

საქართველოს განათლებისა და მეცნიერების სამინისტრო  
აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

შალვა ცაგარეიშვილი

ლუდის ფილტრაციის პროცესების დამუშავება მემბრანული  
ტექნოლოგიების გამოყენებით

ინჟინერიის დოქტორის (0409) აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად წარმოდგენილი  
დისერტაციის

ავტორეფერატი

ქუთაისი 2018 წ.

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: პროფესორი შოთა რუხაძე

რეცენზენტები: თემური ღვინიაძე, ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის პროფესორი.  
რაული გოცირიძე, აკადემიური დოქტორი, ბათუმის შოთა რუსთაველის სახელმწიფო უნივერსიტეტის აგრარული და მემბრანული ტექნოლოგიების ინსტიტუტის მთავარი მეცნიერ-თანამშრომელი

დისერტაციის დაცვა შედგება 2018 წლის \_\_\_\_\_

საინჟინრო -ტექნიკური ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს მიერ შექმნილ სადისერტაციო კომისიის სხდომაზე. მისამართი: 4600. ქუთაისი. თამარ მეფის ქ. 59, I კორპუსი აუდ. №1114.

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის ბიბლიოთეკაში მისამართზე: 4600. ქუთაისი. თამარ მეფის ქ. 59.

ავტორეფერატი დაიგზავნა “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_

(თარიღი)

სადისერტაციო საბჭოს

მდივანი ასოც. პროფესორი \_\_\_\_\_ /ნ. სახანბერიძე/

(ხელმოწერა)

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

სამუშაოს აქტუალობა. ლუდის მხარშველებისთვის, თეორიულ და პრაქტიკულ ინტერეს წარმოადგენს სასმელების მიკრობიოლოგიური და ფიზიკო-ქიმიური თვისებების სტაბილიზაცია, პროდუქტის უფრო ხანგრძლივი დროით შენახვის მიზნით. თანამედროვე ხისტი კონკურენციის პირობებში ლუდის შენახვის დროის გაზრდა გახდა აუცილებელ პირობად, მისი წარმატებით რეალიზაციისათვის. ამაში ლუდის მხარშველებს ჩვეულებრივ ეხმარება ხარისხიანი ფილტრაცია და პასტერიზაცია. ლუდის გამჭირვალობის აუცილებელი ხარისხი ტრადიციულად მიიღწევა ხარისხიანი ფილტრაციით. მოცემულ შემთხვევაში ფილტრაციის ქვეშ იგულისხმება ლუდიდან შეწონილი ნაწილაკების, საფუარის უჯრედების და მიკროორგანიზმების მოცილება.

მოთხოვნილებები, რომლებიც მოეთხოვება ჩამოსხმული ლუდის ხარისხს, აუცილებელს ხდის პროდუქტის მრავალსაფეხურიან დამუშავებას მისი ხარისხის არსებული ნიშნების შენარჩუნებით, რაც არ გაუარესდება ხანგრძლივი დროის განმავლობაში.

მართალია მოწყობილობების ყველა არსებული სახეობა კომპლექსურად სრულად აკმაყოფილებს ფილტრაციის პროცესზე წაყენებულ მოთხოვნებს, უზრუნველყოფენ ლუდის აუცილებელ ხარისხს და შენახვის ხანგრძლივობას, მაგრამ აქვთ რიგი ნაკლოვანება:

- დამხმარე მფილტრავი საშუალებების აუცილებელი საწარმოო ხარჯები;
- კონსტრუქციების და შესაბამისად ექსპლოატაციის და რემონტის სირთულე;
- ლუდის შედარებით მაღალი დანაკარგი;
- მომსახურების შრომატევადობა;
- მგრძნობელობა გასაფილტრ ლუდში მაღალ ბაქტერიულ დაბინძურებასა და მყარი ნაწილაკების კონცენტრაციაზე;
- კიზელგურის უტილიზაციის ან ხელმეორედ გამოყენების პრობლემატურობა.

ამავე დროს ფილტრაციის პროცესი ვერ უზრუნველყოფს საფუარის უჯრედების და მიკროორგანიზმების სრულ მოცილებას, რომლებიც იწვევენ მეორად

გარდაქმნებს მზა პროდუქტში, ამღვრევას ან ამჟავებას, ამიტომ მიკრობიოლოგიური მდგრადობის მისაღწევად ყველა დარჩენილი მიკროორგანიზმი ნადგურდება პასტერიზაციით, რაც დაკავშირებულია დიდ ენერგეტიკულ დანახარჯებთან და ამავე დროს ცვლის ლუდის ორგანოლექტიკურ მახასიათებლებს.

ლუდის ფილტრაციის პროცესში გადასაწყვეტი ამოცანები ხდებიან სულ უფრო მრავალფეროვანი. თუ ოცი წლის უკან მთავარი ამოცანა იყო გაუფილტრავი სასმელის გაკრიალება, დღეს საფილტრაციო განყოფილებაში ხდება ლუდის სტაბილიზაცია და კარბონიზაცია, აქ მასში შეჰყავთ დანამატები, რომლებიც ახდენენ საწყისი ბადაგის მაჩვენებლების კორექტირებას, ხდება ლუდის შერევა. ამას გარდა ქვეყნებში, რომლებზედაც არ ვრცელდება გერმანული კანონი ლუდის ხარშვის სისუფთავეზე (მისი მიხედვით ლუდის მოსამზადებლად შეიძლება გამოყენებული იქნას მხოლოდ წყალი, ალაო, სვია და საფუარი) ფილტრაციის ეტაპზე სასმელში შეიყვანება სხვადასხვა დანამატები. ლუდი წარმოადგენს რთულ სისტემას, რომლის კომპონენტების შემადგენლობა დროის მიხედვით იცვლება (პირველ რიგში, საუბარი მიდის რთულ პოლიფენოლურ და ცილოვან შენაერთებზე). როგორი შემადგენელი ნაწილიც არ უნდა მოვაცილოთ ლუდს ეს გავლენას ახდენს მის ორგანოლექტიკაზე. ფრაქციები, რომლებიც რჩებიან ცუდად გაფილტრულ ლუდში პრაქტიკულად არ ახდენენ გავლენას მის გემოზე. მაგრამ განსაზღვრული დროის გასვლის შემდეგ ისინი იწვევენ არასასურველ რეაქციებს, რომლებიც დამთრგუნველად მოქმედებენ ლუდზე.

მრავალი სპეციალისტის აზრით, სწორედ არა მაღალმა მიკრობიოლოგიურმა დისციპლინამ გახადა ასე პოპულარული ლუდის საწარმოებში პასტერიზაცია, განსაკუთრებით ბოთლებში ჩამოსხმის დროს. ის არის საშუალება მოახდინოს შემდეგ სტადიაზე ყველა შესაძლო მეორადი გარდაქმნის ლიკვიდაცია. მაგრამ პასტერიზაცია აუარესებს ლუდის გემოს. უმრავლესობა უცხოელი ექსპერტისა თანხმდება იმაზე, რომ მემბრანულ ტექნოლოგიას აქვს ყველა შანსი შეავიწროვოს კიბელგური და გავიდეს ძირითადი ტექნოლოგიის დონეზე. იმავე პროგნოზებით ეს შესაძლებელი გახდება არა უადრეს 10 წლისა.

მემბრანული ტექნოლოგიის გამოყენება ლუდის გაკრიალების პროცესში საშუალებას მოგვცემს გამოვრიცხოთ არსებული ტექნოლოგიის ყველა

წარმოდგენილი უარყოფითი მხარე და გავიდეთ სასმელების თვისებების სტაბილიზაციის პროცესის ახალ დონეზე.

**სადისერტაციო ნაშრომის მიზნები და ამოცანები.** სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს უფრო რაციონალური, ენერგო- და რესურს დამზოგი ტექნოლოგიებისა და აპარატურის ძიება, რომლებიც უზრუნველყოფენ ლუდის ეფექტურ გაკრიალებას.

დასმული მიზნის შესაბამისად გადასაჭრელია შემდეგი ამოცანები

- ლუდის როგორც კვლევის ობიექტის ძირითადი თვისებების განსაზღვრა;
- მემბრანების შერჩევის დასაბუთება და მათი თვისებების შესწავლა;
- ბარომემბრანული მეთოდით ფილტრაციის პროცესის კინეტიკისა და ჰიდროდინამიკის კვლევა;
- სუსპენზიის ნახევრად გაღწევად ტიხრებში ფილტრაციის პროცესის მათემატიკური მოდელის დამუშავება და ანალიზი, გაანგარიშების ინჟინრული მეთოდიკის შექმნა;
- კონცენტრაციულ პოლარიზაციასთან ბრძოლის მეთოდების კვლევა და მათი პრაქტიკაში რეალიზება;
- ინოვაციური მოწყობილობისა და ტექნოლოგიის დამუშავება ლუდის ეფექტური გაკრიალებისთვის.

**სამეცნიერო სიახლე.** განსაზღვრულია ლუდის „გერმანული“ სიბლანტის დამოკიდებულება მასში საფუარის უჯრედების შემცველობისაგან დამოკიდებულებით, შეფასებულია მიკროსკოპიული ნაწილაკების რაოდენობის დამოკიდებულება მათ ზომებზე, შესწავლილია მემბრანების სტრუქტურა და თვისებები, რამაც საშუალება მოგვცა წინასწარ დავგეგმოთ ფორების რაციონალური ზომა და მემბრანების ექსპლოატაციის ტექნოლოგიური პირობები.

დამუშავებულია კომპიუტერული პროგრამით კოლოიდური ხსნარების ფილტრაციის უნარის გამოკვლევა.

გამოკვლეულია ბარომემბრანული მეთოდით ლუდის ფილტრაციის პროცესის კინეტიკა და ჰიდროდინამიკა.

დამუშავდა მილისებრ მემბრანულ არხში პულსირებული წნევის მოქმედებით სითხის მოძრაობის მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს დიდი სიზუსტით

განვსაზღვროთ მემბრანის სელექციურობა პროცესის ტექნოლოგიურ პარამეტრებზე (მუშა წნევა, მემბრანის ზედაპირზე ნაკადის ტანგენციალური სიჩქარე, ტემპერატურის), მემბრანის ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე, ფილტრაციის ობიექტის რეოლოგიურ და მიკრობიოლოგიურ თვისებებზე, დისპერსული ფაზის ზომებზე და კონცენტრაციაზე დამოკიდებულებით.

**სამუშაოს პრაქტიკული მნიშვნელობა.** ლაბორატორიულ და საწარმოო პირობებში ჩატარებული კომპლექსური კვლევების საფუძველზე, ნაჩვენებია ლუდის ფილტრაციისათვის მილისებრ ელემენტებიანი მემბრანული აპარატის გამოყენების მიზანშეწონილობა.

დამუშავებულია მემბრანული მოწყობილობების კონსტრუქციები, კონცენტრაციული პოლარიზაციის დაბალი დონით, ლუდის ეფექტური გაკრიალებისთვის.

შემოთავაზებულია ტექნოლოგიური რეკომენდაციები მიკროფილტრაციის პროცესის გამოსაყენებლად და დამუშავებულია ლუდის გაკრიალების უბნის ტექნოლოგიური სქემა.

დამუშავებული მათემატიკური მოდელის საფუძველზე მოხდა სუსპენზიის მიკროფილტრაციის პროცესის გაანგარიშების ინჟინრული მეთოდის სრულყოფა, რომელიც ითვალისწინებს დისპერსული ფაზის კონცენტრაციის ცვლილებას დროში და არხის სიგრძეზე.

**სამუშაოს აპრობაცია.** სამუშაო მოხსენებულია და განხილულია სხვადასხვა დონის სამეცნიერო ფორუმებზე. შედეგები გამოქვეყნებულია ბეჭდური მასალის სახით სამეცნიერო ჟურნალებში და კონფერენციების შრომათა კრებულებში.

**გამოქვეყნებული მასალები:** დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია ხუთი ნაბეჭდი სამუშაო. მათ შორის ორი - საერთაშორისო რეფერირებად ჟურნალში.

დისერტაცია შედგება 160 ნაბეჭდი გვერდისაგან, რომელიც შეიცავს 61 ნახაზს და 12 ცხრილს; შედგება შესავალის, ხუთი თავის, დასკვნების, გამოყენებული ლიტერატურის (131 დასახელება) ჩამონათვალის და დანართისაგან.

### სამუშაოს შინაარსი

შესავალში დახასიათებულია სასმელების, ნაწილობრივ ლუდის მიკრო-

ბიოლოგიური და ფიზიკო-ქიმიური თვისებების სტაბილიზაციის თანამედროვე მდგომარეობა, დასაბუთებულია სადისერტაციო თემის აქტუალობა, სამეცნიერო სიახლე და შესრულებული კვლევების პრაქტიკული მნიშვნელობა.

პირველ თავში სისტემატიზირებულია ლიტერატურული მონაცემები ლუდის გაკრიალების ტექნიკის და ტექნოლოგიის თანამედროვე მდგომარეობაზე, აღნიშნულია ტექნოლოგიის ინტენსიფიკაციის ძირითადი შესაძლო გზები და მაღალეფექტური მემბრანული მოწყობილობების შექმნის მიმართულებები. მოყვანილია პროდუქტის დახასიათება და მისი წარმოების თანამედროვე მდგომარეობა. განხილულია ლუდის ფილტრაციის პროცესი და ფაქტორები, რომლებიც მოქმედებენ მასზე: ლუდის ფილტვრადობის შეფასება, ლუდის სტაბილიზაცია, ლუდის ფილტრაციის ხერხები, თანამედროვე მოწყობილობები ლუდის გაკრიალებისთვის.

შესწავლილია აგრეთვე გაყოფის მემბრანული მეთოდები, მემბრანების მასალა და სტრუქტურა, მემბრანული მოდულები, მემბრანული სისტემების კლასიფიკაცია, კონცენტრაციული პოლარიზაციის მოვლენები, თხევადი საკვები არეების მემბრანული დამუშავების აპარატურული გაფორმება, მიკროფილტრაციის პროცესის მათემატიკური აღწერა.

ჩატარებული ანალიზის საფუძველზე ფორმულირებულია სადისერტაციო სამუშაოს მიზნები და ამოცანები, დასაბუთებულია კვლევის ობიექტის შერჩევა, განსაზღვრულია დასმული პრობლემების გადაწყვეტის მეთოდები.

**მეორე თავში** ფილტრაციის პროცესის სამეცნიერო-პრაქტიკული ანალიზისათვის მოყვანილია მონაცემები, რომლებიც ახასიათებენ შერჩეული პროდუქტის თვისებებს და მათი განსაზღვრის მეთოდებს.

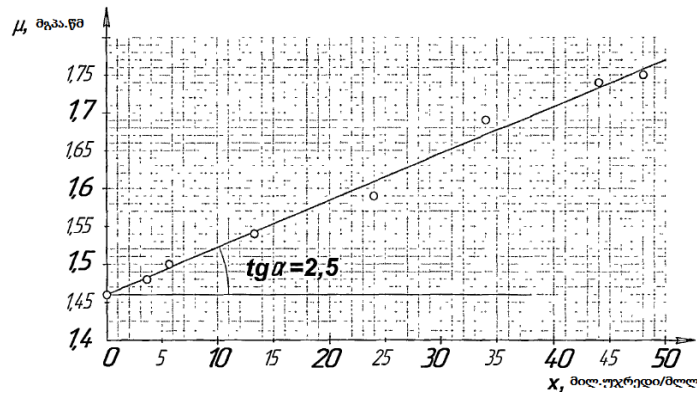
ლუდის ფილტვრადობის შესაფასებლად იყენებენ შემდეგ მეთოდებს:

- pH სიდიდის გაზომვა;
- სიცივე-ალკოჰოლური ტესტი (ხაპონის მიხედვით);
- მემბრანულ-ფილტრაციული ტესტი (ესერის მიხედვით).

გაუფილტრავი ლუდის ჩატარებული ანალიზის შედეგებით საფუვრის უჯრედების კონცენტრაცია 5,36 მილ.უჯრ./მლლ, pH სიდიდე 4,38, სიმღვრიე 78 ერთ. EBC - გამოტანილი იქნა დასკვნა, რომ ფილტვრადობა არადამაკმაყოფილებელია.

ცუდი ფილტვრადობა ჩვენთვის არ არის ნეგატიური ფაქტორი, ვინაიდან თუ ექსპერიმენტის შედეგი იქნება დადებითი, მაშინ არ უნდა აღიძრას კარგი ფილტვრადობის ლუდის გაკრიალების პრობლემა.

ვინაიდან ფილტვრადობის პროცესში სუსპენზიის კონცენტრაცია მუდმივად იცვლება, განისაზღვრა და აიგო ლუდის სიბლანტის საფუვრის უჯრედების კონცენტრაციაზე დამოკიდებულება (ნახ.1), რომელსაც ადეკვატურად აღწერს აინშტაინის განტოლება.



ნახ. 1 ლუდის სიბლანტის დამოკიდებულება საფუარის უჯრედების კონცენტრაციაზე

მემბრანების შეკავების ზღურბლის შერჩევის დროს ვსარგებლობდით ლიტერატურული წყაროების რეკომენდაციებით და გამოსაკვლევი პროდუქტის მახასიათებლებით, სახელდობრ ლუდის ნაწილაკების ფარდობითი ზომებით. ლუდის გაკრიალების დროს სცილდება შემდეგი ნივთიერებები მექანიკური მინარევი (1-60 მკმ), საფუვრები (1-13 მკმ), ბაქტერიები (0,2-5 მკმ) და კოლოიდური ნაწილაკების ( $\geq 0,1$  მკმ). ნებისმიერ შემთხვევაში არ შეიძლება დავივიწყოთ, რომ რეალური ფორები ძალიან ძლიერად განსხვავდებიან იდეალიზირებული ფორებისაგან და ამას გარდა დამტკიცებულია მემბრანის ფორებში უძრავი ან მცირედმოძრავი სითხის ფენის არსებობა, ე.ი. მემბრანის სელექციურობა დამოკიდებული იქნება გასაყოფ სისტემაში ნაწილაკების და მემბრანაში ფორების რადიუსების თანაფარდობაზე.

ამიტომ გაკეთებული იქნა დასკვნა, რომ მიზანშეუწონელია 0,1 მკმ ნაკლები შეკავების ზღურბლის მქონე მემბრანის გამოყენება, რადგანაც შეიძლება მოვაცილოთ ცილოვანი შენაერთები და სხვა ნივთიერებები, რომელთა მიერ ხდება ლუდის



ორგანოლეპტიკური და ფიზიკო-ქიმიური მაჩვენებლების ფორმირება. ამიტომ ექსპერიმენტის დასაწყისში ჩვენს მიერ გამოყენებული იქნა მემბრანები ფორის ზომებით 0,2 და 0,4 მკმ.

ცხრილი 1

კერამიკული მემბრანული ფილტრების პარამეტრები

შეკავების ზღვარი	0,2	0,4	1,2	3	5	7
გაღწევადობა წყალზე, 20°C ტემპერატურაზე მ <sup>3</sup> /მ <sup>2</sup> სთ	1,45	3,85	6,70	9,10	15	20
დასაშვები წნევა, მპა	გარანტირებული არა ნაკლებ 1					
pH დასაშვები დიაპაზონი	0-დან 13-მდე ხანგრძლივად 13-ზე მეტი ხანმოკლედ					
სელექციური ფენის სისქე, მკმ	10 დან 45 მდე					
მემბრანის ფორიანობა, %	64	66	72	78	82	84

მიღებული მონაცემების მიხედვით დამუშავებული იქნა ექსპერიმენტული დანადგარის სქემა - „ულუფოვანი“ სისტემა სრული რეცირკულაციის მექანიზმით.

აქვე განხილულია ლუდის ფილტვრადობის შესაფასებლად ჩვენს მიერ დამუშავებული ახალი მეთოდი.

ლუდის, ღვინოების, ყურძნის და სხვა ხილის წვენების კოლოიდური სუსპენზიების მიკროფილტრაციისათვის მემბრანების შესარჩევად და საწარმოო მიკროფილტრაციის პროცესის ეფექტურობის პროგნოზირებისათვის დამუშავებულია ხსნარების მემბრანებზე ფილტრაციის უნარის გამოკვლევა. შედეგები ძირითადად წარმოგვიდგება მუდმივების სახით, რომლებიც გაანგარიშებულია სხვა და სხვა დროის შუალედში მიღებული პერმეატის რაოდენობიდან გამომდინარე.

ფილტრაცია მუდმივ წნევაზე აღიწერება ოთხი სხვა და სხვა კანონით:

- სუფთა დაცობა  $k_b V = Q_0 [1 - \exp(-k_b t)]$  (2.1)

- შუალედური შემთხვევა  $k_t V = \ln[1 + k_t Q_0 t]$  (2.2)

- სტანდარტული კანონი 
$$k_s t = \frac{2t}{V} - \frac{2}{Q_0} \quad (2.3)$$

- ფილტრაცია ნალექის წარმოქმნით 
$$k_c V = \frac{2t}{V} - \frac{2}{Q_0} \quad (2.4)$$

სადაც: V –პერმეატის მოცულობა

t- დრო

$k_b$ –სუფთა დაცობის მუდმივა;

$k_i$ –ფილტრაციის შუალედური კანონის მუდმივა;

$k_c$  –ნალექის ფენის გავლით ფილტრაციის კანონის მუდმივა;

$k_s$  –მუდმივა სტანდარტული კანონით ფილტრაციისათვის;

$Q_0$ –საწყისი ხარჯი.

(პირობითად მიკროფილტრაციისთვის გამოვიყენებთ ტერმინს ფილტრაცია)

თითოეული ეს განტოლება გამოდის ფილტრაციის ფიზიკური მოდელიდან.

სუფთა დაცობა მიღებულია დაშვებიდან, რომ მემბრანა შედგება პარალელური ფორებისგან და თითოეული ნაწილაკი რომელიც აღწევს მემბრანის ზედაპირს ბლოკირებას უკეთებს ფორებს.

შუალედური კანონი მიღებულია დაშვებიდან, რომ ნაწილაკი შეიძლება დაედოს სხვა ნაწილაკს, რაც ზრდის ფორის დახშობის ალბათობას.

სტანდარტული კანონი მიღებულია დაშვებიდან, რომ ფორების მოცულობა მცირდება პერმეატის მოცულობის პროპორციულად, მათ კედლებზე ნაწილაკების დალექვის შედეგად.

სპეციალისტებისათვის უფრო ნაცნობია ფილტრაცია ნალექის წარმოქმნით, რომელიც მართალია ზრდის მემბრანის წინააღმდეგობას ნაწილაკების დაგროვებით ნალექის წარმოქმნის შედეგად, მაგრამ ნაკადის ჰიდროდინამიკით იგი შეიძლება შევინარჩუნოთ მინიმალურ დონეზე და ამისათვის ეფექტურია ჩვენს მიერ შემოთავაზებული პულსირებული წნევის გამოყენება.

რომ განვსაზღვროთ ექსპერიმენტალური მრუდისთვის უფრო შესატყვისი განტოლება, დამუშავებულია პროგრამა კომპიუტერზე გასაანგარიშებლად, რომლებიც იძლევა მუდმივებს  $k$  და  $Q_0$  ოპტიმალურს თითოეული მოდელისათვის. შემდეგ ვადარებთ ოპტიმალურ მნიშვნელობებს ექსპერიმენტის მონაცემებს. თუ ჩვენ განვიხილავთ ექსპერიმენტალურ მნიშვნელობებს ( $t_i, V_i$ ) და ( $t_i$ ) ორ წყვილს, პერმეატის

მოცულობებს გაანგარიშებულს განტოლებებით (2.1), (2.2), (2.3) და (2.4)  $k_b, k_t, k_s, k_c$  ოპტიმალური მნიშვნელობებისთვის, რომლებიც მიღებულია კომპიუტერის საშუალებით, შეიძლება ვიანგარიშოთ

$$\Delta = \sum_{i=1}^N (f(t_i) - V_i)^2 \quad (2.5)$$

სადაც: N-ექსპერიმენტალური წერტილების რაოდენობა;

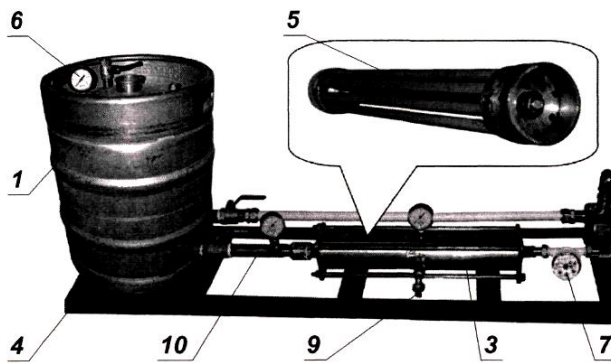
$V_i - t_i$  დროის მომენტისათვის შეგროვილი პერმეატის მოცულობა.

მაშასადამე, მოდელებიდან უკეთესი იქნება ის, რომელიც მოგვცემს

$$e = \frac{\sqrt{\Delta}}{N} \quad (2.6)$$

მინიმალურ მნიშვნელობას, რაც წარმოადგენს თითოეულ ექსპერიმენტალურ წერტილში განსახილველი მოდელის საშუალო კვადრატულ გადახრას.

მესამე თავში პროცესის რაციონალური რეჟიმული პარამეტრების სრული ანალიზისა და დასაბუთებისთვის გადმოცემულია ექსპერიმენტული დანადგარის აღწერა (ნახ.2) და ექსპერიმენტული კვლევის ჩატარების მეთოდიკა, მოყვანილია ბარომეტრული პროცესების გამოყენებით ლუდის ფილტრაციის კინეტიკის და ჰიდროდინამიკის კვლევის შედეგები.

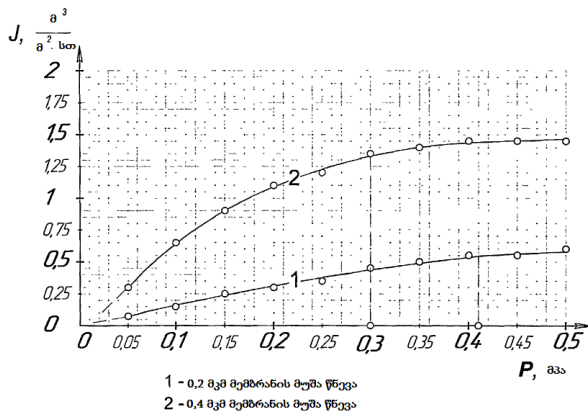


ნახ.2 ექსპერიმენტალური დანადგარი:

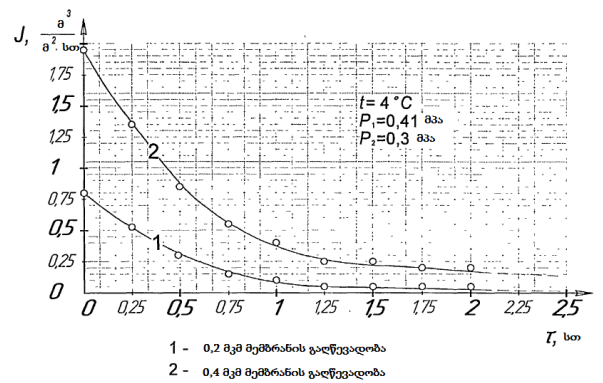
1. -ბუფერული ჭურჭელი;
- 2-ცენტრიდანული ტუმბო;
- 3-მფილტრავი აპარატი;
- 4-ჩარჩო; 5-მემბრანული მოდული; 6-მანომეტრი;
- 7-ხარჯმომი; 8-გამშვები;
- 9-მილყელი პერმეატის გამოსაყვანად; 10-რეტენტატის დასაბრუნებელი მილყელი.

ექსპერიმენტული კვლევის პირველი ეტაპი იყო 0,2 და 0,4 მკმ მემბრანების წყალგალწევადობის განსაზღვრა, რამაც საშუალება მოგვცა გაგვეკეთებინა დასკვნა, რომ მემბრანების სტაბილურობის კოეფიციენტი ტოლია 1.

შემდეგ ვსაზღვრავდით 0,2 და 0,4 მკმ მემბრანების ტექნოლოგიურ თვისებებს გამოსაკვლევ ობიექტზე - ლუდზე. ექსპერიმენტს ვატარებდით სამი საათის განმავლობაში, მიღებულ გაკრიალებულ ლუდს ვაბრუნებდით უკან ჭურჭელში. თითოეულ ცდაზე ვსაზღვრავდით მუშა წნევას (ნახ.3) და კერამიკული მემბრანების მწარმოებლობას (ნახ.4) გაუფილტრავ ლუდზე.



ნახ. 3. 0,2 და 0,4 მკმ მემბრანების გალწევადობის დამოკიდებულება ჭარბ წნევაზე



ნახ.4. 0,2 და 0,4 მკმ მემბრანების გალწევადობის დამოკიდებულება ფილტრაციის ხანგრძლივობაზე

მიღებული ფილტრატის ხარისხის შესაფასებლად კონტროლდებოდა ისეთი მაჩვენებლები როგორებიცაა ექსტრაქტულობა, სპირტის მოცულობითი წილი, მიკროორგანიზმების შემცველობა, pH, სიმღვრიე. გაუფილტრული ლუდის ანალიზის შედეგები წარმოდგენილია ცხრილში 2.

მიღებული შედეგებით გაკეთებული იქნა შემდეგი დასკვნები. 0,2 და 0,4 მკმ მემბრანებზე ფილტრაციის დროს ხდებოდა საფუვრის უჯრედების და მსხვილი ცილოვანი შენაერთების სრული მოცილება, მაგრამ 0,2 მკმ მემბრანების გამოყენების დროს იცვლებოდა ლუდის ექსტრაქტულობა და მისი ფერი. ამრიგად 0,4 მკმ მემბრანას ენიჭებოდა უპირატესობა, რადგან ის არ მოქმედებდა ლუდის ხარისხზე, სრულად აცილებდა რა ბაქტერიებსა და საფუვრის ნაწილაკებს. როგორც ჩანს მემბრანების გალწევადობა დროის მიხედვით მკვეთრად ეცემოდა და ორი საათის შემდეგ პრაქტიკულად ნულის ტოლი იყო. მაშასადამე გაკეთებული იქნა დასკვნა

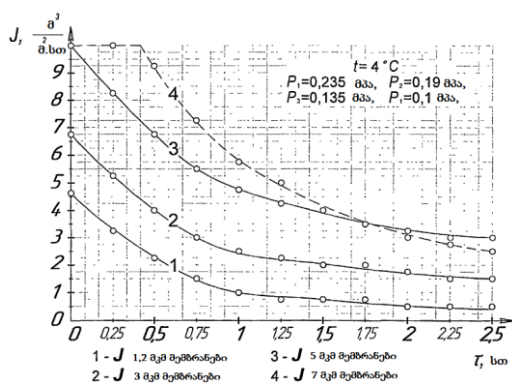
ფილტრაციის რამოდენიმე სტადიით წარმართვის აუცილებლობის, ე.ი. შეკავების ზღურბლის ვარირებით.

ცხრილი 2

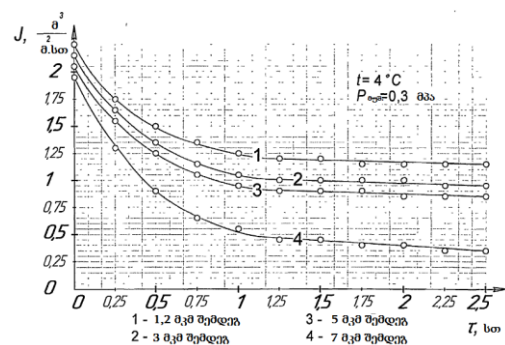
0,2 და 0,4 მკმ მემბრანებზე გაფილტრული ლუდის ანალიზის შედეგები

მაჩვენებლის დასახელება	ფორების ზომები, მკმ	
	0,2	0,4
მიკროორგანიზმების შემცველობა, მილ.უჯრედი/მლლ	არ აღმოჩენილა	არ აღმოჩენილა
pH	4,39	4,38
სიმღვრიე, ერთ	0,37	0,47
ექსტრაქტულობა, %	10,55	11
სპირტის მოცულობითი წილი, %	4	4

მიკროორგანიზმების წინასწარი მოცილებისათვის გამოყენებული იქნა მემბრანები ფორების ზომებით 7, 5, 3, და 1,2 მკმ. ექსპერიმენტს ვატარებდით ჭურჭლის გაცლამდე, მიღებულ პერმეატს ვაგროვებდით მისი შემდგომი ფილტრაციისათვის მემბრანაზე 0,4 მკმ ზომის ფორებით. შედეგად განსაზღვრული იქნა მუშა წნევა გამოკვლეული მემბრანებისათვის (7 მკმ - 0,100 მპა, 5 მკმ - 0,135 მპა, 3 მკმ - 0,190 მპა, 1,2 მკმ - 0,235 მპა) და აგებულია გალწევადობის ფილტრაციის ხანგრძლივობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი (ნახ. 5)



ნახ. 5. მემბრანების გალწევადობის დამოკიდებულება ფილტრაციის ხანგრძლივობაზე



ნახ. 6. 0,4 მკმ მემბრანის გალწევადობის დამოკიდებულება ფილტრაციის ხანგრძლივობაზე წინასწარი გაკრიალების შემდეგ

მიღებულ პერმეატს ვაფასებდით ფილტვრადობაზე (ცხრილი 3) და ვაკრიალებდით 0,4 მკმ მემბრანაზე. მემბრანის ფორის დიამეტრით 0,4 მკმ გაღწევადობის დამოკიდებულება მიკროფილტრაციის პროცესის ხანგრძლივობაზე წარმოდგენილია ნახ. 6.

ცხრილი 3.

წინასწარ გაკრიალებული ლუდის მიკრობიოლოგიური და ფიზიკო-ქიმიური თვისებები

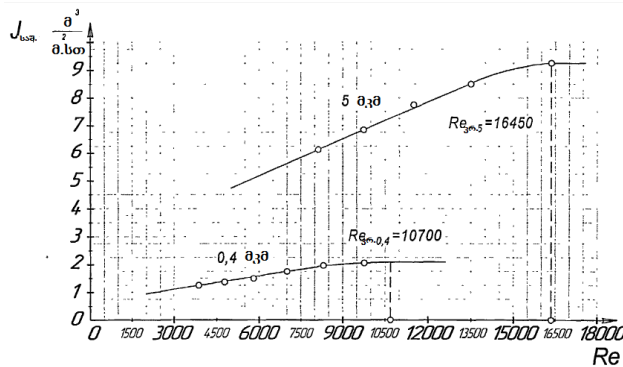
მაჩვენებლის დასახელება	ფორის ზომები, მკმ			
	1,2	3	5	7
მიკროორგანიზმების შემცველობა, მილ. უჯრ./მლ	0,6	1,02	1,38	3,1
pH	4,38	4,38	4,38	4,38
სიმღვრიე, ერთ.	0,77	1,22	1,27	1,64

როგორც მიღებული გრაფიკებიდან ჩანს, 0,4 მკმ ფორებიანი მემბრანების გაღწევადობა მემბრანებზე 5, 3, და 1,2 მკმ წინასწარი დამუშავების შემდეგ გაიზარდა თითქმის ოთხჯერ, ხოლო მემბრანის 7მკმ შემდეგ მხოლოდ ორჯერ. ჩატარებული ლუდის ანალიზების თანახმად, გაყოფის ხარისხი მემბრანებისათვის 5, 3, და 1,2 მკმ (ცხრილი 3.2) უმნიშვნელოდ განსხვავდებოდა, ამიტომ წინასწარი გაკრიალებისთვის შევირჩიეთ მემბრანა დიდი მწარმოებლობით, ე.ი. - 5 მკმ.

ძირითადი პრობლემა მემბრანული პროცესების წარმართვის დროს - ეს არის გაღწევადობის შემცირება დროის გასვლით ძირითადად მემბრანის ზედაპირზე მაღალი კონცენტრაციის ლაბა-ფენის წარმოქმნის გამო. კონცენტრაციული პოლარიზაციის ძირითად მეთოდებს შეიძლება მივაკუთვნოთ შემდეგი:

- აპარატების გამოყენება ვიწრო არხით;
- ტემპერატურის ამაღლება;
- ნაკადის ტურბულიზაცია;
- ხსნარის ნაკადის პულსაცია.

პირველი ორი მეთოდის გამოყენება მიუღებელია, ამიტომ გამოკვლეული იქნა მემბრანის ზედაპირზე ტანგენციალური სიჩქარის და დისპერსული ფაზის კონცენტრაციის გავლენა მის გაღწევადობაზე - ნახ. 7.



ნახ.7. მემბრანის გაღწევადობის დამოკიდებულება რეინოლდსის რიცხვზე

მემბრანის ზედაპირზე გელ-ფენის სრული რღვევა ხდებოდა: 0,4მკმ -  $Re_{კრ.}=10700$ , 5მკმ -  $Re_{კრ.}=16450$ .

მოცემული ტიპზომის მემბრანებისათვის რეინოლდსის რიცხვის მიღებული მნიშვნელობები შეესაბამებთან შემდეგ სიჩქარეებს: 0,4მკმ -  $v_{საშ.}=3,7$  მ/წმ, 5მკმ -  $v_{საშ.}=2,3$  მ/წმ.

მაგრამ მაღალი სიჩქარეების გამოყენებას მიყვავართ ხსნარის რეცირკულაციაზე ენერჯის დიდ ხარჯთან და ტემპერატურის მნიშვნელოვან აწევასთან. ტანგენციალური ნაკადის მაღალი სიჩქარეების ხანგრძლივმა ზემოქმედებამ შეიძლება მიგვიყვანოს ბიოლოგიურად აქტიური მაკრომოლეკულების ინაქტივაციასთან.

მილისებრ მემბრანულ აპარატში კონცენტრაციული პოლარიზაციის შესამცირებლად ავტორების [შ.შ. რუხაძე., ვ.მ. სტაროვი] ანლოგიურად, სადაც განხილულია პულსირებული წნევის მოქმედებით დინება ბრტყელ მემბრანულ არხში, ჩვენ განვიხილოთ სასაზღვრო აურევადი ფენის ცვლილება მილში, სითხის წნევათა სხვაობის პერიოდული ცვლილებით. ასეთი რხევები შეიძლება განხორციელდეს დგუშის მოძრაობით ხან ერთ და ხან მეორე მხარეს. განვიხილოთ გრძელი მილი მრგვალი განივი კვეთით. ვთქვათ  $x$  არის კოორდინატა მილის ღერძის გასწვრივ, ხოლო  $r$  რადიალური დაცილება მილის შუიდან. შეიძლება მივიღოთ, რომ განხილული მოვლენა არ არის დამოკიდებული  $x$  კოორდინატაზე, შესაბამისად  $x$  ზე არ არის დამოკიდებული მილის ღერძის გასწვრივ სიჩქარის მდგენელი  $u$ , ამ შემთხვევაში სხვა შემადგენელი სიჩქარეები ქრებიან და ნავიე-სტოქსის სამი განტოლების ნაცვლად ყოველგვარი გამარტივების გარეშე ჩვენ ვიღებთ მხოლოდ ერთ განტოლებას.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \lambda \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (3.1)$$

სასაზღვრო პირობებით  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$  როცა  $\mathbf{r} = \mathbf{R}$  (ე.ი, მილის კედლებზე).

დავუშვათ წნევის გრადიენტი იცვლება ჰარმონიული კანონით, შესაბამისად

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = K \cos nt \quad (3.2)$$

სადაც  $K$  არის მუდმივი და ამ შემთხვევაში მიზანშეწონილია შემოვიტანოთ კომპლექსური ფორმა ამ განტოლების ჩასაწერად; მაშინ მივიღებთ

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = K e^{int} \quad (3.3)$$

სადაც ფიზიკური აზრი აქვს კომპლექსური სიდიდის ნამდვილ ნაწილს.

შემდგომში სიჩქარისათვის მივიღოთ შემდეგი გამოსახულება:

$$\mathbf{u}(r, t) = f(r) e^{int}. \quad (3.4)$$

თუ  $\mathbf{u}$ -ს ამ გამოსახულებას ჩავსვამთ (1) განტოლებაში, ჩვენ მივიღებთ დიფერენციალურ განტოლებას ამპლიტუდის  $f(r)$  განაწილებისათვის

$$f''(r) + 1/r f'(r) - in/v f(r) = -K/v. \quad (3.5)$$

ამ განტოლების ამოხსნით ჩვენ ვიპოვით სიჩქარეთა განაწილებას

$$\mathbf{u}(r, t) = -\frac{K}{n} e^{int} \left[ \mathbf{1} - \frac{J_0\left(r \sqrt{\frac{-in}{v}}\right)}{J_0\left(R \sqrt{\frac{-in}{v}}\right)} \right]. \quad (3.6)$$

სადაც  $J_0$  არის ნულოვანი რიგის პირველი სახის ბესელის ფუნქცია. განტოლების (1) წრფივობის გამო ამოხსნები შეიძლება დაედოს ერთი მეორეს.

(6) ამონახსნის გამოკვლევა ზოგადი შემთხვევისთვის, ე.ი. ნებისმიერი  $n$  სიხშირისთვის, საკმაოდ გაძნელებულია, კომპლექსურ არგუმენტის ბესელის ფუნქციის არსებობის გამო. მაგრამ ზღვრული შემთხვევები ძალიან მცირე და ძალიან დიდი სიხშირეებისთვის გამოიკვლევა მარტივად.

თუ უგანზომილებო სიდიდე  $R\sqrt{n/v}$  ძალიან მცირეა, მაშინ ბესელის ფუნქციის ამონახსნის დაშლით და უკანასკნელში პირველი ორი წევრის დატოვებით, მივიღებთ

$$\mathbf{u}(r, t) = -\frac{K}{n} e^{int} \left[ \mathbf{1} - \frac{1 + \frac{in}{4v} r^2}{1 + \frac{in}{4v} R^2} \right]. \quad (3.7)$$

ან თუ ისევ გადავალთ ნამდვილი საგნობრივი ფორმით ჩაწერაზე,



$$u(r, t) = \frac{K}{4\nu} e^{int} (R^2 - r^2) = \frac{K}{4\nu} (R^2 - r^2) \cos nt. \quad (3.8)$$

შესაბამისად წნევების ნელი რხევების დროს, სიჩქარეების რხევები სრულდება წნევის რხევებთან ერთ ფაზაში და სიჩქარის რხევის ამპლიტუდა, მილის დიამეტრის გასწვრივ იცვლება პარაბოლური კანონით, ე. ი. ისე, როგორც სტაციონალური დინების დროს.

თუ უგანზომილებო სიდიდე  $R\sqrt{n/\nu}$  ძალიან დიდია (ძალიან სწრაფი რხევები), მაშინ ბესელის ფუნქციის ასიმპტოტურად დაშლით და თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ

$$J_0(z) \rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi z}} e^{iz} i^{-1/2}, \quad (3.9)$$

მაშინ გვექნება

$$u(r, t) = -\frac{iK}{n} e^{int} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{R}{r}} \exp \left[ -(1+i) \sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right] \right\}, \quad (3.10)$$

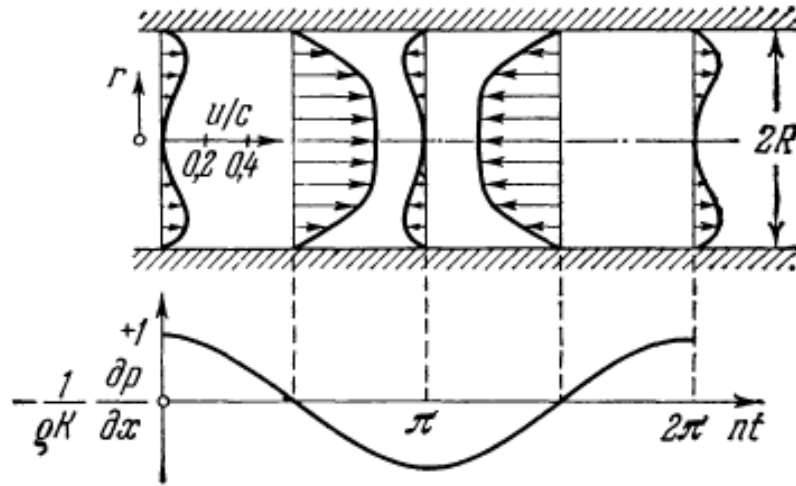
ან თუ გადავალთ ნამდვილი ფორმით ჩაწერაზე

$$u(r, t) = \frac{K}{n} \left\{ \sin nt - \sqrt{\frac{R}{r}} \exp \left( -\sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right) \sin \left[ nt - \sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right] \right\}. \quad (3.11)$$

$R\sqrt{n/\nu}$  დიდი მნიშვნელობებისთვის მეორე წევრი, ფიგურულ ფრჩხილებში კედლიდან დაცილების  $R-r$  გაზრდით სწრაფად მცირდება, ამიტომ შორს კედლიდან გავლენას ახდენს მხოლოდ პირველი წევრი, რომელიც არაა დამოკიდებული კედლიდან დაცილებაზე. შესაბამისად (3.11) ამოხსნას აქვს, სასაზღვრო ფენისათვის მახასიათებელი თვისებები. კედლიდან დიდ მანძილზე, სითხის რხევები ხდება ხახუნის გარეშე და ფაზაში, რომელიც აღმგზნები ძალის რხევის ფაზისაგან, დაძრულია პერიოდის ნახევარით.

ნახ.7 გამოსახულია მილში ოსცილირებადი დინების სიჩქარეთა პროფილი  $\left( R\sqrt{n/\nu} = 5 \right)$  საშუალო სიხშირის რხევების პერიოდის სხვადასხვა დროებში.

ქვემოთ გამოხატული წნევის გრადიენტის დროის მიხედვით ცვლილების მრუდიდან, ცხადად ჩანს მილის შუაში დინების ფაზის წინსწრება, კედლის მახლობლობაში მდებარე ფენებთან შედარებით.



ნახ.8. სიჩქარის განაწილება მილში სითხის პულსირებული დინების დროს რხევის სხვა და სხვა პერიოდში.

წნევის გრადიენტი -  $\frac{\partial p}{\partial x} = \rho K \cos(nt)$ ;  $K = R\sqrt{n/\nu} = 5c = \frac{Kk^2}{8n} = 3,125 K/n$ .

სიჩქარის ცვლილების კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა, რომელიც ძნელი არ არის დავინახოთ (3.11) ფორმულიდან, ტოლია

$$\overline{u^2(r)} = \frac{R^2}{2n^2} \left\{ 1 - 2 \sqrt{\frac{R}{r}} \exp \left[ -\sqrt{\frac{n}{2\nu}}(R-r) \right] \cos \left[ \sqrt{\frac{n}{2\nu}}(R-r) \right] + \frac{R}{r} \exp \left[ -2\sqrt{\frac{n}{2\nu}}(R-r) \right] \right\}. \quad (3.12)$$

თუ დავცილება კედლიდან  $y = R - r$  მცირეა,  $R$  რადიუსთან შედარებით, მაშინ ფარდობა  $R/r$  მიახლოებით ტოლია ერთის. მაშინ თუ შემოვიღებთ კედლიდან უგანზომილებო დაცილებას

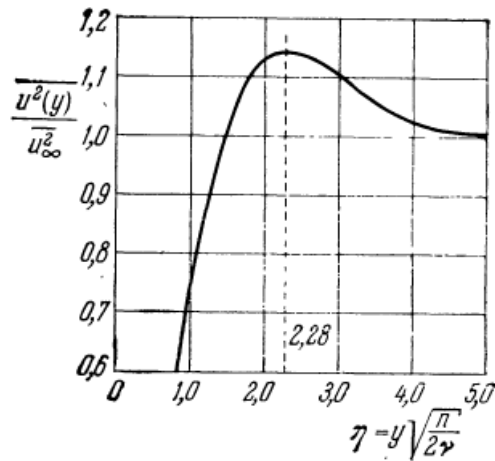
$$\eta = (R - r) \sqrt{\frac{n}{2\nu}} = y \sqrt{\frac{n}{2\nu}}, \quad (3.13)$$

წინა ფორმულიდან ჩვენ მივიღებთ

$$\frac{\overline{u^2(y)}}{K^2/2n^2} = 1 - 2 \cos \eta \exp(-\eta) + \exp(-2\eta). \quad (3.14)$$

ამ ფორმულით გამოთვლილი გასაშუალოებული სიჩქარის კვადრატის განაწილება ნაჩვენებია ნახ.9. ჩვენ ვხედავთ, რომ ამ საშუალოს მაქსიმუმი დევს არა დიდ მანძილზე კედლიდან (ე.ი. არა მილის ღერძზე), არამედ კედლის მახლობლად მანძილზე

$$\eta = y \sqrt{\frac{n}{2\nu}} = 2.28 \quad (3.15)$$



ნახ. 9. დროის მიხედვით სიჩქარის კვდრატის გასაშუალებული მნიშვნელობის განაწილება მილში სითხის პერიოდული დინების დროს. რხევის სხვა და სხვა პერიოდში.

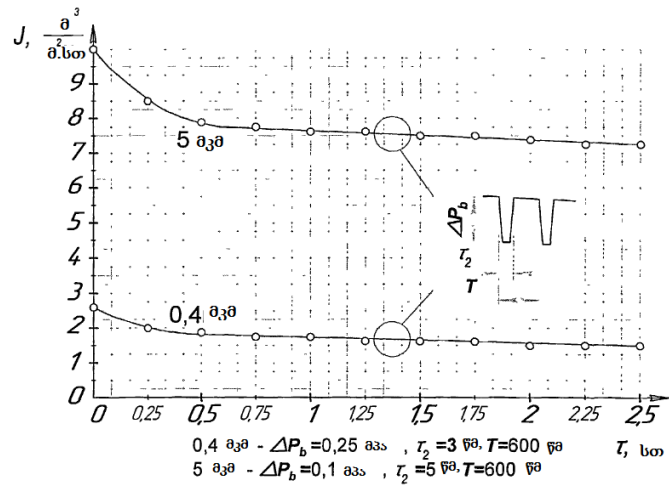
$y$  – დაცილება მილის კედლიდან;  $\overline{u^2} = K^2 / 2n^2$  -დროის მიხედვით

(ეგრეთ წოდებული რიჩარდსონის ანულიარული ეფექტი). ეს თეორიული დასკვნა კარგად ემთხვევა ე.გ. რიჩარდსონის და ე. ტაილერის გაზომვების შედეგებს.

ამიტომ ერთადერთ მეტად პერსპექტიულ მიმართულებას, ჩვენი აზრით, წარმოადგენს იმპულსური რეჟიმის გამოყენება, რადგანაც ამ მეთოდს არ აქვს ზემოდ ჩამოთვლილი ნაკლოვანებები და ადვილია პრაქტიკაში რეალიზაციისათვის.

ჩვენ შემთხვევაში გამოყენებულ იქნა პულსირებადი ნაკადი მემბრანების პერიოდული რეგენერაციით ტანგენციალური ნაკადით შემდეგი მახასიათებლებით (5მკმ):

- სიხშირე  $\nu=0,002$  ჰერცი;
- პულსაციის ხანგრძლივობა  $\tau_2=5$ წმ;
- გამჭოლობა  $\Omega=0,83\%$ ;
- ამპლიტუდა  $\Delta P_b=0,1$ მპა;
- ნაკადის სიჩქარე  $\nu_r=3$ მ/წმ.



ნახ. 10. 0,4 მკმ მემბრანის გაღწევადობის დამოკიდებულება ფილტრაციის ხანგრძლივობაზე იმპულსურ რეჟიმში

ექსპერიმენტის შედეგები წარმოდგენილია ნახ.10. რომლიდანაც ჩანს, რომ იმპულსური რეჟიმის გამოყენებამ საშუალება მოგვცა გაგვეზარდა საშუალო მწარმოებლობა 96%-ით და გამოვრიცხოთ მონალექი ფენის წარმოქმნა.

მიღებული ფილტრატის ხარისხის განსაზღვრისათვის ჩავატარეთ ლუდის ორგანოლეპტიკური შეფასება და მდგრადობის პროგნოზირება (ცხრილი 4), რამაც საშუალება მოგვცა გაგვეკეთებინა დასკვნა მიღებული გაკრიალებული ლუდის მაღალ ხარისხზე.

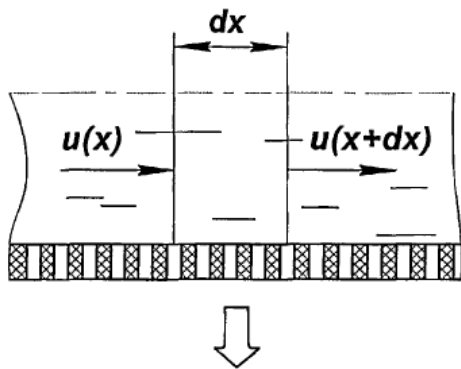
ცხრილი 4

ლუდის მდგრადობის პროგნოზირება

სიმღვრიე, ერთ.	კოლოიდური მდგრადობა, დღე ღამე	
	მაქსიმალური	მინიმალური
1,63	90	40-55

მეოთხე თავში - შემოთავაზებულია მილისებრ არხში სუსპენზიის

მიკროფილტრაციის მათემატიკური აღწერა შემდეგი დაშვებების დროს:



ნახ.11. საანგარიშო სქემა

- 1) მოძრაობა დამყარებულია,
- 2) ამოცანა ღერძსიმეტრიულია,
- 3) ამოცანა ერთმიმართულია,
- 4) ჰიდროდინამიკური სტრუქტურა ახლოსაა იდეალურ შერევისთან განივი მიმართულებით.
- 5) ჰიდროდინამიკური სტრუქტურა ახლოსაა იდეალურ გამოდევნასთან გრძივი მიმართულებით.

ამოცანის ფიზიკური დასმა საშუალებას გვაძლევს, მიღებული დაშვებების შესაბამისად, შევუდგეთ მათემატიკური მოდელის სინთეზს. ამისათვის გამოვყოთ ელემენტარული მოცულობა და ჩავწეროთ მისთვის მატერიალური ბალანსის დიფერენციალური განტოლება.

$$G(x + dx) - G(x) = -G_g(x). \quad (4.1)$$

$$u(x + dx) = u(x) + \frac{du}{dx} dx, \quad (4.2)$$

ცხადი საწყისი პირობით

$$u(0) = u_0.$$

მათემატიკური გარდაქმნის შემდეგ

$$u(x) = u_0 - \frac{2}{r} \int_0^x k(x, \tau) dx. \quad (4.3)$$

შევადგინოთ ელემენტარული მოცულობის სუსპენზიაში ნაწილაკების მიხედვით მატერიალური ბალანსი დიფერენციალური ფორმით:

$$dN = dN^+ - dN^- - dN^0. \quad (4.4)$$

სადაც  $dN^+$  - ელემენტარულ მოცულობაში ნაწილაკების რაოდენობის ცვლილება;  $dN^+$  - ელემენტარულ მოცულობაში შემავალი ნაწილაკების რაოდენობა;  $dN^-$  - ნაწი-

ლაკების რაოდენობა რომლებიც ტოვებენ ელემენტარული მოცულობას;  $dN^0$ -დალე-ქილი ან ფოროვან კედელში გამავალი ნაწილაკების რაოდენობა.

მათემატიკური გარდაქმნების შემდეგ

$$\frac{\partial n(x, \tau)}{\partial \tau} = - \left( u_0 - \frac{2}{k} \bar{k} x \right) \frac{\partial n(x, \tau)}{\partial x} + \frac{2}{r} (\bar{k} - \bar{k}_0) n(x, \tau). \quad (4.5)$$

ნამდვილი სასაზღვრო პირობებით  $n(x, 0) = 0; n(0, \tau) = n_0$ .

საბოლოოდ

$$N(X \cdot \Theta) = 1 \left[ \Theta - \frac{\ln(1-AX)^{-1}}{A} \right] \exp \left[ \left( 1 - \frac{A_0}{A} \right) \ln(1-AX)^{-1} \right], \quad (4.6)$$

$$\text{სადაც } A = 2 \frac{\bar{k}}{r} \frac{h}{u_0}; A_0 = 2 \frac{\bar{k}_0}{r} \frac{h}{u_0}.$$

ფილტრაციის კოეფიციენტის  $\bar{k}$  იდენტიფიკაციისათვის გამოვიყენოთ დარსის ფილტრაციის ემპირიული კანონი

$$\bar{k} = -c \text{grad } P, \quad (4.7)$$

სადაც  $c = (\mu r_0)^{-1}$  -ფოროვანი არის თვისებებზე დამოკიდებული ფილტრაციის კოეფიციენტი;  $\mu$ - სითხის სიბლანტე, პა.წმ;  $r_0$  - ნალექის ფენისა და მემბრანის კუთრი წინააღმდეგობა, მ<sup>2</sup>.

თუ მემბრანის გავლით ფილტრატის დინება შეესაბამება ლამინარულ რეჟიმს, ხოლო თვით მემბრანა მასზე მოთავსებულ ნალექთან ერთად არის უკუმშვადი, შეიძლება მივიღოთ  $c = \text{const}$ , მაშინ

$$\bar{k} = \frac{\Delta P}{\mu(r_0 h_0 + R_n)}. \quad (4.8)$$

მიგრაციული დალექვის სიჩქარის კოეფიციენტის განსაზღვრისათვის ვისარგებლოთ მედნიკოვის ფორმულით

$$k_0 = \begin{cases} 7,25 \cdot 10^4 u \left[ \frac{\tau_p \cdot u}{v(1+\omega_E \cdot \tau_p)} \right] & \text{როცა } -\frac{\mu_p^2 \cdot u^2}{v} \leq 16,6 \\ 0,2u & \text{როცა } -\frac{\mu_p^2 \cdot u^2}{v} \geq 16,6 \end{cases}, \quad (4.9)$$

(6) ამონახსნის განვრცობა შეიძლება მივიღოთ კონცენტრაციული ველების სუპერპოზიციით. ფრაქციისათვის ნაწილაკების ზომებით  $l$ -დან  $l + \Delta l$ -მდე ჩავწერთ

$$\Delta n(l, x, \tau) = \Delta n_0(l)N(l, x, \tau) \quad (4.10)$$

ხოლო თუ შევიყვანოთ უგანზომილებო ცვლადებს  $L = l/\bar{l}$ ;  $F_0(L) = \frac{\bar{l}f_0(l)}{n_0}$ ;  $F(L, X, \theta) = \bar{l}f(l, x, \tau)/n_0$  საბოლოოდ მივიღებთ გამოსახულებას სიმკვრივის უგანზომილებო ფუნქციისათვის.

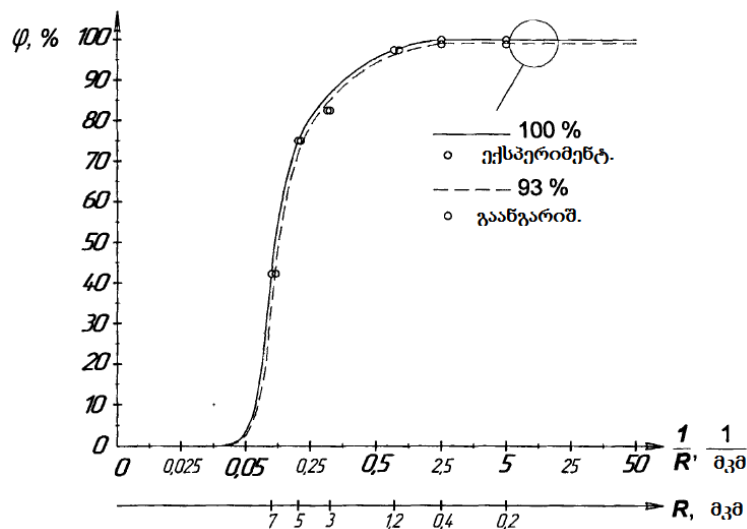
ფილტრიდან გამოსასვლელში მინარევების ფარდობითი მასური კონცენტრაციის გამოსახულება

$$M(X_{max}) = \frac{m(x_{max})}{m_0} = \int_0^\infty L^3 F(LX_{max}) dL, \quad (4.11)$$

სადაც  $m_0 = k_v \rho_T \bar{l}^3 n_0$  - შესასვლელში ფილტრატში ნაწილაკების მასური კონცენტრაცია;  $k_v$  - ნაწილაკების ფორმის კოეფიციენტი;

შევადართო მიღებული თეორიული შედეგები არსებულ ექსპერიმენტალურებს.

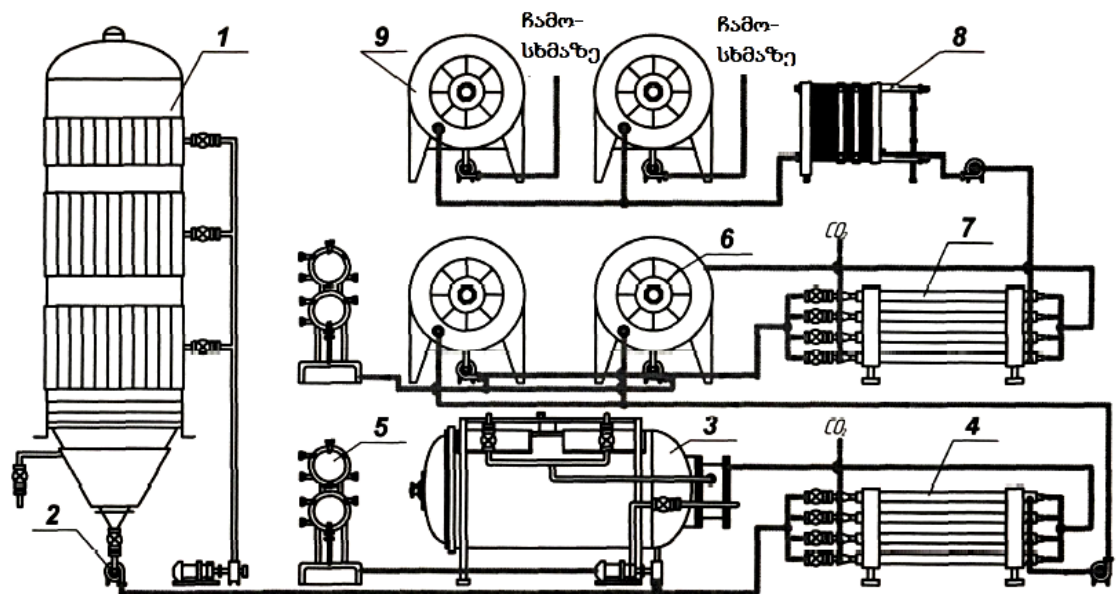
შედეგად დავამუშავეთ სელექციურობის პროცესის ტექნოლოგიურ პარამეტრებზე (დისპერსული ფაზის ზომები და კონცენტრაცია, რომელიც ითვალისწინებს კონცენტრაციის ცვლილებას დროისა და არხის გასწვრივ) დამოკიდებულების გაანგარიშების ალგორითმი (შემდეგ კი საინჟინრო მეთოდოვით).



ნახ.12. სელექციურობის დამოკიდებულება მემბრანის ფორების ზომებზე: გაანგარიშებით და ექსპერიმენტალურად მიღებული მრუდების შედარებითი ანალიზი.

განგარიშებით და ექსპერიმენტალურად მიღებული მრუდების შედარებითი ანალიზი საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ დასკვნა მოდელის ადეკვატურობაზე (ნახ.12).

მეხუთე თავში კვლევის შედეგების საფუძველზე დამუშავებულ იქნა ლუდის გაკრიალების ტექნოლოგიური ხაზის ორიგინალური მანქანა-აპარატურული გაფორმება (ნახ.13).

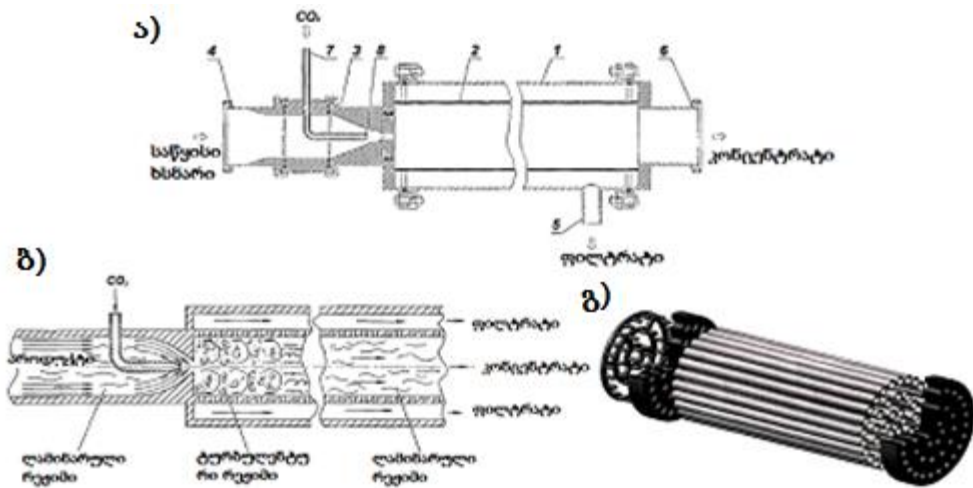


ნახ.13. ლუდის გაკრიალების უზნის ტექნოლოგიური სქემა:

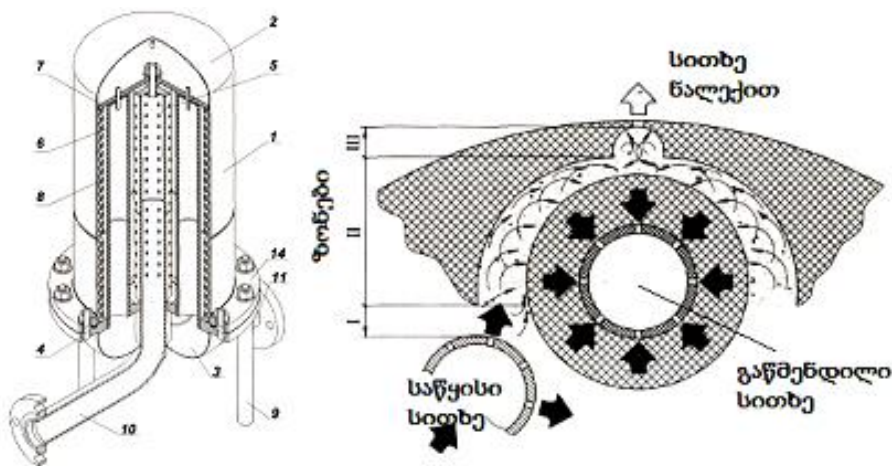
- 1- ტანკი, 2-ცენტრიდანული ტუმბო, 3,6,9 - ბუფერული ჭურჭელი, 4-მემბრანული ფილტრი ლუდის წინასწარი გაკრიალებისთვის, 5-მემბრანული აპარატი ჭარბი საფუვრების რეკუპერაციისათვის, 7 - მემბრანული ფილტრი ლუდის გამაუსნებოვნებელი ფილტრაციისათვის, 8 - ფირფიტებიანი გამაცივებელი

ჩატარებული თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევის, დამუშავებული მათემატიკური მოდელის საფუძველზე დამუშავებულია და შემოთავაზებულია ლუდის ბიოლოგიური სტაბილიზაციის ხერხი და ლუდის გაკრიალების წარმართვისათვის მემბრანული მოწყობილობის ორიგინალური კონსტრუქცია, რომელთა განმასხვავებელ თავისებურებას წარმოადგენს რესურ და ენერგო დაზოგვა, კონცენტრაციული პოლარიზაციასთან ბრძოლის ეფექტური ხერხების გამოყენება, მეორადი რესურსების უტილიზაცია, მზა პროდუქტის ხარისხის ამაღლება (ნახ.14, 15).





ნახ.14. მემბრანული აპარატი აირითგაჯერებული კვების პროდუქტების ფილტრაციისათვის: ა)მემბრანული აპარატის ჰორიზონტალური ჭრილი1-ცილინდრული კორპუსი, 2-მემბრანული მოდული, 3-ინექტორი, 4-საწყისი ხსნარის მისაწოდებელი მილყელი, 5-ფილტრატის გამოსაყვანი მილყელი, 6-კონცენტრატის გამოსაყვანი მილყელი, 7-მილგაყვანილობა CO<sub>2</sub>, 14- საქმენი CO<sub>2</sub> მისაწოდებლად. ბ)მუშაობის სქემა; გ)აპარატის სამგანზომილებიანი მოდელი



ნახ.15. მემბრანული აპარატი მიმართული ნაკადებით: ა)მემბრანული აპარატის მიმართული ნაკადებით სამგანზომილებიანი მოდელი:1-ცილინდრული გარსაცმი, 2-ელიფსური სახურავი, 3-ელიფსური ფსკერი, 4- ფილტრდამჭერი, 5-პერფორირებული გამანაწილებელი მოწყობილობა, 6-მფილტრავი ელემენტები, 7-დამწნეხი ფილა, 8-პროფილური ელემენტი, 9-საყრდენები, 10-საწყისი სითხის შესაყვანი მილყელი, 11-ფილტრატის გამოსასვლელი მილყელი, 14-მილტუჩი.

შემდგომ მოყვანილია მილისებრ მემბრანულ არხში ლუდის მიკროფილტრაციის პროცესის გაანგარიშების ინჟინრული მეთოდისა და მემბრანული სისტემების გამოყენებით ლუდის გაკრიალების ხაზის დანერგვის ტექნიკურ-ეკონომიკური მაჩვენებლები. ღირებულებითმა შეფასებამ გვიჩვენა, რომ ლუდის მიკროფილტრაციის პროცესის გამოყენებით გაკრიალების დროს საერთო ხარჯები ოთხჯერ მცირეა, ვიდრე კიზელგურის ფილტრების დახმარებით.

### ძირითადი დასკვნები და შედეგები

1. გამოკვლეულია გაუფილტრავი ლუდის“გერმანული“ ფიზიკო-ქიმიური და მიკრობიოლოგიური თვისებები, რომლებიც გავლენას ახდენენ ლუდის ფილტრაციის პროცესზე - მიკროორგანიზმების შემცველობა 5,68 მილ.უჯრედი/მლ, pH სიდიდე 4,38, სიმღვრე 78ერთ.; განსაზღვრულია ლუდის სიბლანტის დამოკიდებულება მასში საფუარის უჯრედების შემცველობაზე.

2. დასაბუთებულია მემბრანის (მილისებრი მარკის ) და მემბრანული სისტემის კონფიგურაციის შერჩევა, რომლის საფუძველზეც დაგეგმარდა ექსპერიმენტული დანადგარი.

3. შეფასებულია ლუდში მიკროორგანიზმების ნაწილაკების რაოდენობის მათ ზომაზე დამოკიდებულება, შესწავლილია მემბრანის სტრუქტურა და თვისებები, რამაც საშუალება მოგვცა წინასწარ დავგეგმოთ ფორების რაციონალური ზომა და მემბრანების ექსპლოატაციის ტექნოლოგიური პირობები.

4. დამუშავებულია კომპიუტერული პროგრამითკოლოიდური ხსნარების ფილტრაციის უნარისგამოკვლევა.

5. დამუშავდა მილისებრ მემბრანულ არხში პულსირებული წნევის მოქმედებით სითხის მოძრაობის მათემატიკური მოდელი.

6. დადგენილია მილისებრ მემბრანულ არხში პულსირებული წნევის მოქმედების დროს სიჩქარის განაწილების სურათი.

7. დადგენილია მილისებრ მემბრანულარხში წნევის პულსაციის ოპტიმალური სიხშირე.

8. გამოკვლეულია ბარომემბრანული მეთოდით ლუდის ფილტრაციის პროცესის კინეტიკა და ჰიდროდინამიკა, შედეგად შემოთავაზებულია ფილტრების შემდეგი თანმიმდევრობა:

ა) ფილტრი ფორის ზომით 5 მკმ ერდროულად როგორც უხეში ისე დახვეწილი ფილტრაციის უზრუნველსაყოფად ( $P_{ფუმ.}=0,135$ მპა,  $\varphi=76\%$ ,  $J_{საშ.}=7,5$  მ<sup>3</sup>/მ<sup>2</sup>.სთ,  $v=1,9$ მ/წმ, რეცირკულაციის ჯერადობა 3);

ბ) მასტერილებელი (გამაუსნებოვნებელი) ფილტრი ფორის ზომით 0,4 მკმ ( $P_{ფუმ.}=0,3$ მპა,  $\varphi=100\%$ ,  $J_{საშ.}=1,7$  მ<sup>3</sup>/მ<sup>2</sup>.სთ,  $v=0,9$ მ/წმ, რეცირკულაციის ჯერადობა 5).

9.გამოკვლეულია გაკრიალებული ლუდის „გერმანული“ ფიზიკო-ქიმიური, მიკრობიოლოგიური და ორგანოლექტიკური მაჩვენებლები, მოხდა ლუდის მდგრადობის პროგნოზირება, რამაც საშუალება მოგვცა გავაკეთოთ დასკვნა მიღებული გაკრიალებული ლუდის მაღალ ხარისხზე (ტი 9184-103 2012, გოსტი 51174-98).

10.დამუშავებულია მილისებრ არხში სუსპენზიის ფილტრაციის მათემატიკური მოდელი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს დიდი სიზუსტით განვსაზღვროთ მემბრანის სელექციურობა პროცესის ტექნოლოგიურ პარამეტრებზე (მუშა წნევა, მემბრანის ზედაპირზე ნაკადის ტანგენციალური სიჩქარე, ტემპერატურის), მემბრანის ფიზიკო-მექანიკურ თვისებებზე, ფილტრაციის ობიექტის რეოლოგიურ და მიკრობიოლოგიურ თვისებებზე, დისპერსული ფაზის ზომებზე და კონცენტრაციაზე დამოკიდებულებით.

11. დამუშავებული მათემატიკური მოდელის საფუძველზე მოხდა სუსპენზიის მიკროფილტრაციის პროცესის გაანგარიშების ინჟინრული მეთოდის სრულყოფა, რომელიც ითვალისწინებს დისპერსული ფაზის დროის და არხის სიგრძის მიხედვით კონცენტრაციის ცვლილებას.

12. გამოკვლეულია კონცენტრაციულ პოლარიზაციასთან ბრძოლის ხერხები, დასაბუთებულია მიკროფილტრაციის იმპულსური რეჟიმის გამოყენება მემბრანის ზედაპირზე გელ-ფენის დარღვევისათვის, განსაზღვრულია იმპულსური რეჟიმის პარამეტრები 0,4 მკმ-  $\Delta P_b=0,25$ მპა;  $\tau_2=3$ წმ;  $T=600$  წმ; 5 მკმ -  $\Delta P_b=0,1$ მპა;  $\tau_2=5$ წმ;  $T=600$  წმ.

13. დამუშავებულია მემბრანული მოწყობილობის კონსტრუქციები კონცენტრაციული პოლარიზაციის დაბალი დონით ლუდის ეფექტური გაკრიალებისთვის.

14. შემოთავაზებულია ტექნოლოგიური რეკომენდაციები მიკროფილტრაციის პროცესის გამოსაყენებლად და ლუდის გაკრიალების უბნის ტექნოლოგიური სქემა.

#### **დისერტაციის ძირითადი საკითხები გამოქვეყნებულია შემდეგ სამუშაოებში:**

1. შოთა რუხაძე, მეგი აფრიდონიძე, შალვა ცაგარეიშვილი. ყურძნის ღვინოებისა და წვენების ბიოლოგიური სტაბილიზაცია ელექტროდიალიზის გამოყენებით. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „მოამბე“ 11 (1), 6 გვ. 2018.
2. აფრიდონიძე მ. დ., რუხაძე შ. შ., მარდალეიშვილი ნ. ვ., ცაგარეიშვილი შ. დ. „კოლოიდური ხსნარის ფილტრაციის უნარის გამოკვლევა კომპიუტერული პროგრამით. აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტის „მოამბე“ 10 (2), 5 გვ. 2017.
3. რუხაძე შ.შ., აფრიდონიძე მ.დ., შოთაძე ა.მ., ცაგარეიშვილი შ.დ. „მილისებრ მემბრანულ აპარატში კონცენტრაციული პოლარიზაციის შემცირება პულსირებული წნევის მოქმედებით“, ადგილობრივი სამეცნიერო პრაქტიკული კონფერენცია საქართველოში გამოყენებული ტრაქტორების, სასოფლო-სამეურნეო და სამელიორაციო მანქანების ექსპლუატაციის თავისებურებანი და განვითარების პერსპექტივები, შრომათა კრებული, ქუთაისი, 2017
4. რუხაძე შ.შ., აფრიდონიძე მ.დ., შოთაძე ა.მ., ცაგარეიშვილი შ.დ. „მოწყობილობა მიმღებ საზღვაო პორტში ბალასტური წყლების ეკოლოგიური უსაფრთხოების უზრუნველყოფის მიზნით და ტექნიკური წყლის მისაღებად“, ადგილობრივი სამეცნიერო პრაქტიკული კონფერენციის საქართველოში გამოყენებული ტრაქტორების, სასოფლო-სამეურნეო და სამელიორაციო მანქანების ექსპლუატაციის თავისებურებანი და განვითარების პერსპექტივები, შრომათა კრებული, ქუთაისი, 2017.

5. შ. რუხაძე, მ. აფრიდონიძე, ა. შოთაძე, შ. ცაგარეიშვილი. წყლის ელექტროდ-იონიზაცია და გამოყენების პრაქტიკა. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია კვების პროდუქტების ხარისხის გაუმჯობესების პრობლემები. შრომათა კრებული. თბილისი 2016
6. ო. სესიკაშვილი, დ. ცაგარეიშვილი, შ. ცაგარეიშვილი-კაკლის ფქვილის დამატებით ფოროვანი მაკროსტრუქტურის მქონე ექსტრუდატების წარმოება. საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია „კვების მრეწველობის და სასტუმრო ინდუსტრიის მოწყობილობების განვითარების ინოვაციური ასპექტები თანამედროვე პირობებში“ შრომების კრებული, მელიტოპოლი-კირილოვკა, უკრაინა, 8-11 სექტემბერი 2015 წ. 187-189 გვ.
7. დ.ცაგარეიშვილი, ო. სესიკაშვილი, შ. ცაგარეიშვილი- თერმოპლასტიკური ექსტრუზიის პროცესის პარამეტრების გავლენა ექსტრუდატების ფუნქციონალურ თვისებებზე. საერთაშორისო სამეცნიერო პრაქტიკული კონფერენცია „კვების პროდუქტების წარმოების აქტუალური პრობლემები და თანამედროვე ტექნოლოგიები“ აწსუ, ქუთაისი, 12-13 ივნისი 2014, 398-400 გვ.
8. დ. ცაგარეიშვილი, თ. ცქიფურიშვილი, შ. ცაგარეიშვილი- თერმოპლასტიკური ექსტრუზიით ექსტრუდატების მიღების ფიზიკო-ქიმიური კონცეფცია მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია „ენერგეტიკა: რეგიონალური პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები. მოხსენებების კრებული, ქუთაისი, აწსუ, 2013, 222-223 გვ. 2013 წ.
9. დ. ცაგარეიშვილი, ა. თვალჭრელიძე, შ. ცაგარეიშვილი- თერმოპლასტიკური ექსტრუზიის მეთოდით ფოროვანი სტრუქტურის მქონე კვების პროდუქტების წარმოების პროცესის კვლევა მცირე წარმადობის ექსტრუდერის დაგეგმარების მიზნით. საერთაშორისო სამეცნიერო-პრაქტიკული კონფერენცია „კვების პროდუქტების წარმოების ტექნოლოგიებისა და ტექნიკის სრულყოფა“ აწსუ, შრომების კრებული, ქუთაისი, 2011, 285-289 გვ.

**Ministry of Education and Science of Georgia**

**Akaki Tsereteli State University**

Copyrighted manuscript

**Shalva Tsagareishvili**

**Development of Beer Filtration Processes Using Membrane Technologies**

**The Author's Abstract**

of the Doctoral Thesis Nominated for academic degree of Doctor in Industrial Engineering and  
Technology (0409)

**Kutaisi 2018**

The given work has been executed at the Department Mechanical Engineering of the Faculty of Technical Engineering, at the Akaki Tsereteli State University

Scientific advisor:

Shota Rukhadze, Academic Doctor, Professor

Official reviewers:

Defense of a thesis will be held \_\_\_\_\_

(date and time)

at the session of the Dissertation Commission created by Dissertation Council of the Faculty of Technical Engineering. Address: Auditorium №1114, Building I, 59 Tamar Mepe Street, 4600, Kutaisi.

Dissertation is available in the library of the Akaki Tsereteli State University at the address: 59 Tamar Mepe Street, 4600, Kutaisi

The Author's Abstract had been sent out „\_\_\_\_ “ \_\_\_\_\_

Dissertation Council  
Secretary,  
Assoc. Professor

N. Sakhanberidze

## GENERAL DESCRIPTION OF WORK

**Topicality of research.** The process of stabilization of microbiological and physicochemical properties of drinks is of theoretical and practical interest for brewers, in connection with interest in longer terms of storage of the product. In the conditions of modern, tough competition, the ability of beer to last long enough became an indispensable condition for its successful implementation. In this brewery, a qualitative filter is usually helped and, as an addition to it, pasteurization. The necessary degree of transparency of beer is traditionally achieved through qualitative filtration. By filtration, in this case, we mean separation from the beer of suspended particles, yeast cells and microorganisms.

The requirements that are imposed on the quality of bottled beer make the necessary multi-stage processing of the product, while it is necessary to preserve all the available quality attributes and to exclude a decrease in quality in the future.

Although all the existing types of equipment in the complex fully meet the requirements for the filtration process, provide the required quality and long shelf life of beer, they have a number of significant disadvantages:

- the need for production costs for auxiliary filtering aids;
- complexity of construction and, accordingly, operation and repair;
- relatively high losses of beer;
- labor intensity in maintenance;
- susceptibility to high bacterial contamination and concentration of solids in filtered beer;
- the problematical nature of the utilization or preparation of diatomaceous earth for povtornogo application.

Also, the process of beer filtration does not ensure complete removal of yeast cells and bacteria that form opacities, therefore, to ensure biological stability, all remaining microorganisms are destroyed - a pasteurization process is carried out, which is associated with greater energy costs and entails a change in organoleptic showers

The tasks solved in the process of beer filtration are becoming increasingly diverse. If twenty years ago the main task was to clarify the unfiltered beverage, then today in the filtration department are stabilized and carbonized beer, here additives are added to it, correcting the parameters of the initial wort, and beer mixing is made [51,79,93 ]. In addition, in countries that are not covered by the German law on the purity of brewing (according to which only water, malt, hops and yeast can be used to make beer), various additives are introduced into the beverage during the filtration phase. Beer is a complex system, the composition of the components in which it changes over time (in the first instance, we are talking about complex polyphenolic and protein compounds). Whatever components we take out of the beer, it will



inevitably have an influence on organoleptic. Fractions that remain in poorly filtered beer, practically do not affect the taste. But after a certain time, they lead to the emergence of undesirable reactions, detrimental to beer. According to many experts, it is the low microbiological discipline has made pasteurization so popular in domestic enterprises, especially carried out in bottles [74]. It provides an opportunity to eliminate all possible consequences of secondary exposure or contamination of beer at the last stage. But pasteurization distorts the taste of beer. Most foreign experts agree that membrane filtration has every chance to seriously press kieselguhr and reach the level of the main technology. But according to the same forecasts, this will be possible not earlier than in 10 years.

The use of membrane technology in the process of beer clarification will eliminate all the deficiencies presented and come to a new level in the process of stabilizing the properties of beverages

**Aim and objectives of research.** The aim of the thesis is to find the most rational energy and resource-saving technological processes and devices capable of providing

effective clarification of beer In accordance with the goal, the following tasks were accomplished

- determination of the basic properties of beer as a filter object,
- justification of the selection of membranes and study of their properties,
- study of the kinetics and hydrodynamics of the filtration process baromembrane method,
- development and analysis of the mathematical model of the filtering process suspension through semipermeable partitions, the creation of engineering methods of calculation,
- study of methods for controlling concentration polarization and their implementation in practice,
- development of innovative equipment and technology for effective beer clarification

**Novelty of research.** The dependence of the viscosity of the Hermanudi beer on the content of yeast cells was determined. The kinetics and hydrodynamics of the beer filtration process by the baromembrane method were studied. A mathematical model of the process of filtering a suspension in a tubular channel has been developed, which makes it possible to determine the membrane selectivity with high accuracy, depending on the technological parameters of the process, the dimensions and concentration of the dispersed phase.

**Practical bearing of research.** On the basis of a complex of studies conducted in laboratory and production conditions, the expediency of using a membrane device with tubular elements in the process of beer filtration is shown. Designs for membrane equipment with a lower level of

concentration polarization for effective beer clarification are proposed. Technological recommendations on the use of the microfiltration process and the technological scheme of the beer clarification area based on the developed mathematical model. An engineering technique for calculating the process of microfiltration of suspensions, taking into account the change in the concentration of the dispersed phase in time and along the length of the channel.

**Approbation of work.** The results of the research were reported and discussed in forums of various levels. The results are published in the form of printed material in scientific journals and in conference proceedings.

**Published materials:**

On the topic of the thesis, a dozen printed works were published in local and international peer-reviewed journals.

The thesis consists of 160 printed sheets. Which contains 61 figures, 12 tables and 131 names of applied literatures.

**In the introduction**, the modern state of stabilizing the microbiological and physicochemical properties of beverages, in particular beer, is characterized, the relevance of the theme of the dissertation work, the scientific novelty and practical significance of the studies performed.

**The first chapter** systematizes the literature data on the current state of the technology and the technology of beer clarification, identifies the main possible ways of intensifying the technology and the direction of creating highly efficient membrane equipment. The product characteristics and the current state of its production are considered. The process of beer filtration and the factors influencing the filterability of beer, stabilization of beer, ways of beer filtration, modern equipment for beer clarification.

The membrane processes of separation of membrane materials and structures, membrane modules, the classification of membrane systems, the phenomena of concentration polarization, the instrumental design of membrane processing of liquid food media, the mathematical description of the microfiltration process are analyzed. Based on the analysis, the goal and tasks of the dissertation work are formulated, solving the problems

**In the second chapter**, for the scientific and practical analysis of the filtering process, data characterizing the properties of the selected product and methods for their determination are given. To assess the filterability of beer, the following methods

- determination of the content of microorganisms,
- measurement of pH value,
- cold-alcohol test (according to Hapon),
- membrane-filtration test (according to Esser)

According to the results of the conducted analyzes of unfiltered beer, the concentration of yeast cells was 5.36 million cells / ml, the pH was 4.38, the turbidity was 78 units of EBU-it was concluded that the filterability of beer was unsatisfactory.

The poor filterability of beer was not a negative factor for us, because if the results of the experiment are positive, then there should not be any problems with clarifying the beer with good filterability. Since in the filtration process the concentration suspension is constantly changing, the dependence of the viscosity of beer on the concentration of yeast cells was determined and constructed (Fig. 1), which is adequately described by Einstein's equation.

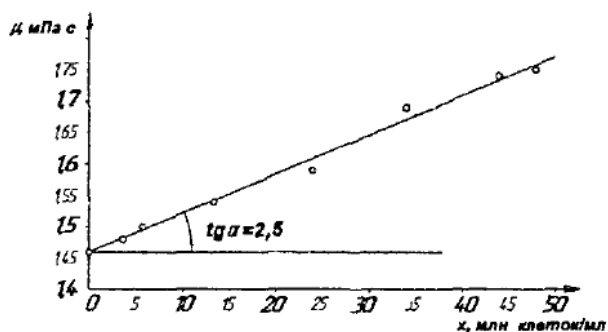


Fig. 1 Dependence of viscosity of beer on concentration yeast cells

When choosing the threshold for the retention of membranes, they were guided by the recommendations of literature sources and the characteristics of the product under study, namely the relative sizes of the beer particles. When the beer is clarified, the following substances are removed: mechanical impurity (1-60 μm), yeast (1-13 μm), bacteria (0,2- 5 μm) and part of colloidal particles (> 0.1 μm). In any case, one should also not forget that real pores are very different from idealized pores, and apart from the existence of a stationary or inactive layer of liquid pores membranes, the membrane selectivity will depend on the ratio of the radii of particles in the divided system and the pores in the membrane. Therefore, it was concluded that using membranes with threshold delay of less than 0.1 micron is inadvisable, since protein compounds and other substances forming physicochemical and organoleptic parameters of beer can be removed. Therefore, in the initial stage of the experiment, we used membranes with a pore size of 0.2 and 0.4 microns. membranes, first of all proceeded from the fact that it must have the maximum specific productivity with selectivity, which ensures that the quality of the permeate is satisfied. In addition, the membrane must have high chemical stability with respect to the solution to be separated and to the microbiological effect, high operating temperature. Investigating the market of membrane equipment and membranes, analyzing all the advantages and disadvantages presented, we chose tubular ceramic membranes of the CMFE type, which meet all the requirements. Further, the main physico-mechanical properties of membranes were

studied: water permeability, allowable pressure, allowable pH range, porosity of the membrane depending on the pore size (Table 1).

Table 1.

Parameters of ceramic membrane filters

Threshold delay, $\mu\text{m}$	0,2	0,4	1,2	3	5	7
Water permeability at 20 ° C $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-h}$	1	3,85	6,70	9,10	15	20
Permissible pressure, MPa	Guaranteed not less than 1					
Permissible range, pH	0 to 13 for a long time, More than 13 - for a short time					
Thickness of selective layer, mkm	10 to 45					
Porosity of the membrane,%	62	64	66	72	78	82

According to the obtained data, a scheme of the experimental installation was developed – a "portioning" system with a complete recirculation mechanism.

To select membranes for microfiltration of such colloidal suspensions as beer, wine, grape juice and other fruit juices and to predict the effectiveness of industrial microfiltration, the filtruence benefits on membranes were proposed. The results are presented mainly in the form of a constant, calculated on the basis of the volumes of permeate accumulated at different times. In order to better define the applications of this kind of tests and the precautions to be taken when performing them, we also studied microfiltration at constant pressure on cellulose acetate membranes of colloidal suspensions of calibrated latexes.

Filtration at constant pressure is described by four laws of plugging:

$$\text{Clear clogging} \quad k_b V = Q_0 [1 - \exp(-k_b t)] \quad (2.1)$$

$$\text{The intermediate case} \quad k_t V = \ln[1 + k_t Q_0 t] \quad (2.2)$$

$$\text{The standard law} \quad k_s t = \frac{2t}{V} - \frac{2}{Q_0} \quad (2.3)$$

$$\text{Filtration through the sediment layer} \quad k_c V = \frac{2t}{V} - \frac{2}{Q_0} \quad (2.4)$$

where: V is the volume of the permeate;

t-time;

$k_b$  is the constant of the pure clogging law;

$k_t$  is the constant of the intermediate filtering law;

$k_c$  is the constant of the filtration law through the sediment layer;

$k_s$ -constant of the standard filtering law;

$Q_0$  is the initial flowrate. Q

(conditionally and for microfiltration we use the term filtering).

Each of these equations is derived from the physical filter model. Thus, the law of pure clogging was obtained on the basis of the assumption that the fibrillar membrane consists of parallel pores, each particle reaching the membrane blocking the pore.

The intermediate law is derived on the assumption that the particle can be deposited on another particle, which leads to an increase in the probability of clogging the pores.

The standard law is obtained under the assumption that the pore volume decreases in proportion to the volume of the permeate as a result of the deposition of particles on their walls. More familiar to experts, filtering through a layer of sludge is to increase the resistance of the filter baffle as a result of the accumulation of particles forming a layer of sediment.

In order to determine the most suitable equation for the experimental curve, we have developed a computer program that gives the constants  $k$  and  $Q_0$  optimal for each model. Then we compared the values obtained for the optimal equation with the experimental data. If we consider the pairs of experimental values  $(t_i, V_i)$  and  $(t_i)$ , the permeate volumes calculated from equations (2.1), (2.2), (2.3) and (2.4) for the optimal values  $k_b, k_i, k_s, k_c$  obtained from using a computer, you can calculate

$$\Delta = \sum_{i=1}^N (f(t_i) - V_i)^2 \quad (2.5)$$

where:  $N$  is the number of experimental points;  $N$

$V_i$ - volume of permeate collected at time  $t_i$ .

Thus, the best of the models will be the one that will give the smallest value

$$e = \frac{\sqrt{\Delta}}{N} \quad (2.6)$$

which is the root-mean-square deviation of the considered mold for each experimental point.

The study was carried out on a third type plant. The amount of permeate as a function of time was recorded. Then the resulting curve was processed on a computer to determine the clogging model to which it best approaches.

**In the third chapter**, the description of the experimental setup (Figure 2) and the procedure for carrying out the experimental studies are described for the complete analysis and justification of the rational operating parameters of the process, the results of studies on the off-state and hydrodynamics of filtering the beer using barome-branck processes are described. The first stage of the experimental studies was the determination of the permeability of membranes 0, 2 and 0.4  $\mu\text{m}$ , which made it possible to make the removal of shrinkage of membranes, i.e. the membrane stability coefficient is equal to 1

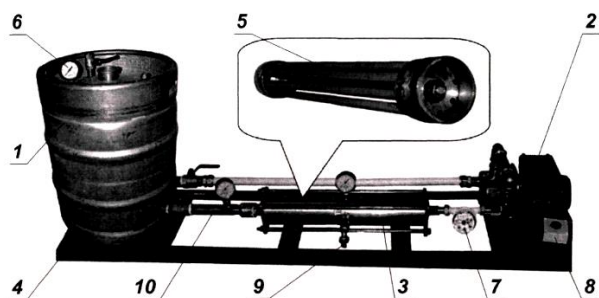


Fig. 2. Experimental setup: 1 - buffer tank, 2-centrifugal pump, 3-filtration unit, 4-frame, 5-membrane module, 6 - a manometer, 7 - a flowmeter, 8-starter, 9-outlet tube permeate, 10 - retort return nozzle

Further, the technological properties of 0.2 and 0.4  $\mu\text{m}$  membranes were determined on the object under study - beer. The experiment was carried out for three hours, the resulting clarified beer was returned back to the container.

In each experiment, the working pressure was determined (Fig. 3) and the productivity (Fig. 4) of ceramic membranes according to unfiltered beer.

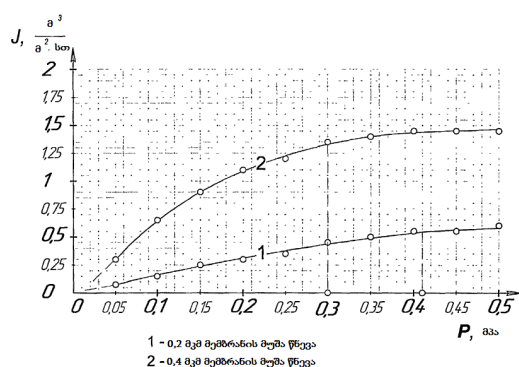


Fig. 3. Dependence of permeability membranes 0.2 and 0.4  $\mu\text{m}$  from excess pressures

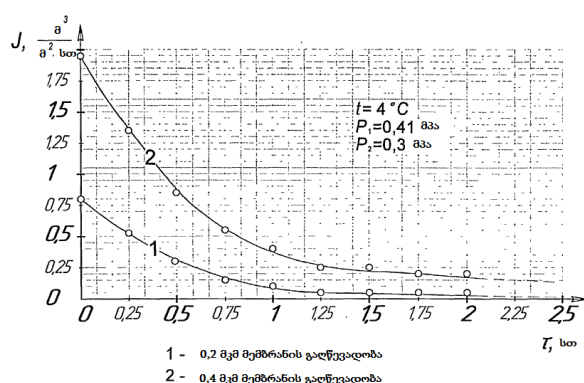


Fig. 4. Dependence of permeability membranes 0.2 and 0.4  $\mu\text{m}$  in length filtering

To assess the quality of the filtrate obtained, such indicators as extractivity, volume fraction of alcohol, microorganism content, pH, turbidity were monitored. The results of filtered beer analyzes are shown in Table. 2.

Table 2

Results of filtered beer analysis on membranes 0.2 and 0.4  $\mu\text{m}$ 

Indicator name	Pore size, micron	
	0,2	0,4
The content of microorganisms, million cells / ml	not detected	not detected
pH	4,39	4,38
Turbidity, unit, EBU	0,37	0,47
Extractivity,%	10,55	11
Volume fraction of alcohol,%	4	4

According to the obtained data, the following conclusions were made: Filtering on membranes with a pore size of 0.2 and 0.4  $\mu\text{m}$ , the extractivity of the beer and its chromaticity changed. Hence, a membrane of 0.4  $\mu\text{m}$  was preferable, since it did not affect the quality of beer, completely removing bacteria and yeast particles. The permeability of the membrane was noticeably reduced over time and after two hours practically equaled zero. Thus, it was concluded that it is necessary to filter in several stages, that is, the variation in the retention threshold. For preliminary filtration, the filtration was collected for subsequent filtration on a 0.4  $\mu\text{m}$  membrane. As a result, the working pressure was determined for the membranes under study (7  $\mu\text{m}$  - 0.100 MPa, 5  $\mu\text{m}$  - 0.135 MPa, 3  $\mu\text{m}$  - 0.190 MPa, 1.2  $\mu\text{m}$  - 0.235 MPa) and the graphs of the permeability versus the filtering duration have been constructed (Fig. 5).

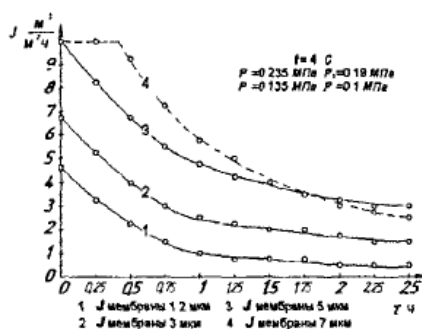
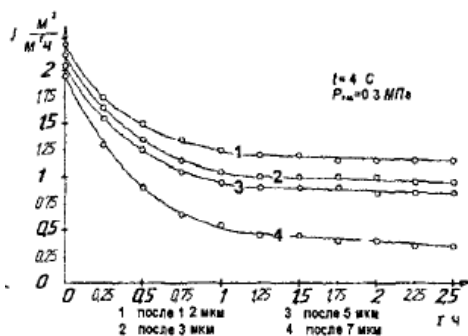


Fig. 5. Dependence of permeability membranes from the duration of filtration

Fig. 6. Dependence of membrane permeability 0.4  $\mu\text{m}$  of duration filtering after a preliminary clarification

The resulting permeate was evaluated for filterability (Table 3) and brightened on a 0.4  $\mu\text{m}$  membrane. The permeability of the membrane with a pore diameter of 0.4  $\mu\text{m}$  versus the duration of the microfiltration process is shown in Fig. 6.

Table 3

Microbiological and physico-chemical properties clarified beer				
Indicator name	Pore size, $\mu\text{m}$			
	1,2	3	5	7
Content of microorganisms, mln. ml / ml	0,6	1,02	1,38	3,1
pH	4,38	4,38	4,38	4,38
Turbidity, unit EBU	0,77	1,22	1,27	1,64

As can be seen from the graphs obtained, the membrane permeability of 0.4  $\mu\text{m}$  after pre-clarification on membranes 5, 3 and 1.2  $\mu\text{m}$  increased almost fourfold, and after membrane 7  $\mu\text{m}$  only in two times. In addition, filtration on a 7  $\mu\text{m}$  membrane occurred with an obvious blocking of the pores, Therefore, its use was considered inexpedient. According to the analyzes, the filterability of the resulting beer is good for all membrane sizes of 5, 3 and 1.2 microns, therefore For pre-clarification, a membrane with a higher capacity was selected, that is, 5  $\mu\text{m}$ . The main problem in carrying out membrane processes is the reduction of permeability with In the course of time, mainly because of the formation of a gel layer with an increased concentration on the membrane surface. The main methods for reducing the concentration polarization can be include the following:

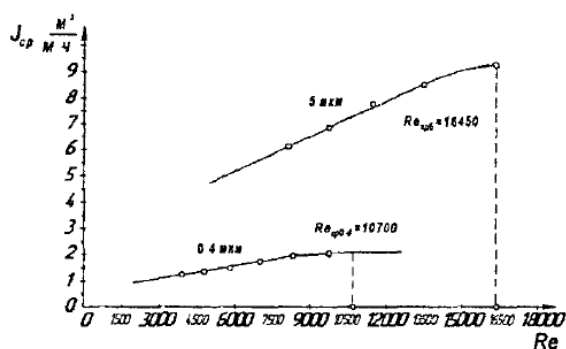


Fig. 7 Dependence of membrane permeability of the Reynolde number

- the use of apparatus with narrow channels,
- temperature increase,
- pulsation of the solution,
- flow turbulence



The use of the first two methods is unacceptable, therefore, the influence of the tangential velocity over the surface of the membrane and the concentration of the dispersed phase on its permeability was investigated - Fig. 7.

As a result, the speed at which the gel layer was completely destroyed approximately 3.7 m / s. However, application of such a large speed leads to a sharp increase in the energy consumption for solution recovery and a significant increase in its temperature. Also, prolonged exposure to high velocities of the tangential flow can lead to inactivation of biologically active macromolecules.

To reduce the negative effect of concentration polarization in tubular membrane apparatuses, analogues of the authors (Rukhadze Sh.Sh., Starov VM), where the flow of a liquid is considered flat in the intermembrane channel under the influence of pulsating pressure, we have examined fluctuations in the fluidity in a tubular membrane channel caused by a periodic change pressure drop. Such oscillations can be carried out by alternating motion of the piston in one direction or the other.

Consider a long tube with a circular cross section. Let  $x$  be the coordinate in the direction of the tube axis, and  $r$  the radial distance from the middle of the pipe. It can be assumed that the phenomenon under consideration does not depend on the coordinate  $x$ , therefore, does not depend on  $x$  and the velocity component  $u$  in the direction of the tube axis. In this case, the remaining velocity components, and therefore the convective terms in the equation of motion for the direction coinciding with the axis of the tube, will disappear, and instead of the three Navier-Stokes equations, we obtain without any displacements exactly one equation

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \lambda \left( \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (3.1)$$

with boundary condition

at  $r = R$  (i.e., on the walls of the pipe).

Let the pressure gradient caused by the movement of the piston vary according to the hormone law, therefore,

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = K \cos nt \quad (3.2)$$

Where  $K$  is a constant. And in this case it is advisable to introduce a complex form for writing the equation (3.2); then we get

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = K e^{int} \quad (3.3)$$

Of course, only the real part of the complex quantity has a physical meaning.

Further, we take for velocity  $u$  the following expression:

$$u(r, t) = f(r)e^{int}. \quad (3.4)$$

Substituting this expression into Eq. (3.1), we obtain for the amplitude distribution the differential equation

$$f''(r) + 1/r f'(r) - in/v f(r) = -K/v. \quad (3.5)$$

Solving this equation, we find the velocity distribution

$$u(r, t) = -\frac{K}{n} e^{int} \left[ 1 - \frac{J_0\left(r\sqrt{\frac{-in}{v}}\right)}{J_0\left(R\sqrt{\frac{-in}{v}}\right)} \right], \quad (3.6)$$

where there is a Bessel function of the first kind of zero order. Because of the linearity of equation (3.1), solutions (3.3) can be superimposed one on another. The investigation of solutions (3.3) in the general case, i.e. for any frequency  $n$ , is relatively dull due to the presence of Bessel functions with a complex argument. But the limiting cases of a very small and very large frequency are investigated quite simply.

If the dimensionless quantity  $R\sqrt{n/v}$  is very small (very slow oscillations), then, expanding the Bessel functions in solution (3.3) into series and retaining only the first two terms in the latter, we obtain

$$u(r, t) = -\frac{K}{n} e^{int} \left[ 1 - \frac{1 + \frac{in}{4v} r^2}{1 + \frac{in}{4v} R^2} \right], \quad (3.7)$$

or, going back to the material entry,

$$u(r, t) = \frac{K}{4v} e^{int} (R^2 - r^2) = \frac{K}{4v} (R^2 - r^2) \cos nt. \quad (3.8)$$

Consequently, with slow oscillations of pressure, the velocity oscillations take place in an identical phase with pressure oscillations, and the amplitude of velocity oscillations changes along the diameter of the tube in accordance with the parabolic law, i.e. in the same way as in a stationary flow.

If, however, the dimensionless quantity is very large (very rapid oscillations), then, by performing the asymptotic expansion of the Bessel function and bearing in mind that

$$I_0(z) \rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi z}} e^{iz} t^{-1/2}, \quad (3.9)$$

we will get

$$\mathbf{u}(r, t) = -\frac{iK}{n} e^{int} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{R}{r}} \exp \left[ -(1+i) \sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right] \right\}, \quad (3.10)$$

or, going to the real record,

$$\mathbf{u}(r, t) = \frac{K}{n} \left\{ \sin nt - \sqrt{\frac{R}{r}} \exp \left( -\sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right) \sin \left[ nt - \sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right] \right\}. \quad (3.11)$$

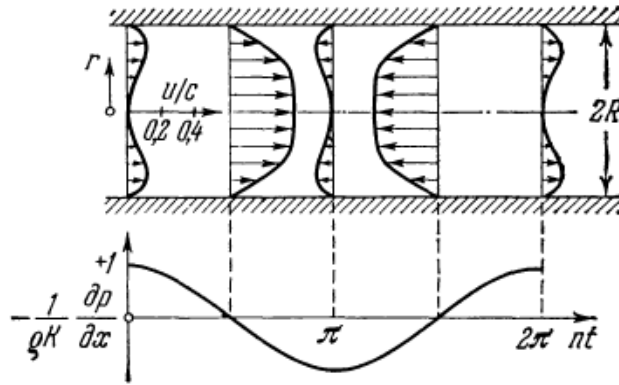


Fig. 8. Distribution of velocities with oscillating flow in the tube at various times of the oscillation period.

$$\text{Gradient of pressure } -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho K \cos(nt); \quad K = R \sqrt{\frac{n}{\nu}} = 5c = \frac{Kk^2}{8n} = 3,125 K/n.$$

For large values  $R \sqrt{\frac{n}{\nu}}$ , the second term in the curly brackets decreases rapidly with increasing distance from the wall, so only the first term, which does not depend on the distance from the wall, plays a role far from the wall. Consequently, the solution (3.11) has properties characteristic of the boundary layer. At a great distance from the wall, the oscillations of the liquid occur without friction and, moreover, in a phase shifted relative to the phase of the oscillating excitation force by half the period.

In Fig. 8 shows the velocity profiles of the oscillating flow in the tube at an average frequency  $\left( R \sqrt{\frac{n}{\nu}} = 5 \right)$  at different times of the oscillation period. From a comparison with the curve of the variation in the time of the pressure gradient plotted below, the advance phase of the flow in the middle of the tube is clearly visible in comparison with the layers close to the walls.

The time-average value of the square of the velocity for the case of fast oscillations, as is easily seen from (11), is

$$\overline{u^2(r)} = \frac{R^2}{2n^2} \left\{ 1 - 2 \sqrt{\frac{R}{r}} \exp \left[ -\sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right] \cos \left[ \sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right] + \frac{R}{r} \exp \left[ -2\sqrt{\frac{n}{2\nu}} (R-r) \right] \right\}. \quad (3.12)$$

If the distance  $y = R - r$  from the wall is small in comparison with the radius  $R$  of the tube, then the ratio  $R/r$  is approximately equal to unity. Then, by introducing a dimensionless distance from the wall

$$\eta = (R - r) \sqrt{\frac{n}{2\nu}} = y \sqrt{\frac{n}{2\nu}}, \quad (3.13)$$

We obtain from the preceding formula

$$\eta = (R - r) \sqrt{\frac{n}{2\nu}} = y \sqrt{\frac{n}{2\nu}}, \quad (3.14)$$

The distribution of the time-averaged square of the velocity calculated from (3.14) is shown in Fig. 9. We see that the maximum of this average lies not at a great distance from the wall (ie not on the axis of the pipe), but near the wall, at a distance

$$\eta = y \sqrt{\frac{n}{2\nu}} = 2.28 \quad (3.15)$$

$y$  is the distance from the pipe wall;  $\overline{u^2} = K^2 / 2n^2$  averaged over time, the square of the velocity from a small distance from the wall.

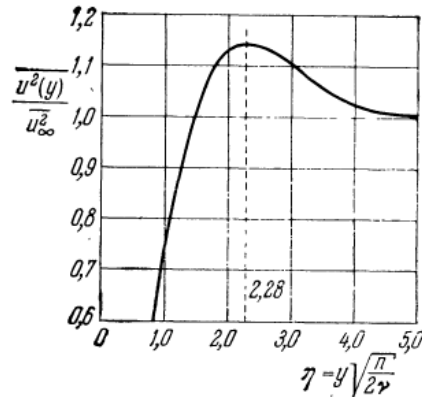


Fig.9. The distribution of the time-averaged velocity square for a periodic flow of a velocity square for a periodic flow in a pipe.

(the so-called annihilation Richardson effect). This theoretical conclusion is in good agreement with the results of measurements by EG Richardson and E. Tyler.

Therefore, one of the most promising areas is the use of pulsed regimes, since this method does not have the above disadvantages and is easily realized in practice.

In our case, a pulsating flow with the following characteristics

- frequency  $\nu = 0.025$  Hz,
- duration of pulsation  $t_2 = 3$  s,
- duty ratio  $Q = 10\%$ ,
- amplitude  $AP_b = 0.25$  MPa,
- flow velocity  $v_s = 3$  m / s

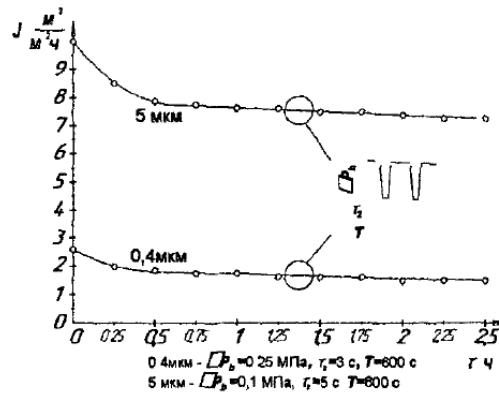


Fig.10 Dependence of membrane permeability 0.4  $\mu\text{m}$  on the duration of filtering under pulsed conditions

The results of the experiment are shown in Fig. 10, from which it can be seen that the application of the impulse regime allowed to increase the productivity by an average of 96% and eliminate the formation of the gel layer. To determine the quality of the filtrate obtained, an organoleptic evaluation and prediction of the beer resistance was made (Table 4), which led to a conclusion about the high quality of the clarified beer obtained.

Table 4

Turbidity, units EBS	Prediction of beer resistance	
	Colloid resistance, days	
	Maximum	Minimum
1,63	90	40-55

**The fourth chapter** proposes a mathematical description of the process of microfiltration of a suspension in a tubular channel with the following assumptions:

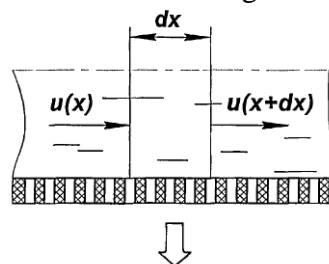


Fig. 11. The calculation scheme

- 1) the motion is steady; 2) the problem is axisymmetric; 3) the task is unidirectional;
- 4) the hydrodynamic structure is close to the kideal mixing in the transverse direction;
- 5) the hydrodynamic structure is close to the kideal displacement in the longitudinal direction

The physical formulation of the problem makes it possible, according to accepted assumptions, to proceed to the stage of synthesizing a mathematical model. To this end, we select an elementary volume and write for it the differential equation of material balance

$$G(x + dx) - G(x) = -G \varphi(x). \quad (4.1)$$

$$u(x + dx) = u(x) + du / dx dx, \quad (4.2)$$

with an obvious initial condition

$$u(0) = u_0.$$

After the mathematical transformations

$$u(x) = u_0 - \frac{2}{r} \int_0^x k(x, \tau) dx \quad (4.3)$$

The material balance of particles in the suspension for an elementary volume in a differential form:

$$dN = dN^+ - dN^- - dN^0. \quad (4.4)$$

where  $dN$  is the change in the number of particles in the elementary volume,  $dN^+$  is the number of particles entering the elementary volume,  $dN^-$  is the number of particles leaving the elementary volume,  $dN^0$  is the number of particles that settled or filtered through the porous wall.

After the mathematical transformations

$$\frac{\partial n(x, \tau)}{\partial \tau} = - \left( u_0 - \frac{2}{r} \bar{k} x \right) \frac{\partial n(x, \tau)}{\partial x} + \frac{2}{r} (\bar{k} - \bar{k}_0) n(x, \tau). \quad (4.5)$$

with obvious boundary conditions  $n(x, 0) = 0$ ;  $n(0, \tau) = n_0$ .

Eventually

$$N(X \cdot \Theta) = 1 \left[ \Theta - \frac{\ln(1 - AX)^{-1}}{A} \right] \exp \left[ \left( 1 - \frac{A_0}{A} \right) \ln(1 - AX)^{-1} \right] \quad (4.6)$$

Where  $A = 2 \frac{\bar{k} h}{r u_0}$ ;  $A_0 = 2 \frac{\bar{k}_0 h}{r u_0}$ .

Day of identification of the filtration coefficient  $\bar{k}$  Use the empirical law of filtering Darcy

$$\bar{k} = -c \text{grad } P, \quad (4.7)$$

$c = (\mu r_0)^{-1}$   $\mu$ -viscosity of the fluid,  $r^0$  is the specific resistance of the layer and membrane,  $m^{-2}$ .

If the flow rate of the filtrate through the membrane corresponds to a laminar regime, and the membrane itself together with the sediment on its surface are incompressible, then we can assume  $c = \text{const}$ , then

$$\bar{k} = \frac{\Delta P}{\mu(r_0 h_0 + R_n)}. \quad (4.8)$$

To determine the migration rate coefficient, we use the Mednikov formula

$$k_0 = \begin{cases} 7,25 \cdot 10^4 u \left[ \frac{\tau_p \cdot u}{v(1 + \omega_E \tau_p)} \right] & \text{при } \frac{\mu_p^2 \cdot u^2}{v} \leq 16,6 \\ 0,2u & \text{при } \frac{\mu_p^2 \cdot u^2}{v} \geq 16,6 \end{cases} \quad (4.9)$$

The generalization of the solution (6) can be obtained by superposition of concentration fields.

For a fraction with particle sizes from  $l$  to  $l + \Delta l$ , we write

$$\Delta n(l, x, \tau) = \Delta n_0(l) N(l, x, \tau) \quad (4.10)$$

And introducing the dimensionless variables  $L = l/l_0$ ;  $F_0(L) = \frac{l f_0(L)}{n_0}$ ;  $F(L, X, \Theta) =$

$\bar{l} f(l, x, \tau) / n_0$  Finally, we obtain the expression for the dimensionless density function, as a result, the relative mass concentration of impurities at the output of the filter

$$M(X_{max}) = \frac{m(x_{max})}{m_0} = \int_0^{\infty} L^3 F(LX_{max}) dL, \quad (4.11)$$

Where  $m_0 = k_v \rho_T \bar{l}^3 n_0$  is the mass concentration of particles at the inlet to the filter;  $k_v$ -coefficient of particle form.

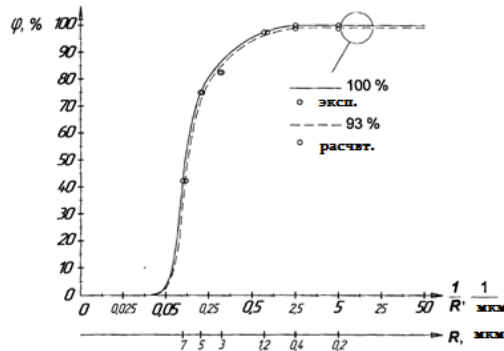


Fig. 12 Dependence of selectivity on pore size of membrane

As a result, an algorithm was developed (and later an engineering method) for calculating the selectivity depending on the technological parameters of the process, the size and concentration of the dispersed phase, taking into account the change in the concentration of the dispersed phase in time and along the channel length. Comparative analysis of the calculated and experimental data showed good convergence deviation of the calculated from experimental data did not exceed 17%. According to the obtained curves, a conclusion was made about the adequacy of the mathematical model.

**In the fifth chapter**, based on the results of the research, the original machine-instrumental design of the technological line of clarification of beer was developed (Fig. 13).

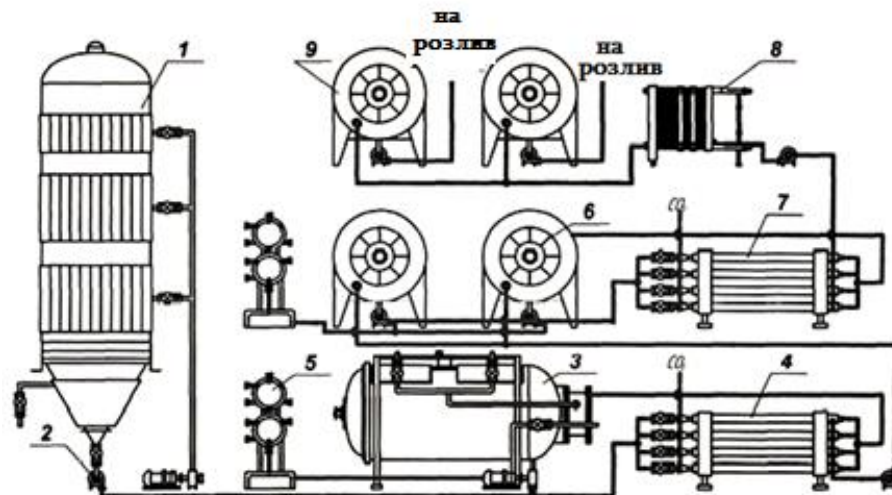


Fig. 13. Technological scheme of the area of beer clarification.

1-CKT, 2-centrifugal pump, 3, 4-membrane filter for pre-clarification of beer, 5-membrane apparatus for the recovery of beer from excess yeast, 6, 9 - buffer capacity, 7-membrane filter for the filtering of beer, 8- Plate cooler.

Based on the theoretical and experimental studies developed, the mathematical model was developed and proposed the biological stabilization of the beer and the original design of the membrane equipment for the process of clarification of beer, the distinguishing feature of which is resource and energy saving, the use of effective methods to control the concentration polarization, recycling of secondary resources, improving the quality of the finished product Fig. 14.15)

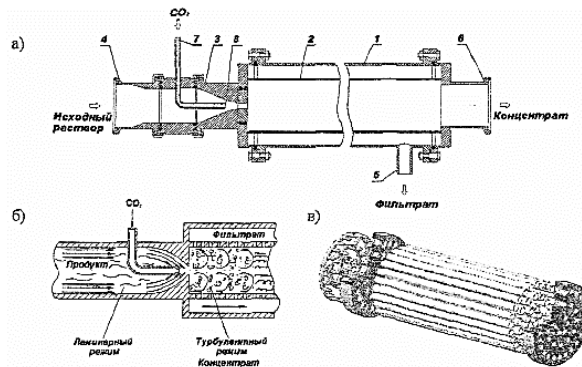


Fig. 14. Membrane apparatus for the filtration of gas-saturated food products: a) nrodolysy section of the membrane apparatus: 1-cylinder body, 2-membrane module, 3-injector, 4 feed pipe, 5-branch filtrate, 6- branch pipe, 7- pipeline CO2, 14-injector for the supply of CO2; b) the scheme of work; c) three-dimensional model

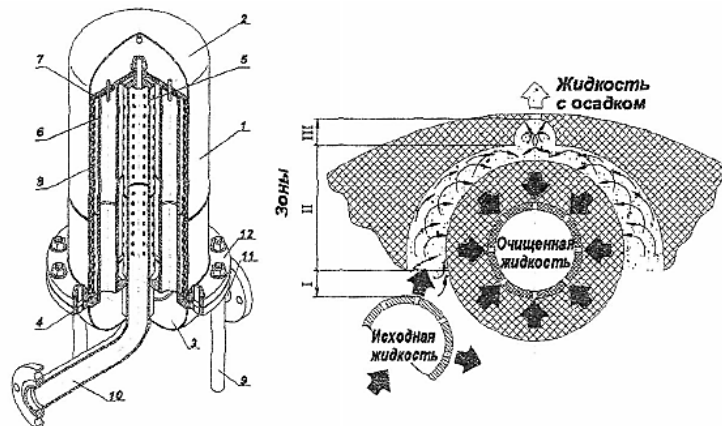


Fig. 15. Membrane apparatus with directed flows: three-dimensional model of membrane apparatus with directional flows: 1 - cylindrical shell, 2 - elliptic lid, 3 - elliptical bottom, 4 - filter holder, 5 - perforated distributor, 6 - filter elements, 7 - clamping plate, 8 - a profile element, 9 - supports, 10 - a branch pipe of input of a source liquid, 11 - outlet branch of the filtrate, 12 - flange; principle of operation: I - pressure zone, II - zone of speed conversion, III - zone of meeting of two flows.

The following is an engineering procedure for calculating the process of microfiltration of beer in a tubular channel and the technical and economic indicators of the efficiency of introducing a clarification line using membrane systems. The cost estimate showed that when the beer is clarified using the microfiltration process, the total costs are four times less than in the case of filtering with kieselguhr filters.



## MAIN CONCLUSIONS AND RESULTS

1. The physicochemical and microbiological properties of unfiltered beer have been studied, which have an effect on the process of beer filtration-the content of microorganisms is 5.68 million cells / ml, the value is 4.38, the turbidity is 78 units. EBU; the dependence of the viscosity of the beer "Germani" on the content of yeast cells in it was determined.
2. The choice of the membrane (tubular grade KMFE) and the configuration of the membrane system based on which the experimental setup was designed was justified.
3. The dependence of the amount of microscopic particles in vivo on their size was estimated, the structure of membrane properties was studied, which allowed to pre-plan the rational pore size and technological conditions of membrane operation
4. A computer program was developed to study the filterability of colloidal solutions
5. A mathematical model of fluid flow in a tubular membrane channel is developed under the influence of pulsating pressure.
6. The pattern of velocity distribution in a tubular membrane channel is established under the action of pulsating pressure.
7. The optimum frequency of pressure pulsation is established in the tubular membrane channel.
8. Kinetics and hydrodynamics of the filtering process were studied by the baromembrane method, the following sequence of filters
  - a) a filter with a pore size of 5  $\mu\text{m}$  to ensure simultaneous coarse and fine filtration ( $P_{p5} = 0.135$  MPa,  $p = 76\%$ ,  $J_{cp} = 7.5 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h}$ ,  $v = 1.9 \text{ m} / \text{s}$ , recirculation rate 3 ),
  - b) a sterilizing (filtering) filter with a pore size of 0.4  $\mu\text{m}$  ( $P_{rab} = 0.3$  MPa,  $\varphi = 100\%$ ,  $J_{cp} = 1.7 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ h}$ ,  $v = 0.9 \text{ m} / \text{s}$ , recirculation rate 5)
9. The physicochemical, microbiological and organoleptic parameters of the clarified beer "Germanyuli" have been studied, the stability of beer has been predicted, which made it possible to conclude about the high quality of the clarified beer obtained (TI 9184-103 2007, GOST R51174-98)
10. A mathematical model of the process of filtering a suspension in a tubular channel has been developed, which makes it possible to determine with high accuracy the selectivity of a membrane, depending on the technological parameters of the process, the dimensions and concentration of the dispersed phase
11. Based on the developed mathematical model, the engineering procedure for calculating the process of microfiltration of suspensions has been improved, taking into account the change in the concentration of the dispersed phase in time and along the length of the channel.

12. The methods for controlling the concentration polarization are investigated, the use of a pulsed microfiltration regime to destroy the gel layer on the membrane surface is justified, rational parameters of the pulsed mode  $0.4 \mu\text{m} - \Delta P_b = 0.25 \text{ MPa}$ ,

$\tau_2=3 \text{ s}$ ,  $T=600 \text{ s}$ ,  $5 \text{ MKM} - \Delta P_b = 0,1 \text{ MPa}$ ,  $\tau_2=5 \text{ s}$ ,  $T=600 \text{ s}$

13. Designs of membrane equipment with a lower level of concentration polarization for effective clarification of beer have been developed.

14. Technological recommendations on the use of the microfiltration process and the technological scheme of the beer clarification section are proposed.

**The main questions of the thesis are published in the following works:**

1. Shota Rukhadze, Megi Afradonidze, Shalva Tsagareishvili. Grape wines and Biological stabilization of juices using electrolysis. Akaki Tsereteli State University "Moambe" 11 (1), 6 pp. 2018.
2. Afradonidze str. D., Rukhadze Sh. Sh., Martaleishvili n. V., Tsagareishvili Sh. D. "The study of colloidal filtration capability on computer computing. Akaki Tsereteli State University "Moambe" 10 (2), 5 pp. 2017.
3. REDUCTION OF CONCENTRATION POLARIZATION IN A TUBULAR MEMBRANE APPARATUS BY THE ACTION OF PULSATING PRESSURE. Collection of Works - International Scientific Conference Agricultural and Transport Machines: Development Prospects in Response to Modern Requirements of Standardization and Quality Management Kutaisi 2017.
4. Sh. Ruxadze, M. Apridonidze, A. Shotadze, Sh. Cagareishvili DEVICE FOR PROVIDING ECOLOGICAL SAFETY OF BALLAST WATERS AND PRODUCING INDUSTRIAL WATER AT THE DESTINATION SAEPORIS. Collection of Works - International Scientific Conference Agricultural and Transport Machines: Development Prospects in Response to Modern Requirements of Standardization and Quality Management Kutaisi 2017.
5. Sh. Ruxadze, M. Apridonidze, A. Shotadze, Sh. Cagareishvili ELCTRODEIONIZATION AND WATER USE PRACTICES. Collection of Works - International Scientific Conference FOOD QUALITY IMPROVEMENT PROBLEMS PROCEEDINGS. Tbilisi 2016.
6. O. Sesikashvili, D. Tsagareishvili, Sh. Tsagareishvili-Production of extrudates of the porous microstructure of the nut flour filler. Collection of Works-International Scientific and Practical Conference „Innovative Aspects in Food and Hospitality Industry Equipment Development Under Present Conditions” Melitopol-Kyrylovka,Ukraine, 8–11 september 2015. pp.187-189
7. Tsagareishvili, O. Sesikashvili, Sh. Tsagareishvili -Thermoplastic extrusion process parameters affect the functional properties of extrudes. International Scientific and

Practical Conference „Actual Problems and Modern Technologies of Food Products"  
Kutaisi, 2014, pp.398-400.

8. D.Tsagareishvili, T. Tskipurishvili, Sh. Tsagareishvili - DPhysical-Chemical Concept of Obtaining Extrudes by Thermoplastic Extrusion. 2nd International Scientific Conference "Energy: Regional Problems and Development Opportunities", Conference Proceedings, Kutaisi,2013, pp. 222-224
9. D.Tsagareishvili, A. Tvalchrelidze, Sh. Tsagareishvili - Studies of Production Processes of Foods with Porous Structures by Thermoplastic Extrusion Method for the purpose of Designing Low-Productive Extruder. International Scientific-Practical Conference "Improvement of Food Production Technologies and Engineering" Conference Proceedings, Kutaisi, 2011, pp. 231-235