

მცენარეული ნედლეულის საექსტრაქციო პერიოდული  
ქმედების აპარატის დამუშავება

არჩილ ზანცაძე

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის  
მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
თბილისი, 0175, საქართველო  
2013 წელი

## საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### სატრანსპორტო და მანქანათმშენებლობის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელის მომწერნი, გავეცანით არჩილ ბანცაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „მცენარეული ნედლეულის საექსტრაქციო პერიოდული ქმედების აპარატის დამუშავება“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის „სატრანსპორტო და მანქანათმშენებლობის ფაკულტეტის“ სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი:

ხელმძღვანელი: კვების ინდუსტრიის დეპარტამენტის **სრული პროფესორი ზურაბ ჯაფარიძე**

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_.

რეცენზენტი: \_\_\_\_\_.

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

წელი 2013

ავტორი: არჩილ ბანცაძე

დასახელება: მცენარეული ნედლეულის საექსტრაქციო პერიოდული ქმედების აპარატის დამუშავება

ფაკულტეტი: სატრანსპორტო და მანქანათმშენებლობის

ხარისხი: დოქტორის აკადემიური ხარისხი

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პროვზებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემოთმოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებულ საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციალურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

დღეისათვის წარმოებაში გამოყენებული ექსტრაქტორები დამუშავებულია პრაქტიკული რეკომენდაციების ბაზაზე, პროცესის თეორიული საფუძვლების გათვალისწინების გარეშე. ამიტომ აქტუალურია ექსტრაქტორების პროცესის ამოცანის შესწავლა, რის საფუძველზეც შეიძლება დავამუშაოთ საექსტრაქციო აპარატი, როგორც ჰიდროდინამიკური პროცესის ასევე გადასამუშავებელი ნედლეულის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გათვალისწინებით.

არანაკლებ აქტუალურია ექსტრაქტორების პროცესის ინტენსიფიკაცია დასამუშავებელ ნედლეულზე სხვადასხვა ფიზიკური ზემოქმედების დახმარებით, მაგალითად: ვიბრაციული, პულსაციური, ულტრაბგერითი, ნივთიერებათა მოძრაობის მიმართულების ორგანიზებით. ვიბრაციული და პულსაციური ექსტრაქტორების გამოყენება გარე ენერჯის მიწოდებით გვაძლევს პროცესის მნიშვნელოვან ინტენსიფიკაციას, რომელიც დადგენილია მრავალი მეცნიერული შრომებით. ამიტომ ახალი იაფფასიანი და მაღალეფექტური ვიბრაციული და პულსაციური ექსტრაქტორების კონსტრუქციის დამუშავება რჩება აქტუალურად.

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია ახალი პერიოდული ქმედების მაღალეფექტური საექსტრაქციო აპარატის კონსტრუქციის გაანგარიშება და დამუშავება, რომელშიც ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაცია წარმოებს საექსტრაქციო მასის დაბალი სიხშირის ვიბრაციული რხევებით ან ექსტრაგენტის პულსაციით.

აღნიშნული მიზნის რეალიზაციისათვის ძირითად ამოცანებად დავისახეთ შემდეგი მეცნიერული საკითხების გადაწყვეტა:

- პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო დანადგარების ანალიზური მიმოხილვა და მათში პულსაციით ან ვიბრაციით ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციის შესაძლებლობის დადგენა;
- პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო აპარატის კონსტრუქციული პარამეტრების გაანგარიშება;
- ვიბრაციისა და პულსაციის ოპტიმალური რეჟიმების დადგენა;
- პერიოდული ქმედების ვიბრაციისა და პულსაციის რეჟიმებზე მომუშავე საექსტრაქციო აპარატის კონსტრუქციის დამუშავება და საექსპლუატაციო პარამეტრების დადგენა;
- საცდელ-საწარმოო საექსტრაქციო აპარატის დამუშავება და პრაქტიკული რეალიზაცია.

აქტიური ჰიდროდინამიკური მოქმედების აპარატებში მცენარეულ ფოროვან ნაწილაკებზე ექსტრაქტორების პროცესი მიმდინარეობს სამ ეტაპად. პირველ ეტაპზე კაპილარული ძალების მოქმედებით ექსტრაგენტი აღწევს მსხვილ ფორებში და ხსნის ამ ფორებში არსებულ გამოსაწვლილ კომპონენტს. მეორე – კონვექტიური სტადიაა – მიზნობრივი კომპონენტის დიფუზიის სიჩქარე სატრანსპორტო ფორებში და ფორებიდან ხსნარის მოცილება შეჯერებულია. მესამე – დიფუზიური სტადია პროცესის სიჩქარე

შეზღუდულია მოლეკულური დიფუზიის სიჩქარით, მიზნობრივი კომპონენტის ფოროვანი ნაწილის სიღრმიდან მის ზედაპირზე გამოტანით და სატრანსპორტო ფორებით.

შემუშავებულია მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის მესამე სტადიის – დიფუზიის მათემატიკური მოდელი. ნაჩვენებია, რომ კაპილარებში სითხის მოძრაობა პრაქტიკულად არ არსებობს და ნივთიერების გადატანა წარმოებს მოლეკულურ დიფუზიური მექანიზმით. მაგრამ გარე წნევის პულსაციის განსაზღვრული ამპლიტუდისას ან საექსტრაქციო მასის ვიბრაციისას გარკვეული სიხშირითა და ამპლიტუდით მსხვილ ფორებში შეიძლება წარმოიშვას სითხის რხევითი მოძრაობა, რაც იწვევს ექსტრაქციის ინტენსიფიკაციას.

წარმოდგენილი პულსაციური ექსტრაქციის აპარატი მუშაობს არარეზონანსულ რეჟიმში. ამ აპარატის დამუშავებისას დასმული იყო ორი ამოცანა, რომელიც უზრუნველყოფდა ექსტრაქციის მაღალ სიჩქარეს. პირველი – შიგა მასათაგადაცემის გაუმჯობესება – რეალიზებულია ნაწილაკის კაპილარებში სითხის პულსაციის ხარჯზე. მეორე – გარე მასათაგადაცემის ინტენსიფიკაცია – რომელიც მიიღწევა აპარატში ნაწილაკების ფენის პულსაციური გაფხვიერება. ნაწილაკების ფენის გაფხვიერების პრობლემა აქტუალურია დიდი მოცულობის აპარატებისათვის და აგრეთვე წვრილი გაჟიჟებისადმი მიდრეკილების მქონე ნაწილაკების შემთხვევაში, როცა აპარატებში ფორმირდება ძნელადშეღწევადი საცობები.

ჩატარებული კვლევებისა და არსებული პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო დანადგარების ანალიზის საფუძველზე ჩვენს მიერ გაანგარიშებული იქნა ცალკეული კვანძები და დეტალები და დამუშავდა ინოვაციური პერიოდული ქმედების საწარმოო-ექსპერიმენტული ექსტრაქტორი, რომლის კონსტრუქციაც საშუალებას იძლევა ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციის მიზნით ვამუშაოთ როგორც გამხსნელის პულსაციის, ასევე საექსტრაქციო მასის ვიბრაციის პრინციპზე. ამავდროულად, საექსტრაქციო აპარატის მუშა ზედაპირები დამზადდა უჟანგავი ფოლადისაგან, რამაც მისი გამოყენების შესაძლებლობა მოგვცა როგორც არაორგანული, ისე ორგანული გამხსნელით მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციისათვის.

სხვადასხვა მცენარეული ნედლეულისათვის აპარატის ექსპერიმენტული გამოკვლევებით დადგენილია, რომ ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციისთვის მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ საექსტრაქციო მასის დაბალი სიხშირის რხევები. სხვადასხვა მცენარეული ნედლეულისათვის რხევების სიხშირის ნულოვან (ძირითად) დონედ მიზანშეწონილია მივიღოთ  $(3-4) \text{ წ}^{-1}$ , ხოლო ვარირების ინტერვალად –  $1 \text{ წ}^{-1}$ , როცა რხევების ამპლიტუდა  $1-3 \text{ მმ}$ -ის ფარგლებშია.

დამუშავებული საექსტრაქციო დანადგარის მუშაობის ეფექტურობის დასადგენად ექსტრაქციას დაექვემდებარა ჩაის ბუნებრივად გამშრალი მწვანე ფოთლის ორგანული გამხსნელით (ტრიქლორეთილენი). ექსტრაქციის შემდეგ დარჩენილი ე.წ. "ჩაის შროტი", რომელიც

სამრეწველოდ მნიშვნელოვანი როდენობით შეიცავს კატექინების კომპლექსს. ნაჩვენებია, რომ ექსტრაგენტის პულსაციის ან საექსტრაქციო მასის დაბალ სიხშირეზე ვიბრაციის გამოყენებით, სხვა თანაბარ პირობებში, საერსტრაქციო მასის წყლით ექსტრაქციის ხანგრძლივობა მნიშვნელოვნად, 4-5-ჯერ მცირდება ექსტრაქციის ცირკულაციურ მეთოდთან შედარებით.

## Abstract

The extractors used in modern production are processed on the basis of practical recommendations without consideration of the theoretical basis. Therefore, the task of studying the extraction process is of acute importance as it will enable us to process extraction's apparatus, taking into consideration both hydrodynamic processes and the physical - mechanical properties of the raw material.

Equally important is the issue of intensification of the extraction process with the help of a variety of physical effects applied to the raw materials, such as vibration, pulse, ultrasound, nutritional direction of motion. The use of vibration and pulse extractors leads to a significant intensification of the process, which is determined by many scientific works. The construction and development of new low-priced and high-efficiency pulse vibrating extractors remains an important issue.

The aim of the thesis, is the estimation and development of the construction of a new high-efficiency extraction device of periodic behavior. In which the extraction process is intensified low-frequency vibrational oscillations or extragents pulse of the extraction mass.

For the realization of the goal we set for the solution of following scientific issues:

- Review and analysis of the extraction equipment of periodic mode of action and prove their ability of intensifying the extraction process via pulse or vibration;
- calculation of structural parameters of the extraction device of periodic mode of action;
- Optimal modes of vibration and pulsation;
- Processing of construction and operational parameters of the extraction device with periodic vibration and pulsation modes of action;
- Processing and the practical realization of experimental - industrial extraction apparatus.

In devices of active hydrodynamic mode of action the process of extraction on plants porous particles is conducted in 3 stages. On the first stage, the capillary forces enable extragents to the reach large pores and remove the extraction components from them. On the second – convection stage the diffusion speed of the target component in transport pores and removal of the solution from the pores is combined. On the third-diffusion stage the speed of process is limited by

molecular diffusion speed, from the depth of the porous part of the target component onto its surface and by transport pores.

There was created a mathematical model of diffusion – the third stage of vegetable raw materials extraction process. It shows that there is practically no movement of fluid in capillaries and the substance is transported via molecular diffusion, but during certain amplitude of outer pressure pulsation or during extract mass vibration in definite frequency and amplitude in the large pores there can be created oscillating fluid motion, which leads to the intensification of extraction.

The given pulse extraction device works in a nonresonant mode. There were two targets set while processing this device to provide a high frequency of extraction. Firstly – the improvement of internal mass transfer – achieved via fluid pulsation in particle capillaries, secondly – the improvement of the external mass transfer – achieved via the pulse loosening of the particle layer in apparatus. The problem of loosening the particle layer is vital for the large capacity devices, as well as in case of the shallow saturation particles, when the hardly penetrated clogs are formed in the device.

On the basis of provided investigations and the analysis of extraction device of a periodical behaviour we have worked out separate knots and details and created the innovative experimental – industrial extractor of periodical behaviour, whose construction enables us to make it function both on the principles of solvent pulsation and extract mass vibration, which makes the extraction process intensified. Simultaneously, the working surfaces of the extraction device were made of stainless steel, which provided us with the possibility of using it in the process of vegetable raw material extraction using both organic and non-organic solvents.

The experimental study of the devices for different vegetable raw material provided that for the intensification of the extraction process we should use the low frequency oscillations of the extraction mass. We should take  $(3-4) \text{ sec}^{-1}$  as a basic-zero level for oscillation frequency, and  $1\text{-sec}^{-1}$  for variation interval, when the amplitude of the oscillations is in the scope of 1-3mm.

To prove the efficiency of the extraction apparatus functioning, there was extracted so called “tea factor”, a remnant after the extraction of air-dry green tea leaves, treated with organic solvent (trichlorethilen), This remnant contains industrially important amount of catechin complex. It is proved that via extragent’s pulsation or the usage of low frequency vibration on extraction mass, in otherwise equal condition the duration of water extraction on extraction mass is shortened 4-5 times, compared with the circulation method of extraction.

## შინაარსი

|   |    |
|---|----|
| შესავალი .....  | 12 |
| თავი 1. ლიტერატურის მიმოხილვა .....   | 17 |
| 1.1. მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის ძირითადი კანონზომიერებები .....                    | 17 |
| 1.1.1. ექსტრაქციის პროცესის არსი .....  | 17 |
| 1.1.2. ექსტრაქციის პროცესის ძირითადი სტადიები .....   | 20 |
| 1.1.3. მასათაცვლა როგორც დიფუზიური პროცესი .....  | 25 |
| 1.1.4. შიგა მოლეკულური დიფუზია .....  | 29 |
| 1.1.5. კონვექციური დიფუზია .....  | 30 |
| 1.1.6. მასათაცვლის პროცესზე მოქმედი სხვა ძირითადი ფაქტორები .....                                 | 34 |
| 1.2. მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის მეთოდები .....  | 39 |
| 1.2.1. ექსტრაქციის მეთოდების კლასიფიკაცია და თავისებურებები .....                                 | 39 |
| 1.2.2. ცენტრიდანული ექსტრაქცია .....  | 43 |
| 1.2.3. წილადური მაცერაცია ანუ რემაცერაცია .....   | 43 |
| 1.2.4. პერკოლაცია .....   | 44 |
| 1.2.5. რეპერკოლაცია ბოსინის მიხედვით .....  | 46 |
| 1.2.6. რეპერკოლაცია ჩულკოვის მეთოდით .....  | 48 |
| 1.2.7. ცირკულაციური ექსტრაქცია .....  | 49 |
| 1.2.8. მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციისა და საექსტრაქციო ტექნიკის ზოგადი მიმოხილვა .....          | 51 |
| თავი 2. მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის თეორიული წინაპირობები .....                     | 55 |
| 2.1. ფოროვანი ნაწილაკებიდან დიფუზიურ-კონვექციურ რეჟიმში ექსტრაქციის მოდელები .....                | 55 |
| 2.2. დიფუზიური სტადიის მათემატიკური მოდელი .....  | 62 |
| 2.3. პერიოდული ქმედების ექსტრაქტორები და ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციის გზები .....         | 67 |
| 2.3.1. დიფუზორები .....   | 67 |
| 2.3.2. პულსაციური ექსტრაქტორები .....   | 70 |
| 2.4. პერიოდული ქმედების ინოვაციური ექსტრაქტორის დაპროექტება .....                                 | 75 |
| 2.4.1. საკითხის დასმა .....   | 75 |
| 2.4.2. დანადგარის პრაქტიკული გამოყენების მაგალითი პულსაციის მეთოდით ექსტრაქციისათვის .....        | 82 |
| 2.5. საექსტრაქციო დანადგარის საექსპლუატაციო-ლაბორატორიული გამოკვლევების შედეგები .....            | 85 |
| 2.5.1. ექსტრაქციის ხანგრძლივობის გავლენა ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე ..... | 85 |



|  |     |
|--|-----|
| 2.5.2. ჩაის შროტისა და წყლის თანაფარდობის<br>გავლენა ბიოლოგიურად აქტიური<br>ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე .....         | 96  |
| 2.5.3. საექსტრაქციო მასის პულსაციის გავლენა<br>ჩაის შროტიდან ბიოლოგიურად აქტიური<br>ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე ..... | 97  |
| დასკვნები .....  | 100 |
| გამოყენებული ლიტერატურა .....  | 102 |

## ცხრილების ნუსხა

|  |    |
|--|----|
| ცხრილი 1. ექსტრაქტის კონცენტრაცია სხვადასხვა<br>ნედლეულის პულსაციით ექსტრაქციების დროს .....   | 83 |
| ცხრილი 2. სხვადასხვა სიჩქარით ექსტრაგენტის ცირკულაციის<br>გავლენა წონასწორული კონცენტრაციის დამყარების<br>დროზე .....  | 84 |
| ცხრილი 3. ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების<br>გამოსავლიანობის დამოკიდებულება<br>ექსტრაქციის ხანგრძლივობაზე ( $H_1 = 85\%$ ) .....   | 86 |
| ცხრილი 4 ექსტრაქციის ტემპერატურის გავლენა ბიოლოგიურად<br>აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე .....  | 92 |
| ცხრილი 5 სხვადასხვა ხერხით ექსტრაქციის ტემპერატურის<br>გავლენა ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე,<br>როცა საწყის ნედლეულში ნაზი ფრაქციის<br>წილია 85% (3%-იანი ექსტრაქტისათვის) ..... | 92 |
| ცხრილი 6. ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების<br>გამოსავლიანობის დამოკიდებულება ექსტრაქციისას<br>წყლისა და შროტის თანაფარდობაზე .....  | 96 |
| ცხრილი 7. ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების<br>გამოსავლიანობის დამოკიდებულება საექსტრაქციო<br>მასის პულსაციაზე .....   | 99 |

## ნახაზების ნუსხა

|  |    |
|--|----|
| ნახ. 1. ექსტრაქციის მეთოდების კლასიფიკაცია .....   | 39 |
| ნახ. 2. თანაბრად დანაწილებული ნედლეულის<br>რეპერკოლაციის სქემა .....   | 46 |
| ნახ. 3. რეპერკოლაციის სქემა ბოსინის მიხედვით .....   | 47 |
| ნახ. 4. სოკსკლეტის ტიპის ცირკულაციური აპარატის<br>პრინციპული სქემა .....   | 50 |
| ნახ.5 საექსტრაქციო დანადგარის ტიპური სქემები: .....  | 53 |
| ნახ. 6 ექსტრაგენტის გადაადგილება ფორებში<br>წნევის იმპულსის მოქმედებით .....   | 57 |
| ნახ. 7. მყარ სხეულის და ბრტყელ ფორებში ფენების<br>განაწილების მოდელი .....   | 63 |
| ნახ. 8. დიფუზორი .....   | 68 |
| ნახ. 9. პულსაციური ექსტრაქტორის საანგარიშო სქემა .....   | 72 |
| ნახ.10. პულსაციური აპარატის კონტეინერი .....   | 74 |
| ნახ. 11. საწარმოო–ექსპერიმენტული დანადგარის<br>პრინციპული სქემა .....  | 77 |
| ნახ. 12. დანადგარის საერთო კონსტრუქცია .....   | 79 |
| ნახ. 13. ელექტრო-მექანიკური პულსატორის<br>პრინციპული სქემა .....   | 80 |
| ნახ. 14. პულსაციის წნევის ცვლილების გრაფიკი<br>დროის მიხედვით .....  | 81 |
| ნახ. 15 პულსატორის კონსტრუქციის საერთო ხედი .....  | 81 |
| ნახ.16. ჩაის შროტიდან ექსტრაქტული ნივთიერებების<br>გამოსავლიანობის დინამიკა .....  | 87 |
| ნახ. 17. ჩაის შროტიდან ფენოლური ნაერთების<br>გამოსავლიანობის დინამიკა .....  | 88 |
| ნახ. 18. ჩაის შროტიდან ჯამური კატექინების<br>გამოსავლიანობის დინამიკა .....  | 89 |
| ნახ. 19. ჩაის შროტის ექსტრაქტის ანტიოქსიდანტური<br>აქტივობის ცვალებადობის დინამიკა<br>(3%-იანი ექსტრაქციისათვის) .....         | 90 |
| ნახ. 20. ექტრაქციის ტემპერატურის გავლენა ექსტრაქტის<br>ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე .....  | 91 |
| ნახ. 21. ექტრაქციის ტემპერატურის გავლენა<br>კატექინების გამოსავლიანობასა და<br>ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე .....                | 93 |
| ნახ. 22. ექსტრაქციული ტემპერატურის გავლენა<br>ექსტრაქტის ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე: .....                                     | 94 |
| ნახ. 23. ექსტრაქტული ნივთიერებებისა და ფენოლური<br>ნაერთების გამოსავლიანობის დამოკიდებულება<br>ექსტრაქციის ტემპერატურაზე ..... | 95 |

## შესავალი

### თემის აქტუალობა

უკანასკნელ წლებში მკვეთრად გაიზარდა ინტერესი პროდუქტებისა და პრეპარატების მიმართ, რომლებიც მიმართულია მოსახლეობის ჯანმრთელობის ეფექტური პროფილაქტიკისათვის.

პირველ ადგილზე წამოწეულია ბალანსირებული კვების პრობლემა. ცხოველური ცილების შემცირება, ვიტამინების და სიცოხცლისათვის აუცილებელი მინერალური ნივთიერებებისა და მიკროელემენტების უკმარისობა. ამ უკანასკნელის დეფიციტი ნეგატიურ გავლენას ახდენს ადამიანის ჯანმრთელობაზე, რომელსაც მიყავს ორგანიზმი გარემო პირობებისადმი ბრძოლის უუნარობისაკენ, დაცვითი სისტემის მოშლისა და იმუნოდეფიციტის განვითარებისკენ.

ამ პრობლემის გადაჭრის ერთ–ერთ გზას წარმოადგენს კვების მრეწველობაში ახალი ტექნოლოგიების ფართო გამოყენება, რათა შეიქმნას კომბინირებული ინოვაციური ცხოველური და მცენარეული კვების პროდუქტები, რომლებიც გამდიდრებული იქნება ვიტამინებითა და სხვადასხვა ბიოლოგიურად აქტიური დანამატებით.

ამ ტექნოლოგიური მიმართულების მეცნიერული ბაზა საქართველოში საკმაოდ მაღალ დონეზეა, თუმცა მისი ტექნიკური გადაწყვეტა უკიდურესად გამწვანებულია. ამასთან დაკავშირებით დგება კომბინირებულ საკვებ პროდუქტებში შემავალი კომპონენტების წარმოების პროცესების ტექნიკური ასპექტების მეცნიერულ–ექსპერიმენტული გამოკვლევების აუცილებლობა, რათა უფრო ეფექტური გავხადოთ მათი მცენარეული ნედლეულიდან ექსტრაქცირება.

დღეისათვის წარმოებაში გამოყენებული ექსტრაქტორები დამუშავებულია პრაქტიკული რეკომენდაციების ბაზაზე, პროცესის თეორიული საფუძვლების გათვალისწინების გარეშე. ამიტომ აქტუალურია ექსტრაქცირების პროცესის ამოცანის შესწავლა, რის საფუძველზეც შეიძლება დავამუშაოთ საექსტრაქციო აპარატი, როგორც ჰიდროდინამიკური

პროცესის ასევე გადასამუშავებელი ნედლეულის ფიზიკურ-მექანიკური თვისებების გათვალისწინებით.

არანაკლებ აქტუალურია ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაცია დასამუშავებელ ნედლეულზე სხვადასხვა ფიზიკური ზემოქმედების დახმარებით, მაგალითად: ვიბრაციული, პულსაციური, ულტრაბგერითი, ნივთიერებათა მოძრაობის მიმართულების ორგანიზებით. ვიბრაციული და პულსაციური ექსტრაქტორების გამოყენება გარე ენერჯის მიწოდებით გვაძლევს პროცესის მნიშვნელოვან ინტენსიფიკაციას, რომელიც დადგენილია მრავალი მეცნიერული შრომებით. ამიტომ ახალი იაფფასიანი და მაღალეფექტური ვიბრაციული და პულსაციური ექსტრაქტორების კონსტრუქციის დამუშავება რჩება აქტუალურად.

### **კვლევის მიზანი და ამოცანები**

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია ახალი პერიოდული ქმედების მაღალეფექტური საექსტრაქციო აპარატის კონსტრუქციის გაანგარიშება და დამუშავება, რომელშიც ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაცია წარმოებს საექსტრაქციო მასის დაბალი სიხშირის ვიბრაციული რხევებით ან ექსტრაგენტის პულსაციით.

აღნიშნული მიზნის რეალიზაციისათვის ძირითად ამოცანებად დავისახეთ შემდეგი მეცნიერული საკითხების გადაწყვეტა:

პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო დანადგარების ანალიზური მიმოხილვა და მათში პულსაციით ან ვიბრაციით ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციის შესაძლებლობის დადგენა;

პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო აპარატის კონსტრუქციული პარამეტრების გაანგარიშება;

ვიბრაციისა და პულსაციის ოპტიმალური რეჟიმების დადგენა;

პერიოდული ქმედების ვიბრაციისა და პულსაციის რეჟიმებზე მომუშავე საექსტრაქციო აპარატის კონსტრუქციის დამუშავება და საექსპლუატაციო პარამეტრების დადგენა;

საცდელ–საწარმოო საექსტრაქციო აპარატის დამუშავება და პრაქტიკული რეალიზაცია.

### **ნაშრომის მეცნიერული სიახლე**

ნაჩვენებია, რომ აქტიური ჰიდროდინამიკური მოქმედების აპარატებში მცენარეულ ფოროვან ნაწილაკებზე ექსტრაჰირების პროცესი მიმდინარეობს სამ ეტაპად. პირველ ეტაპზე კაპილარული ძალების მოქმედებით ექსტრაგენტი აღწევს მსხვილ ფორებში და ხსნის ამ ფორებში არსებულ გამოსაწვლილ კომპონენტს. მეორე – კონვექტიური სტადიაა – მიზნობრივი კომპონენტის დიფუზიის სიჩქარე სატრანსპორტო ფორებში და ფორებიდან ხსნარის მოცილება შეჯერებულია. მესამე – დიფუზიური სტადია პროცესის სიჩქარე შეზღუდულია მოლეკულური დიფუზიის სიჩქარით, მიზნობრივი კომპონენტის ფოროვანი ნაწილის სიღრმიდან მის ზედაპირზე და სატრანსპორტო ფორებით.

შემუშავებულია მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის მესამე სტადიის – დიფუზიის მათემატიკური მოდელი. ნაჩვენებია, რომ კაპილარებში სითხის მოძრაობა პრაქტიკულად არ არსებობს და ნივთიერების გადატანა წარმოებს მოლეკულურ დიფუზიური მექანიზმით. მაგრამ გარე წნევის პულსაციის განსაზღვრული ამპლიტუდისას ან საექსტრაქციო მასის ვიბრაციისას გარკვეული სიხშირითა და ამპლიტუდით მსხვილ ფორებში შეიძლება წარმოიშვას სითხის რხევითი მოძრაობა, რაც იწვევს ექსტრაქციის ინტენსიფიკაციას;

გამოკვლევულია პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო აპარატი, რომელშიც ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციისათვის გამოყენებულია ექსტრაგენტის პულსაციისა და საექსტრაქციო მასის ვიბრაციის მეთოდები. გაანგარიშებულია აპარატის კონსტრუქციული პარამეტრები და პროცესის ინტენსიფიკაციის ოპტიმალური რეჟიმები.

### **პრაქტიკული ღირებულება**

ჩატარებული კვლევებისა და არსებული პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო დანადგარების ანალიზის საფუძველზე ჩვენს მიერ

დამუშავდა ინოვაციური პერიოდული ქმედების საწარმო-ექსპერიმენტული ექსტრაქტორი, რომლის კონსტრუქციაც საშუალებას იძლევა ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციის მიზნით ვამუშაოთ როგორც გამხსნელის პულსაციის, ასევე საექსტრაქციო მასის ვიბრაციის პრინციპზე.

აპარატის ექსპერიმენტული გამოკვლევებით სხვადასხვა მცენარეული ნედლეულისათვის დადგენილია, რომ ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციისთვის მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ საექსტრაქციო მასის დაბალი სიხშირის რხევები. სხვადასხვა მცენარეული ნედლეულისათვის რხევების სიხშირის ნულოვან (ძირითად) დონედ მიზანშეწონილია მივიღოთ (3-4) წ-1, ხოლო ვარირების ინტერვალად – 1 წ-1, როცა რხევების ამპლიტუდა 1-3 მმ-ის ფარგლებშია.

დამუშავებული საექსტრაქციო დანადგარის მუშაობის ეფექტურობის დასადგენად ექსტრაპირებას დაექვემდებარა ჩაის ჰაერმშრალი მწვანე ფოთლის ორგანული გამხსნელით (ტრიქლორეთილენი) ექსტრაპირების შემდეგ დარჩენილი ე.წ. "ჩაის შროტი", რომელიც სამრეწველოდ მნიშვნელოვანი რაოდენობით შეიცავს კატეჩინების კომპლექსს. ნაჩვენებია, რომ ექსტრაგენტის პულსაციის ან საექსტრაქციო მასის დაბალ სიხშირეზე ვიბრაციის გამოყენებით, სხვა თანაბარ პირობებში, ექსტრაქციის ხანგრძლივობა მნიშვნელოვნად, 4-5-ჯერ მცირდება ექსტრაქციის ცირკულაციურ მეთოდთან შედარებით.

### **დასაცავად გამოტანილი დებულებები**

ექსტრაგენტის პულსაციისა და საექსტრაქციო მასის ვიბრაციის მეთოდით მომუშავე პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო აპარატის კონსტრუქციის დასაბუთება და მისი საცდელ-საწარმოო ნიმუში მცენარეული ფხვიერი მასალებისათვის და პარამეტრების ოპტიმიზაცია.

### **ნაშრომის აპრობაცია**

ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებულია აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის სამეცნიერო ცენტრისა და საქართველოს

ტექნიკური უნივერსიტეტის კვების ინდუსტრიის დეპარტამენტის სხდომებზე (2012-2013 წ.წ). ნაშრომის შედეგები განხილული და გამოქვეყნებულია შემდეგი საერთაშორისო კონფერენციების მასალებში:

IV Международная конференция. «Экстракция орнанических соединений», Воронеж, 2010, გვ. 414;

საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია „სუბტროპიკული ზონის დარგების პრობლემები და მათი გადაჭრის გზები“, ქუთაისი, 2010, გვ. 245-247;

Международная заочная научно-техническая конференция. Государственный университет им. А. Церетели, Кутаиси, Грузия, გვ. 90-92;

საერთაშორისო დაუსწრებელი სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია „მცენარეული ექსტრაქტების ქიმია და ტექნოლოგია“, აკაკი წერეთლის სახელობის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ქუთაისი, 2011, გვ. 81-85.

#### **პუბლიკაცია**

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 4 სამეცნიერო სტატია და საერთაშორისო კონფერენციებზე მოხსენებების მასალები საქართველოს და საზღვარგარეთის რეიტინგულ პერიოდულ გამოცემებში.

#### **ნაშრომის სტრუქტურა და მოცულობა**

სადისერტაციო ნაშრომი წარმოდგენილია კომპიუტერზე აკრებილ 107 გვერდზე და შედგება შესავლის, 2 თავის, ძირითადი დასკვნებისა და 97 დასახელების ლიტერატურული წყაროსაგან, შეიცავს 7 ცხრილსა და 23 გრაფიკულ მასალას.



# 1. ლიტერატურის მიმოხილვა

## 1.1. მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის ძირითადი კანონზომიერებები

### 1.1.1. ექსტრაქციის პროცესის არსი

ექსტრაქცია (ლათ. extragere –ვიღებ, ვწურავ) წარმოადგენს საჭირო სამკურნალო ნივთიერებების გამოწვლილვის პროცესს მცენარეული და ცხოველური ნედლეულიდან ექსტრაგენტის საშუალებით.

ექსტრაქცია, ისევე როგორც დისტილაცია ადსორბცია კრისტალიზაცია და სხვა განიხილება როგორც დაყოფის ფიზიკური მეთოდი, როცა დასაყოფი კომპონენტები ქიმიურ ცვლილებებს არ განიცდიან.

ექსტრაქცია, როგორც პროცესი, გამოირჩევა გარკვეული სირთულით, ვინაიდან ის მოიცავს გახსნას, დესორბციას, დიალიზს, დიფუზიას და სხვა პროცესებს. მყარი სხეულის სითხეში გახსნისაგან განსხვავებით, ექსტრაქციის პროცესი გართულებულია უჯრედული გარსის არსებობით, რომელიც ქმნის ძირითად წინაღობას უჯრედის შიგნით გამხსნელის შესაღწევად და უჯრედის შიგნიდან ექსტრაქტული ნივთიერებების გარეთ გამოტანისას.

დიდი ხნის განმავლობაში მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქცია წარმოებდა პრიმიტიული მცირე წარმოებებით, ექსტრაგენტების მრავალფეროვნება შეზღუდული იყო. მიზეზი იყო სამკურნალო მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის ერთერთი ფორმის მასალათცვლის პროცესის სიტემა მყარი სხეული-სითხე არასაკმარისი ცოდნა. ამ პროცესები შესასწავლად მეცნიერების მიერ მრავალი შრომა იქნა გაწეული. კვლევის შედეგების მიხედვით შეიძლება წარმოვადგინოთ პროცესის მექანიზმი, რომელიც მიმდინარეობს სამკურნალო მცენარეული ნედლეულიდან ფარმაკოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების

გამოწვლილვის დროს. ექსტრაჰირების პრაქტიკაში გვხვდება შემთხვევები, როცა მიზნობრივი კომპონენტები იმყოფება ინერტულ გადამტანში, როგორც სითხით ასევე მყარი სახით. მიზნობრივი კომპონენტების გამოწვლილვის კინეტიკა დამოკიდებულია აგრეგატულ მდგომარეობაზე და აღიწერება სხვადასხვა განტოლებებით. ქვემოთ მოყვანილი თეორიული მოდელები არ გვადლევს პირდაპირ გავითვალთ ექსტრაჰირების რეალური რეალური პროცესები, სამაგიეროდ იძლევა მექანიზმის ღრმად აღწერის საშუალებას. ამასთან ერთად ზოგ შემთხვევაში მცენარეული ნედლეულის ნაწილაკები შეიძლება წარმოვადგინოთ მარტივი ფორმის იზოტროპულ სხეულებად (სფერული, ცილინდრული, ბრტყელი) და გამოსაწვლილი კომპონენტების ფოროვანი სხეულიდან ეფექტური დიფუზიის კოეფიციენტების განსაზღვრის შემდეგ, გამოვიყენოთ მოდელები სამრეწველო აპარატები გაანგარიშებისათვის.

ელექტრონული მიკროსკოპისა და რენდგენოსტრუქტურული ანალიზით დადგენილია, რომ მცენარეული უჯრედოვანი გარსი წარმოადგენს მკვრივ ბოჭკოსმაგვარ ტიხარს, წარმოქმნილს  $(C_6H_{10}O_5)_n$  შედგენილობის ცელულოზის მიცელარული ძაფებით, სადაც “n” ტოლია 600-30000 ერთეულის. ამას გარდა არსებობს პექტინოვანი პროტოცილოვანი და სხვა გარსები. უჯრედის გარსი ულტრამიკროფოროვანია დიამეტრით 0,01-0,001 მკმ და ხშირად დაფარულია ნივთიერებებით, რომლებიც ამცირებენ ან სრულიად ახშობენ ამ ფორებს, ასეთი ნივთიერებებია პროტოპექტინი, ლიგნინი, სუბერინი, კუტინი, ცვილები და სხვა. ყველა მათგანი წყალში ნაკლებად ან საერთოდ არ იხსნებიან. ყოველივე ამნელებს ექსტრაგენტის შეღწევას უჯრედში.

ულტრამიკროფოროვანი უჯრედის გარსი ქმნის დიდ ჰიდროსტატიკურ წინააღმდეგობას გამხსნელისა და გახსნილი ნივთიერების მოლეკულების გადაადგილებისას (მოძრაობისას) და, რაც ყველაზე მნიშვნელოვანია, მას შესწევს უნარი გამოაცალკეოს, დააკაოს მაღალმოლეკულური ნივთიერებები, ანუ უზრუნველყოს დიალიზი და

გაატაროს ამავდროულად დაბალმოლეკულური ნივთიერებები, რომელთა რიცხვსაც მიეკუთვნებიან თითქმის ყველა ბუნებრივი წარმოშობის თერაპევტულად აქტიური ნივთიერებები.

უჯრედის გარსს გააჩნია მაკროფორები (0,1-0,2 მკმ). ისინი აკავშირებენ ურთიერთშორის უჯრედებს, ქმნიან უჯრედებს შორის კავშირებს, რომლებითაც ხორციელდება მცენარეული წვენების ნელი მოძრაობა უჯრედიდან უჯრედში.

უჯრედის შემადგენელი არასდროს არ არის წარმოდგენილი მხოლოდ ერთი ნივთიერებით. ის მოქმედი ნივთიერებების რთული კომპლექსია და შეიცავს ასევე ცვლის მკვებავ მეტაბოლიტებს, მჟავათა ფერმენტებს, მინერალურ ნივთიერებებს და სხვა, რომლებიც მოქმედებენ დესორბციის, გახსნისა და დიფუზიის პროცესებზე ანუ ექსტრაქციაზე, ახდენენ გავლენას პრეპარატის თერაპევტულ ეფექტურობაზე.

ნედლეულიდან გამომწვლილვის პროცესი გართულებულია ექსტრაგენტ-გამხსნელის მოლეკულების ურთიერთქმედებით უჯრედოვანი სტრუქტურის მოლეკულებთან. ადგილი აქვს სორბციულ მოვლენებსაც: ნივთიერებათა უმეტესობა გაშრალ ნედლეულში იმყოფება გარსის ზედაპირზე და მის შიგნით სორბირებულ მდგომარეობაში, ენდო და ციტოპლაზმით, ფერმენტული ელემენტებით, პროტოპლაზმით. ყოველივე ეს მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს ექსტრაქციის პროცესზე.

ექსტრაქციის პროცესზე მოქმედი ფაქტორები მრავალრიცხოვანია, მაგრამ მათ შორის შეიძლება გამოვყოთ:

მოლეკულური მასა და შესაბამისად გამოსაწვლილი ნივთიერების მოლეკულების ზომა;

უჯრედის პროტოპლაზმის კოლოიდური ნაწილაკების მუხტი;

ექსტრაქციის პროცესის ტემპერატურა;

დაქუცმაცებული ნედლეულის ნაწილაკების ზომები;

ნედლეულის სიმკვრივე ნაყარ მდგომარეობაში;

გამხსნელის სახეობა, მისი სიბლანტე და ჰიდროდინამიკური პირობები;

ექსტრაქციის პროცესის ხანგძლივობა დროში;

ნედლეულში ჰაერის არსებობა;

ცოცხალი პროტოპლაზმის არსებობა და მრავალი სხვა.

ექსტრაქცია, ამრიგად, რთული პროცესია და წარმოადგენს მთელი რიგი პროცესების შეხამებას. მათ შორისაა დასველება, გაჯირჯვება, გახსნა, ქიმიური ურთიერთქმედება, ადსორბცია, დიფუზია, დიალიზი და სხვა.

ყოველივე ზემო აღნიშნულის გამო არ არსებობს უჯრედოვანი ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის მკაფიოდ ჩამოყალიბებული მათემატიკური მოდელი.

### **1.1.2. ექსტრაქციის პროცესის ძირითადი სტადიები**

განასხვავებენ უჯრედოვანი ნედლეულის ექსტრაქციის სამ ძირითად სტადიას:

1. მშრალი მცენარეული ნედლეულის გაჟღენთვა-გაჯირჯვება ესტრაგენტით – ე.წ. კაპილარული გაჟღენთვა. ამ დროს ხდება ესტრაგენტის შეღწევა ნედლეულში და მასში არსებული ნივთიერებების დასველება.

2. მცენარეული უჯრედის კომპონენტების გახსნა და პირველადი წვენის წარმოქმნა.

3. გახსნილი ნივთიერებების გადასვლა ექსტრაქტში, ანუ მასათა ცვლა, ნივთიერებების მასაგადატანა უჯრედების ფოროვანი კედლებიდან (გარსიდან რეალურად კაპილარულ-ფოროვან ნედლეულს აქვს სხვადასხვაგვარი გარეგნული ფორმა. შიგა სტრუქტურა კი წარმოადგენს რთულ ურთიერთდაკავშირებულ და სხვადასხვა ფორმისა და სიგრძის ცვლადი განივი კვეთის იზოლირებულ კაპილარებს. დამუშავებულ მათემატიკურ მოდელში აღიწერება იზოტროპული თვისებების მქონე

მარტვივი ფორმის სხეულები, მათში დიფუზიური გადატანის სიჩქარე არაა დამოკიდებული მიმართულებაზე. ანალიტიკური შედეგების გამოყენებით რეალური კაპილარულ-ფოროვანი სხეულიდან ექსტრაჰირების პოცესის გაანგარიშებისათვის წარმოვადგენთ მარტვივი ფორმის სხეულებს და შესაბამისად მათემატიკურ მოდელში შევიტანთ შეცდომების გაანგარიშებებს. ამასთან ერთად თეორიული მოდელის საფუძველზე შეიძლება ავაგოთ რეალური პროცესებისათვის მათემატიკური მოდელი.

**1 სტადია.** მცენარეული ნედლეულის გაჟღენთვა ექსტრაგენტით ხორციელდება კაპილარული ძალების გავლენით. დაქუცმაცებული მცენარეულ ნაწილაკებს შორისი არხებით, უჯრეთ შორისი გზებით და ულტრამიკროფორებით ექსტრაგენტი ხვდება ნედლეულის სიღრმეში და უჯრედის შიგნით. გამშრალი ნედლეულის გაჟღენთვა სპონტანური, თავისთავადი პროცესია გარედან ჩარევის გარეშე. ამ დროს ძირითად როლს ასრულებს მყარი ფაზისა და ექსტრაგენტის მოლეკულების ასოციაციის ენერგია და თავისუფალი ზედაპირის ენერგია.

თუ ექსტრაგენტის მოლეკულები უფრო აქტიურად ურთიერთქმედებენ მყარი ფაზის ზედაპირულ მოლეკულებთან ვიდრე საკუთარ მოლეკულებთან, მაშინ სითხე ყოველთვის ეცდება გაზარდოს შეხების ფართი მყარ ფაზასთან და გამოიწვევს მყარი ზედაპირის დასველებას. ამ სიტუაციაში გამხსნელი, შედის რა ულტრამიკროფორებსა და წვრილ კაპილარულ მილებში სპონტანურად, სწრაფად გაჟღენთს მცენარეულ მასალას.

როგორც მცენარეული ისე ცხოველური ნედლეული, ზოგადად, ჰიდროფილურია. ამიტომაც ადვილად სველდება წყლითა და პოლარული სითხეებით, რომლებიც თავიანთ მოლეკულებში შეიცავენ OH-, COOH, NOC, NH- ჯგუფებს. ასეთებია, წყალთან ერთად, დაბალატომიანი სპირტები, აცეტონი, გლიკოლები, გლიცერინი და სხვა.

აღსანიშნავია ის ფაქტიც, რომ მცენარეული ნედლეული ხშირად შეიცავს ჰიდროფობულ ნივთიერებებსაც, რომლებითაც გაჟღენთილია

ბოჭკოვანი უჯრედის გარსი. მაგალითად: ცილები, მცენარეული ზეთები, ეთერზეთები და სხვა. ამიტომაც ამ მცენარეულ ნედლეულს შესწევს უნარი დასველდეს ჰიდროფობული სითხეებით როგორებიცაა ეთერი, ეთილაცეტატი, ბენზოლი, ბენზინი, ჰექსანი, ქლოროფორმი, დიქლორეთანი, ქლორმეთილენი, ტრიქლორეთილენი და სხვა.

თუ ექსტრაგენტის მოლეკულათა ასოციაციის ძალები აღემატებიან ამ მოლეკულების მყარი ფაზის მოლეკულებთან ურთიერთქმედების ძალებს, მაშინ დასველებას ადგილი არა აქვს და არავითარ ექსტრაქციაზე ლაპარაკი არ შეიძლება. ასე, მაგალითად, თუ ნედლ მცენარეულ ნედლეულს დავამუშავებთ ბენზინით მაშინ ის წყლით არ დასველდება და მასათა ცვლის პროცესებს ადგილი არა აქვს.

ექსტრაგენტის უჯრედში შეღწევის სიჩქარეზე არა მარტო კაპილარული ძალები მოქმედებენ არამედ მნიშვნელოვანია სითხის სიბლანტე, კონტაქტის ზედაპირის ფართი და სხვა ფაქტორები. დაბალი სიბლანტის სითხე სწრაფად გაჟღენთს მასალას და პირიქით სიბლანტის გაზრდით პროცესი ყოვნდება.

ფიკის კანონის მიხედვით ექსტრაგენტის გარკვეულ შრეში გადასული ნივთიერებების რაოდენობა უკუპროპორციულია ამ ექსტრაგენტის სიბლანტისა მოცემულ ტემპერატურაზე. შესაბამისად, დაბალი სიბლანტის ხსნარები ხასიათდებიან მაღალი დიფუზური უნარით.

ექსტრაგენტი, ავსებს რა უჯრედშორის სივრცეს, გამოდენის ჰაერს, რაც ძალზედ მნიშვნელოვანია ექსტრაქციისათვის, ვინაიდან ამ დროს იზრდება კონტაქტის ფართი ნედლეულთან.

ექსტრაჰირების პირველი სტადია მთავრდება გამხსნელის უჯრედის შიგნით შეღწევის პროცესით.

**2 სტადია.** მცენარეული უჯრედების კომპონენტების გაჯიჯვება და გახსნა. პირველადი წვენის წარმოქმნა.

უჯრედის შიგნით შეღწევის შემდეგ გამხსნელი შედის ურთიერთქმედებაში უჯრედის შიგთავსისა და გარსის ყველა კომპონენტთან:

ხსნადი ნივთიერებები დესორბირდებიან და იხსნებიან

შეუზღუდავად გაჯირჯებადი ნივთიერებები იჟღენთებიან და პეპტიზირდებიან

შეზღუდულად გაჯირჯებადი ნივთიერებები მხოლოდ იჟღენთებიან.

მიმდინარეობს სხვა პროცესებიც. მაგ. ქიმიური ურთიერთქმედება. ამ დროს უჯრედის მემბრანები სქელდებიან, ფორები იწელებიან, ხოლო ნედლეულის მოცულობა იზრდება. მცენარეული ნედლეულის ყველაზე მეტ გაჯირჯებას იწვევს წყალი, ყველაზე ნაკლებს – თხევადი ნახშირწყლები. განსაკუთრებული ადგილი ექსტრაგენტებს შორის უჭირავს სპირტს. ნედლეულის გაჟღენთვის ხარისხი (ერთი გრამი მასის ნედლეულის მიერ დაკავებული ექსტრაგენტის რაოდენობა) უკუპროპორციულია სპირტის კონცენტრაციასთან: ის რაც უფრო ნაკლებია, მით მეტია გაჯირჯების ხარისხი, მით უფრო მეტად იხსნებიან ფორები, ადვილად მიმდინარეობს ექსტრაქციის პროცესი.

ექსტრაგენტის მასალაში შეღწევისას უჯრედში წარმოიშვება გამხსნელში ხსნადი ნივთიერებებით კონცენტრირებული ხსნარი, რომელსაც პირველადი წვენი ეწოდება. მისი ნაწილი რჩება თავისუფალი, ხოლო ნაწილი შეიწოვება პლასტიდების ფერმენტული ელემენტების და გაჯირჯებული უჯრედის გარსის სხვადასხვა ფორებში.

პირველადი წვენის წარმოქმნა მთავრდება ექსტრაქციის მე-3 სტადიის მასალათაცვლის ანუ საკუთრივ ექსტრაქციის სტადიის დადგომით.

**3. სტადია. მასალათაცვლა.** მასალათაცვლის (მასაგადატანის) პროცესი წარმოადგენს ნივთიერებების ერთი ფაზიდან (სისტემიდან) მეორეში გადატანის პროცესს წონასწორობის დამყარების მიმართულებით. კონკრეტულ შემთხვევაში – მცენარეული ნედლეულიდან ექსტრაგენტში,

ანუ მყარი ფაზიდან თხევადში ფაზათაშორისი ზედაპირის გავლით. მასათაცვლის პროცესებს ადგილი აქვთ ასევე სისტემებისათვის: სითხე-სითხე, მყარი სხეული-სითხე, სითხე-აირი.

თერმოდინამიკის მეორე კანონის შესაბამისად, სითბოს თვითნებური გადაცემა ხდება მხოლოდ ცხელი სხეულიდან ცივზე და არა პირიქით. ანალოგიურად, ნივთიერების ერთი ფაზიდან მეორეში გადასვლა მიმდინარეობს მხოლოდ მათ შორის კონცენტრაციების სხვაობის შემთხვევაში: მაღალი კონცენტრაციის ფაზიდან დაბალი კონცენტრაციის ფაზაში.

თხევად ფაზაში – ექსტრაგენტში ექსტრაქციის პროცესის დასაწყისში მყარი ფაზის – მცენარეული ნედლეულის მოლეკულები საერთოდ არ არის ან არის ძალზე მცირე რაოდენობით. შემდგომში ექსტრაქტული ნივთიერებები იწყებენ გადასვლას მყარი ფაზიდან თხევად ფაზაში – ექსტრაგენტში. დროთა განმავლობაში, მოლეკულათა ქაოსური მოძრაობის წყალობით, იწყება უკუპროცესიც – თხევადი ფაზიდან ექსტრაქტული ნივთიერებების უკან, მყარ ფაზაში დაბრუნება. საწყის ეტაპზე ეს პროცესი უმნიშვნელოა, მაგრამ ექსტრაგენტში ექსტრაქტული ნივთიერებების კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად უკუპროცესის სიჩქარე იზრდება. გარკვეულ მომენტში თხევადი ფაზიდან ექსტრაქტული ნივთიერებების მყარ ფაზაში გადატანის სიჩქარე გაუტოლდება მყარიდან თხევადში გადატანის სიჩქარეს და დამყარდება წონასწორობა – მყარდება დინამიკური წონასწორობა და მასათაცვლის პროცესი წყდება.

ამრიგად, ნივთიერებების გადატანა შესაძლებელია მხოლოდ მაღალი კონცენტრაციის ფაზიდან დაბალი კონცენტრაციის ფაზაში, ანუ კონცენტრაციათა სხვაობის  $\Delta c$  არსებობისას. სწორედ კონცენტრაციათა არსებული სხვაობა წარმოადგენს მასაგადაცემის პროცესის მამოძრავებელ ძალას.



### 1.1.3. მასათაცვლა როგორც დიფუზიური პროცესი

მასათაცვლის პროცესი დიფუზიური პროცესია. რთულ დიფუზიურ პროცესში ანსხვავებენ ორი სახის ერთმანეთისაგან პრონციპულად განსხვავებულ დიფუზიას:

მოლეკულური დიფუზია, რომელიც იყოფა: 1 თავისუფალ დიფუზიად და 2. შიგა დიფუზიად.

კონვექციური დიფუზია

მოლეკულური დიფუზია ხორციელდება საკუთრივ მოლეკულების ქაოსური მოძრაობების ხარჯზე. მოლეკულური დიფუზიის დამახასიათებელი თავისებურებაა მყარი და თხევადი ფაზების ურთიერთ მოძრაობა – მიკრო სიმშვიდე.

მოლეკულურ დიფუზიას შეიძლება ადგილი ჰქონდეს ფაზების გაყოფის საზღვარზე, მცენარეული ან ცხოველური უჯრედის შიგნით, დიფუზურ (ლამინარულ) ფენაში, რომელიც გარს აკრავს მყარ ფაზას და ამ უკანასკნელის მიმართ გვევლინება უძრავი თხევადი ფაზის როლში.

მოლეკულურ დიფუზიაზე გავლენას ახდენს:

ტემპერატურული ფაქტორი: რაც მაღალია ტემპერატურა, მით სწრაფად მოძრაობენ მოლეკულები;

დიფუზიის სიჩქარე დამოკიდებულია ექსტრაქტული ნივთიერების მოლეკულის ზომაზე: მოლეკულური მასის გაზრდით (შესაბამისად, მოლეკულის ზომის გაზრდით) მისი მოძრაობის უნარი (სიმარდე) ეცემა. მოლეკულური დიფუზიისას ყველაზე მაღალი სიჩქარით გამოირჩევიან აირების მოლეკულები, ხოლო ყველაზე დაბალით – მაღალმოლეკულური ნივთიერებების მოლეკულები;

ორი ფაზის კონტაქტის ზედაპირი: მისი გაზრდით იზრდება მასათაცვლა;

დიფუზური შრის სისქე, იმ შრისა, რომელშიც მიმდინარეობს დიფუზია: რაც უფრო სქელია ეს შრე, მით ნელა მიმდინარეობს დიფუზია.

ანალოგიურად მოქმედებენ დრო და რიგი სხვა ფაქტორებისა, მაგრამ დომინირებულია კონცენტრაციების სხვაობა  $\Delta c$ .

მოლეკულური დიფუზიის კინეტიკის შესწავლას მიუძღვნეს თავიანთი შრომები გ.ა. აქსელრუდმა, ვ.მ. ლისიანსკიმ, ს.ფ. დრონოვმა, დალტონმა, ბერტოლემ და სხვა. ფიკმა პირველმა დაამტკიცა ანალოგია დიფუზიის კინეტიკასა და თბოგამტარებლობის კინეტიკას შორის. მან მოგვცა ამ მოვლენის რაოდენობრივი დახასიათება თხევადი სისტემებისათვის.

მყარი სხეულის სითხეში გახსნისას დიფუზიის განტოლება გამოიყვანა ა.ნ. შჩუკარევმა. მოლეკულური დიფუზიის პროცესის მისეული მათემატიკური განსაზღვრა გამოიხატება შემდეგნაირად: დიფუნდირებული ნივთიერებების რაოდენობა პირდაპირპროპორციულია მოცემული ნივთიერების დიფუზიის კოეფიციენტის, იმ ზედაპირის ფართის, რომელზეც მიმდინარეობს ეს პროცესი, დროის, კონცენტრაციათა სხვაობის და უკუპროპორციულია ფენის სისქის.

ამრიგად მოლეკულური დიფუზიის კანონის მათემატიკურ გამოსახულებას აქვს შემდეგი სახე:

$$S_{\text{თავ}} = \frac{D_{\text{თავ}} \times F \times T \times \Delta C}{d}$$

სადაც  $S_{\text{თავ}}$  – დიფუნდირებული ნივთიერების რაოდენობა, კგ;

$D_{\text{თავ}}$  – თავისუფალი მოლეკულური დიფუზიის კოეფიციენტი კგ/(მ<sup>2</sup>/წმ);

F – ზედაპირი, რომელზეც მიმდინარეობს დიფუზია, მ<sup>2</sup>;

T – დიფუზიის დრო, სთ;

$\Delta c$  – ფაზების დაყოფის საზღვარზე კონცენტრაციების სხვაობა, კგ/მ<sup>3</sup>;

d – დიფუზიური ფენის სისქე, მ;

მოლეკულური (თავისუფალი) დიფუზიის კოეფიციენტი  $D_{\text{თავ}}$ . მუდმივი სიდიდეა, რომელიც გვიჩვენებს ერთეულ დროში (წმ) 1მ<sup>2</sup> ზედაპირზე 1 კგ/მ<sup>3</sup> კონცენტრაციების სხვაობისას 1მ სისქის ფენაში

დიფუნდირებული ნივთიერებების რაოდენობას კგ-ში. ეს სიდიდე მუდმივია კონკრეტული ნივთიერებებისა და კონკრეტული ექსტრაგენტი – გამხსნელისათვის.

მოლეკულური (თავისუფალი) დიფუზიის Dთავ კოეფიციენტის მნიშვნელობა დიფუზიის კინეტიკური თეორიის თვალთახედვით განსაზღვრა ეინშტეინმა. მის მიერ გამოყვანილ განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$D_{\text{თავ}} = \frac{R \times T}{N_0} \cdot \frac{1}{6 \times \pi \times \eta \times r},$$

სადაც  $R=8,32$  ჯ/(გრად.მოლი) – კლავირონის გაზის (აირის) მუდმივაა;

$T$  – ტემპერატურა კელვინის შკალის მიხედვით ( $^{\circ}\text{K}$ );

$N_0=6,06 \times 10^{23}$  –ავოგადროს რიცხვია,

$\pi=3,14$ ;

$\eta$  – თხევადი ფაზის სიბლანტეა, ნ/(წმ/მ<sup>2</sup>);

$r$  – დიფუნდირებული ნაწილაკის (მოლეკული, იონის) რადიუსი, მ.

თუ მოლეკულური (თავისუფალი) დიფუზიის განტოლებაში შევიტანთ “Dთავ” მნიშვნელობას მივიღებთ შჩუკარევ-ფიკის გამლილ განტოლებას:

$$S_{\text{თავის.}} = \frac{R \times F \times T \times \Delta C \times \tau}{d \times 6 \times N_0 \times \pi \times \eta \times r} \quad (\text{კვ})$$

მიღებული განტოლების საშუალებით შეგვიძლია შევაფასოთ სხვადასხვა ფაქტორის გავლენა დიფუნდირებული ნივთიერებების რაოდენობაზე თავისუფალი მოლეკულური დიფუზიის დროს.

თავისუფალი მოლეკულური დიფუზიის სიჩქარე წარმოადგენს ერთეულ ფართობზე ერთეულ დროში დიფუნდირებული ნივთიერებების რაოდენობას:

$$W_{\text{თავის.}} = \frac{S_{\text{თავის.}}}{F \times \tau},$$

ან, თუ ჩავსმათ ამ განტოლებაში  $S_{\text{თავის}}$  მნიშვნელობას, გვექნება:

$$W_{\text{თავის.}} = \frac{R \times T \times \Delta C}{d \times 6 \times N_0 \times \pi \times \eta \times r} \quad (\text{კგ}/(\text{მ}^2/\text{წმ}))$$

ახლა ვნახოთ, რომელია ის ძირითადი ფაქტორები, რომლებიც ახდენენ გავლენას თავისუფალ მოლეკულურ დიფუზიაზე.

ჩვენ უკვე ავღნიშნეთ მოლეკულურ დიფუზიაში კონცენტრაციათა სხვაობის  $\Delta c$  უპირველესი როლის შესახებ. რაც შეეხება ტემპერატურას (T), მისი გაზრდა ხელს უწყობს  $S_{\text{თავ.}}$  და  $W_{\text{თავ.}}$  სიდიდეების ზრდას, ვინაიდან ამ დროს იზრდება მოლეკულების კინეტიკური ენერჯია, იზრდება მათი თბური მოძრაობა. ამავდროულად მცირდება სიბლანტე ( $\eta$ ). დიფუზიის სიჩქარე იზრდება საშუალოდ 2-ჯერ ტემპერატურის 400C გაზრდით.

სადიფუზიო ნივთიერების ნაწილაკების (მოლეკულების, იონების, მიცელების) ეფექტური რადიუსი ( $r$ ) მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს დიფუზიაზე. მცირე მოლეკულები გაცილებით სწრაფად დიფუნდირდებიან, ვიდრე მსხვილი. მაგალითად, ამიაკის მოლეკულები ( $\text{NH}_3$ , მოლეკულური მასა 17) გადაადგილდებიან ვაკუუმში 517მ/წმ სიჩქარით, ხოლო ქლორწყალბადის მოლეკულები ( $\text{HCl}$ , მოლეკულური მასა 36) იგივე პირობებში – 354 მ/წმ სიჩქარით. ამრიგად, მოლეკულური მასის 2-ჯერ გაზრდა იწვევს დიფუზიის სიჩქარის 1/3-ით დაცემას. შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ მაღალმოლეკულური ნაერთების მოლეკულების გადაადგილების სიჩქარე თხევად არეში ძალზედ მცირეა.

მაღალმოლეკულურ ნაერთთა და დაბალმოლეკულურ ნაერთთა დიფუზიის სიჩქარეთა სხვაობის შედეგად ხდება დიალიზი, ანუ ფრაქციონირება: საწყის მცენარეულ ნედლეულში რჩება მაღალმოლეკულური ნაერთები (ლორწო, ცილები, პექტინები და სხვა მაღალმოლეკულური ნაერთები) ექსტრაქციის შეზღუდული ექსპოზიციისას, ხოლო დაბალმოლეკულური ნაერთები (ალკალოიდები, გლუკოზიდები, ვიტამინები, ფლავონოიდები და სხვ) გადადიან ნაწურში, ვინაიდან დაბალმოლეკულური ნაერთების “ $D_{\text{თავ.}}$ ” 2-3 რიგით მეტია მაღალმოლეკულებიანების “ $D_{\text{თავ.}}$ ”-ზე.

ასეთია ის ძირითადი ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენენ თავისუფალი მოლეკულური დიფუზიის სიჩქარეზე.

#### **1.1.4. შიგა მოლეკულური დიფუზია.**

ჩვენს მიერ ზემოთ განხილული მოლეკულური დიფუზია იყო თავისუფალი, ანუ არ იყო შეზღუდული ტიხარით მყარ და თხევადი ფაზებს შორის. უჯრედოვანი გარსის კედლების და სხვა არსებობის შემთხვევაში, რასაც ადგილი აქვს უჯრედოვანი ნედლეულის ექსტრაჰირებისას, ნივთიერებათა დიფუზია განისაზღვრება, როგორც შიგა დიფუზია. ამ დროს ექსტრაქტული ნივთიერებების მოლეკულები დიფუნდირდებიან საკუთრივ უჯრედოვანი გარსისა და ტიხრის სიღრმეში.

უჯრედოვანი გარსის ფიზიოლოგიური მდგომარეობა განსაზღვრავს მასათაცვლის შესაძლებლობებს. ცოცხალ უჯრედში გარსი შიგნიდან დაფენილია პროტოპლაზმით, რომელიც წყალს უშვებს უჯრედშიგნით და იქედან არ უშვებს პლაზმაში გახსნილ ნივთიერებებს. მასათა ცვლას, ექსტრაქციას ადგილი არა აქვს სანამ ცოცხალია პროტოპლაზმა. ამ დროს უჯრედიდან არავითარი ნივთიერების გამოღება არ შეძლება. ყველასათვის ცნობილია გაჭრილი ცოცხალი ქარხლის, სტაფილოს ცივ წყალში დასველების მაგალითი: ნივთიერებათა გამოყოფას დაუზიანებელი უჯრედებიდან ადგილი არა აქვს, ექსტრაქცია არ ხდება.

სხვაგვარად იქცევა გამშრალი მკვდარი უჯრედი. მკვდარი პროტოპლაზმა ხდება შეღწევადი, უჯრედოვანი გარსი ხდება ფოროვან ტიხრად, გამჭოლი ულტრაფორებით, რომლებითაც ხდება დიფუზია, მიმდინარეობს დიალიზი.

უჯრედოვანი გარსიდან ნივთიერების დიფუზიის მექანიზმი შემდგომში მდგომარეობს: სადიფუზიო ნივთიერებების მოლეკულები ჯერ სორბირდებიან პირველადი წვენიდან მცენარეული უჯრედის კედლის მემბრანის მასალასთან, შემდეგ დიფუნდირდებიან მემბრანიდან და

დესორბირდებიან ტიხრის მეორე მხარეს, გროვდებიან დიფუზურ (სასაზღვრო) შრეში და მხოლოდ ამის შემდეგ გადაადგილდებიან გამხსნელის არეში. მცენარეულ ნედლეულში უჯრედოვანი კედლის, მემბრანის არსებობა ასევე უჯრედოვანი გარსის ცვილით, კუტინით, სუბერინით მოპირკეთება, ლიგნინისა და სხვა კომპონენტების თანხლებით, მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს მასათა ცვლაზე, ამცირებს რა მას კიდევ უფრო მეტად (რამდენიმე რიგით) ვიდრე თავისუფალი მოლეკულური დიფუზიის შემთხვევაში.

ბუნებრივია, უჯრედის კედლებში, უჯრედოვან გარსში სადიფუზიო ნივთიერების დიფუზიის კოეფიციენტი იქნება ნაკლები თავისუფალ მოლეკულურ დიფუზიასთან შედარებით. ამიტომაც, მცენარეული მასალებისაგან ნივთიერებების დიფუზიის სიდიდის დასადგენად მოლეკულურ (თავისუფალ) დიფუზიის კოეფიციენტში “D<sub>თავ</sub>” შეგვყავს შემასწორებელი კოეფიციენტი “B”, რომელიც ითვალისწინებს პროცესის ზემოთნახსენებ გართულებებს. “D”-ს ამ შემთხვევაში ეწოდება “შიგა დიფუზიის კოეფიციენტი” “D შიგა”, ხოლო შიგა დიფუზიის განტოლება ლებულობს შემდეგ სახეს:

$$S_{\text{შიგა}} = \frac{R \times T}{N_0} \times \frac{F \times \Delta C}{-6 \times \pi \times \eta \times r \times d \times B};$$

$$W_{\text{შიგა}} = \frac{S_{\text{შიგა}}}{F \times \tau} = \frac{R \times T \times \Delta C}{-6 \times \pi \times \eta \times r \times d \times B}.$$

### 1.1.5. კონვექციური დიფუზია

მოლეკულური დიფუზია მიმდინარეობს უძრავ სისტემაში ნელა. ამიტომაც, პრაქტიკისათვის დიდი მნიშვნელობა აქვს დიფუზიას მოძრავ არეში, ანუ კონვექციურ დიფუზიას..

ამ შემთხვევაში ნივთიერების მოლეკულები ერთი ფაზიდან მეორეში გადადიან არა მარტო მოლეკულური მოძაობის მიზეზით, არამედ

მექანიკურადაც, ცალკეული მცირე (ელემენტარული) თხევადი ფაზის მოცულობების გადაადგილებით ცირკულაციის, შერყევის, წნევის, ტემპერატურათა სხვაობის და ა.შ. გავლენით.

კონვექციური დიფუზია ექვემდებარება კანონზომიერებებს, რომელთა მიხედვითაც კონვექციური დიფუზიის სიდიდე იზრდება მასათაცვლის ზედაპირის, კონცენტრაციათა სხვაობის, პროცესების ხანგრძლივობის, კონვექციური დიფუზიის კოეფიციენტის გაზრდით.

სადიფუზიო ნივთიერებების მოლეკულების ზომა, მათი კინეტიკური ენერგია აქ მეორეხარისხოვანი ფაქტორების როლს ასრულებენ.

კონვექციური დიფუზიის განტოლებას აქვს შემდეგი სახე:

$$S_{\text{კონვ.}} = \beta \times F \times \Delta C_{\text{ნაწ.}} \times \tau$$

სადაც  $S_{\text{კონვ.}}$  – კონვექციური დიფუზიით გადატანილი ნივთიერებების რაოდენობაა, კგ;

$\beta$  – კონვექციური დიფუზიის კოეფიციენტია და წარმოადგენს 1 წამში 1მ2 ფართობიდან მოძრავი სითხით გადატანილი ნივთიერებების რაოდენობას, როცა კონცენტრაციების სხვაობაა 1კგ/მ<sup>3</sup>.

F – დიფუზური პროცესის ზედაპირის ფართობი, მ<sup>2</sup>.

$\Delta C_{\text{ნაწ.}}$  – ნივთიერების კონცენტრაციების სხვაობაა ფაზების დაყოფის ზედაპირსა და მოძრავი სითხის მოცულობის ცენტრში, კგ/მ<sup>3</sup>.

$\tau$  – დრო, წმ.

ნივთიერების კონვექციური გადატანის სიჩქარე, რომელიც ახასიათებს გადატანილი ნივთიერების რაოდენობას ერთეულ დროში გამოითვლება როგორც

$$W_{\text{კონვ.}} = \frac{S_{\text{კონვ.}}}{\tau} = \frac{\beta \times F \times \Delta C \times \tau}{\tau} = \beta \times F \times \Delta C_{\text{ნაწ.}} \quad (\text{კგ/წმ})$$

კონვექციური დიფუზიის სიჩქარე ათეულობითჯერ მეტია თავისუფალი მოლეკულური დიფუზიის სიჩქარეზე.

ორი სახის დიფუზიის (მოლეკულური და კონვექციური) არსებობის პირობებში მასათაგადაცემის პროცესი შესაძლებელია წარმოვიდგინოთ განტოლებით (მასათაგადატანის ძირითადი განტოლება):

$$S = K \times F \times \Delta C \times \tau_{(კვ)}$$

ერთი ფაზიდან მეორეში გადამავალი ნივთიერებების რაოდენობა (ჩვენს შემთხვევაში უჯრედიდან ექსტრაგენტ-გამხსნელში) დამოკიდებულია მასათაგადაცემის კოეფიციენტზე /K/, გამყოფ ზედაპირზე /F/, კონცენტრაციების სხვაობასა / $\Delta C$  / და დროზე / $\tau$ /.

მასათაგადაცემის K კოეფიციენტი აჯამებს ყველა სახის დიფუზიების მნიშვნელობებს, რომლებსაც ადგილი აქვს ექსტრაქციისას, განზოგადებული სახით შეიძლება ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$K = \frac{1}{\frac{2r}{\eta \times D_{შიგ.}} + \frac{d}{D_{თავ}} + \frac{1}{\beta}}$$

სადაც r – მცენარეული ნედლეულის ნაწილაკის რადიუსია, მ;

$\eta$  – მცენარეული ქსოვილის ანატომიური თავისებურებებით გამოწვეული შემასწორებელი კოეფიციენტი;

D, d,  $\beta$  – იგივეა რაც წინა შემთხვევაში.

მნიშვნელში ორი უკანასკნელი შესაკრები წარმოადგენენ ცვლად სიდიდეებს. რომლებიც დამოკიდებული არიან სისტემის ჰიდროსტატიკურ მდგომარეობაზე, ანუ თხევადი ფაზის გადაადგილების სიჩქარეზე.

როგორც უკვე ავღნიშნეთ, მასათაგადატანის პროცესი მიმდინარეობს სასაზღვრო შრეში (ლამინარული, დიფუზური შრე). ეს შრე უქმნის ძირითად წინაღობას მოლეკულურ დიფუზიას. მისი სისქე მნიშვნელოვნად მოქმედებს მასათაცვლის ინტენსივობაზე: ლამინარული (დიფუზური) შრის გაზრდით ექსტრაგენტული ნივთიერებების რაოდენობა თხევად ფაზაში ნელა იზრდება, შრის შემცირებისას – პირიქით, სწრაფად, ვინაიდან კონცენტრაციების სხვაობა შენარჩუნებულია მაქსიმალურ ნიშნულზე.



ამ შრის სისქე დამოკიდებულია, ძირითადად, ექსტრაგენტის გადანაცვლების (გადაადგილების) სიჩქარეზე.

თუ მასათაგადატანის პროცესი (მოქმედი და თანმდევი ნივთიერებების ექსტრაქცია მცენარეული ნედლეულიდან) მიმდინარეობს სრულ მაკროსიმშივადეში, მაგალითად, მაცერაციის მეთოდის დროს, როცა კონვექციური დიფუზიის “ $\beta$ ” მნიშვნელობა ნულის ტოლია და არსებითია მხოლოდ მნიშვნელის ორი შესაკრები – შიგა და თავისუფალი დიფუზიები. მასათაგადატანის კოეფიციენტი ასეთ შემთხვევაში იქნება:

$$K = \frac{1}{\frac{2r}{\eta \times D_{\text{შიგ.}}} + \frac{d}{D_{\text{თავ.}}}}$$

თუ გავითვალისწინებთ, რომ კონვექციური დიფუზიის კოეფიციენტი რამდენიმე რიგით მეტია თავისუფალი დიფუზიის კოეფიციენტზე და მით უმეტეს, შიგა დიფუზიის კოეფიციენტზე, მაშინ მასათაგადატანაც მთლიანად მიმდინარეობს ნაკლებეფექტურად.

ექსტრაგენტის ზომიერი გადაადგილების (არაუმეტეს 0,5 მ/წმ სიჩქარე) შემთხვევაში დიფუზიის ყველა კოეფიციენტი არსებითია და ისინი იკრიბებიან, ანუ მასათაგადაცემის კოეფიციენტი ღებულობს მნიშვნელობას:

$$K = \frac{1}{\frac{2r}{\eta \times D_{\text{შიგ.}}} + \frac{d}{D_{\text{თავ.}}} + \frac{1}{\beta}}$$

მართლაც, პერკოლაციის, რეპერკოლაციის და ურთიერთსაწინააღმდეგო ნაკადის მეთოდებით ექსტრაქციისას მასათაცვლის პროცესი ერთობ ეფექტურია.

ექსტრაქციის მესამე შესაძლო შემთხვევაა, როცა ექსტრაგენტი გადაადგილდება დიდი სიჩქარით. ამ დროს ნივთიერება, გადალახავს რა უჯრედოვან გარსს, ხვდება გამონაწვლილის საერთო მოცულობაში, ანუ თხევად ფაზაში. აღარ არსებობს დიფუზური შრე, ამ შრის სისქე ნოლის ტოლია და მასათაცვლის განტოლებაში მნიშვნელის მეორე შესაკრებიც ნოლის ტოლია. ამავდროულად, კონვექციური დიფუზიის კოეფიციენტი

იზრდება უსასრულობამდე ( $\beta \rightarrow \infty$ ) და მნიშვნელის მესამე შესაკრებიც ნოლის ტოლია. შესაბამისად, ასეთ შემთხვევაში მასათაგადაცემის კოეფიციენტი განისაზღვრება როგორც

$$K = \frac{1}{\frac{2r}{\eta \times D_{\text{მოგ.}}}}$$

ასეთ სურათს ვღებულობთ ექსტრაქციის გრიგალისებური მეთოდის შემთხვევაში როცა ამრევი პროპელერის ბრუნთა რიცხვი 9000-12000-ია წუთში, აგრეთვე აკუსტიკური და ელექტროჰიდრადინამიკური მეთოდებით ექსტრაქციისას, როტორულპულსაციური აპარატებით ექსტრაქციისას.

უკანასკნელ წლებში შემოთავაზებულია ექსტრაჰირება ელექტრული განმუხტვებით, ელექტროპლაზმოლიზისა და ელექტროდიალიზის გამოყენებით. ამ შემთხვევებში ჩნდება შიგა დიფუზიის კოეფიციენტზე ზემოქმედების შესაძლებლობა, რაც განაპირობებს ექსტრაქციის პროცესის დაჩქარებას მის ყველაზე ნელ სტადიაზე.

#### 1.1.6. მასათაგვლის პროცესზე მოქმედი სხვა ძირითადი ფაქტორები

**ფაზების გამყოფი ზედაპირი (F).** “მყარი მცენარეული ნედლეული – სითხე” დამოკიდებულია ნედლეულის დაქუცმაცების ხარისხზე. F მით მეტია, რაც უფრო მცირეა ნაწილაკების ზომა. მაგრამ, პრაქტიკულად, ბევრი მცენარეული ნედლეულის 0,1-0,3 მმ ფრაქციამდე დაფქვისას ექსტრაქცია უფრო ნელა მიმდინარეობს, ვიდრე 5-10 მმ ფრაქციის შემთხვევაში. ეს იმიტომ ხდება, რომ ნედლეულის ფქვილი გამხსნელში ქმნის ბურთულებს და მის გარსში ექსტრაგენტის შეღწევა გამწელებულია. ნედლეულის გარკვეული ნაწილი ამ მიზეზით, შესაძლებელია, საერთოდ არ ექსტრაჰირდეს. ამას გარდა, ძალზე წმინდად დაქუცმაცების შემთხვევაში მკვეთრად იზრდება დაშლილი უჯრედების რაოდენობა, რასაც მივყავართ თანმიმდევრული ნივთიერებების გამორეცხვამდე და, როგორც შედეგი,

ექსტრაქტის დაბინძურებამდე (პექტინები, ლორწო, ცილები, სხვა მაღალმოლეკულური ნაერთები). ამასთან ექსტრაქტში გადადის შეწონილი ნაწილაკების დიდი რაოდენობა. შედეგად გამონაწვლილები მიიღებიან მღვრიე, ძნელად ფილტრირებადი. აქედან გამომდინარეობს, რომ მსხვილი ნედლეული უნდა დაქუცმაცდეს ოპტიმალურ ზომებამდე: ფოთლები, ყვავილები, ბალახეული 3-5 მმ-მდე; ღეროები, ქერქი, ფესვები 1-3 მმ-მდე; თესლი და ნაყოფი 0,3-0,5 მმ-მდე. აღნიშნული ისე უნდა განხორციელდეს, რომ ნედლეულში შენარჩუნდეს უჯრედივანი სტრუქტურა. ექსტრაქირება შესაძლებელია შენელდეს, მაგრამ მიღებული გამონაწვლილი იქმნება მნიშვნელოვნად სუფთა, მექანიკური მინარევების გარეშე.

**კონცენტრაციების სხვაობა ნედლეულსა C<sub>1</sub> და ექსტრაგენტში C<sub>2</sub>** წარმოადგენს ექსტრაქციის პროცესის მამოძრავებელ ძალას. ექსტრაქციის დროს აუცილებელია მივისწავლოდეთ კონცენტრაციის მაქსიმალურად გადაცემაზე, რაც მიიღწევა ექსტრაგენტის ხშირი შეცვლით (რემაკერაცია მაცერაციის ნაცვლად), პროცესის ურთიერთსაწინააღმდეგო ნაკადით ჩატარებით და სხვა.

**ექსტრაქირების დრო** (ხანგძლივობა). მასათადაცემის ძირითადი განტოლებიდან ჩანს, რომ რაღაც ფენაში დიფუნდირებული ნივთიერების რაოდენობა ექსტრაქციის დროის პირდაპირპროპორციულია. მაგრამ, აუცილებელია მივალწიოთ შესაძლო მაქსიმალური გამოღება უმოკლეს დროში, სხვა დანარჩენი ფაქტორის მაქსიმალურად გამოყენების – ინტენსიფიკაციის გზით.

ხანგძლივ ექსტრაქციას მივყავართ გამონაწვლილის დაბინძურებასთან. მასში გადადის მაღალმოლეკულური ნაერთები, რომელთა დიფუზიის სიჩქარეც მნიშვნელოვნად ნაკლებია, ვიდრე ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების დიფუზიის სიჩქარე. ხანძლივი ექსტრაქირების პირობებში შესაძლებელია განვითარდეს არასასურველი პროცესები ფერმენტების გავლენით. ექსტრაქციის საერთო ხანძლივობა განისაზღვრება ეკონომიკური მოსაზრებებით. ამ დროს შესაძლებელია

პროცესი შევწყვიტოთ რაღაც მომენტში, ვინაიდან დამატებით გამოწვლილვით მიღებული ნივთიერება ვეღარ ანაზღაურებს გაწეულ ხარჯებს.

**ექსტრაგენტის სიბლანტე (Π)** ფიკის კანონის მიხედვით ექსტრაგენტის რაღაც შრეში დიფუნდირებული ნივთიერების რაოდენობა უკუპროპორციულია ამ ექსტრაგენტის სიბლანტის მოცემულ ტემპერატურაზე. შესაბამისად, დაბალი სიბლანტის ხსნარები ხასიათდებიან დიფუზიის გაზრდილი უნარით. სიბლანტის შესამცირებლად ზეთებით ექსტრაჰირებისას იყენებენ ექსტრაგენტის შეთბობას.

პერსპექტიულია, ამ მიმართულებით, უკანასკნელ წლებში გამოყენებული გათხევადებული აირები, მაგალითად ნახშირბადის დიოქსიდი, პროპანი, თხევადი ამიაკი და სხვა. ყველაზე ხშირად იყენებენ გათხევადებულ ნახშირბადის დიოქსიდს, რომელიც ინდიფერენტულია უმეტეს ბიოლოგიურად აქტიურ ნივთიერებებთან. მისი სიბლანტე წყლისაზე 14-ჯერ ნაკლებია, ეთანოლისაზე – 5-ჯერ. ნახშირბადის დიოქსიდი თხევად მდგომარეობაში მაღალ შედეგებს იძლევა ეთერზეთებისა და სხვა ჰიდროფობური ნივთიერებების ექსტრაქციისას.

**ტემპერატურა (T).** ტემპერატურის გაზრდა იწვევს ექსტრაქციის პროცესის დაჩქარებას, მაგრამ ფიტოქიმიური წარმოებისას შეთბობას იყენებენ მხოლოდ წყლის ექსტრაქტებისათვის. ექსტრაქცია ეთანოლით და, მით უმეტეს, ეთერებით მიმდინარეობს ოთახის ტემპერატურაზე, რადგან ტემპერატურის გაზრდით იზრდება ექსტრაგენტის დანაკარგები, ამასთან მავნე და საშიშია სამუშაო პირობები.

როგორც უკვე ავღნიშნეთ, ზეთებით ექსტრაჰირებისას შესაძლებელია ექსტრაგენტის შეთბობა, მაგრამ, თერმოლაბირული ნივთიერებებისათვის ცხელი ექსტრაგენტის გამოყენება დასაშვებია მხოლოდ მცირე დროის მონაკვეთში. ექსტრაგენტის გაზრდილი ტემპერატურა არასასურველია ეთერზეთოვანი ნედლეულისათვის, ვინაიდან გაცხელების პროცესში

ეთერზეთები მნიშვნელოვანწილად იკარგებიან. გაზრდილი ტემპერატურა შესაძლებელია გამოყენებული იქნას ისეთი ნედლეულისათვის, როგორებიცაა ფესვები, ფესურები, ქერქი და უხეში ფოთლები. ცხელი წყალი ამ დროს ხელს უწყობს ქსოვილების უკეთესად დაშორიშორებას და უჯრედოვანი კედლების დარღვევას, – ამით კი დიფუზური პროცესების დაჩქარებას.

#### **ზედაპირულად აქტიური ნივთიერებების (ზან) დამატება.**

ექსპერიმენტულად დადგენილია, რომ მცირე რაოდენობით (0,01 – 0,1%) ზან-ის დამატება აუმჯობესებს ექსტრაქციის პროცესს. ამ დროს იზრდება ექსტრაჰირებული ნივთიერებების – ალკალოიდების, გლიკოზიდების, ეთერზეთების და სხვა რაოდენობა, ზოგიერთ შემთხვევაში კი გამოწვლილის სისრულე ექსტრაგენტის შედარებით მცირე რაოდენობის გამოყენებით მიიღწევა. ზან-ის დამატება ამცირებს ზედაპირულ დაჭიმულობას ფაზების დაყოფის საზღვარზე, უმჯობესდება უჯრედის შემავსებლის დასველება და ადვილდება უჯრედში ექსტრაგენტის შეღწევა. ამას გარდა მნიშვნელოვან როლს თამაშობს ზან-ის სოლუბილიზაციის უნარი.

**ექსტრაგენტის შერჩევა.** მოქმედი ნივთიერებების სრულად ამოღებისა და ექსტრაჰირების მაქსიმალური სიჩქარისათვის ექსტრაგენტს წაეყენება შემდეგი მოთხოვნები: სელექციურობა (შერჩევითი ხსნადობა), ქიმიური და ფარმაცევტული ინდიფერენტულობა, დაბალი ტოქსიკურობა, ხელმისაწვდომობა.

ექსტრაგენტის შერჩევა განისაზღვრება გამოსაღები ნივთიერების ჰიდროფილურობის ხარისხით. პოლარული ნივთიერებების ექსტრაჰირებისათვის დიელექტიკური მუდმივის მაღალი მნიშვნელობით, გამოიყენება პოლარული გამხსნელები: წყალი, მეთანოლი გლიცერინი; არაპოლარულებისათვის – ძმარმჟავა, ქლოროფორმი, ეთილის ეთერი და სხვა ორგანული გამხსნელი. ყველაზე ხშირად ექსტრაგენტად გამოიყენება ეთანოლი – მცირეპოლარული გამხსნელი, რომელიც წყალთან შერევისას

იძლევა სხვადასხვა ხარისხის პოლარულობის ხსნარებს. ყოველივე იძლევა მისი გამოყენების საშუალებას სხვადასხვა ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების შერჩევითი ექსტრაქციებისათვის. ეთანოლის გარდა მცირეპოლარული გამხსნელებიდან გამოიყენებენ აცეტონს, პროპანოლს, ბუთანოლს.

ლიპიდური კომპლექსების გამოყოფის კლასიკური მეთოდია არაპოლარული გამხსნელების გამოყენება. ამერიკის შეერთებულ შტატებსა და ევროპის ზოგიერთ ქვეყანაში ამ მიზნით გამოიყენება ქლორწარმოებული ნახშირწყალბადები: ტრიქლორეთილენი, ტეტრაქლორეთილენი, დიქლორეთანი და სხვა. ჩაის ფოთლის ლიპიდური კომპლექსის ექსტრაქციებისას, ჩამოთვლილთაგან, ყველაზე ეფექტური აღმოჩნდა ტრიქლორეთილენი.

**ფორიანობა და სიცარიელე.** ფორიანობა წარმოადგენს ნაწილაკებში ცარიელ ადგილებს. რაც მეტია ის, მით მეტი შიგა წვენი წარმოიქმნება გაჯირჯვების დროს. სიცარიელე წარმოადგენს ნაწილაკებს შორის ცარიელ ადგილს ნაყარ მდგომარეობაში. ფორიანობასა და სიცარიელეზე დამოკიდებული ნედლეულის დასველებისა და გაჯირჯვების დრო. გაჯირჯვების სიჩქარე იზრდება ნედლეულის წინასწარი ვაკუუმირებით, ასევე წნევისა და ტემპერატურის გაზრდით.

ფორიანობა და სიცარიელე ახასიათებენ ნედლეულის შთანთქმის უნარს, რომელიც გამოისახება ნედლეულის შთანთქმის კოეფიციენტით  $K_{\text{ფ}}$  :

$$K_{\text{ფ}} = \frac{P_2}{P_1},$$

სადაც  $P_1$  და  $P_2$  – ნედლეულის მასაა გაჯირჯვებამდე და გაჯირჯვების შემდეგ. ნედლეულის შთანთქმის უნარი პირდაპირ დამოკიდებულებაშია მისი დაქუცმაცების ხარისხთან.

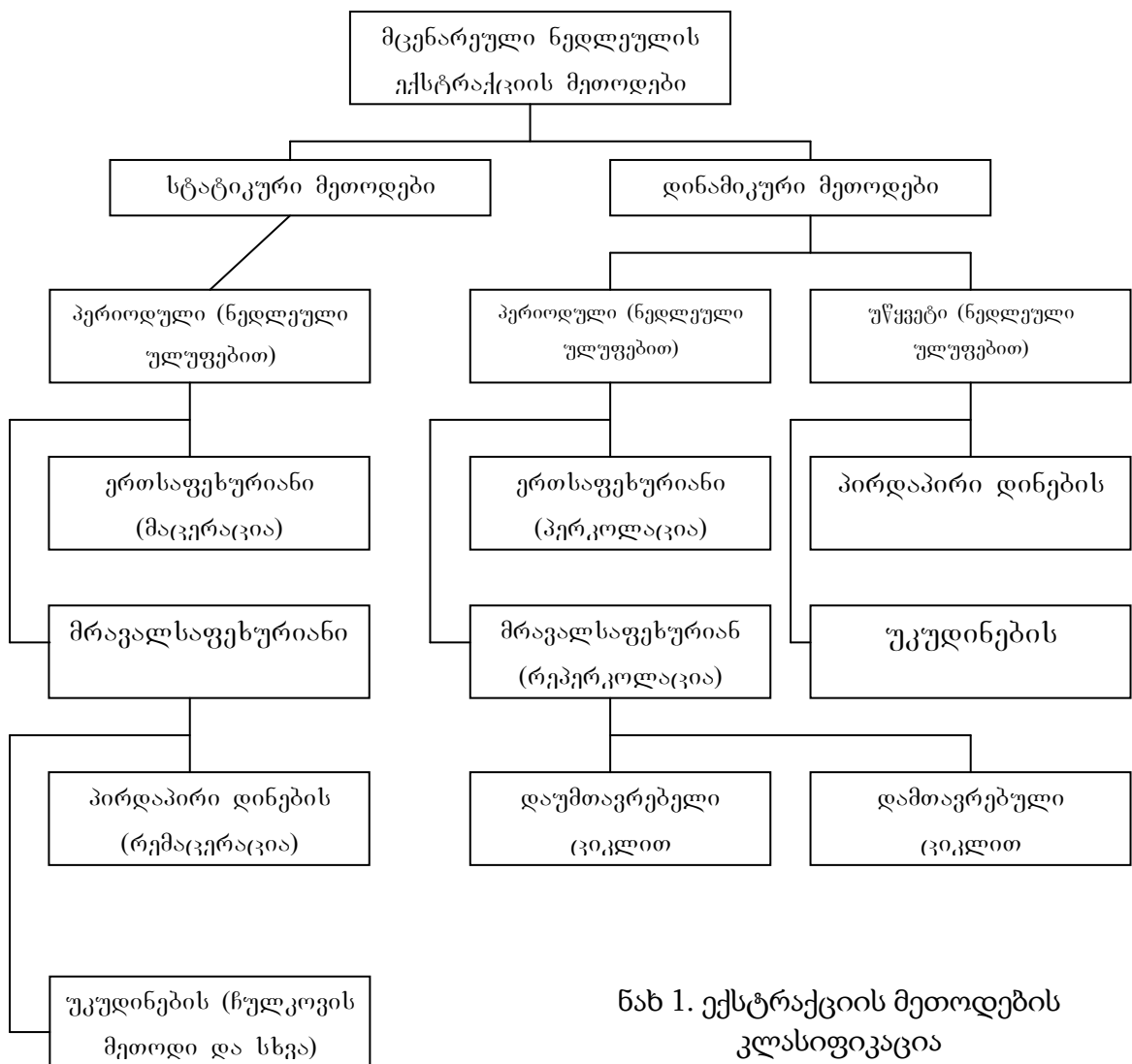
**გამორეცხვის კოეფიციენტი.** ის ახასიათებს დაქუცმაცებულ ნედლეულში უჯრედების რღვევის ხარისხს. თუ ეს კოეფიციენტი დაბალია, ნიშნავს, რომ ნედლეულში დარღვეული უჯრედები ცოტაა, ექსტრაქცირება

მიდის წელა და განისაზღვრება, ძირითადად, მოლეკულური დიფუზიის სიჩქარით. გამორეცხვის კოეფიციენტის სიდიდედ ღებულობენ ერთეული წედლეულიდან ექსტრაგენტისა და წედლეულის გარკვეული თანაფარდობის პირობებში ერთ საათში გარკვეული სიჩქარით არევისას გამონაწვლილში გადასულ ნივთიერებათა რაოდენობას.

## 1.2. მცენარეული წედლეულის ექსტრაქციის მეთოდები

### 1.2.1. ექსტრაქციის მეთოდების კლასიფიკაცია და თავისებურებები

ექსტრაქციის ყველა არსებული მეთოდი კლასიფიცირდება სტატიკურ და დინამიკურ ხერხებად (ნახ. 1).



ნახ 1. ექსტრაქციის მეთოდების კლასიფიკაცია

ექსტრაპირების ყველა არსებული მეთოდები კლასიფიცირდება: სტატიკურად და დინამიკურად.

სტატიკური მეთოდით ნედლეულს პერიოდულად დაასხამენ ექსტრაგენტს და დააყოვნებენ გარკვეული დროით.

დინამიური მეთოდის დროს ხდება ექსტრაგენტის ან ექსტრაგენტისა და ნედლეულის მუდმივად ცვლა.

ერექსტრაპირების სტატიკურ და დინამიურ მეთოდებში გამოყოფენ პერიოდული ქმედების ექსტრაპირებას – როცა ნედლეულის ექსტრაპირების პროცესი მიმდინარეობს გარკვეული დროის განმავლობაში, ე.ი ნედლეულის მიწოდება ხდება პერიოდულად.

სტატიკურ პერიოდულ მეთოდს მიეკუთვნება ერთსაფეხურიანი – მაცერაცია და მრავალსაფეხურიანი – რემაცერაცია, პერიოდული ჩასხმით ცირკულაცია (მრავალსაფეხურიანი პირდაპირი დინებით), მრავალსაფეხურია უკუდინებით – რეპერკოლაცია პერიოდული ჩადინებით ჩულკოვის მეთოდით.

დინამიური პერიოდული მეთოდი – ერთსაფეხურიანი – პერკოლაცია და მრავალსაფეხურიანი – რეპერკოლაცია დამთავრებული და დაუმთავრებელი ციკლებით.

დინამიურ მეთოდებს შორის გამოყოფენ უწყვეტ (ნედლეულის უწყვეტ მიწოდებას) – პირდაპირდინების (ექსტრაგენტი და მასალა ერთი ნაკადით) და უკუდინების (ექსტრაგენტისა და მცენარეული ნედლეულის აქტიური ურთიერთსაწინააღმდეგო მოძრაობა)

განვიხილოთ ცალ-ცალკე ექსტრაპირების მეთოდების თავისებურებები

ექსტრაპირების ყველაზე მარტივ მეთოდს წარმოადგენს სტატიკური და მათ შორის უმარტივესი – დაყენების მეთოდი, მაცერაცია (ლათინურიდან macerare – დასველება), გამოიყენება ექსტრაქტებისა და ნაყენების დასამზადებლად. შედარებით რთულია რემაცერაციული მეთოდები (მრავალჯერადი დაყენება), ხშირად ბისმაცერაციის მეთოდი,



რომელიც ფართოდ გამოიყენება წარმოებაში სქელი და მშრალი ექსტრაქტებისათვის.

დღესდღეობით მაცერაცია ამ “კლასიკური” სახით ვერ აკმაყოფილებს წარმოების ინტენსიფიკაციის მოთხოვნებს და გამოიყენება იშვიათ შემთხვევაში.

ამ მეთოდის უპირატესობაა აპარატების სიმარტივე. ხოლო ნაკლოვანებებია:

ინგრედიენტების არასრული ექსტრაქცია (90%-მდე);

პროცესის ხანგრძლივობა;

გ) გამოწვლილვის დროს ბალასტური ნივთიერებების გადამეტებული შემცველობა (ცილები, ლორწო, პექტინები და სხვა)

დ) შრომატევადობა (ორმაგი დაწნეხვა, შროტის გარეცხვა)

სტატიკური მეთოდის შემთხვევაში ნედლეულს პერიოდულად ასხამენ გამხსნელს და აყოვნებენ გარკვეული დროით. დინამიკურში გათვალისწინებულია ან ექსტრაგენტის ან ექსტრაგენტისა და ნედლეულის მუდმივი ცვლა.

ამჟამად მიმდინარეობს მაცერაციის ახალი ფორმების დანერგვა ყველა სახის დიფუზიის მაქსიმალური დინამიზაცია. მაცერაციის ასეთი სახის მოდიფიკაციის მაგალითებს წარმოადგენენ:

ჭავჭავი ექსტრაქცია – ტურბოექსტრაქცია

ექსტრაქცია ულტრაბგერის გამოყენებით (აკუსტიკური)

ელექტროიმპულსური და ნედლეულის სხვა იმპულსური მეთოდებით დამუშავება.

ცენტრიდანული ექსტრაქცია

წილადური მაცერაცია და სხვა

მცენარეული ნედლეულიდან კაპილარულ-ფოროვანი მარტივი ფორმის სხეულებიდან გამოწვლილვის დიფუზიური მოდელები მოყვანილია [3, 5, 10, 11, 16, 19, 21, 25, 26].

სტატიკური და დინამიკური ექსტრაქციის მეთოდებიდან გამოყოფენ პერიოდულს – როცა ნედლეულის ერთი ან რამდენიმე ულუფის ექსტრაქცია ხდება გარკვეული დროის განმავლობაში, ანუ ნედლეულის (ექსტრაგენტის და/ან მცენარეული მასალის) საექსტრაქციო აპარატში მიწოდება წარმოებს პერიოდულად.

სტატიკურ პერიოდულ მეთოდებს განეკუთვნებიან ერთსაფეხურიანი მაცერაცია და მრავალსაფეხურიანი რემაცერაცია, ცირკულაცია პერიოდული ჩამოსხმით (ანუ მრავალსაფეხურიანი პირდაპირი დინების), ასევე მრავალსაფეხურიანი უკუდინებით – რეპერკოლაცია პერიოდული ჩამოსხმით ჩულკოვის მიხედვით.

დინამიკურ პერიოდულ მეთოდებს განეკუთვნებიან: ერთსაფეხურიანი პერკოლაცია და მრავალსაფეხურიანი რეპერკოლაცია დასრულებული და დაუსრულებელი ციკლებით.

დინამიკურ მეთოდებს შორის გამოყოფენ უწყვეტ (ნედლეულის უწყვეტი მიწოდებით) პირდაპირი დინების (ექსტრაგენტი და ნედლეული ერთ ნაკადად) და უკუდინების (ექსტრაგენტი და მცენარეული ნედლეული გადაადგილდებიან შემხვედრი მიმართულებით) ხერხებს.

მოქმედი ნივთიერებების გამოსავალზე მოქმედებს ულტრაბგერის ინტენსივობა და ხანგრძლივობა, ექსტრაგენტის ტემპერატურა, ნედლეულისა და ექსტრაგენტის თანაფარდობა. ოპტიმალურ სიხშირედ მიღებულია 21-22 კჰც, დასხივების სიმკვრივედ – არაუმეტეს 2–2,2 ვტ/სმ<sup>2</sup>. მყარი ფაზის კონცენტრაცია – არაუმეტესი 10%, ანუ 1:10. ექსტრაქციის ხანგრძლივობა – 40წთ. მომეტებული ხანგრძლივობა ვერ გაზრდის მოქმედი ნივთიერებების გამოსავლიანობას, მათ სტაბილურობაზე კი უარყოფითად იმოქმედებს.

იმ ფაქტორებს შორის, რომლებსაც მივყავართ ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციასთან, წამყვანია ტემპერატურისა და წნევის ჩქაროსნული ცვლა. ამ პარამეტრების ცვლილებები მიიღწევა სხვადასხვა ფიზიკური და ელექტროფიზიკური ხერხით: იმპულსური მაგნიტური ველით (წნევა 0.11მპა), ნედლეულიან ექსტრაგენტზე ლაზერული სხივის თერმული და

მექანიკური მოქმედებით (წნევა 0,31მპა), აკუსტიკური გამოსხივებითა და იმპულსური ელექტროგანმუხტვით (წნევა 0,11მპა-მდე). ელექტროჰიდრაულიკური მეთოდის უპირატესობა სხვა ჩამოთვლილ მეთოდებთან შედარებით მდგომარეობს პროცესის მაღალ საიმედოობასა და აღწარმოებაში, ავტომატიზაციის შესაძლებლობაში.

### 1.2.2. ცენტრიდანული ექსტრაქცია

აღნიშნული ექსტრაქცია ხორციელდება მფილტრავი ცენტრიფუგით. ცენტრიდანული ძალების გავლენით უჯრედოვანი მასალიდან პირველადი წვენი გამოიყოფა და მის ადგილს იკავებს ახალი ექსტრაგენტი, რომელიც ასევე გამოიყოფა მასალიდან. ექსტრაგენტი ცირკულირდება გაჯერებამდე, შემდეგ კი იცვლება ახლით.

მეთოდი მნიშვნელოვნად აჩქარებს ექსტრაქციას. ის შემოთავაზებულია პროფ. ოლშევსკის მიერ (ვროცლავის სამედიცინო აკადემია, პოლონეთი).

### 1.2.3. წილადური მაცერაცია ანუ რემაცერაცია

ეს მოდიფიკაცია ითვალისწინებს ფაზების გაყოფის საზღვარზე კონცენტრაციათა სხვაობის ეპიზოდურ შეცვლას ექსტრაგენტის განახლების გზით. ამ დროს როგორც ექსტრაგენტი, ისე დაყენების დრო იყოფიან ულუფებად და პერიოდულად. ასე, მაგალითად, თუ ექსტრაქტი უნდა დამზადდეს ფარდობით მცენარეული ნედლეული: ექსტრაგენტი – 1:5, ხოლო ექსტრაქციის ხანგრძლივობაა 7 დღე-ღამე, მაშინ პირველი 4 დღე-ღამე ნედლეული ექსტრაჰირდება ექსტრაგენტის სამჯერადი მოცულობით. გამოწნევის შემდეგ ექსტრაქცია ხორციელდება სუფთა ექსტრაგენტის ერთჯერადი მოცულობით 2 დღე-ღამის განმავლობაში და, ბოლოს 1 დღე-ღამის განმავლობაში – დარჩენილი (ერთჯერადი მოცულობის)

ექსტრაგენტით. ჯამში ექსტრაქციის ხანგძლივობა შეადგენს 7 დღე-ღამეს, ხოლო ექსტრაგენტის რაოდენობა – 5 მოცულობას. თუ ექსტრაქტი მზადდება თანაფარდობით 1:10, მაშინ ზემოთმოყვანილი მოცულობები ორმაგდებიან, ანუ 6:2:2, რაც ჯამში 10-ს გვამღევს.

სტატიკური მრავალსაფეხურიანი მეთოდებიდან წარმოებაში ამჟამად იყენებენ ჩულკოვის მეთოდს – დაუსრულებელი ციკლის რემაკერაციას უკუდინებით.

#### 1.2.4. პერკოლაცია

დინამიკური მეთოდებიდან წარმოებაში გამოიყენება ერსაფეხურიანი პერიოდული ხერხი – პერკოლაცია.

პერკოლაცია წარმოადგენს სპეციალურ მოცულობებში ცრუ ფსკერით განხორციელებულ უწყვეტ ფილტრაციას – ექსტრაგენტის გაწურვას ნედლეულის შრეში.

პერკოლაცია მიმდინარეობს “სრული” გამოფიტვის მიღწევამდე, ანუ იქამდე, ვიდრე ნედლეულში არ დარჩება მოქმედი ნივთიერებების ისეთი რაოდენობა, რომლის გამოღებაც ეკონომიკურად არამიზანშეწონილია. ამიტომაც გამოფიტვას აფასებენ ვიზუალურად პერკოლიატის გაუფერულებით ან ხარისხობრივი რეაქციებით მოქმედ ნივთიერებებზე – ალკალოიდებზე, მჟავებზე, გლიკოზიდებზე და სხვა. ამის შემდეგ გამონაწვლილი განზავდება სუფთა ექსტრაგენტით თუ მისი მოცულობა იმაზე ნაკლებია ვიდრე საანგარიშო ან თუ მოქმედი ნივთიერებების შემცველობა სტანდარტულზე მეტია.

თუ გამონაწვლილის კონცენტრაცია ნორმაზე ნაკლებია, არავითარ შემთხვევაში არ შეიძლება მისი კონცენტრირება აორთქლებით. ასეთ შემთხვევაში განმეორებით კეთდება ანალოგიური ნაყენი მოქმედი ნივთიერებების გაზრდილი შემცველობით (აღნიშნული მიიღწევა უფრო ხარისხოვანი ნედლეულით, გამხსნელის შედარებით მცირე დოზით,

პერკოლაციის სიჩქარის შემცირებით და სხვა). მიღებული ნაყენი ერევა დაბალი კონცენტრაციის ნაყენს და დაიყვანება სტანდარტულამდე.

გალენური პრეპარატების წარმოებაში უფრო ფართოდ გამოიყენება რეპერკოლაციის პერიოდული მრავალსაფეხურიანი მეთოდები დასრულებული ან დაუსრულებელი ციკლით. ამ მეთოდის არსი დიფუზორების (პერკოლატების) ბატარეის გამოყენებაში მდგომარეობს. ამ დროს გამოწვლილი ერთი პერკოლატიდან გამოიყენება მეორე პერკოლატში ნედლეულის პერკოლაციისათვის და ა.შ. ამრიგად, ექსტრაგენტი, გაივლის რა პერკოლატების აღნიშნულ ბატარეას ნედლეულით, გაჯერებულია საჭირო რაოდენობის მოქმედი ნივთიერებებით.

ახალი ექსტრაგენტი ყოველთვის მიეწოდება ყველაზე გამოფიტულ ნედლეულიან ექსტრაქტორს, ხოლო გამოწვლილს ღებულობენ ნედლეულით ახლადჩატვირთული ექსტრაქტორიდან.

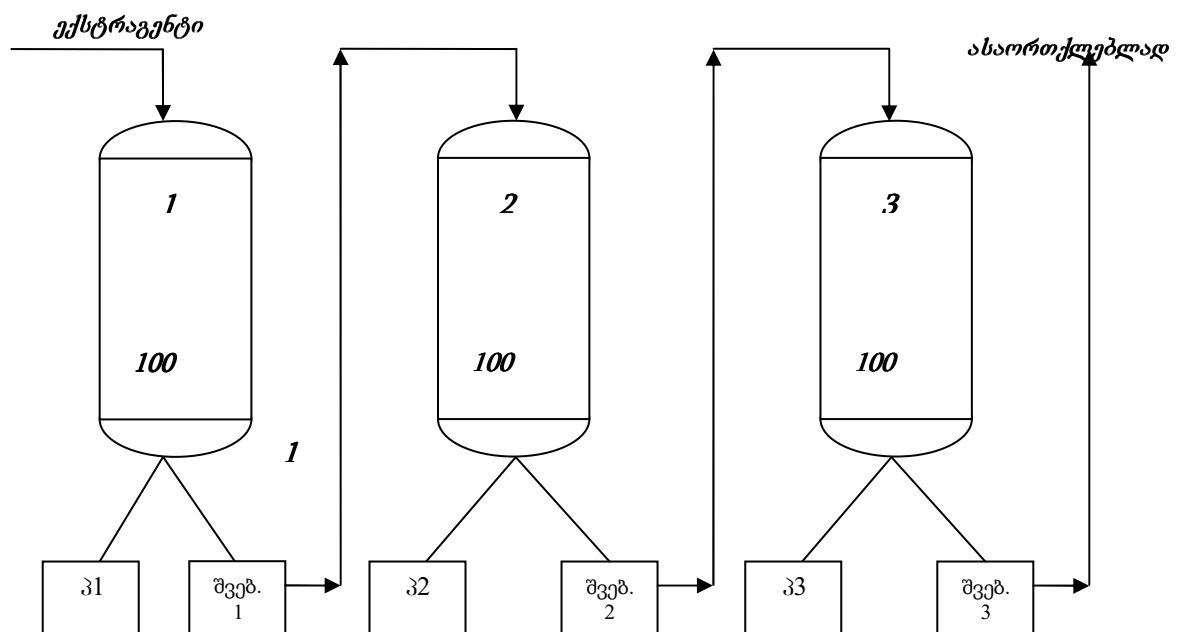
რეპერკოლაცია დასრულებული ციკლით თანაბარ ნაწილებად დაყოფილი ნედლეულით მიმდინარეობს პერკოლატების ბატარეაში. პერკოლატების რაოდენობა ბატარეაში დამოკიდებულია ნედლეულის მახასიათებლებზე. რაც უფრო ძნელად ექსტრაჰირდება ნედლეული, მით მეტი პერკოლატია საჭირო ბატარეაში.

დასრულებული ციკლით თანაბარ ნაწილებად დაყოფილი ნედლეულის რეპერკოლაციის სქემა ნაჩვენებია ნახ. 2-ზე.

ტოლ ნაწილებად დაყოფილი ნედლეული იტვირთება პერკოლატებში. 1 პერკოლატში ასვლებენ გაჯირჯვებისათვის 4-6 სთ., რის შემდეგ პერკოლატორში აწოდებენ ექსტრაგენტს ნიშნულამდე და აყოვნებენ 24 სთ. შემდგომ გამოიტანენ ექსტრაქტს ცალკე მოცულობაში და ღებულობენ მზა პროდუქციის 80%-ს (მ.კ. 1-80%) ამ პერკოლატში არსებული ნედლეულის მასასთან ფარდობაში.

პერკოლირებას აგრძელებენ ნედლეულის სრულ გამოფიტვამდე – ღებულობენ “1 შვებულს”, რომლითაც ახდენენ მცენარეული ნედლეულის

დასველებას, დაყენებას და პერკოლაციას მე-2 პერკოლატორში, საიდანაც ღებულობენ მზა პროდუქტს (მ.პ.2 – 100%) და “2 შვებულს”. ამ უკანასკნელით ხდება დასველება, დაყენება და პერკოლაცია მე-3 პერკოლატორში არსებული ნედლეულის, საიდანაც ღებულობენ მზა პროდუქტს (მ.პ.3 – 100%) და “3 შვებულს”. ასე მიმდინარეობს პროცესი ყოველი მომდევნო პერკოლირებისათვის, თუ მათი რაოდენობა სამზე მეტია. უკანასკნელი პერკოლატორის “შვებულს” აორთქლებენ მასში დანაკლისი მზა პროდუქტის 20%-მდე დასაყვანად. ამ წესით 300 კგ ნედლეულზე ღებულობენ თხევად ექსტრაქტს 300 ლ ანუ თანაფარდობით 1:1.



ნახ. 2. თანაბრად დანაწილებული ნედლეულის რეპერკოლაციის სქემა

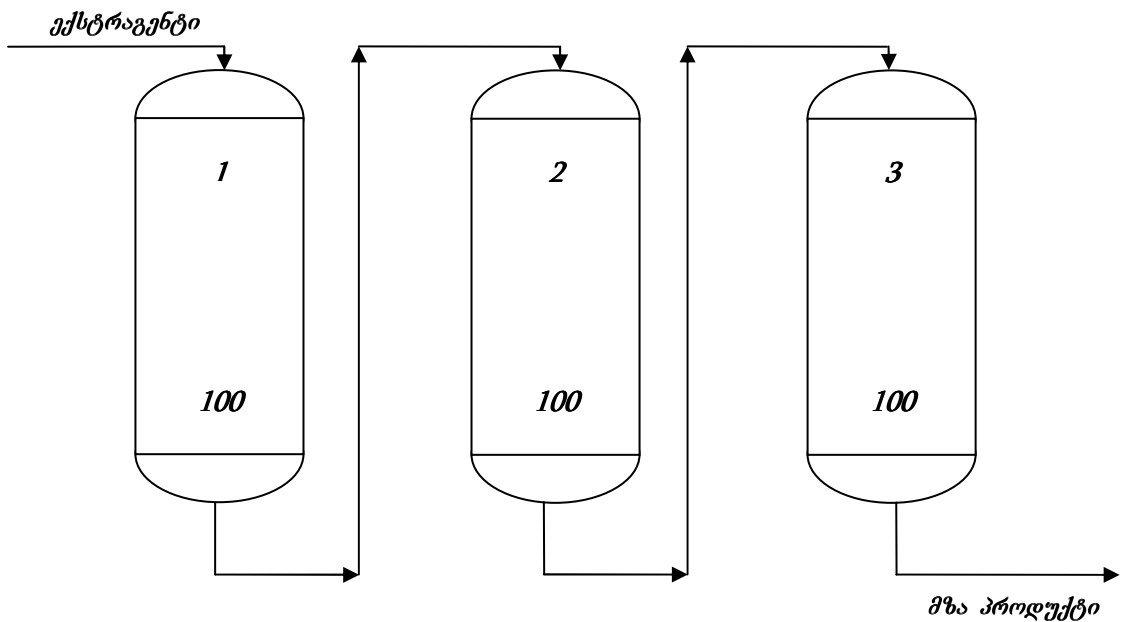
### 1.2.5. რეპერკოლაცია ბოსინის მიხედვით

ბოსინის მეთოდის მიხედვით ნედლეულს თანაბარი რაოდენობით ათავსებენ ბატარეის ყოველ პერკოლატორში (ნახ.3). ნედლეული 1 პერკოლატორში ექსტრაჰირდება სუფთა გამხსნელით, ხოლო შემდგომ პერკოლატორებში მიწოდება წინა პერკოლატორიდან “შვებული”.

პერკოლატორების რიცხვს ისე არჩევენ, რომ მზა პროდუქტის მასური რაოდენობა, მიღებული ბოლო პერკოლატორიდან იყოს ტოლი საექსტრაქციო ნედლეულის მთლიანი მასის, ანუ დაცული იყოს ფარდობა 1:1.

რეპერკოლაცია ნედლეულის დაყოფით არათანაბარ ნაწილებად

ამერიკის შეერთებული შტატებისა და გერმანიის ფარმაკოპეათი გათვალისწინებულია აღნიშნული მეთოდით რეპერკოლაცია. ამ დროს ნედლეულის საწყისი რაოდენობა მიღებულია 100%-ად და მას პერკოლატორების ბატარეაში ანაწილებენ ფართობით 5:3:2.



ნახ.3. რეპერკოლაციის სქემა ბოსინის მიხედვით

იწყებენ ნედლეულის მაქსიმალური ულუფიდან და მას ამუშავებენ სუფთა ექსტრაგენტით. პერკოლატს აგროვებენ ორჯერადად: მზა პროდუქტი 1 20%-ის ოდენობით ნედლეულის საერთო რაოდენობიდან და შვებული, რომელსაც იყენებენ მე-2 პერკოლატორში ნედლეულის გაჯირჯვების, დაყენებისა და პერკოლაციისათვის. მე-2 პერკოლატორიდან

ღებულობენ მზა პროდუქტს 2 რაოდენობით 30% ნედლეულის საწყისი რაოდენობიდან და შვებულს 2, რომელსაც იყენებენ მე-3 პერკოლატორისათვის. 1-ლი პერკოლატორიდან ღებულობენ 50% მზა პროდუქტს 3 ნედლეულის საწყისი რაოდენობიდან. სულ მიიღება  $20+30+50=100\%$  მზა პროდუქტი 100% საწყისი ნედლეულიდან, ანუ 1:1.

გერმანელი ფარმაკოპეის მიხედვით ნედლეული ნაწილდება სამ პერკოლატორში თანაფარდობით 5:3, 25:1,75 და პროცესი მიმდინარეობს აშშ-ს ფარმაკოპეის ანალოგიურად.

რეპერკლაცია ნედლეულის სხვადასხვა არათანაბარ ნაწილებად დაყოფით ამერიკული და გერმანული ფარმაკოპეების მიხედვით შესაძლებელია გამოყენებული იქნას მცირე წარმოებისათვის უმნიშვნელო რაოდენობის პროდუქციის მისაღებად, ვინაიდან ამ მოდიფიკაციებში ნედლეული მე-2 და მე-3 პერკოლატორებში არასრულად იფიტება. ყველაზე ნაკლებად კი ნედლეული გამოიფიტება მე-3 პერკოლატორში. აქ უნდა აღინიშნოს, რომ სწორედ რეპერკლაციის ეს მოდიფიკაციებია მისაღები საქართველოს პირობებისათვის, სადაც მცირე წარმოებები გამართლებულია ერთის მხრივ და, მეორეს მხრივ, მცენარეული სამკურნალო ნედლეულის პრობლემა პრაქტიკულად მეორეხარისხოვანია.

### 1.2.6. რეპერკლაცია ჩულკოვის მეთოდით

ამ შემთხვევაში ექსტრაჰირება მიმდინარეობს ოთხ ან მეტ პერკოლატორში. განასხვავებენ ორ პერიოდს: გასაშვებ პერიოდში ყოველდღიურად იტვირთება ერთი პერკოლატორი და მზა პროდუქტი არ გამოიტვირთება. თითოეულ პერკოლატორში თავსდება ტოლი რაოდენობის ნედლეული და ემატება ექსტრაგენტის ტოლი რაოდენობა. პირველ ექსტრაქტორს ემატება სუფთა ექსტრაგენტი, დანარჩენებს – გამონაწვლილი წინა ექსტრაქტორებიდან. გაჯირჯვებულ ნედლეულს ათავსებენ პირველ პერკოლატორში, ამატებენ ექსტრაგენტს ნიშნულამდე

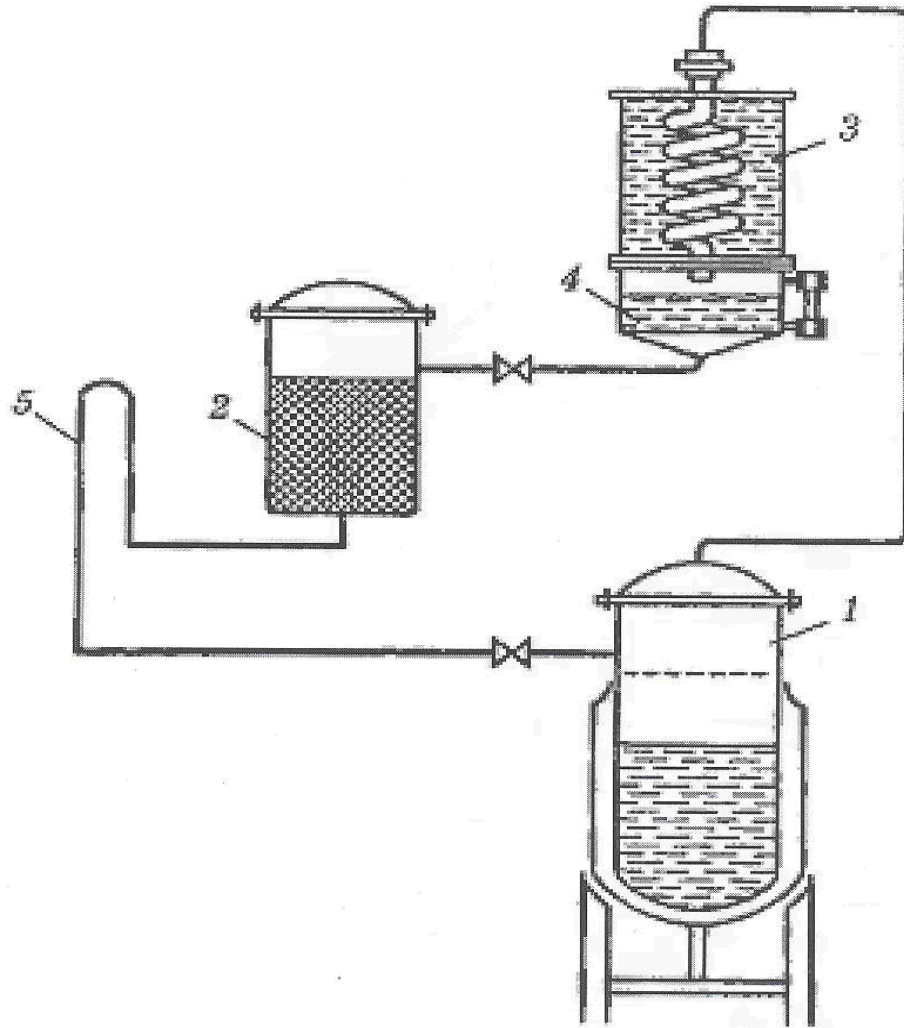


(სარკემდე) და აყოვნებენ 24 სთ განმავლობაში. მეორე დღეს პირველი პერკოლატორიდან ჩამოასხამენ გამონაწვლილს ორ ულუფად: პირველი ულუფა, რომელიც პერკოლატორში ჩატვირთული ნედლეულის მასის ტოლია, გამოიყენება ნედლეულის დასასველებლად მეორე პერკოლატორში და მეორე ულუფა – ნედლეულის მასის ორმაგი მოცულობით, გამოიყენება მეორე პერკოლატორში ნედლეულზე დაყენებისათვის. ამ დროს პირველ პერკოლატორს აწოდებენ სუფთა ექსტრაგენტს საერთო გამონაწვლილის რაოდენობით. შემდეგ დღეს მეორე პერკოლატორიდან იღებენ ორ ულუფად გამონაწვლილს მესამე პერკოლატორის ნედლეულთან სამუშაოდ. მეორე პერკოლატორს უმატებენ გამონაწვლილს პირველი პერკოლატორიდან, ხოლო ამ უკანასკნელში ისევ უმატებენ ახალ ექსტრაგენტს. შემდგომში პროცესი მიმდინარეობს ანალოგიურად. უკანასკნელი ექსტრაქტორის დატვირთვიდან ერთი დღე-ღამის შემდეგ იწყება მუშა პერიოდი. ამ დროს უკანასკნელი პერკოლატორიდან უშვებენ მზა პროდუქტის პირველ პორციას, რომელიც ამ პერკოლატორში ჩატვირთული ნედლეულის მასის ტოლია. იმავდროულად, პირველი პერკოლატორიდან გამოაქვთ მთელი გამონაწვლილი.

მრავალტონაჟიანი წარმოების პირობებში გამოიყენება უკუდინებით ექსტრაქციის მეთოდი პერკოლატორების (დიფუზორების) გაზრდილი რაოდენობით.

### 1.2.7. ცირკულაციური ექსტრაქცია.

მეთოდი დაფუძნებულია ექსტრაგენტის ცირკულაციაზე. საექსტრაქციო დანადგარი მუშაობს უწყვეტად და ავტომატურად სოქსლეტის აპარატის პრინციპით. ის შედგება ურთიერთშორის კომუნიცირებული 1 გადამდენი კუბისაგან, 2 ექსტრაქტორისაგან, 3 მაცივარ-კონდენსატორისაგან, 4 კონდენსატის შემკრებისაგან (ნახ.4).



ნახ.4. სოკსლეტის ტიპის ცირკულაციური აპარატის პრინციპული სქემა

მეთოდის არსი მდგომარეობს მასალის მრავალჯერად ექსტრაქციაში სუფთა ექსტრაგენტით. ექსტრაგენტად გამოიყენება აქროლადი ორგანული გამხსნელები, რომლებსაც აქვთ დუდილის დაბალი ტემპერატურა. ესენია, ქლოროფორმი, ეთერი, ქლოროვანი მეთილენი ან მათი ნარევი. ეთილის სპირტი, 96%-იანიც კი, ამ მიზნისათვის გამოუსადეგარია, ვინაიდან ის ადსორბირდება ნედლეულში არსებულ ტენთან და შეიცვლის თავის

კონცენტრაციას, რაც გამოიწვევს დუღილის ტემპერატურისა და შესაბამისად, ექსტრაქციის უნარის შეცვლას.

ნედლეული იტვირთება 2 ექსტრაქტორში და ესხმება ექსტრაგენტი 5 სიფონური მილის კვანძიდან მცირე მანძილამდე. ამავდროულად 1 კუბში ასხამენ ექსტრაგენტის მცირე რაოდენობას. დაყენების დამთავრების შემდეგ შემკრებიდან ჩაუშვებენ ექსტრაქტორში იმდენ ექსტრაგენტს, რომ გამონაწვლილმა მიაღწიოს სიფონის კვანძის ზედა დონეს და კუბში გადადენის საწყისს. შემდგომ კუბს შეათბობენ. ექსტრაგენტის წარმოქმნილი ორთქლი მიემართება კონდენსატორში, იქიდან კი – შემკრებში. შემდგომ ექსტრაგენტი მიემართება ნედლეულზე. გაჯერებული გამონაწვლილი კვლავ ჩაედინება კუბში. ექსტრაგენტის ცირკულაცია წარმოებს მრავალჯერადად ნედლეულის სრულ გამოფიტვამდე. მიღებულ გამონაწვლილს აკონცენტრირებენ გამხსნელის გამოხდით და გადადენით კუბში. კუბში რჩება ექსტრაქტული ნივთიერებების კონცენტრირებული ხსნარი.

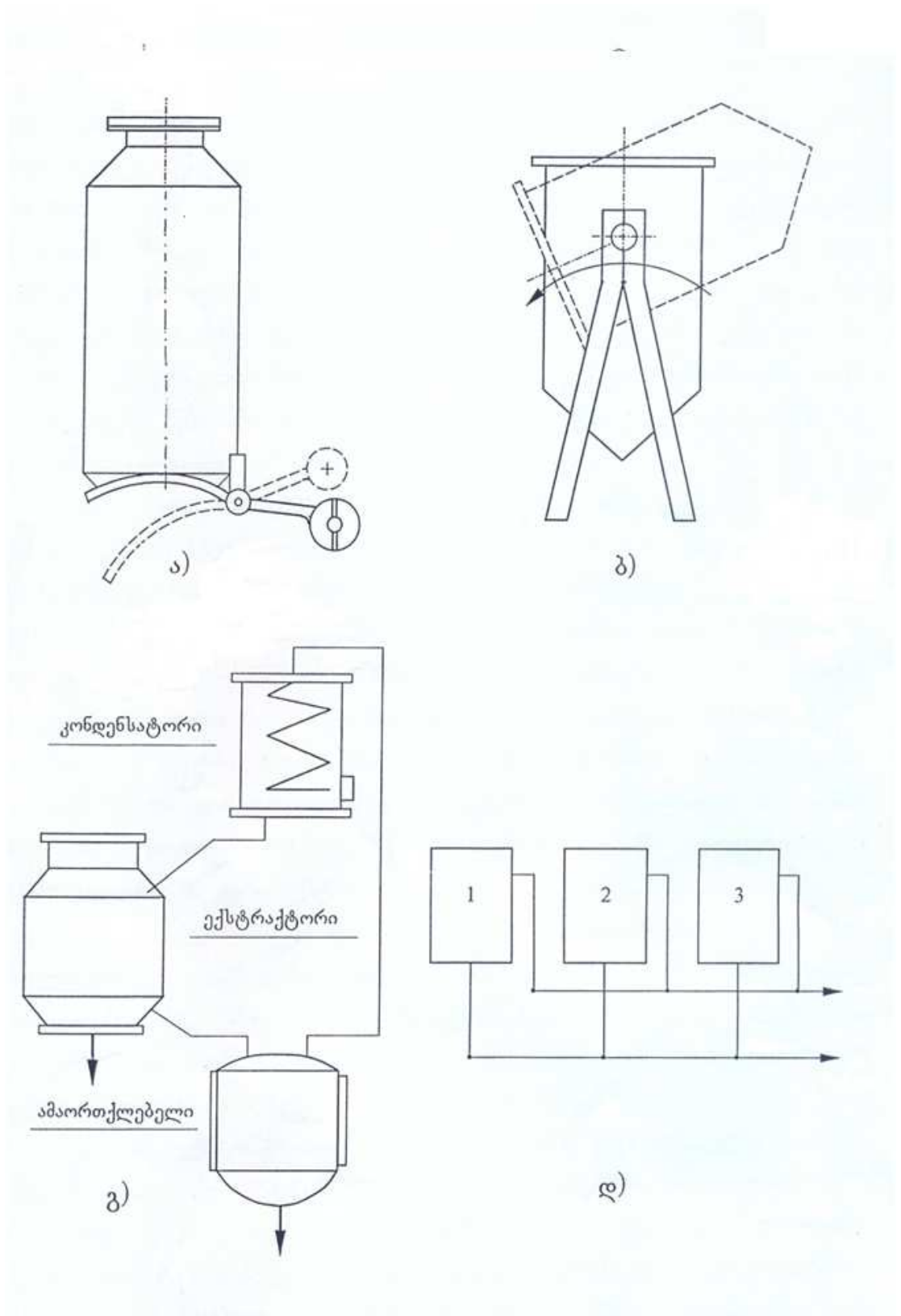
### **1.2.8 მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციისა და საექსტრაქციო ტექნიკის ზოგადი მიმოხილვა**

ექსტრაქცია, ისევე როგორც დისტილაცია, ადსორბცია, კრისტალიზაცია და სხვა, წარმოადგენს დაყოფის ფიზიკურ მეთოდს. ამ მეთოდის მახასიათებელი ნიშანთვისებაა ის რომ დასაყოფი კომპონენტები ქიმიურ ცვლილებებს არ განიცდიან. ექსტრაქციის პროცესი დიფუზიის კანონებით მიმდინარეობს. ეს პროცესი ნარევის ტემპერატურის გაზრდით ჩქარდება. შესაძლებელია ნარევის წინასწარი გათბობა, საექსტრაქციო ნედლეულის წინასწარ გათბობა დასაშვებ ფარგლებში, ან გათბობა მოხდეს საკუთრივ ექსტრაქციის პოცესში. თუ გამხსნელის სიჩქარე საექსტრაქციო მასაში დიდია, საჭირო ხდება მისი მრავალჯერადი გატარება შედარებით სრული ექსტრაქციის მისაღწევად.

ჩაის ნედლეულიდან ბიოლოგიურად აქტიური ნაერთების კომპლექსური წარმოების დროს ფასეული პროდუქტების – ლიპიდების ფრაქციისა და P ვიტამინის აქტიური კონცენტრატის – ექსტრაქციების ძირითადი მიზანია ორივე შემთხვევაში შესაძლო მაქსიმალური გამოსავლის მიღება პირველ შემთხვევაში ორგანული გამხსნელით, ხოლო მეორეში – წყლით. ამის გარდა, არ წარმოადგენს საჭიროებას ლიპიდების შემადგენელ კომპონენტებად დაყოფა და პროცესის გამარტივების მიზნით მიზანშეწონილია ექსტრაქცია ვაწარმოოთ ერთი გამხსნელით.

მცენარეული წარმოშობის ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებებისა და კონცენტრატების მწარმოებელი კვების, ფარმაცევტული და საპარფიუმერო-კოსმეტიკური საწარმოები ხასიათდებიან პროდუქციის მრავალფეროვნებით. თითქმის ყველგან გამოიყენება პერიოდული ქმედების მანქანა-აპარატები – ექსტრაქტორები. ისინი, ჩვეულებრივ, ცილინდრული ფორმის არიან და აქვთ ასაკეცი ფსკერი შროტის გამოსატვირთად (ნახ.5,ა) ხშირად გამოიყენებენ გადასაყირავებელ დიფუზორებს (ნახ.5,ბ) უფრო ხშირად კი დიფუზორის, კონდენსატორისა და ამორთქლებლის ჩაკეტილ სისტემას (ნახ.5,გ) ან დიფუზორების ბატარეას (ნახ.5,დ). მათი მოქმედების პრინციპი ახსნის გარეშეც ნათელია.

თუ თვალს გადავავლებთ საქართველოს შესაბამის საწარმოებში საექსტრაქციო ტექნიკის თანამედროვე მდგომარეობას შეიძლება მივიღეთ შემდეგ დასკვნებამდე: უწყვეტი ქმედების მეთოდები და აპარატურა პრაქტიკულად არ გამოიყენება; პერიოდული მეთოდით ექსტრაქციის შემთხვევაში აპარატურებში ვერ ხერხდება ექსტრაქციის მაღალი სიჩქარეების უზრუნველყოფა; საექსტრაქციო აპარატურის დიდი უმრავლესობა კუსტარულად, ემპირიულად არის დამზადებული და არ არის გათვალისწინებული საქსტრაციო ნედლეულის თავისებურებები.



ნახ. 5 საექსტრაქციო დანადგარის ტიპიური სქემები:  
 ა) მოძრავი ფსკერით; ბ) გადასაყირავებელი ჭურჭლით  
 გ) დიფუზიური ამორთქლებლით; დ) დიფუზორების ბატარეა

ორგანული გამხსნელებით საექსტრაქციო ტექნიკამ განსაკუთრებით დიდი განვითარება ჰპოვა მცენარეული ზეთების საწარმოებში, სადაც დანერგილია სხვადასხვა ტიპის უწყვეტი ქმედების ექსტრაქტორების სხვადასხვა კონსტრუქციები. აქვე პერიოდული ქმედების ექსტრაქტორები ყოველთვის გაერთიანებული არიან ბატარეებად მაღალი მექანიზაციის დონით [28].

განვიხილოთ უწყვეტი ქმედების ყველაზე გავრცელებული ტიპის ექსტრაქტორები მათი ჩაის ცხიმხსნადი ფრაქციის გამოსაყოფად გამოყენების თვალსაზრისით. საერთოდ, უწყვეტი ქმედების ექსტრაქტორად შესაძლებელია გამოვიყენოთ ნებისმიერი ჭურჭელი, რომელშიც ერთი მიმართულებით გადაადგილდება მცენარეული ნედლეული, ხოლო საწინააღმდეგო მიმართულებით მიეწოდება ექსტრაგენტი. მაგრამ ამ დროს ჭურჭლის მუშა სიგრძეზე უნდა იყოს კონცენტრაციის გრადიენტის დიდი მნიშვნელობა, მცენარეული ნაწილაკები კარგად იბანებოდნენ გამხსნელით, სატრანსპორტი სისტემა საიმედოდ უნდა მუშაობდეს. ეს უკანასკნელი მოთხოვნა მეტად მნიშვნელოვანია, ვინაიდან ჩაის ნედლეულს გააჩნია დაწნევისა და გუნდების წარმოქმნის თავისებურება, რაც წინააღმდეგობას უწევს ნაწილაკებზე გამხსნელის თანაბრად მოხვედრას. და ბოლოს, ცხიმხსნადი ფრაქციის ჩაიდან ექსტრაჰირება ორგანული გამხსნელით უნდა წარმოებდეს. შესაბამისად, ექსტრაქტორის კონსტრუქცია ჰერმეტიული და გამხსნელისადმი მედეგი იყოს.

## 2. მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის თეორიული წინაპირობები

### 2.1. ფოროვანი ნაწილაკებიდან დიფუზიურ-კონვექტიურ რეჟიმში ექსტრაქციის მოდელები

ინტენსიური ჰიდროდინამიკური რეჟიმის აპარატებში (სწრაფი ამრევით, პულსაციური, ვიბრაციული, ულტრაბგერითი დამუშავებით, ელექტრონული მუხტით, ვაკუუმური დუდილით და სხვა) მსხვილ კაპილარებში ხდება ექსტრაგენტის ფილტრაცია, ნედლეულის გაწურვის გამო, ნაწილაკების ურთიერთშეჯახებით, სისტემაში წნევის პერიოდული ცვლილებით, ექსტრაგენტის ინტენსიური დუდილით და სხვა.

მრავალ კვლევებში კონვექტიური მასათაგადაცემა დიფუზიურ მოდელებში გათვალისწინებულია ეფექტური დიფუზიის კოეფიციენტის შეტანა [16, 26].

გამონაკლისებს წარმოადგენს ნაშრომები სადაც ერთიანად გათვალისწინებულია გამოსაწვლილი ნივთიერების დიფუზია გამოსაწვლილი ნივთიერების მსხვილი ფორების ფოროვანი ნაწილის სიღრმიდან და ამ ფორებიდან ნაწილაკის ზედაპირზე კონვექტიური გადატანა [50, 51, 85].

აქტიური ჰიდროდინამიკური მოქმედების აპარატებში ფოროვანი ნაწილაკებზე ექსტრაქციის პროცესი მიმდინარეობს სამ ეტაპად. პირველ ეტაპზე კაპილარული ძალების მოქმედებით ექსტრაგენტი აღწევს მსხვილ ფორებში და ხსნის ამ ფორებში არსებულ გამოსაწვლილ კომპონენტს. პროცესისი სიჩქარე შეზრუდულია ფორებიდან ხსნარის ფილტრაციული გამოწურვით ექსტრაგენტში ნაწილაკების არსებობით. შემდგომში ამ სტადიას მოვიხსენიებთ როგორც ჰიდრავლიკური. მეორე კი არის დიფუზიურ კონვექტიური სტადია – მიზნობრივი კომპონენტის დიფუზიის სიჩქარე სატრანსპორტო ფორებში და ფორებიდან ხსნარის მოცილება

შეჯერებულია. ფორებიან სხეულში ასეთი პროცესის კანონზომიერების გამოსაკვლევად ბიდისპერსიული სტრუქტურისათვის მიძღვნილია [50, 51].

მესამე – დიფუზიური სტადიის პროცესის სიჩქარე შეზღუდულია მოლეკულური დიფუზიის სიჩქარით, მიზნობრივი კომპონენტის ფოროვანი ნაწილის სიღრმიდან მის ზედაპირზე და სატრანსპორტო ფორებით.

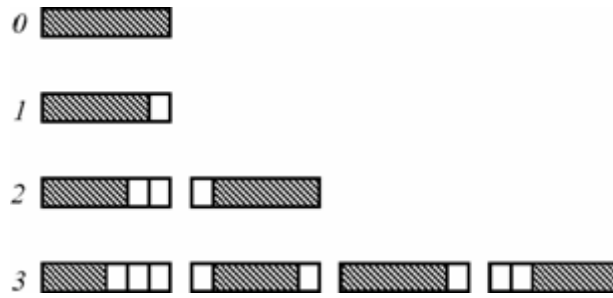
შეგნიშნოთ, რომ ექსტრაჰირების პროცესის დასაკვირვებელი კინეტიკური კანონზომიერებები, განსაკუთრებით დიფუზიური რეჟიმის მიმდინარეობისას, ფორმალურად გავს კინეტიკური კანონზომიერების პროცესს, რომელიც მიმდინარეობს აპარატში ფოროვან ნაწილაკებზე ინტენსიური ჰიდროდინამიკური ზემოქმედებით. ერთი და იგივე გამოსავლიანობის დროის მისაღწევად დიფუზიური რეჟიმით ექსტრაჰირებისას ექსტრაქტის გამოსავალი უფრო მეტია ვიდრე ფოროვან ნაწილაკებზე კონვექციური მასათაგადაცემით.

ქვემოთ მოყვანილია ჰიდრავლიკური და დიფუზიური სტადიის მოდელები, რომელთა შესწავლა განსაკუთრებით საჭიროა პრაქტიკული მიზნებისათვის.

განვიხილოთ ერთეულოვანი ფორა, გამჭოლი ნაწილაკით და შევსებული ხსნარით, რემელსაც შეიცავს მიზნობრივი კომპონენტი. ნახ. 6.0\_ზე მიზნობრივი კომპონენტის არსებობა მოცემულია შტრიხებით. ფორების სათავეები გამოდიან ნაწილაკების ზედაპირზე და ეხებიან ექსტრაგენტს, რომლებიც არ შეიცავენ მოიზნობრივ კომპონენტს.

პირველი ერთჯერადი წნევის იმპილსის მოქმედებისას (მაგალითად ფორის ნაპირზე კავიტაციური ბუშტის გასკდომით) სითხე ჩაიწნეხება მასში, რის შედეგადაც მიზნობრივ კომპონენტს მოცილდება მისი ტოლი ექსტრაგენტის მოცულობა (ნახ-ზე 6.1 ფორის ნაწილია, სადაც არ არის მიზნობრივი კომპონენტი, არაა დაშტრიხული).





ნახ. 6 ექსტრაგენტის გადაადგილება ფორებში  
წნევის იმპულსის მოქმედებით

შემდგომისათვის ჩავთვალოთ, რომ წნევის იმპულსები ერთნაირია და ტოლია წნევის იმპულსის საშუალო სტატისტიკური მნიშვნელობის. მათი წარმოშობის ალბათობა როგორც მარჯვენა ისე მარცხენა ფორის ნაპირისათვის ერთნაირია და იმპულსები განაწილებულია დროის მიხედვით.

მეორე იმპულსი შეიძლება წარმოიშვას ფორის როგორც მარცხენა ისე მარჯვენა ნახვრეტში, ამიტომ შეიძლება ფორის 2 ვარიანტი არსებობდეს (ნახ 6.2). პირველით გამოიდევენება მიზნობრივი კომპონენტიდან ექსტრაგენტის მოცულობა, მეორე იმპულსით კი არაფერი არ გამოიდევენება, ექსტრაგენტი გადაადგილდება ფორებში. ე.ი. ერთი იმპულსის მიერ გამოტანილი ნივთიერების რაოდენობა შეადგენს  $\epsilon/2$ .

შემდეგი მესამე წნევის იმპულსის მოქმედებისას შესაძლებელია ფორისათვის 4 ვარიანტის განხილვა (ნახ 6.3). ე.ი. საშუალოდ წნევის ერთი იმპულსის მოქმედებისას მიზნობრივი კომპონენტიდან გამოიყოფა  $\epsilon/2$  სითხე.

კაპილარის მდგომარეობა შემდგომი მოქმედებისას გვიჩვენებს, რომ  $m$  და  $(m + 1)$  ეტაპზე  $(m - 2)$  მიზნობრივი კომპონენტიდან გამოიყოფა ექსტრაგენტის ერთი და იგივე რაოდენობა, ამიტომ საერთო ფორმულის გამოსაყვანად მიზანშეწონილია დავნომროთ წყვილები (2,3), (4,5), (6,7) ... შესაბამისად  $n = 1, 2, 3, \dots$  მნიშვნელობით შეიძლება დავითვალოთ, რომ

მიზნობრივი კომპონენტიდან წნევის ერთი იმპულსით გამოყოფილი ექსტრაგენტის მოცულობა  $m$  მდგომარეობაში ტოლია  $V(m)$ , და აქვს შემდეგი მნიშვნელობა:

$$n=1: \quad \frac{V(2,3)}{\varepsilon} = \frac{1}{2};$$

$$n=2: \quad \frac{V(4,5)}{\varepsilon} = \frac{3}{8};$$

$$n=3: \quad \frac{V(6,7)}{\varepsilon} = \frac{5}{16};$$

$$n=4: \quad \frac{V(8,9)}{\varepsilon} = \frac{35}{128}.$$

მოცემული თანმიმდევრობა გაერთიანდება ფორმულით:

$$\frac{V(m, m=1)}{\varepsilon} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(n+0,5)}{\Gamma(n+1)}, \quad (1)$$

სადაც  $\Gamma$  –გამა ფუნქციაა;  $n$  – ფორის ნომერი

მიზნობრივი კომპონენტიდან  $n$ -ური წყვილის მოქმედების შემდეგ გამოყოფილი ექსტრაგენტის რაოდენობა ორჯერ მეტია, ამიტომ (1)-დან მივიღებთ

$$V(n/\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(n+0,5)}{\Gamma(n+1)}. \quad (2)$$

მიზნობრივი კომპონენტიდან ექსტრაგენტის საერთო მოცულობა, რომელიც გამოიყოფა პირველი და მომდევნო  $N$  წყვილი წნევის იმპულსით  $Q(N)$  მიიღება (2)გამოსახულების შეჯამებით.

$$\frac{Q(n)}{\varepsilon} = 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^n \frac{\Gamma(n+0,5)}{\Gamma(n+1)} \quad (3)$$

(3) ფორმულა აღსანიშნავია იმით, რომ დამოკიდებულება სისტემის მახასიათებლების (ფორების ზომები, ექსტრაგენტის სიბლანტე და ა.შ.) და მოქმედების მახასიათებლებს (წნევის იმპულსის ინტენსივობა) შორის ჩართულია ერთადერთი პარამეტრი, ხოლო მიზნობრივი კომპონენტიდან გამოყოფილი ექსტრაგენტის ფარდობითი რაოდენობა განისაზღვრება ალგებრული გამოსახულებით.

ამაში მდგომარეობს ამ მოდელის ზოგიერთი უპირატესობა დიფუზიურთან შედარებით, თუმცა დამოკიდებულების საერთო ხასიათი იგივეა.

უნდა შევთანხმდეთ, რომ გაკეთებული დასკვნები გულისხმოს უსასრულო სიგრძის ფორმებს, ამიტომ რეალურ პირობებში (1)-(3) ფორმულები სწორია იმ მომენტამდე სანამ მოცულობა Q არ აღემატება კაპილარის მოცულობას:

$$Q(N) < \frac{\pi d^2 l}{4} \quad (4)$$

სადაც l – კაპილარის სიგრძეა; d – მისი დიამეტრი.

(4) გამოსახულება გადავიყვანოთ ისეთ ფორმაში, რომელიც მოსახერხებელი იყოს პრაქტიკული გამოყენებისათვის, მივიღოთ მხედველობაში რომ რიცხვი N საკმარისად დიდია. ასე რომ ჯამი შევცვალოთ ინტეგრირებით:

$$\frac{Q(N)}{\varepsilon} \approx 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_1^N \frac{\Gamma(z+0,5)}{\Gamma(z+1)} dz, N \gg 1. \quad (5)$$

გამოვიყენოთ მიახლოებითი გამოსახულება გამა ფუნქციისათვის [86]:

$$\Gamma(z+1) \approx \sqrt{2\pi z^{z+1/2}} \exp\left(-z + \frac{\delta}{12z}\right),$$

$$z > 0, 0 < \delta < 1, z \rightarrow \infty$$

უგულებელყოთ მამრავლი  $\frac{\delta}{12z}$ , და გადავწეროთ (5) შემდეგნაირად:

$$\frac{Q(N)}{\varepsilon} \approx 1 + 2\sqrt{\frac{e}{\pi}} \int_1^N \frac{(z+0,5)^z}{z^{z+1/2}} dz \approx 1 + 2\sqrt{\frac{e}{\pi}} \int_1^N \frac{\exp\{z[\ln z + \ln(1-1/2z)]\}}{\exp[(z+1/2)\ln z]} dz.$$

შემდეგ დავუშვათ  $\ln[1-1/(2z)] \approx -\frac{1}{2z}$  და მივიღებთ

$$\frac{Q(N)}{\varepsilon} \approx 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_1^N \frac{dz}{\sqrt{z}} \approx 1 + \frac{4}{\sqrt{\pi}} (\sqrt{N} - 1) \approx \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{N}, \quad (6)$$

სადაც  $N \gg 1$ .

პრაქტიკაში ხშირად გვხვდება, რომ წყვილი წნევის იმპულსების რაოდენობა მცირეა, ამიტომ (6) ფორმულა მიუღებელია. ძირითადი ცდომილება წარმოიშობა მაშინ როცა ჯამს (6) ვცვლით ინტეგრირებით (5).

მცირე  $n$  რიცხვისათვის დამოკიდებულება (2) კარგად მიუახლოვდება ხარისხობრივი ფუნქციით:

$$\frac{V(n)}{\varepsilon} = An^{-a}, \quad (7)$$

სადაც  $1 \leq n \leq 10$  სათვის გვაქვს  $A = 0,505$ ,  $a = 0,466$ ; როცა  $n \approx 1000$ ,  $\alpha \approx 0,5$ .

(7) ფორმულით  $\frac{V(n)}{\varepsilon}$  საშუალო კვადრატული გადახრა (2) ფორმულიდან შეადგენს  $s^2 = 1,21 \cdot 10^{-5}$ .

(3) ფორმულის აპროქსიმაცია საკმარისი სიზუსტით გამოისახება.

$$\frac{Q(N)}{\varepsilon} = 1 + \sum_{n=1}^N \frac{V(n)}{\varepsilon} + \frac{A(n^{1-\alpha} - S^{1-\alpha})}{1-\alpha} \quad (8)$$

$N=100$  სათვის კოეფიციენტებს აქვს შემდეგი მნიშვნელობა:  $S = 3$ ,

$A = 0,505$ ,  $a = 0,466$  და განსხვავება  $\frac{Q(N)}{\varepsilon}$  -სა და (6) და (8) გამოთვლილ მნიშვნელობისაგან არ განსხვავდება 2 %-ით.

$$\frac{Q(N)}{\varepsilon} = 1 + B_1 N^b \quad \text{და} \quad \frac{Q(N)}{\varepsilon} = B_2 N$$

ტიპის ხარისხობრივი ფუნქციის გამოყენებით  $1 \leq N \leq 100$  ვგაძლევს საშუალო კვადრატულ შეცდომას, რომელიც ტოლია  $s^2 = (0,57,3) \cdot 10^{-3}$ , რის გამოც  $N$  მნიშვნელობის ზრდით აპროქსიმაციის შეცდომა იზრდება. მასთან ერთად  $b \approx 0,5$ , როცა  $N \approx 10\,000$ .

წყვილი დარტყმების რიცხვი  $n$  წარმოადგენს დროის შემთხვევით ფუნქციას. ექსტრაჰირების სტაციონარულ რეჟიმში  $n$ -ის საშუალო მნიშვნელობა (ავლნიშნოთ  $\langle n \rangle$ ) პროპორციული პროცესის ხანგრძლივობის:

$$\langle n \rangle \sim \tau. \quad (9)$$

დამოკიდებულება  $\frac{V(n)}{\varepsilon}$  არსებითად წარმოადგენს ექსტრაგენტის  $\frac{V(\tau)}{\varepsilon_B}$  ფორიდან მოცილების სიჩქარეს  $\tau$  დროის მომენტში შესაბამისად  $\langle n \rangle$ . ზემოთქმულიდან გამომდინარეობს რომ

$$\frac{V(\tau)}{\varepsilon} \sim \frac{1}{\sqrt{\tau}}. \quad (10)$$

ექსტრაჰირების დიფუზიური თეორიით [5] დადგენილია, გახსნილი ნივთიერებების  $q$  ნაკადი ერთი კაპილარიდან და ნახევრად შეზღუდული ფორისებური სხეულიდან დამოკიდებულება გამოითვლება ანალოგიურად (10):

$$q(\tau) \sim \frac{1}{\sqrt{\tau}} \quad (11)$$

ერთგვარად გამოსახულებაში პროპორციულობის კოეფიციენტი განისაზღვრება ჰიდროდინამიკური პროცესების წარმოების პირობებით, ხოლო (11) – მოლეკულური დიფუზიის კოეფიციენტებით  $V_{II}$  ფორის მოცულობის გატოლების გატოლებით მიზნობრივი კომპონენტიდან ექსტრაგენტის მოცულობასთან, რომელიც გამოდევნილია ფორებიდან (6), შეიძლება განვსაზღვროთ წყვილ დარტყმათა რიცხვი  $N^*$ , რომელიც უზრუნველყოფს ექსტრაგენტის მთლიანად შეცვლას ახლით, მიმდინარეს სითხის ძირითად მოცულობაში.

$$N^* \approx \frac{\pi V_{\Pi}}{16 \varepsilon^2} . \quad (12)$$

სხვაგვარად რომ ვთქვათ, ექსტრაჰირების ხანგრძლივობა ( $t \sim N^*$ ) ექსტრაგენტის მთლიანად შეცვლამდე უკუპროპორციულია  $\varepsilon^2$ -ის:

$$t \sim \frac{1}{\varepsilon^2} . \quad (13)$$

ინტენსიური ექსტრაჰირებისას  $\left( \frac{\varepsilon}{V_{\Pi}} = 0,010,25, N7840 \right)$  განუახლებელი ნაწილის (ახალი ჩაუნაცვლებელი) დამოკიდებულება  $w$  ფორმებში ექსტრაგენტის  $Q = \frac{n}{N}$  განუსაზღვრელი დროით მოსახერხებელია ფუნქციის აპროქსიმაცია.

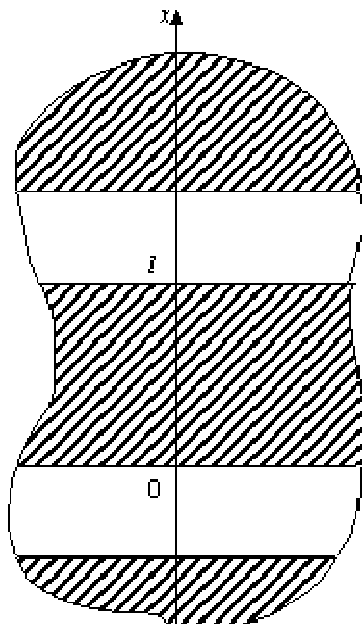
$$w = Q^K \quad (14)$$

ხარისხის მაჩვენებელი  $K=0,4680,492$   $\left( \frac{\varepsilon}{V_{\Pi}} = 0,010,25, N7840 \right)$ -თვის,  $k \rightarrow 0,5$ , როცა  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

## 2.2. დიფუზიური სტადიის მათემატიკური მოდელი

დიფუზიურ-კონვექტიური სტადიის დამთავრების შემდეგ დავუშვათ, რომ მიზნობრივი კომპონენტის შემადგენლობა მატრანსპორტირებელ ფორმებში ნულთან ახლოსაა. მესამე საფეხურზე მიმდინარეობს დიფუზიური პროცესი, რომელიც უკავშირდება ფორმებში ექსტრაგენტის ფილტრაციულ მოძრაობას. ასეთი პროცესის მოდელი დიფუზიის ამოცანის ამოხსნისას ბუნებრივია ავიღოთ უსასრულოდ დანაწევრებული მრგვალი, ცილინდრული სხეულის მაგალითზე. ამ ამოცანის ამოხსნა სფერული სხეულისათვის საკმაოდ დიდი მოცულობისაა [87].

ამიტომ შევცვალოთ რეალური არე მოდელით, რომელიც შედგება მყარი სხეულის თანმიმდევრული ბრტყელი ფენებით და ბრტყელი ფორებით ნახ. 7.



ნახ. 7. მყარ სხეულის და ბრტყელ ფორებში ფენების განაწილების მოდელი

$l$ -საშუალო დაცილებაა ბრტყელ ფორებს შორის.

დიფუზიური ამოცანის ამოხსნა ბრტყელი ფენისათვის (ცილინდრულისაგან განსხვავებით) შედარებით მარტივია [87].

დავუშვათ  $t=0$  მომენტისათვის გამოსაწვლილი ნივთიერების კონცენტრაცია ფენაში არ არის დამოკიდებული  $x$  ღერძის კოორდინატზე და იგი ტოლია  $C_0$ , ხოლო საზღვრებზე კონცენტრაცია ( $x=0, x=l$ ) ტოლია 0-ის. მაშინ ლოკალური დიფუზიური ნაკადი საზღვარზე როცა  $x=0$  გამოისახება გამოსახულებით

$$-D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{4D}{l} C_0 \sum_{n=0}^{\infty} \exp \left[ \frac{-4\pi^2 D}{l^2} (n+0,5)^2 t \right] \quad (15)$$

სადაც  $D$  – დიფუზიის კოეფიციენტი.

ხარისხობრივი შეფასება გვიჩვენებს, რომ გამოსაწვლილი ნივთიერებების ძირითადი რაოდენობა ტოვებს ფენას  $t$ -ს საკმაოდ დიდი მნიშვნელობისთვის. ამიტომ (15) გამოსახულებაში შეიძლება შევინახოთ მხოლოდ პირველი შესაკრები  $n=0$ . მივიღებთ მიახლოებით გამოსახულებას.

$$-D \frac{\partial c}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{4D}{l} C_0 \exp\left[-\frac{\pi^2 D}{l^2} t\right] \quad (16)$$

რომ მოვძებნოთ მთლიანი ნაკადი, საჭიროა ლოკალური დიფუზიური ნაკადის მნიშვნელობა (16) გავამრავლოთ ფორის ზედაპირის  $S$  ფართობზე, ხოლო მთლიანი ნივთიერების რაოდენობის მოსაძებნად, რომელიც გამოიყოფა დიფუზიურ ფორულ სივრცეში  $Q(t)$ , გავაინტეგრიროთ (16) გამოსახულება  $[0, t]$ :

$$Q = S \frac{4lC_0}{\pi^2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi^2 D}{l^2} t\right) \right] \quad (17)$$

(17) ფორმულა გვაძლევს ნაკადის მაღალ მნიშვნელობას, ასე რომ ფოროვანი სიტემა შეიცვალა ფენით, ამიტომ უნდა გავამრავლოთ (17) გამოსახულება განუსაზღვრელ მამრავლზე  $C < 1$ , რომელიც ფორების ფენის “შევსების” მახასიათებელია.

$$Q = S\chi \frac{4lC_0}{\pi^2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\pi^2 D}{l^2} t\right) \right] \quad (18)$$

(18) გამოსახულებაში კვადრატული ფრჩხილების წინ მამრავლი ტოლია ნაწილაკში მიზნობრივი კომპონენტის შემადგენლობისა, დიფუზიური სტადიის დასაწყისში. (18) ფორმულაში კვადრატულ ფრჩხილებში არსებული გამოსახულება წარმოადგენს, გამოყვანილი კომპონენტის რაოდენობის დამოკიდებულებას დროზე. შესაბამისად გამოყვანილი კომპონენტის წილი განისაზღვრება თანაფარდობით.

$$\frac{\bar{C}}{C} = \exp\left(-\frac{\pi^2 D}{l^2} t\right), \quad (19)$$



სადაც  $\bar{C}$  – მყარ ფოროვან სხეულში მიზნობრივი კომპონენტის საშუალო კონცენტრაციაა  $t$  დროის მომენტისათვის დიფუზიის საწყის სტადიაში.

ჰიდრავლიკურ სტადიაში წამოდგენილი მოდელი გვიჩვენებს, რომ ყველა გამოწვლილული ნივთიერება იმყოფება გახსნილ მდგომარეობაში ხოლო მისი შემცველობა ექსტრაგენტის გარე მოცულობაში შეიძლება მივიღოთ ნულის ტოლად. პრაქტიკულად ფორებში მუდმივად მიედინება ნივთიერება ფოროვანი ნედლეულის უახლოესი ფენებიდან მოლეკულური დიფუზიის ხარჯზე, ხოლო მისი შემცველობა ექსტრაგენტის ძირითად მოცულობაში მუდმივად იზრდება. ამიტომ გამოწვლილვის გამოსავალი შეიძლება პროპორციული იყოს  $\sqrt{t}$  მხოლოდ პროცესის საწყის ეტაპზე, დიფუზიურ-კონვექტიური სტადიის დადგომამდე. მითუმეტეს მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქირებისას დროის ხანგრძლივობა პირდაპირპროპორციულია  $\sqrt{t}$ .

საინტერესოა შევადაროთ დიფუზიური სტადიის მოდელი [15-19] დამამთავრებელი სტადიის (ე. წ. რეგულარულ) მოდელთან სუფთა დიფუზიური ექსტრაქირებისას [5, 21].

უკანასკნელის თანახმად, სხვადასხვა ფორმის (სფერო, უსასრულო ფირფიტა და ცილინდრი) ფოროვანი სხეულიდან მიზნობრივი კომპონენტის ექსტრაქირებისას, გარკვეული დროის მომენტის დასაწყისიდან, გამოწვლილული კომპონენტის დამოკიდებულება დროზე განისაზღვრება ფორმულით [5, 21]

$$\frac{C_D}{C_{0D}} = B_1 \exp\left(-\mu_1^2 \frac{Dt_D}{R^2}\right), \quad (20)$$

სადაც  $C_D$  და  $C_{0D}$  – ნაწილაკში მიზნობრივი კომპონენტის საშუალო კონცენტრაციაა შესაბამისად დროის მიმდინარე და საწყისი მომენტისათვის;  $B_1$  – კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია ნაწილაკის ფორმაზე, ბიო კრიტერიუმზე მახასიათებელი განტოლების

ფესვის მნიშვნელობაზე;  $R$  – სფეროს ან ცილინდრის რადიუსია, ან კიდევ ფირფიტის სისქის ნახევარი;  $t_D$  – პროცესის საერთო ხანგრძლივობა;  $\mu_1$  – მახასიათებელი განტოლების ფესვია.

(19) და (20) ფორმულები ფორმალურად მსგავსია, მაგრამ მასში შემავალი პარამეტრები დიფუზიის კოეფიციენტის  $D$  გარდა, არსებითად განსხვავდებიან. (19) გამოსახულებაში შედის დიფუზიური სტადიის ხანგრძლივობის  $t$  და ფორებს შორის მანძილი  $l$ , ხოლო (20) – ნაწილაკების რადიუსი  $R$  (ან ფირფიტის სისქის ნახევარი) და პროცესის ხანგრძლივობა  $t_D$ . რეალურად კაპილარულ-ფოროვანი ნაწილაკები წარმოადგენენ ნახევრად დისპერსიულ ფოროვან სტრუქტურას და კაპილარებს, რომლებიც ხასიათდებიან საკმაოდ დიდი დიაპაზონის განივი კვეთის ზომებით. უმარტივერს მოდელს წარმოადგერნს ნაწილაკის ბიდისპარსიული სტრუქტურა, რომელსაც ორი განსხვავებული ზომის კაპილარები აქვს [21].

მათ განეკუთვნებიან მცენარეული და ცხოველური წარმოშობის ქსოვილები, კატალიზატორის ზოგიერთი სახეობები და აგრეთვე მადნეულის ნაწილაკები. როგორც წესი, კაპილარებში სითხის მოძრაობა პრაქტიკულად არ არსებობს და ნივთიერების გადატანა წარმოებს მოლეკულურ დიფუზიური მექანიზმით. მაგრამ გარე წნევის პულსაციის განსაზღვრული ამპლიტუდისას მსხვილ ფორებში შეიძლება წარმოიშვას სითხის რხევითი მოძრაობა, კაპილარებში გაზის შეკუმშვით [38, 39].

ამ სახით მსხვილი ფორები ითამაშებს სატრანსპორტო არხების როლს, რომლებშიც ნივთიერების გადატანა კონვექტიურია, რის გამოც შესაძლებელია ნაწილაკებიდან ნივთიერების მთლიანად გამოწვლილვის პროცესის დაჩქარება.

## 2.3. პერიოდული ქმედების ექსტრაქტორები და ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციის გზები

### 2.3.1. დიფუზორები

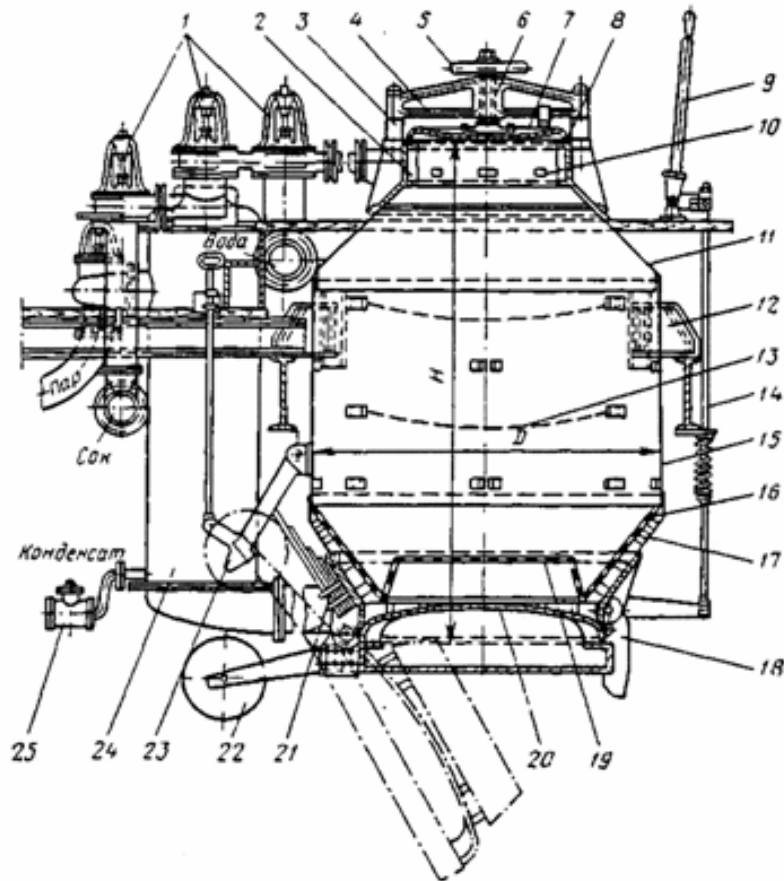
კონსტრუქციულობის მიხედვით ექსტრაქტორები კლასიფიცირდება: კორპუსის განლაგების მიხედვით სვეტებიანი (ერთსვეტიანი, ორსვეტიანი და მრავალსვეტიანი), დახრილი, ჰორიზონტალური, კამერული, როტაციული განივი ან ვერტიკალური ღერძის მიმართ მბრუნავი; სატრანსპორტო ორგანოს მიხედვით – შნეკური, ჯაჭვური, კარუსელური, ლენტური; ტრანსპორტირების მიხედვით – მექნიკური სატრანსპორტო საშუალებით და მასში შეყვანილი სითხის ორქლის ან აირის ფაზის ენერჯით.

აპარატის დასახელებაში შედის ერთი ან რამოდენიმე ზემოთ თამოთვლილი ნიშანი. ქვემოთ განხილულია საწარმოო ექსტრაქტორების ძირითადი ტიპები.

პერიოდული ქმედების ექსტრაქტორებია საინფუზიციო ტანკები (ჩანები). კამერული აპარატები მექანიკური, ჰიდრავლიკური და პნევმატური გადაადგილებით, სხვადასხვა სახის მაინტენსიფიცირებელი მოქმედებით: ვიბრაციული, პულსაციური, ვაკუუმ დუღილით და სხვა. როგორც წესი პერიოდული ქმედების ექსტრაქტორები წარმოადგენენ საფეხურებს უწყვეტი და ნახევრადუწყვეტი მრავალსაფეხურიანი პირდაპირი და უკუდინების (უპირატესად) ექსტრაქტორებს.

საინფუზიციო ჩანები – ღია ან ჰერმეტიკული ტევადობის მყარი ნაწილაკების უძრავი ფენით ექსტრაგენტის ცირკულაციით (პერკოლატორები ან დიფუზორები) ან ცირკულაციის გარეშე. კვების და ფარმაცევტულ წარმოებაში მას გამოიყენებენ მცირე რაოდენობის ნედლეულის ექსტრაქციებისათვის [4,5,10,14,16]. ჰიდრომეტალურგიულ წარმოებაში [75-78], მაგ. ოქროს გამოსაღებად ქვიშის ფოროვანი სტრუქტურიდან ტუტე და ტუტემიწიანი მეტალის ციანიდებიდან, გამოიყენებენ მრგვალ (12-14მ დიამეტრის, 2-4მ სიმაღლის) და მართკუთხა

(სიგრძე 25მ სიგანე 15მ) ჩანებს 8-900 ტონა ნედლეულის ტევადობით. ექსტრაქციების პროცესში არაა შეხებაში მთელი ფენა, ამიტომ ექსტრაქციების პროცესი გრძელდება 4-12 დღე-ღამე.



ნახ. 8. დიფუზორი:

1-ვენტილი; 2-საყელური; 3-საკიდები; 4-ბუგელი; 5-მქნევარა; 6-ბრახნი; 7,20-სახურავები; 8-დასალუქი; 9-სახელური; 10-ნახვრეტი; 11-კორპუსის ზედა ნაწილი; 12-დამჭერი ფეხი; 13-ჯაჭვი; 14-ბერკეტი; 15-კორპუსი; 16,19-საცერი; 17-კორპუსის ქვედა ნაწილი; 18,23-შემომჭერები; 21-ამორტიზატორი; 22-საპირწონე; 24-გამახურებელი; 25-კონდენსატის მიმღები.

მცირე ზომის კედლის ჩანები (დიფუზორები) უძრავი ნედლეულის ფენით და ცირკულირებადი ჩამრეცხი ექსტრაგენტით, მზადდება ვერტიკალური აპარატის სახით, რომელსაც შუაში აქვს ცილინდრული ფორმა, ზედა და ქვედა ნაწილში კი წაკვეთილი კონუსის ფორმა ნახ. 8 [16].

მასალის ჩატვირთვა გადმოტვირთვა ხდება ზედა და ქვედა სარქველის სახურავებით, რომლებიც მყარად იკეტებენ მექანიკური ან ჰიდრავლიკური მოწყობილობით. ქვემოთ გადმოსატვირთი სარქველის წინ იდგმება საცერი სხვადასხვა სითხისათვის. მას აგროვებენ და აწოდებენ ნასოსით ნედლეულის მოსარწყავად. ექსტრაგენტისა და ნედლეულის კარგად ურთიერთქმედებისათვის ამონტაჟებენ ამრევეებს.

პერიოდული ქმედების კამერული ექსტრაქტორები [4, 5, 75-78] წარმოადგენს ცილინდრული ტევადობის ჭუჭყელს, ბრტყელი, ელიფსური ან კონუსური ფუძით. ისინი დამზადებულია უჟანგავი ან ნახშირბადიანი ფოლადით დამცავი საფარით. მაღალი ტემპერატურაზე მომუშავე აპარატები აღჭურვილია პერანგით და სალტეებით. ექსტრაქტორის შიგა მოწყობილობები დამოკიდებულია იმაზე თუ რა მეთოდით ხდება მორევა. ჰიდრომეტალურგიულ წარმოებაში 10 მ დიამეტრისა და 2-4,5მ სიმაღლის აპარატები აღჭურვილია ამრევით, რომელიც ბრუნავს 2-4ბრუნ/წუთში სიჩქარით.

ექსტრაქციის იმ მეთოდების გამოყენებისას, რომლის დროსაც ადგილი აქვს ვიბრაციას, პულსაციას, ექსტრაგენტის არეში ნედლეულის დაქუცმაცებასა და დეფორმაციას, მნიშვნელოვნად იზრდება ექსტრაქციის სისრულე და სიჩქარე. ეს აიხსნება შემდეგი გარემოებებით:

მყარ ნაწილაკებზე ინტენსიური ზემოქმედებისას წარმოიქმნებიან ძლიერი ტურბულენტური დინებები, ჰიდროდინამიკური მიკრონაკადები, რომლებიც ხელს უწყობენ მასათა გადატანას და ნივთიერებების გახსნას. ასეთი მოვლენა აღინიშნება როგორც ნაწილაკების ზედაპირებზე, ისე მათ შიგნით. შედეგად მიიღწევა ინტენსიური არევა ცალკეული უჯრედების შიგნითაც კი;

ნედლეულის ნაწილაკების ინტენსიური რხევებისას ხახუნის ადგილებში ლოკალურად იზრდება ტემპერატურა, მცირდება ექსტრაგენტის სიბლანტე, ხოლო შედეგად ვლელულობთ შიგა დიფუზიის კოეფიციენტის ზრდას;

ტურბულენტურობის გაზრდისა და მიმდებარე ფენების სტრუქტურის დარღვევის შედეგად სასაზღვრო დიფუზური შრე იფიტება ან აქვს ძალზე მცირე სისქე;

ინტენსიური რხევების შედეგად ადგილი აქვს შეკუმშვისა და გაწევის ზონების პერიოდულობას. ამ დროს, გაჭიმვის მომენტში, ექსტრაგენტში იქმნება სითხის გაწყვეტის ზოლები (კავიტაციური ზონები), რომლებიც ძალისმიერად იხურებიან (ამ დროს წნევა რამდენიმე ათეულ მპა-ს აღწევს). ამ პროცესის დადებითი მხარეა ნაწილაკების დისპერგირება და, შესაბამისად, ფაზათაშორისი ზედაპირის გაზრდა.

### 2.3.2. პულსაციური ექსტრაქტორები.

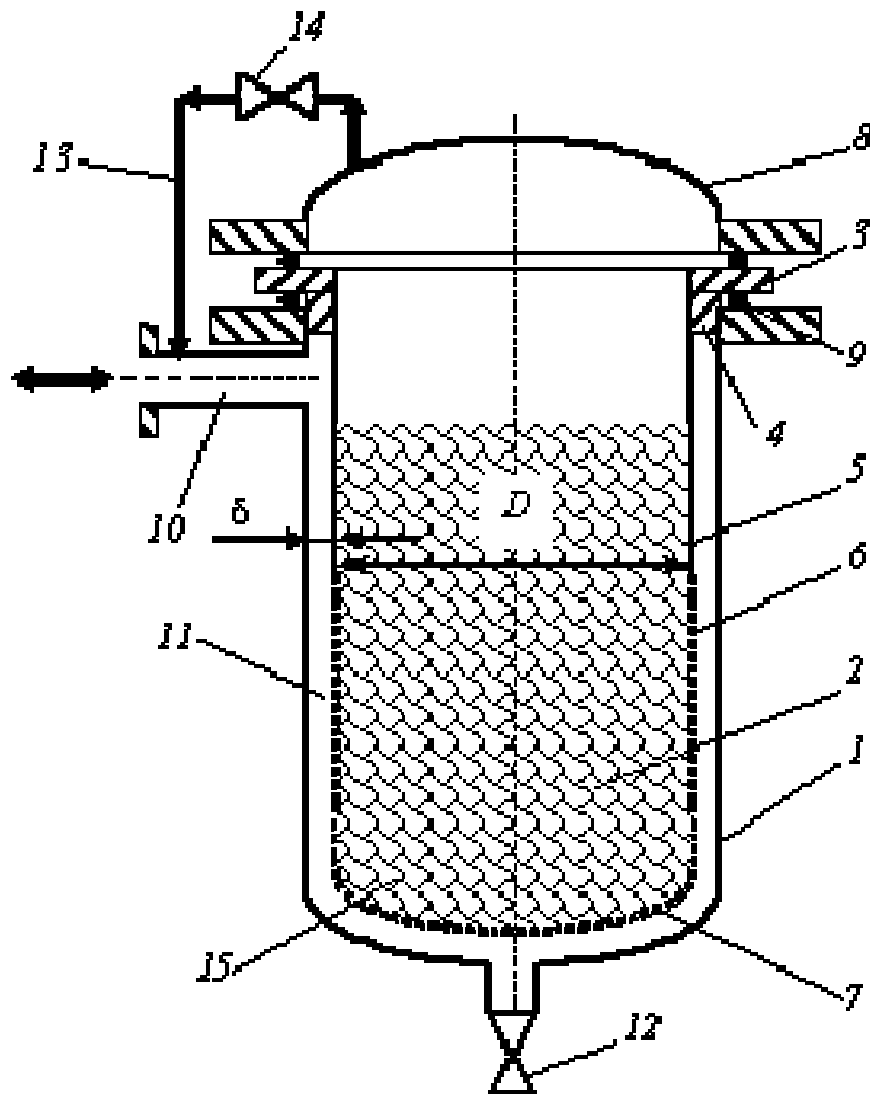
გასული საუკუნის შუახანებში წარმოებდა პულსაციური აპარატების აქტიური კვლევები და დამუშავება, მათ შორის ექსტრაქტორების სისტემის მყარი სხეული-სითხე [29, 31, 41-44, 47-52, 70, 71, 74]. ს. მ. კარპაჩევის მიერ მის თანამშრომლებთან ერთად წარმოდგენილი იყო პერიოდული და უწყვეტი ქმედების ექსტრაქტორების პნევმატური პულსაციის სისტემა. ამ აპარატებში ექსტრაქტორების პროცესი წარმოებდა  $f = 0,517\text{წმ}^{-1}$  სიხშირით (ძირითადად  $f = 12\text{წმ}^{-1}$  და პულსაციის ინტენსივობით სიხშირის წარმოებული ამპლიტუდით).  $f = 12\text{წმ}^{-1}$  სიხშირის დიაპაზონი პნევმატურ ექსტრაქტორში შეესაბამება ჰაერის მინიმალურ ხარჯს. ყველაზე ეკომომიური პულსაციური ექსტრაქტორებიდან არის რეზონანსული ექსტრაქტორები [47-52], რომელშიც ენერჯის გადაცემა ხდება სიხშირით რომელიც უახლოვდება აპარატი-გადასამუშავებელი მასის საკუთარი რხევის სიხშირეს. U-ს მაგვარ რეზონანსულ-პულსაციურ ექსტრაქტორში ორი ერთნაირი ვერტიკალური ცილინდრული ტევადობის სექციით პერფორირებული ძირებით, ერთმანეთთან შეერთებულია დიდი განივი კვეთის U-ს მაგვარი მილით [49]. დრეკადი ელემენტების როლს, რომელთა შორისაც ირხევა გადასამუშავებელი სითხე, იტოვებს აირის ღრუს, სითხის

სარკეების თავზე. პულსაცია გარედან გადაეცემა ერთ-ერთ აირის ღრუს მერე კი პასიურია. ერთკორპუსიან პულსაციურ რეზონანსულ აპარატზე თანაღერძულად დაყენებულია მილი. სითხე ირხევა ცენტრალურ მილსა და მის ირგვლივ წრიულ სივრცეს შორის. დრეკად ელემენტებს წარმოადგენს აირის ღრუ ჩაკეტილი გადასამუშვებელი სითხის ზედაპირზე. ფასონური ძირი (ტორის ქვედა ნახევარში) ამცირებს სითხის მოძრაობის ჰიდროდინამიკურ წინაღობას. მყარი ფაზის ჩატვირთვა ხორციელდება დამაკავშირებელი მილით და სარქველიდან, რომელიც აპარატის თავზეა განთავსებული.

შედარებით ახლახანს იქნა წარმოდგენილი პულსაციური ექსტრაქციის აპარატები, რომლებიც მუშაობენ როგორც რეზონანსულ ისე არარეზონანსულ რეჟიმში [88-94]. ამ აპარატების დამუშავებისას დასმული იყო ორი ამოცანა, რომელიც უზრუნველყოფდა ექსტრაქციების მაღალ სიჩქარეს. პირველი – შიგა მასათაგადაცემის გაუმჯობესება – რეალიზებულია ნაწილაკის კაპილარებში სითხის პულსაციის ხარჯზე. მეორე – გარე მასათაგადაცემის ინტენსიფიკაცია – რომელიც მიიღწევა აპარატში ნაწილაკების ფენის პულსაციური გაფხვიერებით. ნაწილაკების ფენის გაფხვიერების პრობლემა აქტუალურია დიდი მოცულობის აპარატებისათვის და აგრეთვე წვრილი გაჟიჟებისადმი მიდრეკილების მქონე ნაწილაკების შემთხვევაში, როცა აპარატებში ფორმირდება ძნელადშელწევადი საცობები.

ნახ.9-ზე ნაჩვენებია პულსაციური ექსტრაქტორის სქემა კონტეინერით [94]. აპარატი შედგება კორპუსისაგან 1, რომელშიც მოთავსებულია კონტეინერი 2 და აქვს სალტე 3 დასაცენტრებელით 4, რის გამოც კონტეინერის ზედა ნაწილის 5 გვერდითი კედლები შეუღწევადია, ქვედა ნაწილი 6 და ძირი 7 შეღწევადია სითხისათვის და შუღწევადია ნაწილაკებისათვის. აპარატი ჰერმეტიზაციას უზრუნველყოფს სახურავი 8 და ორი საფენი 9. წნევის რხევების აღმგზნებიდან (ნახაზზე არაა ნაჩვენები) პულსაცია მიეწოდება მილიდან 10 რომელიც მიერთებულია აპარატის ზედა

ნაწილში 11, 5,6 გვერდითი კედლებით. კლაპანი 12 ემსახურება პროდუქტის გამოდენას (ან ნედლეულის გასარეცხი სითხისათვის). აპარატი შეიძლება აღწერილი იყოს სხვადასხვა ტექნოლოგიური მილგამომყვანებით (ნედლეულის ჩასატვირთად, მანომეტრების მისაერთებლად და სხვა). აპარატის სახურავი 8 ქვედა ცილინდრულ ნაწილთან 11 შეერთებულია ერთი ან რამოდენიმე გადასადენი კლაპანით 13, რომელზეც შეიძლება დამონტაჟდეს მარეგულირებელი კლაპანები 14, ჰიდროდინამიკური წინაღობის რეგულირებისათვის. d ღრეჟო შეიძლება მთელ სიგრძეზე ერთნაირი იყოს ან იცვლებოდეს გარკვეული კანონით.



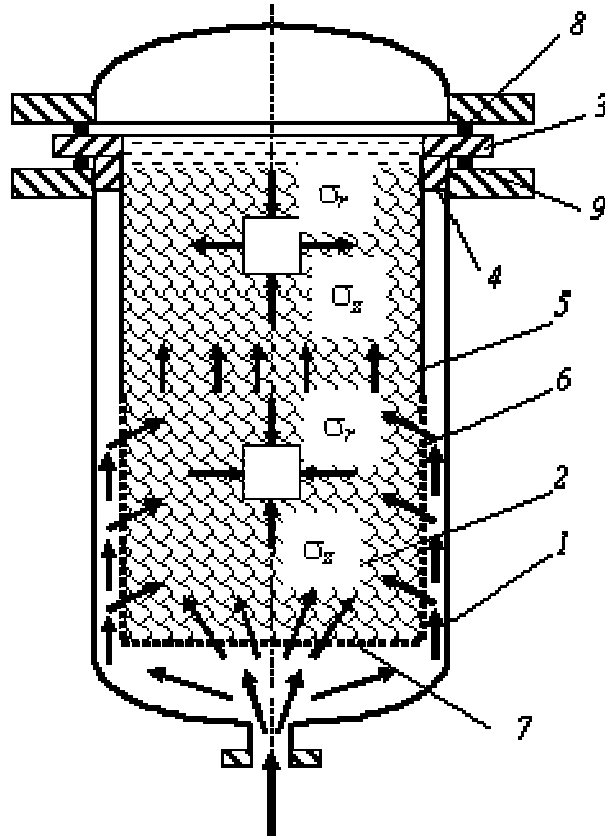
ნახ. 9. პულსაციური ექსტრაქტორის საანგარიშო სქემა



აპარატი მუშაობს შემდეგნაირად. კონტეინერი 2 შევსებულია დასამუშავებელი ნედლეულის ნაწილაკებით 15 ჩაიდგმება პულსაციური კორპუსში 1, რის შემდეგაც აპარატი დაიხურება და ჩაისხმება მასში ექსტრაგენტი. შემდეგ ჩაირთვება რხევითი წნევის აღმგზნები შეკუმშული აირი (მაგალითად ჰაერი) მილგამომყვანიდან 10 და მიეწოდება აპარატის ცილინდრულ ნაწილში 11, სადაც აირი ნაწილაკების ფენებში შეღწევის შემდეგ დაიწყებს სითხის გამოდევნას მარცვალთშორისი სივრციდან. კონტეინერში სითხის დონე იმატებს, აირი სახურავის 8 ქვეშ იკუმშება. აირის ემეტესი ნაწი გადაედინება სახურავის გადასადენი კლაპანიდან 13 და მარეგულირებელი კლაპანიდან 14, ასე რომ მილსაცმზე 10 წნევა უფრო მაღალია ვიდრე სახურავის 8 ქვეშ. რხევითი წნევის აღმგზნების წნევა როგორც კი გაუტოლდება შეკუმშული აირის ჯამურ წნევას, ჰიდროსტატიკური სითხის სვეტის და ნაწილაკების ფენაში წნევის დანაკარგს, აირის შეკუმშვის პროცესი შეწყდება და წნევის აღმგზნები გადაირთვება წნევის ჩაწნებიდან წნევის გამოტუმბვაზე ე.ი. მილსაცმი 10 გადაირთვება ატმოსფეროზე ან ვაკუუმშიმდებზე. წნევის დაგროვების სტადიაში გაზი სახურავის 8 ქვემოდან სწრაფად გადაედინება გადასადენ 13 და მარეგულიელ კლაპანებში 14, აპარატის ცილინდრულ ნაწილში 11 და მილსაცმზე 10. შემდეგ კი ატმოსფეროში ან ვაკუუმ მიმდებში. ამასთან ერთად წნევის სწრაფი დაცემისას სითხის გადადენა მოხდება ნაწილაკის ფენიდან ცილინდრულ ნაწილში 11. სითხის ჰიდროსტატიკური სვეტის მოქმედებით ნაწილაკის ფენებში აღარ წარმოიქმნება საცობი. რხევის პროცესი შემდგომში კი გრძელდება.

პულსაციური აპარატის [89] კონტეინერი ნახ.10 (პულსაციური აპარატის კორპუსთან 1 ერთად). კონტეინერი 2 შედგება სარტყელი 3 მაცენტრირებული შვერილი 4, ჰერმეტიულად შეერთებული სარტყელთან 3 შეუღწევადი გვერდითი ნაწილით 5 და შეღწევადი გვერდითი ნაწილით 6 (მაგალითად კარკასზე შემორტყმული ბადით) აგრეთვე შეღწევადი ძირით

7. კონტეინერის 2 კორპუსთან 1 ჰერმეტიკობისათვის გათვალისწინებულია ზედა 8 და ქვედა 9 საფენები.



ნახ.10. პულსაციური აპარატის კონტეინერი:

1 – პულსაციური აპარატის კორპუსი; 2 – კონტეინერი; 3 – რგოლი; 4 – დასაცენტრებელი შვერილი; 5 – შეულწევადი გვერდითი კედელი; 6 – შელწევადი გვერდითი კედელი; 7 – შელწევადი ფსკერი; 8 – ზედა საფენი; 9 – ქვედა საფენი

კონტეინერიანი აპარატი მუშაობს შემდეგნაირად. პულსაციური აპარატის 1 ქვედა მილსაცმზე პერიოდულად მიეწოდება სითხე, რომელიც შედის აპარატი ქვედა ძირიდან 7 კონტეინერში 2. სითხის ნაკადი იყოფა ორ ნაწილად. ნახაზზე ნაჩვენებია კონტეინერში ნაწილაკების შეწონადობის დინამიური პროცესი, ელემენტარულ ზედაპირებზე მექანიკური ძაბვები

კაილარულ ფოროვან ზედაპირზე. ნაკადის პირველი ნაწილი მიედინება კონტეინერის 2 ლედის გასწვრივ, რომელმაც შეაღწია ფსკერში 7. სითხის მეორე ნაწილი კი მიედინება კონტეინერისა 2 და აპარატის კორპუსის შორის და შემდეგ კი რადიალური ნაწილიდან 6 შედის კონტეინერში 2. ამ ორი ნაკადის დინებით ნაწილაკები განიცდიან მოცულობით ძაბვებს, რომლებიც იწვევს ყოველმხრივ ზედაპირულ შეკუმშვას.

## 2.4. პერიოდული ქმედების ინოვაციური ექსტრაქტორის დაპროექტება

### 2.4.1. საკითხის დასმა

ექსტრაპირებისათვის საჭირო აპარატების კონსტრუქციული თავისებურებები განისაზღვრება მათი მუშაობის რეჟიმით (პერიოდული, ნახევრადპერიოდული და უწყვეტი), მყარი და თხევადი ფაზების თვისებებით, წარმადობით, წარმოების პროცესის ტემპერატურით და წნევით, ინტენსიფიკაციის მეთოდების გამოყენებით, მისაღები ექსტრაქტის ხარისხის მოთხოვნით, ნედლეულისა და ექსტრაქტის მოცილების თავისებურებებით. რამდენადაც ამ ფაქტორების გავლენა კომპლექსურია, კონსტრუქციის ძირითად კრიტერიუმად მიიჩნევა მაღალი კუთრი წარმადობა, დაბალი ლითონტევადობა და პროცესის მაღალი ტექნოლოგიური მაჩვენებლები.

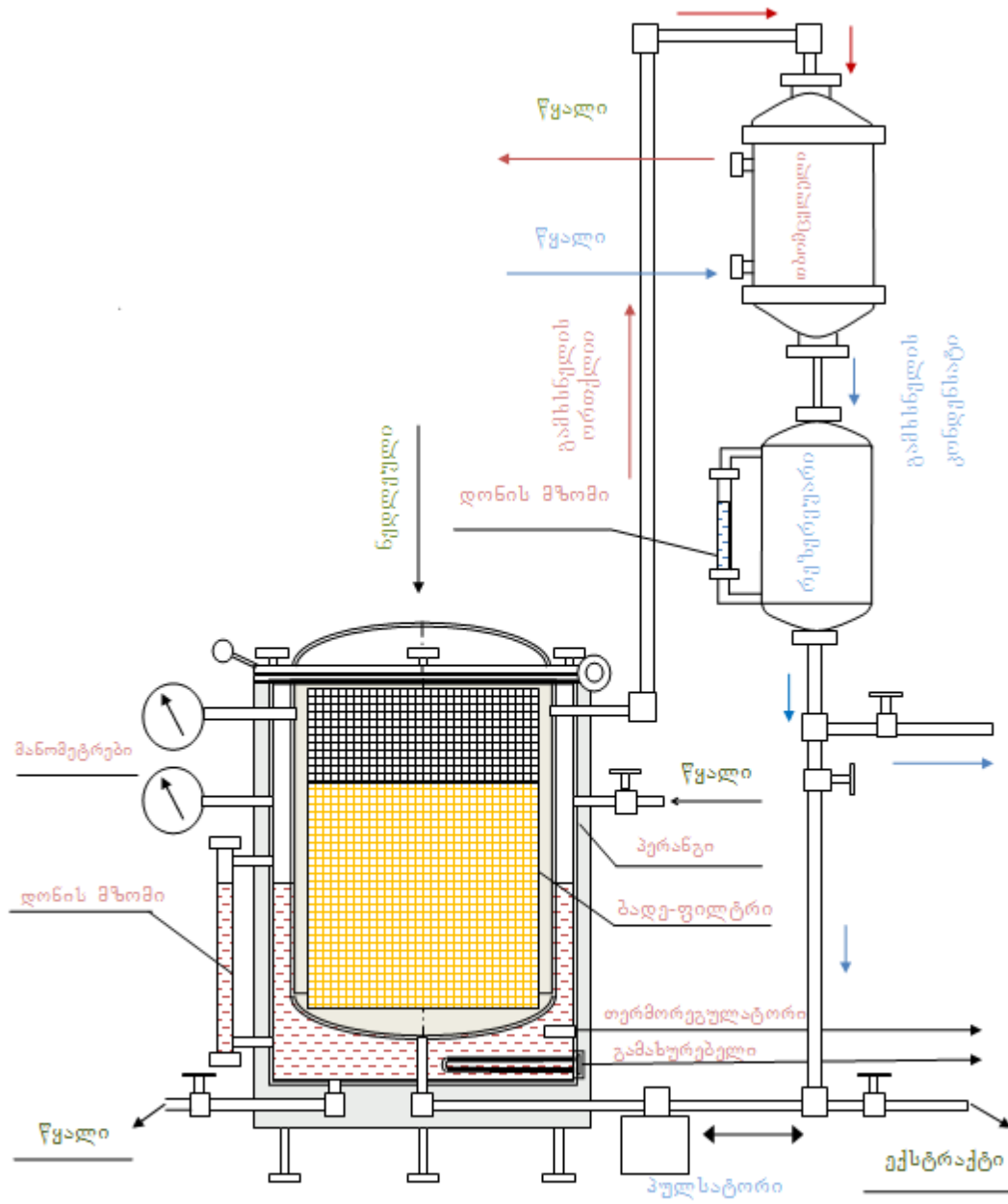
პერიოდული ქმედების აპარატები მარტივია და იაფია უწყვეტი ქმედების აპარატებთან შედარებით. მათში როგორც წესი ადვილად რეალიზდება პროცესების ინტენსიფიკაცია. ამასთან თანაბარი პირობების დროს, მიზნობრივი კომპონენტის გამოსავალი და ექსტრაქტის მაქსიმალური კონცენტრაცია მიიღება უწყვეტი ქმედების ექსტრაქტორებში მტარი და თხევადი ფაზის ურთიერთსაწინააღმდეგო დინებით. ამასთან პერიოდული ქმედების აპარატებში ინტენსიფიკაციის ზემოქმედება იწვევს ფაზის განივი გადაადგილების გაზრდას და პროცესის ეფექტურობის

შემცირებას. ერთდროული სწრაფვა ინტენსიფიკაციისა და ეფექტურობისაკენ გვიბიძგებს აპარატის სექციებად დაყოფისაკენ. რაც ართულებს კონსტრუქციას. ამასთან ერთად 10-12-ზე მეტი სექციის შემთხვევაში მიზნობრივი კომპონენტის გამოსავალი და ექსტრაგენტის საწინააღმდეგო დინების საფეხურებრივ აპარატში მაჩვენებლები უახლოვდება უკუდინებით უწყვეტი ქმედების აპარატის მაჩვენებლებს.

ექსტრაქტორის კონსტრუქცია არსებითად დამოკიდებულია გადასამუშავებელი მყარი ფაზის თვისებებზე. გამოცდილებიდანაც ჩანს, რომ აპარატები რომლებიც მუშაობს ერთი სახის ნედლეულზე ისე ეფექტურად ვერ მუშაობს სხვა სახის ნედლეულზე. მაგალითად მხოლოდ მნიშვნელოვანი გადაკეთების შემდეგ აღიჭურვა შნეკური ექსტრაქტორები ზეთის წარმოებაში, ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების ექსტრაქციისათვის ჩაის ნედლეულიდან [68, 69].

ექსტრაქციის პირობების მრავალსახეობამ გვაჩუქა მრავალი სახის აპარატები. ექსტრაქტორების კლასიფიკაცია შეიძლება მოვიყვანოთ კონსტრუქციული და ტექნოლოგიური ნიშნებით [5,10,16,73]. ტექნოლოგიური ნიშნების საფუძველზე ექსტრაქტორები კლასიფიცირდებიან: მუშაობის რეჟიმის მიხედვით – პერიოდული, უწყვეტი და ნახევრადუწყვეტი; ფაზათა ურთიერთმიმართულების მიხედვით – პირდაპირი და უკუდინებით, პირდაპირ და უკუდინებით საფეხურებრივი, პერიოდული პროცესით, მთლიანი შერევით, ფენებით და კომბინირებული პროცესით; ექსტრაგენტის ცირკულაციის მიხედვით – ექსტრაგენტის ერთჯერადი გატარების და ექსტრაგენტის რეცირკულაციით; ექსტრაქტორში წნევის მიხედვით – ატმოსფერული, ვაკუუმური და მოჭარბებული წნევით; აპარატში ჰიდროდინამიკური რეჟიმის მიხედვით – უძრავი, მოძრავი და შეწონილი ფენით; გადასამუშავებელი ნედლეულის მიხედვით – მსხვილმარცვლოვანი, წვრილმარცვლოვანი, პასტისებური, ბოჭკოვანი და სხვა.

ჩატარებული კვლევებისა და არსებული პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო დანადგარების ანალიზის საფუძველზე ჩვენს მიერ დამუშავდა ინოვაციური პერიოდული ქმედების საწარმოო-ექსპერიმენტული ექსტრაქტორი, რომლის პრინციპული სქემა ნაჩვენებია ნახ. –11ზე.



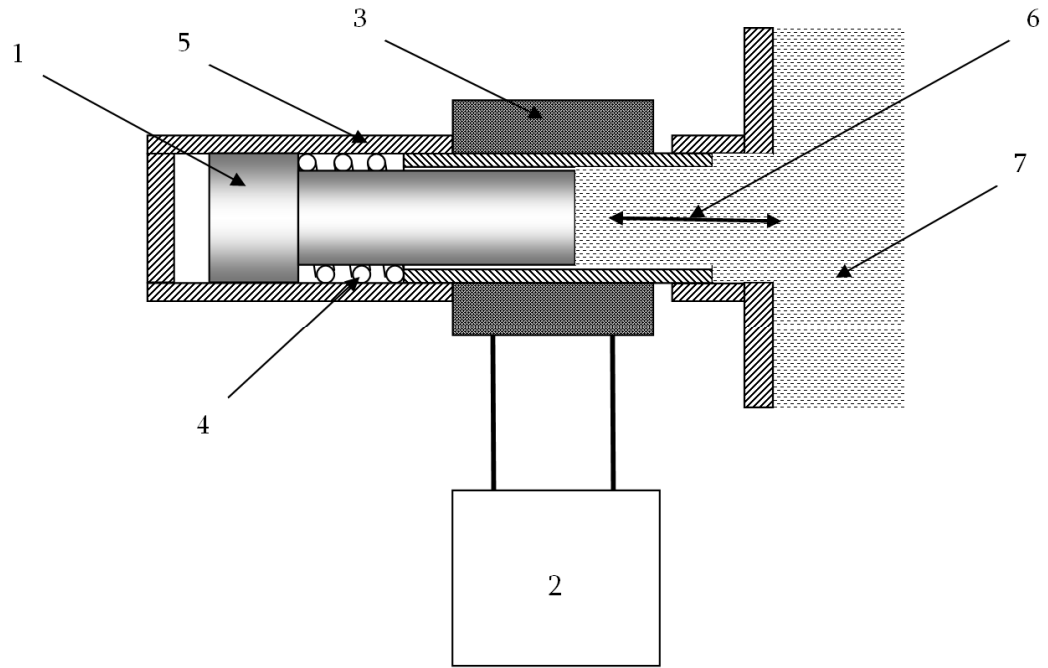
ნახ. 11. საწარმოო-ექსპერიმენტული დანადგარის პრინციპული სქემა

ჩვენს მიერ დამუშავებული ექსტრაქტორი ერთმანეთში ჩაწყობილი, რამოდენიმე გარსისაგან. შიგა გარსი წამოადგენს ბადე ფილტრს მოქსოვილი უჟანგავი ლითონის წვრილი მავთულისაგან რომლის დანიშნულებაა არ გაატაროს ბადის გარეთ ნედლეულის დაქუცმაცებული ნაწილაკები და თავისუფლად შევიდეს მასში ექსტრაგენტი, რომელიც მოძრავად თავსდება ლითონის სალტებიან გარსში. მასში თავსდება საექსტრაქციო ნედლეული. თვითონ ძირითადი დანადგარი შედგება ერთი მეორეში ჩადგმული ჰერმეტიკულად დაკავშირებული შიგა და გარე კორპუსისაგან. ზემოდან ეხურება ხუფი თავისი ექვსი მომჭერით. შიგა კორპუსი წარმოადგენს საექსტრაქციო კამერას, რომელშიც თავსდება საექსტრაქციო ნედლეულით შევსებული ბადე-ფილტრი და ემატება მას ექსტრაგენტი. გარე კამერა კი წარმოადგენს წყლის აბაზანას, რომელშიც მოთავსებულია ელექტრო გამხურებელი და თერმორეგულატორის გადამწოდი. ამ უკანასკნელის მეშვეობით ხდება წყლის გათბობა სასურველ ტემპერატურამდე, რომელიც საჭიროა ექსტრაგენტის ასაორთქლებლად. გარე კამერას გააჩნია წყლის შემშვები და გამომშვები, კორპუსის გარეთ დამონტაჟებულია წყლის დონის მაჩვენებელი ვიზუალური კონტროლისათვის და მანომეტრი. შიგა კამერას ზედა ნაწილში გამოყვანილი აქვს ორი მილი ერთი მანომეტრისთვის მეორე კი ექსტრაგენტის ორთქლის გამოსასვლელი, რომელიც შეერთებულია თბომცვლელთან საიდანაც კონდენსირებული ექსტრაგენტი უბრუნდება საექსტრაქციო კამერას ქვედა ნაწილში. ექსტრაქციის პროცესის დასრულების შემდეგ აორთქლებილი ექსტრაგენტის კონდენსატი შეგვიძლია გადავადინოთ რეზერვუარში, შემდეგ გავალოთ საექსტრაქციო კამერის ქვედა ნაწილში არსებული გამომავალი ვენტილი ექსტრაქტის მისაღებად. დანადგარის საერთო კონსტრუქცია წარმოდგენილია ნახ. 12- ზე



ნახ. 12. დანადგარის საერთო კონსტრუქცია

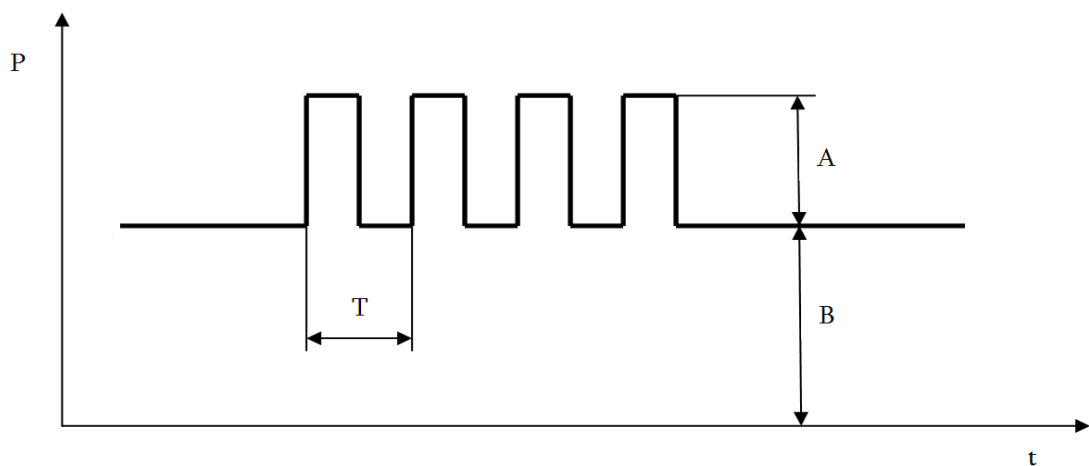
ჩვენს მიერ დამუშავებულ დანადგარში გამოყენებულია ელექტრო-  
მაგნიტური პულსატორი რომლის პრინციპული სქემა ნაჩვენებია ნახ. 13



ნახ. 13. ელექტრო-მექანიკური პულსატორის პრინციპული სქემა  
 1-ელექტრომაგნიტის გულანა, 2-კვების წყარო, 3-ელექტრომაგნიტის  
 ხვიები, 4-ზამბარა, 5-პულსატორის კორპუსი, 6-პულსატორის მოძრაობის  
 მიმართულება, 7 ექსტრაგენტი

პულსატორის კორპუსში 5 მოთავსებულია გულანა 1 და ზამბარა 4, კვების წყაროდან 2 ელექტრომაგნიტის ხვიებზე 3 მიეწოდება პულსირებული დენი, რომელსაც მოძრაობაში მოყავს გულანა გრძივი მიმართულებით 6. დენის იმპულსის მიწოდემისას გულანა გადაადგილდება მარჯვენა მიმართულებით (ნახ. ), ხოლო დენის იმპულსის მოხსნის შედეგ ზამბარა აბრუნებს გულანას საწყის მდგომარეობაში. გულანა დამზადებული მაღალი მაგნიტური შეღწევადობის ლითონისაგან, კორპუსი კი დაბალი მაგნიტური შეღწევადობის მასალისაგან. გულანის მოძრაობით წარმოიშვება ექსტრაგენტში 7 წნევის ცვლილება, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.14





ნახ. 14. პულსაციის წნევის ცვლილების გრაფიკი დროის მიხედვით

პულსაციის წნევის ცვლილება კვების წყაროს საშუალებით წარმოებს  $T$  პერიოდით  $1-6 \text{ წმ}^{-1}$ -სიხშირემდე,  $B$ -ექსტრაგენტის წნევაა პულსაციის გარეშე. კვების წყაროს საშუალებით შეგვიძლია ვარეგულიროთ აგრეთვე რხევის ამპლიტუდაც, სადაც  $A$ -პულსაციით მიღწეული წნევის ცვლილებაა. პულსატორის კონსტრუქცია ნაჩვენებია ნახ. 15.



ნახ. 15 პულსატორის კონსტრუქციის საერთო ხედი

#### 2.4.2. დანადგარის პრაქტიკული გამოყენების მაგალითი პულსაციის მეთოდით ექსტრაქციისათვის

პერიოდული ქმედების ექსტრაქტორის გამოყენების დროს შეიძლება გარე წინააღმდეგობამ იქონიოს გავლენა ექსტრაქციის პროცესის სიჩქარეზე. გარე წინააღმდეგობის შემცირების უმარტივეს მაგალითს წარმოადგენს საექსტრაქციო მასის მორევა. მაგრამ მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის დროს ჩვენს მიერ შემუშავებული საექსტრაქციო დანადგარის პირობებში მორევა გართულებულია.

ამიტომ გარე წინააღმდეგობის შესამცირებლად გამოცდილი იქნა ორი მეთოდი ექსტრაგენტის პულსაციის და საექსტრაქციო მასის დაბალ სიხშირეებზე ვიბრაციის მეთოდები. ამ ფაქტორების მაინტენსიფიცირებული მოქმედება ცნობილია [96, 97].

ნიმუშად აღებულ იქნა ვალერიანის ფესვები, ნედლეულის პულსაციური ექსტრაქციის დროს ნაკლებია ნაწილაკების დეფორმაცია, რადგან ისინი საკმაოდ მყარია.

ნედლეული მუშავდებოდა 70%-იანი ეთილის სპირტით სხვადასხვა პულსაციის ამპლიტუდით და სიხშირით. გარკვეული პერიოდის განმავლობაში ექსტრაგენტს უკეთდებოდა ანალიზი. ცდების შედეგები ნაჩვენებია ცხრილში 1.

როგორც ცხრილიდან ჩანს წონასწორობა მყარდება 3 საათში (პულსაციის გარეშე წონასწორობა მყარდება არანაკლებ 6 საათში). მასათაგადაცემის კოეფიციენტი პულსაციის დროს 2-ჯერ მაღალია ვიდრე პულსაციის გარეშე დაყენების დროს. მნიშვნელოვანია ავღნიშნოთ რომ წონასწორობა მედმივი მორევის დროს მყარდება 3 საათში.

ცხრილი 1.

ექსტრაქტის კონცენტრაცია სხვადასხვა ნედლეულის პულსაციით  
ექსტრაჰირების დროს (რხევის სიხშირე 1,5 წმ-1; ამპლიტუდა 1 მმ)

| დრო,<br>სთ | 1 კონტაქტი                   |                              |                              | 2                            | 3                            |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|            | 1,5წმ <sup>-1</sup> ,<br>1მმ | 6,6წმ <sup>-1</sup> ,<br>1მმ | 6,6წმ <sup>-1</sup> ,<br>4მმ | 6,6წმ <sup>-1</sup> ,<br>4მმ | 6,6წმ <sup>-1</sup> ,<br>1მმ |
| 0,25       | 0,380                        | 0,393                        | 0,456                        | 0,300                        | 0,222                        |
| 0,50       | 0,455                        | 0,440                        | 0,478                        | 0,340                        | 0,250                        |
| 1,00       | 0,475                        | 0,482                        | 0,472                        | 0,370                        | 0,250                        |
| 1,50       | 0,520                        | 0,531                        | 0,562                        | 0,375                        | 0,255                        |
| 2,00       | 0,560                        | 0,568                        | 0,572                        | 0,380                        | 0,260                        |
| 3,00       | 0,615                        | 0,594                        | 0,603                        |                              |                              |
| 4,00       | 0,590                        | 0,589                        | 0,598                        |                              |                              |
| 5,00       | 0,570                        | 0,600                        | 0,618                        |                              |                              |

მცირე პულსაციაც კი 3 დარტყმა 2 წამში 1 მმ ამპლიტუდით პრაქტიკულად აგვარებს გარე წინაღობის პრობლემას და ორჯერ აჩქარებს პროცესს. ავლნიშნოთ, რომ პულსაციის გაძლიერება არ ცვლის ექსტრაქციის პროცესის დაჩქარებას. ჩვენს მიერ დამუშავებული პულსატორი არ საჭიროებს მემბრანას, პულსაცია ხორციელდება პულსატორის ელექტრომაგნიტის გულანის საშუალებით.

ყოველგვარი თვალსაზრისით უფრო მოსახერხებელია ექსტრაგენტის ცირკულაცია ტუმბოთი, ჩვენს მიერ გამოცდილი იქნა ეს მეთოდი იგივე ნედლეულზე. ცდები ჩატარდა რამოდენიმე სიჩქარეზე.

ექსტრაჰირებული ნივთიერებების შემცველობის ცვლილება ექსტრაქტში ნაჩვენებია ცხრ.2-ში.

სხვადასხვა სიჩქარით ექსტრაგენტის ცირკულაციის გავლენა წონასწორული კონცენტრაციის დამყარების დროზე

| დრო, სთ | V=0,28მმ/წმ | V=1,2მმ/წმ | V=0,28მმ/წმ | V=0,28მმ/წმ |
|---------|-------------|------------|-------------|-------------|
| 0,25    | 0,430       | 0,427      | 0,258       | 0,228       |
| 0,50    | 0,467       | 0,484      | 0,302       | 0,250       |
| 1,00    | 0,513       | 0,542      | 0,378       | 0,252       |
| 1,50    | 0,568       | 0,578      | -           | -           |
| 2,00    | 0,601       | 0,593      | 0,370       | 0,263       |
| 3,00    | 0,605       | 0,516      | 0,374       |             |
| 4,00    | 0,589       |            |             |             |
| 5,00    | 0,600       |            |             |             |

ცდებით დადგინდა, რომ სითხის დაბალი სიჩქარით მოძრაობის დროსაც კი პრაქტიკულად იხსნება გარე წინააღმდეგობა. აქაც წონასწორობა მყარდება 3 საათში, როგორც პულსაციის და ინტენსიური მორევის დროს. 4-ჯერ სიჩქარის გაზრდა არ იწვევს ცვლილებებს, საკმარისია სითხის დაბალი სიჩქარით მოძრაობა რათა მოიხსნას გარე წინააღმდეგობა.

როგორ უნდა განვსაზღვროთ ექსტრაქციის დრო ცირკულაციის გამოყენებით. როგორც ვიცით ცირკულაცია ამცირებს გარე წინააღმდეგობას და ექსტრაქციის სიჩქარე განისაზღვრება შიგა წინააღმდეგობით, ამ დროს მიღწეული წონასწორობა შეიძლება შეედაროს ექსტრაქციას ნედლეულის მორევით. მეთოდიკა შემდეგში მდგომარეობს: ჩავტვირთოთ ნედლეული, დავასხათ გამხსნელი ისეთი რაოდენობით, რომ შესაძლებელი იყოს მისი თავისუფლად მორევა. ექსტრაქციის დროს ავიღოთ სინჯები ნივთიერებებისა რომლებიც იქნება გამოღებული ნედლეულიდან. ამ მონაცემებით ავაგოთ ექსტრაქციის იზოთერმა, რომლითაც განისაზღვრება ექსტრაქციის დრო, ან განვსაზღვროთ განტოლების მუდმივა

$$\lg \frac{x_H - x_p}{x - x_p} = K\tau + b$$

შემდეგ მიახლოების მეთოდებით წონასწორობის მიღწევისათვის დავადგენთ ექსტრაქციის დროს ყოველი კონკრეტული ნედლეულისათვის.

## 2.5. საექსტრაქციო დანადგარის საექსპლუატაციო-ლაბორატორიული გამოკვლევების შედეგები

### 2.5.1. ექსტრაქციის ხანგრძლივობის გავლენა ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე

დამუშავებული საექსტრაქციო დანადგარის მუშაობის ეფექტურობის დასადგენად ექსტრაქციას დაექვემდებარა ჩაის ბუნებრივად გამშრალი მწვანე ფოთოლი. ორგანული გამხსნელით (ტრიქლორეთილენი) ექსტრაქციის შემდეგ დარჩენილი ე.წ. "ჩაის შროტი", შეიცავს სამრეწველოდ მნიშვნელოვანი რაოდენობით კატექინების კომპლექსს.

ლაბორატორიულ პირობებში 4 %-მდე გამშრალ ჩაის შროტს ვუტარებდით ექვს საფეხურიან ექსტრაქციას წყლით, თითოეული საფეხურის ხანგრძლივობით 10 წთ.

ყოველ საფეხურზე დაცული იყო მასური თანაფარდობა – წყალი/შროტი 3:1.

ექსტრაქციის ტემპერატურა შეადგენდა  $70 \pm 5$  °C-ს. ექსტრაქციას ექვემდებარებოდა შროტი ჩაის საწყის ნედლეულში ნაზი ფრაქციის სხვადასხვა შემცველობით. თითოეული საფეხურის შემდეგ ვსაზღვრავდით ექსტრაქტული ნივთიერებების, ფენოლური ნაერთებისა და ჯამური კატექინების რაოდენობებს. ექსპერიმენტის შედეგები მოყვანილია ცხრ.3-ში.

ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობის დამოკიდებულება ექსტრაქციის ხანგრძლივობაზე ( $H_1 = 85\%$ )

| ექსტრაქციის<br>საფეხურები | ექსტრაქციის<br>ხანგრძლივობა<br>$\tau$ , წთ | ექსტრაქტული<br>ნივთიერებები,<br>$\Xi_1, \%$ | ფენოლური<br>ნაერთები,<br>$\Phi_1, \%$ | კატექინების<br>ჯამი,<br>$K_1, \%$ |
|---------------------------|--|---|---------------------------------------|-----------------------------------|
| I                         | 10   | 23,5  | 9,8                                   | 2,0                               |
| II                        | 20   | 29,4  | 15,4                                  | 7,1                               |
| III                       | 30   | 32,1  | 17,3                                  | 8,8                               |
| IV                        | 40   | 33,4  | 18,2                                  | 9,6                               |
| V                         | 50   | 34,2  | 18,8                                  | 10,2                              |
| VI                        | 60   | 34,8  | 19,1                                  | 10,5                              |

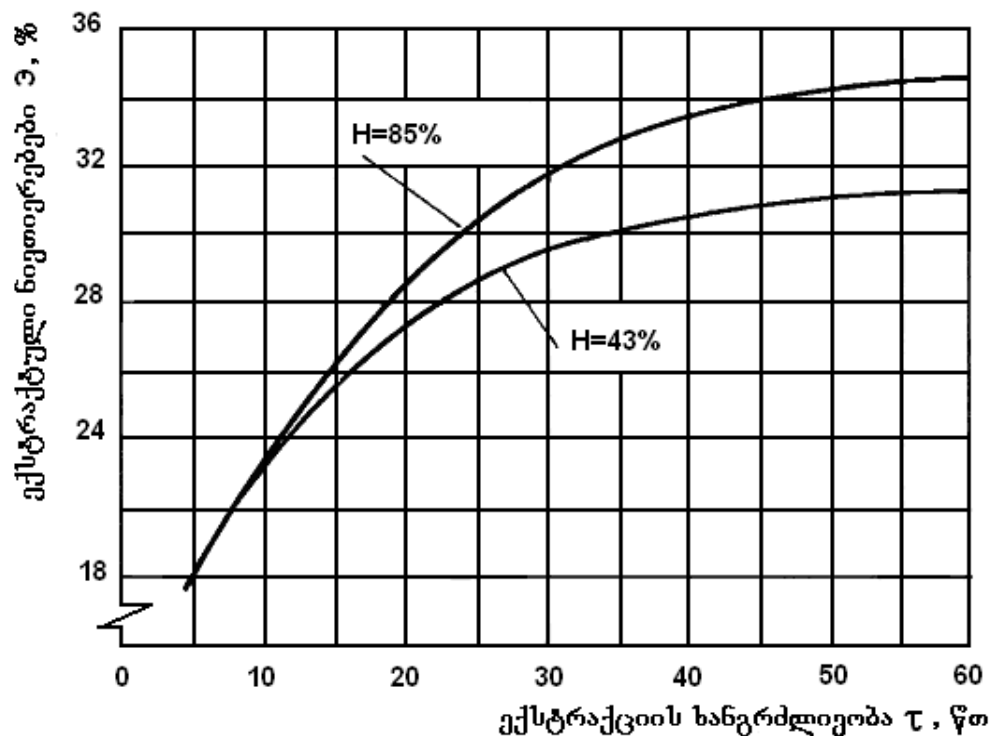
ჩაის შროტიდან ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების წყლით ექსტრაქციის ლაბორატორიული გამოკვლევების შედეგები და მათი გრაფიკული ინტერპრეტაცია საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ შემდეგი მნიშვნელოვანი დასკვნები:

– ექსტრაქციის პროცესის ხანგრძლივობის გაზრდით იზრდება, როგორც ექსტრაქტული ნივთიერებების (ნახ.16), ისე ფენოლური ნაერთების (ნახ.17) გამოსავლიანობა, მაგრამ ზრდის ტემპი განსაკუთრებით მაღალია ექსტრაქციის პირველი 30 წუთის განმავლობაში. 60 წუთიანი ექსტრაქციის შემდეგ აღნიშნული ნივთიერებების გამოსავლიანობის ზრდას პრაქტიკულად ადგილი აღარ აქვს. ეს, განსაკუთრებით, შედარებით დაბალი ხარისხის საწყისი ნედლეულის შროტს ეხება;

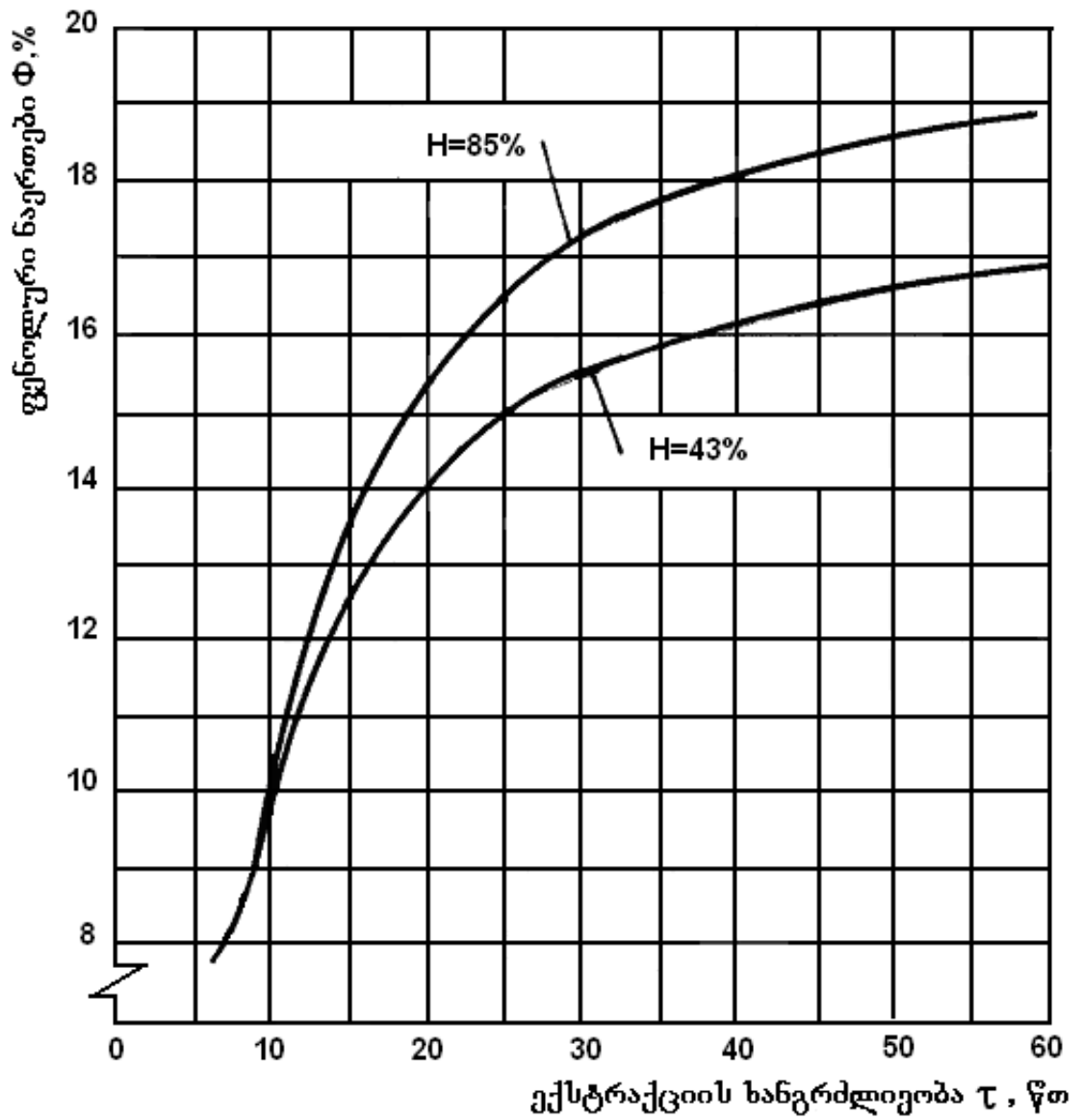
– ექსტრაქციის პროცესის ხანგრძლივობის გაზრდით, როგორც მოსალოდნელი იყო, ჯამური კატექინების გამოსავლიანობა იზრდება (ნახ.18). შესაბამისად იზრდება ექსტრაქტის ანტიოქსიდანტური აქტიურობა (ნახ.19). ამასთან, თუ ჯამური კატექინების გამოსავლიანობას 60 წუთიანი

ექსტრაქციის შემდეგ კიდევ აქვს ზრდის ტენდენცია, ანტიოქსიდანტური აქტიურობა იზრდება პირველი 20...25 წუთის განმავლობაში, რის შემდეგაც პრაქტიკულად მუდმივი რჩება;

საწარმოო ექსპერიმენტის დაგეგმვისა და რეალიზაციის დროს ექსტრაქციის პროცესის ხანგრძლივობისათვის ნულოვან დონედ მიზანშეწონილია ავიღოთ 60 წუთი, ხოლო ვარირების ინტერვალად – 10 წუთი. აღნიშნულ დიაპაზონში როტატაბელური დაგეგმვის მატრიცის რეალიზაციის შემთხვევაში (ხანგრძლივობის სრული ინტერვალი შეადგენს 40-80 წთ) შესაძლებელია მოიძებნოს როგორც ექსტრაქტულ ნივთიერებების, ფენოლური ნაერთების, ჯამური კატეხინების გამოსავლიანობის, ასევე ანტიოქსიდანტური აქტიურობის და პროცესზე გაწეული ენერგოდანახარჯების შესაძლო ოპტიმალური მნიშვნელობები.

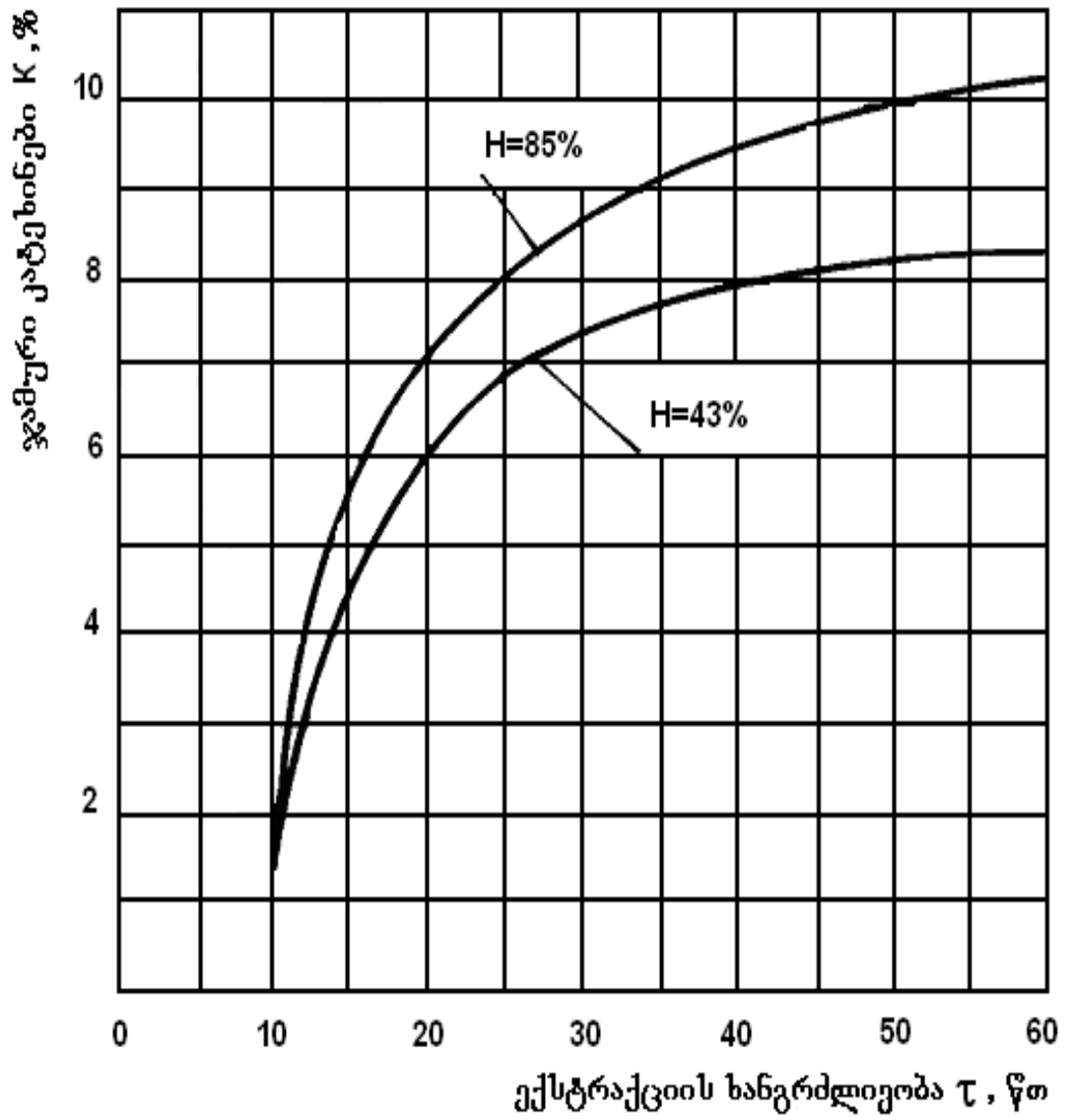


ნახ.16. ჩაის შროტიდან ექსტრაქტული ნივთიერებების გამოსავლიანობის დინამიკა

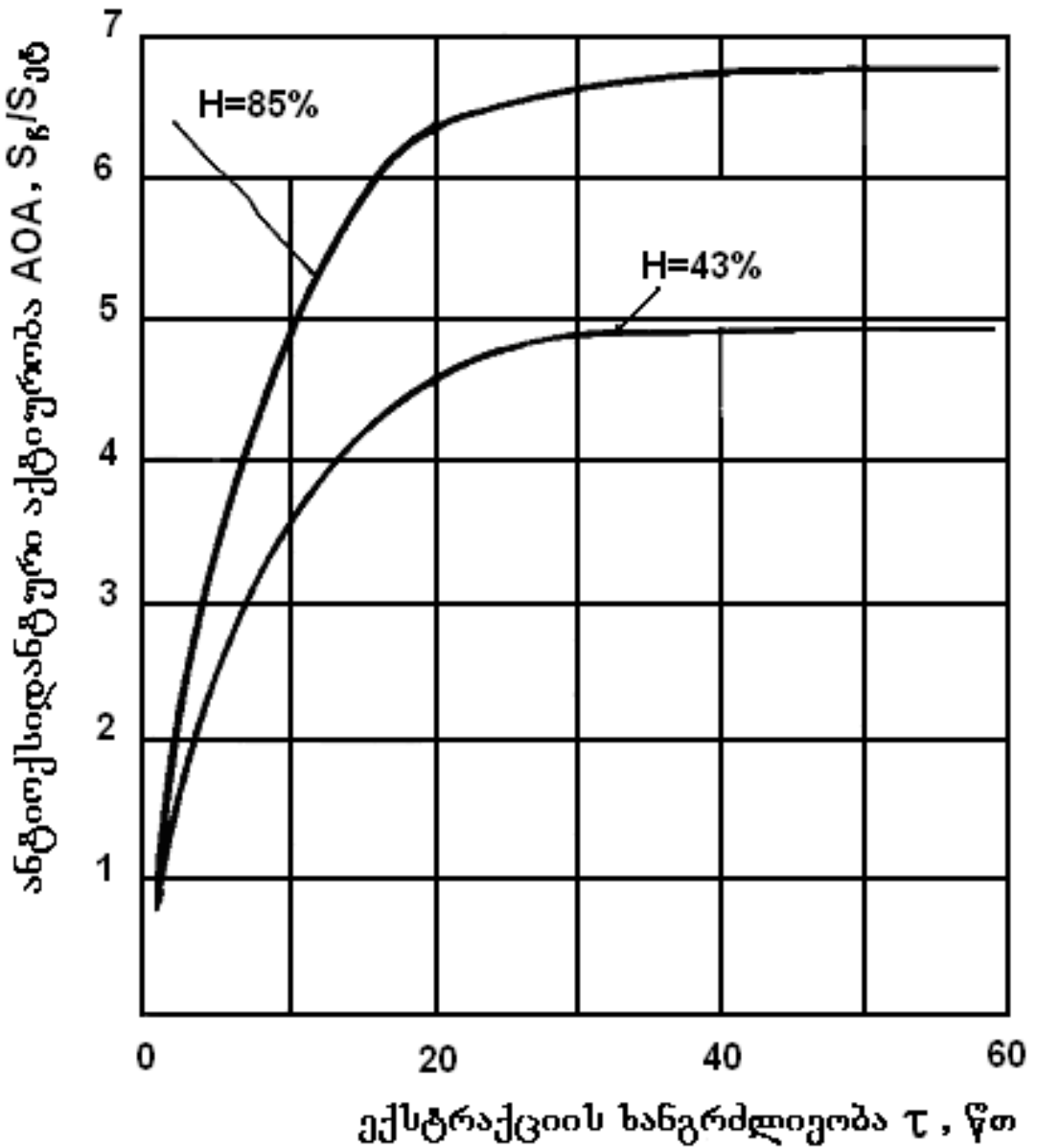


ნახ.17. ჩაის შროტიდან ფენოლური ნაერთების გამოსავლიანობის დინამიკა





ნახ.18. ჩაის შროტიდან ჯამური კატეხინების გამოსავლიანობის დინამიკა



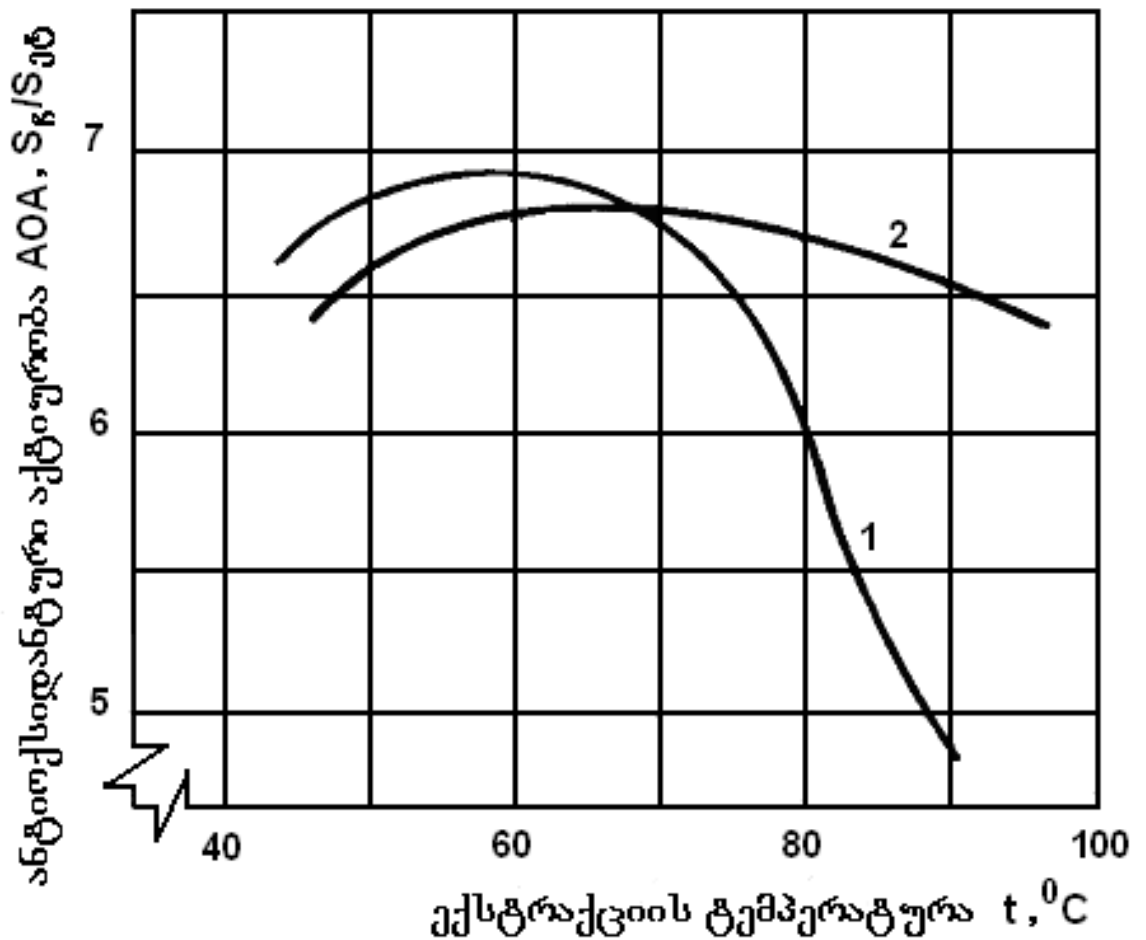
ნახ.19. ჩაის შროტის ექსტრაქტის ანტიოქსიდანტური აქტივობის ცვალებადობის დინამიკა (3%-იანი ექსტრაქციისათვის)

### 2.2.2. ექსტრაქციის ტემპერატურის გავლენა ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე

გამომშრალ ჩაის შროტს ექსტრაქციას ვუტარებდით 60 წუთის განმავლობაში, როცა მასური თანაფარდობა შროტსა და წყალს შორის

შეადგენდა 1:8-ს ექსტრაგენტის ტემპერატურას ვცვლიდით 50–დან 95 °C – მდე დიაპაზონში. ექსპერიმენტის შედეგები მოცემულია ცხრ.5–ში და 6–ში.

წინასწარ შევისწავლეთ ჩაის შროტის წყლით ექსტრაქციის ტემპერატურის გავლენა ექსტრაქტის ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე, როდესაც ექსტრაქციას სხვადასხვა ხერხით ვაწარმოებდით. კერძოდ, ერთმანეთს ვადარებდით შროტის სტატიკურ, დაყენებით (მაცერაციით) ექსტრაქციისა და დინამიკურ, პერიოდული არევით სხვადასხვა ტემპერატურაზე ექსტრაქციის პროცესებს. ექსპერიმენტის შედეგები გრაფიკულად ნაჩვენებია ნახ.20–ზე.



ნახ.20. ექსტრაქციის ტემპერატურის გავლენა ექსტრაქტის ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე: 1 - მაცერაციით; 2 - არევით.

ცხრილი 4

ექსტრაქციის ტემპერატურის გავლენა ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე

| ექსტრაქციის ტემპერატურა, $t, ^\circ C$ | ექსტრაქტული ნივთიერებები, $\Xi, \%$ | ფენოლური ნაერთები, $\Phi, \%$ | კატექინების ჯამი, $K, \%$ |
|--|-------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 50                                     | 30,1                                | 16,30                         | 8,76                      |
| 60                                     | 31,4                                | 17,25                         | 9,27                      |
| 70                                     | 32,6                                | 17,90                         | 9,60                      |
| 80                                     | 33,5                                | 18,40                         | 9,89                      |
| 90                                     | 34,5                                | 18,75                         | 10,08                     |
| 95                                     | 35,1                                | 18,95                         | 10,19                     |

ცხრილი 5

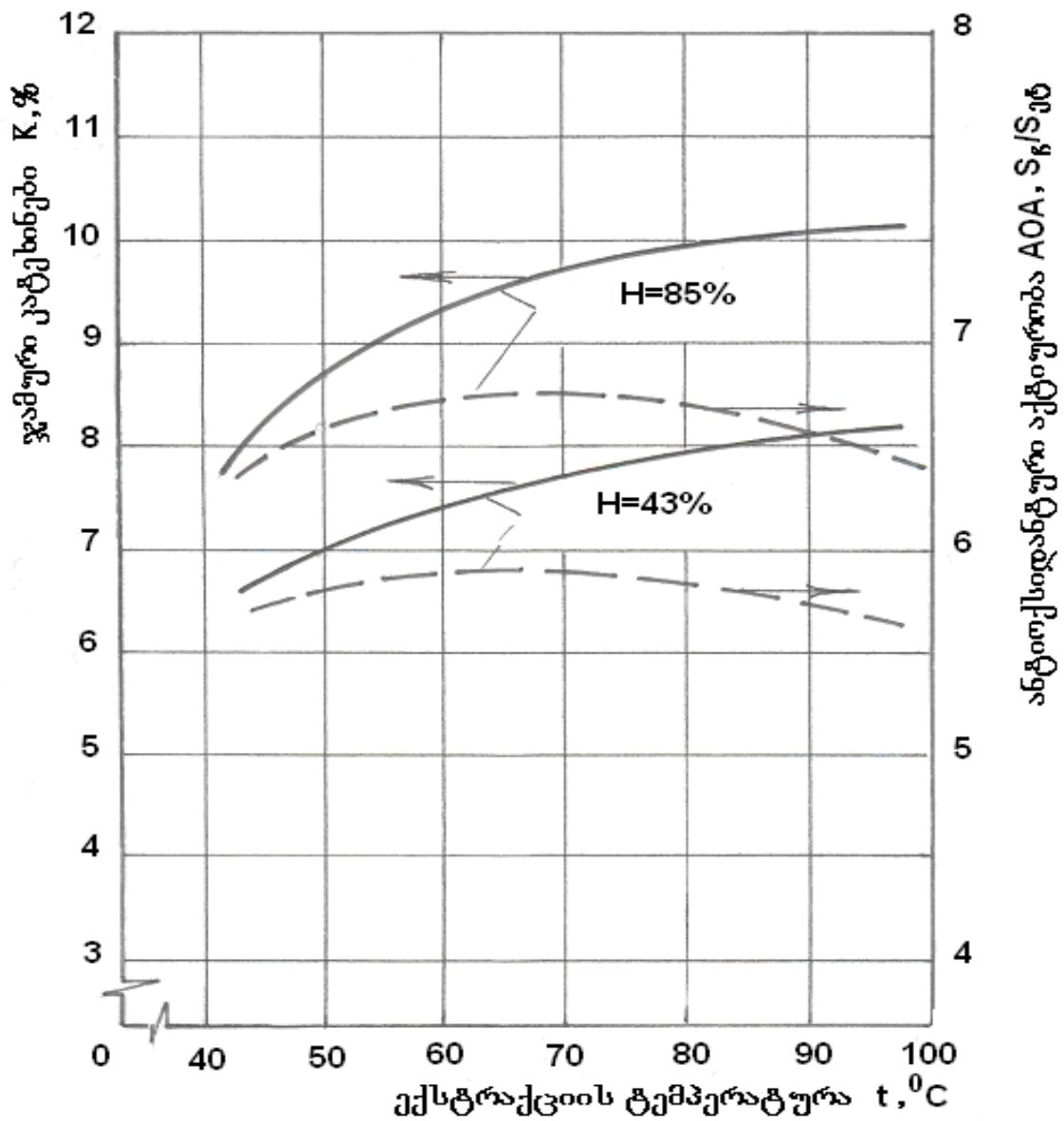
სხვადასხვა ხერხით ექსტრაქციის ტემპერატურის გავლენა ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე, როცა საწყის ნედლეულში ნაზი ფრაქციის წილია 85% (3%-იანი ექსტრაქტისათვის)

| ექსტრაქციის ხერხი | ანტიოქსიდანტური აქტიურობა $AOA S_n / S_{\text{კვ}}$ , როცა ექსტრაქციის ტემპერატურა $t, ^\circ C$ |      |      |      |      |      |
|-------------------|--|------|------|------|------|------|
|                   | 50   | 60   | 70   | 80   | 90   | 95   |
| მაცერაცია         | 6,75   | 6,90 | 6,75 | 6,00 | 4,75 | 4,25 |
| პერიოდული არევა   | 6,60   | 6,75 | 6,75 | 6,70 | 6,50 | 6,40 |

ნახ. 20 ნაჩვენებია, რომ სტატიკური ექსტრაქციის დროს ექსტრაქტის ანტიოქსიდანტური აქტიურობა ტემპერატურის გაზრდით ეცემა და უკვე  $80^\circ C$  –ზე 6–ს არ აღემატება (როცა ნაზი ფრაქციის წილი საწყის ნედლეულში

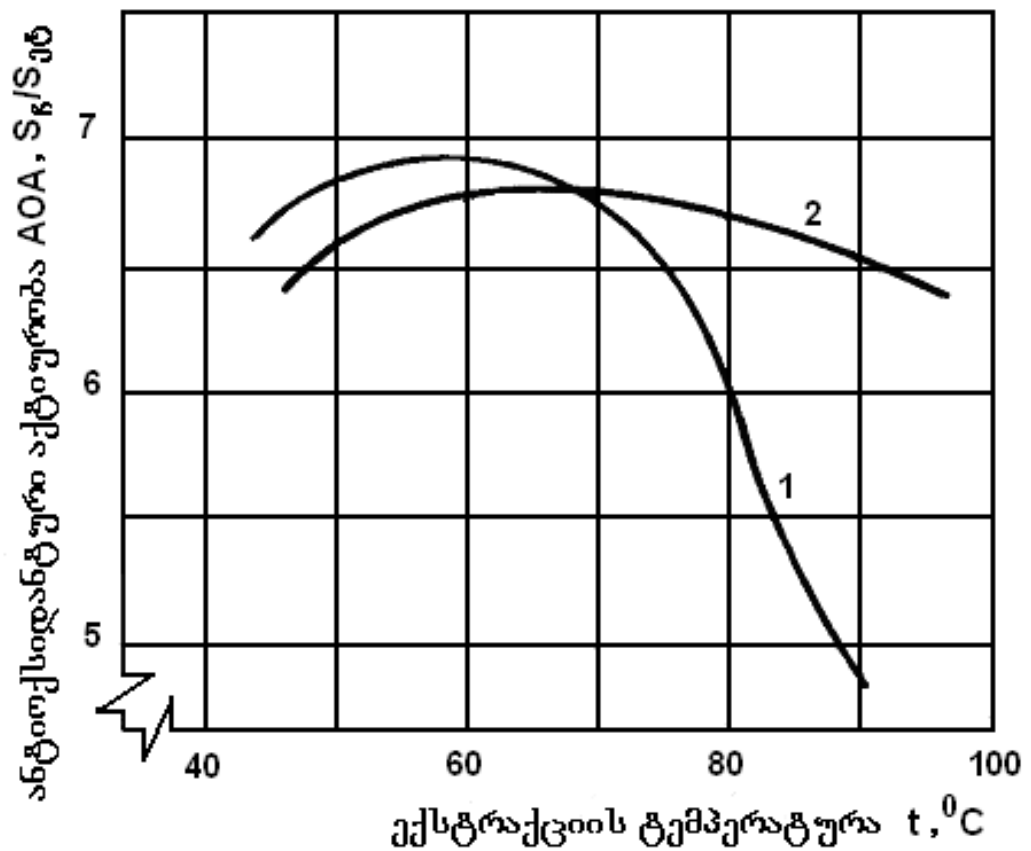
შეადგენს 85%-ს). ამასთან გასათვალისწინებელია ის ფაქტიც, რომ დაბალ 50-60<sup>0</sup>C ტემპერატურაზე მართალია ანტიოქსიდანტური აქტიურობა მაღალია, მაგრამ მნიშვნელოვნად დაბალია ექსტრაქტული ნივთიერებების, კატექინებისა და საერთოდ ფენოლური ნაერთების გამოსავლიანობა.

დინამიკური, არევიტ ექსტრაქციის პირობებში ანტიოქსიდანტური აქტიურობა ტემპერატურის ზრდით განხილულ დიაპაზონში არ იცვლება, თუმცა აქვს შემცირების ტენდენცია, კატექინების გამოსავლიანობის ზრდის ტენდენციაზე გავლენას ვერ ახდენს (ნახ.21).



ნახ.21. ექტრაქციის ტემპერატურის გავლენა კატექინების გამოსავლიანობასა და ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე

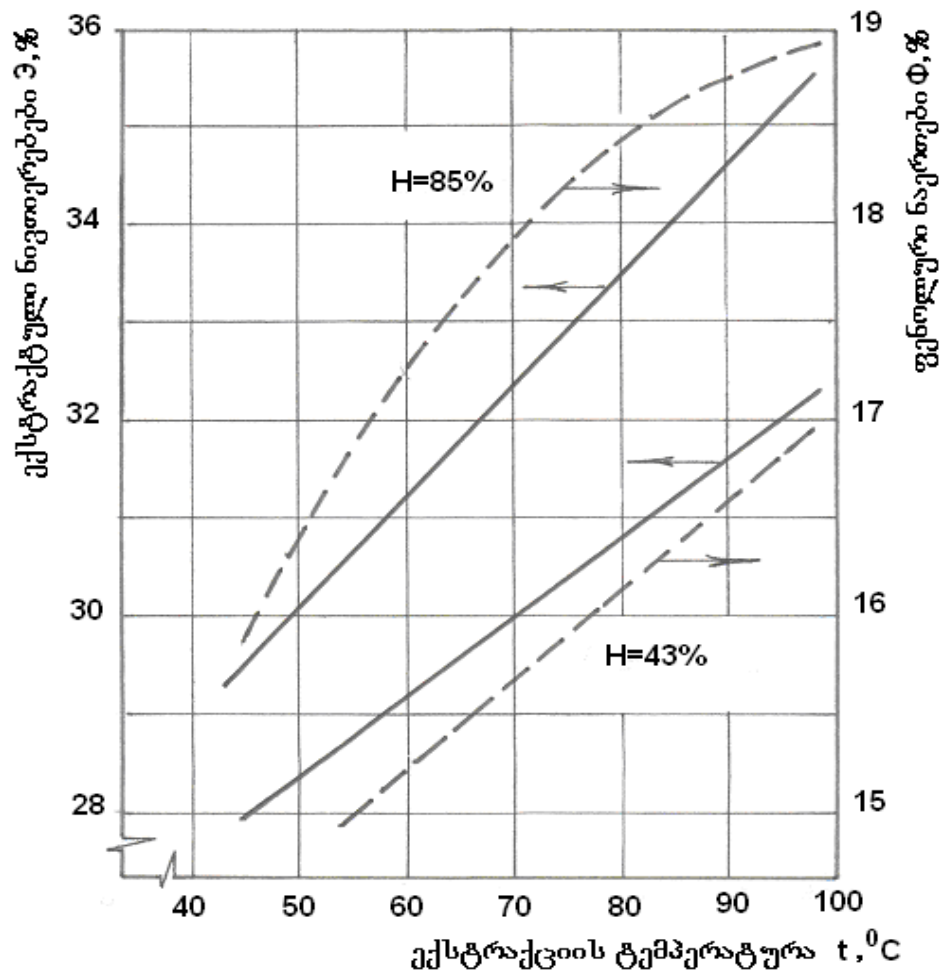
ექსტრაქციის ტემპერატურის გაზრდით, როგორც ექსპერიმენტის შედეგებიდან ჩანს, იზრდება ჯამური კატექინების რაოდენობა მიუხედავად საწყის ნედლეულში ნაზი ფრაქციის შემცველობისა. რაც შეეხება ანტიოქსიდანტურ აქტიურობას, მას საწყისი ნედლეულის ხარისხის მიხედვით მაქსიმალური მნიშვნელობა აქვს  $60...70^{\circ}C$  ტემპერატურაზე მაცერაციით ექსტრაქციისას და  $60...80^{\circ}C$ -ზე პერიოდული არევის პირობებში ექსტრაქციისას (ნახ.19).



ნახ.22. ექსტრაქციული ტემპერატურის გავლენა ექსტრაქტის ანტიოქსიდანტურ აქტიურობაზე: 1 – მაცერაციით; 2 – არევით.

ექსტრაქციის ტემპერატურის გაზრდით, როგორც მოსალოდნელი იყო, იზრდება ექსტრაქტული ნივთიერებებისა და ფენოლური ნაერთების საერთო გამოსავლიანობა (ნახ. 23). ამასთან, რაც მეტია ჩაის საწყის ნედლეულში ნაზი ფრაქციის ხვედრითი წილი, მით მეტია აღნიშნული ნაერთების გამოსავლიანობაც.

ამრიგად, ჩაის შროტის წყლით ექსტრაქციის ტექნოლოგიის დამუშავებისას მისაღებია ექსტრაქციის დინამიკური ხერხი საექსტრაქციო მასის პერიოდული არევის გზით. საწარმოო ექსპერიმენტის დაგეგმვისა და რეალიზაციის დროს ექსტრაქციის ტემპერატურის ნულოვან დონედ უნდა მივიღოთ  $70^{\circ}C$ , ხოლო ვარირების ინტერვალად –  $10^{\circ}C$ , რაც მეორე ხარისხის ცენტრალური კომპოზიციური როტატაბელური ოთხფაქტორიანი დაგეგმვის მატრიცის რეალიზაციის შემთხვევაში მოიცავს  $50$ –დან  $90^{\circ}C$  – მდე ტემპერატურების დიაპაზონს, რომელიც სავსებით მისაღებია საწარმოო ექსპერიმენტის პირობებში ოპტიმალური ტემპერატურის საძიებლად.



ნახ. 23. ექსტრაქტული ნივთიერებებისა და ფენოლური ნაერთების გამოსავლიანობის დამოკიდებულება ექსტრაქციის ტემპერატურაზე

**2.5.2. ჩაის შროტისა და წყლის თანაფარდობის გავლენა  
ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე**

გამომშრალ ჩაის შროტს ექსტრაქციას ვუტარებდით 60 წუთის განმავლობაში 70<sup>0</sup>C ტემპერატურაზე, ხოლო თანაფარდობას «წყალი/ჩაის შროტი» ვცვლიდით 5–დან 10–მდე. ექსპერიმენტისათვის გამოვიყენეთ მხოლოდ ერთი სახის ჩაის შროტი, რომლის საწყისი ნედლეულიც შეიცავდა 85% ნაზ ფრაქციას. ექსპერიმენტის შედეგები მოყვანილია ცხრ.6–ში.

ცხრილი 6.

ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობის  
დამოკიდებულება ექსტრაქციისა და წყლისა და შროტის თანაფარდობაზე

| თანაფარდობა:<br>წყალი/შროტი<br>$n$ , ლ/კგ | ექსტრაქტული<br>ნივთიერებები<br>$\varnothing$ , % | ფენოლური<br>ნაერთები,<br>$\Phi$ , % | კატეინები<br>ს ჯამი $K$ , % | ანტიოქსიდანტ.<br>აქტიურობა<br>$AOA$ , $S_{ჩაი}$<br>$/S_{ეტალონი}$ |
|---|--|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| 5   | 30,5   | 17,00                               | 8,80                        | 7,13  |
| 6   | 31,6   | 18,00                               | 9,32                        | 7,46  |
| 7   | 32,7   | 18,80                               | 9,73                        | 7,59  |
| 8   | 33,8   | 19,30                               | 10,04                       | 7,63  |
| 9   | 34,8   | 19,60                               | 10,25                       | 7,48  |
| 10  | 35,5   | 19,80                               | 10,03                       | 7,25  |

ექსპერიმენტის შედეგები გვიჩვენებენ, რომ წყლისა და ჩაის შროტის მასური თანაფარდობის ზრდა, როგორც მოსალოდნელი იყო, იწვევს ექსტრაქტული ნივთიერებებისა და ფენოლური ნაერთების საერთო გამოსავლიანობის ზრდას საკმაოდ დიდ დიაპაზონში (ნახ.23). ამასთან, ფენოლური ნაერთების გამოსავლიანობის მრუდის ხასიათი გვაფიქრებინებს, რომ მაქსიმუმი ახლოა ექსპერიმენტის ზედა ზღვართან.



თანაფარდობა «წყალი/შროტი»-ს გაზრდით იზრდება ჯამური კატეინების გამოსავლიანობაც, თუმცა ანტიოქსიდანტურ აქტიურობას აქვს ექსტრემალური (მაქსიმალური) წერტილი, რომელიც უნდა ვეძებოთ 6,5...8,5 ლ/კგ დიაპაზონში.

უკვე აღვნიშნეთ, რომ ექსპერიმენტი ჩავატარეთ ჩაის შროტზე, რომლის საწყის ნედლეულში ნაზი ფრაქციის ხვედრითი წილი 85%-ს შეადგენდა. როგორც წინა პარაგრაფებში მოყვანილი კვლევების შედეგები მოწმობენ, ექსტრაქტული ნივთიერებების, ფენოლური ნაერთებისა და ჯამური კატეინების გამოსავლიანობის ცვალებადობის ხასიათი შესაძლებელია განვავრცოთ ნებისმიერი ხარისხის ჩაის საწყისი ნედლეულის შროტზე.

ამრიგად, ჩაის შროტის წყლით ექსტრაქციის პროცესში თანაფარდობა «წყალი შროტი»-ს ნულოვანი დონე, როგორც ექსპერიმენტული მონაცემებიდან ჩანს, უნდა იყოს  $n_0 = 7,5$  ლ/კგ. თუ ამ შემთხვევაში ვარირების ინტერვალად მივიღებთ 1,0 ლ/კგ-ს.

### **2.5.3. საექსტრაქციო მასის პულსაციის გავლენა ჩაის შროტიდან ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობაზე**

ცნობილია, რომ პერიოდული მეთოდით ექსტრაქციის დროს გარე წინაღობა ხშირად მნიშვნელოვნად მოქმედებს პროცესის სიჩქარეზე. გარე წინაღობის დაძლევის უმარტივეს გზას ექსტრაქციის პროცესში საექსტრაქციო მასის პერიოდული არევა წარმოადგენს. მაგრამ ეს ყოველთვის არ არის შესაძლებელი. მცენარეული ნედლეულის საექსტრაქციო პერიოდული ქმედების ექსტრაქტორების უმეტესობა არ არის აღჭურვილი ამრევი მოწყობილობებით, ხშირ შემთხვევაში კი ექსტრაქციის პროცესში მასის არევა შეუძლებელიც კია.

ჩაის შროტის საექსტრაქციო დანადგარში შემრევი მოწყობილობა გათვალისწინებული არ არის, მაგრამ გათვალისწინებულია საექსტრაქციო მასის პულსაციის შესაძლებლობა.

გარე წინაღობის შემცირებისა და ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციის მიზნით შევისწავლეთ ექსტრაქციის პროცესში საექსტრაქციო მასის პულსაციის (რხევების) გამოყენების შესაძლებლობის საკითხი. ვიყენებდით რხევებს სიხშირით  $1,5...6,0^{-1}$ , როცა რხევის ამპლიტუდა იყო 1 მმ. უფრო დიდი ამპლიტუდის შემთხვევაში შედეგები შედარებით დაბალია და, ამავდროულად, ფერხდება საექსტრაქციო დანადგარის უსაფრთხო და გამართული მუშაობა.

ექსპერიმენტის შედეგები მოცემულია ცხრ.7–ში. ამ დროს ექსტრაქციის პროცესზე მოქმედი სხვა, ადრე განხილული ფაქტორები დაფიქსირებული იყვნენ ნულოვან, ძირითად დონეებზე. ექსპერიმენტისათვის ვიღებდით 85% ნაზი ფრაქციის შემცველი საწყისი ნედლეულის შროტს.

როგორც ექსპერიმენტის შედეგები გვიჩვენებენ, საექსტრაქციო მასის (ექსტრაგენტი+ჩაის შროტი) რხევების სიხშირის გაზრდით, სხვა თანაბარ პირობებში, ჩაის შროტის ექსტრაქტული ნივთიერებები და ფენოლური ნაერთები იზრდებიან; რაც შეეხება ანტიოქსიდანტურ აქტიურობას – ისინი ჯერ იზრდებიან, აღწევენ მაქსიმალურ მნიშვნელობას  $2...4$  წ $^{-1}$  რხევების დიაპაზონში, შემდეგ კი მკვეთრად მცირდებიან. აღნიშნული მოვლენა, ჩვენი აზრით, გამოწვეულია იმით, რომ საწყის ეტაპზე პულსაციის გავლენით ხდება კატექინების ექსტრაქციის აქტივაცია, ხოლო რხევათა სიხშირის გაზრდით  $4$  წ $^{-1}$ -ზე მეტად მართალია ფენოლური ნაერთების საერთო რაოდენობა ექსტრაქტში იზრდება, მაგრამ ამ დროს წარმოებს მათი ინტენსიური ჟანგვა, აქტიური კატექინებისა და სხვა ანტიოქსიდანტური ნაერთების რაოდენობის შემცირება.

ცხრილი 7.

ბიოლოგიურად აქტიური ნივთიერებების გამოსავლიანობის დამოკიდებულება საექსტრაქციო მასის კულსაციაზე (ამპლიტუდა 1 მმ)

| რხე<br>ვების<br>სიხშირე<br>$m, \text{წ}^{-1}$ | ექსტრაქ<br>ტული<br>ნივთიერებები<br>$\mathfrak{A}, \%$ | ფენო<br>ლური<br>ნაერთები<br>$\Phi, \%$ | კატეჯი<br>ნების ჯამი<br>$K, \%$ | ანტიოქსიდან<br>ტური აქტიურობა<br>$AOA, S_{\text{წ}} / S_{\text{კბ}}$ |
|---|---|--|---------------------------------|--|
| 1,5   | 32,9  | 18,20                                  | 9,80                            | 7,64   |
| 2,0   | 33,5  | 18,40                                  | 9,95                            | 7,76   |
| 3,0   | 33,9  | 18,60                                  | 10,05                           | 7,74   |
| 4,0   | 34,2  | 18,70                                  | 10,10                           | 7,68   |
| 5,0   | 34,5  | 18,80                                  | 10,15                           | 7,61   |
| 6,0   | 34,8  | 18,80                                  | 10,20                           | 7,61   |

ექსპერიმენტის შედეგები უფლებას გვაძლევს გავაკეთოთ დასკვნა, რომ ზოგადად, საწარმოო ექსპერიმენტის დაგეგმვის დროს რხევების სიხშირის ნულოვან (ძირითად) დონედ მიზანშეწონილია მივიღოთ  $m_0=3,0 \text{ წმ}^{-1}$ , ხოლო ვარირების ინტერვალად –  $1 \text{ წმ}^{-1}$ . ასეთ შემთხვევაში დაგეგმილი ექსპერიმენტი მოიცავს ჩვენთვის საინტერესო სიხშირეთა მთელ სპექტრს 1–დან  $5 \text{ წმ}^{-1}$ –მდე დიაპაზონში.

## დასკვნები

1. ნაჩვენებია, რომ აქტიური ჰიდროდინამიკური მოქმედების აპარატებში მცენარეულ ფოროვან ნაწილაკებზე ექსტრაჰირების პროცესი მიმდინარეობს სამ ეტაპად. პირველ ეტაპზე კაპილარული ძალების მოქმედებით ექსტრაგენტი აღწევს მსხვილ ფორებში და ხსნის ამ ფორებში არსებულ გამოსაწვლილ კომპონენტს. მეორე – კონვექტიური სტადიაა – მიზნობრივი კომპონენტის დიფუზიის სიჩქარე სატრანსპორტო ფორებში და ფორებიდან ხსნარის მოცილება შეჯერებულია. მესამე – დიფუზიური სტადია პროცესის სიჩქარე შეზღუდულია მოლეკულური დიფუზიის სიჩქარით, მიზნობრივი კომპონენტის ფოროვანი ნაწილის სიღრმიდან მის ზედაპირზე და სატრანსპორტო ფორებით;

2. შემუშავებულია მცენარეული ნედლეულის ექსტრაქციის პროცესის მესამე სტადიის – დიფუზიის მათემატიკური მოდელი. ნაჩვენებია, რომ კაპილარებში სითხის მოძრაობა პრაქტიკულად არ არსებობს და ნივთიერების გადატანა წარმოებს მოლეკულურ დიფუზიური მექანიზმით. მაგრამ გარე წნევის პულსაციის განსაზღვრული ამპლიტუდისას ან საექსტრაქციო მასის ვიბრაციისას გარკვეული სიხშირითა და ამპლიტუდით მსხვილ ფორებში შეიძლება წარმოიშვას სითხის რხევითი მოძრაობა, რაც იწვევს ექსტრაქციის ინტენსიფიკაციას;

3. წარმოდგენილი პულსაციური ექსტრაქციის აპარატი მუშაობს არარეზონანსულ რეჟიმში. ამ აპარატის დამუშავებისას დასმული იყო ორი ამოცანა, რომელიც უზრუნველყოფდა ექსტრაჰირების მაღალ სიჩქარეს. პირველი – შიგა მასათაგადაცემის გაუმჯობესებას, რომელიც რეალიზებულია ნაწილაკის კაპილარებში სითხის პულსაციის ხარჯზე. მეორე – გარე მასათაგადაცემის ინტენსიფიკაცია – რომელიც მიიღწევა აპარატში ნაწილაკების ფენის პულსაციური გაფხვიერებით. ნაწილაკების ფენის გაფხვიერების პრობლემა აქტუალურია დიდი მოცულობის აპარატებისათვის და აგრეთვე წვრილი გაჟიჟებისადმი მიდრეკილების

მქონე ნაწილაკების შემთხვევაში, როცა აპარატებში ფორმირდება ძნელადშელწევადი საცობები.

4. ჩატარებული კვლევებისა და არსებული პერიოდული ქმედების საექსტრაქციო დანადგარების ანალიზის საფუძველზე ჩვენს მიერ დამუშავდა ინოვაციური პერიოდული ქმედების საწარმოო-ექსპერიმენტული ექსტრაქტორი, რომლის კონსტრუქციაც საშუალებას იძლევა ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციის მიზნით ვამუშაოთ როგორც გამხსნელის პულსაციის, ასევე საექსტრაქციო მასის ვიბრაციის პრინციპზე;

5. აპარატის ექსპერიმენტული გამოკვლევებით სხვადასხვა მცენარეული ნედლეულისათვის დადგენილია, რომ ექსტრაქციის პროცესის ინტენსიფიკაციისთვის მიზანშეწონილია გამოვიყენოთ საექსტრაქციო მასის დაბალი სიხშირის რხევები. სხვადასხვა მცენარეული ნედლეულისათვის რხევების სიხშირის ნულოვან (ძირითად) დონედ მიზანშეწონილია მივიღოთ (3–4) წმ<sup>-1</sup>, ხოლო ვარირების ინტერვალად – 1 წმ<sup>-1</sup>, როცა რხევების ამპლიტუდა 1–3 მმ-ის ფარგლებშია;

6. დამუშავებული საექსტრაქციო დანადგარის მუშაობის ეფექტურობის დასადგენად ექსტრაჰირებას დაექვემდებარა ჩაის ბუნებრივად გამშრალი მწვანე ფოთოლი. ორგანული გამხსნელით (ტრიქლორეთილენი) ექსტრაჰირების შემდეგ დარჩენილი ე.წ. "ჩაის შროტი", შეიცავს სამრეწველოდ მნიშვნელოვანი რაოდენობით კატეჩინების კომპლექსს. ნაჩვენებია, რომ ექსტრაგენტის პულსაციის ან საექსტრაქციო მასის დაბალ სიხშირეზე ვიბრაციის გამოყენებით, სხვა თანაბარ პირობებში, ექსტრაქციის ხანგრძლივობა მნიშვნელოვნად, 4–5-ჯერ მცირდება ექსტრაქციის ცირკულაციურ მეთოდთან შედარებით.

## გამოყენებული ლიტერატურა

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 9-е изд. М.: Химия, 1973. 750 с.
2. Черняк А.С. Процессы растворения: выщелачивание, экстракция. Иркутск: Изд. Ир. ГУ, 1998. 406 с.
3. Аксельруд Г.А. Массообмен в системе твердое тело–жидкость. Львов: Изд. Львовского университета, 1970. 188 с.
4. Аксельруд Г.А., Молчанов А.Д. Растворение твердых веществ. М.: Химия, 1977. 272 с.
5. Аксельруд Г.А., Лысянский В.М. Экстрагирование (система твердое тело–жидкость). Л.: Химия, 1974. 256 с.
6. Броунштейн Б.И., Фишбейн Г.А. Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах. Л.: Химия, 1977. 279 с.
7. Вигдорчик Е.М., Шейнин А.Б. Математическое моделирование непрерывных процессов растворения. Л.: Химия, 1971. 248 с.
8. Зеликман А.Н., Вольдман Г.М., Белявская Л.В. Теория гидрометаллургических процессов. М.: Metallurgia, 1975. 504 с.
9. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л.: Химия, 1990. 385 с.
10. Романков П.Г., Курочкина М.И. Экстрагирование из твердых материалов. Л.: Химия, 1983. 256 с.
11. Рудобашта С.П., Карташов М.И. Диффузия в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1993. 209 с.
12. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
13. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. В 2-х кн. Кн. 2 / Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: Химия, 2000. С. 1393–1434.
14. Пономарев В.Д. Экстрагирование лекарственного сырья. М.: Медицина, 1976. 202 с.
15. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. Кн. 2. М.: Химия, 1995. С. 276–280.
16. Лысянский В.М., Гребенюк С.М. Экстрагирование в пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1987. 187 с.
17. Медведева В.И., Мандрыка Е.А. Пути повышения эффективности процесса экстрагирования биологически активных веществ в медицинской, микробиологической и пищевой промышленности. М.: ВНИИСЭНТИ, 1989. 63 с.
18. Crosier H.E., Brownell L.E. Washing in porous media // Ind. Eng. Chem. 1952. V. 44, N 3. P. 631–635.
19. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.

20. Товбин М.В. и др. Динамика извлечения иода из слоя силикагеля // Укр. хим. журн. 1963. Т. 19, № 2. С. 119–124.
21. Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию. М.: Химия, 1983. 264 с.
22. Термодинамика геохимических процессов: Сб. статей. М.: Издательство, 1960. 270 с.
23. Piret E.L., Ebel R.A., Kiang C.T., Armstrong W.P. Diffusion rates in extraction of porous solids. II. Two-phase extractions // Chem. Eng. Prog. 1951. V. 47, № 12. P. 628–636.
24. Берлинер Л.Б., Берлинер Л.Д. Решение задачи определения коэффициента диффузии по кинетическим данным о перемещении поверхности фронта растворения в гладкостенном капилляре // Журн. физ. химии. 1973. Т. 47, Вып. 9. С. 2357–2360.
25. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел. М.: Пищевая пром-сть, 1966. 480 с.
26. Лысянский В.М. Процесс экстракции сахара из свеклы. Теория и расчет. М.: Пищевая пром-сть, 1973. 224 с.
27. Аксельруд Г.А. Теория диффузного извлечения веществ из пористых тел. Львов, 1959.
28. Гребенюк С.М., Губиев Ю.К., Назаров С.М. и др. СВЧ-экстракция полезных веществ из растительного сырья // Изв. вузов. Пищевая технология. 1987. № 4. С.77–80.
29. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Принципы разработки новых энергосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19, № 4–5. С. 13–25.
30. Долинский А.А., Накорчевский А.И. Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии // Пром. теплотехника. 1997. Т. 19, № 6. С. 5–9.
31. Карпачева С.М., Рябчиков Б.Е. Пульсационная аппаратура в химической технологии. М.: Химия. 1983. 223 с.
32. Систер Р.Г, Мартынов Ю.В. Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов. Калуга: Изд-во Бочкаревой Н. 1998. 507 с.
33. Ультразвуковая технология / Под. ред. Б.А. Аграната. М.: Металлургия, 1974. 504 с.
34. Лобода П.П., Завьялов В.Л. // Тез. докл. Всесоюз. науч. конф. «Повышение эффективности процессов и аппаратов химических производств». Харьков, 1985.
35. Игнатьева Г.П. К расчету аппарата для выщелачивания растворимой примеси в плотном движущемся слое зернистого материала // Журн. прикл. химии. Т. 68, № 5. С. 818–821.
36. Игнатьева Г.П. Влияние пульсационного режима подачи жидкости на кинетику массообмена с твердой фазой // Журн. прикл. химии. Т. 68, № 4. С. 669–674.

37. Абиев Р.Ш. и др. Новые разработки пульсационной резонансной аппаратуры // Хим. пром-сть. 1994. № 11. С. 44–46.
38. Островский Г.М., Иваненко А.Ю., Аксенова Е.Г. О пропитке сквозных капилляров с помощью периодического изменения давления // Теор. основы хим. технологии. 1995. Т. 29, № 6. С. 607–611.
39. Абиев Р.Ш. Исследование процесса пропитки капилляров при постоянном и переменном давлении в жидкости // Журн. прикл. химии. 1994. Т. 67, № 3. С. 419–422.
40. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М: Медицина, 1983. 160 с.
41. Долинский А.А., Басок Б.И. Роторно-импульсный аппарат. 1. Импульсные эффекты локального адиабатического вскипания и кавитации жидкости // Пром. теплотехника. 1998. Т. 20, № 6. С. 7–10.
42. Долинский А.А., Басок Б.И. Роторно-импульсный аппарат. 2. Локальный импульсный нагрев жидкости // Пром. теплотехника. 1999. Т. 21, № 1. С. 3–5.
43. Долинский А.А., Корчинский А.А., Панчишин В.В. и др. Исследование динамики и изменения давления газа в аппарате для импульсного перемешивания // Пром. теплотехника. 1985. Т. 7, № 4. С. 83–41.
44. Накорчевский А.И., Гаскевич И.В. Математическое моделирование пульсационных перемешивающих устройств // Теор. основы хим. технологии. 1994. Т. 28, № 3. С. 258–267.
45. Долинский А.А. и др. Моделирование работы пульсационной установки с переменной геометрией рабочего объема // Докл. АН Украины. 1994. № 2. С. 89–94.
46. Островский Г.М., Абиев Р.Ш. Пульсационная резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных системах // Хим. пром-сть. 1998. № 8. С. 10–20.
47. Аксенова Е.Г., Абиев Р.Ш., Островский Г.М. и др. Извлечение экстрактивных веществ древесной зелени при резонансных колебательных воздействиях // Изв. вузов. Лесной журнал. 1993. № 2–3. С. 176–179.
48. Васильев С.Н., Роцин В.И., Ягодин В.И. и др. Исследование кинетических закономерностей извлечения биологически активных веществ из древесной зелени // Изв. вузов. Лесной журнал. 1994. № 5–6. С. 126–131.
49. Абиев Р.Ш. Моделирование пульсационного экстрактора U-образного типа // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2000. № 8. С. 11–14.
50. Абиев Р.Ш., Островский Г.М. Моделирование процесса экстрагирования из капиллярно-пористой частицы с бидисперсной структурой // Теор. основы хим. технологии. 2001. Т. 35, № 3. С. 270–275.
51. Абиев Р.Ш. Исследование процесса экстрагирования из капиллярно-пористой частицы с бидисперсной структурой // Журн. прикл. химии. 2000. Т. 74, № 5. С. 754–761.
52. Мясников В.Ю. и др. Экстрагирование лекарственного растительного сырья в пульсационном режиме // Тез. международного съезда



«Актуальные проблемы создания новых лекарственных препаратов природного происхождения». СПб.: Изд. Сангик. 2001.

53. Агронат Б.А., Кириллов О.Д. Ультразвук в гидрометаллургии. М.: Металлургия. 1969. 250 с.

54. Гершал В.А., Фридман А.М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. М.: Энергия. 1976. 319 с.

55. Гистлинг А.М., Барам А.А. Ультразвук в процессах химической технологии. Л.: Госхимиздат. 1960. 96 с.

56. Кардашев Г.А., Михайлов Н.Е. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты. М.: Машиностроение. 1973. 239 с.

57. Хитерхеев С.К., Хитерхеева Н.С. Кавитационные тепломассообменные аппараты. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ. 1999. 141 с.

58. Молчанов Г.И. Ультразвук в фармации. М.: Медицина, 1980. 176 с.

59. Казуб В.Т., Денисенко О.Н., Кудимов Ю.Н. и др. Экстракция биологически активных соединений из растительного сырья импульсными электрическими разрядами. М.: ГНИИЭМП. Вып. 3. Серия «Химико-фармацевтическое производство». 1998. 27 с.

60. Наугольник К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде (гидродинамическое описание). М.: Наука, 1971. 190 с.

61. Ломачинский В.А. Экстрагирование с промежуточным отжимом растительного сырья. М.: АгроНИИТЭИПП. 1995. 24 с.

62. Печерский П.П. Исследования по оптимизации технологии лекарств аптечного производства и совершенствование механизации трудоемких процессов работы: Автореф. дис. ... фарм. наук. Харьков, 1992. 54 с.

63. Белобородов В.В. и др. // Тепломассообмен. ММФ: Тез. докл., секция II. Минск, 1988. С. 16–18.

64. Rotenberg H. // Microwave power symposium. Monaco, 1979. P. 74–76.

65. Саканян Е.И. Разработка составов, технологии и методов анализа лекарственных препаратов из растительного сырья: Автореф. дис. ... фарм. наук. СПб., 1996. 48 с.

66. Белобородов В.В. Экстрагирование из твердых материалов в электромагнитном поле сверхвысоких частот // Инж.-физ. журн. 1999. Т. 72, № 1. С. 141–146.

67. Полькин С.И. и др. Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. М.: Наука, 1982. 288 с.

68. Богоришвили Е.Д., Абаджиди И.И. Опыт внедрения шнекового экстрактора непрерывного действия в производстве кофеина из чайного формовочного материала // Мед. пром-сть СССР. 1963. № 5. С. 40–42.

69. Пляшкевич А.М., Антошина В.А. Применение непрерывно-действующей аппаратуры для экстракции глюкоалкалоидов из растения паслен дольчатый // Мед. пром-сть СССР. 1964. № 10. С. 25–29.

70. Малышев Р.М., Золотников А.Н., Седов А.А. и др. Повышение эффективности экстракционных процессов за счет использования пульсационной технологии // Изв. высш. учеб. заведений. Сер. химия и хим. технология. 2001. Т. 44, № 1. С. 141–142.
71. Малышев Р.М., Кутепов А.М., Золотников А.Н. и др. Процессы пульсационной экстракции из растительного сырья // Теор. основы хим. технологии. 2001. Т. 35, № 1. С. 57–60.
72. Абиев Р.Ш. и др. Новые разработки пульсационной резонансной аппаратуры для жидкофазных систем // Хим. пром-сть. 1994. № 11. С. 44–46.
73. Белоглазов И.Н. Твердофазные экстракторы (инженерные методы расчета). М.: Атомиздат, 1998. 192 с.
74. Карпачева С.М. и др. Основы теории и расчета горизонтальных аппаратов и пульсаторов. М.: Атомиздат, 1981. 192 с.
75. Абрамов В.Я., Еремин Н.И. Выщелачивание алюминатных спеков. М.: Metallurgia, 1976. 208 с.
76. Еремин Н.И. и др. Процессы и аппараты глиноземного производства. М.: Metallurgia, 1980. 360 с.
77. Раков Э.Г., Хаустов С.В. Процессы и аппараты производств радиоактивных и редких металлов. М.: Metallurgia, 1993. 384 с.
78. Вольдман Г.М., Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов. М.: Metallurgia, 1993. 400 с.
79. Боровикова С.А. и др. К вопросу интенсификации процесса экстракции // Тез. междунар. съезда «Актуальные проблемы создания новых лекарственных препаратов природного происхождения». СПб.: Изд. Сангик. 2001.
80. Голицын В.П. и др. Математическая модель экстракции из пористых материалов с использованием вакуум импульсной технологии // Тр. / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Вып. 4. Барнаул: Изд. Алт. ГТУ, 1995. С. 201–208.
81. Турецкова В.Ф., Голицын В.П., Мосуор С.Н. и др. Сравнительное изучение возможности применения стандартной и импульсно-вакуумной технологии для получения сухого экстракта крапивы // Тр. / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Вып. 4. Барнаул: Изд. Алт. ГТУ, 1995. С. 218–225.
82. Голицын В.П., Турецкова В.Ф., Колбин Г.Л. и др. Исследования по получению сухого водорастворимого экстракта плодов шиповника способом импульсно-вакуумной технологии // Тр. / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Вып. 4. Барнаул: Изд. Алт. ГТУ, 1995. С. 226–228.
83. Голицын В.П., Стенникова М.Ф., Бочкарев Е.Ю. и др. Интенсификация экстракции низкомолекулярных соединений поликапроамидной крошки // Тр. / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Вып. 4. Барнаул: Изд. Алт. ГТУ, 1995. С. 239–244.
84. Абрамов А.Я., Голицын В.К., Молокеев В.А. и др. Способ экстрагирования материалов. Пат. 2163827. РФ, МПК В01 D11/02. № 98113349/12; Заявл. 06.07.1998. Опубл. 10.03.2001.

85. Малышев Р.М., Кутепов А.М., Золотников А.Н. и др. Влияние наложения поля низкочастотных колебаний на эффективность экстрагирования и математическая модель процесса // Докл. АН СССР. 2001. Т. 381, N 6. С. 800.
86. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.
87. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964, 327 с.
88. Абиев Р.Ш. Способ обработки жидкостями капиллярно-пористых частиц суспензий и аппарат для его осуществления. Пат. 2077362 РФ, Бюл. № 11, 1997.
89. Абиев Р.Ш. Контейнер для обработки жидкостями капиллярно-пористых частиц в пульсационном аппарате. Пат. 2184593 РФ, Бюл. № 19, 2002.
90. Абиев Р.Ш. Пульсационный аппарат для обработки жидкостями твердых частиц и способ его эксплуатации. Пат. 2184594 РФ, Бюл. № 19, 2002.
91. Абиев Р.Ш. Пульсационный аппарат для обработки жидкостями твердых частиц и способ его эксплуатации. Пат. 2184595 РФ, Бюл. № 19, 2002.
92. Абиев Р.Ш. Пульсационный аппарат для обработки жидкостями капиллярно-пористых частиц. Пат. 2187355 РФ, Бюл. № 23, 2002.
93. Абиев Р.Ш. Пульсационный аппарат для обработки жидкостями капиллярно-пористых частиц и способ его эксплуатации. Пат. 2188057 РФ, Бюл. № 24, 2002.
94. Абиев Р.Ш. Пульсационный аппарат для обработки жидкостями твердых частиц и способ его эксплуатации. Пат. 2205677 РФ, Бюл. № 16, 2003.
95. Абиев Р.Ш. Опыт использования силовой пневмоавтоматики в оборудовании для переработки капиллярно-пористых частиц // Гидравлика и пневматика, 2001. № 1. С. 26–28.
96. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах. Л.: Химия, 1984. 336 с.
97. Абиев Р.Ш. Резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных системах. Автореферат дисс. д. т. н. С.-Пб.: СПб Технологический институт, 2000. 40 с.