებენ არაერთგვაროვანი სისტემების ნაწილობრივი გაყოფისათვის. გრავიტაციული დალექვის უპირატესობას წარმოადგენს მარტივი დამლექი აპარატები და მცირე ენერგეტიკული დანახარჯი.

განვიხილოთ სიმძიმის ძალით დალექვის პროცესი (სურ. 2.1). სფერულ ნაწილაკზე მოქმედი სიმძიმის ძალა

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ნაწ}} g ,$$

სადაც  $d$  სფერული ნაწილაკის დიამეტრია, მ;

$\rho_{\text{ნაწ}}$  - ნაწილაკის სიმკვრივე, კგ/მ<sup>3</sup>.



sur. 2.1. სიმძიმის ძალით ნაწილაკის დაღეჭვის სქემა

იმავე ნაწილაკზე სითხეში მოქმედი ამომგდები ძალა

$$N = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{სითხე}} g ,$$

სადაც  $\rho_{\text{სითხე}}$  სითხის სიმკვრივეა, კგ/მ<sup>3</sup>.

მამოძრავებელი ძალა, რომელიც განაპირობებს ნაწილაკის დაღეჭვას,

$$P = G - N = \frac{\pi d^3}{6} g (\rho_{\text{ნაწილაკი}} - \rho_{\text{სითხე}}).$$

სითხის წინააღმდეგობის  $R$  ძალა მიმართულია ნაწილაკის მოძრაობის საპირისპიროდ და შედგება ხახუნისა და ინერციის ძალებისაგან. ხახუნის ძალების გავლენა უფრო მეტია იმ შემთხვევაში, როდესაც გვაქვს დაღეჭვის მცირე სიჩქარე, ნაწილაკების მცირე ზომები და გარემოს (სითხის) დიდი სიბლანტე, ანუ ლამინარული რეჟიმის შემთხვევა. ამ პირობებში სითხე თანაბრად შემოუვლის ნაწილაკს და არ ქმნის არეულ ნაკადებს.

ტურბულენტური დაღეჭვის შემთხვევაში, ნაწილაკის უკან იქმნება ამღვრეული ნაკადები, რომლებიც, თავის მხრივ, ქმნიან გარკვეულ გაიშვიათებასაც. ეს განაპირობებს გარემოს წინააღმდეგობის გარკვეულ გაზრდას და შესაბამისად, დაღეჭვის პროცესის სიჩქარის შემცირებას.

ნაწილაკის დაღეჭვის რეჟიმისაგან დამოუკიდებლად ნიუტონი იძლევა გარემოს წინააღმდეგობის ძალის შემდეგ მნიშვნელობას

$$R = \xi F \frac{\rho_{\text{სითხე}} \cdot \omega^2}{2} ,$$

სადაც  $\xi$  გარემოს წინააღმდეგობის კოეფიციენტია;

$F$  - ნაწილაკის კვეთის პროექცია მოძრაობის მიმართულებისადმი მართობულ სიბრტყეზე, მ<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{სითხე}}$  - სითხის სიმკვრივე, კგ/მ<sup>3</sup>;

$\omega$  - ნაწილაკის დაღეჭვის სიხარე, მ/წმ.

დასაღეჭი ნაწილაკი თავდაპირველად აჩქარებულად მოძრაობს, მაგრამ გარკვეული დროის შემდეგ, როდესაც  $R$  და  $P$  ძალები სიდიდით მიუახლოვდებიან ერთმანეთს, იწყებს თანაბარი სიხარით მოძრაობას და დაღეჭვას. ამ მუდმივ სიხარეს შეესაბამება პირობა  $P = R$ . ამ პირობებში ნაწილაკის სიხარეს ეწოდება დაღეჭვის სიხარე.

თუ გავუტოლებთ  $P$  და  $R$  სიდიდეების მნიშვნელობებს, მივიღებთ

$$\frac{\pi d^3}{6} g(\rho_{\text{ნაწ}} - \rho_{\text{სომ}}) = \xi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{სომ}} \cdot \omega^2}{2},$$

საიდანაც განისაზღვრება დაღეჭვის სიხარე

$$\omega = \sqrt{\frac{4gd(\rho_{\text{ნაწ}} - \rho_{\text{სომ}})}{3\rho_{\text{სომ}} \cdot \xi}}.$$

მიღებული ფორმულა მართებულია დაღეჭვის ნებისმიერი რეჟიმისათვის, თუ შესაბამისად ჩავსვამთ  $\xi$  სიდიდის მნიშვნელობას.

თუ დასაღეჭი ნაწილაკები არ არის სფერული, მაშინ საჭიროა განისაზღვროს მათი ეკვივალენტური დიამეტრი  $d_{\text{ეკ}}$ , რომელიც შეიძლება გამოვთვალოთ ნაწილაკის  $V$  მოცულობის ან  $G$  მასის მიხედვით ფორმულიდან

$$d_{\text{ეკ}} = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} V} \quad \text{ან} \quad d_{\text{ეკ}} = 1,24 \sqrt[3]{\frac{G}{\rho_{\text{ნაწ}}}}.$$

დაღეჭვის პროცესი ხორციელდება გასაყოფ კამერაში, სადაც გაატარებენ გასაყოფ ნარევს. კამერის ძირზე ნარევში დაიღეჭება შეწონილი ნაწილაკები, გასუფთავებული ნაწილი კი გამოაქვთ კამერიდან. დაღეჭვის პროცესის ჩასატარებლად დაცული უნდა იყოს ორი ძირითადი პირობა: 1. აპარატში სითხის დაყოვნების ხანგრძლივობა მეტი ან ტოლი უნდა იყოს ნაწილაკების დაღეჭვის ხანგრძლივობაზე; 2. აპარატში სითხის ნაკადის სიხარე გაცილებით ნაკლები უნდა იყოს დაღეჭვის სიხარეზე. პირველი პირობის შეუსრულებლობის შემთხვევაში ნაწილაკები ვერ მოასწრებენ დაღეჭვას; მეორე პირობის შეუსრულებლობა კი გამოიწვევს უკვე დაღეჭილი ნაწილაკების კვლავ ზევით აწევას სითხის ნაკადის მიერ.

დამღეჭი კამერის (სურ. 2.2,ა) მუშა მოცულობა შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით

$$V = abh = G\tau_0, \tag{2.3}$$

სადაც  $V$  კამერის მუშა მოცულობაა, მ<sup>3</sup>;

$a, b, h$  - კამერის ზომები, მ;

$G$  - კამერის მწარმოებლობა, მ<sup>3</sup>/წმ;

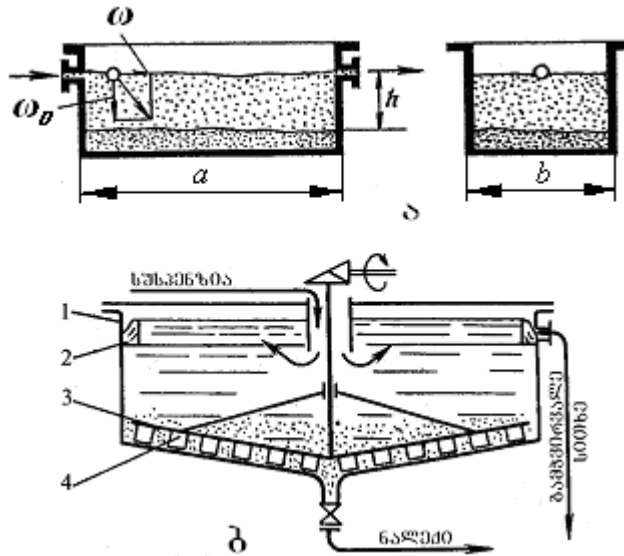
$\tau_0$  - ნაწილაკის დაღეკვის ხანგრძლიობა, წმ;

თუ გავითვალისწინებთ, რომ

$$\tau_0 = \frac{h}{\omega_0} \text{ წმ,}$$

სადაც  $\omega_0$  ნაწილაკის დაღეკვის სიხარება (მ/წმ). მაშინ შეგვიძლია დავწეროთ

$$G = ab\omega_0, \text{ მ}^3/\text{წმ.} \quad (2.4)$$



ნახ. 2.2. დამღეკი კამერების სქემები

ამგვარად გამოდის, რომ დამღეკი აპარატის მწარმოებლობა ( $G$ ) ტოლია დაღეკვის ფართობის ( $ab$ ) ნამრავლისა დაღეკვის სიხარებაზე ( $\omega_0$ ).

ნახ.2.2,ბ-ზე წარმოდგენილია დამღეკი აპარატის სქემა ნაღეკის მექანიზმებული გამოტვირთვით. დამღეკი წარმოადგენს ცილინდრულ რეზერვუარს 1 კონუსური ძირით და წრიული ღარით 2. დამღეკი აღჭურვილია ფრთებიანი 3 ლილვით და საფხეკებით 4. ლილვის ბრუნვის შედეგად ნაღეკი პერიფერიიდან გადაადგილდება გამოსასვლელი მილყელისაკენ, რომლის ონკანს ხსნიან მხოლოდ ნაღეკის გამოტვირთვის პროცესში.

### 2.3.2. დაღეკვა ცენტრიდანული ძალის მოქმედებით

ცენტრიდანული ძალის ზემოქმედებით დაღეკვის პროცესს იყენებენ მტვრის, სუსპენზიების და ემულსიების გასაყოფად. ამ პროცესის განხორციელებისათვის დასაღეკ ნარევეზე უნდა იმოქმედოს ცენტრიდანულმა

ძალემა, რაც მიიღწევა გასაყოფი ნაკადის შეტანით ცენტრიდანული ძალების მოქმედების ველში.

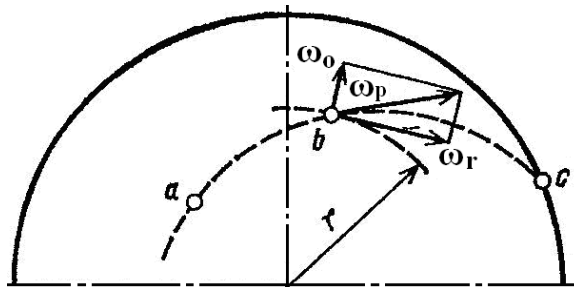
ცენტრიდანული ძალების ველის შესაქმნელად გამოიყენება ორი ტექნიკური ხერხი: 1. უძრავ აპარატში ხორციელდება აირის ან სითხის ნაკადის ბრუნვითი მოძრაობა. აღნიშნული ხერხი ხორციელდება ციკლონებში; 2. სითხის ან აირის ნაკადი შედის მბრუნავ აპარატში და ბრუნავს მასთან ერთად. ამ ხერხს ახორციელებენ ცენტრიფუგებში.

ცენტრიდანული ძალის ზეგავლენით დაღექვის პროცესის ფიზიკური არსი არის ის, რომ მბრუნავ ნაკადში შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედებს ცენტრიდანული ძალა, რომელიც მას უბიძგებს ცენტრიდან რადიუსის გასწვრივ ისეთი სიჩქარით, რომელიც ტოლია დაღექვის  $\omega_0$  სიჩქარის (ნახ. 2.3). ნაკადის წრიული სიჩქარე ტოლია  $\omega_r$ -ის, დასაღექი ნაწილაკი ჯამური  $\omega_p$  სიჩქარით მოძრაობს abc ტრაექტორიაზე და დაიღექება აპარატის კედელზე. დაღექვის პროცესი მიმდინარეობს ცენტრიდანული ძალის ზეგავლენით

$$G = \frac{m\omega_r^2}{r} \text{ ნ,}$$

სადაც  $m$  ნაწილაკის მასაა, კგ;

$r$  - ნაწილაკის ბრუნვის საშუალო რადიუსი, მ.



ნახ. 2.3. ნაწილაკზე ცენტრიდანული ძალების ზემოქმედების სქემა

დაღექვას წინააღმდეგობას უწევს ნაკადში არსებული ხახუნის ძალა (გარემოს წინააღმდეგობის ძალა).

ცენტრიდანული ძალების ზემოქმედებით შეწონილი ნაწილაკების დაღექვის სიჩქარე შეიძლება განისაზღვროს ფორმულით

$$\omega_0 = \frac{r}{\tau} \text{ მ/წმ,}$$

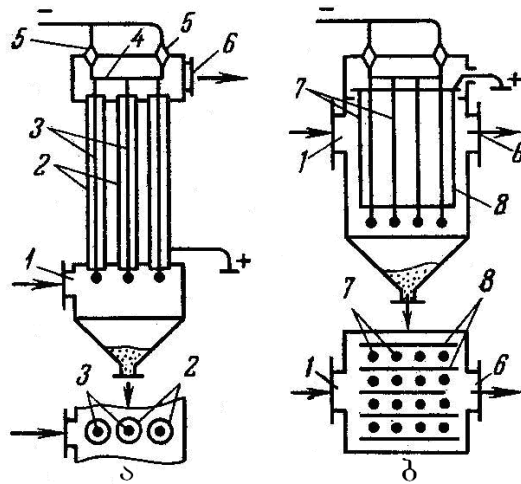
საიდანაც დაღექვის ხანგრძლიობა

$$\tau = \frac{r}{\omega_0} \text{ წმ.}$$

### 2.3.3. დალექვა ელექტრული ველის ზეგავლენით

ელექტრული ველის მოქმედების აირში მყარი და თხევადი ნაწილაკების დალექვას მნიშვნელოვანი უპირატესობა აქვს დალექვის სხვა ხერხებთან შედარებით. ელექტრული ველის ზემოქმედება დამუხტულ ნაწილაკებზე მნიშვნელოვანწილად განისაზღვრება მისი ელექტრული მუხტით. ელექტრული დალექვის შემთხვევაში მცირე ზომის ნაწილაკებს შესაძლებელია გადაეცეთ საკმაოდ დიდი ელექტრული მუხტი და ამის შედეგად მიღწეულ იქნას ძალზე მცირე ზომის ნაწილაკების დალექვა. ასეთი მცირე ზომის ნაწილაკების დალექვა სხვა ხერხებით შეუძლებელია.

ელექტრული დალექვის პროცესის ფიზიკური არსი ნაჩვენებია ნახ.2.4-ზე.



ნახ. 2.4. ელექტროფილტრი:  
ა - მილისებრი; ბ - ფირფიტისებრი

წინასწარ ახდენენ შეწონილი ნაწილაკების შემცველი აირის ნაკადის იონიზაციას. ამის შედეგად აირში შეწონილი ნაწილაკები იძენენ ელექტრულ მუხტს. აღნიშნული იონიზირებული აირის ნაკადის გავლისას ორ ელექტროდს შორის არსებულ ელექტრულ ველში, დამუხტული ნაწილაკები გადაადგილდებიან საპირისპირო მუხტის მქონე ელექტროდებისაკენ და დაილექებიან მათზე. აირის იონიზაცია შეიძლება განხორციელდეს ელექტროდებზე საკმაოდ მაღალი პოტენციალთა სხვაობის მოდების გზით, ან აირის გატარებით რადიაქტიურ ველში, რენტგენის სხივებში და სხვ.

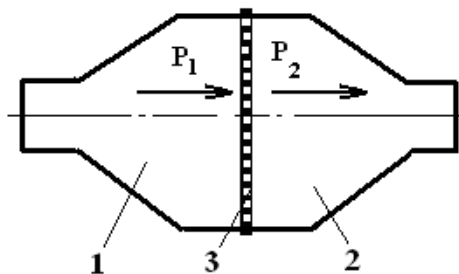
ნახ.2.4,ა-ზე წარმოდგენილია მილისებური ელექტროდამლექვის სქემა. დამტვერილი აირი აპარატში შედის მილყელიდან 1 და ნაწილდება მილებში 2, რომელთა დერძულად, ჩარჩოზე 4 დაკიდებულია უარყოფითად დამუხტული ელექტროდები 3, თვითონ მილები კი წარმოადგენენ დადებითად დამუხტულ

ელექტროდებს. ჩარჩო 4 დაყრდნობილია იზოლატორებზე. მიღების შიგნით დალექილი ნაწილაკების პერიოდული გამოტვირთვა ხდება აპარატის ქვედა ნაწილიდან სისტემის შენჯღრევით, ხოლო გაწმენდილი აირი გამოედინება მილყელიდან 6.

განხილულის ანალოგიურად არის მოწყობილი ფირფიტისებრი ელექტროდამლექი (ნახ.2.4,ბ), რომელშიც უარყოფითად დამუხტულ ელექტროდებს წარმოადგენენ მავთულები 7, ხოლო დამლექ დადებით ელექტროდებს – ლითონის ფირფიტები 8. ნალექის გამოტვირთვის პროცესი ანალოგიურია წინა აპარატის, ხოლო გაწმენდილი აირი გადის მილყელიდან 6.

## 2.4. გაფილტვრა

გაფილტვრა (ნახ. 2.5) ეწოდება მყარი დისპერსული ფაზის შემცველი არაერთგვაროვანი სისტემის გაყოფის პროცესს, რომელიც ემყარება ფოროვანი ტიხარის მიერ მყარი ნაწილაკების დაკავებას და თხევადი ან აირადი ფაზის გატარებას. გაფილტვრით შესაძლებელია მიღწეული იქნას სითხეების ან აირების პრაქტიკულად სრული გასუთავება შეწონილი ნაწილაკებისაგან. გაფილტვრის პროცესი ფართოდ გამოიყენება როგორც კვების, ასევე მრეწველობის მრავალ სხვა დარგში.



ნახ. 2.5. წნევათა სხვაობის ზეგავლენით გაფილტვრის პროცესის სქემა:

1- საწყისი ნარევის არე; 2-ფილტრატის არე; 3-ფოროვანი ტიხარი

გაფილტვრის პროცესის ძირითად დამახასიათებელ სიდიდეებს წარმოადგენს გაფილტვრის სიჩქარე და ხანგრძლიობა, რომლებიც დამოკიდებულია პროცესის მამოძრავებელ ძალაზე, ფილტრატის სიბლანტესა და ნალექისა და ფილტრის ფენების წინააღმდეგობებზე.

გაფილტვრის სიჩქარე ეწოდება დროის ერთეულში ფილტრის ზედაპირის ერთეულიდან მიღებული ფილტრატის რაოდენობას.

## 2.4.1. გაფილტვრის პროცესები

მიმდინარეობის თავისებურებების მიხედვით არსებობს ორი ძირითადი სახის გაფილტვრის პროცესი: გაფილტვრა ფილტრის ზედაპირზე ნალექის წარმოქმნით და გაფილტვრა ნალექის ფილტრის ფორებში დალექვის პირობებში.

როგორც წესი, ფოროვანი ტიხრის ფორების ზომები მეტია სითხეში შეწონილი მყარი ნაწილაკების ზომებზე. მიუხედავად ამისა, მხოლოდ პროცესის დასაწყისში აქვს ადგილი ფილტრატთან ერთად ნაწილაკების გასვლას ტიხარის ფორებში. ძალზე მცირე დროის შემდეგ ფორების თავზე წარმოიქმნება მყარი მინარევის ნაწილაკებისაგან შექმნილი თაღები, რომლებიც აღარ ატარებენ მინარევის დანარჩენ ნაწილაკებს ფორებისაკენ და ამით იცავენ აღნიშნულ ფორებს დაჭუჭყიანებისაგან. წარმოიქმნება ნალექი, რომლის სისქე იზრდება ფილტრაციის პროცესის მიმდინარეობისას. ნალექის წარმოქმნის შემდეგ მისი ფენა ფაქტობრივად ძირითად როლს ასრულებს ფილტრაციის პროცესში, რადგან უკვე ეს ფენა აკავებს მყარი მინარევის ნაწილაკებს. რაც უფრო იზრდება ნალექის ფენის სისქე, მით უფრო მატულობს გაფილტვრისადმი წინააღმდეგობა და მცირდება მისი სიჩქარე.

გაფილტვრის მეორე სახის პროცესს წარმოადგენს გაფილტვრა ნალექის ფილტრის ფორებში დალექვის (ჩარჩენის) პირობებში, ე.წ. “საცობის ტიპის“ გაფილტვრა. ეს ხდება იმ შემთხვევებში, როდესაც მინარევის ნაწილაკების ზომები მცირეა, აგრეთვე ძალზე ბლანტი სითხეების გაფილტვრისას. ასეთ სუსპენზიებში დალექვა მიმდინარეობს ძალზე ნელა და ფორების თავზე თაღები არ წარმოიქმნება. მყარი ნაწილაკები შეაღწევენ კაპილარებში და იქ ჩარჩებიან მიწებების ან მათში გაჭედვის გამო, თუმცა ნაწილაკების ნაწილი გააღწევს ფორებში და გადის ფილტრატთან ერთად. ფილტრის კაპილარებში ჩარჩენილი ნაწილაკები კეტავენ მათ. დაკეტილი ფორების რაოდენობის ზრდასთან ერთად ფილტრის ცოცხალი კვეთი მცირდება და წინააღმდეგობა იზრდება.

გარდა აღწერილი ორი სახის პროცესისა, არსებობს გაფილტვრის მესამე სახე ანუ შუალედური პროცესიც. ამ შემთხვევაში ხდება მყარი ნაწილაკების შეღწევა ფილტრის ფორებში, ამ ფორების გაჭედვა მყარი ნაწილაკების მიერ და ამავე დროს კაპილარების შესასვლელებთან თაღების წარმოქმნა.

როგორც ზემოთ აღწერილიდან ჩანს, გაფილტვრის პროცესი დამოკიდებულია გასაფილტრი სუსპენზიის თვისებებზე, ფილტრის სახეზე და გაფილტვრის წნევაზე. ამიტომ ერთი და იგივე სუსპენზია სხვადასხვა პირობებში შეიძლება განსხვავებულად გაიფილტროს.

## 2.4.2. გაფილტვრა ნალექის ფილტრის ზედაპირზე წარმოქმნით

გაფილტვრის თეორიის ძირითად ამოცანას წარმოადგენს გაფილტვრის პროცესზე მოქმედ სხვადასხვა ფაქტორებისაგან დამოკიდებულებით ამ პროცესის სიჩქარის დადგენა. გაფილტვრის სიჩქარე წარმოადგენს დროის ერთეულში გაფილტვრული სითხის რაოდენობის ფარდობას ფილტრის ზედაპირის ფართობთან

$$v = \frac{V}{F\tau} \quad \text{მ/წმ,}$$

სადაც  $V$  - ფილტრატის მოცულობა, მ<sup>3</sup>;

$F$  - ფილტრის ზედაპირის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

$\tau$  - გაფილტვრის პროცესის ხანგრძლიობა, წმ.

გაფილტვრის პროცესის სიჩქარე დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე, რომელთაგან მთავარია: სითხის სიბლანტე, ნალექის სტრუქტურა და სისქე, ფილტრის მახასიათებლები, პროცესის მამოძრავებელი ძალა.

ფილტრაციის პროცესის მამოძრავებელი ძალა არის ფილტრის წინ სითხის წნევა და ფილტრიდან გამოსვლისას ფილტრატის წნევა შორის სხვაობა

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

აღნიშნული სხვაობა (ნახ.2.6) შეიძლება წარმოიქმნას ფილტრის წინ წნევის გადიდებით ან ფილტრის შემდეგ ვაკუუმის შექმნით. ამის შესაბამისად ფილტრი შეიძლება მუშაობდეს წნევის ან ვაკუუმის პირობებში.

გაფილტვრის თეორია ემყარება იმ მოსაზრებას, რომ ნალექის კაპილარებში სითხის მოძრაობას აქვს ლამინარული ხასიათი. აღნიშნული მოსაზრება გამომდინარეობს ფორების დიამეტრის სიმცირიდან. ფორებში სითხის ასეთ პირობებში მოძრაობისათვის რეინოლდსის რიცხვი ნაკლები იქნება მის კრიტიკულ მნიშვნელობაზე. ამიტომ შეიძლება ითქვას, რომ ნალექის კაპილარებში სითხის მოძრაობა ემორჩილება **პუაზელის განტოლებას**

$$\omega = \frac{\Delta p d^2}{32 \mu l} ,$$

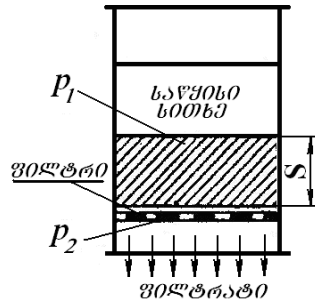
სადაც  $\omega$  - კაპილარში სითხის მოძრაობის სიჩქარე, მ/წმ;

$p$  - წნევა, პა;

$d$  - კაპილარის დიამეტრი, მ;

$\mu$  - სითხის დინამიკური სიბლანტე, პა.წმ;

$l$  - კაპილარის სიგრძე, მ;



ნახ. 2.6. ნალექის წარმოქმნის პირობებში გაფილტვრის სქემა

ერთი კაპილარის გასწვრივ გამავალი სითხის ხარჯი

$$q = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\Delta p d^2}{32 \mu l} = \frac{\Delta p d^4 \alpha}{32 \mu l} \quad \text{მ}^3/\text{წმ} ,$$

სადაც  $\alpha = \frac{\pi}{4}$  კაპილარის ფორმაზე დამოკიდებული კოეფიციენტი.

მაშინ,  $\tau$  დროის განმავლობაში ფილტრის მთელი ზედაპირის გავლით გასული სითხის მოცულობა ტოლი იქნება

$$Q = q \tau F z = \frac{\Delta p d^4 \alpha}{32 \mu l} \tau F z \quad \text{მ}^3, \quad (2.5)$$

სადაც  $F$  ფილტრის ზედაპირის მთლიანი ფართობია,  $\text{მ}^2$ ;

$z$  - ფილტრის ზედაპირის ერთეულზე ფორების რაოდენობა,  $1/\text{მ}^2$ ;

მიღებული განტოლებების გამოყენებით ფილტრაციის სიჩქარის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$v = \frac{\Delta p}{r S} \quad \text{მ/წმ}, \quad (2.6)$$

სადაც  $r = \sigma \mu$  - წარმოადგენს ნალექის კუთრ წინაღობას,  $(\text{ნ.წმ}/\text{მ}^4)$ ;

$\sigma$  - კოეფიციენტი ახასიათებს ნალექის სტრუქტურულ წინაღობას;

$S$  - გამფილტრავი ფენის სისქე, მ.

მიღებულ განტოლებაში გათვალისწინებული არ არის წინააღმდეგობა, რომელსაც ქმნის უშუალოდ ფილტრი. აღვნიშნოთ ეს წინააღმდეგობა  $R$  ასოთი. მაშინ გაფილტვრის სიჩქარის საანგარიშო განტოლება მიიღებს სახეს

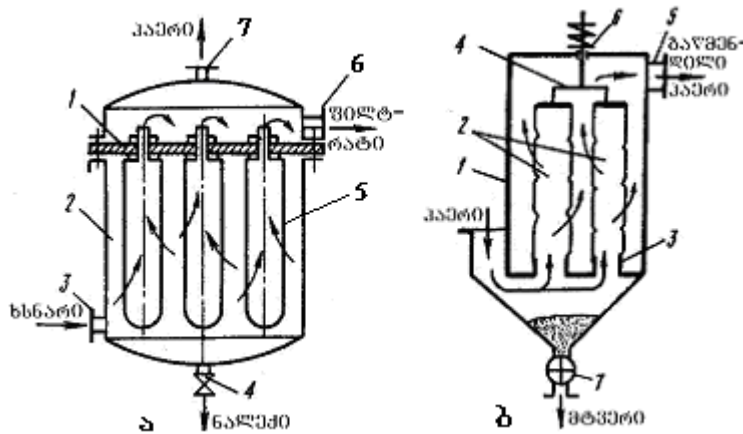
$$v = \frac{\Delta p}{r S + R} \quad (2.7)$$

$R$  წინააღმდეგობის განზომილებაა  $\text{ნ.წმ}/\text{მ}^3$ .

მიღებული განტოლება დამყარებულია მოსაზრებაზე, რომ ნალექის სტრუქტურის მახასიათებელი ყველა სიდიდე ფილტრაციის პროცესში უცვლელია. მაგრამ რეალურად, მიღებული განტოლება მართებულია მხოლოდ უკუმშველი ნალექებისათვის. თუმცა ნალექების უმეტესობა კუმშვადია და მათთვის ზედა ფენები ყოველთვის ნაკლებად მკვრივია, ვიდრე ქვედა ფენები. შესაბამისად, კაპილარები ქვედა ფენებში უფრო დაწვრილებულია, ვიდრე ზედა ფენებში. ამიტომ მიღებული ფორმულა კუმშვადი ნალექების მქონე სითხეებისათვის საჭიროებს კორექტირებას.

ნახ.2.7-ზე წარმოდგენილია საფილტრაციო აპარატების სქემები.

ნახ.2.7,ა-ზე ნაჩვენებია ვაზნებიანი ფილტრის სქემა, რომელსაც წარმატებით იყენებენ მაგალითად, უაღკოპოლო სასმელების წარმოებაში წყლის გასაწმენდად შეწონილი ნაწილაკებისაგან და მიკროორგანიზმებისაგან.



ნახ.2.7. საფილტრაციო აპარატების სქემები:  
ა- ვაზნებიანი; ბ- სახელოიანი

ასეთი ფილტრის ელემენტს ამზადებენ ფოროვანი კერამიკისაგან 50 მმ დიამეტრის და 270 მმ სიმაღლის ვაზნის სახით, კედლის სისქით 4-5 მმ. ვაზნის ფორიანობა შეადგენს 30-40%. ვაზნებს 5 ამაგრებენ ტიხრის 1 ნახვრეტებში, რომელიც ჩადგმულია კორპუსში 2. გასაწმენდი სითხე 0,2-0,25 მპა წნევით მიეწოდება აპარატის კორპუსის ქვედა ნაწილში მილყელიდან 3. ვაზნების კედლის კაპილარების გავლით სითხე შედის მათ შიგა არეში და გაფილტრული სითხე აპარატიდან გამოდის მილყელის 6 გავლით. ვაზნების გარე ზედაპირზე წარმოქმნილი ნალექი პერიოდულად ირეცხება და გამოდის აპარატის ძირიდან ონკანის 4 გავლით. აპარატის სახურავზე გაკეთებულია ჰაერის გამომშვები მილყელი 7.

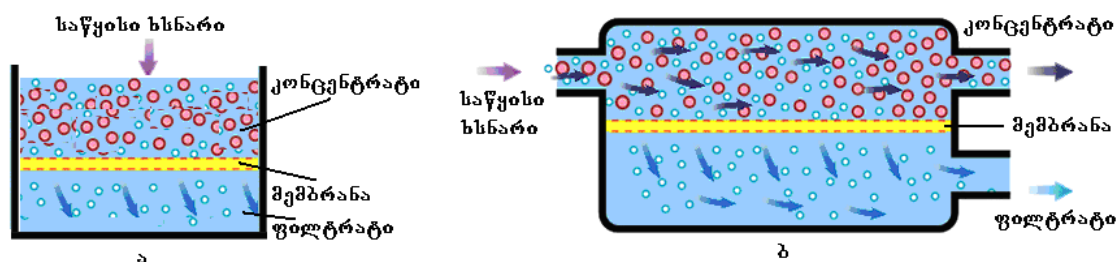
ჰაერის და ვაზნების ფილტრაციისათვის ფართოდ იყენებენ უხეში ქსოვილისაგან დამზადებულ სახელოან ფილტრებს (ნახ.2.7,ბ). ფილტრი შედგება

კორპუსისაგან 1 და ქსოვილის სახელოების 2 რიგისაგან, რომელთა ქვედა გახსნილი ბოლოები მაგრდება მილებიანი გისოსის მილყელებზე 3. ზედა ბოლოებით სახელურები დაკიდებულია ჩარჩოზე 4, რომელიც დაკავშირებულია შემნჯღრევ მექანიზმთან 6. დამტვერიანებული მშრალი ჰაერი ან გაზი ვენტილატორით მიეწოდება კორპუსის ქვედა ნაწილიდან და შედის სახელოების შიგა არეში. რამდენადაც სახელოების ზედა ბოლოები დახურულია, ჰაერი იძულებით გადის სახელოების ქსოვილში და იფილტრება. გაფილტრული ჰაერი აპარატიდან გამოდის მილყელიდან 5. სახელოების შიგა ზედაპირზე დალექილი მტვერი გამოიტვირთება სახელოების სისტემის პერიოდული შენჯღრევით, მექანიზმის 6 დახმარებით. მტვერი გროვდება აპარატის ქვედა კონუსურ ნაწილში და გამოიტვირთება სექტორული ჩამოკეტით 7.

## 2.5. ნარევის მემბრანული გაყოფა

ნარევთა გაყოფის თანამედროვე ყველაზე მაღალეფექტურ პროცესს წარმოადგენს მემბრანული ტექნოლოგია. ტრადიციულ მეთოდებთან შედარებით მემბრანულ ტექნოლოგიას უკავია მნიშვნელოვანი ადგილი თხევადი სისტემების გაყოფის პროცესებში. ნარევთა მემბრანული გაყოფის პროცესი ეწოდება ნარევთა გაყოფას ნახევრად შეღწევადი მემბრანების გამოყენებით. ეს პროცესი გამოიყენება ხსნარების გაწმენდისა და კონცენტრირებისათვის, მაღალმოლეკულური ნივთიერებების გამოსაყოფად დაბალმოლეკულურისაგან, ჩამდინარე წყლების მაღალი ხარისხით გასაწმენდად, ზღვის წყლის გამტკნარებისათვის და ა.შ.

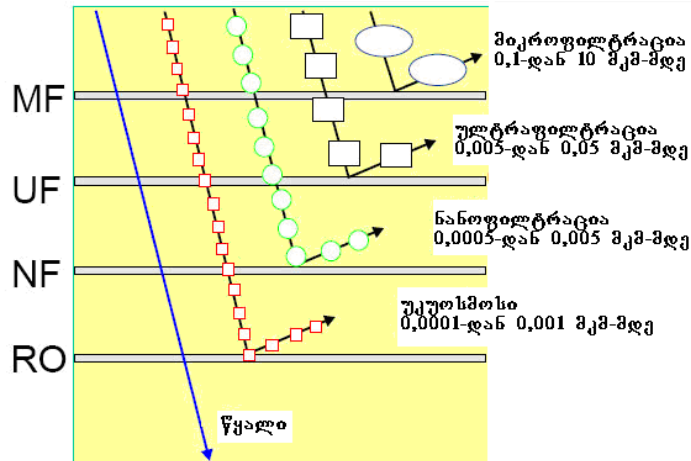
მემბრანული გაყოფის პროცესის არსი არის შემდეგი: გასაყოფი ნარევი აპარატში (ნახ. 2.8) შესვლის შემდეგ კონტაქტში იმყოფება ნახევრად შეღწევად მემბრანასთან. აღნიშნული კონტაქტის შედეგად ნარევის ერთ-ერთი კომპონენტი მემბრანის გავლით გადის ფილტრატის სახით, მეორე კომპონენტი კი, რომელსაც არ გაატარებს მემბრანა, კონცენტრატის სახით გამოდის აპარატიდან.



ნახ. 2.8. ნახევრად შეღწევადი მემბრანის საშუალებით ნარევის გაყოფის სქემა: 1 – ჩიხური პროცესი; 2 – გამდინარე პროცესი

გაყოფის პროცესი შეიძლება იმდენად კარგად მიმდინარეობდეს, რომ ფილტრატში პრაქტიკულად ვერ მოხვდეს ნარევის მეორე კომპონენტის ნაწილაკები.

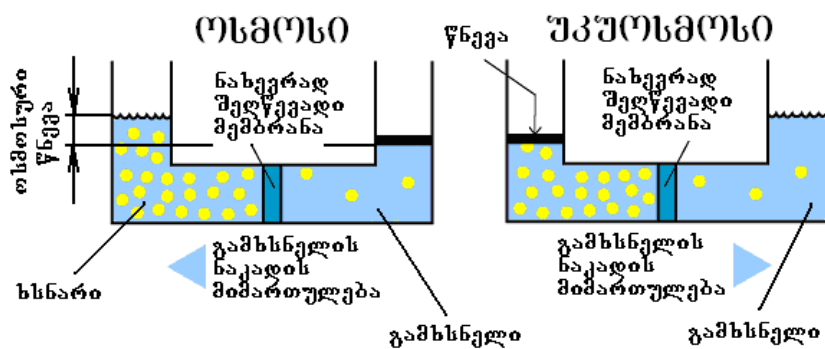
მემბრანული გაყოფის ძირითადი მეთოდებია: მიკროფილტრაცია (0,1-10 მკმ), ულტრაფილტრაცია (0,005-0,05 მკმ), ნანოფილტრაცია (0,0005-0,005 მკმ), უკუოსმოსი (<0,0001 მკმ) (ნახ.2.9). აღნიშნული მეთოდების მემბრანები ხასიათდებიან ფორების განსხვავებული ზომებით და შესაბამისად – შეკავებული ნაწილაკების ზომებით.



ნახ.2.9. მემბრანული მეთოდებით წყლის ფილტრაციის ხარისხის სქემა: **MF-** მიკროფილტრაცია; **UF-** ულტრაფილტრაცია; **NF-** ნანოფილტრაცია; **RO-** უკუოსმოსი

ხსნარების გაწმენდის ყველაზე მაღალ ეფექტს იძლევა უკუოსმოსის მეთოდი, რომლის გამოყენებით ხსნარების გაწმენდის ხარისხი აღწევს 99,5%-ზე მეტს.

ოსმოსი ბერძნული სიტყვაა და ნიშნავს წნევას. ოსმოსის და უკუოსმოსის არსის გასაგებად განვიხილოთ 2.10 სურათზე ნაჩვენები სქემები.



ნახ.2.10. ოსმოსური და უკუოსმოსური პროცესების სქემები

U-ს მაგვარ ჭურჭელში, რომელიც გაყოფილია ნახევრად შეღწევადი მემბრანით, მის სხვადასხვა მხარეს ასხია რომელიმე ნივთიერების ხსნარი და გამხსნელი. ნახევრად შეღწევადი მემბრანა ხასიათდება სელექციურობით ანუ თვისებით გაატაროს დაბალმოლეკულური გამხსნელი და არ გაატაროს

მაღალმოლეკულური ხსნარი. იმის გამო, რომ სისტემა ცდილობს დამყარდეს კონცენტრაციული წონასწორობა, გამხსნელი თვითნებურად გადადის ხსნარის არეში. ეს პროცესი (მოვლენა) ცნობილია ოსმოსის სახელწოდებით. ოსმოსის შედეგად ჭურჭლის სხვადასხვა მხარეს მიიღება სითხის დონეთა სხვაობა, რაც ქმნის **ოსმოსურ წნევას**. თუ ხსნარის ზედაპირზე შევქმნით ატმოსფერულიაგან განსხვავებულ გარე წნევას (მარჯვენა სქემა), მაშინ, როდესაც ეს წნევა გადააჭარბებს ოსმოსურ წნევას, გამხსნელი, ხსნარიდან მემბრანის გავლით იწყებს უკუდინებას თავის პირვანდელ არეში. ამ მოვლენას ეწოდება **უკუოსმოსი**. ამჯერად სითხის დონე აიწვეს გამხსნელის არეში. ამ შემთხვევაში დონეთა სხვაობა შეესაბამება **უკუოსმოსურ წნევას**. ამრიგად, **უკუოსმოსი** არის ოსმოსის შებრუნებული პროცესი, რადგან ახლა გამხსნელის მიმართულება იცვლება საპირისპიროთი და არა თავისთავად, არამედ მაღალი გარე წნევის მოქმედებით. ნახევრად შეღწევადი მემბრანა გაატარებს გამხსნელს, ხოლო გახსნილი ნივთიერების მოლეკულებს ან იონებს მთლიანად ან ნაწილობრივ აკავებს. უკუოსმოსისათვის საჭიროა გარკვეული ენერჯის დახარჯვა იმისათვის, რომ შევქმნათ ხსნარზე (ოსმოსურ წნევაზე) უფრო მაღალი წნევა. ეს წნევა მით უფრო მაღალი უნდა იყოს, რაც უფრო მცირე იქნება მემბრანის ფორები. შესაბამისად, მაღალი იქნება ხსნარის გაწმენდის ხარისხი.

მემბრანული ტექნოლოგიის ძირითადი ელემენტია ნახევრად შეღწევადი მემბრანა, რომელიც მზადდება განსხვავებული მასალებისგან. ტექნიკაში უპირატესად გამოიყენება სინთეტიკური მასალისაგან დამზადებული მემბრანები, რომლებიც შეიძლება იყოს როგორც ორგანული, ასევე არაორგანული. მემბრანების მნიშვნელოვან კლასს წარმოადგენს ორგანული, კერძოდ კი პოლიმერული მასალებისგან დამზადებული მემბრანები, თუმცა ხშირად გამოიყენება არაორგანული მასალებისგან დამზადებული მემბრანები, მაგალითად კერამიკული მემბრანები და მრავალი სხვა.

ნახევრად შეღწევადი მემბრანები ორი სახისაა: ფოროვანი და არაფოროვანი. ფოროვანი პოლიმერული მემბრანა, ჩვეულებრივ, მიიღება გამხსნელის მოცილების ან პოლიმერის ხსნარში წინასწარ შეტანილი დანამატების გამორეცხვის გზით მათი დაფორმების პროცესში. ასეთი წესით მიღებულ მემბრანას აქვს თხელი (0,25 – 0,5 მკმ) ზედაპირული ფენა 100 – 200 მკმ სისქის მქონე მიკროფოროვან ფუძე-შრეზე. მემბრანული გაყოფის პროცესი ხორციელდება ზედაპირულ აქტიურ ფენაში, ხოლო ფუძე-შრე უზრუნველყოფს მემბრანის მექანიკურ სიმტკიცეს.

მემბრანის მნიშვნელოვანი მახასიათებლებია მისი ქიმიური ბუნება, ფორიანობა, ფორების ფორმა და ზომები, შეღწევადობა და სელექციურობა, სიმტკიცე, თერმომდეგობა, ქიმიური მედეგობა აგრესიული სითხეების მიმართ.

მემბრანის ფორიანობა განისაზღვრება ფორმულით

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ფ}}}{V} = \frac{V - V_{\text{მყ}}}{V} = 1 - \frac{V_{\text{მყ}}}{V},$$

სადაც  $\varepsilon$  – ფორიანობაა;

$V_{\text{ფ}}$  – ფორების მოცულობა;

$V_{\text{მყ}}$  – მყარი ფაზის მოცულობა;

$V$  – მემბრანის მთლიანი მოცულობა.

მემბრანული გაყოფის პროცესი ხასიათდება ორი ძირითადი პარამეტრით: შეღწევადობით და სელექციურობით.

შეღწევადობა ანუ კუთრი მწარმოებლურობა ტოლია მემბრანის ზედაპირის ერთეულ ფართობში დროის ერთეულში გასული ფილტრატის რაოდენობისა და ახასიათებს მემბრანული გაყოფის პროცესის სიჩქარეს

$$G = \frac{W}{F} \text{ კგ/(წმ.მ}^2\text{)},$$

სადაც  $W$  – ფილტრატის მიხედვით აპარატის მწარმოებლურობაა (კგ/წმ);

$F$  – მემბრანის ზედაპირის ფართობი, (მ<sup>2</sup>).

მემბრანული გაყოფის პროცესის სელექციურობა შეიძლება დახასიათდეს ორი პარამეტრიდან ერთერთით: შეკავებით ( $R$ ) და გაყოფის ფაქტორით ( $\alpha$ ). ხშირად უფრო მოხერხებულია მემბრანის სელექციურობა გახსნილი ნივთიერების მიმართ განისაზღვროს  $R$  შეკავების პარამეტრით. მემბრანა გახსნილ ნივთიერებას აკავებს მთლიანად ან ნაწილობრივ. მაშინ, როდესაც გამხსნელის მოლეკულები თავისუფლად გადიან მემბრანაში,  $R$  პარამეტრი განისაზღვრება შეფარდებით

$$R = \frac{C_0 - C_{\text{ფ}}}{C_0} = 1 - \frac{C_{\text{ფ}}}{C_0},$$

სადაც  $C_0$  – გახსნილი ნივთიერების კონცენტრაციაა ხსნარში;

$C_{\text{ფ}}$  – გახსნილი ნივთიერების კონცენტრაცია ფილტრატში.

რამდენადაც  $R$  პარამეტრი უგანზომილებო სიდიდეა, მნიშვნელობა არა აქვს, რა ერთეულებით იქნება გამოსახული კონცენტრაცია.  $R$ -ის სიდიდე იცვლება 100%-დან (გახსნილი ნივთიერების სრული შეკავება; ამ შემთხვევაში გვაქვს

იდეალურად სელექციური მემბრანა) 0%-მდე (ამ შემთხვევაში გახსნილი ნივთიერება თავისუფლად გადის მემბრანაში).

მემბრანული გაყოფის პროცესის **სელექტიურობა** შეიძლება დახასიათდეს გაყოფის ფაქტორით ( $\alpha$ ). იმ ნარევისათვის, რომელიც შედგება  $A$  და  $B$  კომპონენტებისაგან, გაყოფის ფაქტორი

$$\alpha_{A/B} = \frac{Y_A / Y_B}{X_A / X_B},$$

სადაც  $Y_A$  და  $Y_B$  -  $A$  და  $B$  კომპონენტების კონცენტრაციებია ფილტრატში;

$X_A$  და  $X_B$  - იმავე კომპონენტების კონცენტრაციები საწყის ხსნარში.

ხსნარის კონცენტრაცია შეიძლება მოცემული იყოს მოლური (მოლი/მ<sup>3</sup>), მასური (კგ/მ<sup>3</sup>, კგ/კგ, გ/კგ და ა.შ.) ან მოცულობითი (მ<sup>3</sup>/მ<sup>3</sup>) წილებით.

სელექტიურობა ახასიათებს მემბრანული გაყოფის პროცესის ეფექტურობას.

იდეალური ნახევრად შეღწევადობის მქონე მემბრანისათვის უკუოსმოსის მამოძრავებელი ძალა

$$\Delta p = p - \pi_1,$$

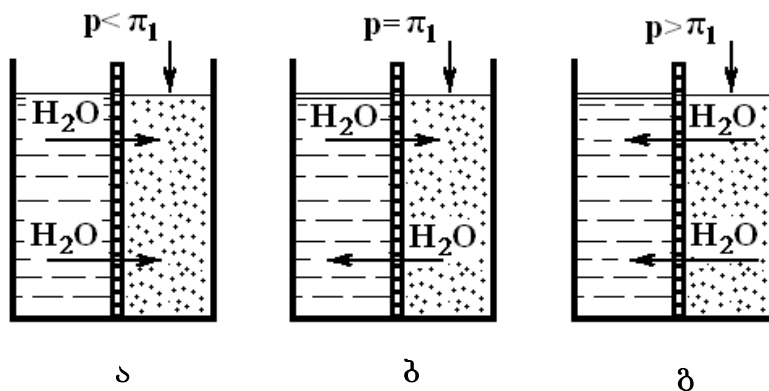
სადაც  $p$  მუშა წნევაა საწყის ხსნარზე, პა;

$\pi_1$  - ხსნარის ოსმოსური წნევა, პა (სურ. 2.11).

რეალურ მემბრანას არ ახასიათებს იდეალური ნახევრად შეღწევადობა, რის გამოც არა მარტო გამხსნელი გადადის მემბრანის გავლით, არამედ ნაწილობრივ გახსნილი ნივთიერებაც. გახსნილი ნივთიერების გაღწევა მემბრანის გავლით ცვლის უკუოსმოსის მამოძრავებელ ძალას და იგი შეიძლება გამოისახოს შემდეგი ფორმულით:

$$\Delta p = p - (\pi_1 - \pi_2) = p - \Delta \pi,$$

სადაც  $\pi_2$  მემბრანაში გასული ფილტრატის ოსმოსური წნევაა.



სურ. 2.11. უკუოსმოსის სქემა

ა-ოსმოსი ( $p < \pi_1$ ); ბ-წონასწორობა ( $p = \pi_1$ ); გ-უკუოსმოსი ( $p > \pi_1$ )

ხსნარის ოსმოსური წნევა საკმაოდ მაღალია. ამიტომ პროცესის წარმართვისათვის უკუოსმოსის აპარატში უნდა შეიქმნას ოსმოსურ წნევაზე მეტი დაწნევა, რადგანაც აპარატის მწარმოებლურობა დამოკიდებულია  $\Delta p$  მამოძრავებელი ძალის სიდიდეზე.

უკუოსმოსის პირობებში ხსნარების გაყოფა მიმდინარეობს ფაზური გარდაქმნების გარეშე. ამიტომ პროცესის წარმართვაზე დახარჯული ენერგია დიდი არ არის და ახლოსაა გაყოფის მინიმალურ თერმოდინამიკურ მუშაობასთან. ამ შემთხვევაში ენერგია იხარჯება აპარატში მუშა წნევის შექმნასა და სითხის დაჭირხნაზე მემბრანის გავლით.

უკუოსმოსის მნიშვნელოვანი უპირატესობაა მისი განხორციელებისათვის საჭირო აპარატების მარტივი კონსტრუქცია, აგრეთვე პროცესის ჩვეულებრივ ტემპერატურაზე ჩატარების შესაძლებლობა.

მემბრანული პროცესის სიჩქარესა და სელექციურობაზე მოქმედი ძირითადი ფაქტორებია: კონცენტრაციული პოლარიზაცია, მუშა წნევა და ტემპერატურა, აპარატის შიგნით ჰიდროდინამიკური პირობები, გასაყოფი ნარევის ბუნება და კონცენტრაცია.

კონცენტრაციულ პოლარიზაციას უწოდებენ მემბრანის ფორებში გამხსნელის შერჩევითი გასვლის შედეგად ამ მემბრანის ზედაპირთან გახსნილი ნივთიერების კონცენტრაციის მატებას. კონცენტრაციული პოლარიზაციის გავლენა მემბრანულ პროცესზე ყოველთვის უარყოფითია, რადგან იგი ამცირებს პროცესის მამოძრავებელ ძალას მემბრანის ზედაპირთან გახსნილი ნივთიერების კონცენტრაციის გაზრდის შედეგად ოსმოსური წნევის მატების გამო.

კონცენტრაციული პოლარიზაციის უარყოფითი ზეგავლენის შემცირების მიზნით მიმართავენ მემბრანის ზედაპირთან ნარევის არევას, მემბრანის ზედაპირის მიმართ საწყისი ხსნარის ნაკადის სიჩქარის გაზრდას ან ტურბულიზაციის გამომწვევი მოწყობილობების ჩაყენებას. ასეთი გზით იზრდება მემბრანული აპარატის მწარმოებლურობა და გაყოფის უნარი.

მემბრანის ზედაპირზე ხსნარის დაწნევა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მემბრანული გაყოფის პროცესის სელექციურობასა და სიჩქარეზე. წნევის გაზრდა ზრდის შეღწევადობას. მაგრამ უნდა აღინიშნოს, რომ წნევის მომატება იწვევს პოლიმერული მემბრანის დეფორმაციას, ხოლო წნევის მოხსნის შემდეგ მემბრანის სტრუქტურის სრული აღდგენა უკვე ვეღარ ხდება. მუდმივი წნევის პირობებში მემბრანის დეფორმაცია დროთა განმავლობაში იწვევს შეღწევადობის შემცირებას, თუმცა მისი სელექციურობა იზრდება.

საწყისი ხსნარის ტემპერატურის გაზრდა აუმჯობესებს გაყოფის პროცესის მიმდინარეობის პირობებს, რადგან ამ დროს მცირდება ხსნარის სიბლანტე და იზრდება მემბრანის ფორეში გახსნილი ნივთიერების დიფუზიის სიჩქარე. აღნიშნული მოვლენა ამცირებს მემბრანული გაყოფის პროცესზე კონცენტრაციული პოლარიზაციის გავლენას.

უნდა აღინიშნოს, რომ აცეტატცელულოზის და პოლიმერული მემბრანები ვერ უძლებენ მაღალი ტემპერატურის ზემოქმედებას. ისინი, როგორც წესი, გამოიყენება ოთახის ტემპერატურის პირობებში.

გახსნილი ნივთიერების ბუნება ასევე ახდენს გავლენას მემბრანის სელექციურობაზე და შედარებით ნაკლებად – მათს შეღწევადობაზე. მაგალითად, მემბრანები უკეთესად აკავებენ არაორგანულ ნივთიერებებს, ვიდრე ორგანულს. ასევე, მაღალმოლეკულური ნივთიერების დაჭერა უფრო ადვილია, ვიდრე დაბალმოლეკულურის.

საწყის ხსნარში გახსნილი ნივთიერებების კონცენტრაციის ამადლება განაპირობებს ხსნარის ოსმოსური წნევის და სიბლანტის გაზრდას. ორივე აღნიშნული ფაქტორი ამცირებს მემბრანის შეღწევადობას. ამასთან გასათვალისწინებელია, რომ ზოგიერთი ორგანული ნივთიერების კონცენტრირებულ ხსნარში შესაძლოა გაიხსნას თვით პოლიმერული მემბრანა და დაიშალოს იგი.

შეიძლება აღინიშნოს, რომ გასაყოფი ხსნარები საკმაოდ ხშირად მრავალკომპონენტიანია. ასეთ ხსნარებში ხშირად ერთი გახსნილი ნივთიერება გავლენას ახდენს მეორე გახსნილი ნივთიერების გამოყოფის უნარზე. ამიტომ ბინარული ხსნარებისათვის დადგენილი სელექციურობა და შეღწევადობა მრავალკომპონენტიანი ხსნარებისათვის შეიძლება არაზუსტი აღმოჩნდეს. ზუსტი მონაცემების მისაღებად ყოველი კონკრეტული შემთხვევისათვის უნდა ჩატარდეს შესაბამისი ექსპერიმენტული კვლევები.

### III თავი. სიტბური პროცესები

სიტბოს გადაცემის პროცესი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს საკვები პროდუქტების წარმოების მრავალ ტექნოლოგიურ პროცესში. მაგალითად, შეგვიძლია დავასახელოთ კვების მრეწველობის ისეთი ძირითადი ტექნოლოგიური პროცესები, როგორცაა შრობა, გამოსხა, რექტიფიკაცია, სტერილიზაცია, გამოსორთქვლა, გათუთქვა, სიტბოთი და სიცივით დამუშავება და სხვა. თბური ტექნოლოგიური პროცესების სწორად და რაციონალურად წარმართვისათვის, მათი მანქანა-აპარატურული აღჭურვის ოპტიმალურობისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს თბოგადაცემის კანონების ცოდნას.

ყოველთვის, როდესაც ერთი სხეულის ან ერთი გარემოს ტემპერატურა განსხვავებულია მეორის ტემპერატურისაგან, სიტბოს გადაცემა ხდება უფრო ცხელი სხეულიდან უფრო ცივ სხეულიზე. მაღალი ტემპერატურის არეს, რომელიც გასცემს სიტბოს, ეწოდება **სიტბოს მატარებელი**, ხოლო უფრო დაბალი ტემპერატურის არეს, რომელიც იღებს სიტბოს, ეწოდება **სიცივის მატარებელი**.

როგორც ბუნებაში, ისე ტექნიკაში სიტბოს გავრცელება ხდება სამი ძირითადი გზით: 1. თბოგამტარობით, 2. კონვექციით, 3. გამოსხივებით.

**თბოგამტარობა** არის სიტბოს გადაცემის პროცესი სხეულის შიგნით მოლეკულების მოძრაობის და ურთიერთშეხების გზით ისე, რომ თვითონ სხეული არ გადაადგილდება. მყარ სხეულებში თბოგამტარობა წარმოადგენს თბოგადაცემის ერთ-ერთ ძირითად სახეს.

**კონვექციით** სიტბოს გადაცემა დაკავშირებულია სითხის, აირის და მისთანების ნაკადთან. ნაკადი, რომელიც გარს ედინება სხეულს (მაგალითად, რაიმე გახურებულ ზედაპირს), აართმევს მას სიტბოს და თან წარიტაცებს. ამრიგად, კონვექციით სიტბოს გადატანა განპირობებულია ნაკადის მოძრაობით. ჰაერის ან სითხის ნაკადით სიტბოს ართმევის დროს აუცილებლად ადგილი აქვს თბოგამტარობას ამ ნაკადში, რადგან ნაკადის შემადგენელი სხვადასხვა ტემპერატურის ცალკეული ნაწილაკები თავიანთი მოძრაობის შედეგად თბოგამტარობით გადასცემენ სიტბოს. ამ შემთხვევაში ერთდროულად მიმდინარეობს სიტბოს გადაცემა კონვექციით და თბოგამტარობით, ე. წ. **კონვექციური თბოგაცემა**.

**გამოსხივების** შემთხვევაში სიტბო ელექტრომაგნიტური ტალღების საშუალებით ვრცელდება ცხელი სხეულიდან გარემოში. სხეული თავის სიტბურ ენერგიას გარდაქმნის სხივურ ენერგიად, რომელიც გამოსხივდება გარემოში და

უფრო დაბალი ტემპერატურის სხეულზე დაცემისას კვლავ გარდაიქმნება მის შინაგან სითბურ ენერგიად. ე. ი. ამ შემთხვევაში ადგილი აქვს ორმაგ გარდაქმნას. ცხელი სხეულის შინაგანი ენერგია გარდაიქმნება სხივურ ენერგიად, შემდეგ კი კვლავ შინაგან სითბურ ენერგიად.

უნდა აღინიშნოს, რომ სითბოს გავრცელების ჩამოთვლილი სამი სახე პრაქტიკაში გვხვდება როგორც ცალ-ცალკე, ისე (უფრო ხშირ შემთხვევაში) მათი გარკვეული ერთობლიობით. ერთდროულად სითბო შეიძლება გავრცელდეს თბოგამტარობითა და გამოსხივებით, კონვექციითა და თბოგამტარობით და ა.შ. ან სამივე გზით ერთდროულად.

როგორც ვხედავთ, სითბოს გავრცელებისათვის თბოგამტარობით და კონვექციით აუცილებელია ნივთიერი გარემოს არსებობა, რომლის საშუალებითაც ვრცელდება სითბო, ხოლო გამოსხივებით სითბოს გავრცელება ხორციელდება ვაკუუმშიც, ანუ იქ, სადაც არა გვაქვს ნივთიერი გარემო.

### 3.1. სითბოს გავრცელება თბოგამტარობით

თბოგამტარობის პროცესების შესასწავლად უნდა განვიხილოთ რამდენიმე ცნება, როგორცაა ტემპერატურული ველი, იზოთერმული ზედაპირი, კუთრი სითბოს ნაკადი, ტემპერატურული გრადიენტი.

სხეულის ყველა წერტილში ტოლი ტემპერატურების ერთობლიობას ეწოდება **ტემპერატურული ველი, რომელიც ქმნის იზოთერმულ ზედაპირს.** ტემპერატურული ველი შეიძლება იყოს დროში უცვლელი ანუ სტაციონარული, ან დროში ცვლადი ანუ არასტაციონარული. იზოთერმული ზედაპირი ან მთავრდება სხეულის საზღვრებზე, ან სხეულის შიგნით ქმნის შეკრულ ზედაპირებს, რომლებიც ერთმანეთს არ გადაკვეთენ. სხვა შემთხვევაში გამოვიდოდა, რომ ერთსა და იმავე წერტილს ერთსა და იმავე მომენტში აქვს სხადასხვა ტემპერატურა, რაც შეუძლებელია. **ტემპერატურული გრადიენტი** ახასიათებს ტემპერატურის ცვლილებას სხეულში. იგი გვიჩვენებს სხეულის მოცემულ წერტილში ტემპერატურის მაქსიმალური ცვლილების მნიშვნელობას. იგი მათემატიკური სიდიდეა და განსაზღვრება მათემატიკური მეთოდებით. აღინიშნება შემდეგნაირად: *gradt*. **კუთრი სითბოს ნაკადი** ეწოდება სითბოს რაოდენობას, რომელიც გადის ფართობის ერთეულიდან დროის ერთეულში.

თბოგამტარობის კანონი დაადგენა ცნობილმა ფრანგმა მათემატიკოსმა **ფურიემ** და გამოითქმის შემდეგნაირად: თბოგამტარობით სითბოს გავრცელების

დროს ხვედრითი თბური ნაკადი პირდაპირპროპორციულია ტემპერატურის გრადიენტისა

$$q = -\lambda \text{grad}t \quad \text{ჯ}/(\text{მ}^2 \cdot \text{წმ}) \quad \text{ანუ} \quad \text{ვტ}/\text{მ}^2. \quad (3.1)$$

ამ ფორმულაში  $\lambda$  პროპორციულობის კოეფიციენტს ეწოდება სხეულის თბოგამტარობის კოეფიციენტი. იგი სხეულის თბოფიზიკური პარამეტრია და ახასიათებს სხეულის თვისებას – თბოგამტარობით გაავრცელოს სითბო. რაც უფრო დიდია  $\lambda$ , მით უფრო სწრაფად ატარებს სხეული სითბოს მოცემულ პირობებში.

ზოგადად გრადიენტიცა და კუთრი სითბოს ნაკადიც ვექტორული სიდიდეებია ანუ მათ სიდიდესთან ერთად ახასიათებს გარკვეული მიმართულება. კერძოდ ტემპერატურის  $\text{grad}t$  მიმართული არის იზოთერმული ზედაპირის მართობულად ტემპერატურის ზრდის მიმართულებით. სითბოს ნაკადს კი საპირისპირო მიმართულება აქვს, რადგან სითბო ვრცელდება უფრო მაღალი ტემპერატურიდან დაბალი ტემპერატურისაკენ. ამ გარემოების გასათვალისწინებლად (3.1) ფორმულის მარჯვენა ნაწილში შეტანილია ნიშანი (-).

### 3.1.1. ფურიეს კანონი და თბოგამტარობის კოეფიციენტი

ფურიეს კანონის მიხედვით, კედლის გავლით თბოგამტარობით გადაცემული სითბოს რაოდენობა ( $Q$ ) პირდაპირპროპორციულია თბოცვლის ზედაპირის ფართობის ( $F$ ), ტემპერატურული გრადიენტისა  $\left(\frac{dt}{dx}\right)$  და დროის ( $\tau$ ).

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx} F \tau,$$

სადაც  $Q$  - გადაცემული სითბოს რაოდენობაა, ჯ;

$\lambda$  - პროპორციულობის კოეფიციენტი ან თბოგამტარობის კოეფიციენტი,

ვტ/(მ $K$ );

$t$  - ტემპერატურა,  $K$ ;

$x$  - სითბოს გადაცემის მანძილი, მ;

$F$  - თბოცვლის ზედაპირის ფართობი, მ $^2$ ;

$\tau$  - დრო, წმ.

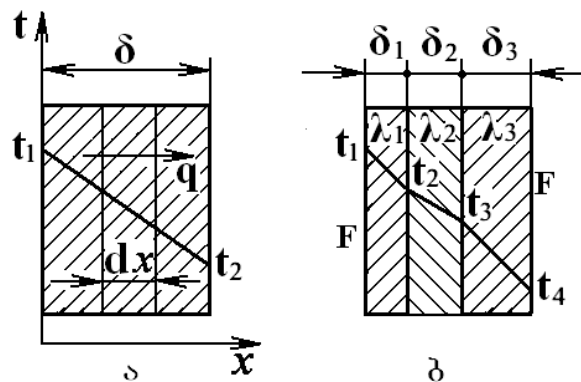
განტოლების მარჯვენა მხარეში მინუსი ნიშნავს იმას, რომ ტემპერატურული გრადიენტი  $\frac{dt}{dx}$  უარყოფითია, რადგან ტემპერატურა მცირდება.

ამრიგად თბოგამტარობის  $\lambda$  კოეფიციენტი გვიჩვენებს რა რაოდენობის სითბო გაივლის თბოგამტარობით 1 მ სისქის 1 მ<sup>2</sup> იზოთერმულ ზედაპირში 1 წმ-ის განმავლობაში, როდესაც ტემპერატურათა სხვაობა კედლის ორ მხარეს შორის 1<sup>0</sup>C ტოლია. მისი განზომილებაა: კკალ/(მწმK) ან ჯ/(მწმK) ან ვტ/(მK).

თბოგამტარობის კოეფიციენტის სიდიდე დამოკიდებულია მასალის თვისებებზე. ყველაზე მაღალი თბოგამტარობის კოეფიციენტი აქვს ლითონს, მაგალითად, სპილენძს – 330, ალუმინს – 175, უჟანგავ ფოლადს – 20 და ა.შ. სითხის თბოგამტარობის კოეფიციენტი გაცილებით მცირეა, მაგალითად, წყლის – 0,51-ია. კიდევ უფრო მცირეა აირის თბოგამტარობის კოეფიციენტი, მაგალითად, ჰაერის 0,019-ია, აზოტის – 0,021 და ა.შ.

### 3.1.2. სითბოს გავრცელება თბოგამტარობით ერთშრიან და მრავალშრიან ბრტყელ კედლებში

განვიხილოთ სითბოს გავრცელება თბოგამტარობით ერთშრიანი ბრტყელი კედლისათვის, როდესაც ტემპერატურა იცვლება მხოლოდ ერთი მიმართულებით. განტოლების ამოსახსნელად უნდა ჩამოვაყალიბოთ სასაზღვრო პირობები ანუ პირობები განსახილველი კედლის ზედაპირებზე: კედლის ერთ ზედაპირზე დაცულია მუდმივი  $t_1$  ტემპერატურა, ხოლო მეორე ზედაპირზე მუდმივი  $t_2$  ტემპერატურა (სურ. 3.1,ა).



სურ.3.1. თბოგამტარობა ბრტყელ კედელში:  
 ა- ერთშრიანი კედელი; ბ- მრავალშრიანი კედელი

ასეთი პირობებისათვის თბოგამტარობის განტოლების ამოსხნა თბური ნაკადის ინტენსივობის ანუ კუთრი სითბოს ნაკადის სიმკვრივის საანგარიშოდ გვაძლევს შემდეგ განტოლებას:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) \text{ ვტ/მ}^2, \quad (3.2)$$

სადაც  $\lambda$  კედლის თბოგამტარობის კოეფიციენტი, ვტ/(მ.კ);

$\delta$  – კედლის სისქე, მ.

სითბოს ნაკადის რაოდენობა

$$Q = qF\tau, \text{ ჯ.} \quad (3.3)$$

(3.2)-ის ჩასმით (3.3)-ში მივიღებთ

$$Q = \frac{\lambda(t_1 - t_2)F\tau}{\delta}, \text{ ჯ.} \quad (3.4)$$

აღვნიშნოთ  $t_1 - t_2$   $\Delta t$ -ით და  $\frac{\delta}{\lambda}$   $R$ -ით. ამის გათვალისწინებით (3.4) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$Q = \frac{\Delta t}{R} F\tau, \text{ ჯ.} \quad (3.5)$$

(3.5) განტოლებაში  $\Delta t$  არის ბრტყელი კედლის სხვადასხვა მხარეებს შორის ტემპერატურათა სხვაობა, ხოლო  $R = \frac{\delta}{\lambda}$  - კედლის თერმული წინაღობა.

მრავალშრიანი, კერძოდ სამშრიანი ბრტყელი კედლის შემთხვევაში (სურ. 3.1,ბ), თითოეული შრის სისქეა  $\delta_1$ ;  $\delta_2$ ;  $\delta_3$ , თბოგამტარობის კოეფიციენტი –  $\lambda_1$ ;  $\lambda_2$ ;  $\lambda_3$  და ტემპერატურა  $t_1$ ;  $t_2$ ;  $t_3$  და  $t_4$ . კედლის გარე ზედაპირებზე შენარჩუნებულია მუდმივი  $t_1$  და  $t_4$  ტემპერატურები,  $\Delta t = t_1 - t_4$ , ხოლო  $\sum R = R_1 + R_2 + R_3$  ანუ კედლის სრული თერმული წინაღობა ტოლია ცალკეული შრეების წინაღობათა ჯამის.

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad R_3 = \frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

ხვედრითი თბური ნაკადის საანგარიშოდ (3.2) განტოლების ანალოგიურად გვექნება

$$q = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \dots} (t_1 - t_4) \text{ ვტ/მ}^2, \quad (3.6)$$

მიღებული აღნიშვნების გათვალისწინებით განტოლება (3.6) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$q = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 \dots} (t_1 - t_4) \text{ ვტ/მ}^2.$$

საბოლოოდ სითბოს ნაკადის რაოდენობის საანგარიშოდ, (3.5) განტოლების ანალოგიურად მივიღებთ

$$Q = \frac{\Delta t}{\sum R} F \tau, \text{ ჯ.}$$

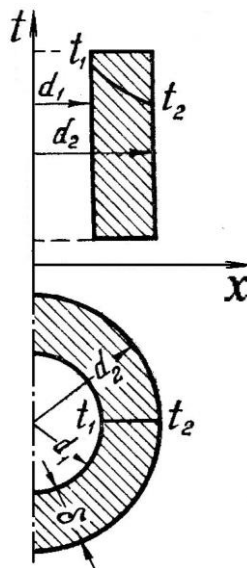
ამრიგად, შეგვიძლია აღვნიშნოთ, რომ თერმულ წინააღმდეგობას ახასიათებს შეჯამება ანუ რაც უფრო მეტია თერმული წინააღმდეგობა, მით უფრო ცუდად გაატარებს იგი სითბოს.

### 3.1.3. სითბოს გავრცელება თბოგამტარობით ერთშრიან ცილინდრულ კედელში

პრაქტიკაში ბრტყელ კედლებთან ერთად ფართოდ გამოიყენება ცილინდრული კედლებიც, როგორცაა, მაგალითად, მილსადენის კედელი. მილის კედლის სისქე (სურ. 3.2)

$$\delta = \frac{d_2 - d_1}{2},$$

სადაც  $d_1$  და  $d_2$  არის მილის შიგა და გარე დიამეტრები.



სურ. 3.2. თბოგამტარობა ცილინდრულ კედელში

ვინაიდან ცილინდრული კედლის შიგა და გარე ზედაპირების ფართობები განსხვავებულია, იმისათვის, რომ ცილინდრული კედლისათვის სითბოს ნაკადის რაოდენობის გამოსაანგარიშებლად შეიძლებოდეს (3.4) განტოლების გამოყენება, საჭიროა  $F$ -ის ნაცვლად ჩაისვას მილის (ცილინდრის) ზედაპირის საშუალო ფართობის მნიშვნელობა, რომელიც გამოითვლება შემდეგნაირად:

$$F_{\text{საშ}} = \frac{\pi L(d_2 - d_1)}{\ln \frac{d_2}{d_1}},$$

სადაც  $L$ -მილის სიგრძეა.

თუ (3.4)-ში შევიტანთ  $\delta$ -სა და  $F$ -ის მნიშვნელობებს, მივიღებთ

$$Q = \frac{2\pi L \lambda (t_1 - t_2) \tau}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ ჯ.}$$

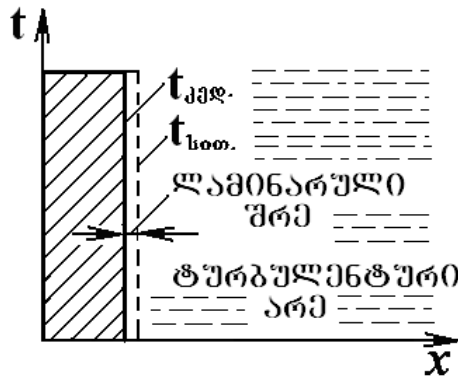
### 3.1.4. თბოგადაცემა კონვექციით

**თბოგადაცემა** ეს არის თბოცვლა ორ სითბოს მატარებელს შორის, მათი გამყოფი მყარი კედლის გავლით. თბოგადაცემა თავის თავში შეიცავს **თბოგაცემას** უფრო ცხელი სითბოს მატარებელიდან კედელზე, **თბოგამტარობას** კედელში და **თბოგაცემას** კედლიდან უფრო ცივ მოძრავ არეში. აღნიშნულის საილუსტრაციოდ მოვიყვანოთ ოთახის გათბობის სისტემა, სადაც ცხელი წყალი რადიატორში გავლის დროს მის კედლებს გადასცემს სითბოს თბოგაცემით. რადიატორის კედელი, თავის მხრივ, სითბოს ატარებს თბოგამტარობით (რომელიც დამოკიდებულია კედლის სისქესა და მის თბოგამტარობაზე), შემდეგ კი ცხელი კედლიდან სითბო თბოგაცემით გადაეცემა ოთახის გარემომცველ ჰაერს.

**თბოგაცემა** ეს არის კონვექციური თბოცვლა ორი ფაზის გამყოფ საზღვარზე. წინა მაგალითის მიხედვით ცხელი ბატარეის ზედაპირი სითბოს გადასცემს ოთახის გარემომცველ ჰაერს. ამრიგად, თბოგაცემა შეიძლება განვიხილოთ, როგორც უფრო ზოგადი პროცესის – თბოგადაცემის ნაწილი. იგი ხასიათდება **თბოგაცემის  $\alpha$  კოეფიციენტით** [ვტ/(მ<sup>2</sup>გრად)], ხოლო მთლიანად სითბოს გავრცელების აღწერილი პროცესი (რომელსაც ეწოდება თბოგადაცემის პროცესი) ხასიათდება **თბოგადაცემის  $K$  კოეფიციენტით** [ვტ/(მ<sup>2</sup>გრად)]. როგორც ვხედავთ, თბოგაცემის და თბოგადაცემის კოეფიციენტებს ერთნაირი განზომილება აქვთ, მაგრამ მათი ფიზიკური შინაარსი განსხვავებულია. თბოგაცემის  $\alpha$  კოეფიციენტი ახასიათებს მხოლოდ კედლის ზედაპირიდან ნაკადისათვის (ან პირიქით) სითბოს გადაცემის პროცესს, ხოლო თბოგადაცემის  $K$  კოეფიციენტი - თბოგადაცემის მთელ პროცესში სითბოს გავრცელებას.

კონვექციით თბოგადაცემა ხდება სითხესა და აირში. სითხე (აირი) მყარ კედელთან შეხების შემთხვევაში (სურ. 3.3), ამ ზედაპირის გასწვრივ მოძრაობისას

კედელთან ქმნის ლამინარულ შრეს, რომელშიც სითხის ნაწილაკები მოძრაობენ ერთმანეთის გასწვრივ. ამის გამო სითბო ლამინარულ შრეში ძირითადად თბოგამტარობით ვრცელდება, ხოლო სითხის დანარჩენ მასაში სითბო ვრცელდება მოძრავი ნაწილაკების ერთმანეთთან შეხებით, კონვექციით.



სურ. 3.3. თბოგადაცემა კონვექციით

კონვექციით გადაცემული სითბოს რაოდენობა განისაზღვრება ნიუტონის კანონით, რომლის თანახმად, კონვექციით გადაცემული სითბოს რაოდენობა პროპორციულია შეხების ფართობის, დროისა და კედელსა და სითხეს შორის ტემპერატურათა სხვაობის

$$Q = \alpha(t_{\text{კედ.}} - t_{\text{სით.}})F\tau \quad \text{ჯ} , \quad (3.7)$$

სადაც  $\alpha$  არის თბოგაცემის კოეფიციენტი, ვტ/(მ<sup>2</sup> K);

$t_{\text{კედ.}}$  - თბოგამცემი კედლის ტემპერატურა, K;

$t_{\text{სით.}}$  - სითხის ტემპერატურა, K;

$F$  - სითბოს გადამცემი ფართობი, მ<sup>2</sup>;

$\tau$  - დრო, წმ.

(3.7) განტოლებიდან

$$\alpha = \frac{Q}{F\tau(t_{\text{კედ.}} - t_{\text{სით.}})} , \quad \text{ვტ/(მ}^2\text{ K)}. \quad (3.8)$$

თბოგაცემის კოეფიციენტი არის 1 მ<sup>2</sup> ფართობის მიერ 1 წამში კონვექციით გადაცემული სითბოს რაოდენობა, როდესაც ტემპერატურათა სხვაობა კედელსა და სითხეს შორის ერთი გრადუსია.

ტექნიკაში უფრო ხშირად გვხვდება ერთფაზიანი კონვექციით თბოგადაცემა, რაც გულისხმობს სითბოს გადაცემას მოძრავი ნაკადით, რომელიც არ იცვლის აგრეგატულ მდგომარეობას ანუ არც სითხე ორთქლდება და არც ორთქლი

კონდენსირდება. ერთფაზიანი კონვექციის მაგალითია ნამწვი აირების მიერ წყლის გაცხელება.

ერთფაზიანი კონვექცია არსებობს ბუნებრივი და იძულებითი. ბუნებრივი ეწოდება კონვექციას, როდესაც მოძრაობა გამოწვეულია არა გარეშე ძალის მოქმედებით, არამედ ცხელი და ცივი ნივთიერების სიმკვრივეთა განსხვავებით, გაცხელებული აირი უფრო მსუბუქია და მიემართება ზემოთკენ, ხოლო ცივი ეშვება დაბლა.

იძულებითი ეწოდება კონვექციას, როდესაც აირის მოძრაობა განპირობებულია გარეშე ძალის ზემოქმედებით, მაგალითად, ტუმბოს მუშაობის შედეგად. ცხადია იძულებითი კონვექცია უფრო ინტენსიურია, ვიდრე ბუნებრივი. როგორც ბუნებრივი, ისე იძულებითი კონვექცია შეიძლება იყოს ლამინარული ან ტურბულენტური. განასხვავებენ ასევე გარე და შიგა კონვექციებს.

გარე კონვექცია არის კონვექცია, როდესაც ნაკადი გარსშემოედინება რაიმე ზედაპირებს. შიგა კონვექცია განიხილავს სხვადასხვა ფორმის არხებში მოძრაობას.

კვების მრეწველობის საწარმოებში ძირითადად გვხვდება ლამინარული და ტურბულენტური იძულებითი კონვექციის მოვლენები სხვადასხვა ფორმის არხებში.

### 3.1.5. თბოგადაცემის ძირითადი განტოლება

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, თბოგადაცემა არის თბოცვლის რთული პროცესი, როდესაც ერთი თბოგამტარი თბილი სითხე ან აირი გადასცემს სითბოს მეორე სითხეს (აირს) მათ შორის მოთავსებული მყარი კედლის გავლით.

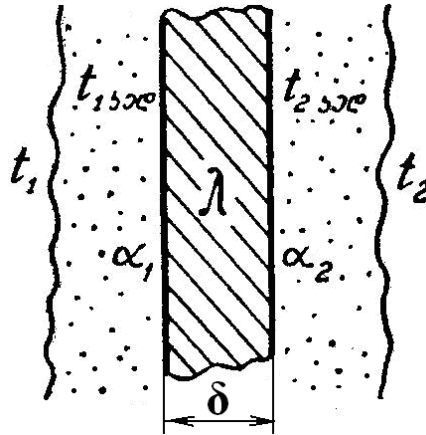
განვიხილოთ თბოგადაცემის ერთ-ერთი მარტივი სახე, როდესაც ორივე თბოგამტარის ტემპერატურა პროცესის მთელი მსვლელობის დროს უცვლელია და შესაბამისად უდრის  $t_1$ -სა და  $t_2$ -ს; მათი თბოგადაცემის კოეფიციენტებია  $\alpha_1$  და  $\alpha_2$ ; კედლის მხარეთა ტემპერატურები -  $t_{კედ.1}$  და  $t_{კედ.2}$ ; კედლის თბოგამტარობის კოეფიციენტია  $\lambda$ , ხოლო სისქე  $\delta$ . თუ  $t_1 > t_2$ , მაშინ სითბოს ნაკადი მიმართული იქნება მარჯვნივ (სურ. 3.4). თბილი თბოგამტარი კონვექციით გადასცემს სითბოს კედელს; კედელში სითბოს იგივე რაოდენობა გაივლის თბოგამტარობით; მეორე თბოგამტარი კედლიდან სითბოს მიიღებს აგრეთვე კონვექციით, ამიტომ თბონაკადის სიმკვრივე სამივე სტადიისათვის ცალ-ცალკე იქნება:

$$q = (t_1 - t_{კედ.1})\alpha_1; \quad q = \frac{\lambda(t_{კედ.1} - t_{კედ.2})}{\delta}; \quad q = (t_{კედ.2} - t_2)\alpha_2.$$

ამ განტოლებების ტემპერატურათა სხვაობების მიმართ ამოხსნითა და შეკრებით მივიღებთ:

$$t_1 - t_{\text{კვლ.1}} = q \frac{1}{\alpha_1}; \quad t_{\text{კვლ.1}} - t_{\text{კვლ.2}} = q \frac{\delta}{\lambda}; \quad t_{\text{კვლ.2}} - t_2 = q \frac{1}{\alpha_2};$$

$$t_1 - t_2 = q \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right).$$



სურ. 3.4. თბოგადაცემის კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის

ბოლო განტოლებიდან

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}$  აღვნიშნოთ  $K$ -თი და  $t_1 - t_2$   $\Delta t$ -თი, მაშინ

$$q = K \Delta t, \text{ ვტ/მ}^2. \quad (3.9)$$

$F$  ფართობის მიერ  $\tau$  დროში გადაცემული სითბოს რაოდენობა იქნება

$$Q = q F \tau, \text{ ჯ} \quad \text{ან} \quad Q = K \Delta t F \tau, \text{ ჯ}. \quad (3.10)$$

უკანასკნელი არის თბოგადაცემის ძირითადი განტოლება, ხოლო  $K$  - თბოგადაცემის საერთო კოეფიციენტი.

თბოგადაცემის კოეფიციენტი  $K$  არის 1 მ<sup>2</sup> ფართობიდან 1 წმ-ში გადაცემული სითბოს რაოდენობა 1<sup>0</sup> ტემპერატურათა სხვაობის დროს.

$K$ -ს განზომილება (3.10) ფორმულიდან იქნება

$$K = \frac{Q}{F \Delta t \tau} \text{ ვტ}/(\text{მ}^2 \cdot \text{K}). \quad (3.11)$$

თბოგადაცემის კოეფიციენტის მნიშვნელობა შეიძლება სხვაგვარადაც გამოვსახოთ, ამისათვის აღვნიშნოთ:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1} - \text{თბილი თბოგამტარის თერმული წინაღობა;}$$

$$R_{\text{კედ.}} = \frac{\delta}{\lambda} - \text{კედლის თერმული წინაღობა;}$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2} - \text{ცივი თბოგამტარის თერმული წინაღობა.}$$

შევიტანოთ ეს აღნიშვნები (3.9) განტოლებაში, მივიღებთ

$$K = \frac{1}{R_1 + R_{\text{კედ.}} + R_2}. \quad (3.12)$$

თუ ბრტყელი კედელი რამდენიმე შრიანია, მაშინ  $K$ -ს მნიშვნელობაში (3.12) კედლის თერმული წინაღობის ( $R_{\text{კედ.}}$ ) ნაცვლად უნდა ჩაისვას ყველა კედლის თერმულ წინაღობათა ჯამი  $\sum R_{\text{კედ.}}$  და მივიღებთ

$$K = \frac{1}{R_1 + \sum R_{\text{კედ.}} + R_2},$$

$$\text{სადაც } \sum R_{\text{კედ.}} = R_{\text{კედ.1}} + R_{\text{კედ.2}} + \dots + R_{\text{კედ.n}}$$

### 3.2. გაცხელება

პროდუქტის გაცხელება ფართოდ გამოიყენება კვების მრეწველობაში მასაგადაცემის მრავალი პროცესის დახქარებისა და ინტენსიფიკაციისათვის. პროცესის მიმდინარეობის ტემპერატურულ და ტექნიკურ პირობებზე დამოკიდებულებით გამოიყენება გაცხელების სხვადასხვა მეთოდი, რომლებიც მოცემული კონკრეტული პროცესისათვის ყველაზე მისაღებია ტექნოლოგიური და ეკონომიკური თვალსაზრისით. ტექნიკაში ყველაზე ფართოდ გამოიყენება გაცხელება წყლის ორთქლით, ნამწვი აირებით, შუალედური თბოგადამტანით და ელექტრული დენით.

#### 3.2.1. გაცხელება წყლის ორთქლით

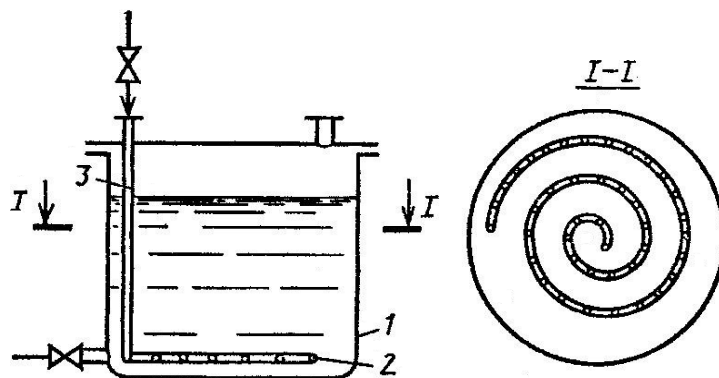
გაცხელებისათვის ძირითადად გამოიყენება წყლის ნაჯერი ორთქლი 1–2 მპა წნევით (ნაჯერი ეწოდება ორთქლს, რომელიც იმყოფება თერმოდინამიკურ წონასწორობაში სითხესთან). უფრო მაღალი წნევის ორთქლის გამოყენება

ეკონომიკურად არ არის გამართლებული. ამიტომ მოცემულ წნევაზე ნაჯერი ორთქლით გაცხელება შეზღუდულია  $190^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურით. გაცხელების პროცესში ორთქლი კონდენსირდება. ამ პროცესში გამოიყოფა სითხის აორთქლების სითბოს ტოლი სითბოს რაოდენობა.

წყლის ორთქლით გაცხელების მეთოდის უპირატესობებს მიეკუთვნება:

1. წყლის ორთქლის ერთეული მასის კონდენსაციის პროცესში გამოიყოფა სითბოს დიდი რაოდენობა (1 კგ კონდენსირებული ორთქლის მიერ გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა 0,1–1,2 მპა წნევის პირობებში შეადგენს 2260–1990 კჯ);
2. კონდენსირებადი ორთქლიდან კედელზე თბოგაცემის მაღალი კოეფიციენტი (დაახლოებით 5000–18000 ვტ/მ<sup>2</sup>.<sup>0</sup>C);
3. გათბობის თანაბრობა (ორთქლის მუდმივი ტემპერატურის პირობებში კონდენსაციის გამო).

“მწვავე“ ორთქლით გაცხელების მეთოდის გამოყენების შემთხვევაში წყლის ორთქლი შედის უშუალოდ გასაცხელებელ სითხეში (“მწვავე“ ეწოდება ორთქლს, რომელიც გაცხელებულია კონდენსაციის ტემპერატურაზე მეტად). კონდენსაციის პროცესში ორთქლი მთელ თავის სითბოს გადასცემს სითხეს და კონდენსატის სახით შეერევა მას. გაცხელებისა და ამაღროულად ასარეგად სითხეში ორთქლი შედის ბარბოტერის საშუალებით, რომელიც წარმოადგენს რეზერვუარის ფსკერთან მოთავსებულ წვრილნახვრეტებიან სპირალისებურ მილს (სურ. 3.5).



სურ. 3.5. ორთქლის ბარბოტერი:

1–რეზერვუარი, 2–ბარბოტერი, 3–ორთქლის მომწოდებელი მილი

პერიოდული გაცხელების შემთხვევაში “მწვავე“ ორთქლის ხარჯი შეგვიძლია განვსაზღვროთ სითბური ბალანსის განტოლებიდან

$$Gct_1 + DH = Gct_2 + Dc_{\text{წყ}}t_2 + Q_{\text{დან}},$$

აქედან

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + Q_{ღან}}{H - c_{\nabla} t_2} \text{ კგ/წმ,}$$

სადაც  $D$  გამცხელებელი ორთქლის ხარჯია, კგ/წმ;

$G$  - გასაცხელებელი სითხის რაოდენობა, კგ/წმ;

$c$  - გასაცხელებელი სითხის სითბოტევადობა, ჯ/(კგ·K);

$c_{\nabla}$  - კონდენსატის სითბოტევადობა, ჯ/(კგ·K);

$t_1$  და  $t_2$  - სითხის ტემპერატურა შესაბამისად გაცხელებამდე და მის შემდეგ, K;

$Q_{ღან}$  - აპარატის მიერ გარემოში დაკარგული სითბოს რაოდენობა, ჯ/წმ;

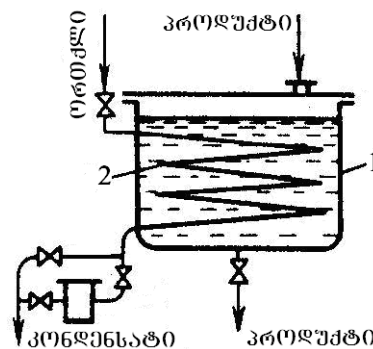
$H$  - გამცხელებელი ორთქლის ენთალპია, ჯ/კგ.

“მწვავე“ ორთქლით გაცხელების შემთხვევაში გასაცხელებელი ხსნარი აუცილებლად განზავდება კონდენსატით – წყლით. ამიტომ აღნიშნული მეთოდი ძირითადად გამოიყენება წყლისა და წყალხსნარების გასაცხელებლად.

გაცხელება “ყრუ“ ორთქლით გამოიყენება იმ შემთხვევებში, როდესაც გასაცხელებელი სითხე უშუალოდ არ ურთიერთმოქმედებს ორთქლთან, ან მათი კონტაქტი დაუშვებელია. ამ შემთხვევაში სითხის გაცხელება ხორციელდება ორთქლის პერანგის ან კორპუსში (1) ჩადგმული კლაკნილი მილის (2) (სურ. 3.6) გავლით. გამცხელებელი “ყრუ“ ორთქლი მთლიანად კონდენსირდება და კონდენსატის სახით მოსცილდება ორთქლის არეს. კონდენსატის ტემპერატურა საკმაო სიზუსტით შეიძლება მივიღოთ ნაჯერი გამცხელებელი ორთქლის ტემპერატურის ტოლად.

“ყრუ“ ორთქლის ხარჯი სითხის უწყვეტი გაცხელების შემთხვევაში შეიძლება განისაზღვროს სითბური ბალანსის განტოლებიდან

$$Gct_1 + DH = Gct_2 + Dc_{\nabla} t_{\nabla} + Q_{ღან} ,$$



სურ. 3.6. ”ყრუ“ ორთქლით გაცხელება

აქედან

$$D = \frac{Gc(t_2 - t_1) + Q_{\text{ღან}}}{H - c_{\text{ვ}}t_{\text{ვ}}} \quad \text{კგ/წმ} ,$$

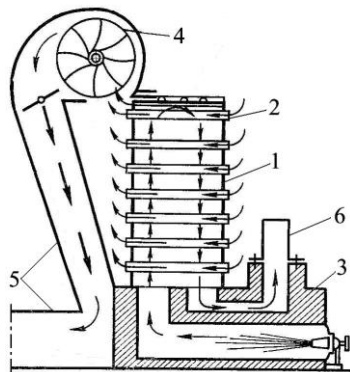
სადაც  $t_{\text{ვ}}$  კონდენსატის ტემპერატურაა.

### 3.2.2. გაცხელება საცეცხლურის გამოყენებით

ეს გაცხელების ყველაზე ძველი მეთოდია და უზრუნველყოფს პროდუქტის 180–1000°C ტემპერატურამდე გაცხელებას. ნამწვი აირები წარმოიქმნება მყარი, თხევადი ან აირადი საწვავის დაწვის გზით, როგორც წესი, ატმოსფერული წნევის პირობებში.

ნამწვი აირების გამოყენებით გაცხელების თავისებურებას წარმოადგენს დიდი ტემპერატურული სხვაობები და ნამწვი აირებიდან აპარატის კედლებისაკენ მცირე თბოგაცემის კოეფიციენტები (15–35 ვტ/მ<sup>2</sup>.K). ამ მეთოდის გამოყენების გზით მიიღწევა მაღალი თბური დატვირთვები, თუმცა აღნიშნულ მეთოდს გააჩნია ისეთი უარყოფითი მხარეები, როგორცაა პროცესის რეგულირებისა და მასალების არათანაბარი გაცხელების თავიდან აცილების სირთულე, ლითონის დაჟანგვა და ცეცხლსაშიშროება.

ნამწვი აირების გამოყენებით უშუალო გაცხელება შეიძლება განხორციელდეს მილებიან კალორიფერში (სურ. 3.7), რეაქციული ქვაბებისა და ავტოკლავების დუმელში, აგრეთვე ნამწვი აირების რეცირკულაციის მქონე კალორიფერში.



სურ. 3.7. მილებიანი კალორიფერი

კალორიფერის კორპუსში (1) (სურ. 3.7) ჰორიზონტალურად ჩაწყობილია მილები (2) ღია ბოლოებით. კორპუსის ქვედა ნაწილში მოწყობილია საცეცხლური (3), საიდანაც ცხელი ნამწვი აირი გარშემოუვლის მილების (2) სისტემას,

აცხელებენ მათ და გამწოვი მილით (6) გადიან ატმოსფეროში. ვენტილატორის (4) მიერ გაცხელებულ მილებში შეწოვილი ჰაერი ცხელება და ჰაერსადენებით (5) მიეწოდება პროდუქტის გასაცხელებლად.

წინა მეთოდისაგან განსხვავებით ნამწვი აირების რეცირკულაციის მქონე კალორიფერში (სურ. 3.8) ხდება ნამუშევარი ნამწვი აირების ნაწილის განუწყვეტელი შეწოვა ვენტილატორით და აპარატში მისაწოდებელ აირებთან მათი შერევა, რითაც მიიღწევა საწვავის გარკვეული ეკონომია.

ნამწვი აირების გამოყენებით გაცხელების შემთხვევაში საწვავის ხარჯი განისაზღვრება სითბური ბალანსის განტოლებიდან

$$Gct_1 + Q_0 = Gct_2 + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{ღან}, \quad (3.13)$$

სადაც  $G$  - გასაცხელებელი სითხის რაოდენობაა, კგ;

$c$  - გასაცხელებელი სითხის ხვედრითი სითბოტევადობა, ჯ/(კგ·K);

$t_1$  და  $t_2$  - პროდუქტის ტემპერატურა შესაბამისად გაცხელებამდე და მის შემდეგ, K;

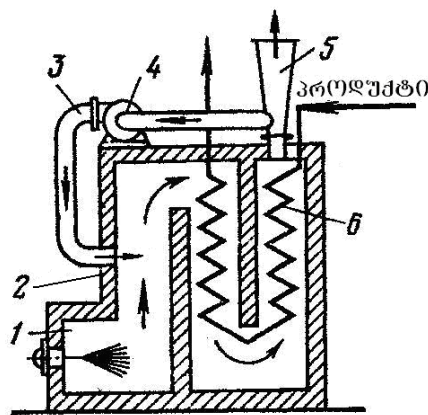
$Q_0$  - საწვავის მიერ ჭურჭელში შეტანილი სითბოს საერთო რაოდენობა, ჯ;

$Q_1$  - აპარატიდან გამომავალ აირთან ერთად გამოტანილი სითბოს რაოდენობა, ჯ;

$Q_2$  - საწვავის მექანიკურად არასრული წვით გამოწვეული სითბოს დანაკარგები, ჯ;

$Q_3$  - საწვავის ქიმიურად არასრული წვით გამოწვეული სითბოს დანაკარგები, ჯ;

$Q_{ღან}$  - აპარატის მიერ გარემოში დაკარგული სითბოს რაოდენობა, ჯ.



სურ. 3.8. ნამწვი აირების რეცირკულაციით გაცხელების სქემა:  
 1-საცეცხლური; 2-კორპუსი; 3-რეცირკულაციის მილი;  
 4-ვენტილატორი; 5-გამწოვი მილი; 6-კლაკნილა მილი

სასარგებლოდ გამოყენებული სითბოს რაოდენობა, რომელიც გაივლის თბოგადამცემ ზედაპირს

$$Q = Gc(t_2 - t_1), \text{ ჯ}$$

საცეცხლურში 1 კგ საწვავის მიერ შეტანილი სითბოს რაოდენობა

$$q_0 = q_{\text{საწ}} + q_{\text{ჰაერ}} + q_{\text{წი}} \text{ ჯ/კგ,}$$

სადაც  $q_{\text{საწ}}$  საწვავის ენთალპიაა, ჯ/კგ;

$q_{\text{ჰაერ}}$  - იმ ჰაერის ენთალპია, რომელიც საცეცხლურში შეიყვანება 1 კგ საწვავის დასაწვავად, ჯ/კგ;

$q_{\text{წი}}$  - საწვავის წვის სითბო, ჯ/კგ;

სითბური ბალანსის განტოლებიდან (3.13) განისაზღვრება საწვავის ხარჯი

$$B = \frac{Q_0}{q_0}, \text{ კგ.}$$

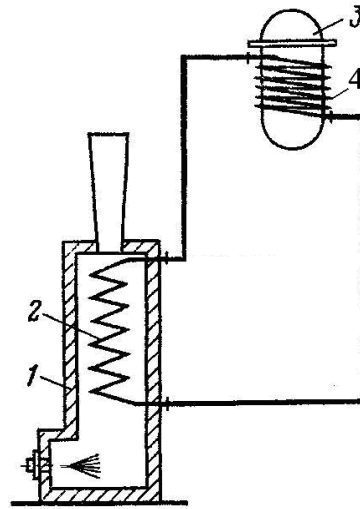
### 3.2.3. გაცხელება შუალედური თბოგადამტანით

ეს მეთოდი გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც დაუშვებელია პროდუქტის თუნდაც მცირე დროით გადახურება. ამ შემთხვევაში გასაცხელებლად გამოიყენება შუალედური სითბოს გადამტანი, რომელიც ჯერ თვითონ გაცხელდება ნამწვი აირის სითბოს ხარჯზე, ხოლო შემდეგ მიღებულ სითბოს გადასცემს დასამუშავებელ პროდუქტს. შუალედური სითბოს გადასატანად გამოიყენება მინერალური ზეთები, გადახურებული წყალი, მარილების გამლნარი ნარევები და სხვა.

აბაზანაში სითხის გაცხელება ნამწვი აირებით საშუალებას იძლევა პროდუქტი გაცხელდეს 200–250°C ტემპერატურამდე. აპარატი აღჭურვილია ზეთით შევსებული პერანგით, რომელსაც გარედან ეხება ნამწვი აირები და გადასცემენ სითბოს. ამის შედეგად პერანგში გაცხელებული ზეთი, თავის მხრივ, სითბოს გადასცემს აპარატში მოთავსებულ პროდუქტს. ეს მეთოდი ვერ უზრუნველყოფს საჭირო მნიშვნელობის კოეფიციენტის თბოგაცემას, რადგან სითბოს გადაცემა ხორციელდება ზეთის სუსტი კონვექციური ნაკადებით.

თბოგაცემის კოეფიციენტის გაზრდის მიზნით გამოიყენება ნამწვი აირით გაცხელება თხევადი შუალედური თბოგადამტანის ბუნებრივი ან ხელოვნური ცირკულაციით.

ბუნებრივი ცირკულაციის შემთხვევაში (სურ. 3.9) თხევადი თბოგადამტანი ცხელდება ღუმელში (1) მოთავსებულ კლაკნილა მილში (2), ადის ზევით და გადასცემს სითბოს გასაცხელებელ აპარატს (3), კლაკნილა მილის (4) მეშვეობით.



სურ. 3.9. ნამწვი აირებით თხევადი შუალედური თბოგადამტანის ცირკულაციით გაცხელების პრინციპული სქემა

ამ თბოგაცემის გამო გაცივებული თბოგადამტანი ჩამოიღვრება ქვევით კლაკნილაში (2) და კვლავ გაცხელდება ნამწვი აირებით. იმის გამო, რომ თბილი და ცივი თბოგადამტანების ხვედრითი წონები განსხვავებულია მათი ცირკულაცია მიმდინარეობს ბუნებრივად, დამატებითი სატრანსპორტო საშუალებების გარეშე.

ასეთი დანადგარის სითბური მწარმოებლურობა გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = Gc(t_{\text{ცხ}} - t_{\text{ცივ}}) \text{ ჯ/წმ,}$$

სადაც  $G$  თბოგადამტანის ცირკულაციის მასური ხარჯია, კგ/წმ;

$c$  - თბოგადამტანის კუთრი სითბოტევადობა, ჯ/(კგ. $K$ );

$t_{\text{ცხ}}$  - თბოგადამტანის ტემპერატურა სისტემის ცხელ შტოში,  $K$ ;

$t_{\text{ცივ}}$  - თბოგადამტანის ტემპერატურა სისტემის ცივ შტოში,  $K$ ;

თავის მხრივ თბოგადამტანის ცირკულაციის მასური სიჩქარე ტოლია

$$G = f\omega\rho \text{ კგ/წმ,}$$

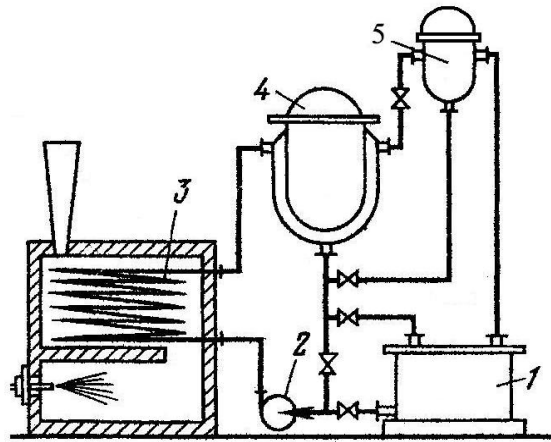
სადაც  $f$  მილგაყვანილობის განივკვეთის ფართობია, მ<sup>2</sup>;

$\omega$  - მილგაყვანილობაში თბოგადამტანის წრფივი სიჩქარე, მ/წმ;

$\rho$  - თბოგადამტანის სიმკვრივე, კგ/მ<sup>3</sup>.

იძულებითი ცირკულაციის შემთხვევაში (სურ. 3.10) ხდება თბოგადამტანის ცირკულაცია ტუმბოს (2) მეშვეობით. თბოგადამტანს სითბო გადააქვს ღუმელში მოთავსებული კლაკნილი მილიდან (3) გამცხელებელი აპარატის (4) პერანგში. აქ წარმოქმნილი ორთქლი გადადის თბომცველში (5), საიდანაც კონდენსატის

სახით ბრუნდება შემკრებში (1). ტუმბო (2) ნამუშევარ (გაცივებულ) თბოგადამტანს პერანგიდან და კონდენსატის შემკრებიდან (1) კვლავ აგზავნის ღუმლის კლანილ მილში (3) და ციკლი მეორდება.



სურ. 3.10. თხევადი შუალედური თბოგადამტანის იძულებითი ცირკულაციის გამცხელებელი დანადგარის სქემა

როგორც ბუნებრივი, ასევე იძულებითი ცირკულაციით შუალედური თბოგადამტანის გამოყენების შემთხვევაში თხევადი თბოგადამტანის ხარჯის განსაზღვრა შესაძლებელია სითბური ბალანსის განტოლებით

$$Gct_{ცხ} + G_{პრ}c_{პრ}t_{პრ.1} = Gct_{ცივ} + G_{პრ}c_{პრ}t_{პრ.2} + Q_{ღან}$$

სადაც  $G$  თბოგადამტანის ცირკულაციის მასური ხარჯია დროის ერთეულში, კგ/წმ;

$c$  - თბოგადამტანის კუთრი სითბოტევადობა, ჯ/(კგ·K);

$t_{ცხ}$  - თბოგადამტანის ტემპერატურა სისტემის ცხელ შტოში, K;

$t_{ცივ}$  - თბოგადამტანის ტემპერატურა სისტემის ცივ შტოში, K;

$G_{პრ}$  - აპარატში გასაცხელებელი პროდუქტის რაოდენობა დროის ერთეულში, კგ/წმ;

$c_{პრ}$  - აპარატში გასაცხელებელი პროდუქტის სითბოტევადობა, ჯ/(კგ·K);

$t_{პრ.1}$  და  $t_{პრ.2}$  - გასაცხელებელი პროდუქტის საწყისი და საბოლოო ტემპერატურები, K;

$Q_{ღან}$  - აპარატის მიერ გარემოსათვის გადაცემული (დაკარგული) სითბოს რაოდენობა, ჯ/წმ.

ბალანსის აღნიშნული განტოლებიდან განისაზღვრება თხევადი შუალედური სითბოს გადამტანის ხარჯი

$$G = \frac{G_{პრ} C_{პრ} (t_{პრ,2} - t_{პრ,1}) + Q_{დან}}{c(t_{ცხ} - t_{ცფ})} \text{ კგ/წმ.}$$

მოცემული ტემპერატურებისა და წნევების შესაბამისად როგორც ბუნებრივი, ასევე იძულებითი ცირკულაციის მქონე აპარატებისათვის ხდება შესაფერისი თბოგადამტანის შერჩევა. ეს თბოგადამტანი შეიძლება იყოს: წყალი, გაზოილი, მაღალტემპერატურიანი ორგანული თბოგადამტანი, სილიკონები, გამდნარი მარილი და სხვ.

### 3.24. გაცხელება ელექტრული დენით

კვების მრეწველობაში საკმაოდ ფართოდ გამოიყენება პროდუქტის გაცხელება ელექტრულ დუმელში. ამ შემთხვევაში აუცილებელია გარკვეული ზომების გათვალისწინება პროდუქტის გადახურების თავიდან აცილების მიზნით.

ელექტრული ენერჯის სითბოდ გარდაქმნის პრინციპის მიხედვით ელექტრული დუმელი არსებობს სამი ტიპის: წინაღობის, ინდუქციური და რკალური.

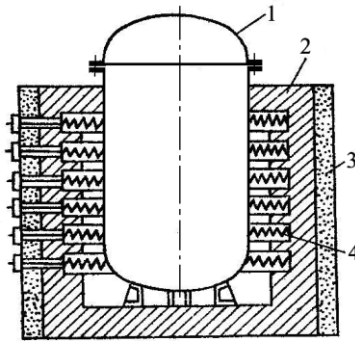
წინაღობის ტიპის ელექტრული დუმელი, თავის მხრივ, შეიძლება იყოს პირდაპირი ან არაპირდაპირი მოქმედების.

პირდაპირი მოქმედების ელექტრულ დუმელში გასაცხელებელი სხეული უშუალოდ ელექტრულ ქსელშია ჩართული და ცხელდება მასში ელექტრული დენის გავლის შედეგად. უმეტეს შემთხვევებში დუმელი წარმოადგენს აპარატს, რომლის კორპუსი იმავე დროს ელექტროდის როლსაც ასრულებს. მეორე ელექტროდი აპარატის შიგნითაა მოთავსებული. თხევად ან გამდნარ გასაცხელებელ პროდუქტს ათავსებენ აღნიშნულ ელექტროდებს შორის.

არაპირდაპირი ქმედების წინაღობის ელექტრულ დუმელში სითბო გამოიყოფა სპეციალურ გამცხელებელ ელემენტებში დენის გავლის შედეგად. გამოყოფილი სითბო გასაცხელებელ პროდუქტს გადაეცემა გამოსხივებით, თბოგამტარობით ან კონვექციით. ასეთ დუმელში (სურ. 3.11) შესაძლებელია პროდუქტის გაცხელება 1000–1100°C-მდე.

სახურებელი აპარატი (1), რომელშიც მოთავსებულია გასაცხელებელი პროდუქტი ჩადგმულია კორპუსში (2). კორპუსი გარედან დაფარულია საიზოლაციო მასალით (3). მასში რამდენიმე ფენად ჩაწყობილია წინაღობის ელექტროსახურებელი ელემენტები (4), რომლებიც ჩართულია ელექტრული დენის წყაროში. ელექტროსახურებელი ელემენტების მიერ გამოყოფილი სითბო

უშუალოდ გადაეცემა სახურებელი აპარატის (1) კედელს და აცხელებს მასში მოთავსებულ პროდუქტს.



სურ. 3.11. არაპირდაპირი ქმედების წინაღობის ელექტრული ღუმლის სქემა

ელექტრული დენის მეშვეობით გასაცხელებლად მისაყვანი სითბოს რაოდენობა განისაზღვრება სითბური ბალანსის განტოლებიდან

$$Q_{ელ} + Gct_1 = Gct_2 + Q_{ღან},$$

სადაც  $Q_{ელ}$  ელექტრული დენის გავლისას ელექტროგამცხელებელში

გამოყოფილი სითბოს რაოდენობაა, ჯ;

$G$  - გასაცხელებელი პროდუქტის რაოდენობა, კგ;

$c$  - გასაცხელებელი პროდუქტის კუთრი სითბოტევადობა, ჯ/(კგ·K);

$t_1$  და  $t_2$  - პროდუქტის ტემპერატურა შესაბამისად გაცხელებამდე და მის შემდეგ, K;

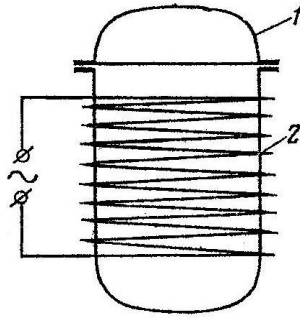
$Q_{ღან}$  - აპარატის მიერ გარემოსათვის გადაცემული (დაკარგული) სითბოს რაოდენობა, ჯ.

ბალანსის განტოლებიდან მივიღებთ გასაცხელებლად საჭირო სითბოს რაოდენობას

$$Q_{ელ} = Gc(t_2 - t_1) + Q_{ღან} \text{ ჯ.}$$

ელექტრული ინდუქციური ტიპის ღუმლის გახურება მიიღწევა ინდუქციური დენის გამოყენებით. სახურებელი აპარატი წარმოადგენს ლითონის გულარს (1) (სურ. 3.12), რომელზედაც დახვეულია სადენი (2).

ცვლადი დენის გავლის შედეგად სოლენოიდში აღიძვრება ცვლადი მაგნიტური ველი, რომელის მოქმედებითაც სახურებელი აპარატის კედლებში ინდუქცირდება ელექტრომაგნიტური ძალა. აღძრული მეორეული დენის გავლისას აპარატის კედლები ხურდება და აცხელებს მასში მოთავსებულ პროდუქტს.



სურ. 3.12. ელექტრული ინდუქციური ტიპის ღუმლის პრინციპული სქემა

### 3.3. გაცივება

პროდუქტების გასაცივებლად იყენებენ ცივ წყალს, ყინულს, მარილისა და ყინულის ნარევს, მშრალ ყინულს, გაცივებულ მარილხსნარს, გათხევადებულ ამიაკს, ფრეონს და ა.შ.

ცივ წყალს, როგორც ყველაზე უფრო ხელმისაწვდომს და იაფ სიცივის მატარებელს იყენებენ მაცივრებში, კონდენსატორებსა და სხვა მოწყობილობებში. წელიწადის დროსა და კლიმატურ პირობებზე დამოკიდებულებით წყლის ტემპერატურა წყალსაცავში არის  $12-25^{\circ}\text{C}$ , ხოლო არტეზიულ ჭაში –  $6-12^{\circ}\text{C}$ .

პროდუქტის გასაცივებლად გამოყენებული წყლის ხარჯს განსაზღვრავენ თბური ბალანსის განტოლებიდან, რომლის მიხედვით პროდუქტის გაცივების დროს გამოყოფილი სითბო  $G$  (კგ/წმ) თბოტევადობით  $c$  (ჯ/კგ·K),  $t_1$ -დან  $t_2$  ტემპერატურამდე გაცივებისათვის წყლის საჭირო ხარჯია  $W$  (კგ/წმ), რომელიც ამ დროს ცხელდება  $t_{\text{წყ}1}$ -დან  $t_{\text{წყ}2}$  ტემპერატურამდე. მივიღოთ წყლის თბოტევადობა  $c_{\text{წყ}}$  (ჯ/კგ·K) და კოეფიციენტი  $x=0,95\dots 0,97$ , რომელიც ითვალისწინებს გაცივების დროს სითბოს დანაკარგებს გარემოში. აღნიშნულის გათვალისწინებით შეგვიძლია დავწეროთ თბური ბალანსის განტოლება

$$Gc(t_1 - t_2)x = Wc_{\text{წყ}}(t_{\text{წყ}2} - t_{\text{წყ}1}),$$

საიდანაც განვსაზღვრავთ გაცივებისათვის საჭირო წყლის ხარჯს

$$W = \frac{Gc(t_1 - t_2)x}{c_{\text{წყ}}(t_{\text{წყ}2} - t_{\text{წყ}1})}, \text{ კგ/წმ.}$$

პროდუქტის გაცივების უფრო სრულყოფილი მეთოდია მანქანური გაცივება, რომელიც ეფუძნება გათხევადებული ამიაკის, ფრეონისა და სხვა აირების თვისებას, რომლებიც აორთქლების დროს გარემოდან შთანთქავენ დიდი რაოდენობის სითბოს.

სამაცივრო კამერების გასაცივებლად იყენებენ შუალედურ სიცივის მატარებლებს, მაგალითად, მარილხსნარს, რომელიც სხვა სიცივის მატარებლით გაცივების შემდეგ ცირკულირებს სამაცივრო კამერის მილებში და აცივებს კამერას.

### 3.4. კონდენსაცია

კვების საწარმოებში ხშირად მიმდინარეობს ნივთიერების ორთქლის კონდენსაციის პროცესი მისგან სითბოს ართმევის გზით. კონდენსაცია არის აირის ან ორთქლის თხევად მდგომარეობაში გადასვლის პროცესი. ამ პროცესის განსახორციელებლად გამოყენებულ აპარატს კონდენსატორი ეწოდება.

არსებობს ორი სახის კონდენსაცია: 1. ზედაპირული კონდენსაცია, რომლის დროსაც კონდენსირებადი ორთქლი და მაცივებელი აგენტი ერთმანეთისაგან გამოყოფილია კედლით, რომლის შიგა ან გარე ზედაპირზე მიმდინარეობს პროცესი; 2. კონდენსაცია შერევით, რომლის დროსაც კონდენსირებადი ორთქლი უშუალოდ ეხება მაცივებელ აგენტს.

**ზედაპირული კონდენსაცია.** ზედაპირულ კონდენსატორში, როგორც წესი, მიეწოდება გადახურებული ორთქლი, ხოლო მაცივებელ აგენტად გამოიყენება ჰაერი ან წყალი. ნივთიერების ორთქლი მოძრაობს ზემოდან მილების გარშემო, ხოლო კონდენსატი გამოდის კონდენსატორის ქვედა ნაწილიდან. გამაცივებელი წყალი მოძრაობს კონდენსატორის ქვედა ნაწილიდან მილებში და გამოდის კონდენსატორის ზედა ნაწილიდან. ე.ი. თბილი და ცივი არეები მოძრაობს წინააღმდეგის პრინციპით. შეიძლება კონდენსაციის დროს თბილი და ცივი არეები ერთი მიმართულებითაც მოძრაობდნენ.

სითბოს გადაცემის პირობების მიხედვით კონდენსატორის გამაცივებელი ზედაპირი იყოფა სამ ზონად: 1. გადახურებული ორთქლის გაცივების ზონა, რის შედეგადაც მიიღება ნაჯერი ორთქლი; 2. მეორე ზონაში ნაჯერი ორთქლი გადაიქცევა კონდენსატად, რის შედეგადაც მიიღება სითხე, რომელსაც ექნება ნაჯერი ორთქლის ტემპერატურა. 3. მესამე ზონაში კონდენსატი გაცივების შედეგად მიიღებს საჭირო ტემპერატურას.

პირველ ზონას შეესაბამება სითბოს გადაცემის ყველაზე უარესი პირობები, მეორე ზონას კი – ყველაზე უკეთესი. ამის გამო თბოგადამცემი ზედაპირის ფართობის განსაზღვრა საჭიროა ყველა ზონისათვის ცალ-ცალკე. მათ გასაანგარიშებლად საჭიროა ყველა ზონისათვის განისაზღვროს კედელში

გამავალი სითბოს რაოდენობა და მაცივებელი წყლის შეაღდური  $t_{\text{წყ}1}$  და  $t_{\text{წყ}2}$  ტემპერატურები (სურ. 3.13).

აპარატში შემოსული გადახურებული ორთქლის ენთალპია შეიძლება განისაზღვროს თანაფარდობით

$$H = c_{\text{გაღ}}(t_{\text{საწ}} - t_{\text{ნაჯ}}) + r + c_{\text{სით}}t_{\text{ნაჯ}} \quad \text{ჯ/კგ},$$

სადაც  $H$  აპარატში შემავალი ორთქლის კუთრი ენთალპიაა, ჯ/კგ;

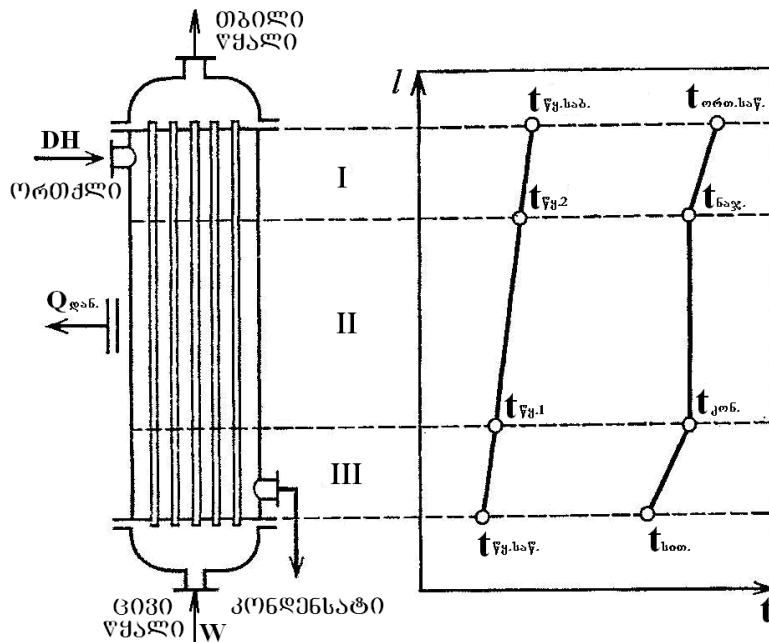
$c_{\text{გაღ}}$  – გადახურებული ორთქლის სითბოტევადობა, ჯ/(კგ.K);

$t_{\text{საწ}}$  – აპარატში შემავალი ორთქლის ტემპერატურა, K;

$r$  – ორთქლის კონდენსაციის სითბო, ჯ/კგ;

$c_{\text{სით}}$  – კონდენსატის სითბოტევადობა, ჯ/(კგ.K);

$t_{\text{ნაჯ}}$  – ნაჯერი ორთქლის (კონდენსაციის) ტემპერატურა, K.



სურ. 3.13. კონდენსაციის პროცესის სითბური ბალანსის შესადგენი სქემა

პროცესის სითბური ბალანსის განტოლება შეიძლება დაიწეროს შემდეგი სახით:

$$DH + Wc_{\text{წყ}}t_{\text{წყ.საწ}} = Dc_{\text{სით}}t_{\text{სით}} + Wc_{\text{წყ}}t_{\text{წყ.საბ}} + Q_{\text{დან}}.$$

ბალანსის განტოლებიდან შეგვიძლია განვსაზღვროთ მაცივებელი წყლის მასური ხარჯი

$$W = \frac{D(H - c_{\text{სით}}t_{\text{სით}}) - Q_{\text{დან}}}{c_{\text{წყ}}(t_{\text{წყ.საბ}} - t_{\text{წყ.საწ}})} \quad \text{კგ/წმ},$$

სადაც  $W$  მაცივებელი წყლის მასური ხარჯია, კგ/წმ;

$D$  – კონდენსატორში შემავალი ორთქლის მასური ხარჯი, კგ/წმ;

$t_{\text{სომ}}$  – აპარატის გამოსასვლელში კონდენსატის ტემპერატურა, K;

$c_{\text{წყ}}$  – მაცივებელი წყლის სითბოტევადობა, ჯ/(კგ.K);

$t_{\text{წყსაწ}}$  – მაცივებელი წყლის საწყისი ტემპერატურა, K;

$t_{\text{წყსაბ}}$  – მაცივებელი წყლის საბოლოო ტემპერატურა, K;

$Q_{\text{ღან}}$  – აპარატის მიერ გარემოსათვის გადაცემული ანუ დაკარგული სითბოს რაოდენობა, ჯ/წმ.

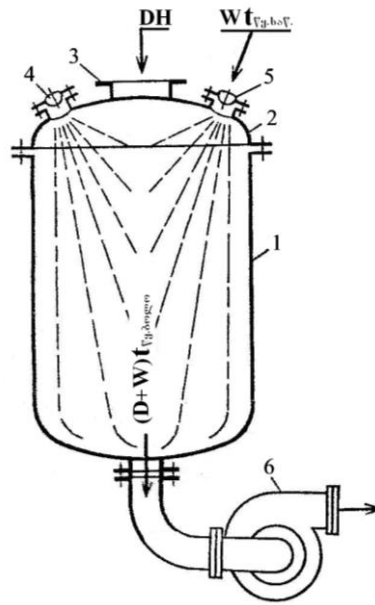
**კონდენსაცია შერევით.** იმ შემთხვევაში, როდესაც საჭიროა წყალში უხსნადი სითხის ორთქლის, ან ისეთი ორთქლის კონდენსაცია, რომელიც შემდგომ აღარ გამოიყენება, მათი გაცივება და კონდენსაცია შესაძლებელია წყალთან უშუალოდ შერევის გზით. ასეთი პროცესი ტარდება შემრევ კონდენსატორში.

შემრევი კონდენსატორის მუშაობის ეფექტურობა უშუალოდ დამოკიდებულია გასაცივებელი ორთქლისა და წყლის ურთიერთშეხების ზედაპირის ფართობზე. ამიტომ ამ ზედაპირის გადიდების მიზნით ხდება გასაცივებელი სითხის გაშხევა სხვადასხვა სახის მექანიზმების გამოყენებით. წყლისა და ორთქლის ნაკადების აპარატიდან გამოტანის მეთოდის მიხედვით განასხვავებენ სველ და მშრალ კონდენსატორებს. სველ კონდენსატორში მაცივებელი წყალი, კონდენსატი და არაკონდენსირებადი აირი (ჰაერი) ერთად გამოაქვთ აპარატის ქვედა ნაწილიდან ტუმბოს მეშვეობით. მშრალ კონდენსატორში მაცივებელი წყალი და კონდენსატი გამოდის აპარატის ქვედა ნაწილიდან, ხოლო ჰაერი – ვაკუუმ-ტუმბოს მეშვეობით გაიწოვება აპარატის ზედა ნაწილიდან.

კონდენსატორი შეიძლება იყოს პირდაპირნაკადიანი და წინაღდენიანი. პირდაპირნაკადიანი აპარატი (სურ. 3.14) წარმოადგენს ცილინდრულ ჭურჭელს (1), რომლის სახურავზე (2) გაკეთებულია მილყელები (3), (4) და (5). ორთქლი მიეწოდება მილყელიდან (3), ხოლო მაცივებელი წყალი – მილყელებიდან (4) და (5). მაცივებელი წყალი და ორთქლი მოძრაობს ერთი მიმართულებით - ზევიდან ქვევით. კონდენსატი გამოდის აპარატის ქვედა ნაწილიდან ტუმბოს (6) მეშვეობით.

წინაღდენიან აპარატში (სურ. 3.15) – წყალი მოძრაობს ზევიდან ქვევით, ორთქლი კი – საპირისპირო მიმართულებით ანუ ქვევიდან ზევით. აპარატის ცილინდრულ კორპუსში (1), ჭადრაკულად განლაგებულია პერფორირებული თაროები (2), რომლებიც კორპუსის კედელთან ქმნიან სითხის გასასვლელ ლაბირინთულ ხვრელებს. აპარატში იქმნება გაიშვიათება ვაკუუმ-ტუმბოს მეშვეობით, რომელიც ჰაერს იწოვს სითხის დამჭერიდან (3). წყალი და

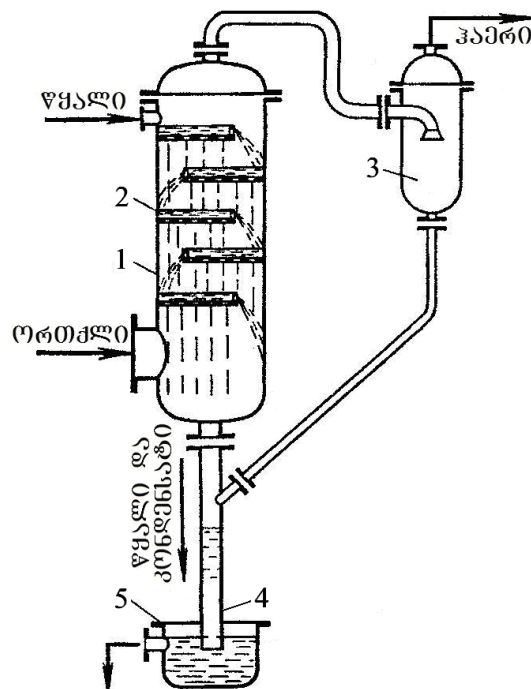
კონდენსატი ჩაედინება აპარატის ქვედა ნაწილიდან მილით (4) და გროვდება შემკრებში (5).



სურ. 3.14. სველი პირდაპირნაკადიანი შემრევი კონდენსატორი

ორთქლის კონდენსაციისათვის საჭირო წყლის ხარჯი განისაზღვრება შემდეგი ფორმულით:

$$W = \frac{D(H - c_{\text{წყ}} t_{\text{წყ,საბ}})}{c_{\text{წყ}} (t_{\text{წყ,საბ}} - t_{\text{წყ,საწ}})}$$



სურ. 3.15. წინაღენიანი შემრევი კონდენსატორი

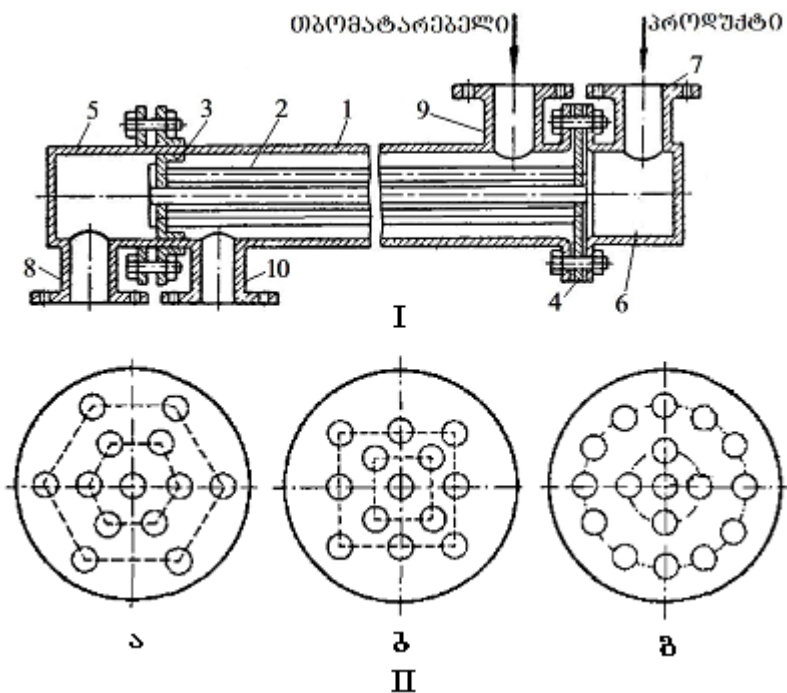
### 3.5. თბომცველი

აპარატს, რომელშიც მიმდინარეობს პროდუქტების გაცხელება ან გაცივება ეწოდება თბომცველი. სითბოს ცვლის პრინციპის მიხედვით არსებობს მრავალი სახის თბომცველი აპარატი. მათგან ყველაზე მეტად გავრცელებულია ზედაპირული თბომცველი, რომელშიც ორ არეს შორის თბოცვლა მიმდინარეობს მათი გამყოფი კედლით.

კონსტრუქციის მიხედვით არსებობს თბომცველი: გარსაცმმილებიანი; კლაკნილამილიანი; ორმილიანი – “მილი-მილში”; ფირფიტებიანი და სხვ.

გარსაცმმილიანი თბომცველის (სურ. 3.16) ძირითადი ელემენტებია: გარსაცმი (1); მილები (2), რომელთა ბოლოები ჩამაგრებულია მილოვან ცხაურებში (3) და (4); წინა (5) და უკანა (6) სახურავები პროდუქტის მიმღები (7) და გამომშვები (8) მილყელებით. კორპუსი აღჭურვილია თბომატარებლის შემშვები (9) და გამომშვები (10) მილყელებით.

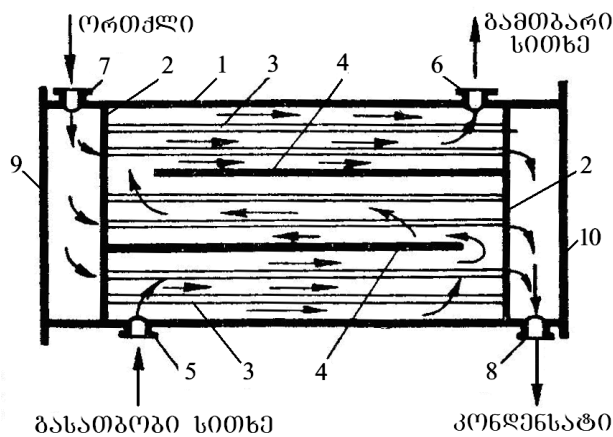
გარსაცმმილებიანი თბომცველი არსებობს ერთსვლიანი და მრავალსვლიანი. ერთსვლიან აპარატში პროდუქტი და თბომატარებელი მოძრაობს ერთმანეთის პარალელურად ერთი მიმართულებით ან საპირისპიროდ. მრავალსვლიან აპარატებში პროდუქტი და თბომატარებელი თბომცველის არეში მრავალჯერ იცვლიან მოძრაობის მიმართულებას.



სურ. 3.16. ერთსვლიანი, გარსაცმმილებიანი თბომცველი:  
 I-საერთო ხედი; II-მილების განლაგების სქემები:  
 ა-ექვსკუთხედის გვერდებზე; ბ-კვადრატის გვერდებზე;  
 გ-კონცენტრულ წრეწირებზე

3.17 სურათზე წარმოდგენილია გარსაცმშილებიანი, მრავალსვლიანი თბომცველი აპარატის სქემა. იგი შედგება გარსაცმისაგან (1), ორი მილოვანი ცხაურასაგან (2), რომლებშიც ჩამაგრებულია მილები (3). მილოვანი ცხაურები ჩამაგრებულია ლითონის ცილინდრულ გარსაცმში (1), რომელსაც ტორსული მხრიდან აქვს სახურავები (9) და (10). გარსაცმში ჩადგმულია ტიხრები (4), რომლებიც ქმნიან კამერებს და აერთიანებენ მილების რამდენიმე ჯგუფს. ამრიგად, მილების ჯგუფები მიმდევრობით არიან შეერთებული ერთმანეთთან.

გასათბობი სითხე აპარატში შედის მილყელიდან (5), ხოლო გამოედინება მილყელიდან (6). თბომატარებელი მილებსა (3) და გარსაცმს (1) შორის არეს მიეწოდება მილყელიდან (7) და ფარავს მილების გარე ზედაპირებს. ტიხრების (4) მიერ წარმოქმნილი კამერების მეშვეობით, პროდუქტი თბომცველში რამდენიმეჯერ იცვლის მიმართულებას, რითაც იზრდება მის მიერ გავლილი მანძილი და შესაბამისად - თბური დამუშავების დრო. წარმოქმნილი კონდენსატი გამოდის მილყელიდან 8.



სურ. 3.17. მრავალსვლიანი, გარსაცმშილებიანი თბომცველი

### 3.5.1. ორმილიანი გამცხელებელი

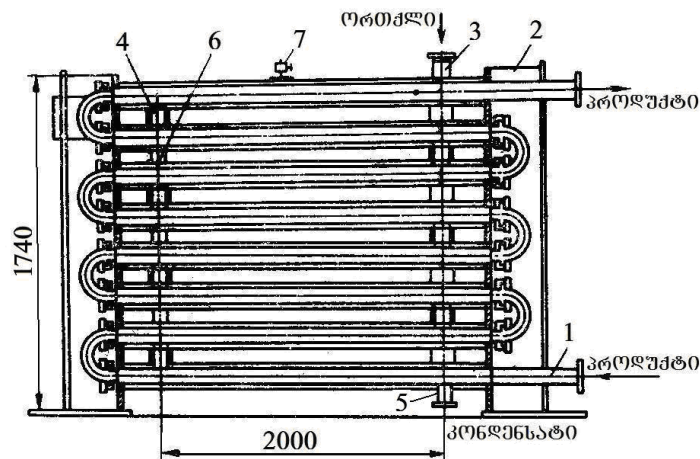
ორმილიანი გამცხელებელი (სურ. 3.18) გამოიყენება კვების თხევადი პროდუქტების როგორც გასაცხელებლად, ისე გასაცივებლად. მაგალითად, მეღვინეობაში ასეთ აპარატებში ხდება ღვინომასალების თბური დამუშავება; საკონსერვო წარმოებაში ხილის და პომიდვრის წვენების გაცხელება და სხვ.

გამცხელებელი შედგება 8-12 სექციისაგან. ყოველი სექცია, თავის მხრივ შედგება სპილენძის ან უჟანგავი ფოლადის 32-70 მმ დიამეტრის და 2,0-2,5 მ სიგრძის მილისაგან, რომელიც მოთავსებულია 60-100 მმ დიამეტრის ფოლადის მილში. შიგა და გარე მილებს შორის არე შევსებულია ორთქლით. შიგა მილების

ბოლოები შეერთებულია ერთმანეთთან 180°-ით მოხრილი მილყელებით. პროდუქტი აპარატს მიეწოდება ტუმბოთი მილტუხიდან (1), ხოლო გაცხელებული პროდუქტი გამოდის მილტუხიდან (2). ორთქლი 0,3 მპა წნევით შედის მილტუხში (3), ხდება მილთა შორის არეში და მოძრაობს მასში მარჯვნიდან მარცხნივ. პირველი სექციის ბოლოს დაყენებულია ვერტიკალური მილისა (4), რომელიც აერთებს ორი სექციის მილთა შორის არეს. ქვედა სექციიდან, მილტუხიდან (5) გამოდის კონდენსატი.

აპარატის მდგრადობისა და სიმტკიცის მიზნით მასში გათვალისწინებულია საყრდენი საფენები (6). მილთა შორის არეში დაგროვილი ჰაერის გამოყვანა ხდება გამწოვი ვენტილიდან (7).

პროდუქტების სიცივით დამუშავების შემთხვევაში მილთა შორის არეში მიეწოდება ცივი წყალი ან მარილხსნარი.



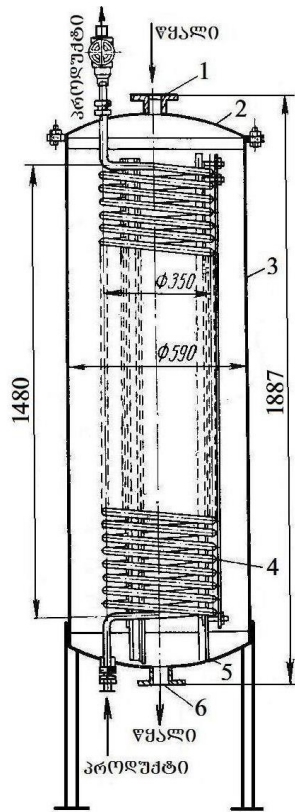
სურ. 3.18. ორმილიანი გამცხელებელი

### 3.5.2. კლაკნილი თბომცვლელი

განხილული თბომცვლელებისაგან განსხვავებით 3.19 სურათზე წარმოდგენილი თბომცვლელის ცილინდრულ კორპუსში (3) სწორი მილების ნაკრების ნაცვლად ჩადგმულია კლაკნილი მილი (4).

კორპუსს აქვს ნახევრადსფერული სახურავი (2) და ძირი (5), რომლებზედაც დამაგრებულია თბომატარებლის (მოცემულ შემთხვევაში ცივი წყლის) შემშვები (1) და გამომშვები (6) მილტუხები. კლაკნილი მილის ბოლოები მთავრდება პროდუქტის შემშვები და გამომშვები მილყელებით.

თბომცვლელის რეზერვუარის მოცულობაა 0,465 მ<sup>3</sup>, ხოლო თბომცვლელის ზედაპირი – 2,85 მ<sup>2</sup>.



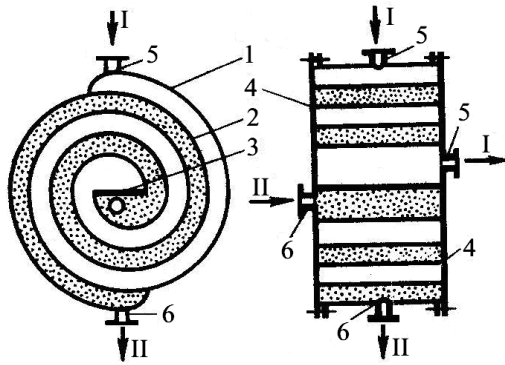
სურ. 3.19. კლაკნილიანი თბომცველი

კლაკნილა თბომცველის თბოგაცემის კოეფიციენტი რამდენადმე მაღალია, ვიდრე სწორმილიანისა, მაგრამ კლაკნილას გაცილებით მეტი სიგრძის გამო, ორთქლის კონდენსაციის დროს, მის ქვედა ნაწილში შესაძლებელია დაგროვდეს კონდენსატი, რაც აუარესებს თბომცველის პირობებს. ამის გამო, კლაკნილებს ხშირად აკეთებენ სექციების სახით, ერთი მეორის თავზე, ან კონცენტრულად.

კლაკნილი მილის დიამეტრს ირჩევენ მასში სითხის ან ორთქლის მოძრაობის სიჩქარის მიხედვით. უმეტეს შემთხვევაში დიამეტრს იღებენ 76 მმ-ის ტოლს.

### 3.5.3. სპირალური თბომცველი

სპირალური თბომცველის ზედაპირი წარმოქმნილია სპირალისებურად დახვეული ლითონის ორი ფურცლისაგან (1) და (2) ტიხრის (3) ირგვლივ (სურ. 3.20). აპარატი ტორსული მხრებიდან მჭიდროდ არის დახურული სახურავებით (4). ფურცლების მიერ წარმოქმნილ სწორკუთხა კვეთის არხებში მოძრაობს ორი თბომცველი არე I და II, რომელთა აპარატში შესასვლელად და გამოსასვლელად დანიშნულია მილყელები შესაბამისად 5-5 და 6-6.

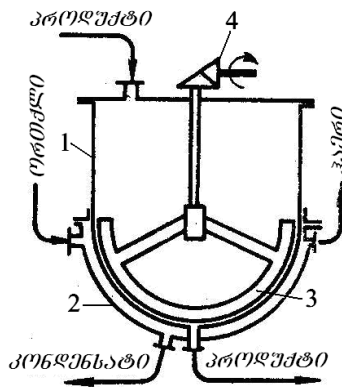


სურ. 3.20. სპირალური თბომცვლელი

სპირალურ თბომცვლელს აქვს თბოგადაცემის მაღალი კოეფიციენტი, უმნიშვნელო ჰიდრაულიკური წინააღმდეგობა და გამოირჩევა კომპაქტურობით.

### 3.5.4. პერანგიანი თბომცვლელი ღუზისებრი სარევით

აპარატში (სურ. 3.21) თბომცვლა მიმდინარებს კორპუსის (1) გავლით, რომლის ძირზე გაკეთებულია ორთქლის ან მაცივებელი აგენტის პერანგი 2.



სურ. 3.21. პერანგიანი თბომცვლელი ღუზისებრი სარევით

თბოგადაცემის კოეფიციენტის გაზრდის მიზნით აპარატი აღჭურვილია ღუზისებრი სარევით (3), რომელიც ბრუნვით მოძრაობას ღებულობს ამძრავი მექანიზმიდან (4). კორპუსს აქვს პროდუქტის შესატანი და გამოსატანი მილყელები, ხოლო პერანგს – ორთქლის შემშვები, კონდენსატის და ჰაერის გამოსაშვები მილყელები.

### 3.5.5. თბომცვლელი აპარატის გაანგარიშება

თბომცვლელი აპარატისათვის ატარებენ საპროექტო და შესამოწმებელ გაანგარიშებებს. კონსტრუქციულ გაანგარიშებას ატარებენ ახალი თბომცვლელის პროექტირების დროს, როდესაც ცნობილია სახურებელი ან საცივებელი

პროდუქტის რაოდენობა და მისი პარამეტრები აპარატის შესასვლელსა და გამოსასვლელში. ამასთან განსაზღვრავენ თბოცვლისთვის აუცილებელ ზედაპირს, თბომატარებლის ან მაცივებელი აგენტის ხარჯს, თბომცვლელის გეომეტრიულ ზომებს, მის ჰიდრავლიკურ წინააღმდეგობასა და მექანიკურ სიმტკიცეს.

შემოწმებითი გაანგარიშებები საჭიროა იმისათვის, რომ განისაზღვროს – შეიძლება თუ არა მოცემული თბომცვლელი აპარატის გამოყენება ამა თუ იმ ტექნოლოგიური მიზნებისათვის. ამასთან ძალიან მნიშვნელოვანია ნაკადების ოპტიმალური სიჩქარეების სწორად შერჩევა. ნაკადების სიჩქარის ზრდასთან ერთად იზრდება თბოგადაცემის კოეფიციენტი და შესაბამისად მცირდება თბოცვლის ზედაპირის ფართობი, რაც, თავის მხრივ, ამცირებს თბომცვლელის გაბარიტებს და მის ღირებულებას. რეკომენდებულია შემდეგი ოპტიმალური სიჩქარეები (მ/წმ): წყლისათვის და ზომიერი სიბლანტის სითხეებისათვის – 0,6...1,5; ბლანტი სითხეებისათვის – 0,2...0,6; ზომიერი წნევის ჰაერისა და აირებისათვის – 8...12; წნევის ქვეშ მყოფი ნაჯერი ორთქლისათვის – 25...30; ვაკუუმში მოთავსებული ნაჯერი ორთქლისათვის – 35...45.

**გარსაცმშილებიანი თბომცვლელის გაანგარიშება** (სურ. 3.16, 3.17).

პროდუქტის ორთქლით გაცხელების შემთხვევაში განსაზღვრავენ ორთქლის ხარჯს ფორმულით

$$D = \frac{Q_1 + Q_2}{i_1 - i_2} \text{ კგ/წმ,}$$

სადაც  $i_1$  და  $i_2$  - ორთქლის და კონდენსატის ენთალპიებია, ჯ/კგ;

$Q_1$  - პროდუქტის გასაცხელებლად საჭირო სითბოს ხარჯი, ჯ/წმ;

$Q_2$  - გარემოზე გადაცემული სითბოს დანაკარგის საკომპენსაციო სითბოს ხარჯი, ჯ/წმ.

თბოგადაცემის განტოლებიდან

$$Q_1 = Fk\Delta t \text{ ჯ/წმ}$$

პოულობენ გახურების ზედაპირის ფართობს

$$F = \frac{Q_1}{k\Delta t} \text{ მ}^2,$$

სადაც  $k$  - თბოგადაცემის კოეფიციენტი, კგ/(მ<sup>2</sup> · K);

$\Delta t$  - ტემპერატურათა სხვაობა, K.

ბოლო ტოლობიდან, მიღების ზომების მიხედვით (დიამეტრი -  $d_{\text{საშ.}}$ , სიგრძე -  $l$ ) შეგვიძლია ვიპოვოთ თბომცვლელში მათი საჭირო რაოდენობა  $n$

$$F = \pi d_{\text{საშ.}} \ell \cdot n \text{ მ}^2, \text{ აქედან}$$

$$n = \frac{F}{\pi d_{\text{საშ.}} \ell}.$$

კლაკნილა თბომცველის გაანგარიშება (სურ. 3.19).

კლაკნილას აპარატში ათავსებენ ისე, რომ ის სითხით დაიფაროს და აპარატის კედლებიდან დაცილებული იყოს 0,25...0,4 მ-ით. აპარატის ცნობილი შიგა დიამეტრის ( $D$ ) შემთხვევაში კლაკნილას ხვიის დიამეტრი

$$D_{\text{ხვ.}} = D - 2(0,25...0,4), \text{ მ.}$$

კლაკნილას მილის საერთო ( $L$ ) სიგრძეს პოულობენ ტოლობიდან

$$F = \pi d_{\text{საშ.}} \cdot L, \text{ მ}^2.$$

კლაკნილას ერთი ხვიის სიგრძე

$$\ell_{\text{ხვ.}} \approx \pi D_{\text{ხვ.}}, \text{ მ.}$$

ხვიების რიცხვი კლაკნილაში დ თბომცველის სიმაღლე

$$n = \frac{L}{\ell_{\text{ხვ.}}}, \quad H = (n-1)\ell_{\text{ხვ.}}, \text{ მ.}$$

### 3.6. გამორთქვლა

გამორთქვლა ეწოდება ნივთიერების ხსნარის კონცენტრაციის გაზრდის პროცესს, რაც ხორციელდება თხევადი აქროლადი გამხსნელის აორთქლებით. გამორთქვლის არსი სწორედ გამხსნელის ორთქლის მდგომარეობაში გადაყვანაა, რის შემდეგაც დარჩება კონცენტრირებული ხსნარი. გამორთქვლას ატარებენ დუღილის დროს ე.ი. მაშინ, როდესაც ორთქლის წნევა ხსნარის ზედაპირზე უტოლდება წნევას აპარატის მუშა მოცულობაში.

გამორთქვლის პროცესში, ხსნარის დუღილის ტემპერატურაზე გამხსნელი მხოლოდ ნაწილობრივ გამოიყოფა, რის გამოც გამორთქვლა პრინციპულად განსხვავდება აორთქლებისაგან, რომელიც მიმდინარეობს ხსნარის ზედაპირიდან დუღილის ტემპერატურაზე უფრო დაბალ ტემპერატურაზე.

ხსნარის დუღილის ტემპერატურამდე გასაცხელებლად პრაქტიკაში, როგორც წესი, იყენებენ წყლის ორთქლს, რომელსაც უწოდებენ **გამცხელებელს**. გარდა ამისა, გაცხელების პროცესში წარმოიქმნება ხსნარიდან გამოყოფილი ორთქლი, რომელსაც **მეორეულ ორთქლს** უწოდებენ.

გამორთქვლის პროცესი შეიძლება ჩატარდეს ატმოსფერული, ჭარბი წნევის ან ვაკუუმის პირობებში. ატმოსფერულ წნევაზე გამორთქვლით

მიღებული მეორეული ორთქლი გადის ატმოსფეროში. გამოსორთქვლის ეს მეთოდი არის ყველაზე მარტივი, მაგრამ არაეკონომიური თბური თვალსაზრისით

ჭარბი წნევით გამოსორთქვლის დროს მეორეულ ორთქლს აქვს მაღალი ტემპერატურა, ამიტომ მას ხშირად იყენებენ სხვადასხვა დაბალ წნევაზე მომუშავე თბომცვლელი აპარატების გასაცხელებლად. ამ შემთხვევაში გამოსორთქვლის დანადგარის ეფექტურობა იზრდება. მაგრამ მეორეული ორთქლის ტემპერატურის და წნევის აწევა დაკავშირებულია გამცხელებელი ორთქლის წნევის შესაბამის გაზრდასთან და დამატებით ხარჯებთან. გარდა ამისა, ამ მანქანებლების გაზრდით უარესდება მრავალი პროდუქტის (რძის, ტომატის, ხილის წვენის და სხვ.) ხარისხი.

ვაკუუმით გამოსორთქვლის დროს ხსნარის დუღილის ტემპერატურა მცირდება. ეს საშუალებას გვაძლევს ვაკუუმ-გამოსორთქვლის აპარატების გასაცხელებლად გამოვიყენოთ უფრო დაბალი წნევის ორთქლი. ეს მეთოდი ფართოდ გამოიყენება ისეთი ხსნარის გამოსორთქვლისათვის, რომელიც მაღალ ტემპერატურაზე იშლება და კარგავს თვისებებს. ვაკუუმით გამოსორთქვლის უპირატესობა ისიც არის, რომ მცირდება გარემოში სითბოს დანაკარგი.

ხსნარის შედეგებასთან (კონცენტრაციის გაზრდასთან) ერთად იცვლება მისი ფიზიკური თვისებები: დუღილის ტემპერატურა, თბოგამტარობა, თბოტევადობა, ტემპერატურაგამტარობა, სიბლანტე და სხვა. ხსნარის კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად მცირდება თბოგამტარობა, თბოტევადობა, ტემპერატურაგამტარობა და იზრდება მისი სიბლანტე. ამასთან უარესდება თბოგაცემის პირობები ხურების ზედაპირიდან მდულარე ხსნარამდე.

ხსნარების გამოსორთქვლა შესაძლებელია განხორციელდეს ერთ (ერთკორპუსიანი დანადგარი) ან თანმიმდევრულად შეერთებულ რამდენიმე აპარატში (მრავალკორპუსიანი დანადგარი).

ერთკორპუსიან დანადგარში გამცხელებელი ორთქლის სითბო გამოიყენება ერთჯერადად, ხოლო აპარატიდან გამავალი მეორეული ორთქლი, როგორც წესი, არ გამოიყენება.

მრავალკორპუსიან დანადგარში, ნებისმიერი წინა აპარატიდან გამომავალი მეორეული ორთქლი წარმოადგენს მომდევნო აპარატის გამცხელებელ ორთქლს, რომელშიც ხსნარი დუღს უფრო დაბალ წნევაზე. ეს მეთოდი უზრუნველყოფს სითბოს მნიშვნელოვან ეკონომიას და ამიტომ ფართოდ არის გავრცელებული მრეწველობაში.

გამოსორთქვლით ხსნარების კონცენტრაციის გაზრდას იყენებენ შაქრის, მინერალური სასუქების, საკვები საფუარების და სხვათა წარმოებაში. ხშირად

გამოორთქვლით მიიღწევა ხსნარის მაღალი კონცენტრაცია (მშრალ ნივთიერებათა 92...93%-მდე). ასეთი ხსნარიდან გამხსნელის შემდგომი გამოყოფისას უკვე იწყება მყარი ნივთიერების გამოკრისტალება.

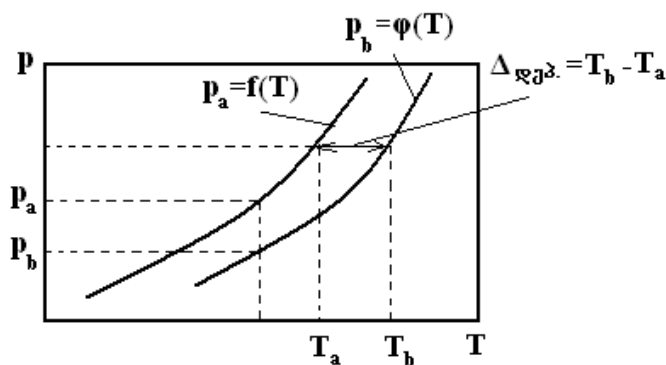
### 3.6.1. ხსნარის ზოგიერთი თვისება

ხსნარის გამოორთქვლისას მნიშვნელოვანია მისი შემდეგი თვისებები: ტემპერატურული დეპრესია, თბოტევადობა და გახსნის სითბო.

**ტემპერატურული დეპრესია.** ცნობილია, რომ ერთსა და იმავე  $T$  ტემპერატურაზე სუფთა გამხსნელზე მოსული ორთქლის  $P_a$  წნევა მეტია ხსნარზე მოქმედ ორთქლის  $P_b$  წნევაზე. შესაბამისად, ერთი და იმავე წნევის პირობებში გამხსნელის დუდილის ტემპერატურა ნაკლებია ხსნარის დუდილის ტემპერატურაზე. გამხსნელის და ხსნარის დუდილის ტემპერატურებს შორის  $T_b - T_a = \Delta_{დეპ.}$  სხვაობას ტემპერატურული დეპრესია ეწოდება. 3.22-ე სურათზე წარმოდგენილია ტემპერატურული დეპრესიის გრაფიკული გამოსახულება, სადაც  $P_a = f(T)$  გამხსნელის ორთქლის წნევის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკია, ხოლო  $P_b = \varphi(T)$  - ხსნარის ორთქლის წნევის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების გრაფიკი.

ჩვეულებრივ, ტემპერატურულ დეპრესიას არ ანგარიშობენ. მას პოულობენ ცდების შედეგად მიღებულ ცხრილებში.

მდულარე ხსნარზე წარმოქმნილ ორთქლს მეორეულ ორთქლს უწოდებენ. მიღებულია, რომ მეორეული ორთქლის ტემპერატურა ტოლია გამხსნელის გაჯერებული ორთქლის ტემპერატურისა მოცემული წნევისას.



სურ. 3.22. ტემპერატურული დეპრესიის გრაფიკი

ხსნარის თბოტევადობა წარმოადგენს გამხსნელი ნივთიერების ტემპერატურისა და კონცენტრაციის ფუნქციას. უმეტესი ხსნარების თბოტევადობას არ ახასიათებს ადიტიურობა ანუ ხსნარის თბოტევადობა არ უდრის შემადგენელი კომპონენტების თბოტევადობათა ჯამს. ამიტომ მათ სითბოტევადობას ვერ ვიანგარიშებთ გამხსნელისა და გახსნილი ნივთიერების მიხედვით. ადიტიურობიდან გადახრა მით უფრო მეტია, რაც მეტია გახსნილი ნივთიერების კონცენტრაცია.

ზუსტი გაანგარიშების დროს უპირატესობას ანიჭებენ ცდებით მიღებულ გრაფიკებსა და ცხრილებს.

**განზაგების სითბო.** მყარი ნივთიერების გახსნისას, როცა ისინი ქიმიურად არ რეაგირებენ გამხსნელთან, შეიმჩნევა ხსნარის გაცივება, რადგან ირღვევა კრისტალური მესერი, რაზეც იხარჯება ენერგია (დნობის სითბო). თუ გასახსნელი ნივთიერება შედის ქიმიურ რეაქციაში გამხსნელთან და წარმოიქმნება სოლვატები (წყალში გახსნისას ჰიდრატები), მაშინ გამოიყოფა სითბო. განზაგების სითბო წარმოადგენს დნობის სითბოსა და ქიმიური ურთიერთქმედების ჯამს.

**განზაგების ინტეგრალური სითბო** ეწოდება სითბოს იმ რაოდენობას, რომელიც გამოიყოფა ან შთაინთქმება მცირე რაოდენობის მყარი ნივთიერების გახსნისას იმდენად დიდი რაოდენობის გამხსნელში, რომ მისი შემდგომი დამატება პრაქტიკულად აღარ იძლევა სითბურ ეფექტს. სითბური ეფექტი პრაქტიკულად არ შეიმჩნევა 1 მოლი მყარი ნივთიერების გახსნისას 300 მოლზე მეტი რაოდენობის გამხსნელში.

ამრიგად, განზაგების სითბო დამოკიდებულია გასახსნელი ნივთიერების და გამხსნელის ბუნებასა და ხსნარის კონცენტრაციაზე.

გამოორთქვლის პროცესის გასაანალიზებლად უნდა ვიცოდეთ ხსნარის კონცენტრაციის ცვლილების  $\Delta q$  სითბო, რომელიც ადვილად განისაზღვრება გახსნის ინტეგრალური სითბოთი.

ვთქვათ, ცნობილია  $X_1$  კონცენტრაციის ხსნარის გახსნის ინტეგრალური  $q_1$  სითბო, და  $X_2$  კონცენტრაციის ხსნარის გახსნის ინტეგრალური  $q_2$  სითბო. ჰესის კანონის საფუძველზე, რომლის მიხედვითაც გარდაქმნის სითბური ეფექტი დამოკიდებულია სისტემის საწყის და საბოლოო მდგომარეობაზე და არ არის დამოკიდებული იმ გზაზე, რომლითაც ხდება ეს გარდაქმნა, ჩვენი შემთხვევისთვის გვექნება:

$$q_1 + \Delta q = q_2 \quad \text{ან} \quad \Delta q = q_2 - q_1.$$

$\Delta q$  სითბო გამოიყოფა ხსნარის განზავებისას  $X_2$  კონცენტრაციიდან  $X_1$  კონცენტრაციამდე და შთაინთქმება ხსნარის კონცენტრირებისას  $X_1$  კონცენტრაციიდან  $X_2$  კონცენტრაციამდე.

ტექნიკაში გამოიყენება გამოსორთქვლის შემდეგი ძირითადი მეთოდები: მარტივი გამოსორთქვლა (პერიოდული ან უწყვეტი), მრავალჯერადი გამოსორთქვლა (მხოლოდ უწყვეტი) და გამოსორთქვლა სითბური ტუმბოს გამოყენებით.

ყველა ჩამოთვლილი პროცესი გამსურებელი ორთქლისა და ხსნარის პარამეტრების მიხედვით ტარდება როგორც ჭარბი წნევის დროს, ასევე ვაკუუმში..

### 3.6.2. მარტივი გამოსორთქვლა

მარტივი გამოსორთქვლა ხდება მცირე მწარმოებლურობის დანადგარებზე, როდესაც სითბოს ეკონომიას არ აქვს დიდი მნიშვნელობა. გარდა ამისა, მარტივი გამოსორთქვლა გამართლებულია პერიოდული ქმედების დანადგარებზე, მაშინ, როცა ვიყენებთ მაღალი დეპრესიის ხსნარებს.

მარტივი გამოსორთქვლის პერიოდული პროცესი შეიძლება განვახორციელოთ ორი მეთოდით: საწყისი ხსნარის ერთჯერადი და პორციებად ჩატვირთვით.

მარტივი გამოსორთქვლის მატერიალური ბალანსი შეიძლება გამოვსახოთ შემდეგი ორი ტოლობით:

$$G_1 = G_2 + W,$$

$$G_1 X_1 = G_2 X_2,$$

სადაც  $G_1$  არის შემომავალი ხსნარის რაოდენობა (კგ/წმ);

$G_2$  - აორთქლებული (კონცენტრირებული) ხსნარის რაოდენობა (კგ/წმ);

$W$  - აორთქლებული წყლის რაოდენობა (კგ/წმ);

$X_1$  და  $X_2$  - შესაბამისად ხსნარის საწყისი და საბოლოო კონცენტრაციები (%).

აღნიშნული ტოლობებიდან ვპოულობთ:

$$W = G_1 \left( 1 - \frac{X_1}{X_2} \right),$$

$$X_2 = G_1 \frac{X_1}{G_1 - W}.$$

მარტივი გამოსორთქვლის სითბური ნაკადების სქემიდან (სურ. 3.23) გამომდინარე ვწერთ თბური ბალანსის განტოლებას

$$G_1 c_1 t_1 + DH_1 = G_2 c_2 t_2 + WH_2 + DH_3 + Q,$$

სადაც  $c_1$  და  $c_2$  არის შესაბამისად შემომავალი და კონცენტრირებული ხსნარების კუთრი თბოტევადობები,  $\text{ჯ}/(\text{კგ}\cdot\text{K})$ ;

$t_1$  და  $t_2$  - შესაბამისად შემომავალი და კონცენტრირებული ხსნარების ტემპერატურები,  $\text{K}$ ;

$D$  - გამხურებელი ორთქლის ხარჯი ( $\text{კგ}/\text{წმ}$ );

$H_1$ ,  $H_2$  და  $H_3$  - შესაბამისად გამხურებელი ორთქლის, მეორეული ორთქლის და კონდენსატის ენთალპიები, ( $\text{ჯ}/\text{კგ}$ );

$Q$  - სითბოს დანაკარგი გარემოში ( $\text{ჯ}/\text{წმ}$ ).

თუ ბოლო განტოლებაში ჩავსვავთ  $G_1 = G_2 + W$  მივიღებთ:

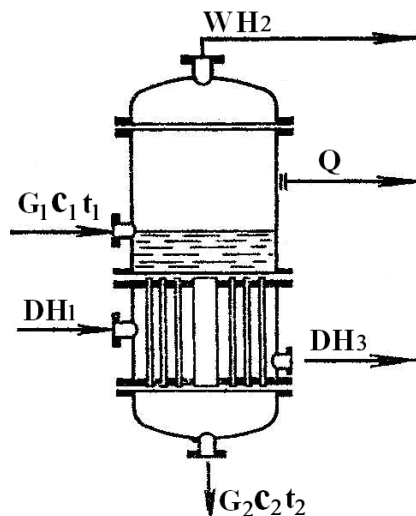
$$G_2 c_1 t_1 + W c_1 t_1 + DH_1 = G_2 c_2 t_2 + WH_2 + DH_3 + Q.$$

აქედან გამხურებელი ორთქლის ხარჯი

$$D = G_2 \frac{c_2 t_2 - c_1 t_1}{H_1 - H_3} + W \frac{H_2 - c_1 t_1}{H_1 - H_3} + \frac{Q}{H_1 - H_3}, \text{ კგ}/\text{წმ}.$$

მიღებული ტოლობიდან ჩანს, რომ გამორთქლისას საჭირო გამხურებელი ორთქლის ხარჯი შეიცავს სამ შესაკრებს: 1. ორთქლის ხარჯი ხსნარის ენთალპიის შესაცვლელად, 2. მეორეული ორთქლის მისაღებად საჭირო ორთქლის ხარჯი, 3. სითბოს დანაკარგის საკომპენსაციო ორთქლის ხარჯი.

პირველი და მესამე შესაკრებების მნიშვნელობები მეორე შესაკრებთან შედარებით მცირეა, ამიტომ მიახლოებითი ანგარიშისას მიღებულია, რომ ხსნარიდან აორთქლებულ 1 კგ წყალს სჭირდება 1,1-1,2 კგ გამხურებელი ორთქლი.



სურ. 3.23. სითბური ნაკადები მარტივი გამორთქლის დროს

დამყარებული პროცესის დროს, დროის ერთეულში გადაცემული სითბოს რაოდენობა იანგარიშება თბოგადაცემის განტოლებით

$$Q = K\Delta t F \text{ ჯ/წმ,}$$

სადაც  $K$  არის თბოგადაცემის კოეფიციენტი, ვტ/(მ<sup>2</sup>·K);

$\Delta t$ -ტემპერატურათა სასარგებლო სხვაობა, K.

გამოორთქვლის პროცესისათვის აპარატის გამხურებელი ზედაპირის ფართობი

$$F = D(H_1 - H_3) / K\Delta t, \text{ მ}^2.$$

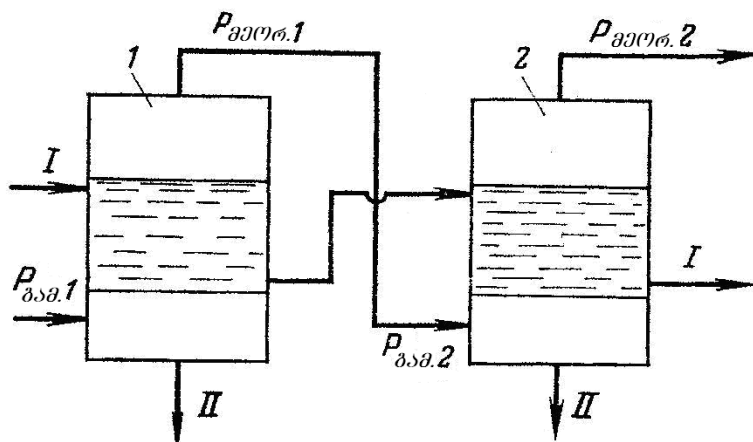
$Q$  - გამხურებელი ორთქლიდან ხსნარზე გადაცემული სითბო

$$Q = D(H_1 - H_3), \text{ ჯ/წმ.}$$

### 3.6.3. მრავალჯერადი გამოორთქვლა

მრავალჯერადი გამოორთქვლის შემთხვევაში გამხურებლად გამოიყენება მეორეული ორთქლი, რის ხარჯზეც მიიღწევა სითბოს ეკონომია. ასეთი პროცესის მიღწევა შეიძლება ან მაღალი წნევის გამხურებელი ორთქლის გამოყენებით, ან ვაკუუმით.

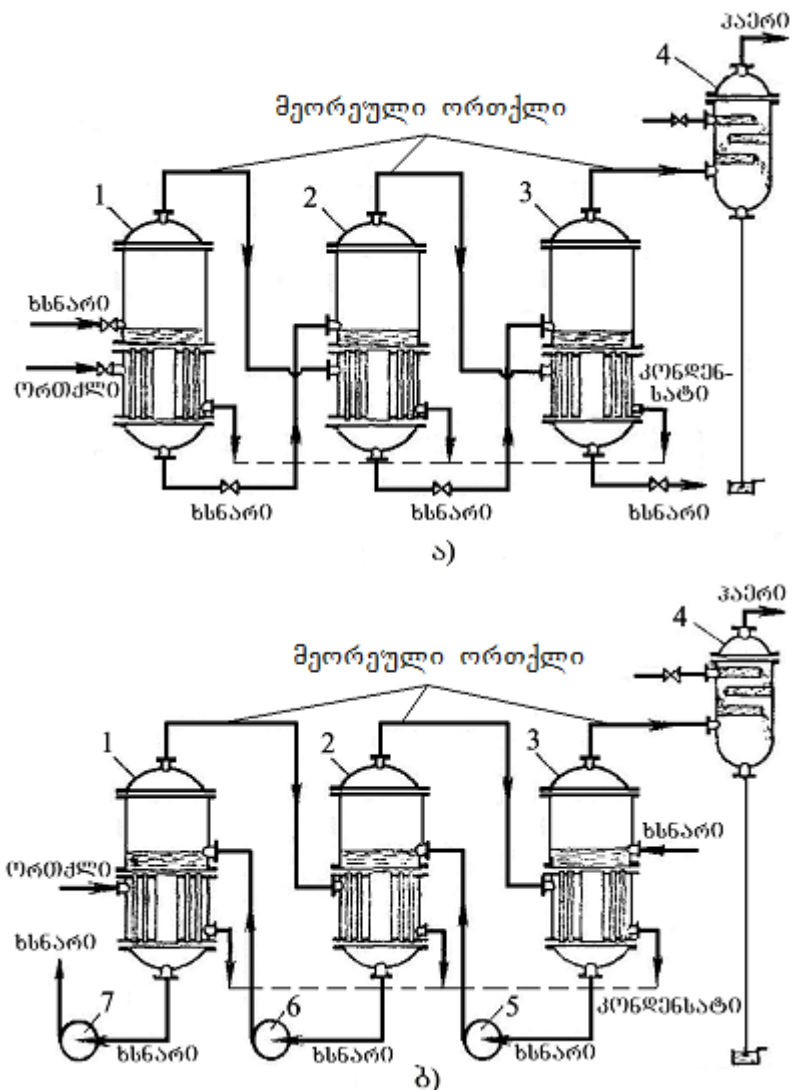
პროცესის არსი არის ის, რომ იგი მიმდინარეობს რამდენიმე თანმიმდევრულად შეერთებულ აპარატში, რომლებშიც წნევა შერჩეულია ისე, რომ წინა აპარატის მეორეული ორთქლი მომდევნო აპარატში შეიძლება გამოყენებული იქნეს, როგორც გამხურებელი ორთქლი. მაგალითად,  $P_{\text{გაბ.1}}$  წნევის მეორეული ორთქლი, რომელიც წარმოიქმნება 1 აპარატში (სურ. 3.24), გამოიყენება როგორც  $P_{\text{გაბ.2}}$  წნევის გამხურებელი ორთქლი 2 აპარატში ( $P_{\text{გაბ.1}} \approx P_{\text{გაბ.2}}$ ).



სურ. 3.24. მრავალჯერადი გამოორთქვლის სქემა  
I-სითხე; II-კონდენსატი

ცხადია, რომ მრავალჯერადი გამოორთქელა საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ სითბოს ხარჯი მიმდევრობით შეერთებული აპარატების რიცხვის პროპორციულად. აღნიშნულ აპარატებს უწოდებენ კორპუსებს, შესაბამის მრავალჯერადი გამოორთქელის დანადგარებს კი – მრავალკორპუსიანს.

მრავალკორპუსიანი გამოორთქელის დანადგარები შეიძლება იყოს პირდაპირი დინების, წინააღმდეგობით და კომბინირებული. პირდაპირი დინების გამოსაორთქელი დანადგარის სქემა ნაჩვენებია 3.25,ა სურათზე. მასზე დატანილი არ არის დამხმარე აპარატები. საწყისი ხსნარი მიეწოდება (1) კორპუსს, შემდეგ გადაედინება (2) და (3) კორპუსებში და გამოედინება (3) კორპუსიდან კონცენტრირებული ხსნარის სახით. დანადგარში წნევა მცირდება (1) კორპუსიდან (3) კორპუსის მიმართულებით, რის გამოც ხსნარის გადაედინება ხდება წნევათა სხვაობის ხარჯზე.



სურ. 3.25. გამოორთქელის დანადგარების პრინციპული სქემები:  
 ა–პირდაპირი დინების; ბ–წინააღმდეგობით; 1-2-3 კორპუსები;  
 4–ბარომეტრული კონდენსატორი; 5-6-7 ტუმბოები.

შეგვიძლია ვთქვათ, რომ პირდაპირი დინების სქემის უპირატესობაა ის, რომ კორპუსიდან კორპუსში ხსნარის გადაღინება შეიძლება ტუმბოების გარეშე, ხოლო ნაკლია თბოგადაცემის ცუდი პირობები. ცნობილია, რომ თბოგადაცემის კოეფიციენტები მდუღარე ხსნარებში მცირდება ხსნარის კონცენტრაციის გაზრდასა და წნევის შემცირებასთან ერთად. პირდაპირი დინების დანადგარში ყოველ მომდევნო კორპუსს შეესაბამება უფრო მაღალი კონცენტრაცია და უფრო მცირე წნევა, ვიდრე წინას. ამიტომ თბოგადაცემის კოეფიციენტი ბოლო კორპუსში რამდენჯერმე უფრო მცირეა, ვიდრე პირველში, ხოლო თბოგადაცემის საშუალო კოეფიციენტი უფრო ნაკლებია, ვიდრე წინააღმდეგობის დანადგარში.

ამრიგად, წინააღმდეგობის დანადგარის უპირატესობაა გახურების მცირე ზედაპირი, ხოლო უარყოფითი მხარეა ტუმბოების გამოყენების აუცილებლობა.

პირდაპირი დინების დანადგარის უარყოფითი მხარე უფრო ნაკლებ-მნიშვნელოვანია, ვიდრე წინააღმდეგობის დანადგარისა, ამიტომ მან უფრო ფართო გამოყენება პოვა წარმოებაში.

მრავალჯერადი გამორთქლის მატერიალური ბალანსი მთელი დანადგარისთვის შეიძლება გამოისახოს განტოლებებით, რომლებიც მიღებულია მარტივი გამორთქლის პირობებისთვის.

დანადგარში მთლიანად გამორთქლილი წყლის რაოდენობა

$$W = G(1 - \frac{x_1}{x_2}),$$

სადაც  $G$  არის დანადგარში შემავალი სითხის რაოდენობა, კგ/წმ;

$x_1$  და  $x_2$  – შესაბამისად ხსნარის საწყისი და საბოლოო კონცენტრაციები (%).

გამორთქლილი წყლის საერთო რაოდენობა, ცხადია, ტოლია კორპუსებში გამორთქლილი წყლის რაოდენობების ჯამის

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n,$$

სადაც  $W_1, W_2,$  და  $W_n$  არის შესაბამისად პირველ, მეორე და მომდევნო კორპუსებში გამორთქლილი წყლის რაოდენობა, კგ/წმ.

### 3.7. დუდილის პროცესი

საკვები პროდუქტების წარმოების ტექნოლოგიურ პროცესებში ფართოდ გამოიყენება დუდილის პროცესი. დუდილი ეწოდება ორთქლწარმოქმნის ინტენსიურ პროცესს, რომელიც მიმდინარეობს სითხის მთელ მოცულობაში.

დუდილის პროცესის წარმართვისათვის, უპირველეს ყოვლისა, აუცილებელია სითხე გავაცხელოთ დუდილის ტემპერატურამდე, რომელიც დამოკიდებულია წნევაზე. გარდა ამისა, აუცილებელია სახურებელ ზედაპირს ჰქონდეს დუდილის ტემპერატურაზე რამდენიმე გრადუსით მაღალი ტემპერატურა. ამ სხვაობას ეწოდება გადახურება. შესაბამისად, გადახურებული არის დუდილის ზედაპირს უნდა ეხებოდეს სითხის გარკვეული ფენა. გადახურება იმისთვისაა აუცილებელი, რომ წარმოიქმნას ორთქლის საწყისი ბუშტულები, რომლებმაც უნდა დაძლიონ ზედაპირული დაჭიმულობის ძალები, გაიზარდონ მოცულობაში და ამოტივტივდნენ სითხის ზედაპირზე. ერთმანეთისაგან განასხვავებენ დუდილს დიდ მოცულობაში (როდესაც დუდილის პროცესი მიმდინარეობს გარკვეული ტევადობის ჭურჭელში) და მილებში მოძრავი სითხის დუდილს.

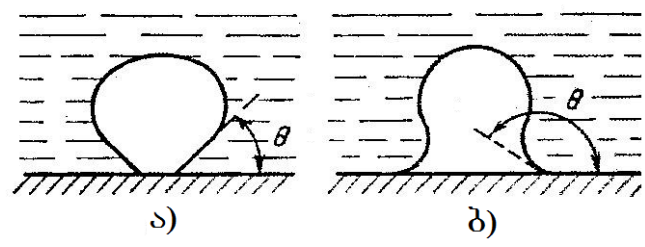
არსებობს დუდილის ორი ძირითადი რეჟიმი: ბუშტულოვანი და აფსკოვანი. **ბუშტულოვანი დუდილის** შემთხვევაში სახურებელ ზედაპირზე (ანუ ჭურჭლის ფსკერზე ან კედლებზე) წარმოიქმნება ორთქლის ცალკეული ბუშტულები, რომლებიც თანდათან იზრდებიან და ამოტივტივდებიან მდუღარე სითხის ზედაპირზე. რაც უფრო მეტი რაოდენობის სითბო მიეწოდება დუდილის ზედაპირს, ან რაც უფრო მეტი იქნება ზედაპირის გადახურება, მით უფრო მეტი ბუშტულა წარმოიქმნება და მით უფრო ინტენსიურად მიმდინარეობს დუდილის პროცესი. ბუშტულოვანი დუდილის დიდი უპირატესობა ის არის, რომ ამ შემთხვევაში ძალიან მაღალია თბოგაცემის კოეფიციენტი ერთფაზიან კონვექციასთან შედარებით. ეს განპირობებულია იმ გარემოებით, რომ ბუშტულების წარმოქმნის შედეგად ხდება დუდილის ზედაპირთან უშუალო შეხებაში მყოფი სითხის სასახლვრო შრეში ინტენსიური ნაკადების წარმოქმნა, რაც აუმჯობესებს სითბოს გადაცემის პირობებს.

უნდა აღინიშნოს, რომ მიწოდებული სითბოს რაოდენობის, ან გადახურების გაზრდა უფრო ინტენსიურს ხდის დუდილის პროცესს. რაც მეტია მიწოდებული სითბოს რაოდენობა ან გადახურება, მით უფრო მეტი ბუშტულა წარმოიქმნება და გადაიტანს სითბოს დუდილის ზედაპირიდან სითხეში. მაგრამ აღნიშნულ პროცესს გააჩნია თავისი ზღვარი. კერძოდ დგება მომენტი, როდესაც დუდილის ზედაპირზე იმდენად ბევრი ბუშტულა წარმოიქმნება, რომ ისინი ერთმანეთს შეერწყმიან, რის შედეგადაც დუდილის ზედაპირთან წარმოიქმნება მთლიანი ორთქლის აფსკი, რომელიც ცუდად ატარებს სითბოს. ამის შედეგად ადგილი აქვს სითბოს გადაცემის პირობების მკვეთრად გაუარესებას. მიწოდებული სითბო სითხეში ვეღარ გადადის, ზედმეტად აცხელებს დუდილის ზედაპირს და იწვევს მის გადაწვას. ამ მოვლენას ეწოდება **დუდილის კრიზისი**, ხოლო დუდილის

პროცესს, რომლის დროსაც დუღილის ზედაპირზე წარმოქმნილია მთლიანი ორთქლის აფსკი, ეწოდება **აფსკოვანი დუღილი**. ატმოსფერული წნევის პირობებში წყლისათვის კრიტიკული სითბური დატვირთვა, რომლის დროსაც ხდება ბუშტულოვანი დუღილის აფსკურ დუღილში გადასვლა (ანუ იწყება დუღილის კრიზისი), დაახლოებით 1 მილიონი ვატის ტოლია.

სითხის დუღილის პროცესში თბოგაცემა განსაკუთრებულად რთულ პროცესებს განეკუთვნება. ამის გამო დღემდე არ არსებობს დუღილის პროცესისათვის თბოგაცემის კოეფიციენტის საანგარიშო სავსებით საიმედო ფორმულა.

დუღილის პროცესის შესწავლა გვიჩვენებს, რომ ამ დროს ორთქლის ბუშტულები წარმოიქმნება სითბოს გადამცემი ზედაპირის გარკვეულ ადგილებში (ცენტრებში). თუ სითხის მიერ სითბოს გადამცემი ზედაპირის დასველების უნარი მაღალია (კუთხე  $\theta$  მცირეა, სურ. 3.26, ა), მაშინ სითხე შედის ბუშტულების ქვეშ და ხელს უწყობს მათს მოწყვეტას ამ ზედაპირიდან. დაბალი დასველების უნარის შემთხვევაში ორთქლის ბუშტულებს ფართო ძირი აქვთ და მათი მოწყვეტა ხდება დიდი ზომების მიღწევის შემდეგ (დიდი  $\theta$  კუთხის შემთხვევაში, სურ. 3.26, ბ). ფაქტობრივად, ადგილი აქვს ბუშტულას მხოლოდ ზედა ნაწილის მოწყვეტას, ხოლო გამცხელებელი ზედაპირის მიმდებარედ მუდმივად არსებობს ორთქლის ფენა. ორთქლადქცევის ცენტრების დიდი რაოდენობის შემთხვევაში გამცხელებელი ზედაპირი თანდათან მთლიანად დაიფარება ორთქლის უწყვეტი ფენით. ამ შემთხვევაში ორთქლის ცუდი სითბოგამტარობის გამო თბოგაცემის კოეფიციენტი მცირდება. ამგვარად, გამცხელებელი ზედაპირის მაღალი დასველების უნარის მქონე სითხეების დუღილის შემთხვევაში თბოგაცემის კოეფიციენტი უფრო მაღალია, ვიდრე მცირე დასველების უნარის მქონე სითხეების დუღილის შემთხვევაში.



სურ. 3.26. ორთქლის ბუშტულების ფორმა დუღილის პროცესში

მდულარე სითხის მოცულობაში ტემპერატურა იცვლება შემდეგნაირად: უშუალოდ გამცხელებელი ზედაპირის მიმდებარე სითხის ტემპერატურა ამ ზედაპირის ტემპერატურის ტოლია. გამცხელებელი ზედაპირიდან 2–3 მმ-ის

დაშორებით სითხის ტემპერატურა მკვეთრად მცირდება სიდიდემდე, რომელიც  $0,3-0,5^{\circ}\text{C}$ -ით აღემატება წარმოქმნილი ორთქლის ტემპერატურას. ასეთი ტემპერატურა შენარჩუნებულია პრაქტიკულად სითხის მთელ მოცულობაში ანუ სითხის ძირითადი მასა ოდნავ გადახურებულია.

სითხის ფენის გავლით ზევით გადაადგილებისას მოწყვეტილი ბუშტულების მოცულობა იზრდება. ეს ნიშნავს, რომ ზევით მოძრაობისას ორთქლის ბუშტულს სითხისაგან იღებს ორთქლისა და სითბოს გარკვეულ რაოდენობას. როგორც წესი, ბუშტულს ზევით მოძრაობისას მისი მოცულობა რამდენიმე ათეულჯერ იზრდება. შესაბამისად შეიძლება ითქვას, რომ ბუშტულს სითბოს ძირითად რაოდენობას იღებს არა გამცხელებელი ზედაპირიდან, არამედ სითხისაგან. გამოდის, რომ დუღილის პროცესში გამცხელებელი ზედაპირიდან სითბო გადაეცემა სითხეს, ხოლო სითხიდან ორთქლის ბუშტულებს, ამის შემდეგ კი ბუშტულებიდან სითბო ორთქლის სახით გადადის გარემოში. ატმოსფერული წნევის პირობებში წყლის დუღილის შემთხვევაში ორთქლის ბუშტულების დიამეტრია 2–3 მმ.

ორთქლის ბუშტულების წარმოქმნილი ცენტრების რაოდენობა, ბუშტულების მოწყვეტის სიხშირე და შესაბამისად, თბოგაცემის ინტენსიურობა დამოკიდებულია გამცხელებელი ზედაპირისა და სითხის ტემპერატურების  $\Delta t$  სხვაობაზე. ტემპერატურული სხვაობის გაზრდის შედეგად თბოგაცემის კოეფიციენტი იზრდება მხოლოდ გარკვეულ ზღვრამდე, რომლის ზევითაც  $\Delta t$  სხვაობის გაზრდა იწვევს თბოგაცემის  $\alpha$  კოეფიციენტის მკვეთრად შემცირებას. ტემპერატურათა იმ სხვაობას, რომელიც შეესაბამება თბოგაცემის კოეფიციენტის მაქსიმალურ მნიშვნელობას, ტემპერატურათა კრიტიკული სხვაობა ეწოდება.

ტემპერატურათა კრიტიკული სხვაობა დამოკიდებულია ასადუღებელი სითხის ბუნებაზე, ტემპერატურაზე, წნევაზე და გამხურებელი ზედაპირის ხასიათზე. პრაქტიკული გამოყენების მიზნით დუღილის პარამეტრები ისე უნდა იქნეს შერჩეული, რომ ტემპერატურათა მუშა სხვაობა არ აღმოჩნდეს კრიტიკულზე მეტი.

### 3.8. ხელლონური ზომიერი გაცივება

ხელლონური სიცივე ფართოდ გამოიყენება კვების მრეწველობაში, ტრანსპორტზე, საზოგადოებრივი კვების ობიექტებში, ვაჭრობის სფეროში, საყოფაცხოვრებო მიზნებისათვის და მრავალ სხვა დარგში.

მაღფუჭადი პროდუქტების კონსერვირების სხვა მეთოდებთან შედარებით, გაცივება წარმოადგენს ყველაზე უფრო ეკონომიურ და მოხერხებულ მეთოდს, რომლის დროსაც ყველაზე სრულად ინახება კვების პროდუქტების ხარისხი და გემოვნებითი თვისებები. კვების მრეწველობაში ხელოვნური სიცივე გამოიყენება არამხოლოდ პროდუქტების ცივად შენახვისა და კონსერვირებისათვის, არამედ უშუალოდ მრავალი სახის ტექნოლოგიურ პროცესში. თითქმის არ არსებობს კვების მრეწველობის დარგი, რომელშიც ხელოვნური სიცივე ფართოდ არ მონაწილეობდეს ტექნოლოგიურ პროცესში.

გაცივება წარმოადგენს სხეულიდან ან გარემოდან სითბოს წართმევის პროცესს, რომელსაც თან ახლავს ტემპერატურის შემცირება. გაცივება შეიძლება იყოს ბუნებრივი და ხელოვნური. ჰაერით ან წყლით ბუნებრივი გაცივების დროს სხეული შეიძლება გაცივდეს გარემოს ტემპერატურამდე. უფრო დაბალი ტემპერატურები მიიღება ხელოვნური გაცივებით, რისთვისაც საჭიროა გარკვეული ენერჯის დახარჯვა ანუ უნდა გამოვიყენოთ სამაცივრო სისტემა. ნებისმიერი სხეული გაცივდება, თუ იგი კონტაქტში მოვა ისეთ გარემოსთან, რომლის ტემპერატურა უფრო დაბალია. ე.ი. ნებისმიერი სამაცივრო სისტემის დანიშნულებაა შექმნას გარემოს ტემპერატურაზე დაბალი ტემპერატურული ღონე. ხელოვნური გაცივებისათვის იყენებენ ისეთ ფიზიკურ პროცესებს, რომლებიც დაკავშირებულია ნივთიერების აგრეგატული მდგომარეობის შეცვლასთან, მაგალითად, როგორცაა, აორთქლება, გაღვობა, სუბლიმაცია, დუდილი და სხვა.

წყალი ნორმალურ პირობებში (1 ატ წნევაზე) დუღს  $+100^{\circ}\text{C}$ -ზე, მაგრამ არის ნივთიერებები, რომლებიც იმავე პირობებში დუღს  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-40^{\circ}\text{C}$ ,  $-100^{\circ}\text{C}$  და  $-269^{\circ}\text{C}$ -ზეც კი. საკმარისია ჩვენ გვქონდეს ასეთი სითხე, რომ მივიღებთ სიცივეს წყაროს. მაგრამ ასეთი ნივთიერებები ბუნებაში თხევად მდგომარეობაში არ არსებობენ. ისინი ნორმალურ პირობებში აირებია: ამიაკი, პროპანი, იზობუტანი და სხვა. მათი გათხევადებისათვის საჭიროა სამაცივრო მანქანების გამოყენება და ენერჯის დახარჯვა.

ნივთიერებას, რომელიც გამოიყენება სამაცივრო ტექნიკაში “მაცივებელი აგენტი” ეწოდება. არსებობს მათი მრავალი სახეობა. ისინი მოიცავს როგორც ბუნებრივ, ისე ხელოვნურ ნივთიერებებსა და მათ ნარეგებს.

ისევე, როგორც ნებისმიერი აირი, მაცივებელი აგენტი შეკუმშვისას თხევადდება. ამ დროს წნევასთან ერთად მატულობს ტემპერატურაც. იმისათვის, რომ ტემპერატურა უცვლელი დარჩეს ანუ პროცესი იყოს იზოთერმული, საჭიროა სითბოს ართმევა ანუ შეკუმშული სითხის გაცივება. ამრიგად, მივიღებთ

გარემოსთან მიახლოებული ტემპერატურის ნივთიერებას თხევად მდგომარეობაში, რომელიც იმყოფება მაღალი წნევის ქვეშ. საკმარისია სითხეს მოვაშოროთ ეს წნევა, რომ იგი დაიწყებს დუღილს და გაცივდება. ასე მიიღება დაბალი ტემპერატურის წყარო. დაბალი ტემპერატურა იქნება მანამ, სანამ არ აორთქლდება სითხის ბოლო წვეთი. თუ ამ აორთქლებულ ნივთიერებას შევაგროვებთ, ისევ შეგვიძლია მისი შეკუმშვა და პროცესის განმეორება. ასეთია ხელოვნური სიცივის მიღების ფიზიკური არსი და ამ პრინციპზე მუშაობს სამაცივრო მოწყობილობები.

ზომიერი სიცივის მისაღებად გამოიყენება მაცივარ-მანქანა. მუშა აგენტის შეკუმშვის ხერხისა და მუშა ციკლის მიმდინარეობის ცვლილების მიხედვით ეს მანქანა არსებობს რამდენიმე სახის:

- ორთქლის კომპრესიული მანქანა, რომელშიც მუშა აგენტი იკუმშება კომპრესორით (დგუშიანი, ხრახნული ან ტურბინული), რის შემდეგაც შეკუმშული აირი კონდენსირდება კონდენსატორში;

- აირის კომპრესიული მანქანა, რომელშიც მუშა აგენტი იკუმშება დგუშიანი ან ტურბინიანი კომრესორით, ამასთან შეკუმშული აირი არ გადადის თხევად მდგომარეობაში;

- აბსორბციული მანქანა, რომელშიც მუშა აგენტი იკუმშება ე.წ თერმოკომპრესორით და სხვა.

### 3.8.1. ორთქლის კომპრესიული მაცივრის მუშა პროცესი

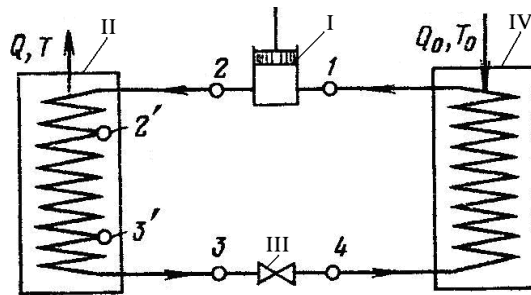
როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ სიცივის მისაღებად საჭიროა გაზის შეკუმშვა, გათხევადება, გაფართოება და აორთქლება. ეს არის ოთხი ძირითადი პროცესი, რომელიც სამაცივრო სისტემაში მიმდინარეობს. შესაბამისად სამაცივრო სისტემის ძირითად ელემენტებს წარმოადგენენ ის მოწყობილობები, რომლებიც ამ პროცესებს უზრუნველყოფენ.

სამაცივრო მანქანებს, რომლებშიც სიცივის მისაღებად გამოიყენება სითხის დუღილი, უწოდებენ ორთქლის მაცივარ მანქანებს. განვიხილოთ ამ მანქანებში მიმდინარე წრიული ციკლი  $T-S$  ენტროპიული დიაგრამის გამოყენებით, სადაც აბსცისთა ღერძზე მოცემულია ენტროპიის მნიშვნელობა ( $S$ ), ხოლო ორდინატთა ღერძზე – აბსოლუტური ტემპერატურა ( $T$ ). რომელიმე სისტემის ენტროპია ( $S$ ) წარმოადგენს სისტემის სითბოსა ( $Q$ ) და მისი აბსოლუტური ტემპერატურის ( $T$ ) ფარდობას.

წრიული ციკლის დროს მაცივარი აგენტი გადადის ერთი აგრეგატული მდგომარეობიდან მეორეში და პირიქით. ყველაზე უფრო სრულყოფილ ციკლს, რომელშიც იხარჯება ყველაზე მცირე მუშაობის რაოდენობა, წარმოადგენს **კარნოს უკუციკლი**, რომელიც შედგება ორი იზოთერმული და ორი ადიაბატური პროცესებისგან. ამ ციკლის შესასრულებლად იხარჯება მუშაობა, რის შედეგადაც ხდება სითბოს ართმევა.

ორთქლის კომპრესიული მაცივარი მანქანის მუშაობის პრინციპი ასეთია (სურ. 3.27): მაცივებელი აგენტი შეიწოვება კომპრესორის I მიერ, შეიკუმშება მუშა წნევაზე და კონდენსირდება კონდენსატორში II. კონდენსატორი არის აპარატი, რომელმაც უნდა უზრუნველყოს ცხელი აირის გაცივება და გათხევადება. იგი შედგება მილებისაგან, რომლებშიც გადის მუშა ნივთიერება, ხოლო მილებს გარედან უვლის მაცივებელი გარემო. ეს უკანასკნელი შეიძლება იყოს ჰაერი ან წყალი. ამ მოწყობილობას ასევე უწოდებენ თბომცველ აპარატს, რადგან მასში ხდება სითბოს გაცვლა მუშა ნივთიერებასა და მაცივებელ გარემოს შორის.

კონდენსატორიდან გამოსული მაღალი წნევის სითხე გადის საფართოებელ მოწყობილობაში III, სადაც მისი წნევა მკვეთრად მცირდება. ასეთი მოწყობილობა შეიძლება იყოს დროსელური ან როგორც მას უწოდებენ თერმომარეგულირებელი ვენტილი. მასში მიმდინარე პროცესის არსი ასეთია: მაღალი წნევის ნაკადი გადის შევიწროებულ არეში.



სურ. 3.27. ორთქლის კომპრესიული მაცივარ-მანქანის სქემა

ვინაიდან ნაკადს უჭირს ამ შევიწროებაში გასვლა, მისი წნევა შევიწროებელი ადგილის გავლის შემდეგ მცირდება. ამ პროცესს დროსელირება ეწოდება. დროსელირების შემდეგ მაცივებელი აგენტი იწყებს ინტენსიურ აორთქლებას და გვაძლევს სიცივეს. იმისათვის, რომ ეს სიცივე გამოვიყენოთ მაცივარს აქვს კიდევ ერთი თბომცველი აპარატი IV, რომელსაც საორთქლებელი ეწოდება. მაგრამ ამ შემთხვევაში მუშა ნივთიერება სითბოს ართმევს გასაცივებელ გარემოს. ვინაიდან ამ აპარატში დაბალი ტემპერატურაა, იგი აუცილებლად უნდა იყოს თბოიზოლირებული. ისევე, როგორც

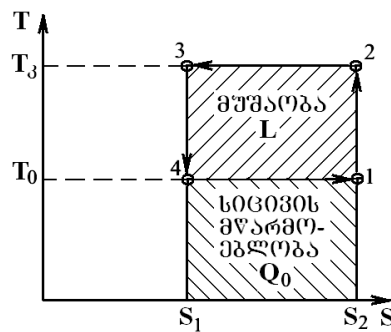
კონდენსატორში, აქაც ხდება სითბოს გადაცემა ერთი გარემოდან მეორეში. აორთქლების პროცესში მაცივებელი აგენტი სითბოს იღებს საორთქლებლის გარემომცველი სივრციდან.

$T-S$  დიაგრამაზე ორთქლი 1-2 ხაზზე (სურ. 3.28) ადიაბატურად იკუმშება, ხოლო შემდეგ 2-3 ხაზზე იზოთერმულად კონდენსირდება და სითბოს ნაწილს გადასცემს გარემოს კონდენსაციის  $T_3$  ტემპერატურის დროს. კონდენსაციის შემდეგად მიღებული სითხე 3-4 ხაზზე ადიაბატურად ფართოვდება და ასრულებს  $L$  მუშაობას. ციკლი მთავრდება 4-1 ხაზზე იზოთერმული გაფართოვებით, მაშინ როდესაც სითხე ორთქლდება და ართმევს სითბოს გასაცემებელ არეს  $T_0$  ტემპერატურის დროს.

თერმოდინამიკის პირველი კანონის საფუძველზე დახარჯული მუშაობა ( $L$ ) ტოლია ართმეული ( $Q$ ) და მიწოდებული ( $Q_0$ ) სითბოთა რაოდენობის სხვაობის

$$L = Q - Q_0.$$

მაცივებელი აგენტის მიერ გასაცემი არისათვის წართმეულ სითბოს უწოდებენ დანადგარის სიცივის მწარმოებლურობას. კუთრი სიცივის მწარმოებლურობა ( $q_0$ ) ეწოდება 1 კგ მაცივებელი აგენტის მიერ ართმეულ სითბოს რაოდენობას, ამასთან  $Q_0 = Gq_0$ , სადაც  $G$  - მაცივებელი აგენტის რაოდენობაა, რომელიც ცირკულირებს დანადგარში (კგ/წმ).



სურ. 3.28. ორთქლის კომპრესიული მაცივარ-მანქანის ციკლის სქემა

სამაცივრო დანადგარის მუშაობის ეფექტურობა ხასიათდება სამაცივრო კოეფიციენტით ( $\varepsilon$ ), რომელიც წარმოადგენს სიცივის მწარმოებლურობის და დახარჯული მუშაობის ფარდობას

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{L}.$$

გაცემული ( $Q$ ) და მიღებული ( $Q_0$ ) სითბოს რაოდენობებს იზოთერმულ პროცესში განსაზღვრავენ შემდეგი ტოლობებიდან:

$$Q = T(S_1 - S_2);$$

$$Q_0 = T_0(S_1 - S_2),$$

სადაც  $S_1$  - მუშა სხეულის ენტროპიაა კონდენსაციამდე, ჯ/(კგ·K);

$S_2$  - მუშა სხეულის ენტროპიაა კონდენსაციის შემდეგ, ჯ/(კგ·K).

აღნიშნული განტოლებებიდან ვღებულობთ

$$L = (T - T_0)(S_1 - S_2);$$

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{L} = \frac{T_0(S_1 - S_2)}{(T - T_0)(S_1 - S_2)} = \frac{T_0}{T - T_0}.$$

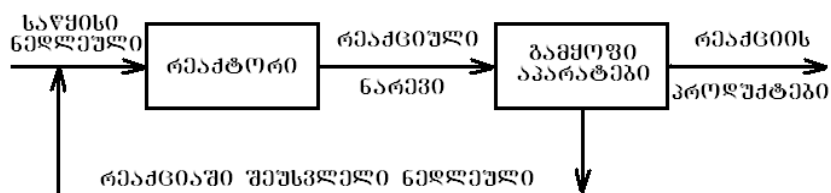
სამაცივრო კოეფიციენტი, როგორც წესი, ერთზე მეტი სიდიდეა და იცვლება ფართო საზღვრებში  $T_1$  და  $T_0$  ტემპერატურებზე დამოკიდებულებით.

## IV თავი. თბომასაგადაცემის პროცესები

### 4.1. მასაცვლის პროცესის ზოგადი ცნებები

ტექნოლოგიურ პროცესს, რომლის სიჩქარე განისაზღვრება ნივთიერების (მასის) ერთი ფაზიდან მეორეში გადაყვანის სიჩქარით, **მასაცვლის პროცესი** ეწოდება, მისთვის განკუთვნილ აპარატს კი – მასაცვლის აპარატი. მასაცვლის პროცესების დროს ორი ან მეტი ფაზა უშუალოდ ეხება ერთმანეთს. ფაზების კონტაქტის შედეგად ერთი ფაზიდან მეორეში ან პირიქით გადადის კომპონენტები. ასეთ პროცესს **მასაგადაცემას** ეწოდებენ, რომელიც ძირითადად დიფუზიური ხასიათისაა. დიფუზიურ პროცესში ერთმანეთს ეხება  $G$  და  $L$  ფაზები. ისინი მასაცვლაში არ მონაწილეობენ, მაგრამ მატარებელნი არიან იმ  $M$  ნივთიერებისა, რომელიც ნაწილდება ამ ფაზებს შორის.

საწარმოო პირობებში ტექნოლოგიური პროცესი ხშირად მიმდინარეობს 4.1-ე სურათზე გამოსახული სქემით. საწყისი ნედლეული მიეწოდება რეაქტორს, სადაც იგი მხოლოდ ნაწილობრივ გარდაიქმნება რეაქციის პროდუქტად. რეაქტორიდან გამომავალი პროდუქტების ნარევი მიემართება გამყოფ აპარატებში, სადაც ხდება ნარევის დაყოფა რეაქციის პროდუქტად და რეაქციაში შეუსვლელ პროდუქტებად. ეს უკანასკნელი ბრუნდება რეაქტორში, ხოლო რეაქციის პროდუქტი მიეწოდება შემდეგ მოწყობილობას.



სურ. 4.1. ტექნოლოგიურ სქემაში რეაქტორის კავშირი გამყოფ აპარატებთან

რეაქციასა და გამყოფ აპარატებს შორის არსებობს მჭიდრო ტექნოლოგიური კავშირი. ამ კავშირის საერთო კანონი ასეთია: რაც ნაკლები საწყისი ნედლეული გარდაიქმნება რეაქციის პროდუქტად, მით მეტი დატვირთვა ექნება გამყოფ აგრეგატს და პირიქით.

ცხადია, რომ რეაქციასა და გამყოფ აპარატზე მოსული დატვირთვების ოპტიმალური შეფარდება იწვევს მინიმალურ საწარმოო დანაკარგს ანუ პროცესის ოპტიმიზაციას. ამრიგად, სქემის ძირითადი ელემენტი – რეაქტორი – ოპტიმალურად მუშაობს მხოლოდ ოპტიმალურად მომუშავე გამყოფ აგრეგატთან ერთად.

გამყოფ აგრეგატში შეიძლება მიმდინარეობდეს სხვადასხვა პროცესი. მათ შორის ძირითადი და მნიშვნელოვანია: აბსორბცია, რექტიფიკაცია, ექსტრაქცია, კრისტალიზაცია, ადსორბცია, შრობა, იონცვლის პროცესები და მემბრანული დაყოფა. გარდა ჩამოთვლილი ძირითადი პროცესებისა, განიხილება ასევე თერმოდინამიკა და სხვ.

განიხილული პროცესებისათვის საერთოა ის, რომ ნივთიერების ერთი ფაზიდან მეორეში გადასვლა უკავშირდება კონვექციურ გადატანას და მოლეკულურ დიფუზიას, ამიტომ ჩამოთვლილ პროცესებს უწოდებენ მასაცვლის ანუ დიფუზიურ პროცესებს.

## 4.2. ფაზათა შედგენილობა

ფაზათა შედგენილობას გამოსახავენ სხვადასხვა ერთეულებით, ამისათვის იყენებენ წონით %-ს, მასურ ფარდობით წილადს, მოლეკულურ პროცენტს, მოლეკულურ წილადს და სხვა.

მასური ფარდობითი წილი არის ნარევის ერთი რომელიმე კომპონენტის მასის შეფარდება ყველა კომპონენტის მასათა ჯამთან. თუ კომპონენტების მასებია  $G_A, G_B, G_C$  კგ, მაშინ  $A, B, C$  კომპონენტების მასური წილი იქნება

$$a_A = \frac{G_A}{G_A + G_B + G_C} = \frac{G_A}{G}; \quad a_B = \frac{G_B}{G}; \quad a_C = \frac{G_C}{G}, \quad \text{სადაც}$$

$$G_A + G_B + G_C + \dots = G.$$

რომელიმე კომპონენტის მოლეკულის რიცხვის ფარდობა ყველა კომპონენტის მოლეკულის რიცხვთა ჯამზე არის ამ კომპონენტის მოლეკულის წილი, ე.ი

$$X_A = \frac{n_A}{n}; \quad X_B = \frac{n_B}{n}; \quad X_C = \frac{n_C}{n}, \quad \text{სადაც}$$

$$n_A + n_B + n_C + \dots = n.$$

თუ კომპონენტები მოცემულია მასური წილებით, მაშინ კომპონენტთა მოლთა რიცხვი იქნება

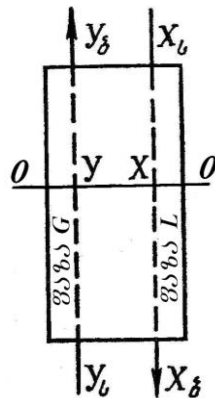
$$n_A = \frac{a_A}{M_A}; \quad n_B = \frac{a_B}{M_B}; \quad n_C = \frac{a_C}{M_C},$$

სადაც  $a_A; a_B; a_C$  - კომპონენტების მასური წილებია;

$M_A; M_B; M_C$  - კომპონენტების მოლეკულური მასები.

### 4.3. მასაცვლის მატერიალური ბალანსი და სამუშაო ხაზის განტოლება

მასაცვლის პროცესი უმთავრესად ხორციელდება ფაზების მოძრაობით ერთმანეთის მიმართ. დავეუშვათ გვაქვს ორი ფაზა  $G$  და  $L$ , რომლებიც ესებიან ერთმანეთს (სურ. 4.2) და მოძრაობენ ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულებით:  $G$  ფაზა მოძრაობს აპარატში ქვევიდან ზევით.  $G$  ფაზაში განაწილებული  $M$  ნივთიერების კონცენტრაცია დასაწეისში არის  $y_b$  და აპარატის ბოლოში  $y_a$ ;  $L$  ფაზის მოძრაობა მიმართულია ზევიდან ქვევით. ამ ფაზაში  $M$ -ის კონცენტრაცია აპარატში შესვლისას არის  $x_b$ , ხოლო აპარატიდან გამოსვლისას  $x_a$ . აპარატის რომელიმე ნებისმიერად აღებულ 0-0 კვეთში  $M$ -ის კონცენტრაციები შესაბამისად არის  $x$  და  $y$ . ყველა ეს კონცენტრაცია მასაგადაცემის აპარატების გაანგარიშების დროს მოცემულია და მათ მუშა კონცენტრაციები ეწოდება.



სურ. 4.2. ფაზების მოძრაობის მატერიალური ბალანსისათვის

დავეუშვათ, რომ განაწილებული  $M$  ნივთიერება ფაზების ერთმანეთთან შეხების შედეგად  $G$  ფაზიდან გადადის  $L$  ფაზაში. ამის გამო

$$M = Gy_b - Gy_a = Lx_a - Lx_b \quad \text{ან}$$

$$M = G(y_b - y_a) = L(x_a - x_b).$$

მიღებული განტოლებებიდან შეიძლება ერთ-ერთი ფაზის გაანგარიშება

$$G = L \left( \frac{x_a - x_b}{y_b - y_a} \right) \quad \text{კვ, ან} \quad L = G \left( \frac{y_b - y_a}{x_a - x_b} \right) \quad \text{კვ.}$$

რომელიმე 0-0 კვეთისათვის ანალოგიურად გვექნება

$$M = G(y_b - y) = L(x_a - x) \quad \text{ანუ}$$

$$y = \frac{L}{G}x + \left( y_b - \frac{L}{G}x_b \right). \quad (4.1)$$

ბოლო განტოლებაში შემოვიტანოთ აღნიშვნები:  $A = \frac{L}{G}$  და  $B = y_b - \frac{L}{G}x_b$ , რომლებიც წრფის განტოლების კოეფიციენტებია. ამგვარად, (4.1) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$y = Ax + B.$$

ეს წრფის განტოლებაა და მას მუშა კონცენტრაციის ან სამუშაო ხაზის განტოლება ეწოდება.

#### 4.4. ფაზათა წონასწორობა

გვაქვს ორი ფაზა –  $G$  და  $L$ , რომლებიც ერთმანეთს ვერ შეერევა, და ამ ფაზებში განაწილებული  $M$  ნივთიერება, რომლის კონცენტრაცია  $G$  ფაზაში არის  $y$ , ხოლო  $L$  ფაზაში –  $x$ . დაეუშვათ, რომ პროცესის დასაწყისში  $M$  ნივთიერება  $L$  ფაზაში არ არის ( $x=0$ ); ისეთ პირობებში, როდესაც  $G$  და  $L$  ფაზა ერთმანეთს შეეხება,  $M$  კომპონენტი იწყებს გადასვლას  $G$  ფაზიდან  $L$  ფაზაში. ამის გამო მისი  $y$  კონცენტრაცია  $G$  ფაზაში თანდათან მცირდება, ხოლო  $L$  ფაზაში  $x$  კონცენტრაცია იზრდება. როგორც კი  $L$  ფაზაში  $M$  ნივთიერება გაჩნდება, მაშინვე აღიძვრება უკუპროცესი:  $M$  გადასვლას იწყებს  $L$  ფაზიდან  $G$  ფაზაში. პირველად  $G$ -დან უფრო მეტი გადადის  $L$ -ში, ვიდრე პირიქით. მაგრამ დადგება ისეთი მომენტი, როდესაც  $M$  ნივთიერება როგორც პირდაპირი, ისე უკუმიმართულებით ერთი და იმავე რაოდენობით გადავა, ე.ი. დამყარდება დინამიკური წონასწორობა.

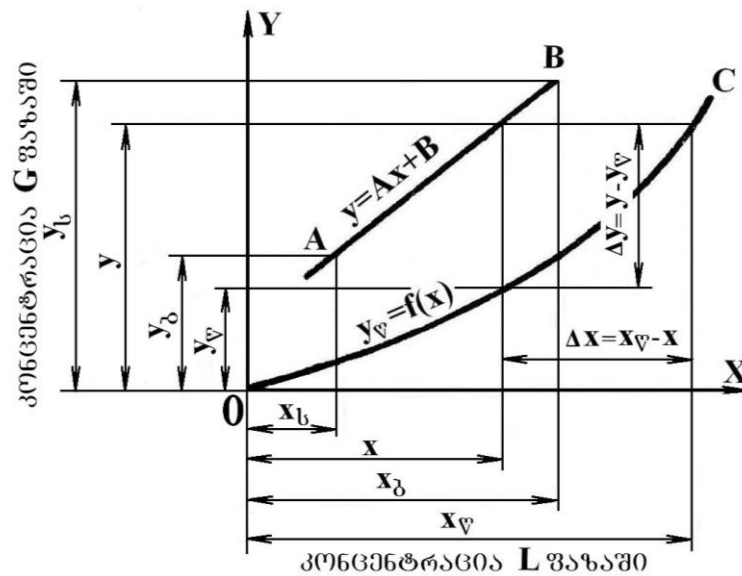
ასეთი წონასწორობის პირობებში ყოველ ნებისმიერ  $x$  კონცენტრაციას  $L$  ფაზაში შეესაბამება გარკვეული წონასწორული  $y_f$  კონცენტრაცია  $G$  ფაზაში და პირიქით – ყოველ ნებისმიერ  $y$  კონცენტრაციას  $G$  ფაზაში შეესაბამება გარკვეული წონასწორული  $x_f$  კონცენტრაცია  $L$  ფაზაში, ე.ი.

$$y_f = f(x); \quad x_f = f(y),$$

სადაც  $x$  და  $y$  არის  $M$  ნივთიერების მუშა კონცენტრაციები  $G$  და  $L$  ფაზებში, ხოლო  $x_f$  და  $y_f$  - ნივთიერების წონასწორული კონცენტრაციები ამავე ფაზებში.

ფაზათა შორის წონასწორობის გრაფიკული გამოსახვა მოცემულია 4.3-ე სურათზე. აბსცისთა ღერძზე გადახომილია განაწილებული ნივთიერების  $x$

კონცენტრაცია  $L$  ფაზაში, ხოლო ორდინატზე გადაზომილია განაწილებული ნივთიერების  $y$  კონცენტრაცია  $G$  ფაზაში. დიაგრამაზე მოცემულია წონასწორული მრუდი ( $OC$ ) და სამუშაო ხაზი ( $AB$ ).

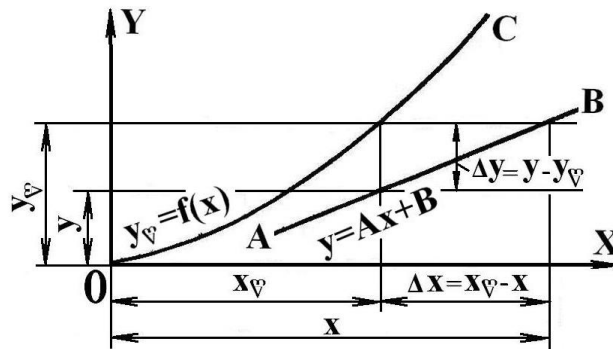


სურ. 4.3. მასაცვლის პროცესი, როდესაც განაწილებული ნივთიერება გადადის  $G$  ფაზიდან  $L$  ფაზაში

წონასწორული მრუდის განტოლება არის  $y_f = f(x)$ , ხოლო სამუშაო ხაზის განტოლება -  $y = Ax + B$ . სამუშაო ხაზის  $(x, y)$  კოორდინატები წარმოადგენენ მუშა კონცენტრაციებს.  $A$  წერტილის საწყისი და საბოლოო კონცენტრაციები არის  $x_b$  და  $y_b$ , ხოლო  $B$  წერტილის კოორდინატები შებრუნებულად  $x_b$  და  $y_b$ . წონასწორულ მრუდზე ყოველ წონასწორულ ორდინატს ( $y_f$ ) შეესაბამება განსაზღვრული აბსცისა ( $x$ ). დიაგრამიდან ჩანს, რომ როცა სამუშაო ხაზის  $y$  ორდინატი მეტია წონასწორული მრუდის  $y_f$  ორდინატზე, მაშინ ნივთიერება  $G$  ფაზიდან გადავა  $L$  ფაზაში. ცხადია, რომ მასაგადაცემის მამოძრავებელი ძალა  $\Delta y = y - y_f$  და სამუშაო ხაზი იქნება წონასწორული მრუდის ზემოთ. გრაფიკიდან აგრეთვე ჩანს, რომ  $\Delta y$  სხვადასხვა სიდიდისაა მასაცვლის პროცესის (აპარატის) სხვადასხვა ადგილას და რაც უფრო მცირეა მანძილი სამუშაო ხაზსა და წონასწორულ მრუდს შორის, მით უფრო ნაკლებია მასაცვლის მამოძრავებელი ძალა.

მამოძრავებელი ძალა  $L$  ფაზაში შეიძლება გამოისახოს  $\Delta x$  კონცენტრაციათა სხვაობითაც. მაგალითად, თუ ნივთიერება  $G$  ფაზიდან გადადის  $L$  ფაზაში, მაშინ კონცენტრაციათა სხვაობა  $L$  ფაზაში იქნება  $\Delta x$ , ხოლო მასაცვლის მამოძრავებელი ძალა -  $\Delta x = x_f - x$ .

თუ სამუშაო ხაზის  $y$  ორდინატი ნაკლებია წონასწორული მრუდის  $y_{\text{წ}}$  ორდინატზე, მაშინ ნივთიერება  $L$  ფაზიდან გადავა  $G$  ფაზაში. ცხადია, რომ მასაგადაცემის მამოძრავებელი ძალა  $\Delta y = y_{\text{წ}} - y$  და სამუშაო ხაზი იქნება წონასწორული მრუდის ქვევით (სურ. 4.4).



სურ. 4.4. მასაცვლის პროცესი, როდესაც განაწილებული ნივთიერება გადადის  $L$  ფაზიდან  $G$  ფაზაში

წონასწორობის მრუდს შეიძლება პქონდეს სხვადასხვა ფორმა, რაც დამოკიდებულია  $x$ -სა და  $y$ -ზე.

#### 4.5. მასაცვლის ძირითადი განტოლება

მასაცვლის პროცესის სიჩქარე ( $v_{\text{ა.ა}}$ ) არის ერთი ფაზიდან მეორეში ერთეულ დროში კონტაქტირების ერთეულ ფართობზე გადასული ნივთიერების რაოდენობა, ე.ი მასაცვლის პროცესის სიჩქარე

$$v_{\text{ა.ა}} = \frac{M}{F \cdot \tau} \text{ კგ/მ}^2 \cdot \text{წმ},$$

სადაც  $M$  არის განაწილებული ნივთიერების მასა, კგ;

$F$  - კონტაქტირების ფართობი, მ<sup>2</sup>;

$\tau$  - დრო წმ.

მეორე მხრივ ნებისმიერი პროცესის სიჩქარე პირდაპირპროპორციულია მისი მამოძრავებელი ძალის, კერძოდ მოცემულ შემთხვევაში მასაცვლის პროცესის სიჩქარე პირდაპირპროპორციულია კონცენტრაციათა სხვაობის

$$\Delta y = y - y_{\text{წ}},$$

სადაც  $y$  არის ფაქტობრივი ანუ მუშა კონცენტრაცია, რომელიც მცირდება, ე.ი. გადადის  $G$  ფაზიდან  $L$  ფაზაში;  $y_{\text{წ}}$  კი - წონასწორული კონცენტრაცია.

გარდა ამისა, ყოველი პროცესის სინქარე უკუპროპორციულია  $R$  წინააღობის. ამგვარად, შეიძლება დაიწეროს განტოლება

$$\frac{M}{F\tau} = \frac{\Delta y}{R}.$$

დიფუზიური პროცესისათვის  $R$  წინააღობის შებრუნებულ სიდიდეს უწოდებენ მასაგადაცემის კოეფიციენტს

$$\frac{1}{R} = K_y$$

ვინაიდან მასაცვლის დროს კონცენტრაციები ( $y, x, y_{\varphi}, x_{\varphi}$ ) ცვალებადია, ამიტომ იყენებენ საშუალო კონცენტრაციათა სხვაობას ( $\Delta y_{\text{საშ}}$ ), რის შედეგადაც ზემოთ მოყვანილი განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{aligned} \frac{M}{F\tau} &= K_y \Delta y_{\text{საშ}} \quad \text{ან} \\ M &= K_y F \Delta y_{\text{საშ}} \tau. \end{aligned} \quad (4.2)$$

მიღებული (4.2) განტოლება წარმოადგენს მასაცვლის ან მასაგადაცემის ძირითად განტოლებას.

ბოლო განტოლებიდან მასაგადაცემის კოეფიციენტი

$$K_y = \frac{M}{F \Delta y_{\text{საშ}} \tau}.$$

როდესაც მასაცვლის პროცესის მამოძრავებელი ძალა განსაზღვრულია კონცენტრაციათა სხვაობით ( $\Delta y_{\text{საშ}}$ ), ხოლო კონცენტრაციათა სხვაობის ერთეულად მიღებულია კგ/კგ, მაშინ მასაგადაცემის კოეფიციენტის განზომილება იქნება  $K_y = \text{კგ/მ}^2 \cdot \text{წმ}$ .

მეორე ფაზისათვის მასაგადაცემის ძირითადი განტოლება დაიწერება შემდეგნაირად

$$M = K_x F \Delta x_{\text{საშ}} \tau,$$

სადაც  $K_x$  არის მასაგადაცემის კოეფიციენტი მეორე ფაზისათვის. მას იგივე განზომილება აქვს, ხოლო რიცხობრივად განსხვავებულია.

ზოგჯერ, როდესაც საკონტაქტო ზედაპირის ფართობი ძნელი გასაანგარიშებელია, იყენებენ აპარატის მოცულობას ( $V$ ) და მასაგადაცემის ძირითადი განტოლება გამოისახება შემდეგნაირად:

$$M = K_{vy} V \Delta y_{\text{საშ}} \tau;$$

$$M = K_{vx} V \Delta x_{\text{საშ}} \tau.$$

## 4.6. აბსორბცია

აბსორბცია ეწოდება აირის ან ორთქლის ნარევის ერთი ან რამდენიმე კომპონენტის შერჩევითი შთანთქმის (გამოყოფის) პროცესს თხევადი შთანთქმელის მიერ. აღნიშნულ თხევად შთანთქმელს აბსორბენტი ეწოდება.

აბსორბციის პროცესი ემყარება სითხეში აირის ხსნადობის მოვლენას. ეს პროცესი არის შერჩევითი და შექცევადი, რის გამოც იგი შეიძლება გამოვიყენოთ არა მარტო სითხისა და აირის ხსნარების მისაღებად, არამედ სითხიდან აირისა და ორთქლის გამოსაყოფადაც. სხვა შემთხვევაში შერჩევითი აბსორბციის გზით აირების ან ორთქლის ნარევიდან შესაძლებელია **დესორბცია** – ანუ ამ კომპონენტების გამოყოფა სითხიდან. ამგვარად ხორციელდება სითხეების გაყოფის პროცესი. რეგენერირებული აბსორბენტი კვლავ ბრუნდება განმეორებითი აბსორბციისათვის.

არსებობს ორი სახის აბსორბცია – ფიზიკური და ქიმიური. ფიზიკური აბსორბციის შემთხვევაში აირის გახსნის პროცესს არ ახლავს ქიმიური რეაქცია. ქიმიური აბსორბციის დროს აბსორბირებული კომპონენტი ქიმიურ რეაქციაში შედის თხევად ფაზასთან.

აბსორბციის პროცესის წარმართვისათვის საჭირო მოწყობილობები საკმაოდ მარტივია, რის გამოც ისინი ფართოდ გამოიყენება ტექნიკაში.

### 4.6.1. აბსორბციის მატერიალური ბალანსი

4.5-ე სურათზე ნაჩვენებია სითხისა და აირის ნაკადების მოძრაობის სქემა აბსორბციულ აპარატში. შემოვიტანოთ შემდეგი აღნიშვნები:

$G$  - აირშემცველის ხარჯი, კგ/წმ;

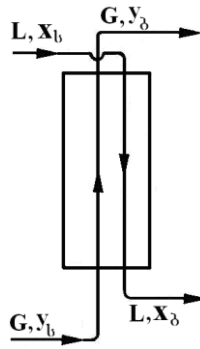
$L$  - შთანთქმელი სითხის ხარჯი, კგ/წმ;

$y_b$  - აირიდან შთანთქმული კომპონენტის შემცველობა აპარატში შემავალ აირშემცველში;

$y_a$  - აირიდან შთანთქმული კომპონენტის შემცველობა აპარატიდან გამავალ აირში;

$x_b$  - შთანთქმელი კომპონენტის შემცველობა თხევად ფაზაში აპარატის შესასვლელში;

$x_a$  - შთანთქმელი კომპონენტის შემცველობა თხევად ფაზაში აპარატის გამოსასვლელში;



სურ. 4.5. სითხისა და აირის ნაკადების მოძრაობის სქემა აბსორბციულ აპარატში

ნივთიერების შენახვის კანონის საფუძველზე შეიძლება შთანთქმული კომპონენტისათვის შევადგინოთ მატერიალური ბალანსის განტოლება

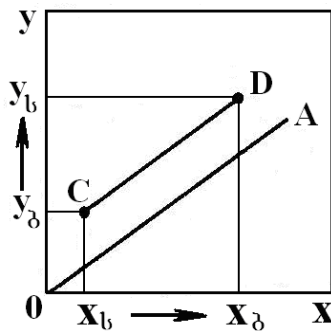
$$L(x_b - x_b) = G(y_b - y_b), \quad (4.3)$$

აქედან შთანთქმული სითხის კუთრი ხარჯისთვის გვექნება

$$l = \frac{L}{G} = \frac{y_b - y_b}{x_b - x_b}.$$

მატერიალური ბალანსის (4.3) განტოლება გვიჩვენებს დამოკიდებულებას შთანთქმადი კომპონენტის ორივე ფაზაში კონცენტრაციებსა და აირშემცველის რაოდენობას შორის.

$x - y$  კოორდინატებში აგებული (4.3) განტოლების შესაბამისია წრფის მონაკვეთი  $CD$  (სურ. 4.6).



სურ. 4.6. აბსორბციის სამუშაო მონაკვეთის აგება

ამ მონაკვეთის ყოველი წერტილი გვიჩვენებს თხევად და აირად ფაზებში შთანთქმადი კომპონენტის შემცველობის დამოკიდებულებას აპარატის ამა თუ იმ კვეთში. ამ მონაკვეთს ეწოდება აბსორბციის პროცესის მუშა მონაკვეთი.

აბსორბციის შემთხვევაში  $OA$  წონასწორობის მონაკვეთი გაივლის მუშა მონაკვეთზე ქვევით. მუშა და წონასწორობის მონაკვეთებს შორის დაშორება ვერტიკალზე განსაზღვრავს აბსორბციის პროცესის მამოძრავებელ ძალას და გვიჩვენებს როგორ იცვლება იგი აპარატის სიმაღლის მიხედვით.

თუ მუშა მონაკვეთი გაივლიდა წონასწორობის მონაკვეთის ქვევით, მაშინ ადგილი ექნებოდა დესორბციას, ანუ განსახილველი კომპონენტის გამოყოფას სითხიდან აირად ფაზაში. ამ შემთხვევაში (4.3) განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს

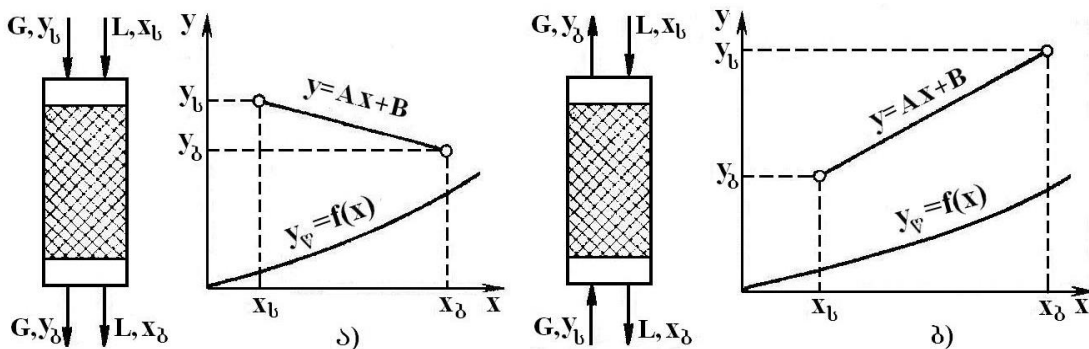
$$l = \frac{G}{L} = \frac{x_b - x_\delta}{y_b - y_\delta}$$

დესორბციის დროს  $G$  ნიშნავს დესორბენტის რაოდენობას, ხოლო  $l = \frac{G}{L}$  - წარმოადგენს დესორბენტის კუთრ ხარჯს.

#### 4.6.2. აბსორბციის პრინციპული სქემები

ტექნიკაში გამოიყენება აბსორბციის შემდეგი ძირითადი სქემები: პირდაპირი დინების, წინაღდენიანი, ერთსაფეხურიანი რეცირკულაციით და მრავალსაფეხურიანი რეცირკულაციით.

აბსორბციის პროცესში პირდაპირი დინების სქემით ნივთიერებათა ურთიერთქმედების (სურ. 4.7, ა) შემთხვევაში აირისა და აბსორბენტის ნაკადები მოძრაობენ ერთმანეთის პარალელურად.



სურ. 4.7. აბსორბციის სქემები:  
ა-პირდაპირი დინების, ბ-წინაღდენიანი

ასეთი დინების პროცესში, განაწილებული ნივთიერების უფრო მაღალი კონცენტრაციის აირი კონტაქტშია ამ ნივთიერების დაბალი კონცენტრაციის სითხესთან, ხოლო უფრო დაბალი კონცენტრაციის აირი აპარატის გამოსასვლელში კონტაქტშია სითხესთან, რომელსაც აქვს განაწილებული ნივთიერების უკვე ამაღლებული კონცენტრაცია.

წინაღდენიანი სქემის (სურ. 4.7,ბ) შემთხვევაში აპარატის ერთ ბოლოში ერთმანეთთან კონტაქტშია განაწილებული ნივთიერების მაღალი კონცენტრაციების აირი და სითხე, ხოლო მეორე ბოლოში - დაბალი კონცენტრაციის.

#### 4.7. აღსორბცია

აღსორბცია არის აირების ან სითხის შთანთქმა მყარი სხეულებით, რომლებსაც **აღსორბენტებს** უწოდებენ, ხოლო შთანთქმულ ნივთიერებას – **აღსორბტივს**. იმისათვის, რომ ეს პროცესი იყოს ეფექტური მყარი სხეულის ზედაპირი უნდა იყოს დიდი. ამიტომ აღსორბციისათვის იყენებენ ფოროვან სხეულებს, რომლებსაც გააჩნიათ დიდი საკონტაქტო ზედაპირის ფართობი.

აღსორბციის პროცესის დამახასიათებელი თავისებურებებია შერჩევითობა და შექცევადობა. პროცესის შექცევადობის გამო შესაძლებელია აირების ნარევიდან ან ხსნარებიდან ერთი ან რამდენიმე კომპონენტის შთანთქმა, შემდეგ კი, განსაზღვრულ პირობებში – მათი გამოყოფა აღსორბენტიდან. აღსორბციის შექცევად პროცესს **დესორბცია** ეწოდება.

კვების მრეწველობაში აღსორბცია გამოიყენება წყალ-სპირტის ნარევის გასაწმენდად; სპირტის დასაჭერად წარმოების პროცესში; შაქრის წარმოებაში დიფუზიური წვენის და შაქრის სიროფის გასაწმენდად და მრავალ სხვა პროცესში.

განასხვავებენ ფიზიკურ და ქიმიურ აღსორბციას. ფიზიკურ აღსორბციას ადგილი აქვს აღსორბენტის და აღსორბტივის მოლეკულების ურთიერთმიზიდვის დროს. ფიზიკური აღსორბციის დროს არ ხდება ქიმიური ურთიერთქმედება აღსორბირებულ აირსა და აღსორბენტს შორის.

ქიმიური აღსორბცია ხასიათდება შთანთქმული ნივთიერებისა და აღსორბენტის მოლეკულებს შორის კავშირის წარმოქმნით, რაც ქიმიური რეაქციის შედეგია.

**აღსორბენტების სახეები.** კვების საწარმოებში ფართოდ იყენებენ შემდეგ აღსორბენტებს: აქტიურ ნახშირს, ძვლის ნახშირს, სილიკოგელებს, ციოლიტებს, თიხას და სხვა ბუნებრივ აღსორბენტებს. აღსორბენტი, რომელიც უშუალო კონტაქტშია პროდუქტებთან, ბიოლოგიურად უვნებელი ანუ არატოქსიკური და მტკიცე, უნდა იყოს, რათა არ დაანაგვიანოს პროდუქტი.

აღსორბენტებს ახასიათებს დიდი კუთრი ზედაპირი ანუ ნივთიერების ერთეული მასის ზედაპირი. აღსორბენტებს აქვთ განსხვავებული დიამეტრის ფორები, რომლებიც შეიძლება დაიყოს მაკროფორებად ( $2 \cdot 10^{-4}$  მმ-ზე მეტი), გარდამავალ ფორებად ( $6 \cdot 10^{-6}$ ...  $2 \cdot 10^{-4}$ ) და მიკროფორებად  $2 \cdot 10^{-6}$ -დან  $6 \cdot 10^{-6}$  მმ-მდე. ფორების ზომებზე დიდად არის დამოკიდებული აღსორბციის ხასიათი.

აღსორბენტი ხასიათდება შთანთქმის აქტიურობით, რომელიც განისაზღვრება ერთეული მასის ან მოცულობის აღსორბენტის მიერ შთანთქმული ნივთიერების რაოდენობით. აღსორბენტის მაქსიმალურ შთანთქმულ უნარიანობას, განსაზღვრული ტემპერატურის, წნევისა და კონცენტრაციის დროს, ეწოდება **წონასწორული აქტიურობა**. მრეწველობაში იყენებენ აღსორბენტებს 2...7 მმ დიამეტრის გრანულების ან 50...200 მკმ ზომის ფხვნილისებური ნაწილაკების სახით.

აღსორბენტი ხასიათდება სტატიკური და დინამიკური აქტიურობით. მუშაობის გარკვეული პერიოდის შემდეგ აღსორბენტი ვეღარ შთანთქავს სრულად კომპონენტს და შეინიშნება ამ კომპონენტის “გაღწევა“ აღსორბენტის ფენის გავლით. ამ მომენტიდან გამავალ ორთქლ-აირის ნარევი შთანთქავი კომპონენტის კონცენტრაცია იზრდება წონასწორობის აღდგენამდე.

აღსორბენტის მასის (ან მოცულობის) ერთეულის მიერ შთანთქმული ნივთიერების რაოდენობა აღსორბციის დაწყებიდან “გაღწევის“ დაწყებამდე, განსაზღვრავს აღსორბენტის დინამიკურ აქტიურობას. აღსორბენტის მასის (მოცულობის) ერთეულის მიერ შთანთქმული ნივთიერების რაოდენობა აღსორბციის დაწყებიდან წონასწორობის აღდგენამდე ახასიათებს აღსორბენტის სტატიკურ აქტიურობას (წონასწორულ აქტიურობას).

სტატიკური და დინამიკური აქტიურობები დამოკიდებულია ნარევის ტემპერატურასა და აღსორბენტის მიერ შთანთქმული კომპონენტის კონცენტრაციაზე.

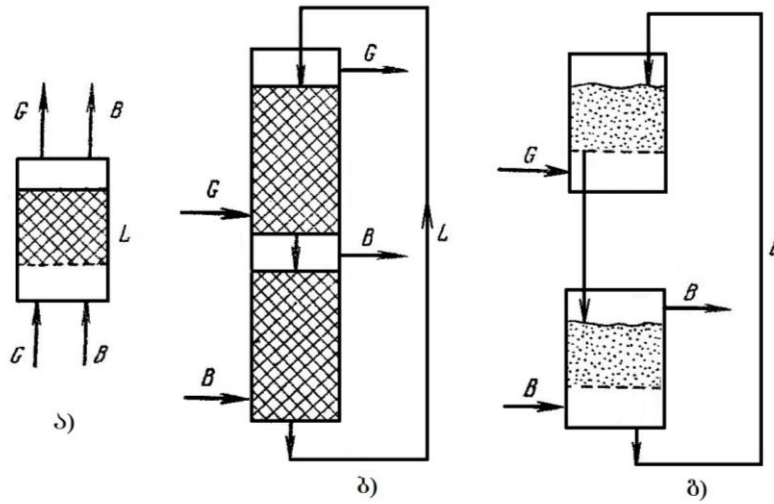
#### 4.7.1. აღსორბციის პროცესის პრინციპული სქემები

აღსორბციის პროცესის სხვადასხვა პრინციპული სქემა წარმოდგენილია 4.8-ე სურათზე. მარცვლოვანი აღსორბენტების გამოყენების შემთხვევაში მიმართავენ სქემებს უძრავი (ა) და მოძრავი (ბ) აღსორბენტით.

პირველ შემთხვევაში პროცესი მიმდინარეობს პერიოდულად (სურ. 4.8,ა). თავდაპირველად აღსორბენტის გავლით გაატარებენ ორთქლ-აირის  $G$  ნარევს და გაამდიდრებენ მას შთანთქავი ნივთიერებით. ამის შემდეგ გაატარებენ შთანთქმულ  $B$  ნივთიერებას ან აცხელებენ აღსორბენტს, რითიც მიიღწევა დესორბცია (აღსორბენტის რეგენერაცია).

მეორე შემთხვევაში  $L$  აღსორბენტი ცირკულირებს ჩაკეტილ სისტემაში. მისი გამდიდრება ხდება აპარატის ზედა (აღსორბციულ) ზონაში (სურ. 4.8,ბ).

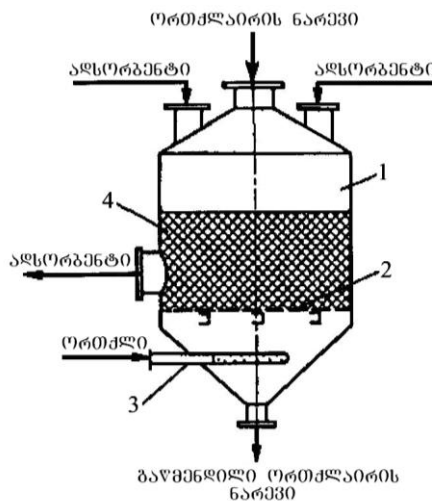
ფხვნილის სახის ადსორბენტების გამოყენების შემთხვევაში მიმართავენ სქემას ცირკულირებული ფსევდოგათხევადებული ადსორბენტით (სურ. 4.8.გ).



სურ. 4.8. ადსორბციული პროცესების პრინციული სქემები

#### 4.7.2. ადსორბერები და ადსორბციული დანადგარების სქემები

ადსორბერი პროცესის ორგანიზაციის მიხედვით ორგვარია: პერიოდული და უწყვეტი ქმედების. პერიოდული ქმედების ადსორბერიც ორგვარი არსებობს: ადსორბენტის უძრავი და ფსევდოგათხევადებული ფენით. ყველაზე უფრო გავრცელებული კონსტრუქციაა ვერტიკალური ცილინდრული ადსორბერი (სურ. 4.9).



სურ. 4.9. ადსორბენტის უძრავ ფენიანი ადსორბერი

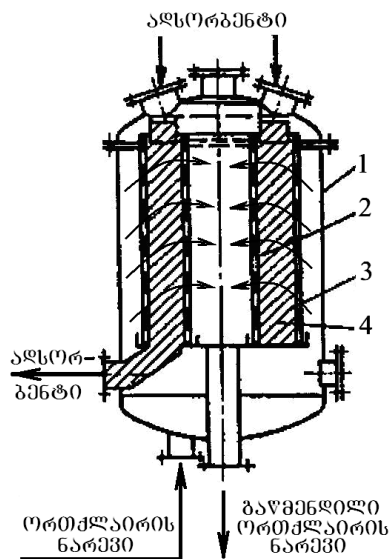
გრანულირებული ადსორბენტის ფენა (4) აპარატში იტვირთება კორპუსის (1) სახურავზე გაკეთებული ლიუკებიდან და თავსდება ცხაურაზე (2). ადსორბენტის აპარატიდან გადმოტვირთვა ხდება ქვედა გვერდით ზედაპირზე გაკეთებული

ლიუკიდან. საწყისი ორთქლ-აირის ნარევი აპარატში შედის სახურავის ცენტრალური მილყელით, ხოლო მწვავე ორთქლის მიწოდება ხდება აპარატის ძირში მოთავსებული საქშენიდან (3).

წარმოდგენილ ადსორბერში პროცესი მიმდინარეობს ოთხ სტადიად: ადსორბცია, დესორბცია, შრობა, ადსორბენტის გაცივება. ადსორბირებული ნივთიერების დესორბცია ადსორბენტიდან წარმოადგენს ტექნოლოგიური პროცესის აუცილებელ სტადიას, რომელიც წყვეტს ორ ამოცანას: ნივთიერების გამოყოფას და ადსორბენტის რეგენერაციას.

დესორბციის ძირითადი მეთოდია ადსორბენტიდან შთანთქმული კომპონენტის გამოდევნა ისეთი ნივთიერებებით, რომელთაც აქვთ უკეთესი ადსორბციული თვისებები (მაგალითად, წყლის ნაჯერი ორთქლი). დესორბციის სიჩქარის გასაზრდელად პროცესს ხშირად ატარებენ მომატებულ ტემპერატურაზე.

უძრავი ადსორბენტის რგოლურფენიანი ვერტიკალური ცილინდრული ადსორბერის (სურ. 4.10) დანიშნულებაა ორთქლ-აირის ნარევიდან კომპონენტების შთანთქმა.



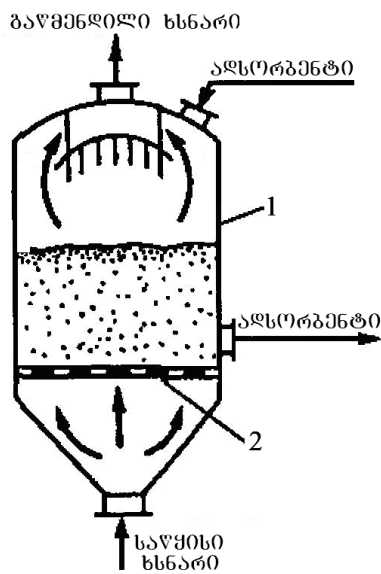
სურ. 4.10. ადსორბენტის რგოლურ ფენიანი ადსორბერი

ადსორბერი წარმოადგენს ვერტიკალურ კორპუსს (1), რომლის შიგნით (2) და (3) პერფორირებულ ბადეებს შორის მოთავსებულია ადსორბენტის რგოლური ფენა (4). ორთქლ-აირის ნარევი მიეწოდება ადსორბერის ქვედა ნაწილიდან და ნაწილდება აპარატის რგოლურ კვეთში. ადსორბენტის ფენის გავლის შემდეგ გაწმენდილი ორთქლ-აირის ნარევი გამოდის ცენტრალური მილიდან. დესორბციის სტადიაზე წყლის ორთქლი მიეწოდება ცენტრალური მილიდან. დესორბირებული კომპონენტების და წყლის ნარევი გამოდის კორპუსის ქვედა გვერდით ზედაპირზე

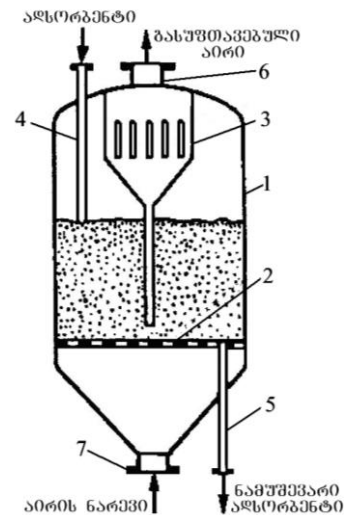
გაკეთებული მილყელიდან. აღსორბენტის გასაშრობად აპარატში აწვდიან ცხელ ჰაერს, ხოლო გასაცივებლად – ცივს. აღსორბენტის გაცივების შემდეგ მუშაობის ციკლი მეორდება. აღსორბენტის ჩატვირთვა ხორციელდება აღსორბერის სახურავზე არსებული ლიუკებიდან, ხოლო გადმოტვირთვა – ქვედა ნაწილში გაკეთებული სადინარიდან.

**ფსევდოგათხევადებულ ფენიანი აღსორბერი** (სურ. 4.11) შევსებულია წვრილმარცვლოვანი აღსორბენტით. საწყისი ნარევი მიეწოდება კორპუსში (1) ჩადგმული მანაწილებელი ბადის (2) ქვედა არიდან ისეთი სიჩქარით, რომელიც აღემატება აღსორბენტის ნაწილაკების ფსევდოგათხევადებას. ამასთან, ფენა ფართოვდება და გადადის მოძრავ მდგომარეობაში. აღსორბერის ჩატარება ფსევდოგათხევადებულ ფენაში მნიშვნელოვნად უწყობს ხელს მასაცვლის პროცესის ინტენსიფიკაციას და ამცირებს მის ხანგრძლივობას.

4.12-ე სურათზე წარმოდგენილია ფსევდოგათხევადებულ ფენიანი **ერთსაფენურიანი აღსორბერი**. იგი შედგება ვერტიკალური ცილინდრული კორპუსისაგან (1), რომლის შიგნით მოთავსებულია აირმანაწილებელი ბადე (2) და ციკლონის ტიპის მტვერმჭერი მოწყობილობა (3). აღსორბენტი აპარატში იტვირთება ზემოდან მილით (4) და გამოდის ქვემოდან მილით (5).



სურ. 4.11. ფსევდოგათხევადებულ ფენიანი აღსორბერი



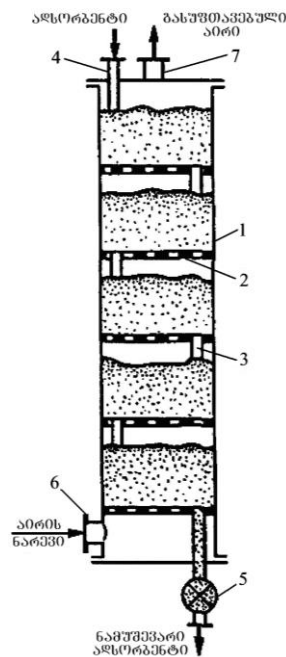
სურ. 4.12. ერთსაფენურიანი აღსორბერი

საწყისი ორთქლაირის ნარევი აღსორბერში შედის სიჩქარით, რომელიც აღემატება აღსორბენტის ნაწილაკების ფსევდოგათხევადების დაწყებას. ნარევი აპარატში შედის ქვედა მილყელიდან (7) აირმანაწილებელი ბადის (2) ქვედა არიდან, ხოლო გამოდის ზედა მილყელიდან (6) მტვერმჭერი მოწყობილობის (3) გავლით.

მრავალსაფეხურიანი აღსორბცია ფსევდოგათხევადებულ შრეში მიმდინარეობს ცილინდრულ აპარატში (1) (სურ. 4.13), რომელსაც გაკეთებული აქვს თაროებად დაწყობილი აირმანაწილებელი ბადეები (2).

ბადეები აღჭურვილია აღსორბენტის ჩამოსაშვები მილებით (3), რომლებიც განლაგებულია ერთმანეთის მიმართ ჭადრაკისებურად. აღსორბენტი მოძრაობს ზემოდან ქვემოთ, ხოლო აირი – ქვემოდან ზემოთ.

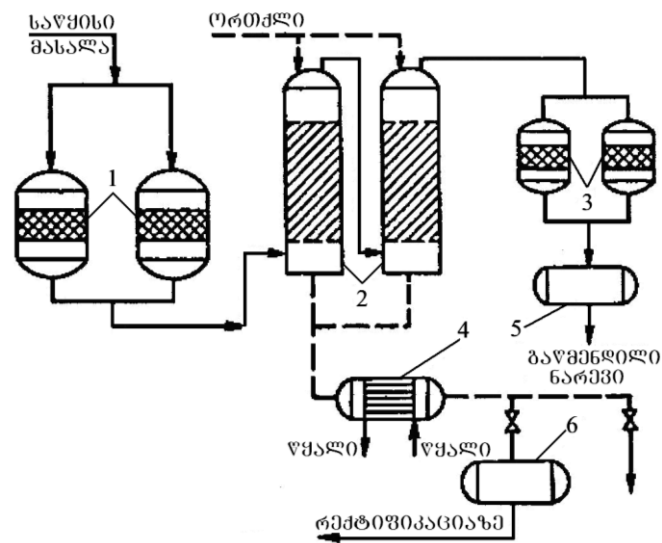
აქტივირებული აღსორბენტი შემოდის აპარატში მილყელით (4) და ერთი თაროდან მეორეზე ჩამოდის ქვემოთ შეტივტივებულ მდგომარეობაში. მილების (3) ჭადრაკისებური განლაგება უზრუნველყოფს თაროებზე აღსორბენტის სასურველი სისქის ფენის მიღებას. გარდა ამისა, აღსორბენტი აპარატში მოძრაობს ზიგზაგისებურად, რითაც იზრდება მისი გადაადგილების მანძილი და აპარატში ყოფნის ხანგრძლივობა. ნამუშევარი აღსორბენტი გამოდის სექტორებიანი ჩამკეტის (5) გავლით. გასაწმენდი აირის ნარევი აპარატში შედის მილტუჩით (6) და გასუფთავებული გამოდის მილტუჩიდან (7).



სურ. 4.13. მრავალსაფეხურიანი აღსორბერი

წყალ-სპირტის ნარევის გასაწმენდი განადგარი (სურ. 4.14). საწყისი მასალა იფილტრება კერამიკულ ფილტრებში (1) და შემდეგ გადადის აღსორბერებში (2). აქტივირებული ნახშირის მასა ერთ ცილინდრულ აღსორბერში შეადგენს 250-დან 300 კგ-მდე. ნახშირი იყრება აღსორბერის მანაწილებელ ბადეზე. წყალ-სპირტის ნარევის აწვდიან აღსორბერის მანაწილებელი ბადის ქვედა არიდან. ნამუშევარი აქტივირებული ნახშირის რეგენერაციას აწარმოებენ აღსორბერში 115°C

ტემპერატურის ცხელი წყლის ორთქლის გატარებით ნახშირის ფენაში ზევიდან ქვევით. ორი პერიოდულად მომუშავე აღსორბერი უზრუნველყოფს დანადგარის უწყვეტ მუშაობას.



სურ. 4.14. წყალ-სპირტის ნარევის აქტივირებული ნახშირის უძრავ ფენაში გავლით გასაწმენდი განადგარი: 1,3- ფილტრები; 2- აღსორბერები; 4- მაგივარ-კონდენსატორი; 5,6- ტევადობები

#### 4.8. გამოხდა და რექტიფიკაცია

გამოხდა და რექტიფიკაცია ყველაზე უფრო გავრცელებული მეთოდებია ორი ან მეტი აქროლადი კომპონენტისაგან შედგენილი თხევადი ერთგვაროვანი ნარევის გასაყოფად. გამოხდას იყენებენ ნარევების უხეშად გაყოფისას, ხოლო თუ სიზუსტეა საჭირო, მაშინ – რექტიფიკაციას.

გამოხდის და რექტიფიკაციის პროცესები დაფუძნებულია ერთი და იმავე ტემპერატურის პირობებში ნარევის კომპონენტების განსხვავებულ აქროლადობაზე. ნარევის კომპონენტს, რომელსაც აქვს მაღალი აქროლადობა ეწოდება ადვილად აქროლადი, ხოლო კომპონენტს, რომელსაც აქვს სუსტი აქროლადობა ეწოდება ძნელად აქროლადი. მათ უწოდებენ აგრეთვე დაბალი და მაღალი დუღილის კომპონენტებს.

გამოხდის ან რექტიფიკაციის შედეგად საწყისი ნარევი იყოფა ადვილად აქროლადი კომპონენტით გამდიდრებულ დისტილატად და ძნელად აქროლადი კომპონენტით გამდიდრებულ კუბის ნარჩენად. დისტილატს იღებენ ორთქლის კონდენსაციის შედეგად კონდენსატორ-დეფლუგმატორში, ხოლო კუბის ნარჩენებს – დანადგარის კუბში.

მარტივ შემთხვევაში საწყისი ნარევი შედგება ორი კომპონენტისაგან და უწოდებენ ბინარულს. თხევადი ნარევები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან თავიანთი ფიზიკურ-ქიმიური თვისებებით. კომპონენტების ურთიერთხსნადობიდან გამომდინარე ბინარული ნარევები შეიძლება გავყოთ კომპონენტების შეუზღუდავი ხსნადობის, ურთიერთარახსნადი კომპონენტების და ერთმანეთში ნაწილობრივად ხსნადის კომპონენტების ნარევებად.

შეუზღუდავი ხსნადობის კომპონენტების ნარევი თავისი თვისებების მიხედვით შეიძლება იყოს იდეალური და რეალური.

**ნარევის იდეალურს** უწოდებენ, თუ მისი კომპონენტების შერევისას სითბო არც გამოიყოფა და არც შთაინთქმება. არ იცვლება ნარევის მოცულობაც.

**რეალური თხევადი ნარევი** ხასიათდება კომპონენტების შერევის სითბოსა და მოცულობის ცვლილებით. ამ ნარევი ითვალისწინებენ ორთქლის ფაზის მოლეკულების ურთიერთმოქმედებას, მათ სკუთარ მოცულობებს და ა.შ.

**ურთიერთუხსნადი ან შეზღუდული ხსნადობის სითხეები.**  $A$  და  $B$  კომპონენტების სრული უხსნადობის შემთხვევაში, მათი მოლეკულების ურთიერთმოქმედების ძალები ნულის ტოლია და ყოველი მათგანი დამოუკიდებელია მეორისაგან. ასეთი ნარევი დულს წნევაზე

$$P = P_A + P_B.$$

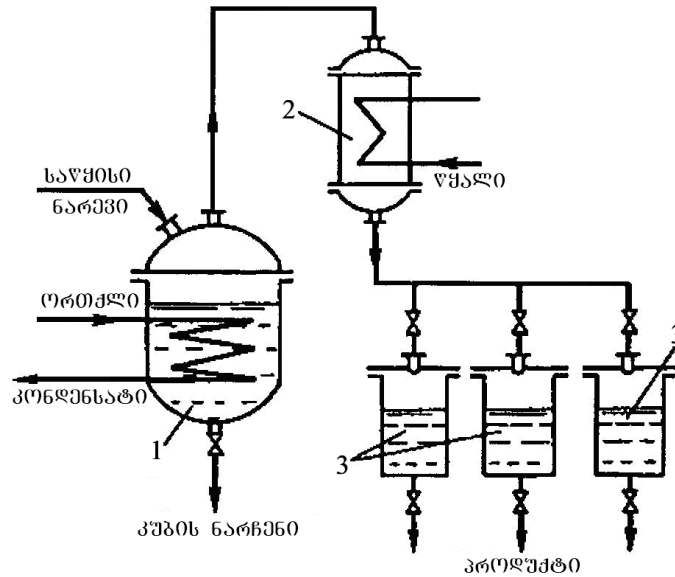
კომპონენტების უხსნადობის პირობებში ნებისმიერი კომპონენტის პარციალური წნევა ტოლია მისი ნაჯერი ორთქლის წნევისა იმავე ტემპერატურაზე.

#### 4.8.1. მარტივი გამოსხდა

გამოსხდა არის თხევადი ნარევის ერთჯერადი, ნაწილობრივი აორთქლების და წარმოქმნილი ორთქლის კონდენსაციის პროცესი. მარტივი გამოსხდა შეიძლება ტარდებოდეს ფრაქციების გამოყოფით, დეფლექაციით, წყლის ორთქლის ან ვაკუუმის გამოყენებით.

**ფრაქციული გამოსხდის** არსი არის გამოსახდელ კუბში (1) (სურ. 4.15) არსებული სითხის თანდათანობით აორთქლება. წარმოქმნილი ორთქლი გაედინება მაცივარში (2) და იქ კონდენსირდება, დისტილატი კი გროვდება შემკრებში (3). გამოსხდის ნარჩენები კუბიდან გამოაქვთ პროცესის დამთავრების შემდეგ. კუბის გაცხელება ხორციელდება ნაჯერი წყლის ორთქლით ან კვამლური აირებით.

მარტივი გამოხდის მატერიალური ბალანსის შესადგენად დაეუშვათ, რომ დროის გარკვეულ  $\tau$  მომენტში გამოსახდელ კუბში მოთავსებულია  $L$  კგ ნარევი დაბალი დუღილის ტემპერატურის კომპონენტის კონცენტრაციით  $x$ .



სურ. 4.15. მარტივი გამოხდის დანადგარი:  
1-კუბი; 2-კონდენსატორი; 3-დისტილატის შემკრებები

დაეუშვათ, რომ დროის უსასრულოდ მცირე  $d\tau$  მონაკვეთში ორთქლდება  $dL$  კგ. მაშინ სითხის რაოდენობა და მისი შედგენილობა იცვლება და შესაბამისად იქნება  $(L-dL)$  და  $(x-dx)$ . დროის ამ მონაკვეთში წარმოქმნილი ორთქლის რაოდენობა ტოლია სითხის რაოდენობის შემცირების ( $dL$ ), ხოლო მისი შედგენილობა  $y$  თანაწონადია  $x$ -ის. აქროლადი კომპონენტის შემცველობა სითხეში განსახილველი დროის დასაწყისში არის  $Lx$ , ხოლო ბოლოში –  $(L-dL)(x-dx)$ . ამავე დროში აორთქლებული აქროლადი ნივთიერების რაოდენობა ტოლია  $ydL$ . ამრიგად, მატერიალური ბალანსის განტოლება აქროლადი კომპონენტის მიმართ მოცემული დროის ინტერვალში შეიძლება დაიწეროს შემდეგნაირად:

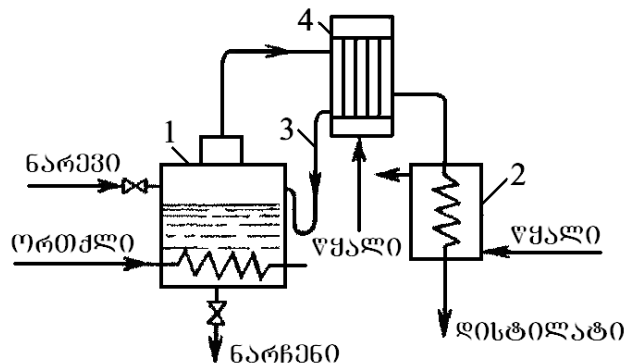
$$Lx = (L-dL)(x-dx) + ydL.$$

თუ გავხსნით ფხვილებს და უგულებელვყოფთ უსასრულოდ მცირე  $dLdx$  სიდიდეს მივიღებთ

$$Ldx = (y-x)dL \text{ ანუ } dL/L = dx/(y-x).$$

კომპონენტების გაყოფის ხარისხის ამაღლება შესაძლებელია მარტივი გამოხდის დროს დეფლეგმაციის გამოყენებით (სურ. 4.16). ამ შემთხვევაში კუბიდან 1 გამოშავალი ორთქლი შედის დეფლეგმატორში (4), სადაც იგი

კონდენსირდება ნაწილობრივ. ნაწილობრივი კონდენსაციის დროს უპირატესად კონდენსირდება მაღალი დუღილის ტემპერატურის მქონე კომპონენტი, ხოლო ორთქლი მდიდრდება დაბალი დუღილის ტემპერატურის მქონე კომპონენტით. დეფლექტატორში მიღებული კონდენსატი (ფლეგმა) ბრუნდება გამოსახდელ აპარატში  $U$ -ს მაგვარი მილით (3), რომლითაც წარმოიქმნება ჰიდრაულიკური საკეტი. ეს უკანასკნელი ეწინააღმდეგება კუბიდან ორთქლის გამოსვლას დეფლექტატორის გვერდის ავლით. დეფლექტატორში არაკონდენსირებული ორთქლი გადადის თხევად ფაზაში კონდენსატორში (2), საიდანაც გამოიყოფა დისტილატის სახით.



სურ. 4.16. დეფლექტაციით მარტივი გამოხდის სქემა

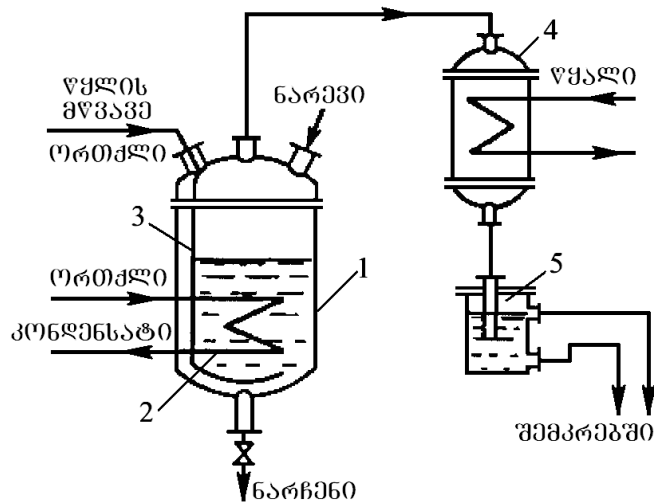
**წყლის ორთქლით გამოხდას** მიმართავენ წყალში უხსნადი კომპონენტების საწყისი ნარევის  $100^{\circ}\text{C}$ -ზე მეტი დუღილის ტემპერატურის შემცირების მიზნით.

ორთქლის საერთო წნევა ხსნარზე ტოლია სუფთა კომპონენტების წნევათა ჯამისა იმავე ტემპერატურაზე ( $P = P_A + P_B$ ). შესაბამისად, ატმოსფერული წნევის დროს წყლის ორთქლის პარციალური წნევა ხსნარზე

$$P_{\text{წყ}} = P - P_A < P$$

წყლის ორთქლით გამოხდის დანადგარის სქემა ნაჩვენებია 4.17-ე სურათზე. საწყისი ნარევი იტვირთება გამოსახდელ კუბში (1), რომელშიც მოთავსებულია კლაკნილა გამცხელებელი (2). კუბის შიგნით, საწყის მასაში, მილით (3) შედის წყლის მწვავე ორთქლი, რომელიც ბარბოტირებს მასში და იწვევს დუღილს. დუღილის დროს წარმოქმნილი ორთქლი გადადის კონდენსატორში (4) შემდეგ კი სეპარატორში (5), საიდანაც გამოიყოფა წყალი და წყალში უხსნადი სუსტი აქროლადობის კომპონენტი, რომელიც გროვდება შემკრებში.

აპარატში შეყვანილი წყლის ორთქლისა და გამოყოფილი კომპონენტის რაოდენობათა თანაფარდობა შეიძლება განისაზღვროს დალტონის კანონის თანახმად



სურ. 4.17. წყლის ორთქლით გამოხდის დანადგარის სქემა

$$y_d = \frac{P_d}{P}, \quad y_{\text{წყ}} = \frac{P_{\text{წყ}}}{P},$$

სადაც  $P_d$  და  $P_{\text{წყ}}$  - შესაბამისად გამოყოფილი კომპონენტის და წყლის ორთქლის წნევებია;

$y_d$  და  $y_{\text{წყ}}$  - კომპონენტისა და წყლის კონცენტრაციები მოლური წილებით.

შესაბამისად მივიღებთ

$$\frac{y_d}{y_{\text{წყ}}} = \frac{P_d}{P_{\text{წყ}}} \quad \text{ანუ} \quad \frac{G_d}{G_{\text{წყ}}} = \frac{P_d M_d}{P_{\text{წყ}} M_{\text{წყ}}},$$

სადაც  $G_d$  - გამოყოფილი კომპონენტის მასაა;

$M_d$  და  $M_{\text{წყ}}$  - კომპონენტისა და წყლის მოლეკულური მასები;

$G_{\text{წყ}}$  - წყლის ორთქლის მასა.

#### 4.8.2. რექტიფიკაცია

რექტიფიკაცია არის ერთგვაროვანი სითხეების გაყოფა შემადგენელ კომპონენტებად სითხის მრავალჯერადი აორთქლებით და ორთქლის კონდენსაციით თხევადი და აირადი ფაზების წინააღმდეგობით ურთიერთქმედების შედეგად. რექტიფიკაციის დროს ნარევიდან ორი ან რამდენიმე განსხვავებული დუღილის ტემპერატურის მქონე ნივთიერება გამოიყოფა რამდენადმე სუფთა სახით. ეს მიიღწევა ნარევის გაცხელებით და აორთქლებით შემდგომი თბო-მასაცვლით თხევად და ორთქლის ფაზებს შორის. ამის შედეგად ადვილად

აქროლადი კომპონენტის ნაწილი გადადის თხევადი ფაზიდან ორთქლში, ხოლო ნაკლებად აქროლადი კომპონენტის ნაწილი – ორთქლის ფაზიდან თხევადში.

გამოხდის პროცესისაგან განსხვავებით რექტიფიკაციით ნარევის გაყოფა ხდება უფრო სრულად და მიიღება მაღალი სისუფთავის დისტილატი.

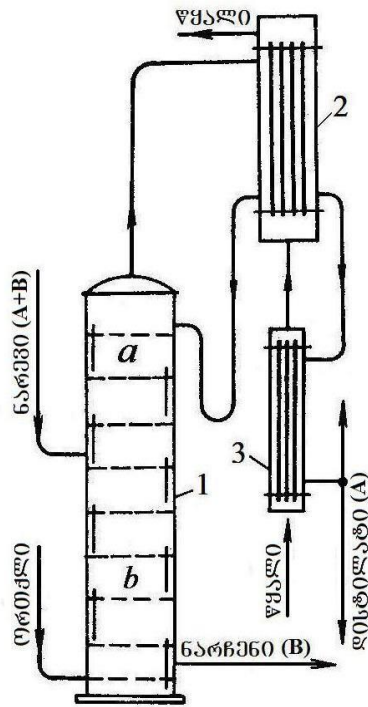
რექტიფიკაციის პროცესს ახორციელებენ სარექტიფიკაციო დანადგარზე, რომელიც შეიცავს სარექტიფიკაციო სვეტს, დეფლემატორს, მაცივარ-კონდენსატორს, საწყისი მასის გამცხელებელს, დისტილატისა და ნარჩენის შემკრებს. დეფლემატორი, მაცივარ-კონდენსატორი და გამცხელებელი ჩვეულებრივი თბომცვლელი აპარატებია. დანადგარის ძირითადი აპარატია სარექტიფიკაციო სვეტი, რომელშიც ნარევის ორთქლი ადის ქვევიდან ზევით. შემხვედრი მიმართულებით ჩამოედინება სითხე, რომელიც აპარატს მიეწოდება მის ზედა ნაწილში ფლეგმის სახით. კლასიკური სვეტი წარმოადგენს ვერტიკალურ ცილინდრს, რომლის შიგნით განლაგებულია საკონტაქტო მოწყობილობები სხვადასხვა კონსტრუქციის თევშების სახით.

სარექტიფიკაციო აპარატი არსებობს ორი სახის – პერიოდული და უწყვეტი ქმედების. უწყვეტი ქმედების აპარატის სქემა წარმოდგენილია 4.18-ე სურათზე.

აპარატი შედგება სვეტისაგან (1), დეფლემატორისაგან (2) და მაცივრისაგან (3). სვეტი იყოფა ორ ნაწილად.  $a$  ნაწილი იმყოფება ნარევის აპარატში შესასვლელზე მაღლა. ამ ნაწილს ეწოდება შემავრების კოლონა.  $b$  კოლონაში ორთქლსა და თხევად ფაზებს შორის მყარდება მჭიდრო კონტაქტი.

დეფლემატორის ძირითადი დანიშნულებაა სვეტის შემამავრებელი ნაწილის კვება ფლეგმით, რომელიც შეიცავს გასაყოფ კომპონენტებს. მაცივარში (3) კონდენსირდება დისტილატის ორთქლი, რომელიც შედის დეფლემატორიდან.

აპარატში შედის ბინარული ნარევი ( $A+B$ ), რომელიც შეიცავს  $A$  და  $B$  კომპონენტებს. მათგან  $A$ -ს აქვს დაბალი დუდილის ტემპერატურა. ამ კომპონენტების გაცხელებული ნარევი შედის კოლონაში და ჩაედინება ქვევით თევშიდან თევშზე გადასხმით. შემხვედრი მიმართულებით მოძრაობს ორთქლი, რომლის მისაღებად კოლონის ქვედა ნაწილში შედის გამცხელებელი წყლის ორთქლი. ფაზების კონტაქტის შედეგად დაბალი დუდილის ტემპერატურის მქონე კომპონენტი თხევადიდან გადადის ორთქლის ფაზაში. სვეტიდან გამოშვებული ნარჩენი ძირითადად შეიცავს მაღალი დუდილის ტემპერატურის მქონე კომპონენტს, ხოლო ორთქლი, რომელიც შედის შემავრების სვეტში თითქმის მთლიანად შეიცავს დაბალი დუდილის ტემპერატურის მქონე კომპონენტს.



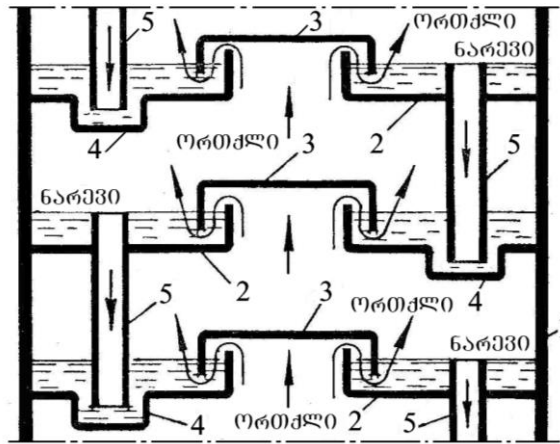
სურ. 4.18. სარექტიფიკაციო აპარატი

სვეტის შემამაგრებელი ნაწილის დანიშნულებაა A კომპონენტის კონცენტრაციის ამაღლება. ამისათვის დეფლექტორიდან შემამაგრებელი სვეტის ზედა თეფშზე ჩაედინება ფლექმა, რომელიც შეიცავს A კომპონენტის მაღალ პროცენტს. ჩადინების პროცესში ფლექმა გადასცემს თავის დაბალი დუდილის ტემპერატურის მქონე კომპონენტს ორთქლს, ხოლო თვითონ ორთქლიდან მიიღებს მაღალი დუდილის ტემპერატურის მქონე კომპონენტს. ასეთი მასათაცვლის შედეგად, სვეტიდან დეფლექტორში შემავალი ორთქლი მდიდრდება A კომპონენტით. გამდიდრებული ორთქლი ნაწილობრივ კონდენსირდება დეფლექტორში და წარმოქმნის ფლექმას. არაკონდენსირებული ორთქლი შედის მაცივარში და წარმოქმნის დისტილატს.

4.19-ე სურათზე მოცემულია სარექტიფიკაციო სვეტის საკონტაქტო თეფშებზე ფაზების მოძრაობის სქემა.

სარექტიფიკაციო სვეტში (1), ერთმანეთის თავზე, მოთავსებულია რამდენიმე საკონტაქტო თეფში (2), რომელთა თავზე მოთავსებულია ხუფი (3). ყოველ თეფშს აქვს ჭიქა (4), რომელიც ასრულებს ჰიდრაულიკური საკეტის როლს. ხუფის (3) და ჭიქის (4) ფორმა და ურთიერთგანლაგება აიძულებს ორთქლს გაიაროს თხევად ფაზაში (ნარევიში). მილით (5) ზედა თეფშიდან ქვედაზე ჩამოდის კონდენსატი. მილი (5) დონით აწეულია თეფშის (2) მიმართ, რის გამოც კონდენსატი თეფშზე იკავებს გარკვეულ ფენას. ქვედა თეფშიდან ორთქლი მილყელის გავლით ადის

ზემოთ და ხვდება ხუფის (3) ქვედა ზედაპირს. ვინაიდან ორთქლს სხვა გასასვლელი არა აქვს, იგი გადის კონდენსატის ფენაში და აორთქლებს კონდენსატში მყოფ ადვილად აქროლად კომპონენტს.



სურ. 4.19. სარექტიფიკაციო სვეტის საკონტაქტო თეფშებზე ფაზების მოძრაობის სქემა

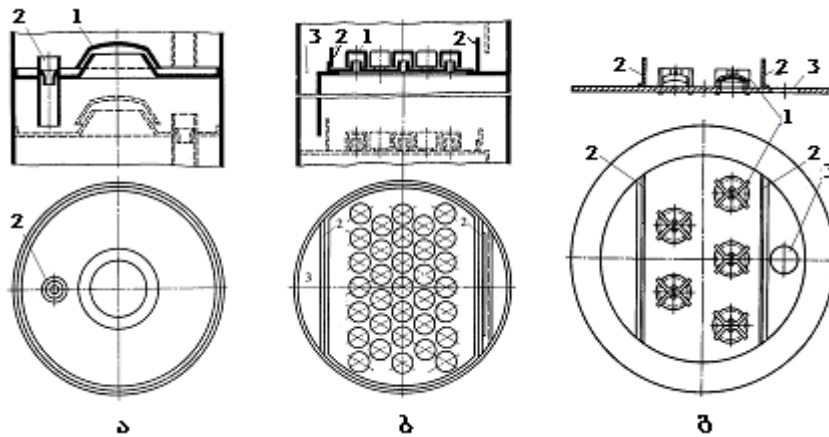
ერთი თეფშიდან მეორეში გავლის დროს (კონდენსაციის შედეგად) ორთქლი კარგავს ძნელად აქროლად კომპონენტს, რომელიც ზედა თეფშიდან ჩამოდის ქვედაზე. ქვედა თეფშიდან ასული ორთქლი ადვილად აქროლად კომპონენტთან ერთად შეიცავს ძნელად აქროლად კომპონენტსაც, რომელსაც აქვს უფრო მაღალი დუღილის ტემპერატურა. ამიტომ ორთქლი ქვედა თეფშიდან ზედა თეფშზე ასვლის შედეგად აორთქლებს ადვილად აქროლად კომპონენტს. ამრიგად, სარექტიფიკაციო სვეტის ქვედა ნაწილიდან ზემოთ ორთქლის მოძრაობის დროს ხდება ორთქლის გამდიდრება ადვილად აქროლადი კომპონენტით, ხოლო სითხის მოძრაობის შედეგად სვეტის ზედა ნაწილიდან ქვემოთ ხდება სითხის (კონდენსატის) გამდიდრება ძნელად აქროლადი კომპონენტით.

4.20-ე სურათზე მოცემულია საკონტაქტო თეფშების სხვადასხვა კონსტრუქცია, რომლებიც არსებობს: თაღფაქიანი (სურ. 4.20,ა); მრავალთაღფაქიანი (სურ. 4.20,ბ); მრავალსარქველიანი (სურ. 4.20,გ), ბადიანი და სხვ. კოლონის საკონტაქტო თეფშები აღჭურვილია ფაზების გასასვლელი ელემენტებით.

**თეფშების რაოდენობის გრაფიკული განსაზღვრისათვის** გამოვიყენოთ ფაზების კონცენტრაციის  $Oxy$  კოორდინატთა სისტემაში აგებული კონცენტრაციის *OAD* მრუდი (სურ. 4.21).

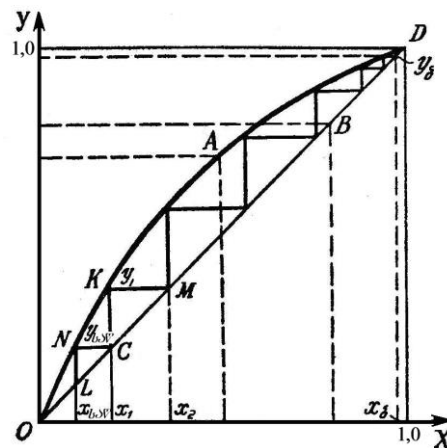
წონასწორობის მრუდზე აორთქლების პროცესი გამოისახება შეეული *LN* მონაკვეთით, რომელიც წონასწორობის მრუდს კვეთს  $y_{საწ}$  წერტილში. ორთქლის

კონდენსაციის პროცესი ხასიათდება თარაზული მონაკვეთით, რომელსაც ავლენენ  $N$  წერტილიდან ( $y_{საწ}$ )  $OD$  დიაგონალის გადაკვეთამდე ( $C$  წერტილი).



სურ. 4.20. საკონტაქტო თეფშების კონსტრუქციები:

- ა) თაღფაქიანი – 1-თაღფაქი, 2-გადასასხმელი ჭიქა; ბ) მრავალთაღფაქიანი – 1-თაღფაქი, 2- თხევადი ფაზის გადასასვლელი თამასები, 3 - გადასასხმელი ხერელი;
- გ) მრავალსარქველიანი – 1-სარქველი, 2- თხევადი ფაზის გადასასვლელი თამასები, 3- თხევადი ფაზის გადასასხმელი ხერელი.



სურ. 4.21. თეფშების რაოდენობის საანგარიშო გრაფიკი

მიღებული წერტილის აბსცისა იხნება  $x_1$ , ხოლო ორდინატი არის ისევე  $y_{საწ}$ , ე.ი. კონდენსაციის დროს ორთქლის შედგენილობა არ იცვლება. აორთქლებისა და კონდენსაციის შედეგად დისტილატი უფრო “მაგრდება”, ე.ი.  $x_1 > x_{საწ}$ . შემდეგ  $C$  წერტილიდან ვავლებთ შვეულ წრფეს მრუდის გადაკვეთამდე, რის შედეგადაც ვიღებთ  $K$  წერტილს, რომლისთვისაც ადვილად აქროლადი ნივთიერების შედგენილობა უდრის  $y_1$ .

$K$  წერტილიდან ვავლებთ თარაზულ წრფეს  $OD$  დიაგონალის გადაკვეთამდე, რის შედეგადაც ვიღებთ  $M$  წერტილს. ამ უკანასკნელის კოორ-

დინამიკა იხვევ  $y_1$  და  $x_2$ , რომლებიც ერთმანეთის ტოლია ( $y_1=x_2$ ). აქაც  $x_2>x_1$  და ასე შემდეგ. ცხადია რექტიფიკაციის პროცესი ხასიათდება საფეხურისმაგვარი *LNCKM* ტეხილით და ყოველი ცალკეული ხსნარის აორთქლებისა და კონდენსაციის პროცესს შეესაბამება ერთი საფეხური. წონასწორობის მრუდზე გამოსახული საფეხურები წარმოადგენენ სარექტიფიკაციო სვეტის თეორიული თეფშების რაოდენობას.



სურ. 4.22. სამრეწველო სარექტიფიკაციო კოლონის საერთო ხედი

#### 4.9. ექსტრაქცია

მყარი ან თხევადი ნივთიერებიდან ერთი ან რამდენიმე კომპონენტის გამოყოფას თხევადი გამხსნელით ექსტრაქციული პროცესი ეწოდება. ამ მიზნით ირჩევენ ისეთ გამხსნელს, რომელიც გახსნის მხოლოდ გამოსაყოფ კომპონენტს, ანუ მას უნდა ჰქონდეს შერჩევითი (სელექციური) გამხსნელი თვისებები. ასეთ გამხსნელებს ექსტრაგენტებს უწოდებენ.

ექსტრაქციის პროცესი მსგავსია გახსნის პროცესის. ეს ორი პროცესი განსხვავდება მხოლოდ იმით, რომ გახსნის დროს ნივთიერება მთლიანად გადადის ხსნარში, ექსტრაქციის დროს კი კომპონენტების განსხვავებული ხსნადობის გამო ხსნარში გადადის ნივთიერების კომპონენტების მხოლოდ ნაწილი, დანარჩენი ნაწილი კი რჩება მყარ მდგომარეობაში. ამრიგად შეიძლება ჩავთვალოთ, რომ ექსტრაქცია არის შერჩევითი გახსნა.

საექსტრაქციო ნივთიერების აგრეგატული მდგომარეობის მიხედვით განასხვავებენ მყარი სხეულების და სითხეების ექსტრაქციას. კვების მრეწველობაში უპირატესად გვხვდება მყარი მასალებიდან ექსტრაქციის პროცესები. მაგალითად, ჭარხლიდან შაქრის დიფუზია; ყურძნის გადამუშავების პროცესში ჭაჭიდან ნარჩენი შაქრის გამოყოფა; შავი ყურძნის დურდოს დუღილის

პროცესში საღებავი ნივთიერებების გადასვლა ტკბილში; მცენარეული ნედლეულიდან მიზნობრივი ნივთიერებების გამოყოფა, ლიქიორ-არყის წარმოებაში ხილ-კენკრას მორსების და წვენების დამზადება; საკვები კონცენტრატების მიღება და მრავალი სხვა.

სითხეების ექსტრაქციის დროს გამოსაყოფი სითხე არ უნდა იყოს დასამუშავებელ სითხეში ხსნადი. ექსტრაქციის შემდეგ, სიმკვრივეთა სხვაობის გამო სითხეები ადვილად გამოიყოფა ერთმანეთისაგან. ამრიგად, როგორც მყარი, ასევე სითხეების ექსტრაქციის დროს გვაქვს ორი ფაზა: პირველ შემთხვევაში მყარი და თხევადი, ხოლო მეორე შემთხვევაში – ორი თხევადი ფაზა.

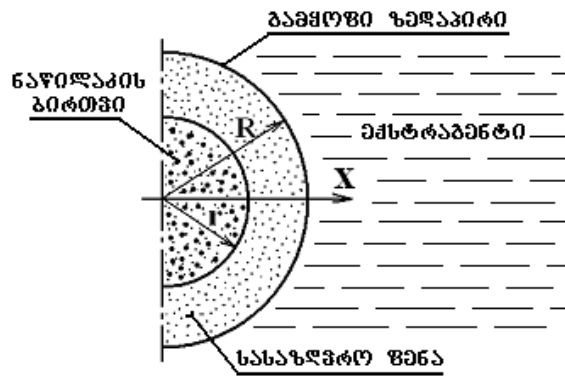
იმისათვის, რომ ექსტრაქციის პროცესში ამ ფაზებს შორის მოხდეს კომპონენტების გაცვლა, საჭიროა ფაზები ერთმანეთთან იმყოფებოდნენ მჭიდრო კონტაქტში. ექსტრაქციისთვის გამოყენებულ აპარატს ექსტრაქტორი ეწოდება.

#### **4.9.1. მყარი ნივთიერებიდან ექსტრაქციის პროცესის ბიო-ფიზიკური მექანიზმი**

უჯრედოვანი სტრუქტურის მქონე მშრალი და დაქუცმაცებული ნედლეულის ექსტრაქცია რთული ფიზიკურ-ქიმიური პროცესია, რომელსაც საფუძვლად უდევს ნივთიერებათა მასაცვლა და მასაგადაცემა. აღნიშნული პროცესები უზრუნველყოფენ ნივთიერების გადატანას მაღალი კონცენტრაციის ფაზიდან დაბალი კონცენტრაციის ფაზაში. კონკრეტულ პროცესზე დამოკიდებულებით, მასაცვლა სისტემაში “მყარი სხეული-სითხე”, შეიძლება იყოს განსხვავებული. მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესში მიმდინარეობს ურთიერთ-მოქმედება სითხესა და ფორიან სხეულებს შორის, რომლებიც შეიცავენ ხსნად ნივთიერებებს ფორების კედლებზე ან ხსნარს ფორების შიგნით.

გამომშრალი ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესში აღინიშნება შემდეგი სტადიები: ექსტრაგენტის შეღწევა ნედლეულში; უჯრედებში არსებული ნივთიერებების დასველება და გახსნა; ნივთიერებათა გამორეცხვა დარღვეული უჯრედებიდან და გახსნილი ფორებიდან; ნივთიერებათა მასაგადატანა უჯრედოვანი კედლებიდან მოლეკულური დიფუზიით; ნივთიერებათა მასაგადატანა მასალის ზედაპირიდან ხსნარში.

4.23-ე სურათზე მოცემულია დიფუზიური პროცესის “მყარი სხეული – სითხე” ფიზიკური მოდელი, რომლის თანახმად მყარი ნივთიერების სფერული ნაწილაკი გაყოფილია ზონებად.



სურ. 4.23. მყარ სფერულ ნაწილაკში დიფუზიური პროცესის ფიზიკური მოდელი

$r$  რადიუსით შემოსაზღვრული მოცულობა შეიცავს მიზნობრივ კომპონენტს მყარ მდგომარეობაში და მის ნაჯერ ხსნარს ფორებში. მეორე მოცულობა, რომელიც შემოსაზღვრულია  $R - r$  არით, შეიცავს მიზნობრივ კომპონენტს ხსნად მდგომარეობაში. ამ არეს ეწოდება სასაზღვრო ფენა, ხოლო  $R$ -ით შემოსაზღვრულ ზედაპირს – გამყოფი ზედაპირი ( $R$  - ნაწილაკის რადიუსია). სასაზღვრო ფენის გავლით ხდება ნივთიერების გამოტანა ნაწილაკის ცენტრალური ზონიდან, რაც ხორციელდება მოლეკულური დიფუზიით. ამ ზონაში დიფუზიური ნაწილაკები გამყოფი ზედაპირისაკენ მოძრაობენ სტოქასტიკურად. მათი გადასვლა ექსტრაგენტში ხდება მაშინ, როდესაც ეს ნაწილაკები აღმოჩნდებიან გამყოფ ზედაპირზე.

ნედლეულში ექსტრაგენტის შეღწევის პროცესი მიმდინარეობს კაპილარული ძალების მოქმედებით. კაპილარებსა და უჯრედებში არსებული ჰაერის გამო მათი სრული შევსების დრო შეიძლება იყოს დიდი. ეს დრო განისაზღვრება ჰაერის დიფუზიის სიჩქარით სითხეში. პროცესის დაჩქარება შესაძლებელია ვაკუუმირებით ან სითხეში წნევის გაზრდით.

ნივთიერებათა დასველების პროცესი მიმდინარეობს ექსტრაგენტის შეღწევასთან ერთდროულად. ეს პროცესი დამოკიდებულია ნივთიერებებისა და ექსტრაგენტის ქიმიურ თავისებურებებზე. ის ნივთიერებები, რომლებიც ამცირებენ დაბაბულობას სითხეებსა და აირებს შორის, აუმჯობესებენ დასველების პროცესს და ექსტრაგენტის შეღწევას ნედლეულში კაპილარული გზით.

ნივთიერების გახსნის სიჩქარე ნაწილაკის შიგნით განისაზღვრება მასაგადაცემის სიჩქარით ფოროვან სხეულში, ხოლო ნაწილაკის ზედაპირზე – სხეულის ზედაპირიდან მასაგადაცემის სიჩქარით. რამდენადაც მასაგადაცემის პროცესი შეიძლება დაჩქარდეს სათანადო ჰიდროდინამიკური პირობების შექმნით,

ამდენად ნივთიერებათა გახსნის სიჩქარე შესაძლებელია მნიშვნელოვნად გაიზარდოს. ამ პერიოდში ხდება ნივთიერებათა გამორეცხვა დარღვეული უჯრედებიდან და გახსნილი ფორებიდან.

მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის ბოლო სტადიას წარმოადგენს ნივთიერებათა მასაგადაცემა მასალის ზედაპირიდან ხსნარში, რაც მიმდინარეობს კონვექციური დიფუზიით.

ექსტრაქციის პროცესის შეფასების უმთავრესი მახასიათებელია ნივთიერებათა გამოსავალი, რომელიც დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე. ისინი შეიძლება გაიყოს ნედლეულის სასაქონლო და ტექნოლოგიური თვისებების განმსაზღვრელ და თბოგადაცემის პროცესზე მოქმედ ფაქტორებად. სასაქონლო მაჩვენებლებს მიეკუთვნება: ნედლეულში ტენის და ექსტრაქტული ნივთიერებების შემცველობა, დაქუცმაცების ხარისხი და სხვა. ტექნოლოგიური მაჩვენებლებია: ნედლეულის მიერ ტენის შთანთქმის უნარი, ფორიანობა, მოცულობის ზრდა ექსტრაქტული ნივთიერებების გახსნის შედეგად და სხვ.

ექსტრაქციის პროცესის მიმდინარეობაზე დიდ გავლენას ახდენს ნედლეულის დაქუცმაცების ხარისხი, რომლის დროსაც ხდება უჯრედების გარკვეული რაოდენობის რღვევა. ეს ექსტრაქციის პროცესში ხელს უწყობს ნივთიერებების სწრაფად გახსნას ექსტრაგენტით და მათ გამორეცხვას დარღვეული უჯრედებიდან. თუ დაქუცმაცებულ ნედლეულში დარღვეული უჯრედების რაოდენობა მცირეა, მაშინ ექსტრაქციის პროცესი მნიშვნელოვნად ყოვნდება და ძირითადად განისაზღვრება დიფუზიის სიჩქარით. გამორეცხილი ნივთიერებების რაოდენობა, ანუ გამორეცხვის კოეფიციენტი, წარმოადგენს ექსტრაქციის პროცესის ძირითად განმსაზღვრელ კრიტერიუმს.

მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქცია, სხვა მყარი სხეულებისგან განსხვავებით, ხასიათდება უჯრედების სრუქტურისა და ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებთან დაკავშირებული მრავალი თავისებურებით. ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებები განთავსებული არიან უჯრედებში, უჯრედებს შორის ფორებსა და ნაპრალებში და ექტრაგენტმა მათში შესაღწევად უნდა გადალახოს უჯრედული და სხვა შიგა ბარიერები. ნედლი და მშრალი მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესები ერთმანეთისაგან მნიშვნელოვნად განსხვავდება. პირველ შემთხვევაში მოქმედი ნივთიერებები იმყოფებიან უჯრედის შიგნით ხსნარში, მეორე შემთხვევაში – მშრალი კონგლომერატების სახით უჯრედების კედლებზე ან ფორებში. აქედან გამომდინარე, სხვადასხვა ექსტრაქციის პროცესისადმი მიდგომაც განსხვავებულია. ხშირ შემთხვევაში განიხილება ორივე შემთხვევა – როგორც ნედლი ნაყოფის სხვადასხვა რეჟიმულ პარამეტრებზე შრობა

კონდიციურ, შენახვისათვის ოპტიმალურ ტენიანობამდე, შემდგომი დაქუცმაცებითა და ექსტრაქციით.

მცენარეული ნედლეულის შრობის დროს უჯრედების თვისებები იცვლება და ისინი გადადიან პლაზმურ მდგომარეობაში. უჯრედული მემბრანები იძენენ ფოროვანი ტიხრების თვისებებს, რომლებიც მოითვლიან 0,2...0,3 მმ-დან რამდენიმე ათეულ ნანომეტრამდე დიამეტრის რამდენიმე ათას ფორს. ექსტრაქციის პროცესი ამ დროს ფოროვან მემბრანაში დიალიზის ხასიათს იძენს.

ექსტრაგენტის უჯრედში შეღწევის პროცესი განისაზღვრება ნედლეულის ჰიდროფილურობის ხასიათით, ექსტრაგენტის თვისებებით, უჯრედთა კედლების ფორების ზომებითა და რაოდენობით. ამასთან, მცენარეული ნედლეული წარმოადგენს კაპილარულ-ფოროვანი სტრუქტურის სხეულს და რაც მეტია მსგავსება სხეულსა და ექსტრაგენტს შორის, მით უფრო სწრაფად ხდება კაპილარების დასველება და მასში ექსტრაგენტის მოხვედრა – მაკრო - და მიკროზარებიდან, უჯრედშორისი გზით, უჯრედის ფორებიდან დიფუზიის გზით. მიმდინარეობს უჯრედოვანი სტრუქტურის შემადგენელი ცელულოზისა და სხვა მაღალმოლეკულური ნივთიერებების მოცულობის ზრდა. ამავდროულად, წარმოიქმნება შიგაუჯრედული წვენი – ექსტრაგენტი აღწევს უჯრედის შიგნით და ხსნის უჯრედის გამშრალ წვენს. პროცესის ხანგრძლივობა სტაციონარულ პირობებში დამოკიდებულია მცენარეული ნედლეულის მორფოლოგიურ თავისებურებებზე და გრძელდება 3...4 სთ-დან 20...30 სთ-მდე.

კაპილარებში ექსტრაგენტის მოხვედრას ხელს უშლის მათში ჰაერის არსებობა. ამ წინააღმდეგობის დასაძლევად და პროცესის ინტენსიფიკაციისათვის მიმართავენ სხვადასხვა ხერხს. მაგალითად, ექსტრაგენტს აწოდებენ გაზრდილი წნევით, ახდენენ წინასწარ ვაკუუმირებას, იყენებენ საექსტრაქციო მასის პულსაციას და სხვა.

მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის მექანიზმის და მოქმედი ფაქტორების სწორად გაანალიზება ქმნის პროცესის რეჟიმული პარამეტრების ოპტიმიზაციის წინაპირობას, აგრეთვე საექსტრაქციო აპარატების გაანგარიშებისა და კონსტრუირების მეთოდოლოგიური საფუძვლების დამუშავების შესაძლებლობას.

#### **4.9.2. მყარი ნივთიერების ექსტრაქციის პროცესის თეორიული საფუძვლები**

მყარი ნივთიერების ორფაზიანი (მყარი სხეული-სითხე) ექსტრაქციის პროცესში მონაწილეობს სამი ნივთიერება: მიზნობრივი პროდუქტის მატარებელი

მყარი ფაზა; მიზნობრივი პროდუქტის გამხსნელი თხევადი ფაზა და თვით მიზნობრივი ნივთიერება, რომელიც გადადის ერთი ფაზიდან მეორეში. ნივთიერების მოძრაობა ფაზებს შორის დამოკიდებულია მის კონცენტრაციაზე ორივე ფაზაში, წონასწორობის პირობის დაცვით.

მასაცვლის პროცესის თეორიის საფუძველზე ნივთიერების გადატანა შესაძლებელია ორი გზით – მოლეკულური და კონვექციური დიფუზიით. ორივე შემთხვევაში პროცესის მამოძრავებელი ძალა არის ფაზებს შორის კონცენტრაციათა სხვაობა.

მოლეკულური დიფუზია არის ნივთიერების თავისუფალი გადატანა მაღალი კონცენტრაციის ფაზიდან დაბალი კონცენტრაციის ფაზაში, ანუ პროცესი მიმდინარეობს კონცენტრაციის გრადიენტის არსებობის შემთხვევაში.

მოლეკულური დიფუზიის მათემატიკური ფორმულირება გამოისახება **ა.ფიკის პირველი კანონის** საფუძველზე

$$M = -DF \frac{dc}{dx} \tau, \quad (4.4)$$

სადაც  $M$  - დიფუნდირებული ნივთიერების რაოდენობაა, კგ;

$D$  - დიფუზიის კოეფიციენტი, მ<sup>2</sup>/წმ;

$F$  - ზედაპირის ფართობი დიფუზიის მიმართულების მართობულად, მ<sup>2</sup>;

$dc/dx$  - კონცენტრაციის გრადიენტი  $x$  მიმართულებით;

$\tau$  - დიფუზიის დრო, წმ.

განტოლებაში ნიშანი “მინუსი” მიუთითებს, რომ პროცესი მიმდინარეობს კონცენტრაციის შემცირების მიმართულებით.

ექსტრაქციის პროცესის მიმდინარეობისათვის გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს დიფუზიის  $D$  კოეფიციენტს, რომლის ერთეული (4.4) განტოლების თანახმად არის მ<sup>2</sup>/წმ. აქედან გამომდინარეობს ამ კოეფიციენტის ფიზიკური არსი, რომელიც გვიჩვენებს ნივთიერების რა რაოდენობის მასა გადის დროის ერთეულში ერთეულ ფართობში, როდესაც კონცენტრაციის გრადიენტი ერთის ტოლია. იგი წარმოადგენს მოცემული ნივთიერების ფიზიკურ კონსტანტას, რომელიც ახასიათებს უძრავ არეში მისი შეღწევის უნარს და არ არის დამოკიდებული პროცესის მიმდინარეობის ჰიდროდინამიკურ პირობებზე.

დიფუზიის კოეფიციენტის მნიშვნელობას ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში განსაზღვრავენ ექსპერიმენტული მონაცემებით ან თეორიული და ნახევრად ემპირიული განტოლებებით.

მოლეკულური დიფუზიის პროცესში განსახილველი არის ნებისმიერ წერტილში კონცენტრაცია წარმოადგენს კოორდინატების და დროის ფუნქციას

$$C = f(x, y, z, \tau)$$

**კონვექციური დიფუზიისათვის** დამახასიათებელია ნივთიერების გადატანა მოძრავ გარემოში, სადაც ადგილი აქვს მოლეკულური და კონვექციური დიფუზიების კომბინირებულ მოქმედებას. კონვექციური დიფუზია ძირითადად დამოკიდებულია ფაზათა კონტაქტის ფარდობით სიჩქარეზე, ანუ რაც უფრო ინტენსიურია ფაზათა ურთიერთმოძრაობა, მით უფრო მეტია დიფუნდირებული ნივთიერების რაოდენობა.

მაღალი ინტენსივობის საექსტრაქციო აპარატებში მოლეკულური და კონვექციური დიფუზიები მიმდინარეობს ერთდროულად. ასეთ შემთხვევაში მასათა გადაცემის პროცესის მათემატიკურ გამოსახულებას აქვს შემდეგი სახე:

$$M = K \cdot F \cdot \Delta C \cdot \tau, \quad (4.5)$$

სადაც  $M$  - ერთი ფაზიდან მეორეში გადასული ნივთიერების

რაოდენობაა, კგ;

$K$  - მასათა გადაცემის კოეფიციენტი, მ/წმ;

$F$  - ფაზათა გამყოფი ზედაპირის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

$\Delta C$  - ფაზათა კონცენტრაციების სხვაობა, ანუ პროცესის

მამოძრავებელი ძალა, კგ/მ<sup>3</sup>;

$\tau$  - დრო, წმ.

იმ ფაქტორებიდან, რომლებიც გავლენას ახდენენ მიზნობრივი პროდუქტის გამოყოფის სისრულესა და სიჩქარეზე და მათი რეგულირებით შესაძლებელია პროცესის სასურველი მიმართულებით შეცვლა, ძირითადია: ექსტრაგენტის შერჩევა, ნედლეულის დაქუცმაცების ხარისხი, კონცენტრაციათა სხვაობა, ტემპერატურა, ექსტრაგენტის სიბლანტე; გამოყოფის ხანგრძლივობა და ჰიდროდინამიკური პირობები.

როგორც აღვნიშნეთ, ფაზის შიგნით ნივთიერების გადატანა შესაძლებელია განხორციელდეს ან მხოლოდ მოლეკულური დიფუზიით ან კონვექციური და მოლეკულური დიფუზიებით ერთდროულად. ტურბულენტურ ნაკადში მოლეკულური დიფუზიის ფაქტორი მაღალია ფაზების საზღვრის ახლოს. ასეთი რეჟიმის დროს წარმოიქმნება ნაკადის სიჩქარის არარეგულარული პულსაციები, რომელთა მოქმედებით, ნაკადის საერთო მოქმედებასთან ერთად, ხდება ნაწილაკების გადაადგილება ყველა მიმართულებით. ნივთიერების კონვექციურ გადატანას, რომელიც ხორციელდება ტურბულენტური პულსაციით, ხშირად

ტურბულენტურ დიფუზიას უწოდებენ. ამ შემთხვევაში მოლეკულური დიფუზიის როლი უმნიშვნელოა.

ნივთიერების გადატანა ფაზების გაყოფის საზღვარზე ხასიათდება მასაგაცემით, რომლის განტოლებას ა.შჩუკარევის მიხედვით აქვს შემდეგი სახე:

$$M = \beta(C_{\delta} - C_{\tau})F ,$$

სადაც  $M$  - დროის ერთეულში გახსნილი ნივთიერების რაოდენობაა, კგ/წმ;

$\beta$  - მასაგაცემის კოეფიციენტი, მ/წმ.

$C_{\delta}$  - ფაზების გაყოფის ზღვარზე გაჯერებული ხსნარის

კონცენტრაცია, კგ/მ<sup>3</sup>;

$C_{\tau}$  - ნაკადში ნივთიერების ფაქტობრივი კონცენტრაცია დროის

მოცემულ მომენტში, კგ/მ<sup>3</sup>;

$F$  - ფაზათა გაყოფის ზედაპირის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

მასაგაცემის კოეფიციენტი  $\beta$  ახასიათებს ნივთიერების გადატანას ერთდროულად როგორც კონვექციით, ასევე დიფუზიით, ამიტომ აღნიშნული კოეფიციენტი დამოკიდებულია დინების ჰიდროდინამიკურ პირობებზე.

როგორც განხილული თეორიული მოდელებიდან ჩანს, ექსტრაპირების პროცესის ძირითად განმსაზღვრელ პარამეტრებს წარმოადგენენ დიფუზიის და მასათა გადაცემის კოეფიციენტები. პირველი ახასიათებს ნივთიერების გადატანის სიჩქარეს მყარი სხეულის შიგნით, ხოლო მეორე – მყარი სხეულის ზედაპირიდან საექსტრაქციო სითხეში.

საექსტრაქციო ნივთიერების დიფუზიის კოეფიციენტი მყარ სხეულში დამოკიდებულია ამ სხეულის აგებულებასა და ფიზიკურ თვისებებზე, საექსტრაქციო ნივთიერების ფიზიკურ თვისებებზე, ტემპერატურასა და კონცენტრაციაზე და არ არის დამოკიდებული ფაზების გამყოფი ზედაპირის პირობებზე.

იმის გამო, რომ აღნიშნული კოეფიციენტები შედიან პროცესის საანგარიშო განტოლებებში, დიდი მნიშვნელობა აქვს მათ სწორად, მაღალი სიზუსტით განსაზღვრას, რაც მიიღწევა ექსპერიმენტულად.

აღსანიშნავია, რომ დიფუზიის და მასათა გადაცემის კოეფიციენტების ექსპერიმენტული გაზომვა ხდება ფიქსირებული პარამეტრების პირობებში და ხშირ შემთხვევაში ვერ ხერხდება ექსტრაქციის პროცესის კინეტიკის განმსაზღვრელი ყველა ძირითადი რეჟიმული პარამეტრის გათვალისწინება.

გარდა ამისა, ექსტრაქციის კინეტიკის განტოლებების განმსაზღვრელ ერთ-ერთ ძირითად პარამეტრს წარმოადგენს ფაზათა გაყოფის ფართობი, რომლის განსაზღვრა ხშირ შემთხვევაში შეუძლებელია, განსაკუთრებით წვრილდისპერსიული სტრუქტურის საექსტრაქციო მასალებისათვის, რაც ზოგჯერ ართულებს თეორიული მოდელების გამოყენებას პრაქტიკული გაანგარიშებების დროს.

ყველა არსებული თეორიის ძირითადი მიზანი არის მიზნობრივი პროდუქტის ექსტრაგენტში გადასვლის სიჩქარის ანუ პროცესის ხანგრძლივობისა და მწარმოებლურობის განსაზღვრა.

მცენარეული ნედლეულის მორფოლოგიური სტრუქტურის თავისებურების და ექსტრაქციის პროცესში მიმდინარე რთული ბიო-ქიმიური გარდაქმნების გამო უადრესად რთულია ამ პროცესის ზუსტი თეორიული ანალიზი და მათემატიკური მოდელირება, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც ერთდროულად მიმდინარეობს მოლეკულური და კონვექციური დიფუზიური პროცესები. ამდენადვე რთულია პროცესის აღმწერი მათემატიკური აპარატის პრაქტიკული რეალიზება. საკითხი რამდენადმე მარტივდება თეორიული კვლევის პროცესში ემპირიული მონაცემების გამოყენებით. ამით უფრო საგრძნობი ხდება მიღებული და რეალური პროცესების შედეგების ადექვატურობა.

ექსტრაქციის კინეტიკური პროცესის თეორიათა ანალიზი გვიჩვენებს, რომ მიზნობრივი პროდუქტის ექსტრაგენტში გადასვლის პროცესს აქვს ექსპონენციალური ხასიათი, ანუ საწყის მასალაში მიზნობრივი პროდუქტის შემცველობა დროში მცირდება, ხოლო ექსტრაგენტში – იზრდება და უსასრულოდ უახლოვდება წონასწორულ კონცენტრაციას ანუ პროცესის კინეტიკის გრაფიკს აქვს ექსპონენციალური სახე (სურ. 4.24). პროცესი მთავრდება ფაზათა შორის კონცენტრაციათა გათანაბრების დროს.

ექსტრაქციის კინეტიკური პროცესის ექსპონენციალური განტოლება შეიძლება წარმოვადგინოთ შემდეგი სახით:

$$C_{\text{თ.ფ.}} = C_{\text{ა.ფ.}}^0 \frac{G_a}{G} (1 - e^{-K\tau}) \quad \text{გ/კგ}, \quad (4.6)$$

სადაც  $C_{\text{თ.ფ.}}$  - თხევადი ფაზის მიმდინარე კონცენტრაციაა, გ/კგ;

$C_{\text{ა.ფ.}}^0$  - მყარ ფაზაში მიზნობრივი პროდუქტის საწყისი შემცველობა, გ/კგ;

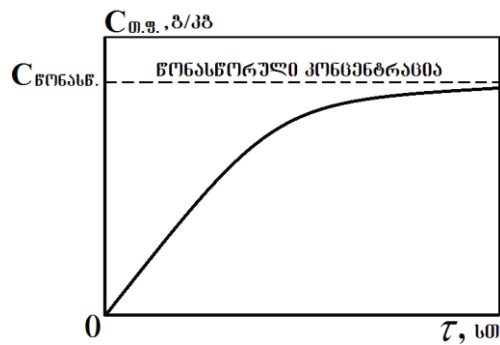
$G_a$  - ექსტრაქტორში ჩატვირთული ნედლეულის, ანუ მყარი ფაზის რაოდენობა, კგ;

$G$  - ექსტრაქტორში ჩატვირთული მთლიანი მასის (ნედლეულს + ექსტრაგენტი) რაოდენობა, კგ;

$K$  - პროცესის განმსაზღვრელი კონსტანტა, 1/სთ;

$\tau$  - მიმდინარე დრო, სთ.

(4.6) განტოლების გრაფიკული გამოსახულება მოცემულია 4.24-ე სურათზე თხევადი ფაზის კონცენტრაციისა ( $C_{თ.ფ.}$ ) და დროის ( $\tau$ ) კოორდინატებით.



სურ. 4.24. ექსტრაქციის პროცესის კინეტიკური გრაფიკი

პროცესის კვლევის მთავარი სირთულე დაკავშირებულია  $K$  კონსტანტას სწორად განსაზღვრასთან, რაც დამოკიდებულია მრავალ ფაქტორზე, მათ შორის ნედლეულის და ექსტრაგენტის ქიმიურ შედგენილობაზე, ტემპერატურაზე, ნედლეულის დისპერსულობასა და დიფუზიური პროცესის მიმდინარეობის სხვა თავისებურებებზე.

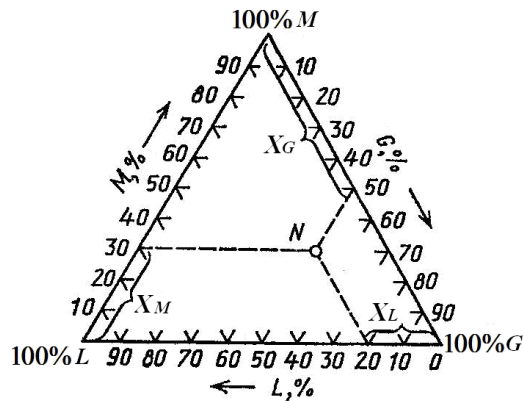
### 4.9.3. სამკუთხა დიაგრამა

სამკომპონენტიანი ხსნარის შედგენილობის დატანა  $XY$  კოორდინატთა დიაგრამაზე შეუძლებელია. ასეთი სამკომპონენტიანი ფაზების შედგენილობა უმჯობესია დაეიტანოს სამკუთხა კოორდინატთა სისტემაზე – ე.წ. სამკუთხა დიაგრამაზე (სურ. 4.25).

წონასწორული სამკუთხედის  $L, G$  და  $M$  წვეროები აღნიშნავს სუფთა კომპონენტებს: საწყისი ხსნარის  $L$  გამსხნეულს,  $G$  ექსტრაგენტს და  $M$  განაწილებულ ნივთიერებას. სამკუთხედის  $LM, MG$  და  $GL$  გვერდებზე ყოველი წერტილი შეესაბამება ორკომპონენტიანი ხსნარის შედგენილობას.

დიაგრამის შიგნით არსებული ფართობის ყოველი წერტილი შეესაბამება სამკომპონენტიანი ხსნარის შედგენილობას (ანუ სამმაგი ხსნარის შედგენილობას). ხსნარში ნებისმიერი კომპონენტის შედგენილობის საპოვნელად

დიაგრამის გვერდებზე დატანილია სკალები. ამასთან, ყოველი გვერდის სიგრძე ითვლება 100%-ად (მასური, მოცულობითი ან მოლური), ან ერთის ტოლად.



სურ. 4.25. სამკუთხა დიაგრამა

სსნარის ან ნარევის შედგენილობა განისაზღვრება იმ მონაკვეთების სიგრძით, რომლებიც გატარებულია სამკუთხედის ყოველი გვერდის პარალელურად დანარჩენი ორი გვერდის გადაკვეთამდე. მაგალითად, რომ ვიპოვოთ  $N$  წერტილში  $M$  კომპონენტის შემცველობა, საჭიროა  $N$  წერტილში გავატაროთ სამკუთხედის  $M$  წვეროს მოპირდაპირე გვერდის პარალელური მონაკვეთი  $LM$  გვერდის გადაკვეთამდე, მივიღებთ  $X_M = 30\%$ . ანალოგიურად მივიღებთ  $G$  და  $L$  კომპონენტების შემცველობას -  $X_G = 50\%$ ;  $X_L = 20\%$ .

#### 4.10. ექსტრაქციის მეთოდების კლასიფიკაცია

ექსტრაქციის ყველა არსებული მეთოდი კლასიფიცირდება სტატიკურ და დინამიკურ მეთოდებად. სტატიკურ მეთოდებში ნედლეულს პერიოდულად ასხავენ ექსტრაგენტს და აყოვნებენ გარკვეული დროით. დინამიკურ მეთოდებში გათვალისწინებულია მუდმივი ცვლა ექსტრაგენტის ან ექსტრაგენტის და ნედლეულის.

ექსტრაქციის სტატიკურ და დინამიკურ მეთოდებში გამოყოფენ პერიოდულ მეთოდებს, როდესაც ნედლეულის ერთი ან რამდენიმე პორციის ექსტრაქცია წარმოებს დროის გარკვეულ პერიოდში ანუ ნედლეულის და ექსტრაგენტის მიწოდება საექსტრაქციო აპარატებში ხორციელდება პერიოდულად.

სტატიკურ პერიოდულ მეთოდებს მიეკუთვნება ერთსაფეხურიანი მაცერაცია და მრავალსაფეხურიანი რემაცერაცია, ანუ ცირკულაცია სსნარის პერიოდული გამოყოფით (მრავალსაფეხურიან პირდაპირი დინების სქემებში), აგრეთვე

მრავალსაფეხურიანი წინაღენითი რეპერკოლაცია ხსნარის პერიოდული გამოყოფით.

დინამიკურ პერიოდულ მეთოდებს მიეკუთვნებიან ერთსაფეხურიანი პერკოლაცია და მრავალსაფეხურიანი რეპერკოლაცია, დასრულებული და დაუსრულებელი ციკლებით.

დინამიკურ მეთოდებს შორის გამოყოფენ უწყვეტ (ნედლეულის უწყვეტი მიწოდებით) პირდაპირი დინების (ექსტრაგენტი და მასალა ერთ ნაკადში) და წინაღენის (ექსტრაგენტის და მასალის შემხვედრი მოძრაობა) მეთოდებს.

ყველაზე უფრო გავრცელებული ექსტრაქციის ჰიდროდინამიკური მეთოდი საშუალებას გვაძლევს ინტენსიფიკაციით შევამციროთ პროცესის ხანგრძლივობა, მაქსიმალურად გამოვეყოთ ღირებული კომპონენტები და შევამციროთ ენერგოდანახარჯები.

#### **4.11. მყარი მასალიდან ნივთიერების საექსტრაქციო აპარატები**

კვების მრეწველობის სხვადასხვა დარგში მყარი ნივთიერებებიდან სასარგებლო კომპონენტების ექსტრაქციისათვის ფართოდ გამოიყენება სხვადასხვა კონსტრუქციის პერიოდული და უწყვეტი ქმედების ექსტრაქტორები. პერიოდული ქმედების ექსტრაქტორებს მიეკუთვნება საექსტრაქციო როფები, რეცირკულაციური, ვიბრო- და ვაკუუმ-ექსტრაქტორები და მრავალი სხვა.

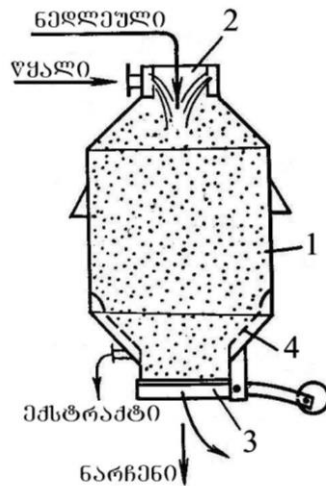
უწყვეტი ქმედების ექსტრაქტორებს მიეკუთვნება: კოლონისმაგვარი (ერთკოლონიანი, ორკოლონიანი, მრავალკოლონიანი), დახრილი და ჰორიზონტალური (შნეკური და ფრთებიანი), როტაციული, სარწყავი, აპარატები მდულარე და ვიბრომდულარე ფენით და სხვა.

ექსტრაქციის მეთოდები და მოწყობილობები ძალზე მრავალფეროვანია და განსხვავდებიან არა მარტო კონსტრუქციით, არამედ ტექნოლოგიური ეფექტურობით და ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლებით. ძირითადი მოთხოვნები, რომლებიც უნდა დააკმაყოფილოს ნებისმიერი კონსტრუქციის აპარატმა არის მიზნობრივი ნივთიერებების მაქსიმალური გამოყოფა მინიმალური დროისა და მატერიალური დანახარჯების პირობებში.

საექსტრაქციო მოწყობილობები კლასიფიცირდება რამდენიმე ნიშნით – მუშა ციკლით; ნედლეულის და ექსტრაგენტის ფარდობითი მოძრაობით; მუშა ორგანოების ტიპით, გადაადგილებით და სხვა. ექსტრაქტორები ხასიათდებიან მეთოდების და კონსტრუქციების მრავალფეროვნებით. ყოველი კონკრეტული

შემთხვევისათვის ოპტიმალური მოდელის შერჩევა მოითხოვს მათ ყოველმხრივ ანალიზს და შეფასებას.

პერიოდული ქმედების მარტივი საექსტრაქციო აპარატის სქემა მოცემულია 4.26-ე სურათზე. საექსტრაქციო მასალა აპარატის კორპუსში (1) თავსდება ჩამტვირთი ლიუკიდან (2). ასეთ აპარატებში ექსტრაგენტს ხშირ შემთხვევაში წარმოადგენს თბილი წყალი, რომელიც გაივლის მასალაში ზევიდან ქვევით, გამოყოფს წყალში ხსნად ნივთიერებებს და კონუსური ბადის გავლით, მილყელის საშუალებით, გამოდის აპარატიდან ექსტრაქტის სახით.



სურ. 4.26. პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო აპარატი

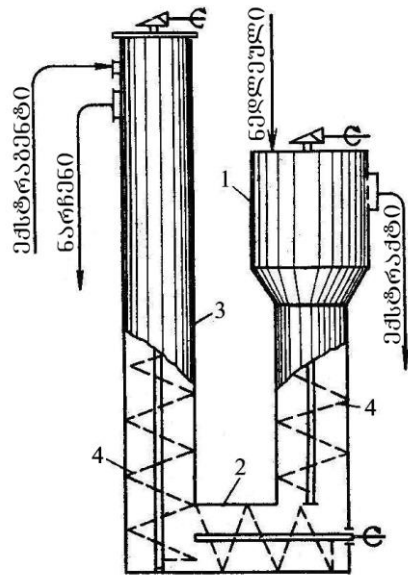
ნარჩენი მასალის გადმოტვირთვა ხდება აპარატის ძირიდან შემოსაბრუნებელი სახურავის გახსნით. ანალოგიური აპარატები გამოიყენება შაქრის ჭარხლის, მცენარეული ზეთის და სხვათა წარმოებაში.

თანამედროვე უწყვეტი ქმედების ექსტრაქტორი მუშაობს საექსტრაქციო მასალისა და ექსტრაგენტის უწყვეტი წინაღდენი მოძრაობით, ან მასალის ექსტრაგენტით მორწყვის მრავალსაფეხურიანი მეთოდით.

ფაზების წინაღდენით პრინციპზე მომუშავე ექსტრაქტორებიდან ფართო გავრცელება ჰპოვეს შნეკური ტიპის ვერტიკალურმა და დახრილმა აპარატებმა.

4.27-ე სურათზე წარმოდგენილია უწყვეტი ქმედების, შნეკური, ვერტიკალური, კოლონის ტიპის ექსტრაქტორის სქემა, რომელიც გამოიყენება მარცვლეული კულტურებიდან მცენარეული ზეთების გამოსახდელად.

ექსტრაქტორი შედგება ჩამტვირთი კოლონისაგან (1), პორიზონტალური უბნის (2) და საექსტრაქციო კოლონისაგან (3). კოლონების შიგნით მოთავსებულია პერფორირებული შნეკები (4), რომლებიც გადაადგილებენ ნედლეულს და ამასთან ხვიების ნახვრეტებში ატარებენ ექსტრაგენტს.



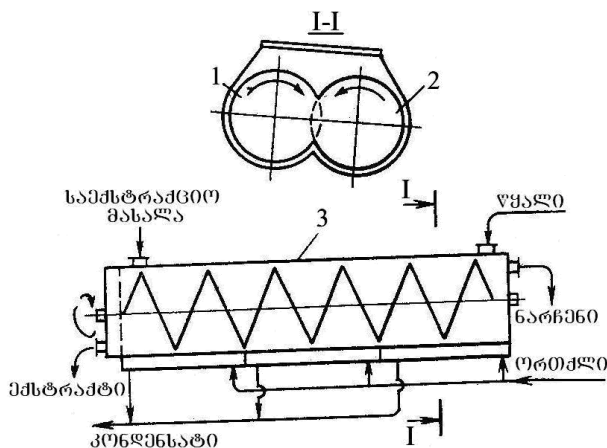
სურ. 4.27. უწყვეტი ქმედების, შნეკური, ვერტიკალური ექსტრაქტორის სქემა

ჩამტვირთი კოლონის ზედა ნაწილი წაკვეთილი კონუსის ფორმისაა და მთავრდება ცილინდრული დეკანტატორით.

საწყისი მასალა მიეწოდება ჩამტვირთ კოლონას (1) და შნეკებით (4) გადაადგილდება საექსტრაქციო კოლონაში (3) ქვევიდან ზევით. იმაგდროულად საექსტრაქციო კოლონის ზედა ნაწილში მიეწოდება ექსტრაგენტი მასალის მოძრაობის შემხვედრი მიმართულებით.

მიღებული ექსტრაქტი შედის ჩამტვირთ კოლონაში, სადაც ის იფილტრება მიწოდებული მასალის ფენაში და ზედა ნაწილიდან ბადის გავლით გამოდის აპარატიდან.

დახრილმა ექსტრაქტორმა (სურ. 4.28) ფართო გამოყენება პოვა ჭარხლის შაქრის წარმოებაში. იგი შედგება დახრილი ღარისაგან (3), რომელშიც ჩადგმულია ორი პარალელური შნეკი (1) და (2).



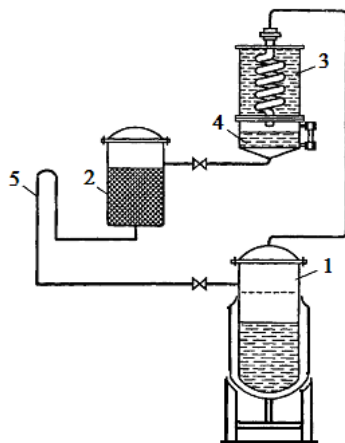
სურ. 4.28. დახრილი შნეკური ექსტრაქტორის სქემა

შნეკები განლაგებულია ისე, რომ ერთის ხვიები შედიან მეორეში. ხვიებს შორის არსებული ღრეხო განკუთვნილია წვენი გასასვლელად. საექსტრაქციო მასალა და ექსტრაგენტი აპარატს მიეწოდება ისრებით ნაჩვენები მილყელებიდან და მოძრაობენ წინააღმდეგობის პრინციპით. ღარის დახრა უზრუნველყოფს მყარი და თხევადი ფაზების გაყოფას. ექსტრაქტი გამოიყოფა ღარის დახრილი ბოლოდან, ხოლო ნარჩენი - მისი საწინააღმდეგო მხრიდან.

ექსტრაქციის პროცესის ოპტიმალური ტემპერატურული რეჟიმის დასაცავად აპარატს ორთქლი მიეწოდება ორთქლის პერანგის რამდენიმე ზონაში. ასეთი ტიპის აპარატებში ექსტრაქციის ხანგრძლივობა შეადგენს დაახლოებით 1 სთ-ს.

პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო აპარატების ბატარეული, თანმიმდევრული გაერთიანებით მიიღება ნახევრად უწყვეტი პროცესი. ამ მიზნით ხშირად გამოიყენება მრავალსაფეხურიანი მეთოდები დასრულებული ან დაუსრულებელი ციკლებით. ამ მეთოდის არსი არის ის, რომ იყენებს დიფუზორების (პერკოლატების) ბატარეას. ამ დროს გამონაწველილი მასა პერკოლატიდან გამოიყენება მეორე პერკოლატში ნედლეულის პერკოლაციისთვის და ა.შ. ამრიგად, ექსტრაგენტი გაივლის რა პერკოლატების აღნიშნულ ბატარეას ნედლეულით, გაჯერებულია საჭირო რაოდენობის მოქმედი ნივთიერებებით.

ექსტრაქციული პროცესის სრული ტექნოლოგიური ციკლის ერთ დანადგარში დამთავრების მიზნით ხშირად იყენებენ ცირკულაციური ექსტრაქციის მეთოდს, რომლის არსი დაფუძნებულია სუფთა ექსტრაგენტის მრავალჯერად ცირკულაციაზე საექსტრაქციო ნივთიერების მასაში. დანადგარში (სურ. 4.29) კომუნიკაციებით ერთმანეთთან თანმიმდევრობით დაკავშირებულია გამოსახდელი კუბი (1), ექსტრაქტორი (2), მაცივარ-კონდენსატორი (3) და კონდენსატის შემკრები (4). ექსტრაგენტად გამოიყენება აქროლადი ორგანული გამხსნელები, რომელთა დუღილის ტემპერატურა დაბალია.



სურ. 4.29. ცირკულაციური საექსტრაქციო დანადგარის სქემა

ნედლეულის ჩატვირთვა ხდება ექსტრაქტორში (2), რომელშიც ისხმება ექსტრაგენტი სიფონური მილის (5) ქვედა ნიშნულის დონემდე. ექსტრაქტორში (2) პროცესის დამთავრების შემდეგ შემკრებიდან (4) აწვდიან იმდენ ექსტრაგენტს, რომ ექსტრაქტულმა ხსნარმა მიაღწიოს სიფონური მილის (5) ზედა დონეს და გადავიდეს გამოსახდელ კუბში (1). კუბში გაცხელების შედეგად ექსტრაგენტის ორთქლი ადის კონდენსატორში (3), სადაც კონდენსირდება და ჩაედინება შემკრებში (4). აქედან კვლავ მიეწოდება ექსტრაქტორს და ციკლი მეორდება. გაჯერებული ექსტრაქტული ხსნარი ჩაედინება გამოსახდელ კუბში (1). ექსტრაგენტის ცირკულაცია ტარდება მრავალჯერადად ნედლეულის სრულ გამოტუტვამდე. კუბში რჩება ექსტრაქციული ნივთიერებების კონცენტრირებული ხსნარი. ამრიგად, დანადგარში სრულდება სრული ტექნოლოგიური ციკლი თხევადი ექსტრაქტის საბოლოო პროდუქტის მიღებამდე.

#### 4.12. კრისტალიზაცია

ნივთიერების გამოკრისტალეების პროცესი არის ხსნარიდან ან მდნარიდან მყარი ფაზის გამოყოფა კრისტალეების სახით. კრისტალიზაცია წარმოადგენს მყარი ნივთიერების სუფთა სახით მიღების ძირითად მეთოდს. ეს აიხსნება იმით, რომ ყოველთვის შეიძლება შევარჩიოთ კრისტალიზაციის ისეთი პირობები (ტემპერატურა, კონცენტრაცია), როდესაც არასასურველი მინარევები რჩება ხსნარში. ამიტომ მყარი ნივთიერების სუფთა სახით გამოყოფისას კრისტალიზაციის პრიონციპი იგივეა, რაც რექტიფიკაციისა სითხეებისათვის.

ნივთიერების კრისტალიზაციის შემდეგ დარჩენილ ხსნარს უწოდებენ “დედახსნარს”. რაც უფრო მსხვილია და მკვეთრად არის გამოსახული კრისტალეების ფორმა, მით უფრო ადვილია კრისტალეების გამოყოფა. კრისტალეებს გამოყოფენ ფილტრაციით ან ცენტრიფუგირებით.

კრისტალიზაციის პირობების მიხედვით შეიძლება ერთმა და იმავე ნივთიერებამ მოგვცეს სხვადასხვა ზომის და ფორმის კრისტალეები, ან პირიქით - რამდენიმე ნივთიერებამ შეიძლება მოგვცეს ერთნაირი ზომის და ფორმის კრისტალეები. ნივთიერების ხსნადობა დამოკიდებულია მის ქიმიურ ბუნებაზე, გამხსნელის ბუნებასა და ხსნადობის ტემპერატურაზე.

ხსნარს, რომელიც მოცემულ ტემპერატურაზე შეიცავს გახსნილი ნივთიერების მაქსიმალურ ოდენობას, უწოდებენ **ნაჯერ ხსნარს**. თუ იმავე ტემპერატურაზე ხსნარში აღმოჩნდება ამ მაქსიმალურ ოდენობაზე მეტი ნივთიერება, ამბობენ რომ ხსნარი **გადაჯერებულია**. ხსნარს, რომელშიც შეიძლება კიდევ გაიხსნას

მოცემული ნივთიერება უჯერი ხსნარი ჰქვია. ნაჯერი ხსნარი იმყოფება წონასწორულ მდგომარეობაში მყარ ნივთიერებასთან. გადაჯერებული ხსნარიდან მისი გაცივების დროს ხელახლა გამოიყოფა ზედმეტი ნივთიერება. ამ პროცესს უწოდებენ კრისტალიზაციას.

**ხსნადობა** ეწოდება მოცემული ნივთიერების კონცენტრაციას ნაჯერ ხსნარში. იგი იზომება პროცენტობით ხსნარის მასასთან მიმართებაში ან გახსნილი ნივთიერების წილის რაოდენობით 1 წილ გამხსნელში. მაგალითად, საქაროზის ხსნადობა  $20^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურაზე შეადგენს 66,92%, ანუ 1 წილ წყალზე მოდის საქაროზის 2,023 წილი.

ტემპერატურის გაზრდით მყარი ნივთიერებების უმეტესობის ხსნადობა იზრდება. მაგალითად, საქაროზის ხსნადობა წყალში  $60^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურაზე შეადგენს 74,43%, ხოლო  $100^{\circ}\text{C}$  ტემპერატურაზე – 82,87%.

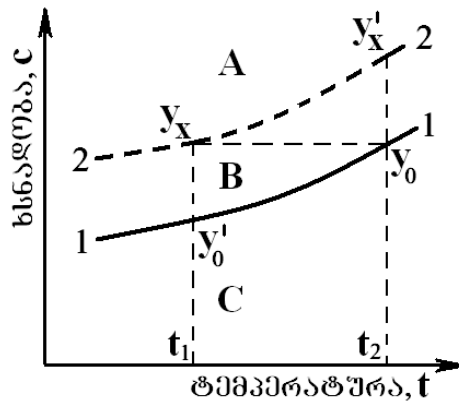
ხსნარის გადაჯერება მიიღწევა შემდეგ შემთხვევებში:

- გამხსნელის გამორთქვლით ხსნარის დუღილის დროს საორთქლებელ აპარატში;
- გამხსნელის აორთქლებით ღია ჭურჭელში მისი დუღილის ტემპერატურაზე უფრო დაბალ ტემპერატურაზე;
- ნაჯერი ხსნარის გაცივებით; ამ შემთხვევაში ხსნარი ხდება გადაჯერებული, რადგან ნივთიერებების უმეტესობის ხსნადობა ტემპერატურის შემცირებასთან ერთად მცირდება;
- ხსნარში წყალამრთმევი ნივთიერების დამატებით; ამ შემთხვევაში წყლის ნაწილი დაკავშირებული იქნება წყალამრთმევი ნივთიერებასთან.

ხსნარის გადაჯერებულობა ხასიათდება გადაჯერებულობის  $K$  კოეფიციენტით.  $K$  არის გადაჯერებულ ხსნარში ნივთიერების შემცველობის შეფარდება მის შემცველობასთან ნაჯერ ხსნარში. როდესაც  $K < 1$  ხსნარი უჯერია, როდესაც  $K = 1$  ხსნარი ნაჯერია, როდესაც  $K > 1$  ხსნარი გადაჯერებულია.

4.30-ე სურათზე წარმოდგენილია ხსნარის მდგომარეობის დიაგრამები ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით.

გრაფიკზე A არე შეესაბამება ლაბილური (აბსოლუტურად არამდგრადი) ხსნარების არეს; B არე – მეტასტაბილურ (სისტემის მდგომარეობა, რომელიც სტაბილურობას ინარჩუნებს მცირე რყევების დროს) ხსნარებს; C - სტაბილური ხსნარების არეს. 1-1 არის ხსნადობის მრუდი; 2-2 – მეტასტაბილური არის ზღვარი.



სურ. 4.30. სხნარის მდგომარეობის დიაგრამები

ლაბილური არის შესაბამისი კონცენტრაციის სხნარი კრისტალდება სწრაფად, ხოლო მეტასტაბილური არის შესაბამისი კონცენტრაციის სხნარი ტემპერატურაზე დამოკიდებულებით კრისტალდება შედარებით ნელა. იმ სხნარებისათვის, რომელთა სხნადობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე მკვეთრად არ არის გამოსატული, გადაჯერებული სხნარების არეში გადასვლა მიმდინარეობს ტემპერატურის მნიშვნელოვანი შემცირების დროს. ტემპერატურის  $t_2$ -დან  $t_1$ -მდე ცვლილების დროს, სხნარიდან მყარი ფაზის გამოყოფა მცირეა და პროპორციულია სხნარის კონცენტრაციის  $y_x - y_0'$  ცვლილების.

სხნარის გადაჯერება შესაძლებელია  $t_2$  მუდმივი ტემპერატურის დროს გამსხნელის ნაწილობრივი მოშორებით. ამასთან სხნარიდან გამოიყოფა მყარი ფაზის ნაწილი, რომელიც პროპორციულია  $y_x' - y_0$  კონცენტრაციათა სხვაობის. შესაბამისად, ასეთი სხნარების კრისტალიზაცია შესაძლებელია როგორც ტემპერატურის შემცირებით, ასევე გამსხნელის ნაწილობრივი მოშორებით.

იმ სხნარისათვის, რომლის სხნადობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე მკვეთრად არის გამოსატული, კრისტალიზაციის ოპტიმალურ მეთოდს წარმოადგენს ტემპერატურის შემცირება.

თუ ნივთიერების სხნადობა არ იცვლება ტემპერატურის გაზრდით, კრისტალიზაცია მიზანშეწონილია გამსხნელის მოცილებით.

#### 4.12.1. კრისტალიზაციის პროცესის მატერიალური ბალანსი

კრისტალიზაციის მატერიალური ბალანსი განისაზღვრება ორი განტოლებით. პირველი განტოლების მიხედვით სხნარის საწყისი მასა ( $G_{საწ.}$ )

უდრის ხსნარის საბოლოო ანუ დედახსნარის მასის ( $G_{\text{ხსნ.}}$ ), წარმოქმნილი კრისტალების მასის ( $G_{\text{კ}}$ ) და გამოყოფილი გამხსნელის მასის ( $W$ ) ჯამს

$$G_{\text{ხსნ.წ.}} = G_{\text{ხსნ.}} + G_{\text{კ}} + W, \text{ კგ.}$$

მეორე განტოლების მიხედვით ხსნარში მშრალი ნივთიერების (გახსნამდე) რაოდენობა უდრის დედახსნარსა და კრისტალებში მყოფ მშრალ ნივთიერებათა ჯამს

$$G_{\text{ხსნ.წ.}} \cdot \eta_{\text{ხსნ.წ.}} = G_{\text{ხსნ.}} \cdot \eta_{\text{ხსნ.}} + G_{\text{კ}} \frac{M_2}{nM_1 + M_2} \text{ კგ,}$$

სადაც  $\eta_{\text{ხსნ.წ.}}$  და  $\eta_{\text{ხსნ.}}$  არის ხსნარის საწყისი და საბოლოო კონცენტრაცია;

$M_1$  და  $M_2$  - გამხსნელის და გახსნილი ნივთიერების მოლეკულური მასა;

$n$  - გამხსნელის მოლეკულების რიცხვი ერთ მოლეკულა კრისტალურ ნივთიერებაზე (კრისტალჰიდრატის მოლეკულის რიცხვი).

თუ კრისტალები გამოიყოფა უწყლოდ, მაშინ  $n=0$  და ბოლო განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$G_{\text{ხსნ.წ.}} \cdot \eta_{\text{ხსნ.წ.}} = G_{\text{ხსნ.}} \cdot \eta_{\text{ხსნ.}} + G_{\text{კ}}, \text{ კგ,}$$

#### 4.12.2. კრისტალიზაციის სითბური ბალანსი

კრისტალიზაციის პროცესის თბური ბალანსის შემოსავალს ეკუთვნის შემდეგი სიდიდეები:

1. სითბოს რაოდენობა, რომელიც აქვს საწყის (საკრისტალიზაციო) ხსნარს

$$Q_1 = G_{\text{ხსნ.წ.}} \cdot c_{\text{ხსნ.წ.}} \cdot t_{\text{ხსნ.წ.}}, \text{ ჯ,}$$

სადაც  $c_{\text{ხსნ.წ.}}$  და  $t_{\text{ხსნ.წ.}}$  არის საკრისტალიზაციო ხსნარის საწყისი თბოტევადობა და ტემპერატურა.

2. კრისტალიზაციის სითბო

$$Q_2 = G_{\text{კ}} \cdot r_{\text{კ}}, \text{ ჯ,}$$

სადაც  $r_{\text{კ}}$  არის კრისტალიზაციის კუთრი სითბო.

თბური ბალანსის გასავალს ეკუთვნის:

1. ხსნარის რაოდენობა, რომელიც საჭიროა ხსნარის გასაცივებლად ( $Q$ ). ეს სითბო მიაქვს მაცივებელ აგენტს, მისი საშუალებით გაიანგარიშება გაცივების ზედაპირი, გაცივების ხანგრძლივობა და სხვა. თუ კრისტალიზაცია მიმდინარეობს ხსნარის აორთქლების შედეგად მაშინ  $Q$  მიეკუთვნება შემოსავალს.

2. თბური ბალანსის გასაგავლს ეკუთვნის აგრეთვე ის  $Q_2$  სითბო, რომელიც მიჰყვება გამხსნელს მისი აორთქლების შედეგად

$$Q_2 = W \cdot i, \text{ ჯ,}$$

სადაც  $W$  არის გამხსნელის ორთქლის რაოდენობა, კგ;

$i$  - ამ ორთქლის თბოშემცველობა, ჯ/კგ.

3. სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც მიჰყვება დედახსნარს

$$Q_4 = G_{\text{საბ.}} \cdot c_{\text{საბ.}} \cdot t_{\text{საბ.}}, \text{ ჯ,}$$

სადაც  $c_{\text{საბ.}}$  და  $t_{\text{საბ.}}$  არის საბოლოო ანუ დედახსნარის თბოტევადობა და ტემპერატურა.

4. სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც მიჰყვება კრისტალებს

$$Q_5 = G_{\text{კ}} c_{\text{კ}} t_{\text{კ}}, \text{ ჯ,}$$

სადაც  $c_{\text{კ}}$  და  $t_{\text{კ}}$  არის კრისტალების თბოტევადობა და ტემპერატურა.

5. სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც იკარგება გარემოში თბური დანაკარგების სახით ( $Q_{\text{დან.}}$ ).

ამგვარად, კრისტალიზაციის თბური ბალანსი გამოისახება შემდეგი განტოლებით:

$$Q_1 + Q_2 = Q + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_{\text{დან.}}$$

ან

$$Q = G_{\text{საწ.}} \cdot c_{\text{საწ.}} \cdot t_{\text{საწ.}} + G_{\text{კ}} \cdot r_{\text{კ}} = Q + W \cdot i + G_{\text{საბ.}} \cdot c_{\text{საბ.}} \cdot t_{\text{საბ.}} + G_{\text{კ}} c_{\text{კ}} t_{\text{კ}} + Q_{\text{დან.}}$$

უკანასკნელი განტოლებიდან სითბოს რაოდენობა, რომელიც საჭიროა კრისტალიზაციის დროს გაცივებისათვის, იქნება

$$Q = G_{\text{საწ.}} \cdot c_{\text{საწ.}} \cdot t_{\text{საწ.}} + G_{\text{კ}} \cdot r_{\text{კ}} - W \cdot i - G_{\text{საბ.}} \cdot c_{\text{საბ.}} \cdot t_{\text{საბ.}} - G_{\text{კ}} c_{\text{კ}} t_{\text{კ}} - Q_{\text{დან.}}$$

#### 4.12.3. კრისტალიზაციის პროცესის აპარატები

საკრისტალიზაციო აპარატურა ძირითადად იყოფა ორ ჯგუფად: პირველ ჯგუფს ეკუთვნის აპარატები, რომლებშიც კრისტალიზაცია მიმდინარეობს გამხსნელის აორთქლებით. მეორე ჯგუფს ეკუთვნის აპარატები, რომლებშიც ნივთიერების გამოკრისტალება ხდება ხსნარის გაცივების შედეგად.

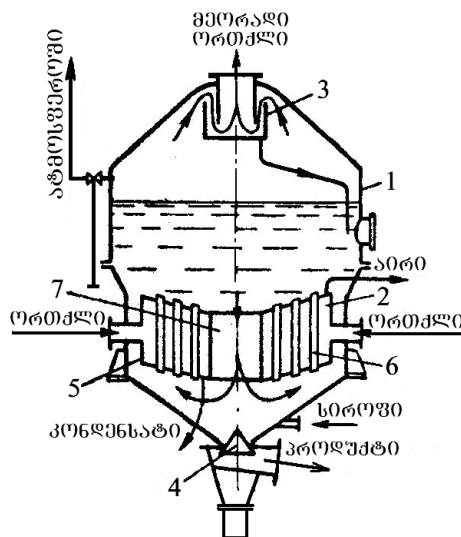
მოქმედების პრინციპის მიხედვით კრისტალიზატორები იყოფა პერიოდული და უწყვეტი ქმედების აპარატებად, გამხსნელის ნაწილობრივი გამოყოფით და

ხსნარის გაცივებით. კრისტალიზაცია წყლის ნაწილობრივი გამოყოფით ხორციელდება ვაკუუმ-აპარატებში.

4.31-ე სურათზე წარმოდგენილია პერიოდული ქმედების ვაკუუმ-აპარატი.

აპარატი გამოიყენება შაქრის ჭარხლის გადასამუშავებელ ქარხნებში გადაჯერებული სიროფების მისაღებად, მშრალი ნივთიერებების 92-93% კონცენტრაციით. მათ იყენებენ აგრეთვე კრისტალიზაციის ცენტრების წარმოსაქმნელად და მათი ზრდის დაწყების ორგანიზაციისათვის, რის შემდეგაც კრისტალების მასას კრისტალშორის სიროფთან ერთად აგზავნიან კრისტალების შემდგომი ზრდისთვის კრისტალიზატორ-სარეგში.

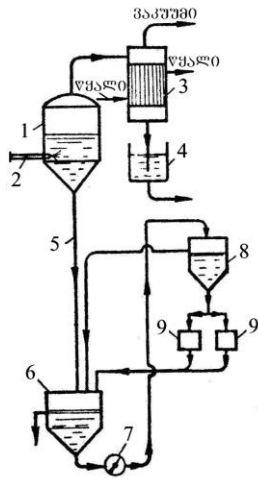
აპარატის კორპუსის (1) შიგნით დაკიდებულია გამცხელებელი კამერა (2) და დამჭერ-სეპარატორი (3). აპარატის ქვედა ნაწილში დაყენებულია სარქველური მოწყობილობა (4) პროდუქტის ჩამოსაშვებად.



სურ. 4.31. პერიოდული ქმედების ვაკუუმ-აპარატი

გამცხელებელი კამერა შედგება ორი კონუსური მილებიანი ცხურისაგან (5), რომლებშიც დავალებულია 102 მმ დიამეტრის მილები (6), ხოლო ცხურის ცენტრთან მიდებულა 800 მმ დიამეტრის საცირკულაციო მილი (7). მასის ცირკულაცია მიმდინარეობს საცირკულაციო მილში და წრიულ არეში, რომელიც წარმოქმნილია აპარატის კორპუსსა და გამცხელებელ ზედაპირს შორის. შემდეგ მასა ადის გამცხელებელ მილებში, როგორც ეს ნაჩვენებია 4.31 სურათზე.

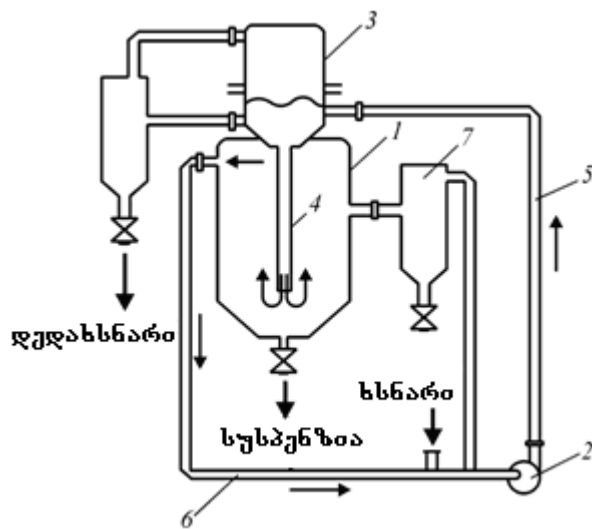
4.32-ე სურათზე წარმოდგენილია ვაკუუმ-კრისტალიზატორის დანადგარის სქემა, რომელიც მუშაობს შემდგენიარად: საცავში (1) მფრქვევანას (2) საშუალებით შეჭყავთ ცხელი საკრისტალიზაციო ხსნარი.



სურ. 4.32. ვაკუუმ-კრისტალიზატორის დანადგარი

საცავში შექმნილია ვაკუუმი, რის შედეგადაც მასში ხდება ხსნარის აორთქლება. უკანასკნელი კონდენსირდება კონდენსატორში (3) და გროვდება ჰიდრაულიკურ ჩამკეტში (4). საცავიდან (1) დედახსნარი და კრისტალები ბარომეტრული მილით (5) ჩამოდის ქვედა საცავში (6), საიდანაც ტუმბოს (7) საშუალებით მიდის შემკრებში (8), აქედან კი - ცენტრიფუგებზე (9), სადაც კრისტალები გამოეყოფა დედახსნარს. უკანასკნელი მიდის ისევ საცავში (6) და მისი შუა ნაწილიდან გამოდის გარეთ.

მსხვილკრისტალიანი პროდუქტების მისაღებად გამოიყენება ვაკუუმ-კრისტალიზატორები (სურ. 4.33) შეწონადი ფენით. კრისტალიზატორი შედგება კორპუსისაგან (1), ტუმბოსაგან (2), სეპარატორისაგან (3), ცირკულაციური მილებისაგან (4), (5), (6) და წვრილი კრისტალების დამლექისაგან (7).

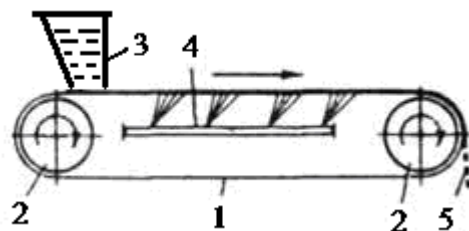


სურ. 4.33. ვაკუუმ-კრისტალიზატორი შეწონადი ფენით

ცხელი ნაჯერი ხსნარი მიეწოდება ცირკულაციური ტუმბოს შემწოვ ხაზს, ერევა ცირკულაციურ დედახსნარს და აცხელებს მას  $0,2-2^{\circ}\text{C}$ -მდე. შემდეგ ხსნარი შედის სეპარატორში (3) და აორთქლების ხარჯზე ცივდება იმდენივე გრადუსით. სეპარატორიდან (3) ნაჯერი ხსნარი მილით (4) ჩაედინება კორპუსში (1), რომლის ქვედა ნაწილში ჩამოედინება სუსპენზია, ხოლო ზედა ნაწილიდან მილით (6) და ტუმბოთი (2) გაიწოვება დედახსნარი.

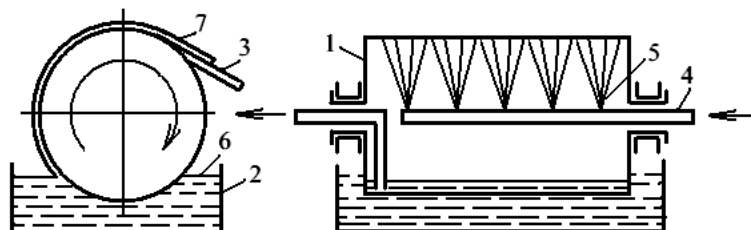
თხელფირფიტოვანი პროდუქტების მისაღებად იყენებენ უწყვეტი ქმედების ლენტურ, დოლურ და დისკურ კრისტალიზატორებს. მათში პროდუქტის გამყარება მიმდინარეობს გაცილებით ინტენსიურად, ვიდრე ფორმებში.

4.34 სურათზე მოცემულია ლენტური კრისტალიზატორის სქემა. იგი შედგება: ლითონის უწყვეტი ბადისაგან (1), რომელიც გადადებულია წამყვან და ამოვლ დოლებზე (2), მკვებავი ბუნკერისგან (3), მაცივებელი მოწყობილობისგან (4). გამყარებული პროდუქტი (5) თხელი ფენით ბუნკერიდან (3) უწყვეტად მიეწოდება ლითონის მოძრავ ლენტზე (1), რომელზედაც იგი ცივდება სრულ გამყარებამდე.



სურ. 4.34. ლენტური კრისტალიზატორი

დოლურ აპარატში (სურ. 4.35) პროდუქტის კრისტალიზაცია ხდება მბრუნავი დრუ დოლის (1) გარე ზედაპირზე. დოლი შიგნიდან ცივდება მილით (4) მიწოდებული მაცივებელი აგენტით, რომელიც საქმენებით (5) ესხმება მის შიგა ზედაპირს. დოლი ნაწილობრივ ჩაშვებულია ხსნარის (6) აბაზანაში (2). გამყარებული პროდუქტი (7) დოლის ზედაპირიდან მოიხსნება უძრავი დანით (3).



სურ. 4.35. დოლური კრისტალიზატორი

ანალოგიური აპარატით მზადდება რძის ფხვნილი ნატურალური რძისგან, იმ განსხვავებით, რომ დოლი ამ შემთხვევაში ცხელდება და მის გარე სარკისებურ

ზედაპირზე თხევადი ფაზის აორთქლების შედეგად მიიღება მშრალი რძის ფირფიტები, რომლებიც შემდგომში ქუცმაცდება და მიიღება ფხვნილი.

#### 4.13. სუბლიმაცია

სუბლიმაცია არის ნივთიერების გადასვლა მყარი ფაზიდან აირადში თხევადი ფაზის გაუფლელად. სუბლიმაციისათვის დამახასიათებელია პროცესის შექცევადობა. ამის გამო შესაძლებელია მყარი ნივთიერებების ნარევიდან ერთი ან რამდენიმე კომპონენტის გამოყოფა სუბლიმაციის გზით, ხოლო შემდგომში, უკვე სხვა, შესაბამისი პირობების შექმნის შედეგად – აირადი ფაზიდან საჭირო კომპონენტის მიღება სუფთა სახით.

სუბლიმაციის პროცესი განსაკუთრებით ფართოდ გამოიყენება ნივთიერების გასაწმენდად არააქროლადი მინარევებისაგან. გარდა ამისა, სუბლიმაცია გამოიყენება ისეთი ნივთიერების გაუწყლოებისათვის (შრობისათვის), რომლისთვისაც მიუღებელია მაღალი ტემპერატურის ზემოქმედება. სუბლიმაცია მიმდინარეობს ჩვეულებრივი წნევის ან ვაკუუმის პირობებში.

სუბლიმაციის პროცესის ანალიზისათვის შეგვიძლია გამოვიყენოთ სისტემის მდგომარეობის დიაგრამა ტემპერატურა–წნევა ( $t-P$ ), რომელიც ახასიათებს წონასწორობას მყარ, თხევად და აირად ფაზებს შორის (სურ. 4.36). აორთქლების მრუდი  $SC$  შეესაბამება წონასწორობის მდგომარეობას თხევად და ორთქლის ფაზებს შორის. ღღობის  $SB$  მონაკვეთი განსაზღვრავს წონასწორობას მყარსა და თხევად ფაზებს შორის. სამმაგი  $S$  წერტილის წნევაზე უფრო დაბალი წნევის პირობებში მყარ ნივთიერებას არ შეუძლია გაღებობა და ამ პირობებში მიმდინარეობს ნივთიერების მყარი ფაზიდან აირადში გადასვლის პროცესი თხევადი ფაზის გაუფლელად.

მყარი ნივთიერების სუბლიმაციის პროცესი რაღაც  $P_D$  წნევის პირობებში შეგვიძლია წარმოვიდგინოთ  $DEF$  მუშა პროცესის სახით (სურ. 4.36).  $DE$  მონაკვეთი შეესაბამება მყარი ნივთიერების გათბობას  $t_D$  ტემპერატურიდან აორთქლების  $t_E$  ტემპერატურამდე.  $E$  წერტილში მიმდინარეობს სუბლიმაცია  $t_E$  ტემპერატურის პირობებში, ხოლო  $EF$  მონაკვეთი შეესაბამება წარმოქმნილი ორთქლის გადახურებას  $t_F$  ტემპერატურამდე. დესუბლიმაციის პროცესს, როგორც სუბლიმაციის პროცესის საპირისპიროს, გამოხატავს  $FED$  მონაკვეთი.



სუბლიმაციის აპარატის გასაანგარიშებლად თავდაპირველად  $t-p$  დიაგრამის მიხედვით განსაზღვრავენ პროცესის მუშა პარამეტრების სიდიდეებს. შემდეგ განისაზღვრება პროცესის მიმდინარეობისათვის საჭირო ზედაპირის ფართობი

$$F = \frac{G}{\beta(p_{სუბ} - p_{კონდ})} \text{ მ}^2,$$

სადაც  $G$  სუბლიმირებული პროდუქტის რაოდენობაა, კგ/წმ;

$\beta$  - მასაგადაცემის კოეფიციენტი, კგ/(მ<sup>2</sup>წმ.პა);

$p_{სუბ}$  - ნივთიერების ზედაპირზე სუბლიმაციის ორთქლის პარციალური წნევა, პა;

$p_{კონდ}$  - კონდენსაციის ტემპერატურაზე სუბლიმაციის ორთქლის პარციალური წნევა, პა.

სუბლიმატორის დანარჩენი ზომები მიიღება კონსტრუქციული მოსაზრებებით მიღებული მუშა ზედაპირის ფართობის მიხედვით.

#### 4.13.1. სუბლიმაციის სითბური ბალანსი

სუბლიმაციის სითბური ბალანსი შედგება სითბოს შემოსავლის და გასაველისაგან.

სუბლიმაციის პროცესის დროს სითბოს შემოსავალს ეკუთვნის:

1. სითბო, რომელიც აქვს საწყის მყარ ნივთიერებას

$$Q_1 = G_{საყ.} \cdot c_{საყ.} \cdot t_{საყ.} \text{ ჯ},$$

სადაც  $G_{საყ.}$ ,  $c_{საყ.}$ ,  $t_{საყ.}$  არის მყარი საწყისი ნივთიერების მასა, თბოტევადობა და ტემპერატურა.

2. სითბო რომელსაც გადავცემთ საწყის ნივთიერებას ასაორთქლებლად ( $Q$ ).

სუბლიმაციის გასაველს ეკუთვნის:

1. სითბო, რომელსაც ართმევს მზა პროდუქტი (სუბლიმატი)

$$Q_2 = G_{\delta} c_{\delta} t_{\delta} + G_{\delta} q \text{ ჯ},$$

სადაც  $G_{\delta}$  და  $c_{\delta}$  არის მზა პროდუქტის მასა და თბოტევადობა;

$t_{\delta}$  - სუბლიმაციის პროცესის საბოლოო ტემპერატურა;

$q$  - სუბლიმაციის ფარული სითბო, რომელიც უდრის ნივთიერების დნობის და აორთქლების სითბოების ჯამს.

2. სითბო, რომელიც იკარგება სუბლიმაციის შემდეგ მიღებულ ნარჩენებში

$$Q_3 = G_6 c_6 t_3 \text{ ჯ,}$$

სადაც  $G_6, c_6, t_3$  არის ნარჩენის მასა, თბოტეკადობა და სუბლიმაციის ტემპერატურა.

3. სითბო თბური დანაკარდების სახით ( $Q_{დან.}$ ).

ამგვარად, სუბლიმაციის თბური ბალანსი მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$Q_1 + Q = Q_2 + Q_3 + Q_{დან.} \text{ ან}$$

$$G_{საწ.} c_{საწ.} t_{საწ.} + Q = G_3 c_3 t_3 + G_3 q + G_6 c_6 t_3 + Q_{დან.} ,$$

საიდანაც

$$Q = (G_3 c_3 + G_6 c_6) t_3 - G_{საწ.} c_{საწ.} t_{საწ.} + Q_3 q + Q_{დან.} \text{ ჯ.}$$

სუბლიმაციის შედეგად მიღებული ორთქლის კონდენსაციისათვის საჭიროა სითბოს წართმევა. სითბოს ის რაოდენობა, რომელიც იხარჯება ორთქლის ისევ მყარ მდგომარეობაში გადასაყვანად აღვნიშნოთ  $Q_{კონდ.}$ -ით.

$$Q_{კონდ.} = G_3 q + G_3 c_3 (t_3 - t_{საწ.}'' ),$$

სადაც  $t_{საწ.}''$  არის მზა პროდუქტის საწყისი ტემპერატურა.

ბოლო განტოლებიდან ჩანს, რომ სითბო ( $Q_{კონდ.}$ ), რომელიც უნდა წავართვათ ორთქლს მზა პროდუქტის (სუბლიმატის) მისაღებად, შედგება სუბლიმაციის ფარული სითბოსა და იმ სითბოსაგან, რომელიც საჭიროა მზა პროდუქტის გასაცივებლად ბოლო ტემპერატურიდან ( $t_3$ ) მზა პროდუქტის ტემპერატურამდე ( $t_{საწ.}''$ ).

#### 4.14. შრობა

ყოველგვარი პროდუქტიდან ზოგადად სითხის გამოყოფას შრობა ეწოდება. სითხის მოცილების შედეგად პროდუქტში არსებული სხვა ნივთიერებების კონცენტრაცია იზრდება, რის შედეგადაც ის იძენს ახალ სასარგებლო თვისებებს. მაგალითად, მალფუჭებადი კვების პროდუქტი გაშრობის შემდეგ ხდება მედევი და კარგად ინახება, მისი კალორიულობა მატულობს. შრობის მიზანია აგრეთვე პროდუქტისათვის ბუნებრივი თვისებების (ფერის, გემოს, არომატის, ვიტამინების შემცველობის) შენარჩუნება. მრავალი პროდუქტის შრობის დროს საჭიროა ზოგიერთი შემადგენელი ნაერთის ქიმიური გარდაქმნა, მაგალითად, შაქრის კარამელიზაცია, ცილების შაქრებთან შეერთება და სხვ. ხშირ შემთხვევაში მოითხოვება შრობა ისეთ პირობებში, რომ პროდუქტმა

შეინარჩუნოს ფერმენტების აქტივობა (მაგალითად, ჩაის ფოთლის ღნობის, საფუარის შრობის და სხვ. შემთხვევაში).

პროდუქტიდან სითხე შეიძლება გამოიყოს სხვადასხვა მეთოდით:

1. მექანიკური ძალების ზემოქმედებით დაწნეხვის, ფილტრაციის საშუალებით ან ცენტრიფუგებში გატარებით;
2. ფიზიკურ-ქიმიური ძალების ზეგავლენით, სითხის გადატანის ნაკლები შესაძლებლობის მქონე ნივთიერების გამოყენებით;
3. სითბოს ზეგავლენით. ამ დროს ხდება სითხის აგრეგატული მდგომარეობის შეცვლა: აორთქლება, კონდენსაცია ან გაყინვა.

გასაშრობი პროდუქტი შეიძლება იყოს მყარი, თხევადი ან აირადი. კვების მრეწველობაში გასაშრობი პროდუქტი ძირითადად მყარი ან თხევადია. ამიტომ კვების მრეწველობაში შრობა განიხილება, როგორც მყარი ან თხევადი პროდუქტებიდან ტენის აორთქლება. აორთქლება ენდოთერმული პროცესია (მიმდინარეობს სითბოს შთანთქმით), ამიტომ ამ პროცესის განსახორციელებლად აუცილებელი ხდება გარკვეული რაოდენობის სითბოს დახარჯვა.

ასაორთქლებელი სითხე შეიძლება იყოს სხვადასხვა სახის, მაგრამ კვების პროდუქტებიდან გამოსაყოფი სითხე თითქმის ყოველთვის წყალია. პროდუქტში მყოფ სითხეს უწოდებენ ტენს, მის შემცველობას კი – ტენიანობას.

შრობის პროცესს ატარებენ სპეციალურ აპარატში, რომელსაც საშრობი დანადგარი ეწოდება.

#### 4.141. პროდუქტის ტენიანობა

რომელიმე პროდუქტის ფარდობითი ტენიანობა (%-ობით) არის პროდუქტში არსებული ტენის მასისა და პროდუქტის მასის ფარდობა გამრავლებული 100-ზე

$$W_{\%} = \frac{G_{\delta}}{G} 100\%, \quad (4.6)$$

სადაც  $W_{\%}$  არის პროდუქტის ფარდობითი ტენიანობა, %;

$G_{\delta}$  - პროდუქტში ტენის შემცველობა მასის ერთეულებით, გ, კგ და სხვა;

$G$  - პროდუქტის მასა, გ, კგ და სხვა.

თუ პროდუქტში არსებული ტენის მასას ( $G_{\delta}$ ) გავყოფთ პროდუქტის აბსოლუტურ მასაზე ( $G_{\alpha}$ ) და გავამრავლებთ 100-ზე, მაშინ მივიღებთ აბსოლუტურ ტენიანობას პროცენტობით

$$W_{\infty} = \frac{G_{\delta}}{G_{\infty}} 100 = \frac{G_{\delta}}{G - G_{\delta}} 100\%, \quad (4.7)$$

სადაც  $W_{\infty}$  არის პროდუქტის აბსოლუტური ტენიანობა;

$G_{\infty}$  - პროდუქტის აბსოლუტური მასა, რომელიც უდრის პროდუქტის და ტენის მასების სხვაობას ( $G - G_{\delta}$ ).

თუ მიღებული განტოლების მარჯვენა მხარის მრიცხველსა და მნიშვნელს გავეყოფთ  $G$ -ზე, მივიღებთ

$$W_{\infty} = \frac{100W_{\text{გ}}}{100 - W_{\text{გ}}}\%. \quad (4.8)$$

ამ განტოლებით შეიძლება პროდუქტის ფარდობითი ტენიანობის განსაზღვრა, თუ ცნობილია პროდუქტის აბსოლუტური ტენიანობა

$$W_{\text{გ}} = \frac{100W_{\infty}}{W_{\infty} + 100}\%. \quad (4.9)$$

#### 4.14.2. პროდუქტში ტენის კავშირის სახეები

საკვები პროდუქტის შრობის ანუ ტენის აორთქლების სიჩქარე დიდად არის დამოკიდებული იმ კავშირებზე, რომლებიც არსებობს ტენსა და მასალის მშრალ ნივთიერებებს შორის. ტენიანი პროდუქტი შეიძლება დავყოთ შემდეგ ჯგუფებად:

1. თხევადი პროდუქტები:

- კრისტალური ხსნარები;
- კოლოიდური ხსნარები.

2. მყარი პროდუქტები:

- კრისტალური პროდუქტები;
- კოლოიდურ-დისპერსიული აგებულების პროდუქტები.

კოლოიდური აგებულების პროდუქტები, თავის მხრივ, იყოფა სამ ჯგუფად:

1. ელასტიკური გელი, რომელიც ტენის მოცილებისას იკუმშება, მაგრამ ინარჩუნებს თავის ელასტიკურობას (ჟელატინი, აგარ-აგარი, ცომი და სხვ.);

2. მსხვრევადი გელი, რომელიც ტენის მოცილების შემდეგ მსხვრევადი ხდება და ადვილი შესაძლებელია მათი ფქვილად გადაქცევა (მცენარეული ნახშირი, კერამიკული მასალები და სხვ.);

3. კოლოიდური, კაპილარულ-ფოროვანი პროდუქტები, რომელთა ელასტიკური კაპილარები შრობის შედეგად მჭიდროვდება, მკვრივდება და მყიფე ხდება (მარცვლეული, პური და სხვ.).

გასაშრობ პროდუქტებში ტენსა და მშრალ ნივთიერებებს შორის შესაძლებელია შემდეგი სახის კავშირი:

1. ქიმიური კავშირი – იონური და მოლეკულური. ქიმიურად ბმული წყალი მასალაში ყველაზე მჭიდროდაა დაკავშირებული. ამ კავშირის დასარღვევად შრობა არ არის საკმარისად ეფექტური. ქიმიურად დაკავშირებული ტენის მოსაცილებლად საჭიროა პროდუქტის გამოწვა ან ქიმიური ზემოქმედება მასზე.

2. ფიზიკურ-ქიმიურად დაკავშირებული ტენი: ადსორბციული, ოსმოსური ან სტრუქტურული.

ადსორბციული ტენი დაკავშირებულია მასალის ზედაპირული ძალებით. კოლოიდური ნივთიერებები ხასიათდება დიდი კუთრი ზედაპირით, რის გამოც მათი შთანთქმის უნარი დიდია. ადსორბციული წყალი დაკავშირებულია მოლეკულური ძალების ველით. ეს კავშირი იმდენად ძლიერია, რომ წყალი კარგავს თავის ჩვეულებრივ თვისებებს. ამ წყალს ბმული წყალი ეწოდება. ადსორბცია ეგზოთერმული პროცესია. გამოყოფილ სითბოს ჰიდრატაციის სითბო ეწოდება;

3. ოსმოსურად დაკავშირებული ან სტრუქტურული ტენი. ეს ტენი ადსორბციულ წყალთან შედარებით უფრო სუსტი ძალებით არის დაკავშირებული მასალასთან. ოსმოსურად დაკავშირებული სტრუქტურული ტენი შრობის საშუალებით შეიძლება გამოიყოს პროდუქტიდან;

4. მექანიკურად დაკავშირებული ტენი, რომელიც არსებობს მასალის კაპილარებში და მის ზედაპირზე. ზედაპირული და კაპილარებში არსებული ტენი შედარებით სუსტად არის დაკავშირებული მასალასთან. მას თავისუფალ ტენს უწოდებენ და მისი მოცილება შესაძლებელია გამოწნეხვით ან აორთქლებით.

#### 4.14.3. შრობის მატერიალური ბალანსი

შრობის მატერიალური ბალანსის შესადგენად, ჩვეულებრივ, მოცემულია გასაშრობი პროდუქტის რაოდენობა  $G_1$  კგ, მისი ტენიანობა  $W_1$  % და აგრეთვე გამშრალი პროდუქტის ტენიანობა  $W_2$  % ან მისი რაოდენობა  $G_2$  კგ.

ბალანსის შედგენის დროს ეყრდნობიან იმ დებულებას, რომ შრობის პროცესში პროდუქტში არსებული მშრალი ნივთიერების რაოდენობა უცვლელი რჩება.

ამის საფუძველზე შეგვიძლია დავწეროთ განტოლება

$$G_1 \frac{100 - W_1}{100} = G_2 \frac{100 - W_2}{100},$$

აქედან მივიღებთ შემდეგ დამოკიდებულებებს:

$$G_1 = G_2 \frac{100 - W_2}{100 - W_1}, \text{ კბ.}$$

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2}, \text{ კბ}$$

შრობის შედეგად აორთქლებული ტენის რაოდენობა

$$W = G_1 - G_2 = G_1 \left( \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2} \right) = G_2 \left( \frac{W_1 - W_2}{100 - W_1} \right), \text{ კბ.}$$

თუ შრობის პროცესში მშრალი ნივთიერების რაოდენობა კლებულობს, მაშინ საჭიროა ბალანსში სათანადო შემასწორებელი კოეფიციენტის შეტანა და მშრალი ნივთიერების ბალანსი შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$G_1 \frac{100 - W_1}{100} = KG_2 \frac{100 - W_2}{100},$$

სადაც  $K < 1$  არის მშრალი ნივთიერების შენარჩუნების კოეფიციენტი. მაგალითად, თუ მშრალი ნივთიერების დანაკარგი შრობის დროს შეადგენს 1 %, მაშინ

$$K = 1,00 - 0,01 = 0,99.$$

#### 4.14.4. შრობის პროცესების კლასიფიკაცია

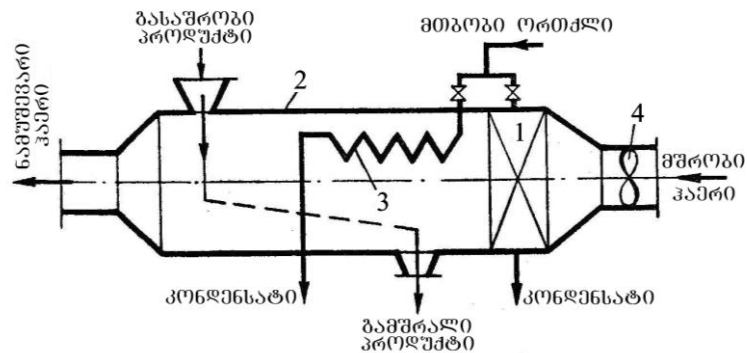
საკვები პროდუქტების შრობისათვის გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდი, რომლებიც იყოფა ორ ძირითად ჯგუფად:

1. ბუნებრივი შრობა, რომელიც მიმდინარეობს ღია ცის ქვეშ ან სპეციალურად მოწყობილ ფარდულეებში; ბუნებრივი შრობა მიმდინარეობს ძალზე ნელა, მოითხოვს დიდ ფართობს, შრომატევადია და დამოკიდებულია კლიმატურ პირობებზე. ამის გამო შრობის აღნიშნული მეთოდი თანამედროვე პირობებში თითქმის არ გამოიყენება;
2. ხელოვნური შრობა, რომელიც მიმდინარეობს სპეციალურ დანადგარებში (საშრობებში) რაიმე სახის ენერჯის დახარჯვით. ხელოვნური შრობა ძალზე ფართოდ გამოიყენება მრეწველობის პრაქტიკულად ყველა დარგში და გამოირჩევა მეთოდების სხვადასხვაობით. განვიხილოთ შრობის ძირითადი მეთოდები.

**კონვექციური შრობის** შემთხვევაში პროცესი მიმდინარეობს ცხელი ჰაერით, კვამლის აირებით ან მათი ნარევით. ჰაერიდან სითბო კონვექციით გადაეცემა

გასაშრობ პროდუქტს, რომლიდანაც გადაცემული სითბოს ზეგავლენით ორთქლდება ტენი და გადადის ჰაერში. ამგვარად, ჰაერი ერთდროულად ასრულებს სითბოს წყაროსა და აორთქლებული ტენის შთამნთქმელის როლს. კონვექციური შრობის დროს პროდუქტში სითბური ნაკადი მიმართულია ცენტრისაკენ, ტენის ნაკადი კი – ცენტრიდან ზედაპირისაკენ. ამასთან, სითბური ნაკადის ზეგავლენით წარმოქმნილი თერმოტენგამტარობა ამუხრუჭებს შრობის პროცესს. შრობის პირველ პერიოდში პროდუქტის ტემპერატურა მუდმივია და ტოლია ჰაერისა და პროდუქტში არსებული წყლის ტემპერატურისა. ამიტომ ამ პერიოდისათვის შესაძლებელია მაღალი ტემპერატურის ჰაერის გამოყენება ჰაერის ნაკადის პარალელურად დინების პირობებში. შრობის მეორე პერიოდში კი, ჩვეულებრივ, გამოიყენება უფრო ნაკლები ტემპერატურის ჰაერი ნაკადის წინააღმდეგ მიმართული პირობებში.

4.37 სურათზე მოცემულია ცხელი ჰაერით შრობის პროცესის სქემა. აირის ან ჰაერის საშუალებით შრობა მიმდინარეობს წინასწარ გამთბარი ჰაერის შეხებით გასაშრობ პროდუქტთან, რის შედეგადაც ჰაერი შთანთქავს ტენს და საშრობიდან გამოდის უფრო მეტი ტენშემცველობით.

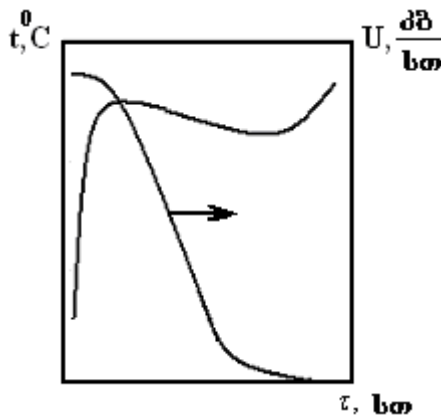


სურ. 4.37. საშრობი აპარატის სქემა

ჰაერის საშუალებით პროდუქტის შრობა მიმდინარეობს საშრობში (სურ. 4.37), რომელიც შედგება ორი აპარატისაგან. პირველი წარმოადგენს ჰაერის მთბობს – კალორიფერს (1), სადაც ორთქლის ან სხვა მთბობი ნივთიერების საშუალებით ხდება მშრობი ჰაერის გათბობა. მეორე აპარატში (2), რომელიც წარმოადგენს საშრობ საკანს, მიმდინარეობს პროდუქტის შრობა. საშრობ საკანში მშრობი ჰაერი მიეწოდება ვენტილატორით (4). ზოგჯერ დამატებით მშრობი ჰაერი თბება თვით საშრობში მოთავსებული მთბობის (3) საშუალებით. ნამუშევარი მთბობი ჰაერი საშრობიდან გამოდის იმავე ვენტილატორის (4) საშუალებით.

შრობა კონდუქციით ანუ თბოგამტარობით, ხორციელდება პროდუქტის უშუალო შეხებით ცხელ ზედაპირთან. ატმოსფერულ საშრობებში აორთქლებული ტენი საშრობი ზონიდან გამოაქვს ჰაერს, ვაკუუმ-საშრობში კი ორთქლს შეიწოვს ვაკუუმ-ტუმბო ან ეექტორი კონდენსატორის გავლით. გასათბობი ზედაპირი წარმოადგენს ღრუტანიან ფილებს ან ცილინდრებს, რომლებიც თბება მათში გამავალი ნაწვაგი აირებით. კონდუქციური შრობისას გასაშრობი პროდუქტის ტემპერატურა ჯერ სწრაფად იზრდება, შემდეგ მუდმივია, შემდეგ მცირდება და კვლავ იზრდება (სურ. 4.38).

პროდუქტის ტემპერატურა მცირდება თერმული წინააღმდეგობის გაზრდის გამო, რაც გამოწვეულია ცხელ ზედაპირსა და პროდუქტს შორის შეხების დარღვევით, აგრეთვე ინტენსიური აორთქლებისათვის საჭირო სითბოს არარსებობით.

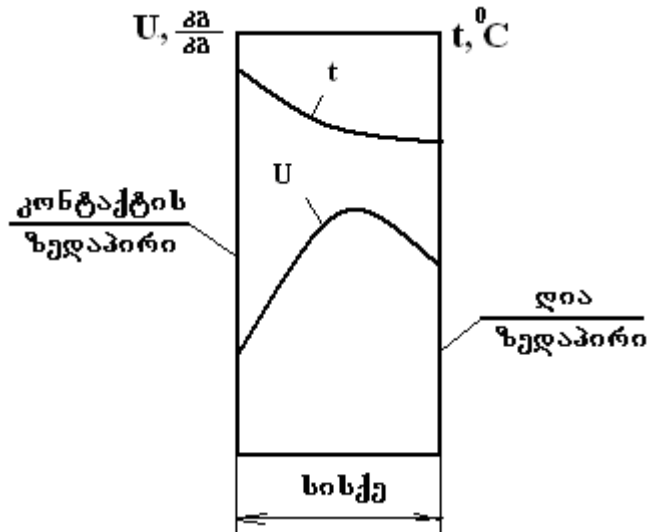


სურ. 4.38. ტემპერატურისა ( $t$ ) და ართმეული ტენის ( $U$ ) ცვლილება დროში ( $\tau$ ) კონდუქციური შრობის დროს

კონტაქტური შრობის შემთხვევაში პროდუქტში ტენიანობა უფრო სწრაფად კლებულობს ცხელი ზედაპირის მახლობლად და თვით ზედაპირზე, ვიდრე შიგა შრეებში (სურ. 4.39). პროდუქტში ტემპერატურათა სხვაობა მიმართულია ცხელი (კონტაქტური) ზედაპირიდან პროდუქტის თავისუფალი ზედაპირისაკენ. ტენიანობის მრუდს აქვს მაქსიმუმი. მრუდის აღმავალ ნაწილში ტენგამტარობა ამუხრუჭებს შრობას, შემდეგ კი აჩქარებს, რადგან მრუდის დაღმავალ ნაწილზე ტენგამტარობასა და თბოტენგამტარობას ერთი და იგივე მიმართულება აქვს თავისუფალი ზედაპირისაკენ.

კონტაქტური შრობის დროს ტენი ძირითადად ორთქლის სახით გადაადგილდება. აორთქლების ინტენსიუობა დამოკიდებულია ცხელი ზედაპირის ტემპერატურაზე, მასალის სტრუქტურასა და მის სისქეზე. როდესაც ზედაპირის ტემპერატურა შედარებით დაბალია, აორთქლება მიმდინარეობს თავისუფალი და კონტაქტური ზედაპირებიდან. კონტაქტურ ზედაპირზე წარმოშობილი ორთქლი

დიფუნდირებს თავისუფალი ზედაპირისაკენ. როდესაც კონტაქტური ზედაპირის ტემპერატურა გადააჭარბებს  $85^{\circ}\text{C}$ -ს, აორთქლება მიმდინარეობს კონტაქტური ზედაპირიდან და იმდენად ინტენსიურად, რომ ორთქლი ვერ ასწრებს პროდუქტიდან გამოსვლას და მისი წნევა იზრდება. წარმოშობილი წნევათა სხვაობა წარმოადგენს ორთქლის გადატანის მამოძრავებელ ძალას.



სურ. 4.39. ტემპერატურისა და ტენიანობის ცვლილება კონტაქტური შრობის დროს

კონტაქტური შრობა ხასიათდება ცხელი ზედაპირიდან ტენის აორთქლების მაღალი კუთრი უნარით ( $10-40$  კგ/მ<sup>2</sup>სთ), რის გამოც შრობის პროცესი ხანმოკლეა და გამშრალი პროდუქტი ინარჩუნებს საწყის ბუნებრივ თვისებებს.

**შრობა ინფრაწითელი სხივებით.** ინფრაწითელი სხივები წარმოადგენს  $0,77-340$  მკმ ტალღის სიგრძის ელექტრომაგნიტურ გამოსხივებას. ეს სხივები ხასიათდება სითბური ნაკადის დიდი ინტენსივობით, რომელიც  $30-70$ -ჯერ აღემატება ცხელი ჰაერიდან კონვექციით გადაცემულ სითბოს. ამავე დროს ინფრაწითელი სხივები ხასიათდება მცირე შეღწევადობით, რის გამოც ისინი ძირითადად გამოიყენება თხელი ფენების გასაშრობად.

ინფრაწითელი სხივების პროდუქტში შეღწევადობა დამოკიდებულია გამომსხივებელი ზედაპირის ტემპერატურასა და თვით პროდუქტის თვისებებზე, მის სტრუქტურაზე, ქიმიურ შედგენილობასა და ტენიანობაზე.

ინფრაწითელი სხივების შეღწევადობა მით უფრო მეტია, რაც უფრო ნაკლებია ტალღის სიგრძე. კვების პროდუქტებისათვის შეღწევადობა მერყეობს  $5-12$  მმ-ის საზღვრებში მათი სტრუქტურისა და ტენიანობის მიხედვით.

ინფრაწითელი სხივების მცირე შეღწევადობის გამო შთანთქმული ენერგია იწვევს პროდუქტის ზედაპირული ფენების ტემპერატურის მატებას. ზედაპირსა და

ცენტრს შორის ტემპერატურათა სხვაობა პროდუქტის შიგნით წარმოშობს ტენის გადატანას თერმოტენგამტარობით. ტენის ეს ნაკადი მიმართულია ზედაპირიდან ცენტრისაკენ ანუ ტენიანობის სხვაობით წარმოქმნილი ნაკადის საპირისპიროდ.

ზედაპირზე ტემპერატურის მატება იწვევს წყლის ორთქლის დრეკადობის გაზრდას და ტენის აორთქლების დაჩქარებას, რის გამოც ზედაპირის ტემპერატურა კლებულობს და პროდუქტის შიგნით წარმოიქმნება ტემპერატურის მაქსიმუმის იზოთერმული ზედაპირები.

დიდი სისქის პროდუქტების ინფრაწითელი გამოსხივებით შრობის შემთხვევაში მიმართავენ წყვეტილ დასხივებას. წყვეტილი დასხივების დროს პროდუქტის გათბობას პერიოდულად ცვლის მისი გაცივება ჰაერით. ამ დროს პროდუქტის ზედაპირის ტემპერატურა მცირდება, ტემპერატურული გრადიენტი იცვლის ნიშანს და ტენგამტარობას ემატება თერმოტენგამტარობა, რის შედეგადაც ტენი უფრო ინტენსიურად გადაადგილდება ცენტრიდან ზედაპირისაკენ.

პროდუქტის წყვეტილი დასხივების დროს მისი გადახურება არ ხდება, რასაც დიდი მნიშვნელობა აქვს მისი ხარისხის შესანარჩუნებლად და ელექტროენერჯის ხარჯის შესამცირებლად.

**სუბლიმაციური შრობა** საკვები პროდუქტების კონსერვირების ერთ-ერთი თანამედროვე მეთოდია. პროდუქტი შრება გაყინულ მდგომარეობაში დაბალი წნევის პირობებში. ამ დროს წყლის კრისტალები მყარი მდგომარეობიდან უშუალოდ გადადიან აირადში ანუ განიცდიან სუბლიმაციას. რადგან სუბლიმაციური შრობა მიმდინარეობს დაბალ ტემპერატურაზე ჟანგბადის მცირე შემცველობის არეში, ამიტომ გამშრალი პროდუქტი ინარჩუნებს თავის ბუნებრივ თვისებებს: გემოს, ფერს, არომატს, ვიტამინებს და ფერმენტებს. გამშრალი პროდუქტი ხასიათდება დიდი ფორიანობით, რის გამოც ადვილად ითვისებს წყალს და აღიდგენს თავის პირვანდელ მდგომარეობას. სუბლიმაციური შრობა წარმოადგენს კონსერვირების ორი გავრცელებული მეთოდის (გაყინვის და შრობის) კომბინაციას. გაყინვის უპირატესობა ისაა, რომ პროდუქტი ინარჩუნებს თავის ბუნებრივ თვისებებს, შრობა კი მნიშვნელოვნად ამცირებს პროდუქტის მასას და აკონსერვებს მას. შესაბამისად, პროდუქტის შემდგომი შენახვისა და გადაზიდვისათვის საჭირო აღარ ხდება დაბალტემპერატურიანი იზოთერმული პირობები. გამშრალი პროდუქტი, დაბალი ტენიანობის გამო, საჭიროებს ჰერმეტიკულად შეფუთვას საკონსერვო ქილებში ან პოლიმერულ აპკებში, რაც ეკონომიურობის თვალსაზრისით ძალზე მოხერხებულია.

სუბლიმაციური შრობა შედგება ხუთი ოპერაციისაგან: 1. პროდუქტის მომზადება, 2. პროდუქტის გაყინვა, 3. პირველადი შრობა, 4. მეორეული შრობა, 5. შეფუთვა.

პროდუქტის მომზადება გულისხმობს მის დახარისხებას, რათა მოხდეს დაზიანებული და უხარისხო ნაწილის მოშორება. თუ პროდუქტი სითხეა, გაყინვის წინ საჭიროა მისი ჰომოგენიზაცია. სასურველია, რომ წინასწარი მომზადების შემდეგ პროდუქტი სწრაფად გაიყინოს.

პროდუქტის გაყინვა უნდა მიმდინარეობდეს მაქსიმალურად სწრაფად, რათა წარმოქმნილი კრისტალები იყოს მცირე ზომის და თანაბრად განაწილებული. გაყინვა შეიძლება მიმდინარეობდეს ცალკე აპარატში ან თვით საშრობში. უკანასკნელ შემთხვევაში გაყინვა ხდება პროდუქტიდან წყლის აორთქლების ფარული სითბოს ართმევის ხარჯზე.

პირველადი შრობის პერიოდში ხდება გაყინული წყლის სუბლიმაცია. ამ დროს პროდუქტში წყლის უმეტესი ნაწილი გაყინულია, დანარჩენი კი – სორბირებული. სუბლიმაციისათვის იყენებენ სპეციალურ სუბლიმატორს, რომელშიც დამყარებულია მაღალი ვაკუუმი და მიეწოდება სითბო. პროდუქტის გათბობა ისე უნდა მიმდინარეობდეს, რომ ყინული არ გადნეს და არ გამოიწვიოს ტენის აღუდება. სითბური ნაკადი ისე უნდა შეირჩეს, რომ არ მოხდეს პროდუქტის ტემპერატურის აწევა, სანამ მთელი ყინული არ განიცდის სუბლიმაციას. ამ შემთხვევაში პროდუქტის მიერ მიღებული სითბო მთლიანად იხარჯება ყინულის აორთქლებაზე. ყინულის შრის სისქე თანდათან მცირდება. პროცესის ბოლოს მთელი ყინული აორთქლებულია. მიღებული მშრალი პროდუქტი არ იცვლის ზომებს. იგი მიიღებს ღრუბლისმაგვარ ფოროვან სტრუქტურას, რაც ხელს უწყობს პროდუქტის შემდგომ აღდგენას.

მეორეული შრობის დროს მიმდინარეობს პროდუქტში დარჩენილი გაუყინავი წყლის აორთქლება, რომელიც აღსორბირებულია პროდუქტის ღრუბლისმაგვარ ზედაპირზე. ამ პერიოდში პროდუქტის ტემპერატურა თანდათან იზრდება, რადგან მიწოდებული სითბოს რაოდენობა აღემატება აორთქლებაზე დახარჯულს. ეს პროცესი მიმდინარეობს პროდუქტის საბოლოო ტენიანობამდე (1–4 %). სუბლიმაციის დროს (მეორე პერიოდი) სიჩქარე და ტემპერატურა მუდმივია, მესამე პერიოდში კი ტემპერატურა იზრდება, ხოლო სიჩქარე მცირდება.

შრობის დამთავრების შემდეგ პროდუქტს შეფუთავენ საკონსერვო ქილებში ან პოლიმერულ აპკებში. ასეთი პროდუქტი ოთახის ტემპერატურაზე ხანგრძლივად ინახება. თუ პროდუქტი განკუთვნილია შემდგომი გადამუშავებისათვის, მას ათავსებენ დიდი ტევადობის პერმეტულ ჭურჭელში.

გამშრალ პროდუქტს აღსადგენად მოხმარების წინ ათავსებენ წყალში. ღრუბლისმაგვარი მშრალი პროდუქტი სწრაფად შთანთქავს წყალს, რომელიც მჭიდროდ უკავშირდება ღრუბლის ჩონჩხს. ზედმეტი წყლის ჩამოდენისა და (ზოგ შემთხვევაში) მისი ტილოთი გამშრალების შემდეგ, პროდუქტი მზადაა მოხმარებისათვის. თუ პროდუქტს ფხენილის სახე აქვს, მაშინ საჭირო კონცენტრაციის ხსნარის დამზადება ხდება სათანადო რაოდენობის წყლის დამატებით.

**აკუსტიკური შრობა.** ბგერისა და ულტრაბგერის ტალღების ზემოქმედებით შესაძლებელია შრობის პროცესის მნიშვნელოვნად დაჩქარება. ბგერის ველში წარმოიქმნება ცვალებადი შეკუმშვისა და გაფართოების არე, რომლის ზეგავლენით გასაშრობი პროდუქტის ზედაპირზე ვითარდება დადებითი და უარყოფითი წნევა. იგი იწვევს ერთგვარ ზედაპირულ კავიტაციას, რომლის ზეგავლენითაც ზედაპირულ შრეებში ჩქარდება ტენის აორთქლება. ამიტომ ბგერის ზემოქმედებას ძირითადად მნიშვნელობა აქვს შრობის პროცესის პირველ პერიოდში, სანამ გასაშრობი პროდუქტის ზედაპირი სველია. შრობის პროცესის მეორე პერიოდში ბგერების გავლენა გაცილებით ნაკლებია. ამიტომ აკუსტიკური შრობა ძირითადად გამოიყენება ღრუბლისმაგვარი, ფოროვანი, გრანულირებული პროდუქტისათვის, რომელიც ხასიათდება დიდი კუთრი ზედაპირით. ბგერების გამოყენება საშუალებას გვაძლევს შევამციროთ გამშრობი ჰაერის ტემპერატურა, რის გამოც ეს მეთოდი ხელსაყრელია ტემპერატურის მიმართ არამდგრადი პროდუქტების (ფერმენტების, ანტიბიოტიკების, კვების ზოგიერთი პროდუქტის) გასაშრობად.

აკუსტიკური შრობისას გამოსხივების წყაროდ გამოიყენება სირენები ან საყვირები, რომელთა მქ კოეფიციენტი 20 % –ს შეადგენს, ბგერების სიხშირე – 20–25 კჰც –ს, ინტენსივობა 0,01–0,1 ვტ/სმ<sup>2</sup> –ს.

**მდულარე შრის პირობებში შრობის შემთხვევაში** გასაშრობი პროდუქტის ნაწილაკები იმყოფებიან ჰაერის აღმავალ ნაკადში ნახევრად შეწონილ მდგომარეობაში. მათი უმრავლესობა განცალკევებულია ერთმანეთისაგან და ინტენსიურად მოძრაობენ, რაც დუღილს მოგვაგონებს. ამავე დროს ჰაერის მოძრაობის სიჩქარე ისეა შერჩეული, რომ არ წარიტაცებს პროდუქტის ნაწილაკებს.

ამგვარად, შრობის პროცესში ნაწილაკები წარმოშობენ მდულარე შრეს. ისინი იმყოფებიან ცრუ თხევად მდგომარეობაში. ნაწილაკების ასეთი მდგომარეობა მნიშვნელოვნად ზრდის გამშრობი ჰაერთან მათი შეხების ზედაპირს და აჩქარებს შრობის პროცესს.

მდულარე შრეში შრობა ხასიათდება დიდი ინტენსივობით. აორთქლებული ტენის რაოდენობა აღწევს რამდენიმე ასეულ კილოგრამს საათში საშრობის ფართობის ერთეულზე. ის საშუალებას გვაძლევს გასაშრობი პროდუქტი საშრობ აპარატში დავტოვოთ ოპტიმალური დროის განმავლობაში. შრობის ხანგრძლივობა საშუალოდ შეადგენს რამდენიმე წუთს. ამ მეთოდის უპირატესობა ის არის, რომ გამშრალ პროდუქტს დენადს გახდის.

მდულარე შრის უარყოფითი მხარეა დიდი ჰიდრაულიკური წინაღობა, რაც განაპირობებს ჰაერის მისაწოდებელი ვენტილატორის მუშაობისათვის გამოყენებული ელექტროენერჯის შედარებით დიდ ხარჯს.

**გამფრქვევი საშრობები** გამოიყენება დიდი საწყისი ტენიანობისა და სითხეებთან მიახლოებული დენადობის მქონე პროდუქტების გასაშრობად. ასეთ საშრობში გასაშრობი პროდუქტი სუსპენზიის ან კოლოიდური ხსნარის სახით მიეწოდება საშრობ კამერას, სადაც სპეციალური გამფრქვევის მეშვეობით ხდება მისი გაფრქვევა 10–50 მკმ ზომის წვეთებად. გასაშრობი პროდუქტის წვეთების ჰაერთან შეხების ზედაპირი პროდუქტის 1 მ<sup>3</sup> მოცულობაზე აღწევს 300000 მ<sup>2</sup>. ასეთ პირობებში შრობის სიჩქარე მნიშვნელოვნად იზრდება და მისი ხანგრძლივობა მცირდება წამის მეთხუთმედამდე.

გასაშრობი პროდუქტის გაფრქვევისათვის გამოიყენება ცენტრიდანული, პნევმატური ან მექანიკური გამფრქვევები. საშრობ კამერაში ჰაერის წრფივი სიჩქარე ნაკლები უნდა იყოს ნაწილაკების დაღეჭვის სიჩქარეზე

$$v = v_0 - v_3$$

სადაც  $v$  ნაწილაკების ზევიდან ქვევით მოძრაობის წრფივი სიჩქარეა;

$v_0$  – ნაწილაკების დაღეჭვის სიჩქარე;

$v_3$  – ჰაერის მოძრაობის სიჩქარე.

საშრობი კამერის სიმაღლე განისაზღვრება შრობის ხანგრძლივობის მიხედვით

$$H_{კამ} = v\tau,$$

სადაც  $\tau$  შრობის ხანგრძლივობაა.

**პნევმატურ საშრობებში** გასაშრობი მასალის ნაწილაკები მოძრაობენ ცხელ ჰაერთან ერთად ვარტიკალურ მილში 10–40 მ/წმ სიჩქარით. მილის სიგრძე უნდა იყოს 20–25 მ. მილში ჰაერი შეიძლება მოძრაობდეს ქვევიდან ზევით ან ზევიდან ქვევით. პროდუქტის და ჰაერის მოძრაობა თითქმის ყოველთვის პარალელურია. მილიდან გამოსვლისას ჰაერის და გამშრალი პროდუქტის ნარევი შედის ციკლონში, სადაც ხდება მშრალი პროდუქტის გამოცალკეება. პნევმატურ

დანადგარებში შრობის ხანგრძლივობა არ აღემატება რამდენიმე წამს. ამიტომ პნევმატური საშრობი გამოიყენება ისეთი პროდუქტის გასაშრობად, რომელშიც ტენის შემცველობა შედარებით მცირეა ან ისეთი მასალებისათვის, რომლებიც ადვილად კარგავენ ტენს, და შესაძლებელია კუთრი ზედაპირის მნიშვნელოვანი გაზრდა დაფქვის საშუალებით.

#### 4.14.5. შრობის კინეტიკა

პროდუქტში ტენის გადაადგილება დიფუზიური პროცესია. მისი მამოძრავებელი ძალაა პროდუქტის შიგნით და მის ზედაპირზე ტენის კონცენტრაციათა სხვაობა. ტენის კონცენტრაცია პროდუქტის შიგა ფენებში მეტია, ვიდრე ზედაპირზე, რადგან ზედაპირიდან ტენი ადვილად ორთქლდება.

აორთქლებული ტენის რაოდენობა

$$G_w = \frac{KF\Delta C}{\delta} \tau \text{ კგ,}$$

სადაც  $G_w$  ტენის რაოდენობაა, რომელმაც გაიარა  $F \text{ მ}^2$  ზედაპირი, კგ;

$\Delta C$  – პროდუქტის შიგნით და მის ზედაპირზე ტენის კონცენტრაციათა სხვაობა, კგ/კგ;

$\delta$  – იმ ფენის სისქე, რომლის გავლითაც მიმდინარეობს ტენის დიფუზია, მ;

$\tau$  – შრობის ხანგრძლივობა, წმ;

$K$  – ტენის დიფუზიის კოეფიციენტი.

ტემპერატურული გრადიენტის გავლენით თბური ნაკადის მიმართულებით გადაადგილდება ტენის გარკვეული  $G_t$  რაოდენობა, რომელიც განისაზღვრება ფორმულით:

$$G_t = \frac{K_t F \Delta t}{\delta} \tau,$$

სადაც  $\Delta t$  ტემპერატურათა სხვაობაა (მამოძრავებელი ძალა),  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\delta$  – პროდუქტის ფენის სისქე, მ;

$\tau$  – შრობის პროცესის ხანგრძლივობა, წმ.

ტენის რაოდენობა ტოლია ტენის იმ რაოდენობის, რომელიც პროდუქტის შიგა ფენებიდან გადადის ზედა ფენებისაკენ. ამგვარად, შრობის სიჩქარე დამოკიდებულია მასალის შიგნით მიმდინარე დიფუზიის სიჩქარესა და მისი

ზედაპირიდან ამ ტენის აორთქლების სიჩქარეზე. შეიძლება ითქვას, რომ შრობის სიჩქარე დამოკიდებულია მასალის თვისებებსა და შრობის პირობებზე.

შრობის სიჩქარე განისაზღვრება ფორმულით:

$$\omega = \frac{W}{F\tau} \text{ მ/წმ,}$$

სადაც  $W$  აორთქლებული ტენის მოცულობაა, მ<sup>3</sup>;

$F$  - აქორთქლების ზედაპირის ფართობი, მ<sup>2</sup>;

$\tau$  - ტენის აორთქლების ხანგრძლივობა, წმ.

1 კგ წყლის ასაორთქლებლად დახარჯული ჰაერის რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით

$$l = \frac{1}{X_2 - X_1} = \frac{1000}{d_2 - d_1},$$

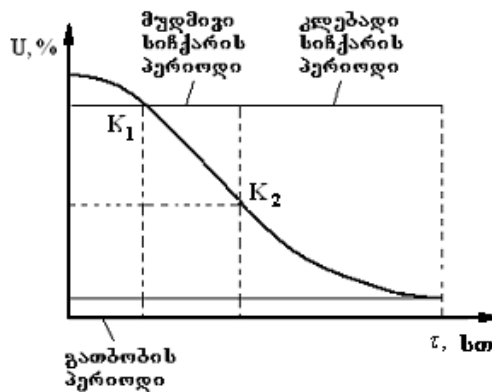
სადაც  $X_1, X_2$  არის 1 კგ აბსოლუტურად მშრალ ჰაერზე მოსული წყლის ორთქლის რაოდენობა (ტენშემცველობა) შრობის დაწყებამდე და შემდეგ (გ/კგ),

$d_1, d_2$  - ტენშემცველობა შრობის დაწყებამდე და მის შემდეგ (გ/კგ).

1 კგ ტენის აორთქლებაზე დახარჯული სითბოს რაოდენობა

$$q = l(i_1 - i_0) = \frac{i_1 - i_0}{X_2 - X_1},$$

სადაც  $i_1, i_2$  ენთალპიებია შრობის პროცესის დაწყებამდე და მის შემდეგ (ჯ/კგ).



სურ. 4.40. კოლოიდური კაპილარულ-ფოროვანი პროდუქტის შრობის მრუდი

კაპილარულ-ფოროვანი სხეულის შრობის ტიპური გრაფიკი (სურ. 4.40) გარკვეული მოკლე დროის განმავლობაში გამოისახება მრუდე წირით. ეს არის მასალის გათბობის პერიოდი, ამის შემდეგ გვაქვს წრფივი დამოკიდებულება ( $K_1 - K_2$ ), ხოლო ბოლო მონაკვეთზე ის კვლავ მრუდი ხდება. პროცესი მთავრდება, როდესაც მასალის ტენიანობა აღწევს წონასწორულ მნიშვნელობას.

## V თავი. ბიოქიმიური პროცესები

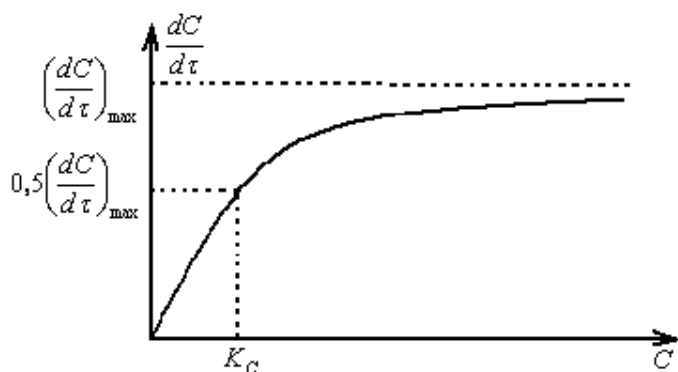
ბიოქიმიური არის პროცესი, რომელიც დაკავშირებულია გადასამუშავებელ პროდუქტზე ფერმენტების ან ბიოლოგიური პრეპარატების ზემოქმედებასთან. ასეთია: ფერმენტაცია, პასტერიზაცია, სტერილიზაცია და სხვ.

**ფერმენტაცია** წარმოადგენს კატალიზის კერძო შემთხვევას, რომელსაც ადგილი აქვს კვების პროდუქტებში. ფერმენტი ცილოვანი ნივთიერებაა, რომელიც წარმოადგენს ქიმიური რეაქციის კატალიზატორს (ამჩქარებელს). მისი არსებობის შემთხვევაში იცვლება ქიმიური პროცესის მიმდინარეობის გზა: ეს პროცესი მიმდინარეობს იმ სხვა, შუალედური ელემენტების გავლით, რომელთა წარმოქმნაშიც მონაწილეობს აღნიშნული კატალიზატორი. ამის შედეგად ქიმიური რეაქციის აქტივაციისათვის საჭირო ჯამური ენერჯის რაოდენობა მნიშვნელოვნად მცირდება, ხოლო რეაქციის სიჩქარე იზრდება.

ფერმენტაციული რეაქცია შეიძლება იყოს არამიკრობული ან მიკრობული. თუ რეაქცია მიკრობულია, ფერმენტებს გამოიმუშავებს მიკროორგანიზმები. ამასთან, მიკროორგანიზმები შეიძლება იწვევდეს სასურველ ან არასასურველ გარდაქმნებს.

ფერმენტაციული რეაქცია მიმდინარეობს ორ სტადიად: პირველ სტადიაზე შეუქცევადად რეაგირებენ სუბსტრატი (საწყისი ნივთიერება) და ფერმენტი; მეორე სტადიაზე რეაქციის პირველ სტადიაზე წარმოქმნილი კომპლექსი იშლება და მიიღება საბოლოო პროდუქტი. ამავე დროს ბიოქიმიური რეაქცია ფორმალურად ისევე განიხილება, როგორც ჩვეულებრივი უბრალო ქიმიური რეაქცია.

ბიოქიმიური პროცესის მასური სიჩქარე  $\frac{dC}{d\tau}$  (სადაც  $C$  საბოლოო პროდუქტის კონცენტრაციაა, ხოლო  $\tau$  – დრო) დამოკიდებულია სუბსტრატის  $C$  კონცენტრაციაზე (სურ. 5.1).



სურ. 5.1. ფერმენტაციული რეაქციის სიჩქარის დამოკიდებულება სუბსტრატის კონცენტრაციაზე

სუბსტრატის კონცენტრაციის გაზრდის შემთხვევაში რეაქციის სიჩქარე ასიმპტოტურად მიისწრაფვის მაქსიმალური მნიშვნელობისაკენ. მისი განსაზღვრისათვის საჭიროა ორი პარამეტრის ცოდნა: რეაქციის მაქსიმალური სიჩქარე  $\left(\frac{dC}{d\tau}\right)_{\max}$  და მუდმივა  $K_c$ , რომელიც ტოლია სუბსტრატის კონცენტრაციის იმ მნიშვნელობისა, რომლისთვისაც რეაქციის სიჩქარე თავისი მაქსიმალური მნიშვნელობის ნახევრის ტოლია.

### 5.1. პასტერიზაცია და სტერილიზაცია

საკვები პროდუქტების ტექნოლოგიაში ფართოდ გამოიყენება პროდუქტების თბური დამუშავება პასტერიზაციისა და სტერილიზაციის პროცესების სახით, რომლებსაც ახორციელებენ შესაბამისი თბოგადამცემი აპარატების გამოყენებით.

საკვები პროდუქტების საკმაოდ დიდი ნაწილი (რძე და რძის თხევადი პროდუქტები, ხილისა და ბოსტნეულის წვენები, ლუდი და ა.შ.) წარმოადგენს საუკეთესო გარემოს მრავალი მიკროორგანიზმის განვითარებისთვის, რომელთა შორის ბევრია პათოგენური, სხვადასხვა ავადმყოფობის გამომწვევი.

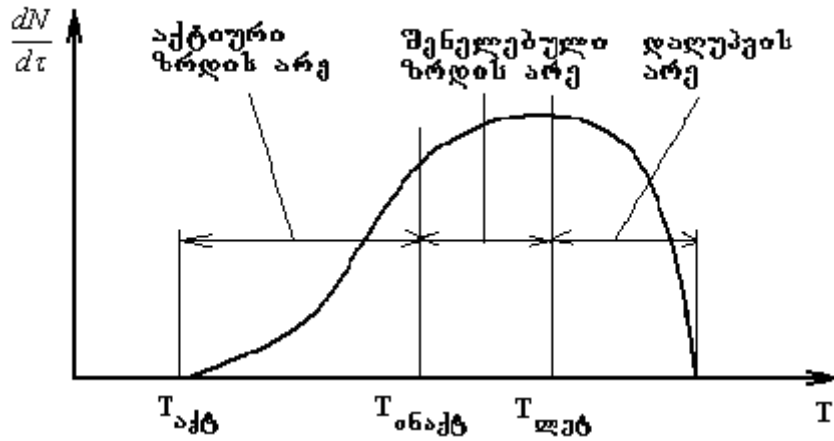
ასეთი პროდუქტების თბური დამუშავება (პასტერიზაცია და სტერილიზაცია) წარმოადგენს საუკეთესო საშუალებას აღნიშნული მიკროორგანიზმების გაუვნებლობისათვის. ეს კი საშუალებას გვაძლევს თავისუფლად შევინახოთ პროდუქტი და გადავამუშაოთ იგი ყოველგვარი საფრთხის გარეშე.

პასტერიზაციის პროცესის ფუძემდებელია ფრანგი მეცნიერი **ლუი პასტერი**. პასტერიზაცია პროდუქტის ისეთი თბური დამუშავებაა, რომლის შედეგადაც იღუპებიან მხოლოდ მიკროორგანიზმების ვეგეტაციური ფორმები. ამ პროცესს ატარებენ 100°C-ზე დაბალ ტემპერატურაზე და გამოიყენება ისეთი პროდუქტებისათვის, რომელთა გაცხელება 100°C-ზე მეტად დაუშვებელია ხარისხის გაუარესების გამო.

მიკროორგანიზმის სრული გაუვნებლობისათვის გამოიყენება სტერილიზაციის პროცესი, რომელიც პასტერიზაციის ანალოგიურია, მაგრამ მიმდინარეობს 100°C-ზე უფრო მაღალ ტემპერატურაზე გარკვეული დროის განმავლობაში.

მიკროორგანიზმის ზრდა-განვითარების სიჩქარის  $\left(\frac{dN}{d\tau}\right)$  დამოკიდებულება ტემპერატურაზე (სურ. 5.2) გვჩვენებს, რომ მიკროორგანიზმი განვითარებას იწყებს აქტივაციის დაწყების ტემპერატურაზე ( $T_{\text{აქტ.}}$ ). მისი განვითარების შენელება

იწვება ინაქტივაციის ტემპერატურის ( $T_{ინაქტ}$ ) მიღწევის შედეგად, ხოლო ზრდის მაქსიმალური ტემპერატურის ( $T_{აქს}$ ) მიღწევის შემდეგ მისი განვითარება პრაქტიკულად წყდება. ლეტალური ტემპერატურის ( $T_{ლეტ}$ ) მიღწევის შემდეგ მიკროორგანიზმი იღუპება.



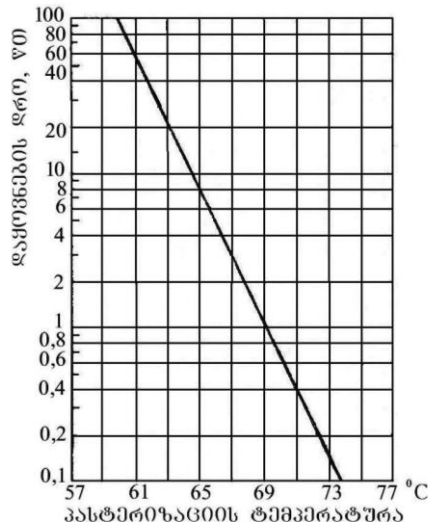
სურ. 5.2. მიკროორგანიზმის განვითარების სიჩქარის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

პასტერიზაციის პროცესში მიკროორგანიზმის მოქმედების განეიტრალება ხდება შემდეგნაირად: პროდუქტს ვაცხელებთ გარკვეულ ტემპერატურამდე, ვაყოვნებთ გარკვეული დროით და შემდეგ ვაცივებთ. რაც უფრო მაღალია პასტერიზაციის ტემპერატურა, მით უფრო ეფექტურად ხდება მიკროორგანიზმების განადგურება და უფრო საიმედოა პროდუქტის ხანგრძლივად შენახვა. მაგრამ, პასტერიზაციის ეფექტი დამოკიდებულია არა მარტო ვაცხელების ტემპერატურაზე, არამედ დაყოვნების დროზეც. რაც უფრო დიდია ეს დრო მით უფრო ეფექტურია პასტერიზაცია. ამრიგად, პასტერიზაციის ერთი და იგივე ეფექტი შესაძლებელია მივიღოთ ტემპერატურისა და დაყოვნების დროის სხვადასხვა კომბინაციით. ამის საილუსტრაციოდ სურ. 5.3-ზე ნაჩვენებია რძის პასტერიზაციის დაყოვნების დროის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე. ეს ორი პარამეტრი განსაზღვრავს პროცესის მიმდინარეობას. წარმოებაში იყენებენ რძის პასტერიზაციის შემდეგ რეჟიმებს:

- მომენტალური პასტერიზაცია – ვაცხელება 85-90<sup>0</sup> - მდე დაყოვნების გარეშე;
- ხანმოკლე პასტერიზაცია - ვაცხელება 72-74<sup>0</sup> – მდე და ხანმოკლე დაყოვნება;
- ხანგრძლივი პასტერიზაცია - ვაცხელება 63<sup>0</sup> – მდე და დაყოვნება 30 წთ.

გასათვალისწინებელია, რომ პროდუქტის ხანგრძლივი ვაცხელება და ვაცივება, განსაკუთრებით მაღალი ტემპერატურის პირობებში, უარყოფითად

აისახება ამ პროდუქტის ხარისხზე, რადგან იწვევს ვიტამინების დარღვევას, ნახშირწყლებისა და ამინომჟავებისაგან ძნელად შესათვისებელი ამინოჰაქრების წარმოქმნას, ცხიმების დაშლას და ა.შ. ამიტომ სტერილიზაციის ტემპერატურა და ხანგრძლივობა უნდა შეირჩეს ორივე აღნიშნული ფაქტორის გათვალისწინებით.



სურ. 5.3. რძის პასტერიზაციის დაყოვნების დროის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

მაღალი ტემპერატურისა და ხანმოკლე სტერილიზაციის შემთხვევაში პროდუქტის ბიოლოგიურად ძვირფასი კომპონენტები უკეთაა შენარჩუნებული, ვიდრე დაბალი ტემპერატურისა და ხანგრძლივი სტერილიზაციის შემთხვევაში. მაგრამ გასათვალისწინებელია ქილებში დაფასოებული პროდუქტების სწრაფი გაცხელების სირთულე, რაც განაპირობებს პროდუქტის ქილის კედლებთან ახლოს განლაგებული ფენების დაზიანებას, ხოლო კედლებიდან მოშორებით, ცენტრალურ ნაწილებში სტერილიზაციის ეფექტის სიმცირეს. აღნიშნული ფაქტორების გათვალისწინებით გაცხელებისა და გაცივების რეჟიმების შერჩევისათვის გამოიყენება პროდუქტით შევსებული ქილის თბოგამტარობის არასტაციონარული განტოლებების ამოხსნის შედეგები.

სტერილიზაციის საერთო ხანგრძლივობა განისაზღვრება, როგორც პროდუქტის გაცხელებისა და გაცივების ხანგრძლივობათა ჯამი, რომელთა დროსაც ტემპერატურამ უნდა გადააჭარბოს ლეტალური ტემპერატურის მნიშვნელობას.

საკვები პროდუქტების მაღალტემპერატურული დამუშავების ერთ-ერთ ძირითად პირობას წარმოადგენს პროცესის სწრაფად ჩატარება პროდუქტის თხელ ფენაში ჟანგბადის შეღწევის გარეშე და შემდგომ სწრაფად გაცივება.

გარდა თერმული სტერილიზაციისა, საკვები პროდუქტების მრეწველობაში გამოიყენება აგრეთვე მაღალი სიხშირის დენით, ულტრაიისფერი გამოსხივებით, ქიმიური ნივთიერებებით და ცენტრიდანული ძალების ზემოქმედებით დამუშავება.

თითქმის ყველა საკვები პროდუქტი დიელექტრიკია. ამიტომ მათზე მაღალი სიხშირის ელექტრული ველის ზემოქმედებისას პროდუქტები სწრაფად და თანაბრად ცხელდება ამ პროდუქტებში მოლეკულების რხევითი მოძრაობის ხარჯზე. თუ ელექტრული ველის დაძაბულობა არ აუარესებს პროდუქტის ხარისხს, მაშინ ეს პროდუქტები ცხელდება 120°C-მდე სულ რაღაც 1 წუთში, ხოლო სტერილიზაციისათვის საკმარისია 10-140 წმ. მაღალი სიხშირის დენების გამოყენება განსაკუთრებით ეფექტურია დაბალი სითბოტევადობის და თბოგამტარობის პროდუქტისათვის.

ულტრაიისფერი დასხივება გამოიყენება სამადურო წარმოებაში გამოყენებული ჰაერის სტერილიზაციისათვის, აგრეთვე სასმელი და მინერალური წყლების გასაწმენდად. 260-300 მკმ ტალღის სიგრძის ულტრაიისფერი სხივების ზემოქმედებით ძალზე სწრაფად ხდება პროდუქტში არსებული ვირუსების ინაქტივაცია. ულტრაიისფერი სხივების შეღწევადობა ოპტიკურად მკვრივ გარემოში მცირეა. ამიტომ მათი გამოყენების ეფექტურობა დამოკიდებულია დასხივების ინტენსივობასა და ხანგრძლივობაზე, აგრეთვე დასხივებული პროდუქტის თვისებებზე.

საკვები პროდუქტების გაუვნებლობისათვის გამოიყენება მათი ცენტრიდანული ზემოქმედების ველში დამუშავების მეთოდი. ამ შემთხვევაში მიკროორგანიზმების გამოყოფა მიიღწევა სითხისა და მიკროორგანიზმების სიმკვრივეებს შორის სხვაობის ხარჯზე და დამოკიდებულია მიკროორგანიზმების ზომებსა და ფორმაზე. მაგალითად, თევზისებური სეპარატორების მეშვეობით შესაძლებელია რძიდან მიკროორგანიზმების 99,9 %-ის მოცილება. აღნიშნული მეთოდი პასტერიზაციასთან შედარებით საკმაოდ მიმზიდველია, რადგან ამ შემთხვევაში პროცესი მიმდინარეობს პროდუქტში ფიზიკური და ქიმიური გარდაქმნების გარეშე და, ამასთან, პროდუქტში არ რჩება დაღუპული მიკროორგანიზმები.

ქიმიური სტერილიზაციის საშუალებებად გამოიყენება ფორმალინი, მარილმჟავა, ქლორის, გოგირდის მჟავები და ა.შ. შეიძლება ითქვას, რომ მიუხედავად ქიმიური სტერილიზატორების დიდი სიმრავლისა, არც ერთი არ არის უნივერსალური საშუალება კვების პროდუქტების სპეციფიკურობის გამო. პროდუქტების გაუვნებლობა, როგორც წესი, მიიღწევა მათი დამუშავების კომბინირებული მეთოდებით.

## 5.2. წყლის მაგნიტური აქტივიზაცია

საკვები პროდუქტების წარმოებაში გამოყენებულ თბოგადაცემის პროცესებში, პროდუქტს სითბური ენერგია გადაეცემა მუშა აგენტიდან (გაცხელებული წყალი, ორთქლი). ამ პროცესების განსახორციელებლად გამოიყენება სხვადასხვა პრინციპზე მომუშავე და განსხვავებული კონსტრუქციის თბოგადამცემი აპარატები. თუმცა ნებისმიერ აპარატში უშუალოდ სითბოს გადამცემ ელემენტს წარმოადგენს პროდუქტსა და მუშა აგენტს შორის არსებული გამყოფი კედელი, რომელიც, როგორც წესი, მუშა აგენტის მხრიდან წარმოადგენს შავ ლითონს, ხოლო საკვები პროდუქტის მხრიდან უჟანგავ ლითონს ან მისი ზედაპირი დაფარულია ემალით.

აღნიშნულ გამყოფ კედლებზე თბოგადაცემის პროცესში მუშა აგენტის მხრიდან წარმოიქმნება მყარი ნადები, რომელსაც ქმნის წყალში არსებული მარილების დალექვა. მილსადენში წყლის მოძრაობის დროს ანალოგიური ნადების წარმოქმნა ამცირებს მილსადენის განივკვეთს, ზრდის მის წინააღმდეგობას, ამცირებს თბოგადაცემის კოეფიციენტს და თბოგადამცემი აპარატების მქ კოეფიციენტს. ამ მოვლენის თავიდან ასაცილებლად გამოიყენება წყლის დამუშავება სხვადასხვა მეთოდებით: ქიმიური (წყალს არბილებენ ქიმიური რეაგენტებით), მექანიკური (წყალი იწმინდება მემბრანული ფილტრებით) და სხვ. მაგრამ ყველა მეთოდის გამოყენება დაკავშირებულია საკმაოდ ძვირადღირებულ ტექნიკურ და ეკონომიკურ სირთულეებთან.

ზემოთ აღნიშნული პრობლემების ერთ-ერთი ყველაზე მარტივი და ეფექტური გადაწყვეტაა წყლის დამუშავება მაგნიტური აქტივატორებით. მათი გამოყენება გამორიცხავს გამხურებელი მოწყობილობის შიგა ზედაპირზე ნადების წარმოქმნას და კოროზიას.

წყლის მაგნიტური აქტივატორის მოქმედების პრინციპი ასეთია: აქტივატორში გავლის დროს წყალზე მოქმედებს ციკლური მაგნიტური ველი, რომელიც წარმოქმნილია მაღალენერგეტიკული მუდმივი მაგნიტების მიერ. მაგნიტური ველის ზემოქმედების შედეგად წყალში გახსნილი მარილების კონცენტრაცია პრაქტიკულად არ იცვლება, მაგრამ სიხისტის წარმომქმნელი მარილები გამოიყოფა არა ნადების, არამედ წვრილდისპერსიული ნაწილაკების სახით. მაგნიტური აქტივატორი მოქმედებს წყალში გახსნილ ჰიდროკარბონატის ანიონებზე (უარყოფითად დამუხტულ ნაწილაკებზე) და გადაიყვანს მათ კოლოიდურ მდგომარეობაში. ეს იწვევს მათ გამოკრისტალებას წყლის მასაში და

არა მილის კედლებზე ან სხვა თბოგადამცემ ზედაპირებზე. აღნიშნული პროცესი ცნობილია როგორც “კრისტალიზაცია მოცულობაში“.

მაგნიტები ისეა განლაგებული, რომ წარმოქმნილი მაგნიტური ველის ზემოქმედება იწვევს სითხის დიპოლების რეზონანსს. აღნიშნული ძალის მოქმედების შედეგად სითხის მოლეკულები ასრულებენ რხევით მოძრაობას. დიპოლების რეზონანსი განაპირობებს წყალში არსებული მინარევებისა და წყლის მოლეკულების განმხოლოებას, რომლებიც ურთიერთმიზიდულობის ძალების მოქმედებით ერთიანდებიან. ცივ წყალში კალციუმის იონები ილექება თავისუფალი მინარევის ზედაპირზე – კრისტალიზაციის ცენტრებზე. ამის შედეგად წარმოიქმნება მიკროკრისტალები, რომლებიც ნალექის სახით არ ილექება თბოგადამცემი აპარატების მუშა ზედაპირებზე. ეს მიკროკრისტალები რჩება წყლის მასაში და გამოიყოფა იქიდან სისტემაში დაყენებული ფილტრების მეშვეობით. დადგენილია აგრეთვე, რომ მაგნიტური აქტივატორის გამოყენების შემთხვევაში მიღებს სცილდება ძველი ნადებიც, რომელიც ილექება მიკროკრისტალების ზედაპირებზე და გამოიყოფა ფილტრების მეშვეობით. იგივე ხდება მუშა ზედაპირებზეც.

მაგნიტური აქტივატორი მაგრდება მილგაყვანილობაზე (სურ. 5.4). მაგნიტური ველის ზემოქმედების შედეგად მილის ზედაპირს შორდება ნადები. მოცილებული ნადები და წყალში არსებული მარილები გამოიყოფა წყლის მასაში და მასთან ერთად გამოდის თბოგადამცემიდან. ეს უზრუნველყოფს თბომცველის კედლების სრულ გასუფთავებას.



სურ. 5.4. მაგნიტური აქტივატორით მილების გასუფთავების სქემა

წყლის მაგნიტური აქტივატორების გამოყენება გამორიცხავს თბოგადამცემ ზედაპირებზე არა მარტო ახალი ნადების წარმოქმნას, არამედ აღნიშნულ ზედაპირებზე ადრე არსებულ ნალექსაც აცილებს. თავის მხრივ, ნალექისაგან თბოგადამცემი ზედაპირების გათავისუფლება უზრუნველყოფს მათ მიერ სითბოს უკეთ გატარებას, ე. ი. ამცირებს ენერგოდანაკარგს, მაშასადამე, ზრდის აპარატის თბოგადამცემის კოეფიციენტს. აპარატი მუშაობს პროცესისათვის წინასწარ

დადგენილი რეჟიმის პარამეტრებით მთელი სამუშაო დროის განმავლობაში. იზრდება აგრეთვე თბოგადამცემი აპარატების ექსპლუატაციის ვადა.

### 5.3. ოზონის გამოყენება საკვები პროდუქტების წარმოების პროცესებში

ოზონი გარემომცველი ჰაერის ერთ-ერთი შემადგენელი ნაწილია. იგი მარტივი ნივთიერებაა, რომელიც შედგება ჟანგბადის სამი ატომისაგან. ბუნებრივი ჰაერის შედგენილობაში ოზონის კონცენტრაცია მცირეა და შეადგენს 0,002–0,02 მკ/მ<sup>3</sup>-ს.

ოზონი, როგორც ქიმიური ელემენტი, აღმოჩენილი იქნა 1787 წ. ჰოლანდიელი მეცნიერის მაკ ვან მარუმის მიერ მძლავრ საელექტრიზაციო დანადგარში მიღებული ელექტრული ნაპერწკლის ჟანგბადის არეში გატარებისას. ცდების შედეგად მიიღებოდა აირადი ნივთიერება, რომელსაც ჰქონდა მკვეთრი დამახასიათებელი სუნი და ვერცხლისწყლის დაშლის უნარი. სწორედ დამახასიათებელი სუნის გამო აირს უწოდეს “ოზონი“, რაც ბერძნულად “სუნის მქონეს“ ნიშნავს.

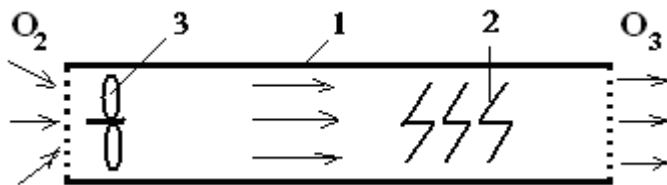
ოზონის ქიმიური აქტივობა განპირობებულია მისი სტრუქტურით: მისი ერთ-ერთი (ცენტრალური) ატომი ჟანგბადის დანარჩენ ორ ატომთან დაკავშირებულია კოვალენტური ბმებით. ციკლური სტრუქტურის არარსებობა განაპირობებს ოზონის არასტაბილურობას. ამის გამო ოზონი აქტიურად რეაგირებს ორმაგი კავშირების მქონე ორგანულ ნივთიერებებთან. მისი დაშლისას მიღებულ თავისუფალ რადიკალებს ახასიათებს რეაქციაში შესვლის აქტიური უნარი და შეუძლიათ დაშალონ მრავალი ორგანული მოლეკულა. ოზონის მცირე კონცენტრაციაც კი დამღუპველად მოქმედებს ისეთ ორგანულ ორგანიზმებზე, როგორცაა სხვადასხვა ტიპის მავნე ბაქტერიები, ვირუსები და სოკოები. ოზონი ჟანგავს მაღალმოლეკულურ ნივთიერებებს, ტოქსინებს, ბიოლოგიურად დაუშლელ და არომატულ ნივთიერებებს, აქრობს არასასიამოვნო სუნს და ამცირებს კანცეროგენური ნივთიერებების კონცენტრაციას ატმოსფერულ ჰაერში.

ოზონი ხელს უწყობს ხორცის, თევზის, კვერცხის, ყველის, ხილის და ბოსტნეულის საწყისი ხარისხობრივი მაჩვენებლების დიდხანს შენარჩუნებას. ოზონირების გზით შესაძლებელია ჰაერის დეზინფექცია და დეზოდორაცია (არასასიამოვნო სუნის მოსპობა). ის გამოიყენება სამაცივრო საკნების, სატრანსპორტო საშუალებების, ჭურჭლის და შესაფუთი მასალების დეზინფექციისათვის. ეკონომიურად დასაბუთებულია ბაქტერიციდული ნათურების

შეცვლა ოზონატორებით, რომლებიც ხასიათდება გამოყენების უფრო ფართო სპექტრით, მომსახურების სიმარტივით, გამძლეობით, არ მოქმედებს გარემოზე უარყოფითად და უტილიზაციისათვის ძვირადღირებულ მოწყობილობებს არ საჭიროებს.

ოზონის მისაღები დანადგარი (ოზონატორი) პირველად 1857 წ. გამოიყენა ფირმა “სიმენსმა“ სასმელი წყლის გასაწმენდად. შემდგომში ხდებოდა ამ მოწყობილობების სრულყოფა და დღეისათვის ოზონატორების სერიული მწარმოებლები არიან: აშშ, გერმანია, საფრანგეთი, და სხვ. ისინი აწარმოებენ სხვადასხვა დანიშნულების და მოდიფიკაციის მოწყობილობებს, თუმცა ყველას მოქმედების პრინციპი მსგავსია: გარემოს ჰაერის ან სუფთა ჟანგბადის ელექტრული განმუხტვის არეში გატარებით მიიღება აირადი ოზონი (სურ. 5.5).

ოზონატორი წარმოადგენს დიელექტრიკული მასალისაგან დამზადებულ (1) მილს, რომლის შიგნით განლაგებულია ელექტრული განმუხტვის (2) ელემენტი და ჰაერის მიმწოდი ვენტილატორი (3). ვენტილატორი გარემოდან შეიწოვს ჰაერს (1) მილში. ელექტრული განმუხტვის (2) ელემენტი მიერთებულია დენის წყაროსთან, რომელიც მას აწვდის მაღალი ძაბვის (18000 ვ) დენს. ამის შედეგად (2) ელემენტში ხდება ელექტრული განმუხტვა, რომელიც მოქმედებს ჰაერში არსებულ ჟანგბადზე და გარდაქმნის მას აირად ოზონად. მიღებული ოზონი მილიდან (1) მიეწოდება დანიშნულების მიხედვით.



სურ. 5.5. ოზონატორის პრინციპული სქემა

**წყლის გაუვნებელოება ოზონის მეშვეობით.** თანამედროვე პირობებში სასმელი წყლისადმი წაყენებული ერთ-ერთი ძირითადი მოთხოვნაა მისი ბაქტერიოლოგიური სისუფთავე. ოზონი სპობს წყალში არსებულ ყველა ცნობილ მიკროორგანიზმს. ოზონის მიმართ მდგრადი მიკროორგანიზმები არ არსებობს, ვინაიდან ეს აირი ჟანგავს უჯრედის კედლებს, ციტოპლაზმას და იწვევს უჯრედის დაშლას. ამასთან, ოზონი დაახლოებით 51 %-ით უფრო ძლიერია ქლორზე და მოქმედებს 15–20-ჯერ სწრაფად. ქლორისაგან განსხვავებით ოზონი წყალს არ აძლევს რაიმე გემოს ან სუნს. მას აქვს თვითდაშლის უნარი: მცირე დროის (2–4 სთ) შემდეგ ოზონი იშლება და გარდაიქმნება სუფთა ჟანგბადად. ამიტომ წყლის გასაწმენდად ოზონის მიწოდება საშიში არ არის.

თავისი არსით ოზონით წყლის გაწმენდა ბუნებრივ პირობებში ჰაერის და მზის ენერჯის მოქმედებით მრავალჯერადი გაწმენდის ეკვივალენტურია.

თანამედროვე საკვები პროდუქტებისა და სამაცივრო წარმოებაში ოზონირებული წყალი ფართოდ გამოიყენება სტერილიზაციისათვის. ამისათვის კვების პროდუქტების მისაღები მოწყობილობები და ჩამომსხმელი ხაზები აღჭურვილია ოზონირების სისტემებით. აღნიშნული სისტემების გამოყენება საგრძნობლად ამარტივებს სტერილიზაციის პროცესს და იძლევა მისი მაღალ დონეზე ჩატარების საშუალებას.

**ოზონის გამოყენება საკვები პროდუქტების შენახვისა და გადამუშავების ტექნოლოგიურ პროცესებში.** პროდუქტის მიკრობული დაბინძურება გარდა იმისა, რომ საშიშია ადამიანის ჯანმრთელობისათვის, მნიშვნელოვნად ამცირებს თვით პროდუქტის შენახვის ვადასაც. მიკრობული დაბინძურების საწინააღმდეგოდ მიმართავენ პროდუქტის თბურ დამუშავებას, იყენებენ გამა გამოსხივებას, ქიმიურ კონსერვანტებს. მაგრამ ყველა აღნიშნულ მეთოდს აქვს თავისი უარყოფითი მხარეები, როგორცაა ორგანოლექტიკური მახასიათებლების ცვლილება, კვებითი ღირებულების შემცირება, ვიტამინების დიდი ნაწილის დაკარგვა და სხვ.

აღნიშნული უარყოფითი მხარეები არ გააჩნია ოზონით დამუშავებულ პროდუქტს. პროდუქტის დამუშავების შემდეგ ოზონი გარდაიქმნება ჟანგბადად, რომელიც არ არის ტოქსიკური და არც ტოქსიკურ ნაერთებს წარმოქმნის. ოზონი არამდგრადი აირია, რომელიც თავისით იშლება და არ გროვდება ორგანიზმში. ოზონით დეზინფექციის შემდეგ არ არის საჭირო პროდუქტის შემდგომი დამუშავება: გარეცხვა ან დეგაზაცია სპეციალურ სათავსებში.

სოფლის მეურნეობის პროდუქტების შენახვა მათი ხარისხის შენარჩუნებით კაცობრიობის გლობალურ პრობლემას წარმოადგენს. მიუხედავად მრავალი სამეცნიერო-კვლევითი სამუშაოების ჩატარებისა, მთელ მსოფლიოში სოფლის მეურნეობის პროდუქტების მარაგის დაახლოებით 30 % იკარგება. კიდევ უფრო დიდი პრობლემები იქმნება სოფლის მეურნეობის ნედლეულისაგან საკვები პროდუქტების მომზადების, შენახვის და ტრანსპორტირების პროცესში, აგრეთვე მას შემდეგ, რაც ეს პროდუქტები მომხმარებელთან მოხვდება. პროდუქტის გაფუჭების მრავალი მიზეზი არსებობს. მაგრამ მათ შორის უმთავრესია მიკროორგანიზმები, რომლებიც ხელსაყრელ პირობებში ძალზე სწრაფად მრავლდებიან.

აღნიშნული არასასურველი მოვლენების თავიდან აცილების საუკეთესო საშუალებაა ოზონის გამოყენება: საწარმოო და საყოფაცხოვრებო შენობების სანიტარიული დამუშავებისათვის.

## VI თავი. მექანიკური პროცესები

კვების მრეწველობის საწარმოებში ნედლეული და შუალედური პროდუქტები, როგორც წესი, საჭიროებენ მექანიკურ დამუშავებას. აღნიშნულ პროცესებს მიეკუთვნება მყარი მასალების დანაწევრება-დაქუცმაცება, დაჭრა, ფხვიერი მასალების სეპარაცია და დახარისხება, მასალებიდან თხევადი ფაზის გამოწნევა, მყარი ფაზის ბრიკეტირება, დრეკად-პლასტიკური მასების დაფორმება, ფხვიერი, ბლანტი და თხევადი პროდუქტების შერევა და სხვა.

### 6.1. პროდუქტის დაქუცმაცების პროცესის თეორიული საფუძვლები

დაქუცმაცებას უწოდებენ პროდუქტის ნაწილაკებად დაყოფას, რომელიც ხორციელდება საწყის პროდუქტზე მექანიკური ზემოქმედებით. განასხვავებენ ორი სახის დაქუცმაცებას: 1. როდესაც დაქუცმაცებული პროდუქტის ნაწილაკებს არა აქვთ ფორმა; 2. ნაწილაკების ზომების შემცირებასთან ერთად მათ ეძლევათ განსაზღვრული ზომები და ფორმა. ამ უკანასკნელ პროცესს ჭრა ეწოდება.

დაქუცმაცების პროცესი ფართოდ გამოიყენება კვების მრეწველობის მრავალ დარგში, მათ შორის: მარცვლეულის გადამამუშავებელ, საკონსერვო, სამადურო, ჩაის წარმოების, მეღვინეობის და სხვა დარგებში. მასალების დაქუცმაცებას ხშირად მიმართავენ შემდგომი პროცესების ინტენსიურობის გაზრდის მიზნით, მაგალითად, ექსტრაჰირების, თბური დამუშავების და სხვა პროცესების დასაჩქარებლად. ამავე დროს მნიშვნელოვანია ნივთიერებათა დანაკარგების და თბური ენერჯის ხარჯის შემცირება.

მასალაზე მოქმედი დატვირთვის მიხედვით, დაქუცმაცება შესაძლებელია მოხდეს: დაჭყლეტით, გახლეჩით, ჭრით, თელვით, გახეხვით, დარტყმითი ზემოქმედებით და სხვა. უმრავლეს შემთხვევაში გვხვდება ამ მეთოდების სხვადასხვა სახის კომბინირებული მოქმედება, მაგალითად, დაჭყლეტა-გახლეჩა, დარტყმა-გახეხვა და სხვა.

დაჭყლეტის დროს გარე დატვირთვის მოქმედებით დეფორმირდება მთელი ნაწილაკის მოცულობა და, როდესაც შიგა დაძაბულობა გადააჭარბებს კუმშვაზე სიმტკიცის ზღვარს, იგი იწყებს რღვევას. ეს მოვლენა მიეკუთვნება კუმშვით დეფორმაციას.

გახლეჩის შემთხვევაში სხეული ირღვევა დატვირთვების მაქსიმალური კონცენტრაციის ადგილას, რის შედეგადაც ის შეიძლება გაიყოს რამდენიმე

ნაწილად. აღნიშნულ მექანიკურ მოდელს შეესაბამება აგრეთვე თელვის და ადგილობრივი თელვის დეფორმაციებიც.

მასალის ნაწილაკები იმსხვრევა ღუნვითი დეფორმაციის გავლენით ეს მეთოდი ხასიათდება იმით, რომ მიღებულ ნაწილაკებს აქვს უფრო თანაბარი ფორმა და ზომები.

ჭრის მეთოდი გამოიყენება მაშინ, როდესაც მასალის დაქუცმაცება საჭიროა წინასწარ დადგენილი ზომებით.

მასალის გახეხვით დამუშავებისას, დაქუცმაცება ხდება კუმშვის, ჭრის და თელვის ძალების ერთობლივი მოქმედებით.

დაქუცმაცების ეფექტურობა ფასდება დაქუცმაცების ხარისხით, ენერჯის კუთრი დანახარჯებით და მანქანის მუშა ორგანოებზე მოსული კუთრი დატვირთვით. დაქუცმაცების ხარისხი ხასიათდება პროდუქტის საწყისი ნაწილაკის საშუალო  $d_0$  ზომის შეფარდებით დაქუცმაცებული პროდუქტის ნაწილაკის საშუალო  $d_1$  ზომასთან.

$$i = d_0 / d_1 . \tag{6.1}$$

თანამედროვე ტექნიკაში დაქუცმაცების ხარისხს გამოსახავენ დაქუცმაცებული პროდუქტის ნაწილაკების ზედაპირების ჯამური ფართობის შეფარდებით საწყისი (დასაქუცმაცებელი) პროდუქტის ნაწილაკის ზედაპირების ჯამურ ფართობთან

$$i = F_0 / F_1 . \tag{6.2}$$

მაგალითად, მარცვლის გადამამუშავებელ საწარმოებში, ფქვილის ხარისხის მიხედვით დაქუცმაცების ხარისხი შეადგენს  $i = 20...50$ .

ნაწილაკების ზედაპირის ფართობის განსაზღვრისთვის მიმართავენ საცრულ ანალიზს. ამისათვის პროდუქტის საშუალო ნიმუშს ატარებენ ანალიზურ ხელსაწყოზე, რომელიც წარმოადგენს სხვადასხვა ზომის ნახვრეტების მქონე ბადეების სისტემას. შედეგად იღებენ ფრაქციათა რიგს, რომლებიც განსხვავდებიან ნაწილაკების სიდიდით. რადგან ნაწილაკს არა აქვს გარკვეული ფორმა, მის ზომად მიღებულია ორი მეზობელი ბადის ნახვრეტების ზომების ნახევარჯამი. ყოველი ფრაქციის ნაწილაკების ზედაპირების ჯამურ  $F$  ფართობს განსაზღვრავენ მისი  $G$  მასური რაოდენობით, ნაწილაკების საშუალო  $d$  ზომით და მათი  $\rho$  სიმკვრივით ანუ ერთი ფრაქციის ნაწილაკების რაოდენობა განისაზღვრება ფორმულით

$$n_1 = \frac{G}{d^3 \rho} . \tag{6.3}$$

ცალკეული ნაწილაკების ზედაპირის ფართობი დაახლოებით შეიძლება მივიღოთ თანაბარი ზომის კუბების ზედაპირის ფართობის ტოლად, ანუ  $f_1 = 6d^2$ , სადაც  $d$  კუბის წიბოა, რომელიც დაახლოებით ტოლია ნაწილაკის საშუალო ზომის.

ერთი ფრაქციის ყველა ნაწილაკის ზედაპირების ჯამური ფართობი

$$F_1 = n_1 f_1 = \frac{6G}{d\rho} . \quad (6.4)$$

თუ ცნობილია ყოველი ფრაქციის ნაწილაკების ზედაპირების ჯამური ფართობი, შესაძლებელია განისაზღვროს მთლიანი საშუალო ნიმუშის ნაწილაკების ზედაპირების ჯამური ფართობი.

დაქუცმაცების ხარისხზე დამოკიდებულებით განასხვავებენ შემდეგი სახის დაქუცმაცებებს: მსხვილი ( $i = 3...5$ ), საშუალო ( $i = 5...10$ ), წვრილი ( $i = 10...50$ ), მცირე ( $i > 100$ ) და კოლოიდური ( $i > 1000$ ).

### 6.1.1. დაქუცმაცების პროცესის ფიზიკური საფუძვლები

მყარი სხეულის დეფორმირებისა და დაქუცმაცებისათვის საჭიროა გარკვეული ენერგია, რომელიც იხარჯება დრეკადი და პლასტიკური დეფორმაციების წარმოქმნაზე, აგრეთვე მოლეკულური შეჭიდულობის ძალების დასაძლევად. ამის შედეგად სხეული ირღვევა და წარმოიქმნება დიდი ჯამური ზედაპირული ფართობის ნაწილაკები. როგორც დრეკადი, ისე პლასტიკური დეფორმაციის დროს ხდება მექანიკური ენერგიის ნაწილობრივი გარდაქმნა სითბურ ენერგიად, რის შედეგადაც იზრდება სხეულის და დაქუცმაცებელი მანქანის ტემპერატურა. ამიტომ ზოგიერთ დაქუცმაცებელ მანქანაში გათვალისწინებულია მუშა ორგანოების გაცივება.

მასალის დასაქუცმაცებლად საჭირო ენერგიის განსაზღვრის რამდენიმე თეორია არსებობს, მათ შორის ვკირპიჩევის და ფ.კიკის მიერ შემოთავაზებული მოცულობითი თეორია. რამდენადაც მასალის ნაწილაკების კუთრი ზედაპირი მათი ზომების უკუპროპორციულია, ამიტომ მასალის დაქუცმაცებისათვის საჭირო კუთრი მუშაობა (მასალის ერთეული მოცულობის დაქუცმაცებისათვის საჭირო მუშაობა) ნაწილაკების  $d_0$  საწყისი ზომიდან  $d_1$  საბოლოო ზომამდე, შესაძლებელია გამოისახოს ფორმულით:

$$A = K(1/d_1 - 1/d_0), \quad (6.5)$$

სადაც  $K$  კოეფიციენტია, რომელიც ახასიათებს დაქუცმაცების დროს მასალის ერთეული ზედაპირისათვის მუშაობის დანახარჯს და დამოკიდებულია მასალის თვისებებზე.

$K$  სიდიდის განსაზღვრა შესაძლებელია მხოლოდ ექსპერიმენტულად. აღნიშნული თეორია გამომდინარეობს იქიდან, რომ დაქუცმაცების დროს მუშაობა სრულდება მასალის დეფორმაციაზე, რომელიც იწვევს მის რღვევას. ამასთან, მუშაობა სრულდება ზღვრული (მრღვევი) დეფორმაციის მიღწევამდე. აქედან გამომდინარეობს, რომ დაქუცმაცებისათვის საჭირო მუშაობა პროპორციულია მასალის ნაწილაკების მოცულობის დაქუცმაცებამდე შემცირებისა.

მოცულობითი თეორიის თანახმად, დაქუცმაცებისათვის საჭირო ენერჯის ხარჯი პროპორციულია სხეულის მოცულობის, შესაბამისად,  $V_1$  და  $V_2$  მოცულობების მქონე ორი სხეულის დაქუცმაცების  $A_1$  და  $A_2$  მუშაობების შეფარდების

$$A_1 / A_2 = V_1 / V_2 . \quad (6.6)$$

მუშაობა გამოისახება  $P$  ძალისა და  $\Delta l$  დეფორმაციის ნამრავლით, რომელიც ჰუკის კანონის თანახმად, პროპორციულია სხეულის წრფივი ზომის  $l$ , ანუ

$$A = aPl ,$$

სადაც  $a$  პროპორციულობის კოეფიციენტია.

სხეულის მოცულობა პროპორციულია მისი  $l$  წრფივი ზომის კუბის

$$V = bl^3 ,$$

სადაც  $b$  – პროპორციულობის კოეფიციენტია.

აღნიშნული ტოლობების გათვალისწინებით, (6.6) გამოსახულება მიიღებს შემდეგ სახეს:

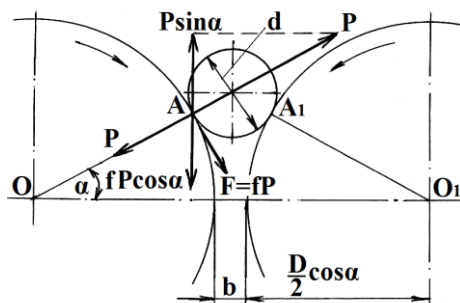
$$\frac{aP_1 l_1}{aP_2 l_2} = \frac{bl_1^3}{bl_2^3} \quad \text{ანუ} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{l_1^2}{l_2^2} . \quad (6.7)$$

მრიგად, მოცულობითი თეორიის თანახმად, დამქუცმაცებელი ძალა პროპორციულია სხეულის შესაბამისი წრფივი ზომის კვადრატის, ხოლო მუშაობა – ამ სხეულის მოცულობის.

**გლუვზედაპირიანი ლილვაკებით დაქუცმაცება.** გლუვი ან დაკეჭნილ-ზედაპირიანი ლილვაკები, უპირატესად გამოიყენება მშრალი, მარცვლოვანი სტრუქტურის მქონე ფხვიერი მასალის დასაქუცმაცებლად. ასეთ მანქანაში მნიშვნელოვანია ლილვაკის მინიმალური დასაშვები დიამეტრის განსაზღვრა, რაც, თავის მხრივ, განაპირობებს მასალის ლილვაკებს შორის არეში ჩათრევის

პირობებს. ეს უკანასკნელი განსაზღვრავს მანქანის მწარმოებლურობას და კუთრ ენერგოდანახარჯს.

გლუვზედაპირიან ლილვაკებში ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრია ნაწილაკის ჩათრევის  $\alpha$  კუთხე (სურ. 6.1), რომელიც წარმოიქმნება  $OA$  რადიუსსა და ლილვაკების ცენტრების შემაერთებელ მონაკვეთს შორის. დეფორმაციის დაწყებამდე ნაწილაკი ლილვაკების ზედაპირს ეხება  $A$  და  $A_1$  წერტილებში და აწვება მათ რადიალური  $P$  ძალით. ნაწილაკიც ლილვაკების მხრიდან განიცდის იმავე სიდიდის  $P$  ძალის მოქმედებას. ამ ძალის ვერტიკალური მდგენელები –  $2P\sin\alpha$  ცდილობენ ამოაგდონ ნაწილაკი სოლისებური ჩათრევის ზონიდან.



სურ. 6.1. ლილვაკების მინიმალურად დასაშვები დიამეტრის საანგარიშო სქემა

ხახუნის ძალების ვერტიკალური  $2fP\cos\alpha$  მდგენელებით ხდება ნაწილაკების ჩათრევა ლილვაკებს შორის მუშა ღრეჩოში. ნაწილაკზე მოქმედ ძალთა სისტემის წონასწორობის განტოლებას ლილვაკების ზედაპირზე კონტაქტის საწყის მომენტში, აქვს შემდეგი სახე:

$$2P\sin\alpha = 2fP\cos\alpha .$$

ნაწილაკის ჩათრევისათვის აუცილებელია პირობა

$$2P\sin\alpha < 2fP\cos\alpha , \tag{6.8}$$

საიდანაც

$$\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} < f \quad \text{ან} \quad \text{tg}\alpha < \text{tg}\rho ,$$

სადაც  $f$  ნაწილაკის ლილვაკის ზედაპირზე ხახუნის კოეფიციენტი;

$\rho$  - ხახუნის კუთხე.

რადგან  $D + b = D\cos\alpha + d\cos\alpha$ , ამიტომ მივიღებთ

$$D = \frac{d\cos\alpha - b}{1 - \cos\alpha} ,$$

სადაც  $D$  ლილვაკების დიამეტრია;

$d$  - ნაწილაკის დიამეტრი;

$b$  - ლილვაკებს შორის მუშა ღრეჩო.

ჩათრევის კუთხის ( $\alpha$ ) ზღვრული მნიშვნელობა ტოლი უნდა იყოს ხახუნის კუთხის ( $\rho$ ), ამიტომ ლილვაკების დიამეტრის მინიმალურად დასაშვები სიდიდე განისაზღვრება ფორმულით:

$$D_{\text{მინ.}} = \frac{d \cos \rho - b}{1 - \cos \rho}. \quad (6.9)$$

ლილვაკებიანი დამქუცმაცებლის მწარმოებლურობა იანგარიშება ფორმულით:

$$Q = \omega_{\text{ლ}} \cdot R \cdot l_{\text{ლ}} \cdot \delta \cdot \rho \cdot \psi, \quad \text{კგ/წმ}, \quad (6.10)$$

სადაც  $\omega_{\text{ლ}}$  ლილვაკების კუთხური სიჩქარეა, რად/წმ;

$R$  - ლილვაკების რადიუსი, მ;

$l_{\text{ლ}}$  - ლილვაკების მუშა სიგრძე, მ;

$\delta$  - ლილვაკებს შორის მუშა ღრეჩო, მ;

$\rho$  - მასალის მოცულობითი მასა, კგ/მ<sup>3</sup>;

$\psi$  - მასალის მიწოდების უთანაბრობის კოეფიციენტი.

## 6.2. ფხვიერი მასალის სეპარაცია და დახარისხება

ფხვიერი მასალის სეპარაცია და დახარისხება ტექნოლოგიური პროცესების განუყოფელი ნაწილებია და ფართოდ გამოიყენება მეურნეობის სხვადასხვა დარგში.

სეპარაცია ეწოდება არაერთგვაროვანი ნარევი მასის დაყოფას შემადგენელ კომპონენტებად და გამოიყენება ძირითადი პროდუქტის გასაწმენდად გარეშე მინარევებისაგან, რაც უზრუნველყოფს პროდუქტის ხარისხობრივი მაჩვენებლების ამაღლებას.

დახარისხების პროცესი გულისხმობს ერთგვაროვანი პროდუქტის დაყოფას კლასებად ზომის ან რომელიმე ხარისხობრივი მაჩვენებლის მიხედვით. დახარისხების შედეგად მიიღება თანაბარი ზომის ნაწილაკებისაგან შედგენილი საბოლოო პროდუქტი ან ნახევარფაბრიკატი (შუალედური პროდუქტი). პირველ შემთხვევაში აუცილებელია მზა პროდუქტმა მიიღოს ხარისხის სტანდარტით გათვალისწინებული გარეგნული სახე, ხოლო მეორე შემთხვევაში, შუალედური პროდუქტის ნაწილაკების ზომითი ერთგვაროვნება მნიშვნელოვანწილად განაპირობებს მომდევნო ტექნოლოგიური ოპერაციების თანაბარ რეჟიმებში წარმართვას, რაც ასევე აისახება საბოლოო პროდუქტის ხარისხში. ამრიგად,

ფხვიერი მასალის სეპარაცია და დახარისხება თანმხვედრი პროცესებია და მათ განსაკუთრებით დიდი გამოყენება აქვთ კვების მრეწველობის მრავალ დარგში.

საწყისი მასალის სეპარაციისა და დახარისხებისათვის იყენებენ ნაწილაკების სხვადასხვა ფიზიკურ თვისებას: წრფივ ზომებს (სიგრძე, სიგანე და სისქე); ნაწილაკების აეროდინამიკურ თვისებებს; სიმკვრივეს; ნაწილაკების ფორმასა და ფრიქციულ თვისებებს; ელექტროფიზიკურ, ფერომაგნიტურ თვისებებს და სხვა.

ხშირად, ნაწილაკების ცალკეული ფიზიკური თვისება ვერ უზრუნველყოფს საწყისი მასალის სრულად გაყოფას. ამიტომ, მაღალი ტექნოლოგიური ეფექტის მისაღწევად იყენებენ კომბინირებულ მეთოდებს, როდესაც საწყისი პროდუქტის დანაწილება ხდება ნაწილაკების რამდენიმე ფიზიკური თვისების მიხედვით.

ის ფიზიკური თვისებები, რომლებიც უზრუნველყოფენ საწყისი მასალის ყველაზე უფრო სრულად დანაწილებას შემადგენელ კომპონენტებად, წარმოადგენენ ნარევის გაყოფადობის ნიშანთვისებებს.

ფხვიერი მასალის სეპარაციისათვის გამოყენებული მანქანები, საწყის მასალას ყოფენ ერთი ან რამდენიმე ნიშანთვისების მიხედვით. შესაბამისად მანქანებიც ორგვარია – მარტივი და რთული.

მარტივ სეპარატორებში ნარევი იყოფა ერთი ნიშნის მიხედვით ორ ფრაქციად. რთულ სეპარატორებში ნარევის გაყოფა ხდება რამდენიმე ნიშანთვისების მიხედვით, შესაბამისი რაოდენობის ფრაქციად.

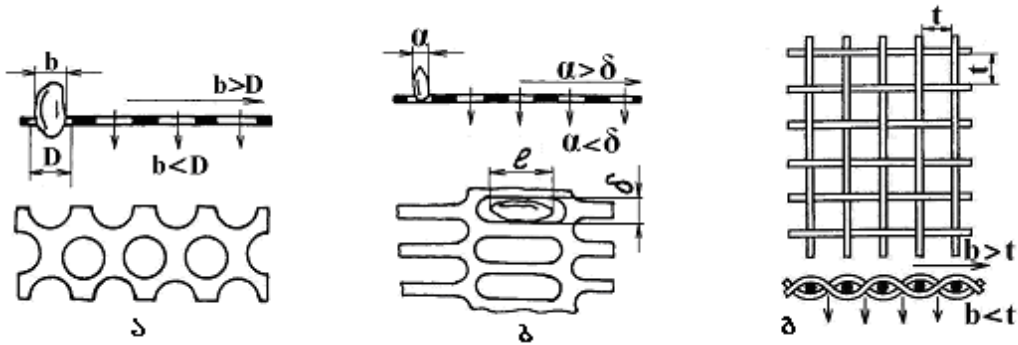
### **6.2.1. სეპარაცია და დახარისხება ნაწილაკების ზომების მიხედვით**

ნარევის გაყოფის გეომეტრიული ნიშანთვისებებია ნაწილაკების წრფივი ზომები: სიგრძე – უდიდესი გრძივი ზომა; სიგანე – უდიდესი განივი ზომა; სისქე – უმცირესი განივი ზომა.

ფხვიერი მასალის გასაყოფად ნაწილაკების სიგანისა და სისქის მიხედვით გამოიყენება მანქანები, რომელთა მუშა ორგანოა სხვადასხვა ფორმისა და ზომის ნახვრეტებიანი ბადე (სურ. 6.2). ბადეზე გატარების შემდეგ საწყისი მასალა იყოფა ორ ნაწილად – ბადეში გასულ და ბადიდან გადასულ ფრაქციებად.

დამზადების წესის მიხედვით ბადე შეიძლება იყოს დატვიფრული (სურ. 6.2, ა, ბ) და დაწნული (სურ. 6.2, გ), ხოლო ნახვრეტების ფორმის მიხედვით – წრიული, გრძივი და კვადრატული. წრიულნახვრეტებიანი ბადე ნარევის ყოფს ნაწილაკების  $b$  სიგანის მიხედვით (სურ. 6.2, ა). ნაწილაკები, რომელთა სიგანე

ნაკლებია ბადის ნახვრეტების დიამეტრზე ( $b < D$ ), გამოიყოფა ბადეში გამავალ ფრაქციაში, ხოლო როდესაც  $b > D$ , მაშინ ნაწილაკები გადადიან ბადეზე.



სურ. 6.2. სახარისხებელი ბადეების სახეები

კვადრატული ფორმის ნახვრეტები (სურ. 6.2, ვ) ნარევს ყოფენ იმავე  $b$  ზომის მიხედვით, მაგრამ გაყოფის სიზუსტე ნაკლებია, რადგან ნაწილაკების ბადეში გავლის დროს მათი ორიენტაცია შეიძლება მოხდეს კვადრატის როგორც გვერდის ( $t$ ), ისე დიაგონალის მიმართ.

გრძივნახვრეტებიანი ბადე ნარევს ყოფს ნაწილაკების  $a$  სისქის მიხედვით (სურ. 6.2, ბ). ის ნაწილაკები, რომელთა სისქე ნაკლებია ბადის ხვრელის  $\delta$  სიგანეზე, გადაიან ბადეში, ხოლო თუ  $a > \delta$ , ნაწილაკები გადადიან ბადიდან.

ბადიანი სეპარატორების ტექნიკურ მაჩვენებლებს აფასებენ ბადის ზედაპირის ფართობის გამოყენების კოეფიციენტით ანუ ცოცხალი კვეთის კოეფიციენტით, რომელიც წარმოადგენს ნახვრეტების ჯამური ფართობის ფარდობას ბადის მთლიან ზედაპირთან. ეს კოეფიციენტი არის სეპარატორის მწარმოებლურობის განმსაზღვრელი სიდიდე.

ბადიანი მანქანები ბადის ფორმის მიხედვით შეიძლება იყოს ბრტყელი ან ცილინდრული, აგრეთვე წახნაგოვანი, პირამიდული, ხოლო მუშა ორგანოს მოძრაობის ხასიათის მიხედვით – წრფივ-უკუქცევადი (ან ვიბრაციული), როტაციული, წრიულ-გადატანითი, წრიულ-რხევითი და სხვა. უფრო იშვიათად გვხვდება უძრავბადიანი მანქანები, რომლებშიც მასალის ბადის მიმართ ფარდობითი მოძრაობა სრულდება სხვა სახის მუშა ორგანოების მეშვეობით.

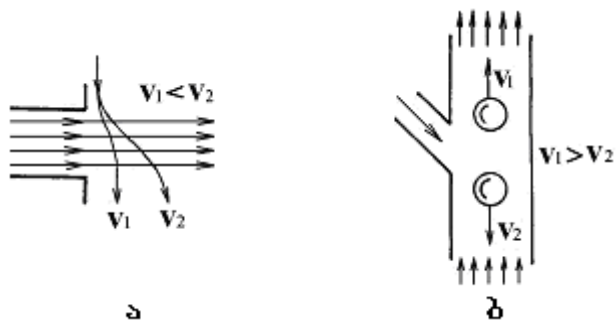
ბრტყელ- და ცილინდრულბადიანი მანქანები გამოიყენება როგორც სეპარაციისათვის, ისე დახარისხებისათვის. ბრტყელბადიანი მანქანები ცილინდრულთან შედარებით უფრო მაღალმწარმოებლურია, რადგან მუშა ზედაპირის გამოყენების კოეფიციენტი მათში გაცილებით დიდია. დინამიკური მახასიათებლების და კონსტრუქციის კომპაქტურობის თვალსაზრისით უპირატესობა ენიჭება როტაციულ მანქანებს.

ბადიანი მანქანების ძირითადი უარყოფით მხარეს წარმოადგენს ბადის ნახვრეტების ხშირი გადავსება, რაც ამცირებს მათ მწარმოებლურობას და ტექნოლოგიურ ეფექტურობას. ამიტომ, ასეთ მანქანებში ხშირად იყენებენ გამწმენდ მექანიზმებს. ხშირ შემთხვევაში გამწმენდი მექანიზმების მოქმედება არაეფექტურია და მიმართავენ ბადეების ხელით გაწმენდას. ასეთი მანქანების უარყოფით მხარეს მიეკუთვნება აგრეთვე მასალის გაძლიერებული ხახუნი მუშა ზედაპირზე, რაც უარყოფითად მოქმედებს ზოგიერთი პროდუქტის ხარისხზე. ხახუნი იწვევს აგრეთვე მტვრის წარმოქმნას, სანიტარიულ-ჰიგიენური პირობების გაუარესებას და ღირებული პროდუქტის დანაკარგების ზრდას.

### 6.2. ფხვიერი მასალის სეპარაცია ნაწილაკების აეროდინამიკური თვისებების მიხედვით

ასეთი სეპარატორების მუშაობის პრინციპი დაფუძნებულია სხვადასხვა კომპონენტის ნაწილაკების განსხვავებული აფრიანობის სიჩქარეზე (სურ. 6.3). აფრიანობის სიჩქარე ( $v$ ) დამოკიდებულია ნაწილაკის თვისებებზე – წინააღმდეგობა გაუწიოს ჰაერის ნაკადს. აფრიანობას განსაზღვრავს აგრეთვე ნაწილაკების ფორმა, სიმკვრივე, სივრცეში ორიენტაცია და სხვა. ჰაერის ნაკადის მიმართულების მიხედვით სეპარატორები არსებობს ჰორიზონტალურნაკადიანი, ვერტიკალურნაკადიანი და დახრილნაკადიანი. ჰორიზონტალურ ნაკადში  $v_1 < v_2$  (სურ. 6.3, ა), ამიტომ ფრაქციები მოძრაობენ განსხვავებული ტრაექტორიით.

ვერტიკალურნაკადიან სეპარატორში მასალა და ჰაერი მოძრაობენ შემხვედრი მიმართულებით. ის ნაწილაკები, რომელთა აფრიანობის სიჩქარე მეტია ჰაერის ნაკადის სიჩქარეზე, წარიტაცებიან ზევით და მოთავსდებიან დამლექ მოწყობილობაში, ხოლო ნაწილაკები, რომელთა აფრიანობის სიჩქარე ნაკლებია ჰაერის ნაკადის სიჩქარეზე, გადაადგილდებიან ქვევით. ამგვარად, ნარევი გაიყოფა მსუბუქ და მძიმე ფრაქციებად (სურ. 6.3, ბ) ანუ  $v_1 > v_2$ .



სურ. 6.3. ფხვიერი მასალის აეროდინამიკური თვისებების მიხედვით სეპარაციისა და დახარისხების სქემები

პნევმოსეპარატორები განსაკუთრებით ეფექტურად გამოიყენება მსუბუქი და მძიმე მინარევების გამოსაყოფად, რომლებიც მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან ძირითადი კომპონენტისაგან აეროდინამიკური მაჩვენებლებით.

პნევმოსეპარირების ტექნოლოგიური ეფექტი დამოკიდებულია შემდეგ პარამეტრებზე: ჰაერის ნაკადის სიჩქარეზე, ხვედრით დატვირთვაზე, მასალის მიწოდების თანაბრობაზე და ა.შ.

### 6.2.3. ფხვიერი მასალის ნარევის დაყოფის კრიტერიუმები

მოცემული ფხვიერი მასალის ნარევის დასაყოფად მუშა ორგანოების შერჩევის მიზნით, საჭიროა სწორად იქნეს გამოყენებული ნარევის კომპონენტების გეომეტრიული და ფიზიკური ნიშანთვისებები. უნდა გამოიკვეთოს ის ძირითადი ნიშნები, რომლებიც უზრუნველყოფენ საწყისი ნარევის ფრაქციებად გაყოფას სასურველი ხარისხობრივი მაჩვენებლებით.

ამასთან დაკავშირებით, დიდი მნიშვნელობა აქვს გასაყოფი კომპონენტების ნაწილაკების გეომეტრიული ზომების, ხვედრითი წონის, ხახუნის კოეფიციენტის, აფრიანობის, ფორმის და სხვა ფიზიკური სიდიდეების მასობრივ გაზომვას, რაც საშუალებას მოგვცემს შევისწავლოთ ამა თუ იმ ნიშანთვისების ცვლილების კანონზომიერებანი. ასეთი გაზომვების შედეგებით შესაძლებელია შევარჩიოთ ის ნიშანთვისებები, რომლებითაც ყველაზე მეტად განსხვავდებიან გამოსაყოფი კომპონენტები, ანუ განვსაზღვროთ ნარევის დაყოფის შესაძლებლობა. ასეთი გამოკვლევებით შესაძლებელია აგრეთვე შერჩეული ნიშანთვისების (D) მიხედვით განვსაზღვროთ ნარევის დაყოფის მოსალოდნელი ხარისხი (სურ. 6.4).

მასობრივი გაზომვის შედეგები გამოისახება შესასწავლი ნიშანთვისების ცვლილების (x) ვარიაციული რიგებით. ვარიაციული რიგების შესადგენად საჭიროა განისაზღვროს ნიშანთვისების სიდიდის ცვლილების ზღვრული მნიშვნელობები  $x_{\text{მინ.}}$  და  $x_{\text{მაქს.}}$ . მათ შორის სხვაობა განსაზღვრავს ნიშანთვისების ცვლილების საერთო  $\Delta_o$  ინტერვალს

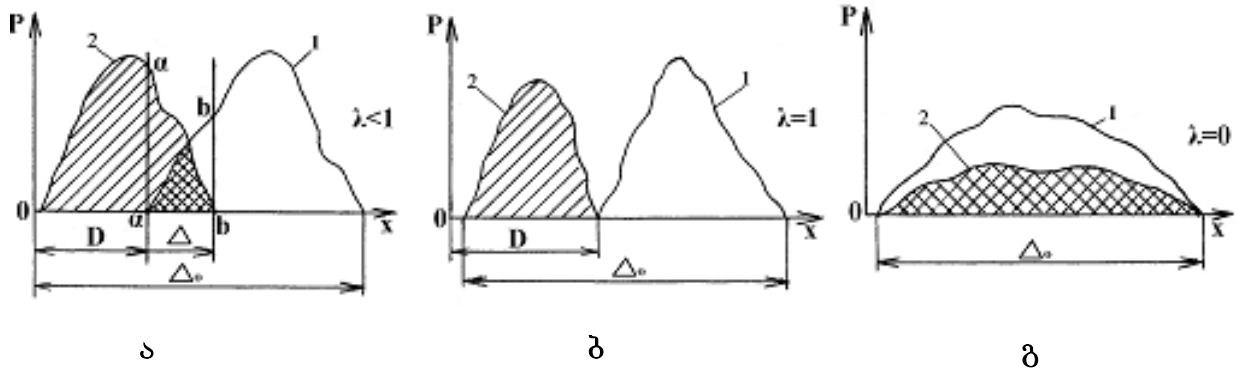
$$\Delta_o = x_{\text{მაქს.}} - x_{\text{მინ.}}$$

ეს ინტერვალი იყოფა n რაოდენობის თანაბარ კლასად. თუ გაზომვათა საერთო რიცხვი ტოლია N -ის, ხოლო ნაწილაკთა რაოდენობა ყოველ i-ურ კლასში -  $P_i$ -ის მაშინ გვექნება

$$N = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i .$$

ვარიაციული რიგის გრაფიკული გამოსახვისათვის აბსცისათა ღერძზე აღინიშნება  $x$  ნიშანთვისების კლასები, ორდინატთა ღერძზე კი – მათი სისშირე  $P$ .

ორკომპონენტიანი ნარევი  $x$  ნიშანთვისებით ხასიათდება ორი (1) და (2) ვარიაციული მრუდით (სურ. 6.4). საერთო ინტერვალი  $\Delta_o$  შეესაბამება მთლიანი ნარევის ინტერვალს, რომელშიც იცვლება ორივე კომპონენტის  $x$  ნიშანთვისება.



სურ. 6.4. ორკომპონენტიანი ნარევის დაყოფის კრიტერიუმის საანგარიშო სქემები: ა) ძნელად დასაყოფი; ბ) ადვილად დასაყოფი; გ) ნარევი, რომელიც არ დაიყოფა

როგორც 6.4,ა სურათიდან ჩანს 1 და 2 მრუდები საერთო ინტერვალის რაღაც  $\Delta$  მონაკვეთზე ფარავენ ერთმანეთს (ორმაგი წახაზული ფიგურა). შესაბამისად, ნარევის ეს ნაწილი არ შეიძლება დაიყოს მოცემული ნიშანთვისებით. დანარჩენი ნაწილი შეიძლება დაიყოს სუფთა სახით: პირველი –  $a-a$  წრფის მარცხნივ წახაზული ფიგურა, რომელიც გამოიყოფა  $x=D$  სიდიდის ნიშანთვისებით და მეორე –  $b-b$  წრფის მარჯვნივ მდებარე ფიგურა, რომელიც გაიყოფა  $x=D+\Delta$  სიდიდის ნიშანთვისებით.

ორკომპონენტიანი ნარევის გაყოფის კრიტერიუმად შეიძლება მივიღოთ თეორიულად შესაძლო გაყოფისა და ნარევის საერთო ინტერვალის შეფარდება

$$\lambda = \frac{\Delta_o - \Delta}{\Delta_o} = 1 - \frac{\Delta}{\Delta_o}. \quad (6.11)$$

სეპარაციის დროს შეიძლება გვექონდეს სხვადასხვა შემთხვევა:

- $\Delta < \Delta_o$ , მაშინ  $\lambda < 1$  და ნარევი ძნელად გასაყოფია (სურ. 6.4, ა);
- $\Delta = 0$ , მაშინ  $\lambda = 1$  და ნარევის გაყოფა შესაძლებელია (სურ. 6.4, ბ);
- $\Delta = \Delta_o$ , მაშინ  $\lambda = 0$  და ნარევის გაყოფა შეუძლებელია (სურ. 6.4, გ).

პრაქტიკაში უფრო ხშირად გვხვდება ძნელად დასაყოფი ნარევები. თუ, ერთი რომელიმე ნიშნის მიხედვით დაყოფა შეუძლებელია, ნარევის სეპარაციისათვის იყენებენ რამდენიმე ნიშანთვისებას. ამასთან, დაყოფის ოპერაციები შესაძლებელია მიმდინარეობდეს თანმიმდევრობით ან პარალელურად.

### 6.3. ფხვიერი, ბლანტი და თხევადი პროდუქტების შერევა

თანამედროვე საკვები პროდუქტების საწარმოებში სხვადასხვა სახის პროდუქტების შერევა ერთ-ერთი ძირითადი ტექნოლოგიური პროცესია. შესარევი პროდუქტები ძირითადად გვხვდება მყარ და თხევად მდგომარეობებში. მათ აქვთ თავიანთი გეომეტრიული, ფიზიკური და ქიმიური თვისებები. ამიტომ საჭირო ხდება ისეთი შემრევი მანქანა-აპარატის დამზადება, რომელიც აღნიშნული თვისებების გათვალისწინებით უზრუნველყოფს პროდუქტების ოპტიმალურ შერევას.

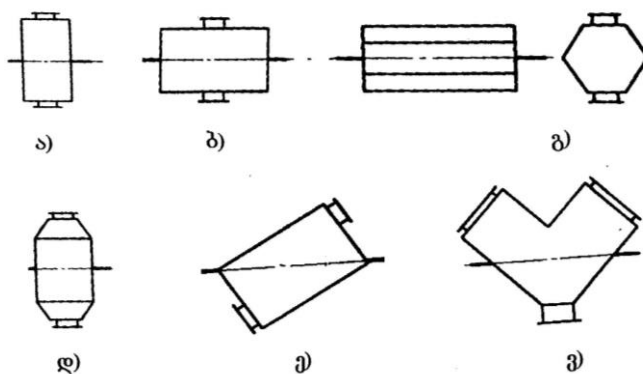
**მბრუნავსაკნინი შემრევეები.** ფხვიერი მასალების შემრევი მოწყობილობები მათი დანიშნულებისა და მუშაობის პრინციპის მიხედვით კლასიფიცირდებიან რამდენიმე ჯგუფად.

მშრალი ფხვიერი პროდუქტების შემრევი კონსტრუქციის მიხედვით არსებობს ორი სახის: მბრუნავი და სატრანსპორტო. მბრუნავ მოწყობილობებს მიეკუთვნება სხვადასხვა ტიპის შემრევეები: დოლური, კონუსური, მბრუნავკუბიანი და სხვ. ძირითადი ტიპის დოლური შემრევეები ნაჩვენებია 6.5 სურათზე.

უფრო ხშირად, ცილინდრულ დოლებს ამაგრებენ ჰორიზონტალურ ლილვებზე ან ვერტიკალურად (სურ. 6.5, ა, დ), ან ჰორიზონტალურად (სურ. 6.5, ბ, გ).

ფხვიერი პროდუქტების ინტენსიური შერევისათვის, როდესაც დასაშვებია ნაწილაკების დაქუცმაცება, იყენებენ ექვსწახნაგა ტიპის შემრევეებს (ნახ. 6.5, ე).

ბევრი ფხვიერი პროდუქტი (ჩაი, ყავა) მოითხოვს შერევის რბილ რეჟიმს, რომელიც უზრუნველყოფს ნაწილაკების სტრუქტურის მთლიანობას. ამ მიზნით იყენებენ კონუსური ძირის მქონე დოლებს (სურ. 6.5, დ). პროდუქტების მოძრაობის თავისებურების გამო შერევის მაღალ ეფექტს იძლევა სურ. 6.5, ე, ვ სქემები.



სურ. 6.5. ძირითადი ტიპის დოლური შემრევეები

დოლური შემრევეები გამოიყენება, როგორც ძალიან მცირე (რამდენიმე ღმ<sup>3</sup>), ასევე ძალიან დიდი (20 მ<sup>3</sup> – მდე) მოცულობის ფხვიერი მასალებისათვის. ამგვარი

შემრევის უპირატესობაა მისი აგების, მოხმარებული ენერჯის და ექსპლუატაციის მცირე დანახარჯები, მასალის ადვილად ჩატვირთვა-გადმოტვირთვის და დანადგარის ადვილად გაწმენდის შესაძლებლობა. აპარატის ნაკლოვან მხარედ ითვლება შერევის უწყვეტი პროცესის შესრულების სირთულე.

როგორც გამოკვლევები აჩვენებს, ფხვიერი პროდუქტების შერევის ხარისხი მათი მრავალჯერადი, დასაშვებზე მეტად გადაჩქვით უარესდება და ნარევი მიმდინარეობს საპირისპირო პროცესები – დახარისხება და სეპარაცია. ამის გამო ყოველი ცალკეული პროდუქტისა და შემრევისათვის ექსპერიმენტულად განისაზღვრება პროდუქტის გადაჩქვის ოპტიმალური რაოდენობა, რომელიც უზრუნველყოფს შერევის მაღალ ხარისხს. თუ საჭირო გადაჩქვის რიცხვს აღვნიშნავთ  $m$ -ით, დოლის ბრუნვის სიხშირეს წუთში -  $n$ -ით, მაშინ დოლში პროდუქტის შერევის ხანგრძლივობა

$$t = \frac{m}{n},$$

დოლური ტიპის შემრევის მწარმოებლურობა იანგარიშება ფორმულით:

$$Q = \frac{V\rho}{t_1 + t_2 + t_3}, \quad (6.12)$$

სადაც  $V$  - შემრევი დოლში პროდუქტის მოცულობაა, მ<sup>3</sup>;

$\rho$  - ნარევის მოცულობითი მასა, კგ/მ<sup>3</sup>;

$t_1$  - პროდუქტის შერევისათვის საჭირო დრო, წმ;

$t_2$  - დოლის შესავსებად საჭირო დრო, წმ;

$t_3$  - დოლის განტვირთვისათვის საჭირო დრო, წმ.

დოლური შემრევის გარდა მბრუნავსაკნიანი შემრევის ჯგუფში შეიძლება გამოვეყნოთ აპარატები, რომელთა მოქმედების პრინციპი იგივეა, მაგრამ საკნის ფორმა განსხვავებული: ბიკონუსური, V-სმაგვარი და ა.შ. ასეთი აპარატები უზრუნველყოფენ უფრო ხარისხიანი პროდუქციის მიღებას (უფრო მაღალი შერევის დონე), ვიდრე უბრალო დოლური შემრევი.

**უძრავსაკნიანი შემრევის** გამოყენება შეიძლება ფართო დიაპაზონის თვისებების მქონე მასალებისთვის. შესარევი მასალების თვისებების მიხედვით გამოიყენება ლენტის და დისკოიანი შემრევი. ლენტის შემრევი შეიძლება განსხვავდებოდნენ ლენტის სიგანით, ლენტის დაშორებით დოლის ზედაპირიდან, ლენტის ხვიების რაოდენობით, შემრევი მექანიზმის ბრუნთა რიცხვით, ჩატვირთვა-გადმოტვირთვის მეთოდებით. ეს აპარატები გამოდგება როგორც პერიოდული, ისე უწყვეტი მუშაობისათვის.

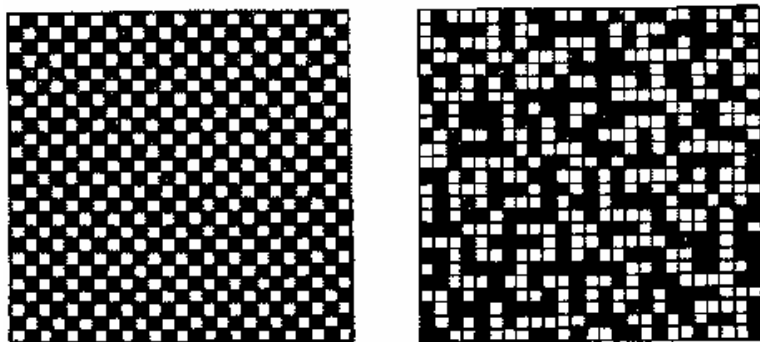
მბრუნავდისკოიანი აპარატის შემრევ მექანიზმს აქვს დიდი სიჩქარით მბრუნავი თხელი დისკო, რომელიც თავის გარშემო წარმოქმნის სიჩქარის დიდ გრადიენტს, რაც იწვევს ძვრის დიდ ძალებს. ამ ტიპის აპარატები გამოიყენება როგორც ფხვიერი მასალების, ისე ზოგიერთი სახის სითხეებისა და სუსპენზიების შესარევად.

### 6.3.1. ნარევი ფხვნილი

ნარევი ფხვნილი, შედგენილი ორი ან მეტი რაოდენობის ფხვიერი პროდუქტისგან, წარმოადგენს სისტემას, რომლის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებები მკვეთრად განსხვავდება თხევადი და აირადი ნარევებისაგან. ფხვიერი ფაზის კომპონენტი არის დინამიკურ ოპერაციაში ერთნაირად მოქმედი ნაწილაკების ერთობლიობა. ნაწილაკების მოქცევის განმსაზღვრელ პარამეტრებს მიეკუთვნება ზომები, ფორმა და კუთრი წონა.

თეორიული მიზნებისთვის შემოდის იდეალური სისტემის ცნება, ე.ი ერთი სახის და ზომის ნაწილაკების მქონე პროდუქტები. ასეთი სისტემა ხშირად გამოიყენება შემრევი მექანიზმების კვლევისთვის. ამ სისტემაში კომპონენტების გამოსაყოფად მათ ღებავენ სხვადასხვაფერად.

იდეალური შერევის შემთხვევა ნაჩვენებია 6.6, ა სურათზე. მთლიანად შერეული ნარევიდან აღებულ ყველა სინჯს უნდა ჰქონდეს თანაბარი შედგენილობა. ვერც ერთი დინამიკური ოპერაციის ჩატარებით ასეთი შედგენილობის ნარევი ვერ მიიღება. მისი მიღება შესაძლებელია მხოლოდ შესარევი ნაწილაკების კომპონენტების თანმიმდევრული განლაგებით.



ა

ბ

სურ. 6.6. ორკომპონენტიანი ნარევის სრული შერევის მდგომარეობა:  
 ა) იდეალური მდგომარეობა ბ) ფაქტობრივი მდგომარეობა

სტატისტიკურად განსაზღვრული სრული შერევის მდგომარეობა წარმოადგენს ფაქტობრივ მდგომარეობას. ეს ისეთი მდგომარეობაა, რომელშიც

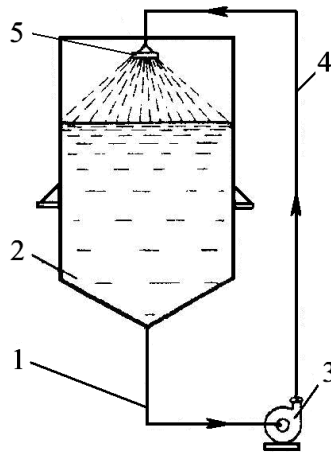
მოცემული კომპონენტის ოდენობა ნარევის ყოველ არეში არ არის მუდმივი სიდიდე. ფაქტობრივი მდგომარეობა მიიღწევა შერევის პროცესში (სურ. 6.6, ბ).

### 6.3.2. სითხეების შერევის პროცესი

თხევადი საკვები პროდუქტის შერევას ფართო გამოიყენება აქვს საკონდიტრო, პურსაცხობ, მაკარონის, მეღვინეობის, ლუდის და სხვა მრავალ საწარმოში. მათი დანიშნულებაა: ხსნარების, ემულსიების, სუსპენზიების მომზადება; თბური, ქიმიური და ბიოქიმიური პროცესების ინტენსიფიკაცია; პროდუქტების დამუშავება მათთვის განსაზღვრული კონსისტენციის მინიჭების მიზნით.

თხევადი საკვები პროდუქტების შერევას ახორციელებენ როგორც მექანიკური შემრევეებით, ასევე სხვა მეთოდებითაც, მაგალითად, მილგაყვანილობებით, ცირკულაციით, შეკუმშული ჰაერით და სხვა.

სითხეების ცირკულაციით შერევის ყველაზე მარტივი მოწყობილობის სქემა ნაჩვენებია 6.7 სურათზე. ცირკულაციური შერევა ხდება ჭურჭელში (2) სითხის მრავალჯერადი ჩასხმა-გადასხმით, რაც ხორციელდება გამომშვები მილით (1), ტუმბოთი (3), მიმწოდი მილით (4) და გამშხეფით (5).



სურ. 6.7. სითხეების ცირკულაციური შერევის სქემა

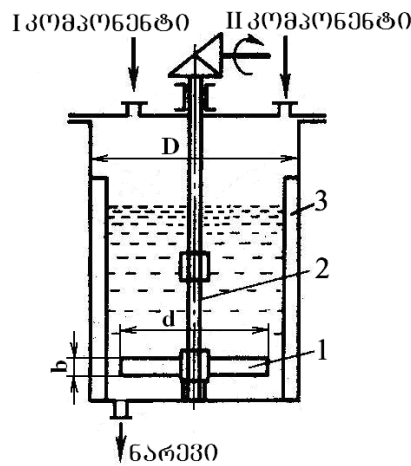
სითხეების შერევისას მნიშვნელოვან როლს ასრულებს სითხეთა ფიზიკური პარამეტრები, უპირველეს ყოვლისა სიბლანტე. არსებობს საერთო აზრი, რომ მცირე სიბლანტის სითხეების შერევისას კარგ შედეგს იძლევა სწრაფმავალი შემრევი მოწყობილობები, ხოლო მაღალი სიბლანტის სითხეების შერევისას – ნელმავალი შემრევი მოწყობილობები.

სხვადასხვა სიბლანტის სითხეებისათვის შემუშავებულია რეკომენდაციები, რომელთა თანახმად ფართო დიაპაზონის სიბლანტის სითხეების შესარევად

უფრო მეტად გამოიყენება ტურბინული და პროპელერიანი შემრევები. გარდა ამისა, მაღალი სიბლანტის სითხეების შესარევად ყველაზე მეტად მოხერხებულია ლენტური და შნეკური ტიპის შემრევების გამოყენება. საშუალო სიბლანტის სითხეების შესარევად შეიძლება გამოვიყენოთ რამდენიმე ტიპის შემრევი მოწყობილობა.

ზომიერი სიბლანტის სითხეების შესარევად იყენებენ ფრთებიან შემრევებს (სურ. 6.8). უმარტივეს ფრთებიან შემრევს აქვს ორი ბრტყელი ფრთა (1), რომლებიც დამაგრებულია ლილვზე (2) მისი ბრუნვის მიმართულების პერპენდიკულარულად. ლილვის ბრუნვის სიჩქარეა  $v=1,5...5,0$  მ/წმ, სითხის სიბლანტის შესაბამისი მნიშვნელობების დროს -  $\mu=3,0...0,001$  პა.წმ.

დადგენილია, რომ თანაბარი შერევა ენერჯის მინიმალური ხარჯის დროს მიიღწევა მაშინ, როდესაც სითხის ფენის სიმაღლე ტოლია აპარატის დიამეტრის; ფენის სიმაღლის მომატებასთან ერთად მკვეთრად იზრდება ენერჯის ხარჯიც და შერევის მოცემული ეფექტურობის მისაღწევად ასეთ აპარატებში სითხის ფენის სიმაღლის პროპორციულად ლილვზე ამაგრებენ ფრთების ორ ან სამ რიგს.

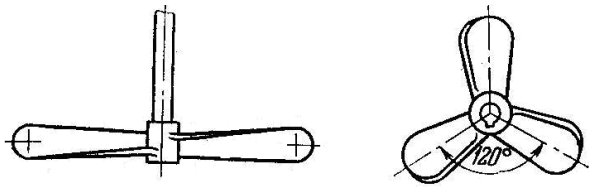


სურ. 6.8. ფრთებიანი შემრევი

სუსპენზიების შერევის შემთხვევაში ფრთებს ლილვზე ამაგრებენ ბრუნვის სიბრტყისადმი  $45^0$ -იანი დახრის კუთხით, რის შედეგადაც წარმოიქმნება სითხის არა მხოლოდ კორიზონტალური ნაკადები, არამედ ვერტიკალურიც. ეს უზრუნველყოფს აპარატის ძირიდან ნაწილაკების გადაადგილებას ზევით და შერევის ეფექტურობის გაზრდას.

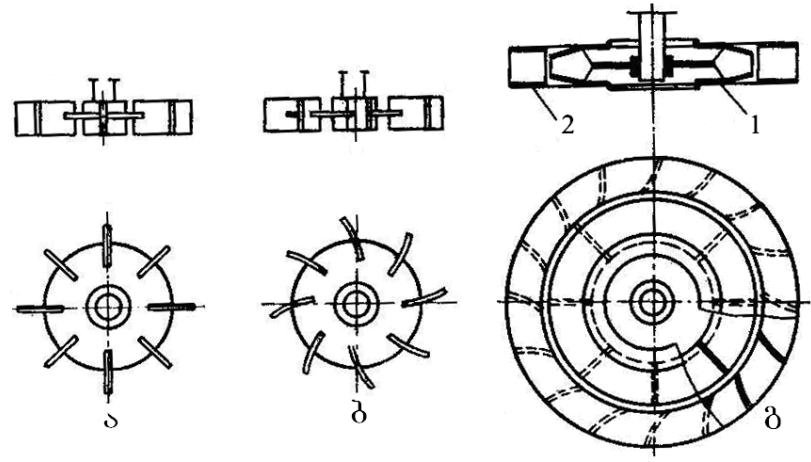
ფრთების  $d$  დიამეტრი შეადგენს აპარატის  $D$  დიამეტრის 0,6-0,7, ხოლო სიგანე  $b=0,1d$ . აპარატში გრიგალისებური ნაკადის შექმნის მიზნით, მის გვერდით ზედაპირზე ამაგრებენ  $b=0,1D$  სიგანის ვერტიკალურ თამასებს (3).

**პროპელერულ შემრევებს** იყენებენ ზომიერი სიბლანტის სითხეების ინტენსიური შერევისათვის. ამ შემრევების ფრთები (სურ. 6.9) მოხრილია პროპელერის პროფილის შესაბამისად ანუ დახრის თანდათანობითი ცვლილებით -  $0^{\circ}$  ღერძთან და  $90^{\circ}$ -მდე ფრთის ბოლოზე. ამის გამო სითხე ფრთების მიერ გაიტყორცნება მრავალი მიმართულებით და ამ დროს წარმოქმნილი შემხვედრი ნაკადები უზრუნველყოფენ კარგ შერევას. პროპელერულ შემრევს, როგორც წესი, აქვს ორი ან სამი ფრთა. პროპელერის დიამეტრი  $d=(0,25...0,3)D$ , ხოლო ბრუნვის სიჩქარე  $\nu=3,8...16$  მ/წმ-ს სითხის სიბლანტისათვის  $\mu=4,0...0,001$  პა.წმ.



სურ. 6.9. პროპელერული შემრევები

**ტურბინული შემრევები** უზრუნველყოფენ კარგ შერევას ბლანტი და ისეთი სითხეების, რომლებიც შეიცავენ შეწონილ ნაწილაკებს. ასეთი შემრევების მუშა ნაწილებია  $\nu=2,5...12$  მ/წმ ბრუნვის სიჩქარის და  $d=(0,25...0,3)D$  დიამეტრის ღია ან დახურული ტიპის ტურბინები (სურ. 6.10).

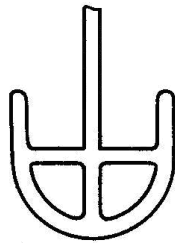


სურ. 6.10. ტურბინული შემრევების მუშა ნაწილები:

- ა,ბ – სწორფრთებიანი და მოხრილფრთებიანი ღია ტურბინები;
- გ – დახურული ტიპის ტურბინა; 1-ტურბინა, 2-მიმმართველი აპარატი

ღია ტიპის ტურბინას აქვს სწორ- ან დახრილფრთებიანი მუშა ბორბლები, ხოლო დახურული ტიპის ტურბინას აქვს არხებიანი ბორბლები. დახრილფრთებიანი ღია ტურბინისაგან განსხვავებით, რომლებიც ქმნიან ღერძულ ნაკადს, დახურული ტურბინა, ბრუნვის მიმართულების შესაბამისად, ქმნის რადიალურ ან ღერძულ ნაკადს, რაც უზრუნველყოფს სწრაფ და ეფექტურ შერევას.

**ღუზისმაგვარი შემრევები** გამოიყენება შედეგებული და ბლანტი თხევადი არეების შესარევად. ასეთი შემრევის ფრთა (სურ. 6.11) მოხრილია აპარატის კედლისა და ძირის ფორმის მიხედვით. მუშა ორგანო ბრუნავს 50...60 ბრ/წთ სიხშირით, აპარატის კედლიდან 5...8 მმ-ის დაშორებით. ასეთი ფრთა ასუფთავებს აპარატის კედლებს მასზე მიკრული მასისაგან, რაც აუმჯობესებს თბოცვლას და გამორიცხავს მასის გადახურებას.



სურ. 6.11. ღუზისმაგვარი შემრევის მუშა ორგანო

#### 6.4. საკვები პროდუქტების წნევით დამუშავება

საკვები პროდუქტების წნევით დამუშავების ძირითადი მეთოდია დაწნეხა, რომელიც ემსახურება რამდენიმე მიზანს:

- სითხის გამოწნეხას მყარი პროდუქტიდან;
- პლასტიკური პროდუქტების დაფორმებას;
- ფხვიერი პროდუქტის შემჭიდროებას ტრანსპორტირების გაუმჯობესების მიზნით;
- პროდუქტის დაფორმებას.

სითხის გამოყოფა დაწნეხით ფართოდ გამოიყენება, მაგალითად, მეღვინეობაში ყურძნის გადამუშავების პროცესში; ხილ-კენკროვანთა ნაყოფიდან წვენების მისაღებად; ზეთოვანი კულტურებიდან ზეთის მისაღებად და სხვა. სითხის გამოყოფასთან ერთად მიმდინარეობს მყარი ნარჩენის შემჭიდროება და დაბრიკეტება.

გამოწნეხის ძირითადი მახასიათებელი სიდიდეა წარმოადგენს თხევადი ფაზის გამოსავალი, რომელიც დამოკიდებულია მუშა წნევის სიდიდეზე, უჯრედოვან სტრუქტურასთან თხევადი ფაზის კავშირის ხასიათზე, საწყის მასალასა და

ნარჩენში თხევადი ფაზის შემცველობაზე, პროცესის ტემპერატურაზე, მასალის ფენის სისქესა და პროცესის ხანგრძლივობაზე.

პროდუქტში თხევადი ფაზა შეიძლება გავყოს თავისუფალ და შეკავშირებულ სითხედ. თავისუფალი სითხე ადვილად გამოიყოფა მშრალი ნარჩენიდან. შეკავშირებული სითხის (მოლეკულური ან ადსორბირებული) გამოსაყოფად საჭიროა ენერჯის დახარჯვა შეჭიდულობის ძალების დასაძლევად, სტრუქტურის დეფორმირებისათვის, არხებში სითხის გადაადგილების წინააღმდეგობის ძალების დასაძლევად, ამასთან ეს წინააღმდეგობა იზრდება კუმშვის ძალების ზრდასთან ერთად, რაც გამოწვეულია არხების კვეთის შემცირებით.

სითხის გამოწნევის ფიზიკური არსი ასეთია: მასალის ნაწილაკების ურთიერთდაახლოებისას მათ შიგნით და ზედაპირზე სითხეს აკავებს მოლეკულური შეჭიდულობა. დასაწყისში სითხე მოძრაობას იწყებს ნაწილაკებს შორის არხებში, ხოლო შემდეგ დაწნევის პროცესში სითხე მოძრაობს ფოროვანი პროდუქტის ფენაში ცვლადი კვეთის და სიმრუდის კაპილარებში. ამასთან დაკავშირებით დროის ერთეულში კაპილარში გამავალი სითხის რაოდენობა  $V$  შეიძლება განისაზღვროს **პუაზელის** განტოლებით:

$$V = \frac{\pi \Delta p d^4}{128 \mu l} \text{ მ}^3/\text{წმ},$$

სადაც  $\Delta p$  – კაპილარში წნევათა სხვაობაა, პა;

$d$  - კაპილარის დიამეტრი, მ;

$\mu$  - სითხის დინამიკური სიბლანტე, პა.წმ;

$l$  - კაპილარის სიგრძე, მ.

ამ განტოლების თანახმად, დაწნევის დროს გამოყოფილი სითხის რაოდენობა პირდაპირპროპორციულია წნევათა სხვაობის, კაპილარების ზომების და უკუპროპორციულია სითხის სიბლანტისა და კაპილარების სიგრძის. შესაბამისად, უფრო სრულ გამოწნეხას უზრუნველყოფს მუშა წნევის გაზრდა და სითხის სიბლანტის შემცირება. მაგრამ წნევის გაზრდით მცირდება კაპილარების კვეთი და შესაბამისად – პროცესის მწარმოებლურობა. ამიტომ, დაწნევის ოპტიმალურ მუშა წნევას ადგენენ ცდების საფუძველზე მასალის სტრუქტურულ-მექანიკური თვისებების გათვალისწინებით, აგრეთვე მიღებული პროდუქტის რაოდენობით და ხარისხით.

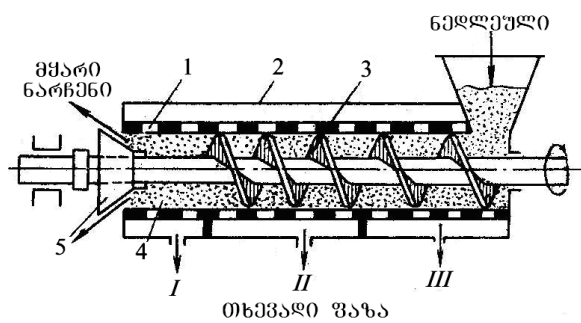
მოყვანილი განტოლება არ ითვალისწინებს მრავალ ფაქტორს, რომლებიც დაკავშირებულია დასაწნევი მასის დეფორმაციებთან, მის ფორიანობასთან და

ფენის სისქესთან. მიუხედავად ამისა ის საშუალებას გვაძლევს საკმაოდ დრმად გავაანალიზოთ პროცესი მისი მახასიათებელი პარამეტრებით.

იმისათვის, რომ უზრუნველყოფილი იყოს სითხის უფრო სრულყოფილი გამოყოფა, ხშირად, საწყის მასალას აქუცმაცებენ, ამუშავებენ მას თბური და ელექტრული ენერგიების გამოყენებით. ხშირად სითხის სიბლანტის შესამცირებლად დასაწნეს მასალას ხშირად აცხელებენ ტექნოლოგიური პირობებით დასაშვებ ტემპერატურამდე.

სითხის გამოსაწნეხი მოწყობილობები მოქმედების პრინციპის მიხედვით არის პერიოდული და უწყვეტი ქმედების წნეხები, მუშა წნეხის შექმნის მეთოდის მიხედვით კი მექანიკური და პნევმატიკური წნეხები. მრეწველობაში ფართო გავრცელება პოვს უწყვეტი ქმედების შნეკურმა და ლილვაკებიანმა აგრეთვე პერიოდული ქმედების პნევმატიკურმა წნეხებმა.

**ჰორიზონტალური შნეკური წნეხის** მოწყობილობა ნაჩვენებია 6.12 სურათზე. პერფორირებულ ცილინდრში (1), რომელიც მოთავსებულია ჰორიზონტალურ კორპუსში (2), მოთავსებულია კლებადბიჯიანი შნეკი (3). შნეკის დანიშნულებაა როგორც პროდუქტის ტრანსპორტირება, ასევე მისგან სითხის გამოწნეხა. I, II და III ფრაქციებში კორპუსის ძირში არსებული მილყელებიდან გამოიყოფა სხვადასხვა გამჭვირვალობის სითხე. საბოლოოდ სითხე გამოიყოფა წნეხის კამერაში (4). წნეხის გამოსასვლელი ნახვრეტი იკეტება კონუსით (5), რომლის მეშვეობითაც რეგულირდება მასალის გამოსასვლელი წრიული რგოლის დიამეტრი და შესაბამისად გამოწნეხილი სითხის მაქსიმალური რაოდენობა.



სურ. 6.12. შნეკური წნეხი

შნეკურ წნეხში სითხის გამოწნეხის მაქსიმალურობას განაპირობებს შემდეგი ფაქტორები:

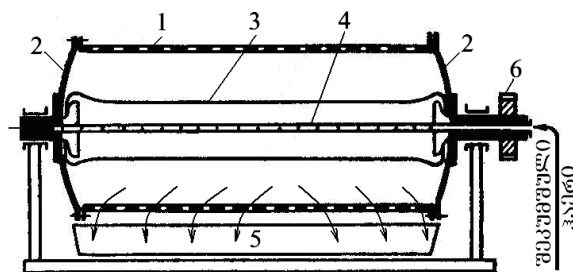
- შნეკის ხვიებს შორის მოთავსებული მასალის მოცულობის შემცირება, რასაც განაპირობებს შნეკის ბიჯის შემცირება მასალის მოძრაობის მიმართულებით;
- შნეკის ბრუნვის დროს ხვიების მექანიკური ზემოქმედება პროდუქტზე;

- დასაწნეხი მასალის ხახუნი ხვიების ზედაპირზე, ცილინდრის კედლებზე და ნაწილაკებს შორის ხახუნი;

- დაწნეხილი მასალის გამოსასვლელი წრიული რგოლის დიამეტრის რეგულირების საზღვრები.

სითხის გამოსავალი და მისი ხარისხი დამოკიდებულია შნეკის ხვიებს შორის მასალის შეკუმშვის ხარისხზე, რომელიც ხასიათდება კუმშვის ( $k$ ) კოეფიციენტით. ეს კოეფიციენტი წარმოადგენს შნეკის პირველ და ბოლო ხვიებში არსებული მასალის მოცულობების (შესაბამისად  $V_1$  და  $V_2$ ) ფარდობას, ანუ  $k = V_1/V_2$ .

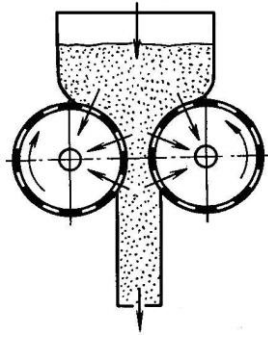
**პნევმატიკურ წნეხში** (სურ. 6.13) დასაწნეხ პროდუქტზე წნევა იქმნება შეკუმშული ჰაერით, რომელიც ზრდის ფურცლოვანი რეზინისაგან დამზადებული ცილინდრის (3) მოცულობას, მიღში (4) მიწოდებული შეკუმშული ჰაერით. ცილინდრი (3) ჩადგმულია პერფორირებულ მბრუნავ დოლში (1), რომელიც ტორსული მხრიდან დახურულია ხუფებით (2). დასაწნეხი მასალა თავსდება (3) ცილინდრსა და (1) დოლს შორის არსებულ არეში. ცილინდრის (3) მოცულობის გაზრდა იწვევს აღნიშნული არის შემცირებას და შესაბამისად მასალის წნევის გაზრდას. რბილ რეჟიმში დაწნეხა მექანიკურად არ აზიანებს პროდუქტს და სითხე გამოდის მაღალი ხარისხის.



სურ. 6.13. პნევმატიკური წნეხი

წნეხი პერიოდული ქმედებისაა. მასში მასალის ჩატვირთვა და გამოტვირთვა ხორციელდება დოლზე (1) გაკეთებული ლიუკებიდან. წნეხის მუშაობის პროცესში მასალა გადაიჩეჩება რამდენიმეჯერ დოლის (1) ბრუნვის საშუალებით, ოღონდ ცილინდრიდან (3) წინასწარ ხდება ჰაერის გამოშვება. დოლის ბრუნვა ხორციელდება ამძრავი კბილანათი (6). გამოყოფილი წვენი დოლის (1) ნახვრეტების გავლით ჩაედინება შემკრებში (5).

**ლილვაკებიან წნეხში** (სურ. 6.14) მასალიდან თხევადი ფაზის გამოწნეხა მიმდინარეობს შემხვედრი მიმართულებით მბრუნავი პერფორირებული ღრუტანიანი ლილვაკებით.



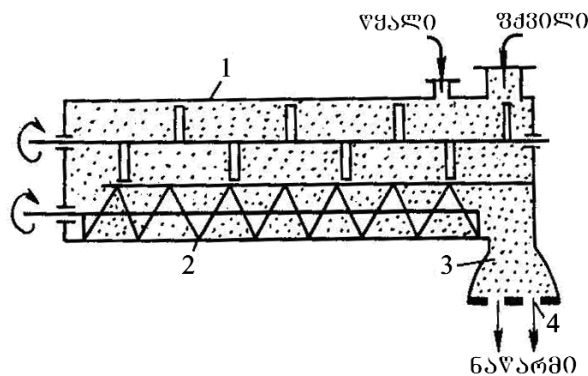
სურ. 6.14. ლილვაკებიანი წნეხი

ლილვაკების მიერ მასალის ჩათრევის პროცესში მასში წარმოიქმნება წნევა, რის შედეგადაც სითხე შედის ლილვაკების ზედაპირზე არსებულ ნახვრეტებში და იქედან გამოდის გარეთ, ხოლო ნარჩენი გაითრევა ლილვაკებს შორის არსებული ღრეხოდან.

#### 6.4.1. პლასტიკური მასალების დაფორმება

დაფორმების მეშვეობით პლასტიკურ მასალებს ანიჭებენ სასურველ ფორმას. ეს მეთოდი გამოიყენება პურსაცხობ, მაკარონის და საკონდიტრო საწარმოებში ცომის და საკონდიტრო ნაწარმის დასაფორმებლად. ცომის მასა მიეკუთვნება დრეკად-პლასტიკურ მასალებს. დაფორმების მეთოდზე დამოკიდებულებით განასხვავებენ დამწნეს, შემომგორ და დამტვიფრავ მოწყობილობებს. დამწნეს მოწყობილობებს იყენებენ მაკარონის, ვერმიშელის, საფუარის და სხვა პროდუქტების დასამზადებლად. ასეთი წნეხები შედგება დამწნევი მოწყობილობისაგან და განსაზღვრული ზომის ნახვრეტების მქონე დამფორმებელი მატრიცისაგან.

მაკარონის და ვერმიშელის დასამზადებელი შნეკური წნეხი (სურ. 6.15) შედგება ცომსაზელისაგან (1), დამწნევი შნეკისაგან (2) და დამწნეხი თავისაგან (3), რომელიც უზრუნველყოფს მატრიცაზე (4) თანაბარი წნევის შექმნას.



სურ. 6.15. მაკარონის და ვერმიშელის დასამზადებელი შნეკური წნეხი

დამწვევი შნეკით ცომი გამოიწვეხება მატრიცის (4) ნახვრეტებში და მიიღება განსაზღვრული ფორმის და კვეთის ნაწარმი. სხვადასხვა ასორტიმენტის ნაწარმის მისაღებად იყენებენ განსხვავებული ფორმის მატრიცებს.

#### 6.4.2. დისპერსიული პროდუქტის ბრიკეტირება

ბრიკეტირება ეწოდება ჩაკეტილ არეში გარე წნევის ზემოქმედებით ფხვიერი პროდუქტის გამკვრივებას დაწნეხით ისეთი სიმკვრივის მონოლითური ბრიკეტის მიღებამდე, რომელიც თვითნებურად არ დაირღვევა.

მიღებულ ბრიკეტს უნდა ჰქონდეს საჭირო ზომები, მასა და სიმტკიცე, რაც აუცილებელია მისი შემდგომი ტრანსპორტირებისა და შენახვისათვის. მაგრამ პროდუქტის ხანგრძლივი შენახვისათვის იგი საჭიროებს დამატებით დამუშავებას, მაგალითად, შრობას.

დაწნეხის დროს პროდუქტის შემჭიდროებას თან ახლავს მისი ნაწილაკების დაქუცმაცება და ფარდობითი გადაადგილება, რაც გამოწვეულია მასალის პლასტიკური და დრეკადი დეფორმაციებით. ფაქტორები, რომლებიც განსაზღვრავენ დისპერსიული პროდუქტის დაწნეხის პროცესს, შეიძლება გავყოთ ორ ჯგუფად:

I ჯგუფი - პროდუქტის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების მახასიათებელი ფაქტორები:

- დაწნეხის მოდული, რომელიც ახასიათებს პროდუქტის შემჭიდროების უნარს გარე წნევის გადაცემით. ამ ფაქტორს წნევის გარკვეულ ინტერვალში აქვს მუდმივი სიდიდე და დამოკიდებულია პროდუქტის სახეობაზე, მის სტრუქტურასა და შემადგენელი ნაწილების ზომებზე;

- გვერდითი წნევის კოეფიციენტი – გვერდითი წნევის შეფარდება ვერტიკალურ წნევასთან;

- პროდუქტის ტენიანობა, ტემპერატურა და გრანულომეტრიული შედგენილობა.

II ჯგუფი – დაწნეხის პირობების მახასიათებელი ფაქტორები. მათ მიეკუთვნება:

- დაწნეხის კუთრი წნევა;
- პროდუქტის ხახუნი დამწნეხ ზედაპირებზე, რომლის სიდიდე დამოკიდებულია პროდუქტის თვისებებსა და ზედაპირების მდგომარეობაზე (სიმქისეზე);
- ბრიკეტის ფორმა და მისი ზომების თანაფარდობა.
- დაწნეხის რეჟიმი, რომელიც შეიძლება იყოს ციკლური ან უწყვეტი;

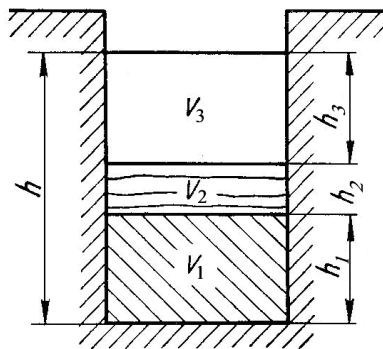
- ბრიკეტის იმ ზედაპირების რაოდენობა, რომლებიც უშუალოდ განიცდიან დაწნევის წნევას. ამ ზედაპირების რიცხვის მიხედვით დაწნევის პროცესი შეიძლება იყოს:

- ცალმხრივი, როდესაც გარე წნევა გადაეცემა ბრიკეტის ერთ ზედაპირს;
- ორმხრივი, როდესაც გარე წნევა გადაეცემა ბრიკეტის ურთიერთსაპირისპირო ორ ზედაპირს;
- მრავალმხრივი, როდესაც გარე წნევა გადაეცემა ბრიკეტის რამდენიმე ზედაპირს;

სქემატურად ბრიკეტის  $V$  მოცულობა შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც სამი ნაწილისაგან შემდგარი: პირველ ნაწილს აქვს  $V_1$  მოცულობა და  $h_1$  სიმაღლე და შეესებულება მშრალი ნივთიერებით; მეორე ნაწილს აქვს  $V_2$  მოცულობა და  $h_2$  სიმაღლე და შეესებულება თხევადი ფრაქციით; მესამე ნაწილს აქვს  $V_3$  მოცულობა და  $h_3$  სიმაღლე და შეესებულება აირისმაგვარი ფრაქციით (სურ. 6.16).

$V_1$  მოცულობის შეფარდებას  $V$  მოცულობასთან ეწოდება შემჭიდროების კოეფიციენტი და აღინიშნება  $\beta$ -ით

$$\beta = \frac{V}{V_1} = \frac{h}{h_1}.$$



სურ. 6.16. დასაწნევი პროდუქტის მოცულობის ცალკეული ფრაქციები

თხევადი და აირადი მოცულობების ფრაქციების ჯამის შეფარდებას მშრალი ნივთიერების მოცულობასთან ეწოდება ფორიანობის კოეფიციენტი, რომელიც აღინიშნება  $\varepsilon$ -ით

$$\varepsilon = \frac{V_2 + V_3}{V}.$$

შემჭიდროების კოეფიციენტი ფორიანობის კოეფიციენტთან დაკავშირებულია შემდეგი გამოსახულებით

$$\varepsilon = \beta - 1.$$

თუ ბრიკეტის კვთოს მთელ სიმაღლეზე აქვს მუდმივი მნიშვნელობა, მაშინ შემჭიდროვების კოეფიციენტი გამოისახება შეფარდებით და აღინიშნება

$$\beta = \frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{h}{h_1},$$

სადაც  $\gamma$  ბრიკეტის კუთრი მასაა, კგ/მ<sup>3</sup>;

$\gamma_0$  - დასაწნეხი მასალის კუთრი მასა კგ/მ<sup>3</sup>.

### ლიტერატურა

1. თ.მეგრელიძე, ზ.ჯაფარიძე და სხვ. კვების პროდუქტების წარმოების და სიცვიის მიღების პროცესები და აპარატები. თბილისი: "ტექნიკური უნივერსიტეტი", 2013.- 275 გვ.
2. რ.იაშვილი. კვების პროდუქტების ტექნოლოგიის პროცესები და აპარატები. წიგნი 1. ჰიდრომექანიკური პროცესები. თბილისი: ისარი. 1994. –122 გვ.
3. რ.იაშვილი. კვების პროდუქტების ტექნოლოგიის პროცესები და აპარატები. წიგნი 2. ჰიდრომექანიკური პროცესები. თბილისი: 1994. –125 გვ.
4. რ.იაშვილი. კვების პროდუქტების ტექნოლოგიის პროცესები და აპარატები. წიგნი 3. სითბური პროცესები. თბილისი: ისარი. 1994. –162 გვ.
5. ვ.კოდანაშვილი. ქიმიური ტექნოლოგიის პროცესები და აპარატები. თბილისი: განათლება. 1970. – 466 გვ.
6. А.Н.Плановский, П.И.Николаев. Процессы и аппараты химической и нефте-химической технологии. М. Химия. 1987 г-496 с.
7. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л. Химия. 1987 г-575 с.
8. Стабников В.И., Баранцев В.И. Процессы и аппараты пищевых производств. М. Легкая и пищевая промышленность. 1983 г-323 с.
9. P.Fellows. Food Processing Technology. Principles and Practice. Second Edition. Boca Raton Boston New York Washington. Dc. Woodhead Publishing Limited. Cambridge England. 2003-575 p.

## შინაარსი

შესავალი .....	3
<b>I თავი. ტექნოლოგიური პროცესების ძირითადი ცნებები .....</b>	<b>5</b>
1.1. საკვები პროდუქტის წარმოების ძირითადი პროცესების კლასიფიკაცია .....	5
1.2. საკვები პროდუქტის წარმოების ძირითადი ტექნოლოგიური პროცესების კინეტიკური კანონზომიერებანი .....	6
1.3. ნედლეულისა და პროდუქციის ზოგიერთი ფიზიკური თვისება .....	7
1.4. ტექნოლოგიური პროცესების შესწავლა მსგავსების თეორიის გამოყენებით .....	13
<b>II თავი. ჰიდროდინამიკური პროცესები .....</b>	<b>19</b>
2.1. თხევადი არაერთგვაროვანი სისტემებისა და ჰიდრომექანიკური პროცესების კლასიფიკაცია .....	19
2.2. ჰიდრომექანიკური პროცესების მატერიალური ბალანსი .....	20
2.3. დაღეჟვა .....	21
2.3.1. დაღეჟვა სიმძიმის ძალით .....	21
2.3.2. დაღეჟვა ცენტრიდანული ძალის მოქმედებით .....	24
2.3.3. დაღეჟვა ელექტრული ველის ზეგავლენით .....	26
2.4. გაფილტვრა .....	27
2.4.1. გაფილტვრის პროცესები .....	28
2.4.2. გაფილტვრა ნალექის ფილტრის ზედაპირზე წარმოქმნით .....	29
2.5. ნარევის მემბრანული გაყოფა .....	32
<b>III თავი. სითბური პროცესები .....</b>	<b>39</b>
3.1. სითბოს გავრცელება თბოგამტარობით .....	40
3.1.1. ფურიეს კანონი და თბოგამტარობის კოეფიციენტი .....	41
3.1.2. სითბოს გავრცელება თბოგამტარობით ერთშრიან და მრავალშრიან ბრტყელ კედლებში .....	42
3.1.3. სითბოს გავრცელება თბოგამტარობით ერთშრიან ცილინდრულ კედელში .....	44
3.1.4. თბოგადაცემა კონვექციით .....	45
3.1.5. თბოგადაცემის ძირითადი განტოლება .....	47
3.2. გაცხელება .....	49
3.2.1. გაცხელება წყლის ორთქლით .....	49
3.2.2. გაცხელება საცეცხლურის გამოყენებით .....	52
3.2.3. გაცხელება შუალედური თბოგადამტანით .....	54
3.2.4. გაცხელება ელექტრული დენით .....	57

3.3. გაცივება .....	59
3.4. კონდენსაცია .....	60
3.5. თბომცველი .....	64
3.5.1. ორმილიანი გამცხელებელი .....	65
3.5.2. კლაკნილი თბომცველი .....	66
3.5.3. სპირალური თბომცველი .....	67
3.5.4. პერანგიანი თბომცველი ღუზისებრი სარევიტო .....	68
3.5.5. თბომცველი აპარატის გაანგარიშება .....	68
3.6. გამორთქვლა .....	70
3.6.1. ხსნარის ზოგიერთი თვისება .....	72
3.6.2. მარტივი გამორთქვლა .....	74
3.6.3. მრავალჯერადი გამორთქვლა .....	76
3.7. დუდილის პროცესი .....	78
3.8. ხელოვნური ზომიერი გაცივება .....	81
3.8.1. ორთქლის კომპრესიული მაცივრის მუშა პროცესი .....	83
<b>IV თავი. თბომასაგადაცემის პროცესები .....</b>	<b>87</b>
4.1. მასაცვლის პროცესის ზოგადი ცნებები .....	87
4.2. ფაზათა შედგენილობა .....	88
4.3. მასაცვლის მატერიალური ბალანსი და სამუშაო ხაზის განტოლება .....	89
4.4. ფაზათა წონასწორობა .....	90
4.5. მასაცვლის ძირითადი განტოლება .....	92
4.6. აბსორბცია .....	94
4.6.1. აბსორბციის მატერიალური ბალანსი .....	94
4.6.2. აბსორბციის პრინციპული სქემები .....	96
4.7. ადსორბცია .....	97
4.7.1. ადსორბციის პროცესის პრინციპული სქემები .....	98
4.7.2. ადსორბერები და ადსორბციული დანადგარების სქემები .....	99
4.8. გამოხდა და რექტიფიკაცია .....	103
4.8.1. მარტივი გამოხდა .....	104
4.8.2. რექტიფიკაცია .....	107
4.9. ექსტრაქცია .....	112
4.9.1. მყარი ნივთიერებიდან ექსტრაქციის პროცესის ბიო-ფიზიკური მექანიზმი .....	113

4.9.2. მყარი ნივთიერების ექსტრაქციის პროცესის თეორიული საფუძვლები .....	116
4.9.3. სამკუთხა დიაგრამა .....	121
4.10. ექსტრაქციის მეთოდების კლასიფიკაცია .....	122
4.11. მყარი მასალიდან ნივთიერების საექსტრაქციო აპარატები .....	123
4.12. კრისტალიზაცია .....	127
4.12.1. კრისტალიზაციის პროცესის მატერიალური ბალანსი .....	129
4.12.2. კრისტალიზაციის სითბური ბალანსი .....	130
4.12.3. კრისტალიზაციის პროცესის აპარატები .....	131
4.13. სუბლიმაცია .....	135
4.13.1. სუბლიმაციის სითბური ბალანსი .....	137
4.14. შრობა .....	138
4.14.1. პროდუქტის ტენიანობა .....	139
4.14.2. პროდუქტში ტენის კავშირის სახეები .....	140
4.14.3. შრობის მატერიალური ბალანსი .....	141
4.14.4. შრობის პროცესების კლასიფიკაცია .....	142
4.14.5. შრობის კინეტიკა .....	150
<b>V თავი. ბიოქიმიური პროცესები .....</b>	<b>152</b>
5.1. პასტერიზაცია და სტერილიზაცია .....	153
5.2. წყლის მაგნიტური აქტივიზაცია .....	157
5.3. ოზონის გამოყენება საკვები პროდუქტების წარმოების პროცესებში .....	159
<b>VI თავი. მექანიკური პროცესები .....</b>	<b>162</b>
6.1. პროდუქტის დაქუცმაცების პროცესის თეორიული საფუძვლები .....	162
6.1.1. დაქუცმაცების პროცესის ფიზიკური საფუძვლები .....	164
6.2. ფხვიერი მასალის სეპარაცია და დახარისხება .....	167
6.2.1. სეპარაცია და დახარისხება ნაწილაკების ზომების მიხედვით .....	168
6.2.2. ფხვიერი მასალის სეპარაცია ნაწილაკების აეროდინამიკური თვისებების მიხედვით .....	170
6.2.3. ფხვიერი მასალის ნარევის დაყოფის კრიტერიუმები .....	171
6.3. ფხვიერი, ბლანტი და თხევადი პროდუქტების შერევა .....	173
6.3.1. ნარევი ფხვნილი .....	175
6.3.2. სითხეების შერევის პროცესი .....	176
6.4. საკვები პროდუქტების წნევით დამუშავება .....	179

6.4.1. პლასტიკური მასალების დაფორმება .....	183
6.4.2. დისპერსული პროდუქტის ბრიკეტირება .....	184
ლიტერატურა .....	186