

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ირინა დენისოვა

ჩამდინარე წყლების სედიმენტაციის კვლევა შეწონილი
ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს გათვალისწინებით

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0406

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

2019 წელი

საავტორო უფლება © 2019, დენისოვა ირინა

ქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სამშენებლო ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავაცანით სახელი, გვარი მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ჩამდინარე წყლების სედიმენტაციის კვლევა შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრაულიკური სისხოს გათვალისწინებით“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის საუნივერსიტეტო სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

_____, _____ 2019 წელი

ხელმძღვანელი: პროფესორი ირმა ინაშვილი

რეცენზენტი: ასოცირებული პროფესორი
შორენა კუპრეიშვილი

რეცენზენტი: ასოცირებული პროფესორი
დავით ჩხაიძე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2019 წელი

ავტორი: ირინა დენისოვა

დასახელება: „ჩამდინარე წყლების სედიმენტაციის კვლევა შეწონილი
ნაწილაკების ჰიდრაგლიკური სისხოს გათვალისწინებით“

სადოქტორო პროგრამა: მშენებლობა

ხარისხი: ინჟინერიის დოქტორი მშენებლობაში

სხდომა ჩატარდა:

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ
ზემომოყვანილი 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 გამოყენებული საავტორო
უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ
მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ
მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია
სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს
პასუხისმგებლობას.

რეზიუმე

წყლის რესურსების ანთროპოგენული დაბინძურება თანამედროვეობის ერთ-ერთი ყველაზე სერიოზული პრობლემაა. ურბანიზაციის, საწარმოო სექტორის განვითარებისა და სოფლის მეურნეობის ინტენსიფიკაციის პირობებში ხშირად ხდება წყლის დაბინძურება კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო, საწარმოთა და სასოფლო-სამეურნეო ჩამონადენით, რაც იწვევს ბუნებრივი წყლების თვისებების და შემადგენლობის ისეთ ცვლილებებს, რომლის დროსაც წყალი მთლიანად ან ნაწილობრივ უვარგისი ხდება მომხმარებლისათვის.

საქართველოს დღევანდელი ეკონომიკური მდგომარეობისა და კანონმდებლობაში არსებული ხარვეზების გამო ჩამდინარე წყლების გამწმენდი ინფრასტრუქტურის მდგომარეობა მიძიმეა. საყოფაცხოვრებო და სამრეწველო ჩამონადენი, ხშირ შემთხვევაში, ყოველგვარი გაწმენდის გარეშე ჩაედინება წყალსატევებში, რითაც დიდ ზიანს აყენებს მათ ეკოსისტემას.

შექმნილი მდგომარეობიდან გამოსავალს წარმოადგენს როგორც ჩამდინარე წყლების გამწმენდი სისტემების მოდერნიზაცია და ახალი, მოწინავე ტექნოლოგიების გამოყენება, აგრეთვე მეტად აქტუალურია არსებული, დაბალხარჯიანი და ეფექტური მეთოდების სრულყოფა.

ჩამდინარე წყლებიდან მყარდისპერსიული მინარევების მოშორების ყველაზე მარტივ ხერხს წარმოადგენს სედიმენტაცია - შეწონილი ნაწილაკების გრავიტაციული დალექვა, რომელსაც იყენებენ წყლების მექანიკური გაწმენდის საფეხურზე. ეს მეთოდი გამოიყენება ნებისმიერი ტექნოლოგიური სქემის შერჩევისას, როგორც მოსამზადებელი ეტაპი შემდგომი გაწმენდისთვის, ასევე როგორც საბოლოო გაწმენდა - თუ ტექნოლოგიურად მოთხოვნილია ჩამდინარე წყლებიდან მხოლოდ უხსნადი მინარევების მოშორება.

ერთ-ერთი ძრითადი პარამეტრი, რომელიც გამოიყენება დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების გაანგარიშებისას არის შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარე - ჰიდრავლიკური სისხო, რომლის განსაზღვრის უზუსტობის გამო, შეწონილი ნაწილაკები ან ვერ ასწრებენ სალექრის ძირზე დალექვას და მიყვებიან გაყვანილ წყალს, ან გამწმენდი ნაგებობების ზომები ბევრად აღემატება ოპტიმალურს, რაც საგრძნობლად ზრდის მათ ღირებულებას.

აუცილებელია იმის მიღწევა, რომ მინიმალური ხარჯებით მიღებულ იქნას დალექვის მაქსიმალური ეფექტი. ამ პრობლემის გადაწყვეტის ერთ-ერთი საშუალებაა ჩამდინარე წყლების ძირითადი მახასიათებლების შესწავლა და გამოთვლებში გამოყენებული მონაცემების მეცნიერული დასაბუთება.

დალექვის სხვადასხვა რეჟიმისა და კონცენტრაციის პირობებში შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს დაზუსტება ხელს შეუწყობს გამწმენდი ნაგებობების გაბარიტების სწორ შერჩევას, დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების ეფექტურობის გაზრდას და წყლის გაწმენდის ხარისხის გაუმჯობესებას.

სადისერტაციო ნაშრომი მიზნად ისახავს ჩამდინარე წყლების მექანიკური საფეხურის გამწმენდი ნაგებობების - პირველადი სალექრების გაანგარიშების მიზნით, ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის კანონების კვლევას. კერძოდ, შეწონილი ნაწილაკების სედიმენტაციისას ჰიდრავლიკური სისხოს გამოთვლის მეთოდის დაზუსტებას.

ნაშრომში ჩატარებული თეორიული კვლევის საფუძველზე მიღებულია შემდეგი შედეგები:

- ლამინარულ რეჟიმში, შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ბალანსის განტოლების გამოყენებით და ნაწილაკისა და სითხის ფიზიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით მიღებულ იქნა, მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლება, როგორც აჩქარებული ისე სტაციონარული მოძრაობისთვის;
- მიღებული ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლების ანლიზის შედეგად დადგინდა სტაციონარულ რეჟიმში გადასვლამდე, ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობის ხანგრძლივობის და მის მიერ გავლილი მანძილის საანგარიშო დამოკიდებულებები;
- ლამინარული რეჟიმის პირობებში, ნიუტონის მეორე კანონზე დაყრდნობით, ნაწილაკისა და ნაკადის სიჩქარეების გათვალისწინებით, მიღებულია მცირე ზომის, სფეროსებრი ნაწილაკის მიერ ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე განვლილი მანძილისა და ნაწილაკის რელაქსაციის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების საანგარიშო განტოლებები;
- კონსოლიდირებული ნაწილაკების ღრუბლის დალექვისას, ნაწილობრივ შეღწევად და შეუღწევად ღრუბლებზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალების გათანაბრებით მიღებულ იქნა კონცენტრაციის ზღვრული მნიშვნელობის საანგარიშო განტოლება, რომლის მიღწევისას ხდება ნაწილობრივ შეღწევადი დალექვის რეჟიმის გადასვლა შეუღწევადი ღრუბლის დალექვის რეჟიმში;
- ჰიპსომეტრულ კანონზე დაყრდნობით, საწყისი კონცენტრაციისა და შეწონილ ნაწილაკთა ლამინარული და გარდამავალი გარსშემოდენისას ჰიდრავლიკური სისხოს გათვალისწინებით, მიღებულ იქნა შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების საანგარიშო განტოლება, რომელიც აგრეთვე ითვალისწინებს ჩამდინარე წყლების ტემპერატურას;
- წინააღმდეგობის ძალების გათანაბრებით ნაწილაკების ლამინარული და გარდამავალი რეჟიმებით გარსშემოდენისას და ორივე რეჟიმში ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს გათვალისწინებით, მიღებულ იქნა ზღვრული კონცენტრაციისა და ზღვრული სიღრმის საანგარიშო განტოლება, რომლის მიღწევის შემდეგ, ნაწილაკების დალექვის ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმი იცვლება გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმით;

- შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის კვლევების შედეგად მიღებულ ექსპერიმენტალურ და თეორიულ მონაცემებზე დაყრდნობით და შეწონილი ნაწილაკების სითხეში განაწილების უჯრედული მოდელის გამოყენებით დაზუსტდა სითხის დინამიკური სიბლანტის, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის, რეინოლდსის რიცხვის და ჰიდრავლიკური სისხოს ეფექტური მნიშვნელობები;
- შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ბალანსის განტოლებაზე დაყრდნობით, წინააღმდეგობის კოეფიციენტისა და სითხის სიმკვრივის ეფექტური სიდიდეების გათვალისწინებით, მიღებულ იქნა ლამინარულ რეჟიმში შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვისას ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო დიფერენციალური განტოლება.

ამგვარად, მიღებული დამოკიდებულებები საშუალებას იძლევა განისაზღვროს შეწონილი ნაწილაკების დალექვის კანონზომიერებები, როგორც თავისუფალი დალექვისას - აჩქარებული და სტაციონარული მოძრაობის დროს, აგრეთვე შეზღუდული დალექვის პირობებში ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარის კლებისას.

სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგების გამოყენებით შესაძლებელია დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების ოპტიმალური ზომების დადგენა, რაც უზრუნველყოფს მინიმალური ხარჯებით ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მოთხოვნილი ეფექტის მიღწევას.

Abstract

Anthropogenic pollution of water resources is one of the most serious problems of modernity. With increased urbanization, industrial sector development and agriculture intensification often occurs water pollution municipal, industrial and agricultural effluents, which causes such changes of the natural waters properties and composition in which the water is completely or partially become unfit for consumers.

Due to the current economic situation in Georgia and existing problems in the legislation, the state of wastewater treatment infrastructure is not good. Domestic and industrial effluents, in many cases, without any treatment flow into water bodies, causing damage to their ecosystem.

The way out of the current situation is the modernization of wastewater treatment systems and the use of new, advanced technologies, as well as the most relevant is the use of existing, inexpensive and effective methods of treatment.

One of the main parameters used for the calculation of constructions for the phases separation is the velocity of sedimentation of suspended particles, due to inaccuracy of calculation of which the suspended particles either have no time to settle to the bottom of the settling tank and follow the removed water, or the dimensions of the treatment constructions are much higher than optimal, which significantly increases their cost value.

It is necessary to achieve the maximum effect of the sedimentation at minimal costs. One of the ways to solve this problem is the study of the basic characteristics of the wastewater and the scientific justification of the data used in its calculations.

More precise definition of sedimentation velocity in different concentrations and modes will facilitate the proper selection of dimensions of settling tanks, increase efficiency of constructions for dispersive phases separation and improve water treatment quality.

The aim of the thesis is to determine the regularities of sedimentation of suspended particles, for the calculation the constructions for wastewater treatment - grit chambers and primary sedimentation tanks, particularly, clarify the methods of calculation the velocity of sedimentation.

On the base of theoretical research the following results have been obtained:

- In the laminar mode, based on the equation of balance of the forces acting on the particle, using the physical characteristics of the particles and the liquid, an equation for calculating fall down velocity of a small spherical particles, both for accelerated and stationary motion have been obtained;
- As a result of the analysis of the equation for calculating fall down velocity of spherical particles in the accelerated mode, until the transition to a stationary mode, the motion duration and the distance passed by the particle have been determined;
- In the laminar regime, based on Newton's Second Law, taking into account velocity of the particles and the flow velocity, an equation for calculating the dependence of relaxation velocity on time and for calculating the distance passed by the particle before reaching the flow velocity have been obtained;
- During the sedimentation of the consolidated cloud of particles, under the condition of equality of resistance forces acting on permeable and impermeable clouds, taking into account the physical characteristics of the particles, an equation of the boundary concentration of particles have been derived, at which permeable sedimentation mode changes to impermeable sedimentation mode;
- Based on the hypsometric law, taking into account the initial particle

concentration and velocities in laminar and transient modes, a dependence of the volumetric concentration of suspended particles on the settling depth have been obtained, which also takes into account the wastewater temperature;

- Under the condition of equality of resistance forces acting on the particles during flow around the particle in laminar and transient modes, the boundary value of concentration and depth of settling have been obtained, at which the laminar flow mode passes into the transient flow mode;
- Based on the results of experimental and theoretical studies of hindered settling of suspended particles and using a cell model of the particle distribution in a liquid, the effective values of dynamic viscosity of fluid, resistance coefficient, Reynolds number and fall down velocity have been determined;
- In laminar mode, based on the equation of balance of forces acting on the particle, taking into account the effective values of the resistance coefficient and fluid density, differential equations of settling velocity of particles in hindered settling have been obtained.

This equations can be used to determine the regularities of sedimentation of suspended particles as in free mode of settling during accelerated and stationary motion, as well as in hindered settling when the velocity of particle sedimentation decreases.

Using the results obtained in the thesis, it is possible to determine the optimal dimensions of constructions for the phases separation, which ensures required result of the wastewater treatment with minimal cost value.

შინაარსი

შესავალი	14
თავი I. ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მეთოდები და გამწმენდი ნაგებობები	20
1.1. ჩამდინარე წყლების კლასიფიკაცია	20
1.2. ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მეთოდები	25
1.3. სალექრების კლასიფიკაცია	29
1.3.1. ჰორიზონტალური სალექრები	31
1.3.2. ვერტიკალური სალექრები	33
1.3.3. რადიალური სალექრები	36
1.3.4. სალექრები თხელფენოვანი ელემენტებით	38
თავი II. გამწმენდი ნაგებობების ჰიდრავლიკური და გეომეტრიული პარამეტრები	41
2.1. ჩამდინარე წყლების დალექვის პროცესის შემსწავლელი ექსპერიმენტალური კვლევების მიმოხილვა	41
2.2. შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს განმსაზღვრელი დამოკიდებულებები	46
2.3. ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხოს განსაზღვრა კრიტერიალური განტოლებების მაშვეობით	56
2.4. სალექრების ჰიდრავლიკური და სამშენებლო პარამეტრების გაანგარიშების მეთოდების ანალიზი	61
2.4.1. სალექრების გაანგარიშება განზოგადოებული მეთოდით	70
2.5. სალექრების მოდელირება და ოპტიმალური პარამეტრების შერჩევა და ანალიზი	77
თავი III. ჩამდინარე წყლების დისპერსიული ფაზის სედიმენტაციის კვლევა	81
3.1. დისპერსიული ფაზის ნაწილაკების გრავიტაციული დალექვის კვლევა	81
3.2. ორფაზიან ნაკადში შეწონილი ნაწილაკების რელაქსაციის სიჩქარის კვლევა	90
3.3. კონსოლიდირებული ნაწილაკების დალექვის კანონზომიერებების კვლევა	97
3.4. სალექრებში, შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვლილების დინამიკის კვლევა	105
თავი IV. შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის მოდელირება	112

4.1.	შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის კვლევა უჯრედულ მოდელზე დაყრდნობით	112
4.2.	შეწონილი ნაწილაკების დალექვის მოდელირება ლამინარულ რეჟიმში, თავისუფალი და შეზღუდული დალექვის პირობებში	122
	ზოგადი დასკვნები	129
	გამოყენებული ლიტერატურა	131

ცხრილების ნუსხა

1. სალექრების ძირითადი საანგარიშო სიდიდეები	66
2. a კოეფიციენტის დამოკიდებულება მინიმალურ ჩამდინარე წყლების საშუალო-თვიურ ტემპერატურაზე	72
3. მდგარ წყალში, ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტის დამოკიდებულება დალექვის ხანგრძლივობაზე	73
4. სალექარში წყლის მოძრაობის v სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი - w	74
5. $(KH/h)^n$ -ის მდგენელის მნიშვნელობები	75
6. შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხოს დროზე დამოკიდებულება	84
7. შეწონილი ნაწილაკის მიერ განვლილი მანძილის ჰიდრაულიკურ სისხოზე დამოკიდებულება	88
8. შეწონილი ნაწილაკის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულება y_0 -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისას	94
9. მოცულობითი კონცენტრაციის, შეწონილ ნაწილაკებს შორის მანძილზე დამოკიდებულება	99
10. შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის ექსპერიმენტალური მონაცემები	119

ნახაზების ნუსხა

1. ჰორიზონტალური სალექრის პრინციპიალური სქემა	32
2. ვერტიკალური სალექრის სქემა	34
3. ვერტიკალური სალექრების ჯგუფი	35
4. რადიალური სალექარი	36
5. სალექარი თხელფენოვანი ელემენტებით სითხის მოძრაობის წინააღმდეგ სქემით	39
6. თხელფენოვანი სალექარი სითხის მოძრაობის ჯვარედინი სქემით	40
7. ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტის მრუდები	43
8. მყარი შეწონილი ნაწილაკების დალექვის დამოკიდებულება დროზე	44
9. მყარი შეწონილი ნაწილაკების დალექვის პროცენტული რაოდენობის დამოკიდებულება ჰიდრაულიკურ სისხოზე	45
10. ცილინდრში, ერთგვაროვანი კონცენტრირებული სუსპენზიის დალექვისას მიმდინარე პროცესები	46
11. მყარი სფეროსებრი ნაწილაკის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სტანდარტული მრუდი	53
12. სტოქსის რეჟიმში დალექვისას $Re (Ar)$ დამოკიდებულების გრაფიკი	57
13. $Re (Ar)$ დამოკიდებულების გრაფიკი ნაწილაკის მოძრაობისას გარდამავალ (1) და ავტომოდელურ (2) რეჟიმებში	59
14. ნაკადში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სქემა	69
15. სალექრის სიგრძის გამოსათვლელი ნომოგრამა	70
16. ჰორიზონტალური სალექარი	71
17. კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო ჩამდინარე წყლებში n -ხარისხის მაჩვენებლის დამოკიდებულების გრაფიკი შეწონილი ნაწილაკების საწყის კონცენტრაციაზე	74
18. სითხეში თავისუფალი დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედი ძალები	82
19. ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხოს დამოკიდებულება დალექვის ხანგრძლივობაზე.	85
20. ნაწილაკის მიერ გავლილი მანძილის დამოკიდებულება ჰიდრაულიკურ სისხოზე	88
21. ლამინარულ რეჟიმში ნაკადში მოძრავი ნაწილაკის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი	95
22. დისპერსიული სისტემის ელემენტარული მოცულობა ნაწილაკების კუბური განლაგებისას	99

23. მოცულობითი კონცენტრაციის დამოკიდებულება ნაწილაკებს შორის მანძილზე	100
24. ნაწილაკების ღრუბლის დალექვის დინამიკა	101
25. სალექარში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის პროცესის სქემა	105
26. შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი	106
27. უჯრედულ მოდელში ნაწილაკისა და სითხის უჯრედის სქემატური გამოსახულება	113
28. ექსპერიმენტალური მონაცემებით მიღებული მნიშვნელობების გამოყენებით გამოთვლილი $\ln \left[\frac{u_a}{u_o} \left(\frac{1+c_V^{1/3}}{1-c_V} \right) \right]$ სიდიდის დამოკიდებულება, $\frac{c_V}{1-c_V}$ სიდიდეზე	120

შესავალი

თემის აქტუალობა. წყალი ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ბუნებრივი რესურსია დედამიწაზე. მის გარეშე არ იარსებებდა სიცოცხლე. ყველა ცოცხალი ორგანიზმი, მათ შორის ადამიანი წყლის არსებობაზეა დამოკიდებული. გარემოს ეკოლოგიური წონასწორობა წყლის ხარისხს უკავშირდება. ამიტომ წყლის დაბინძურებისგან დაცვა უპირველეს ამოცანად გვევლინება.

წყლის რესურსების ანთროპოგენული დაბინძურება თანამედროვეობის ერთ-ერთი ყველაზე სერიოზული პრობლემაა. კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო, საწარმოთა და სასოფლო-სამეურნეო ჩამონადენი იწვევს ბუნებრივი წყლების თვისებების და შემადგენლობის ისეთ ცვლილებებს, რომლის დროსაც წყალი მთლიანად ან ნაწილობრივ უვარგისი ხდება მომხმარებლისათვის [1].

წყლის ხარისხზე დამოკიდებულია ადამიანის ჯანმრთელობა. ჯანდაცვის მსოფლიო ორგანიზაციის მონაცემებით დაავადებების 80% დაბინძურებული წყლის გამოყენებით არის გამოწვეული [2].

ურბანიზაციის, საწარმოო სექტორის განვითარებისა და სოფლის მეურნეობის ინტენსიფიკაციის პირობებში წყლის დაბინძურების ტემპები აღემატება მის ბუნებრივი რეგენერაციის და თვითგაწმენდის უნარს. აშშ-ს მსოფლიო რესურსების ინსტიტუტის მონაცემებით, დაბინძურების მზარდი ტემპები 2025 წლისთვის გამოიწვევს წყლის დეფიციტს, რომელიც 3,5 მილიარდზე მეტ ადამიანს შეეხება [3].

წყლის ობიექტების დეგრადაციის თავიდან აცილების მიზნით მსოფლიოს მრავალმა ქვეყანამ მიიღო საკანონმდებლო აქტები წყლის რესურსების დაცვის შესახებ. მათ შორის: ევროკავშირის წყლის ჩარჩო დირექტივა (2000/60/EC), ურბანული ჩამდინარე წყლების გაწმენდის დირექტივა (91/271/EEC), სახიფათო ნივთიერებების დირექტივა (76/464/EEC) და დიდი სამრეწველო ობიექტებისათვის განკუთვნილი დაბინძურების

ინტეგრირებული პრევენციისა და კონტროლის შესახებ IPPC დირექტივა (96/61/EC) [4, 5].

საქართველო მტკნარი წყლის რესურსებით მდიდარი ქვეყანაა. მათი სიუხვე განპირობებულია ქვეყნის გეოლოგიურ-კლიმატური პირობებით და უხვი ატმოსფერული ნალექებით. წყლის რესურსები საქართველოს ერთ-ერთი მთავარი ეროვნული სიმდიდრეა და მას დაბინძურებისგან განსაკუთრებული დაცვა სჭირდება.

საქართველოს კანონმდებლობა წყლის შესახებ ეფუძნება საქართველოს კონსტიტუციას, საქართველოს კანონებს „გარემოს დაცვის შესახებ“ და „წყლის შესახებ“, კანონქვემდებარე ნორმატიულ აქტებს და საქართველოს საერთაშორისო ხელშეკრულებებსა და შეთანხმებებს. მიუხედავად ამისა, საკანონმდებლო ხარვეზებისა და მძიმე ეკონომიკური მდგომარეობის გამო საქართველოს ჩამდინარე წყლების ინფრასტრუქტურის მდგომარეობა სავალალოა.

სამრეწველო და საყოფაცხოვრებო ჩამდინარე წყლები ხშირად ყოველგვარი გაწმენდის გარეშე ჩაედინება მდინარეებში, ტბებსა და წყალსატევებში, რითაც დიდ ზიანს აყენებს მათ ეკოსისტემას. საქართველოს მდინარეებისა და წყალსატევების წყლის ხარისხი ჯერ კიდევ 1986 წელს მდინარული ჩამონადენის ერთეულზე დაბინძურების დონით 1,7-ჯერ აღემატებოდა მსოფლიოს საშუალო მაჩვენებელს [6].

უკანასკნელ ათწლეულებში, საქართველოში საცხოვრებელი, სამრეწველო და კომერციული ობიექტების რაოდენობის ზრდასთან ერთად გაიზარდა წყლის რესურსებზე მოთხოვნა და შესაბამისად წყლის დაბინძურების ხარისხი.

საქართველოში ზედაპირული წყლების ხარისხის მონიტორინგის მონაცემებმა ცხადყო, რომ დაბინძურების ყველაზე დიდ წყაროს მუნიციპალური ჩამდინარე წყლები წარმოადგენს. ქალაქებთან გამდინარე მდინარეები დაბინძურებულია ორგანული ნივთიერებებით, შეწონილი ნაწილაკებით, დეტერგენტებით, აზოტის და ფოსფორის შენაერთებით და

სხვა ნივთიერებებით. ეს გამოწვეულია იმით, რომ საქართველოში ცენტრალიზებული კანალიზაციის სისტემები ძირითადად 1972-1986 წლებში შეიყვანეს ექსპლუატაციაში. გამწმენდი ნაგებობების უმრავლესობა მწყობრიდან არის გამოსული, დანადგარები ამორტიზებული ან დაკარგულია. ფუნქციონირებადი სისტემები მუშაობს არადაამაკმაყოფილებლად [7, 8].

საქართველოს ზედაპირული წყლების ხარისხზე აგრეთვე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს სამრეწველო სექტორი. მანგანუმის მწარმოებელი მსხვილი საწარმოების, სპილენძისა და ოქროს საბადოების, ელექტროსადგურების და ნავთობგადამამუშავებელი ქარხნების ჩამდინარე წყლები შეიცავს მძიმე ლითონებს, ნავთობპროდუქტებს, ფენოლს და სხვა ტოქსიკურ ნივთიერებებს.

შექმნილი მდგომარეობიდან გამოსავალს წარმოადგენს ჩამდინარე წყლების გამწმენდი სისტემების მოდერნიზაცია და ახალი, მოწინავე ტექნოლოგიების დანერგვა.

გამწმენდი ნაგებობების შერჩევის ან მოდერნიზაციის პროცესში გათვალისწინებულ უნდა იქნეს ყველა ის ფაქტორი, რომელიც შეესაბამება დაბინძურების კონკრეტულ წყაროს. სწორი მეთოდის შერჩევაზე დამოკიდებული ჩამდინარე წყლების გამწმენდი ნაგებობების ეფექტურობა და საიმედო ფუნქციონირება.

ვინაიდან, ჩამდინარე წყლები წარმოადგენს პოლიდისპერსიულ, ჰეტეროგენურ, აგრეგატულად არამდგრად სისტემას, ამიტომ მისი კვლევისას აუცილებელია ძირითადი მახასიათებლების სწორი განსაზღვრა და შესაბამისად დისპერსიული ფაზისა და დისპერსიული გარემოს თვისებების გათვალისწინებით მიმდინარე პროცესების ადეკვატური აღწერა.

ჩამდინარე წყლების ძირითადი მახასიათებლების აკადემიურ დონეზე შესწავლა და გამოთვლებში გამოყენებული მონაცემების მეცნიერული დასაბუთება, ხელს შეუწყობს გამწმენდი ნაგებობების ეფექტურობის

გაზრდას და წყლის გაწმენდის ხარისხის გაუმჯობესებას.

წყლის გაწმენდის მეთოდებიდან ყველაზე მარტივ, საიმედო, ეფექტურ და დაბალხარჯიან მეთოდს წარმოადგენს დალექვა (სედიმენტაცია). შეწონილი ნაწილაკების დალექვა ხდება ჩამდინარე წყლების მექანიკური გაწმენდის საფეხურზე - სალექრებში.

ძრითადი პარამეტრი, რომელიც გამოიყენება სალექრების გაანგარიშებისას არის შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარე - ჰიდრავლიკური სისხო. ამიტომ, ჩამდინარე წყლების დამაბინძურებლების ჰიდრავლიკური სისხოს შესწავლას და მისი გამოთვლის მეთოდების შემუშავებას დიდი თეორიული და პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება.

ჰიდრავლიკური სისხოს გამოთვლის არასრულყოფილების გამო, ხშირად სალექრების გეომეტრიული ზომები ბევრად აღემატება ოპტიმალურს, რაც საგრძნობლად ზრდის მათ ღირებულებას. აუცილებელია იმის მიღწევა, რომ მინიმალური ხარჯებით მიღებულ იქნას დალექვის მაქსიმალური ეფექტი. ამ პრობლემის გადაწყვეტის ერთ-ერთი საშუალებაა ჰიდრავლიკური სისხოს მაქსიმალურად ზუსტი განსაზღვრა.

კვლევის მიზანი და ამოცანები. სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია ჩამდინარე წყლების გამწმენდი ნაგებობების - სალექრების ჰიდრავლიკური და სამშენებლო პარამეტრების გაანგარიშების მიზნით, ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის კანონების კვლევა. კერძოდ, შეწონილი ნაწილაკების სედიმენტაციისას ჰიდრავლიკური სისხოს გამოთვლის მეთოდის სრულყოფა; ცალკეული ნაწილაკის აჩქარებული და სტაციონარული მოძრაობის საანგარიშო დამოკიდებულებების შემუშავება; ნაწილაკის სითხის ნაკადისგან განსხვავებული სიჩქარით მოძრაობისას მისი რელაქსაციის სიჩქარისა და დროის დადგენა; შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს ჩამდინარე წყლების კონცენტრაციაზე დამოკიდებულების კვლევა; შეწონილი ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაციების პირობებში კონსოლიდირებულ ნაწილაკთა ღრუბლის დალექვის კანონზომიერებების კვლევა; შეწონილი ნაწილაკების

შეზღუდული დალექვისას საანგარიშო პარამეტრების ეფექტური მნიშვნელობების დადგენა; შეწონილი ნაწილაკების თავისუფალი და შეზღუდული დალექვისას ნაწილაკთა სიჩქარის და დალექვის სიღრმის საერთო საანგარიშო დამოკიდებულების შემუშავება.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენდა პოლიდისპერსიული, აგრეგატულად არამდგრადი სისტემები და მათი დისპერსიული ფაზა, კერძოდ ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკები.

კვლევები ჩატარებულ იქნა ჰიდროდინამიკაში, ფიზიკასა და მათემატიკაში არსებული საყოველთაოდ აღიარებული მეთოდების გამოყენებით.

ნაშრომის ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე:

ჩატარებული თეორიული კვლევის შედეგად მიღებულ იქნა შემდეგი დამოკიდებულებები:

- ლამინარულ რეჟიმში, მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლება, როგორც აჩქარებული ისე სტაციონარული მოძრაობისთვის;
- სტაციონარულ რეჟიმში გადასვლამდე, ნაწილაკის აჩქარებულ რეჟიმში მოძრაობის ხანგრძლივობის და მის მიერ განვლილი მანძილის საანგარიშო დამოკიდებულებები;
- ლამინარული რეჟიმის პირობებში, მცირე ზომის, სფეროსებრი ნაწილაკის მიერ ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე, მისი რელაქსაციის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების განტოლება და ნაწილაკის სიჩქარის რელაქსაციის დროს განვლილი მანძილის საანგარიშო განტოლება;
- კონსოლიდირებული ნაწილაკების ღრუბლის დალექვისას, კონცენტრაციის ზღვრული მნიშვნელობის საანგარიშო განტოლება, რომლის მიღწევასაც ხდება ნაწილობრივ შეღწევადი დალექვის რეჟიმის გადასვლა შეუღწევადი ღრუბლის დალექვის რეჟიმში;
- შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების საანგარიშო განტოლება;

- ნაწილაკების კონცენტრაციისა და დალექვის სიღრმის ზღვრული მნიშვნელობების საანგარიშო განტოლება, რომელთა მიღწევასაც, ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმი იცვლება გარდამავალი რეჟიმით;
- განისზღვრა სითხის დინამიკური სიბლანტის, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის, რეინოლდსის რიცხვის და ჰიდრავლიკური სისხოს ეფექტური მნიშვნელობები;
- მიღებულ იქნა, ლამინარულ რეჟიმში დალექვისას, შეწონილი ნაწილაკის როგორც თავისუფალი, ისე შეზღუდული დალექვის სიჩქარის და დალექვის სიღრმის საანგარიშო დიფერენციალური განტოლებები, რომლებიც ითვალისწინებს მყარი ფაზის კონცენტრაციის დამოკიდებულებას დალექვის სიღრმეზე.

შედეგების გამოყენების სფერო. სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგების გამოყენებით შესაძლებელია სალექრების ოპტიმალური ზომების დადგენა. ჩამდინარე წყლების დაწმენდის მოთხოვნილი ხარისხის შესაბამისი გაბარიტების სალექრების მოწყობა, რაც უზრუნველყოფს მინიმალური ხარჯებით, ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მოთხოვნილი ეფექტის მიღწევას.

მიღებული შედეგების გამოყენება შესაძლებელია როგორც ჩამდინარე წყლების სალექრების, ასევე წყალმომარაგების, ირიგაციული და სხვადასხვა ჰიდროკვანძების სისტემების სალექრების პროექტირებისას.

კვლევის შედეგები ხელს შეუწყობს ჰიდრავლიკაში, წყალმომარაგებაში, წყალარინებაში, ირიგაციასა და სხვა მომიჯნავე დარგებში მოღვაწე მეცნიერებს სამომავლო კვლევების განხორციელებაში.

დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, 4 თავისა და ძირითადი დასკვნისაგან. იგი მოიცავს 138 ნაბეჭდ გვერდს, მათ შორის 28 ნახაზს და 10 ცხრილს; გამოყენებულია 115 დასახელების ლიტერატურა.

I თავი

ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მეთოდები და გამწმენდი ნაგებობები

1.1. ჩამდინარე წყლების კლასიფიკაცია

ჩამდინარე წყლები ადამიანის მიერ საყოფაცხოვრებო და ტექნოლოგიური დანიშნულებით გამოყენებული წყლებია, რომელიც ბინძურდება და იცვლის ფიზიკურ-ქიმიურ თვისებებს.

ჩამდინარე წყლების არასათანადო გაწმენდის შემთხვევაში ხდება ბუნებრივი წყლების დაბინძურება შეწონილი, გახსნილი, ორგანული და არაორგანული ნივთიერებებით. ადამიანის მოღვაწეობის გამო წყალში ხვდება 13 ათასამდე ტოქსიკური ნივთიერება. ყოველ წელს 5 მილიონზე მეტი ადამიანი, ძირითადად ბავშვები იღუპებიან დაავადებებისგან, რომელიც გამოწვეულია ჩამდინარე წყლების არასათანადო გაწმენდისა და დანაგვიანების გამო [2].

მსოფლიოს ბევრ რეგიონში დაბინძურების ტემპები აღემატება წყლის ბუნებრივი რეგენერაციის და თვითგაწმენდის უნარს. აშშ-ს მსოფლიო რესურსების ინსტიტუტის მონაცემებით, მილიარდზე მეტი ადამიანი ამჟამად ცხოვრობს წყალმწირ რეგიონებში [4].

დაბინძურება ზიანს აყენებს არა მხოლოდ ადამიანს და ჰიდროსფეროს, არამედ მთლიანად ეკოსისტემას.

ჰიდროსფეროს დაბინძურების მხრივ ეკოლოგიური დამაბულობის მოხსნის და წყლის კრიზისის შემცირების მიზნით, ჩამდინარე წყლების გაწმენდა ხშირ შემთხვევაში, წარმოადგენს ყველაზე ეკონომიკურად გამართლებულ გადაწყვეტილებას. ამიტომ მეტად მნიშვნელოვანია ჩამდინარე წყლების გაწმენდის ტექნოლოგიის დაცვა, გაუმჯობესება და კონტროლი. გარდა ამისა, თანამედროვე პირობებში უმნიშვნელოვანეს ამოცანას წარმოადგენს ჩამდინარე წყლების გაწმენდის პროცესების დახვეწა,

ახალი ეფექტური მეთოდების შემუშავება, არსებული წყლის გაწმენდის მეთოდების და ნაგებობების კონსტრუქციების მოდერნიზაცია.

არსებობს ჩამდინარე წყლების ორგანული, მინერალური და ბიოლოგიური დამაბინძურებლები. ორგანულ დამაბინძურებლებს წარმოადგენს მცენარეული და ცხოველური წარმოშობის მინარევები. მინერალური დამაბინძურებლებია კვარცის ქვიშა, თიხა, მჟავები და მათი მარილები, ტუტეები და სხვა. ბიოლოგიურ და ბაქტერიულ დამაბინძურებლებს მიეკუთვნება სხვადასხვა სახის მიკროორგანიზმები: მცირე ზომის წყალმცენარეები, საფუარის და ობის სოკო, ბაქტერიები და ვირუსები.

წარმოშობის მიხედვით განასხვავებენ ჩამდინარე წყლების სამ ძირითად კატეგორიას: კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო, საწარმოო და ატმოსფერულ ჩამდინარე წყლებს [9].

საწარმოო ჩამონადენი ბუნებრივი წყლების ყველაზე დიდ დამაბინძურებელს წარმოადგენს. ჩამონადენის შემადგენლობა და კონცენტრაცია დამოკიდებულია მრეწველობის დარგის ტექნოლოგიური პროცესის თავისებურებაზე, გადასამუშავებელი მასალის სახეობაზე, წარმოებისთვის გამოყენებულ კომპონენტებზე, საწყისი სუფთა წყლის ხარისხზე და სხვა.

საწარმოო ჩამონადენის მინარევები შემცველობის მიხედვით იყოფა სამ ჯგუფად:

- ჩამონადენი დაბინძურებული ძირითადად მინერალური მინარევებით (მეტალურგიური, მანქანათმშენებლობის, ნახშირმომპოვებელი საწარმოები; ქარხნები მინერალური სასუქების, მჟავების, სამშენებლო მასალების წარმოებისთვის და სხვა);

- ჩამონადენი დაბინძურებული ძირითადად ორგანული მინარევებით (ხორცის, თევზის, რძის, ქაღალდ-ცელულოზის, ქიმიური, მიკრობიოლოგიური მრეწველობა; პლასტმასის, კაუჩუკის ქარხნები და სხვა);

- ჩამონადენი დაბინძურებული მინერალური და ორგანული

მინარევებით (ნავთობმომპოვებელი, ნავთობგადამამუშავებელი, მსუბუქი, ფარმაცევტული მრეწველობა; საკონსერვო, შაქრის, ორგანული სინთეზის, ვიტამინების წარმოების ქარხნები და სხვა) [10].

განასხვავებენ „პირობითად სუფთა“ საწარმოო წყლებს, რომლებიც არ საჭიროებს გაწმენდას. მათ მიაკუთვნებენ თბურ და ატომურ ელექტროსადგურებში გაცივებისა და კონდენსაციისთვის გამოყენებულ წყლებს. ტბებსა და მდინარეებში ჩამდინარე გამთბარი წყალი, იწვევს „თბურ დაბინძურებას“. წყალსაცავში ტემპერატურული რეჟიმის შეცვლისას იცვლება ბიოლოგიური წონასწორობა, იწყება მიკროორგანიზმების აქტიური გამრავლება, ლურჯ-მწვანე წყალმცენარეების „აყვავება“, ამას მოჰყვება წყლის ჟანგბადით გაღარიბება, რაც ცხოველების მასობრივ დაღუპვას და უფრო ძლიერ ორგანულ დაბინძურებას იწვევს [1, 11].

ბუნებრივი წყლებისთვის უდიდეს საშიშროებას წარმოადგენს ბირთვული ენერგეტიკის ობიექტების ჩამონადენი, რომელიც შეიცავს რადიოაქტიურ ნარჩენებს.

კომუნალური მეურნეობის ჩამონადენი მოდის ქალაქებსა და დასახლებული პუნქტების საცხოვრებელი, ადმინისტრაციული და კომუნალური შენობებიდან, აგრეთვე სამრეწველო საწარმოების საყოფაცხოვრებო სათავსებიდან. ეს არის სანიტარული აღჭურვილობიდან წყალარინების სისტემაში მოხვედრილი წყლები. ისინი შეიცავს: მიკრობიოლოგიურ პათოგენურ დაბინძურებლებს - ბაქტერიებს, ვირუსებს და გელმინტებს; დეტერგენტებს - სარეცხ საშუალებებს; რთულ არომატულ ნახშირწყალბადებს, ნიტრატებს, ნიტრიტებს და სხვა მავნე ნივთიერებებს.

სანიაღვრე წყლების დაბინძურებას იწვევს ქუჩებიდან, საწარმოო ობიექტებიდან, ავტოგასამართი სადგურებიდან და სხვა ტერიტორიებიდან ნალექებით ჩარეცხილი მტვერი, ნავთობპროდუქტები და სხვა მინერალური და ორგანული დამაბინძურებლები.

ჩამდინარე წყლების ყველა სახის მინარევი (ლ.ა. კულსკი-ს კლასიფიკაციით), მათი წარმოშობის და მიუხედავად, ზომის მიხედვით

იყოფა ოთხ ჯგუფად.

პირველ ჯგუფს მიეკუთვნება წყალში უხსნადი უხემდისპერსიული მინარევები, მსხვილ ნაწილაკთა სახით. ამ მინარევების დიდი ნაწილის მოშორება შესაძლებელია გრავიტაციული დალექვის ხარჯზე.

მეორე ჯგუფის მინარევებს მიეკუთვნება: კოლოიდურ-დისპერსიული ნივთიერებები ნაწილაკების ზომით 10^{-6} სმ-მდე. ამ ნაწილაკების მცირე ზომა ართულებს მათ გრავიტაციულ დალექვას. ფიზიკური პირობებიდან გამომდინარე ამ ჯგუფის მინარევებს შეუძლიათ შეიცვალონ აგრეგატული მდგომარეობა და დაილექონ ფსკერზე.

მესამე ჯგუფს მიეკუთვნება ნივთიერებები ნაწილაკების ზომით 10^{-7} სმ-მდე. მათ გააჩნიათ დისპერსიულობის მოლეკულური ხარისხი. ისინი წყალში წარმოქმნიან ხსნარებს. ჩამდინარე წყლების მესამე ჯგუფის მინარევებისგან გასაწმენდად იყენებენ ბიოლოგიურ და ფიზიკურ-ქიმიურ მეთოდს.

მეოთხე ჯგუფის მინარევების ნაწილაკების ზომა 10^{-8} სმ-მდეა. მათ გააჩნიათ დისპერსიულობის იონური ხარისხი. მათ მიეკუთვნება მჟავების, მარილების და ფუძეების ხსნარები. ზოგიერთი მათგანის, მაგალითად ამონიუმის მარილების და ფოსფატების მოშორება ხდება ბიოლოგიური გაწმენდის შედეგად. თუმცა კომუნალური მეურნეობის ჩამდინარე წყლების სრული ბიოლოგიური გაწმენდის ტექნოლოგია ვერ უზრუნველყოფს წყლის მარილშემცველობის შეცვლას. მარილების კონცენტრაციის შესაცვლელად იყენებენ შემდეგ ფიზიკურ-ქიმიურ მეთოდებს: იონურ გაცვლას, ელექტროლიზს და სხვა [12].

წყლის დაბინძურების ხარისხი განისაზღვრება წყალში მავნე მინარევების კონცენტრაციით. მავნე ნივთიერებების ზღვრულად დასაშვები კონცენტრაციები (ზ.დ.კ) ძირითადი ჰიგიენური ნორმატივია. იზომება მგ/ლ- ში. მისი შემუშავება ხდება ქვეყნების და მსოფლიო ჯანდაცვის ორგანიზაციის მიერ.

ჩამდინარე წყლების შემადგენლობას განსაზღვრავენ სანიტარულ-

ქიმიური ანალიზის შედეგად, რომელიც სტანდარტული ქიმიური ტესტების გარდა შეიცავს რიგ ფიზიკურ, ფიზიკურ-ქიმიურ და სანიტარულ-ბაქტერიოლოგიურ ანალიზს.

სრული სანიტარულ-ქიმიური ანალიზი ითვალისწინებს ისეთი მაჩვენებლების განსაზღვრას როგორცაა: ტემპერატურა, შეფერილობა, სუნი, გამჭირვალობა, pH წყალბადური მაჩვენებელი, მშრალი ნალექის რაოდენობა, აბსოლუტურად მშრალი ნალექი და დანაკარგები ნალექის გავარვარება-გამოწოტობის შედეგად, ნალექის მოცულობა და მასა, პერმანგანატული დამჟანგველობა, ჟანგბადის ქიმიური მოთხოვნილება (ჟ.ქ.მ.), ჟანგბადის ბიოქიმიური მოთხოვნილება (ჟ.ბ.მ.), აზოტი (საერთო, ამონიუმის მარილების NH_4^+ , ნიტრიტული NO_2^- და ნიტრატული (NO_3^-), ფოსფატები, ქლორიდები და სულფატები, მძიმე ლითონები და სხვა ტოქსიკური ელემენტები, ზედაპირული აქტიური ნივთიერებები, ნავთობპროდუქტები, წყალში გახსნილი ჟანგბადი, წყლის კოლი-ტიტრი და კოლი-ინდექსი. გარდა ჩამოთვლილი მაჩვენებლებისა სრული სანიტარულ-ქიმიური ტესტების ნუსხაში შეიძლება შედიოდეს საწარმოო ჩამონადენის სპეციფიკური მინარევების განსაზღვრა.

დაბინძურებული ჩამდინარე წყლების წყალსატევებში ჩაშვებისას, თუ მათი რაოდენობა მცირეა, წყლის გაწმენდა მიმდინარეობს ბუნებრივად, თუმცა ეს პროცესი საკმაოდ ხანგრძლივია.

დღესდღეობით, ურბანიზაციის და ინდუსტრიალური განვითარების პირობებში, ჩამდინარე წყლების რაოდენობის მკვეთრი გაზრდის გამო, წყალსატევები ვერ ასწრებენ წყლის ბუნებრივ გაწმენდას. ამიტომ, აუცილებელ პირობას წარმოადგენს ჩამდინარე წყლების გაწმენდა წყალსატევში ჩაშვებამდე. მნიშვნელოვანია ჩამდინარე წყლების მოცულობისა და მინარევების შემადგენლობის ცოდნა, რის საფუძველზეც ხდება წყლის გამწმენდის მეთოდის შერჩევა.

1.2. ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მეთოდები

ჩამდინარე წყლების გაწმენდა უზრუნველყოფს სხვადასხვა მეთოდით წყალში არსებული მინერალური და ორგანული ნივთიერებების დაშლას ან ამოღებას. წყალი უნდა გაიწმინდოს იმ მდგომარეობამდე, რომ დასაშვები გახდეს მისი წყალსატევებში ჩაშვება. სასურველია მოხდეს ამ წყლის ხელმეორედ გამოყენება წარმოებაში ან რაიმე სხვა დანიშნულებით. წყლის გაწმენდისას აგრეთვე ხდება მისი გაუვნებლება და დეზინფექცია, ადამიანისთვის მავნე ცხოველური ან მცენარეული ნივთიერებების და დაავადებათა გამომწვევი მიკროორგანიზმების და ვირუსების მოშორება [13].

ვინაიდან, ჩამდინარე წყლები განსხვავდება თავისი შემადგენლობით და მათში არსებული დამაბინძურებლები იმყოფება სხვადასხვა აგრეგატულ მდგომარეობაში, ამიტომ მათ გასაწმენდად გამოიყენება სხვადასხვა მეთოდი: მექანიკური, ბიოლოგიური, ქიმიური და ფიზიკო-ქიმიური. როდესაც ეს მეთოდები ერთად გამოიყენება წყლის გაწმენდა კომბინირებულია. ამა თუ იმ მეთოდის გამოყენება ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში განისაზღვრება დაბინძურების ხასიათით, მავნე მინარევების შემცველობით და ტექნიკურ-ეკონომიკური დასაბუთებით.

ჩამდინარე წყლების გაწმენდის პირველ საფეხურს წარმოადგენს მექანიკური გაწმენდა, რომლის დროსაც, ჩამდინარე წყლებიდან დალექვის და ფილტრაციის მეშვეობით ხდება მექანიკური მინარევების მოშორება.

ორგანული და მინერალური წარმოშობის მსხვილი ფრაქციის მქონე დამაბინძურებლების შეკავება ხდება გისოსებზე. შემდეგ შეკავებული ნაგავი მიემართება სამსხვრევებში რომლებშიც ხდება დამაბინძურებლების დაქუცმაცება. მინერალური წარმოშობის ძირითადი მასა (ქვიშა), რომლის კუთრი წონა გაცილებით მეტია წყლის კუთრ წონაზე, ილექება ქვიშდამჭერებში, ხოლო სალექრებში ხდება წყალზე მძიმე, შეწონილ მდგომარეობაში მყოფი ორგანული წარმოშობის დამაბინძურებლების

დალექვა. წყალზე მსუბუქი ნივთიერებები (ზეთები, ნავთობი და სხვა) წყლის ზედაპირზე გროვდება, სადაც ხდება მათი ჩამდინარე წყლიდან მოშორება. ზოგიერთ შემთხვევაში სალექრის წინ აწყობენ პრეაერატორებს, რომლებშიც ხდება ჩამდინარე წყლის ხანმოკლე აერაცია, რათა გაძლიერდეს სალექრებში ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტი.

მექანიკური გაწმენდის შედეგად, გაუხსნელი მინარევის შემცველობა კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო სექტორის ჩამონადენში მცირდება 60-75% ით, ხოლო საწარმო სექტორის ჩამონადენში - 95%-ით. თუ მექანიკური გაწმენდის შემდეგ წყლის ხარისხი აკმაყოფილებს მოქმედ სანიტარულ ნორმებს, მაშინ დეზინფექციის შემდეგ ხდება ჩამდინარე წყლების წყალსატევში ჩაშვება.

მექანიკური გაწმენდა წარმოადგენს ჩამდინარე წყლების გაწმენდის ყველაზე მარტივ, დაბალხარჯიან და ფართოდ გავრცელებულ მეთოდს და ხშირ შემთხვევაში იგი ბიოლოგიური გაწმენდის მოსამზადებელი ეტაპია.

ჩამდინარე წყლების ბიოლოგიური მეთოდით გაწმენდა ეფუძნება ბაქტერიების გამოყენებას, რომლებიც საკვებად იყენებენ უმცირესი ზომის შეწონილ ნაწილაკებს და წყალში გახსნილ ორგანულ ნაერთებს. მიკროორგანიზმები ახორციელებენ ჩამდინარე წყლების დამაბინძურებლების სრულ დაშლას ისეთი ნეიტრალური პროდუქტების გამოყოფით, როგორცაა გაზი და წყალი. ბიოლოგიური გაწმენდის ყველა მეთოდი ძირითადად იყოფა აერობულ და ანაერობულ მეთოდებად. აერობული მეთოდების დროს მიკროორგანიზმები იყენებენ ჩამდინარე წყლებში გახსნილ ჟანგბადს, ხოლო ანაერობულ პროცესებში მიკროორგანიზმებს ჟანგბადთან წვდომა არ გააჩნიათ.

ბიოლოგიური მეთოდით გაწმენდა შეიძლება მიმდინარეობდეს როგორც ბუნებრივ ისე ხელოვნურ პირობებში, რომლებიც მიახლოებულია წყლის ობიექტებსა და ნიადაგში ბუნებრივად მიმდინარე პროცესებთან. ბიოლოგიური მეთოდით გამწმენდ ნაგებობებს მიეკუთვნება აეროტენკები, ბიოლოგიური ფილტრები, ბიორეაქტორები, მორწყვის მინდვრები,

ფილტრაციის მინდვრები და ბიოლოგიური გუბურები.

ბიოლოგიური გაწმენდის მეთოდის გამართულად ფუნქციონირებისთვის აუცილებელია აეროტენკებში გასაწმენდი ჩამდინარე წყლების ჟანგბადით გაჯერების მოცემული ხარისხის და ტემპერატურის შენარჩუნება. ასეთი პირობების შექმნა საკმაოდ შრომატევადი და ხარჯიანია [14, 15].

ფიზიკურ-ქიმიური მეთოდით გაწმენდისას, ჩამდინარე წყლებში ხდება სხვადასხვა ქიმიური რეაგენტების დამატება, რომელიც შედის რეაქციაში დამაბინძურებლებთან. წარმოიქმნება გამსხვილებული, უვნებელი ნაერთები, რომელიც ილექება სალექარის ფსკერზე, ან ამოტივტივდება მის ზედაპირზე.

ფიზიკურ-ქიმიური გაწმენდის მეთოდებია: რეაგენტული გაწმენდა, ადსორბცია, სორბცია, ექსტრაქცია, დეგაზაცია, იონური გაცვლა, ოზონირება, ელექტროფლოტაცია, ქლორირება, ელექტროლიზი ულტრაფილტრაცია, უკუოსმოსს და სხვა. პრაქტიკაში ყველაზე ხშირად გამოიყენება ფლოტაციური და ადსორბციული მეთოდები [16].

ჩამდინარე წყლების გაწმენდის ერთ-ერთი მიმართულებაა ფილტრაცია მემბრანულ ბიორეაქტორებში. მემბრანული ფილტრაციის მეთოდი საშუალებას იძლევა ჩამდინარე წყლებიდან მოშორდეს როგორც მყარი შეწონილი ნაწილაკები, მძიმე ლითონების იონები და ორგანული ნაერთები, ისე არაორგანული მინარევებიც. მოსაშორებელი ნაწილაკების ზომიდან გამომდინარე მემბრანული ფილტრაციის მეთოდებს მიეკუთვნება: მიკროფილტრაცია (0,02–10 მკმ), ულტრაფილტრაცია (0,01–0,1 მკმ), ნანო-ფილტრაცია (0,001–0,01 მკმ) და უკუოსმოსი (0,0001–0,001 მკმ) [17, 18]. მემბრანული ბიორეაქტორის მუშაობის პრინციპი ეფუძნება ბიოტექნოლოგიის და ულტრაფილტრაციული პოლიმერული მემბრანების მეშვეობით წყლის სუსპენზიის გაყოფის ტექნოლოგიის სინთეზს. ფილტრაცია ხდება ვაკუუმის ხარჯზე, რომელიც იქმნება მემბრანული ბოჭკოების შიდა ზედაპირზე ტუმბოს მეშვეობით. ამ მეთოდით გაწმენდილი

წყლი შეიძლება ხელმეორედ იქნას გამოყენებული ტექნიკური ან საყოფაცხოვრებო დანიშნულებით. მემბრანული ფილტრაციის მეთოდი მაღალტექნოლოგიური და ძვირადღირებულია [19, 20, 21].

საწარმოთა ჩამდინარე წყლების გასაწმენდად შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას ელექტროქიმიური მეთოდი, რომლისთვისაც იყენებენ ანოდური ჟანგვის და კათოდური აღდგენის, ელექტროკოაგულაციის, ელექტროფლოტაციის და ელექტროდიალიზის პროცესებს.

ელექტროქიმიური მეთოდი საშუალებას იძლევა ჩამდინარე წყლებიდან ამოღებულ იქნას სასარგებლო პროდუქტები, გაწმენდის მარტივი ტექნოლოგიური სქემის მეშვეობით. პროცესი მიმდინარეობს რეაგენტების გამოყენების გარეშე. ამ მეთოდის ძირითადი ნაკლია ელექტროენერჯის დიდი ხარჯი [22].

საყოფაცხოვრებო ჩამდინარე წყლების გასაწმენდად ეს მეთოდები იშვიათად გამოიყენება.

კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო ჩამდინარე წყლების გასაწმენდად ძირითადად იყენებენ სამ საფეხურიან ტექნოლოგიურ სქემას:

1. მექანიკურ გაწმენდას - ჩამდინარე წყლების განთავისუფლებას მსხვილი მინარევებისა და შეწონილი ნივთიერებებისგან;

2. ბიოლოგიურ გაწმენდას - ჩამდინარე წყლებიდან გახსნილი ორგანული კოლოიდური ნივთიერებების მოშორებას აქტიური ლამით, ბიოლოგიური დაჟანგვის მეშვეობით;

3. დეზინფექციას - ჩამდინარე წყლის პათოგენური მიკრო-ორგანიზმებისგან განთავისუფლებას.

წყლის დამატებითი გაწმენდის საჭიროებისას, თუ ჩამდინარე წყლის ხარისხი არ აკმაყოფილებს მიმდები წყალსატევის ზღვულად დასაშვებ ნორმებს, დამატებითი გაწმენდა ხდება შეწონილი ნივთიერებების ფილტრაციით სხვადასხვა კონსტრუქციის ფილტრებით. გამოიყენება მიკროფილტრები, ქაფური ფლოტაციის დანადგარები და სხვა. მძიმედჟანგვადი მინარევების გასაწმენდად იყენებენ კოაგულაციურ და

სორბციულ დანადგარებს, აგრეთვე ოზონატორებს ფილტრებთან ერთად.

ბიოლოგიური გაწმენდის შემდეგ ჩამდინარე წყლებში ნიტრატების, ნიტრიტების და ამონიუმის მარილების მასაშორებლად იყენებენ ბიოლოგიური და ფიზიკურ-ქიმიური გაწმენდის მეთოდებს [23].

ჩამდინარე წყლების გაწმენდის ზემოაღწერილი მეთოდების ანალიზის შედეგად, შესაძლოა ითქვას, რომ ბიოლოგიური და ფიზიკურ-ქიმიური გაწმენდის მეთოდები ძვირადღირებული და ტექნოლოგიურად რთულია. აღსანიშნავია, რომ მექანიკური გაწმენდის მეთოდი, კეროდ შეწონილი დამაბინძურებლების დალექვა (სედიმენტაცია) გამოიყენება ნებისმიერი ტექნოლოგიური სქემის შერჩევისას. სედიმენტაცია მიმდინარეობს დისპერსიული ფაზის გამყოფ ნაგებობებში - სალექრებში. დალექვით წყლის გაწმენდა ჩამდინარე წყლებიდან მსხვილდისპერსული მინარევების მოშორების ყველაზე მარტივი და საიმედო მეთოდია, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც მოსამზადებელი ეტაპი შემდგომი გაწმენდისთვის, უფრო რთულ ტექნიკურ ნაგებობებში, ან როგორც საბოლოო გაწმენდა - თუ ტექნოლოგიურად მოთხოვნილია ჩამდინარე წყლებიდან მხოლოდ უხსნადი მინარევების მოშორება.

1.3. სალექრების კლასიფიკაცია

ჩამდინარე წყლების გაწმენდა ხორციელდება სხვადასხვა სახის ტექნოლოგიური დანადგარებით, რომლთა მეშვეობით ხდება წყლების გაწმენდა წყალსატევში ჩასაშვებად მიღებულ ნორმატიულ მაჩვენებლებამდე. შესაძლებელია წყალი გაიწმინდოს ხელმეორედ გამოყენებისთვის ტექნიკური დანიშნულებით.

მექანიკური გაწმენდის საფეხურზე, ქვიშდამჭერებში, ხდება მინერალური ნივთიერებების, ძირითადად ქვიშის დალექვა, ხოლო სალექრებში, ჩამდინარე წყლების ნაკადის დაბალი სიჩქარის პირობებში, ხდება მცირე კუთრი წონის მქონე შეწონილი ორგანული ნაწილაკების

მომორება. სიმძიმის ძალის ან ამომგდები ძალის ზეგავლენით, ნაწილაკები ან ილეექტიან სალექტრის ძირზე, ან ამოტივტივდებიან მის ზედაპირზე.

სალექტრებში ბუნებრივი დალექვის პროცესს ხშირად გაკამკამებას ან დაწმენდას უწოდებენ. ჩამდინარე წყლების დაწმენდისას ხდება დამაბინძურებელი შეწონილი ნაწილაკების ოპტიმალური რაოდენობის მოშორება, რაც ამცირებს დატვირთვას ჩამდინარე წყლების გაწმენდის შემდეგ საფეხურზე - ბიოლოგიურ გაწმენდაზე.

მუშაობის რეჟიმის მიხედვით განასხვავებენ პერიოდული მოქმედების (კონტაქტურ) და უწყვეტი მოქმედების (გამდინარე) პირველად სალექტრებს. პერიოდული მოქმედების სალექტრებში ჩამდინარე წყლის მიწოდება ხდება პერიოდულად და დალექვის პროცესი მიმდინარეობს ნაკადის მოძრაობის გარეშე. უწყვეტი მოქმედების სალექტრებში დალექვა ხდება ნაკადის მდორე მოძრაობისას.

სალექტრები, დალექვის ტექნოლოგიური სქემიდან გამომდინარე, შეიძლება იყოს პირველადი ან მეორადი. თუ სალექტარი პირველადია, მასში ხდება ჩამდინარე წყლის მომზადება ბიოლოგიური გაწმენდისთვის, თუ მეორადი - ხდება ჩამდინარე წყლების დაწმენდა ბიოლოგიური გაწმენდის შემდეგ.

წყლის მთავარი ნაკადის მოძრაობის მიმართულების მიხედვით განასხვავებენ ორ ძირითად ჯგუფს: ჰორიზონტალურ და ვერტიკალურ სალექტრებს. რადიალური სალექტრები წარმოადგენს ჰორიზონტალური სალექტრების ნაირსახეობას.

სალექტრებში, შეწონილი ნაწილაკების თვითნებური დალექვის შემდეგ, დაწმენდილი წყალი გადაიღვრება წყალსაშვებიდან, ხოლო წარმოქმნილი ნალექი გროვდება სალექტრის ძირზე და შემდგომ ხდება მისი მოშორება და გადამუშავება.

ჩამდინარე წყლებში არსებული უხსნადი მინარევების მახასიათებლებიდან გამომდინარე, დგინდება წყლის დაწმენდის შემდეგ, შეწონილი ნაწილაკების დასაშვები რაოდენობა. დაწმენდილ წყალში იგი არ

უნდა აღემატებოდეს 8-15 მგ/ლ-ს.

შეწონილი ნაწილაკების საბოლოო კონცენტრაცია პირდაპირ კავშირში იმყოფება ნაწილაკების ჰიდრავლიკურ სისხოსთან: რაც უფრო მაღალია დალექვის სიჩქარე, მით ნაკლებია შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაცია წყლის დაწმენდის შემდეგ. დაწმენდის მაღალი ხარისხის მისაღწევად კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო ჩამდინარე წყლების დაწმენდისას სალექრებში წყლის საანგარიშო სიჩქარეები არ უნდა აღემატებოდეს [24]:

- ჰორიზონტალური სალექრებისთვის - 5-7 მმ/წმ-ს;
- ვერტიკალურისთვის - 0,7 მმ/წმ-ს;
- რადიალურისთვის -7 მმ/წმ-ს.

ყოველ კონკრეტულ შემთხვევაში ხდება დალექვის ხანგრძლივობის განსაზღვრა, რომლის დროსაც მიღწეულ უნდა იქნას წყლის დაწმენდის სასურველი ხარისხი. დაწმენდის ხანგრძლივობა მერყეობს 0,5-დან 2,5 საათამდე, მაგრამ ძირითადად შეადგენს 1,5-2 საათს.

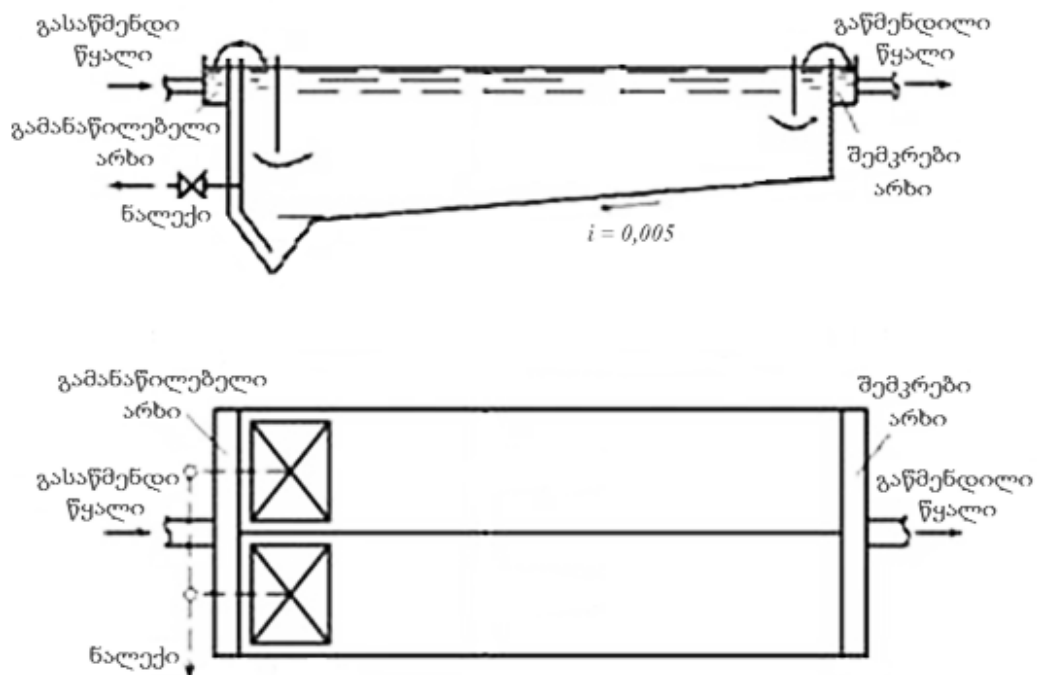
დალექვის მაქსიმალური ეფექტურობა შეადგენს 65%-70%-ს. სალექრის პარამეტრების გაანგარიშება ხდება ეფექტურობის გარკვეული მნიშვნელობის მისაღებად [25].

ჩამდინარე წყლების გამწმენდ სადგურებზე გამოიყენება სალექრების რამოდენიმე კონსტრუქციული გადაწყვეტილება, როგორცაა: ვერტიკალური, ჰორიზონტალური და რადიალური სალექრები. სალექრების დასახელება შეესაბამება გასაწმენდი სითხის მოძრაობის მიმართულებას.

1.3.1. ჰორიზონტალური სალექრები

ჰორიზონტალური სალექრები გამოიყენება კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო და შემადგენლობით მასთან მიახლოებული ჩამდინარე წყლების გასაწმენდად. იგი წარმოადგენს სწორკუთხა, წაგრძელებულ რკინაბეტონის რეზერვუარს, რომელიც სიგრძეზე გაყოფილია ტიხრებით რამოდენიმე განყოფილებად. განყოფილებების სიგანე შეადგენს 3-6 მეტრს.

თუ განყოფილებების რაოდენობა ექვსზე ნაკლებია, აუცილებელია ერთი სარეზერვო განყოფილების მოწყობა. დერეფნის სიგანე შეადგენს 3-6 მეტრს. სალექრის სიღრმე მერყეობს 1,5-დან 4 მეტრამდე. სალექრის სიგრძე 8-12-ჯერ აღემატება მის სიღრმეს.



ნახ.1.1. ჰორიზონტალური სალექრის პრინციპიალური სქემა

რეგიონებში, სადაც ზამთრის პერიოდში ჭარბობს უარყოფითი ტემპერატურა, ჰორიზონტალურ სალექრებს აწყობენ შენობებში, ან ფარავენ ზემოდან. გადაფარვაში აწყობენ საძრომებს, სინჯების ასაღებ ხვრელებს და სავენტილაციო არხებს. სამხრეთის რეგიონებში ჰორიზონტალურ სალექრები ეწყობა ღია ცის ქვეშ.

შეწონილი ნაწილაკების გრავიტაციულ დალექვას ხელს უწყობს ჩამდინარე წყლის სიჩქარის მკვეთრი შენელება, მიმწოდებელ არხში სიჩქარესთან შედარებით. წყლის მოძრაობის საანგარიშო სიჩქარე შეადგენს 5-7 მმ/წმ.

ჰორიზონტალურ სალექრებს იყენებენ 15000-დან 100000 მ³/დ.ლ-მდე წარმადობის მქონე გამწმენდ სადგურებზე. მათი გამოყენება რეკომენდირებულია წყლის სიმღვრივისას 1500 მგ-მდე და ფერადობისას 120°. ჩამდინარე წყლის დაწმენდის ეფექტურობა აღწევს 50 - 60%-ს, მოცულობის გამოყენების კოეფიციენტი შეადგენს 0,5-ს.

ნალექის შესაგროვებლად, სალექრის შესასვლელში, მოწყობილია კონუსური ჩაღრმავება. ლამის მოსაშორებლად იყენებენ სხვადასხვა ხერხებს. ნალექს აშორებენ ხელით, ტუმბოების, ჰიდროელევატორების, გრეიდერების საშუალებით, ან ჰიდროსტატიკური დაწნევის ხარჯზე [26].

ჰორიზონტალურ სალექრებს, შედარებით სრულყოფილი ჰიდრავლიკის გამო, ფართოდ იყენებენ როგორც მცირე, ისე დიდი ზომის გამწმენდ სადგურებზე, თუმცა მცირე ფართობის მქონე გამწმენდ სადგურებზე უფრო ხშირად იყენებენ სხვადასხვა ტიპის ვერტიკალურ სალექრებს, რადგან ისინი მოთხოვს გაცილებით მცირე მიწის ფართობს.

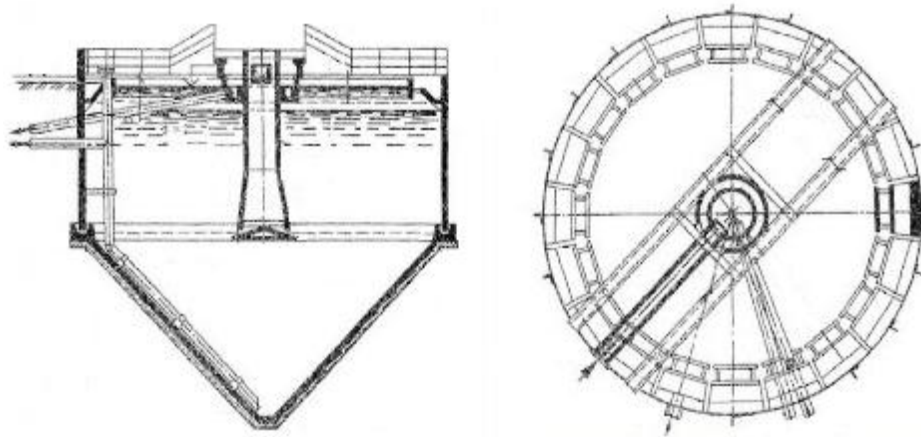
1.3.2. ვერტიკალური სალექრები

ვერტიკალური სალექარი წარმოადგენს გეგმაში წრიულ, იშვიათად კვადრატულ რკინაბეტონის ან ფოლადის, დიდი სიღრმის მქონე რეზერვუარს, კონუსური ან პრიზმული ფორმის ფსკერით.

ვერტიკალური სალექრები შეიძლება განსხვავდებოდეს მიმწოდებელი და გამომყვანი მოწყობილობების კონსტრუქციით. არსებობს სალექრები წყლის ცენტრალური მიწოდებით; წყლის დაღმავალ-აღმავალი მოძრობით და წყლის პერიფერიული გაყვანით.

ყველაზე გავრცელებულია ვერტიკალური სალექრები ჩამდინარე წყლის ცენტრალური მიწოდებით. ამ ტიპის სალექრებში გასაწმენდი წყლის მიწოდება ხდება ზემოდან, ცენტრალურ ვერტიკალურ მილში. წყალი ადის ზემოთ და აღმავალ ნაკადში ხდება შეწონილი ნაწილაკების ფლოკულაცია. წარმოქმნილი აგლომერაციები, რომელთა ჰიდრავლიკური სისხო მეტია

აღმავალი ნაკადის სიჩქარეზე, ილექება კონუსურ ფსკერზე, ხოლო უფრო მცირე ზომის შეწონილი ნაწილაკები, რომელთა ჰიდრავლიკური სისხო ნაკლებია აღმავალი ვერტიკალური ნაკადის სიჩქარეზე, ამოტივტივდება სალექრის ზედაპირზე.



ნახ.1.2. ვერტიკალური სალექრის სქემა

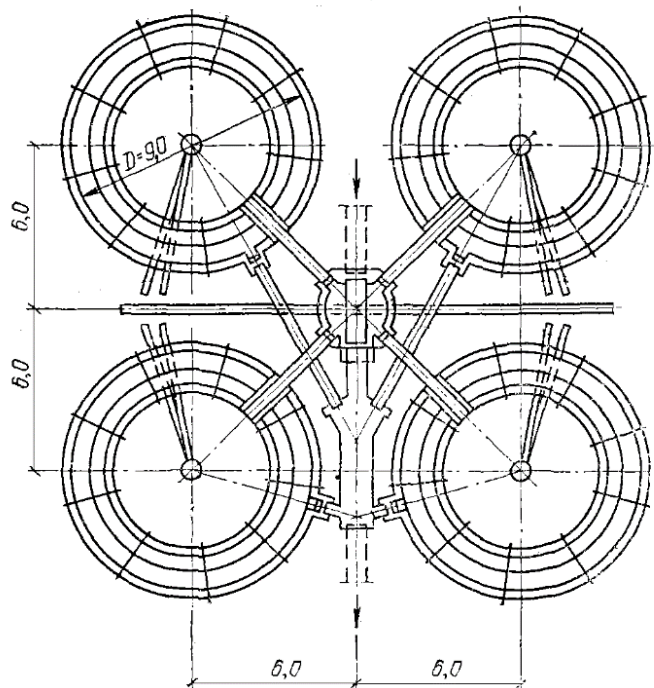
ფსკერზე, კონუსური კედლების ზედაპირიდან ხდება ნალექის ჩამოცურება. ფსკერიდან ნალექის მოშორება ხდება ჰიდროსტატიკური დაწნევის ხარჯზე [9].

ტექნოლოგიური თვალსაზრისით უფრო სრულყოფილ სალექარს წარმოადგენს ვერტიკალური სალექარი დასაწმენდი წყლის დაღმავალ-აღმავალი მოძრობით. ამ ტიპის სალექრებში დაწმენდის ზონა გაყოფილია ორ ნაწილად. ჩამდინარე წყალი მიეწოდება სალექრის ცენტრალურ ნაწილს და კბილანებიანი წყალგამშვებიდან ნაწილდება დაწმენდის ზონის მთელ ფართობზე. ჩამდინარე წყალი იწყებს მოძრობას ქვემოთკენ, რაც უზრუნველყოფს წყლისა და აგლომერირებული ნაწილაკების მოძრობის ვექტორების მიმართულების დამთხვევას. შეწონილი ნაწილაკების ძირითადი მასა ნალექის სახით გამოიყოფა დასაწმენდი წყლის დაღმავალ

ზონაში. წყლის საბოლოო დაწმენდა ხდება აღმავალი მოძრაობის ზონაში.

ვერტიკალური სალექრების გამოყენება რეკომენდირებულია 5000 მ³/დ.ღ-ზე ნაკლები წარმადობის მქონე წყალგამწმენდ სადგურებზე, გასაწმენდი წყლის სიმღვრივისას 1500 მგ/ლ-მდე და ფერადობისას 120°-მდე (პლატინა-კობალტის შლაკის გრადუსი) [27].

როდესაც გასაწმენდი ჩამდინარე წყლის რაოდენობა დიდია, ხდება სალექრების დაჯგუფება, თითო ჯგუფში ოთხ-ოთხი სალექარი.



ნახ. 1.3. ვერტიკალური სალექრების ჯგუფი

ჩამდინარე წყლების გაწმენდის პრაქტიკაში ვერტიკალური სალექრების ფართო დანერგვა განპირობებულია მათი ექსპლუატაციის სიმარტივით. ვერტიკალურ სალექრებს არ სჭირდება დამატებითი დანადგარები.

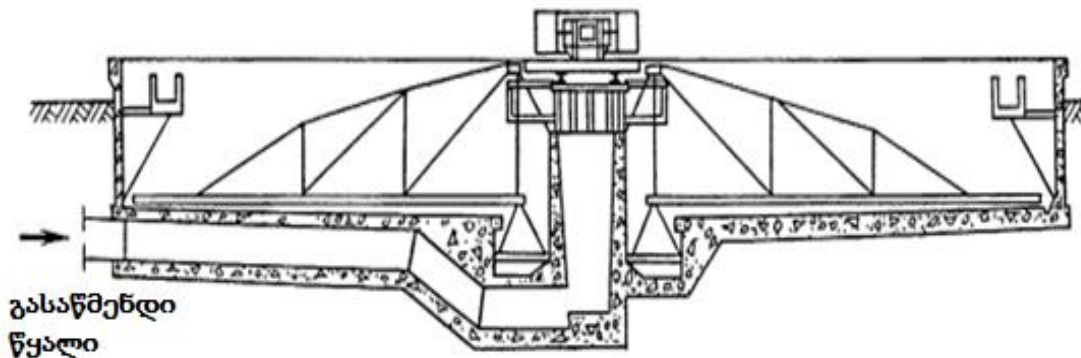
უარყოფითი მხარეებიდან შეიძლება აღინიშნოს ვერტიკალური სალექრების დიდი სიღრმე, რის გამოც მათი მშენებლობა დაკავშირებულია მნიშვნელოვან ხარჯებთან. გრუნტის წყლების არსებობის შემთხვევაში იყენებენ რადიალურ სალექრებს, რომლებიც წარმოადგენს ვერტიკალური

საღებრის ნაირსახეობას, იმ განსხვავებით, რომ მათ გააჩნიათ დიდი დიამეტრი (18-დან 60 მეტრამდე) და შედარებით მცირე სიღრმე (1,5-5 მეტრი).

1.3.3. რადიალური საღებრები

რადიალურ საღებრებში წყალი მოძრაობს ცენტრალური გამანაწილებელი კამერიდან პერიფერიისკენ. წყლის ნაკადის სიჩქარე იცვლება მაქსიმალურიდან ცენტრში, მინიმალურამდე პერიფერიაზე. წყლის დინების სიჩქარე საღებრის რადიუსის შუაში შეადგენს 5-10 მმ/წმ-ში.

ნაღები, ფსკერზე განლაგებული საფხეკების მეშვეობით, მიემართება ცენტრალური ჩაღრმავებისკენ - საღამე კამერისკენ. წყლის ზედაპირზე მოტივტივე ნაწილაკების შეგროვება ხდება ფერმაზე მიმაგრებული, ნახევრადჩაძირული ფიცრის მეშვეობით.



ნახ.1.4. რადიალური საღებარი

საღებრებს ცენტრალური გამანაწილებელი კამერით იყენებენ 20000 მ³/დ.ღ.-ზე მეტი წარმადობის მქონე გამწმენდ სადგურებზე.

რადიალური საღებრების უპირატესობას წარმოადგენს ექსპლუატაციის სიმარტივე და სხვა ტიპის საღებრებისგან განსხვავებით, სამშენებლო მასალის შედარებით მცირე ხარჯი.

ამ ტიპის საღებრების უარყოფით მხარეს მიეკუთვნება მოცულობის

გამოყენების კოეფიციენტის შემცირება, რაც გამოწვეულია სალექრის ცენტრალურ ნაწილში სიჩქარეთა მაღალი გრადიენტით.

დალექვის ზონაში წყლის დაბალი სიჩქარით მიწოდებას უზრუნველყოფს რადიალური სალექარი წყლის პერიფერიული მიწოდებით.

გამანაწილებელი დარიდან გამოსული წყალი მიემართება სალექრის ძირისაკენ. დაღმავალი წყლის სიჩქარე თანდათან კლებულობს და აღწევს მინიმუმს სალექრის ცენტრალურ ზონაში. შემდეგ წყალი მიემართება ცენტრალური წყალგამყვანისკენ.

სალექრის მთელ ცოცხალ კვეთზე წყლის მოძრაობა შედარებით თანაბარია და პრაქტიკულად არ ხდება წყლის ადგილობრივი აგრიგვლა. დასაწმენდი წყლის მიწოდება სალექრის ფსკერთან უზრუნველყოფს შეწონილი ნაწილაკების დალექვის უმოკლეს მანძილს [28].

წყლის პერიფერიული მიწოდებით რადიალური სალექრების ეფექტურობა 1,2-1,3-ჯერ უფრო მაღალია, ვიდრე ჩვეულებრივი რადიალური სალექრებისა, წყლის ცენტრალური მიწოდებით.

ჩამდინარე წყლების გაწმენდისას, პირველადი დალექვის ეფექტურობის გასაზრდის აუცილებლობის შემთხვევაში, იყენებენ:

- ჰიდროდინამიკურ მეთოდებს, რომლებიც ითვალისწინებს ნაგებობის ჰიდრაულიკური პარამეტრებისა და სედიმენტაციის პირობების სრულყოფას. აგრეთვე თხელფენოვან დალექვას;

- ტექნოლოგიურ მეთოდებს, რომლებიც გულისხმობს ნალექის დონის და ჟანგბადის რეჟიმის რეგულირებას;

- ქიმიურ მეთოდებს, როგორცაა pH-ის კორექტირება, კოაგულაცია, ფლოკულაცია და სორბცია;

- ფიზიკურ მეთოდებს: ფლოტაცია, კონტაქტური ფლოკულაცია, მაგნიტური ველების შექმნა, ულტრაბგერების გამოყენება და სხვა.

ყველა ზემოჩამოთვლილი მეთოდებიდან ყველაზე ფართო გამოყენება ჰპოვა თხელფენოვანმა დალექვამ და აქტიური ლამის ბიოფლოკულაციის თვისებების გამოყენებამ.

1.3.4. სალექრები თხელფენოვანი ელემენტებით

სხვადასხვა ტიპის მოქმედი სალექრების რეკონსტრუქციის დროს, მათი წარმადობის გასაზრდელად, მეტად პერსპექტიულია თხელფენოვანი დალექვის პრინციპის გამოყენება.

თხელფენოვან სალექრებში დალექვის პროცესი მიმდინარეობს წყლის მცირე სისქის ფენაში, ლამინარული რეჟიმის პირობებში. ბლოკების კონსტრუქცია აჩქარებს ნალექის დალექვის პროცესს, ხოლო ფენებზე დაგროვილი ნალექი, დაქანების ხარჯზე, თვითნებურად ჩამოცურდება ნალექის შეგროვებისა და გამკვრივების ზონაში.

თხელფენოვანი სალექრების კლასიფიკაცია ხდება შემდეგი კატეგორიებით:

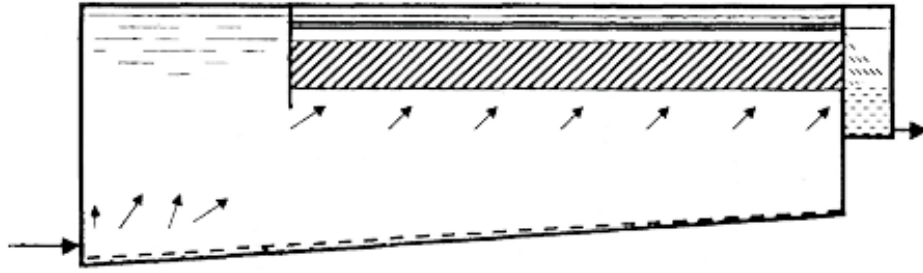
- დახრილი, მილოვანი ან თაროვანი მოდულების კონსტრუქციით;
- პერიოდული ან უწყვეტი მუშაობის რეჟიმით;
- დასაწმენდი წყლის ნაკადისა და გამოყოფილი ნალექის მოძრაობის მიმართულებით.

თხელფენოვან სალექარში სითხის მოძრაობის მიმართულების სქემები სამი სახისაა:

- სითხის მოძრაობის ჯვარედინი სქემა: ნალექი მოძრაობს დასაწმენდი წყლის ძირითადი ნაკადის მოძრაობის განივი მიმართულებით;
- სითხის მოძრაობის წინააღმდეგ სქემა: დანალექი ჩამოედინება დასაწმენდი წყლის მიმართულების საწინააღმდეგოდ;
- სითხის მოძრაობის წინააღმდეგ სქემა: დასაწმენდი წყალი და მისგან გამოყოფილი ნალექი მოძრაობს ერთი მიმართულებით.

დაწმენდის ხარისხის მიხედვით უპირატესობა ენიჭება სითხის მოძრაობის წინააღმდეგ სქემას.

ამ შემთხვევაში შეწონილი ნაწილაკების აგლომერაცია მიმდინარეობს უფრო აქტიურად და უმჯობესდება დალექვის პირობები.



ნახ. 1.5. სალექარი თხელფენოვანი ელემენტებით სითხის მოძრაობის წინაღდენითი სქემით

დახრილ სექციებში წყალი მოძრაობს ქვემოდან ზემოთ, ამიტომ ნალექის გამოყოფა ხდება შემოკლებული ტრაექტორიით. ჩამოცურებული ნალექი გროვდება სალამე ჩაღრმავებაში და შორდება სალამე მილის მეშვეობით.

სითხის წინაღდენითი მოძრაობით მომუშავე სალექრების მთავარ ნაკლს წარმოადგენს იარუსებს შორის ნაკადის გამანაწილებელი კვანძის მუშაობა. იმისათვის, რომ წყლის განაწილება იარუსებს შორის იყოს თანაბარი, დაწმენდილი წყლის მოშორებაც უნდა ხორციელდებოდეს თანაბრად, რისი განხორციელებაც რიგ სირთულეებთან არის დაკავშირებული.

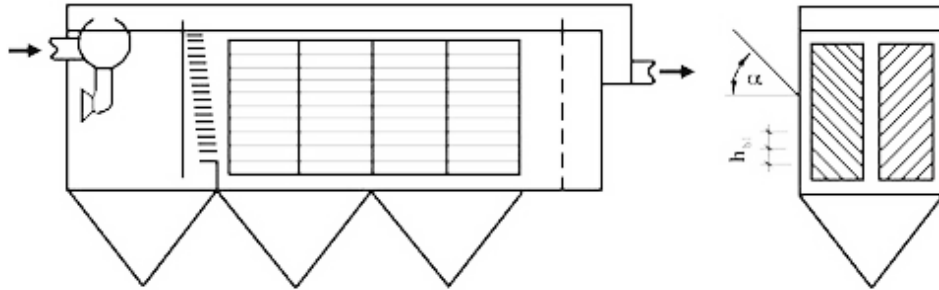
პრაქტიკაში წყლის თანაბარი განაწილების მიღწევა შესაძლებელია მხოლოდ სალექრებში სითხის მოძრაობის ჯვარედინი სქემის გამოყენებისას.

ასეთი სალექრები, როგორც წესი მართკუთხაა. ფირფიტები განლაგებულია იმგვარად, რომ დაწმენდის პროცესში გამოყოფილი ნალექი გროვდება სალექრის კონსტრუქციის ცენტრალური ღერძის გასწვრივ [29].

ამ ტიპის სალექრების უარყოფით მხარეს წარმოადგენს პარალელური ფირფიტების ლითონისგან დამზადების აუცილებლობა, რაც ამვირებს გამწმენდი ნაგებობის საერთო ღირებულებას.

თხელფენოვან დალექვაზე არ ახდენს მნიშვნელოვან გავლენას ჩამდინარე წყლების ტემპერატურისა და კონცენტრაციის ცვლილება. წარმადობის მხრივ დალექვის ბლოკების გამოყენება არ არის შეზღუდული.

თხელფენოვანი დალექვისას ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტი იზრდება 25-30%-ით.



ნახ. 1.6. თხელფენოვანი სალექარი სითხის მოძრაობის ჯვარედინი სქემით

ვინაიდან სალექრების ფუნქციონირების ეფექტურობაზე დამოკიდებულია ჩამდინარე წყლების შემდგომი გაწმენდის ხარისხი, ამიტომ უმნიშვნელოვანეს ამოცანას წარმოადგენს სალექრის ტიპის და კონსტრუქციის სწორი არჩევნი, რომელიც უნდა ხდებოდეს ტექნიკო-ეკონომიკური შედარებების საფუძველზე, ადგილობრივი პირობების (გრუნტის სიმკვრივისა და გრუნტის წყლების დონის) გათვალისწინებით და გამოთვლებში, ჰიდროდინამიკური პროცესების ამსახველი, რეალობასთან მაქსიმალურად მიახლოებული სიდიდეების გამოყენებით.

II თავი

გამწმენდი ნაგებობების ჰიდრავლიკური და გეომეტრიული პარამეტრები

2.1. ჩამდინარე წყლების დალექვის პროცესის შემსწავლელი ექსპერიმენტალური კვლევების მიმოხილვა

ჩამდინარე წყლების დალექვის შესასწავლად პირველი ცდები ჩატარდა გერმანიაში 1900-1902 წლებში შტიერნაგელის მიერ [30]. დალექვა მიმდინარეობდა მდგარ წყალში. ცდების მეშვეობით დადგინდა, რომ დალექვის პროცესი ინტენსიურად მიმდინარეობს პირველი 5 წუთის განმავლობაში, ხოლო შემდგომ, დალექვის სიჩქარე კლებულობდა. ამ ცდების შედეგად მოხდა სალექრების კონსტრუქციის გაუმჯობესება.

ანალოგიური ცდები ჩატარდა საბჭოთა კავშირში პროფესორ პ.ს. ბელოვის მიერ ტყავის გადამამუშავებელი ქარხნების ჩამდინარე წყლების დალექვის პროცესების შესასწავლად [31].

მდგარ წყალში დალექვის ფართო კვლევები ჩატარა პროფესორმა ა.ი. ჟუკოვმა [32]. მის მიერ მიღებული, ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტის დამოკიდებულების გრაფიკი შეწონილი ნაწილაკების პირობით ჰიდრავლიკურ სისხოზე, დღესაც გამოიყენება სალექრების გაანგარიშებისას.

ჟუკოვმა აგრეთვე დაადგინა ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტის დამოკიდებულება ჩამდინარე წყლის სვეტის (ცილინდრის) სიმაღლეზე. დაწმენდის ეფექტის გაზრდა, ჩამდინარე წყლის სვეტის გაზრდისას, ერთნაირი პირობითი ჰიდრავლიკური სისხოს პირობებში, წარმოადგენს ჩამდინარე წყლებში არსებული შეწონილი ნაწილაკების აგლომერაციის შედეგს. ამის გათვალისწინებით, ჟუკოვი, ჩამდინარე წყლების საანგარიშო ჰიდრავლიკური სისხოს მისაღებად, მიზანშეწონილად მიიჩნევდა ექსპერიმენტის ჩატარებას სალექრის სიმაღლის ტოლ ცილინდრებში.

ი. ვ. სკიდროვმა, დალექვის პროცესების კვლევისას, დაადგინა, რომ

ერთნაირი ჰიდრავლიკური სისხოს პირობებში, 1 და 2 მეტრი სიმაღლის ცილინდრებში დაწმენდის ეფექტის სხვაობა შეადგენდა 10% [33].

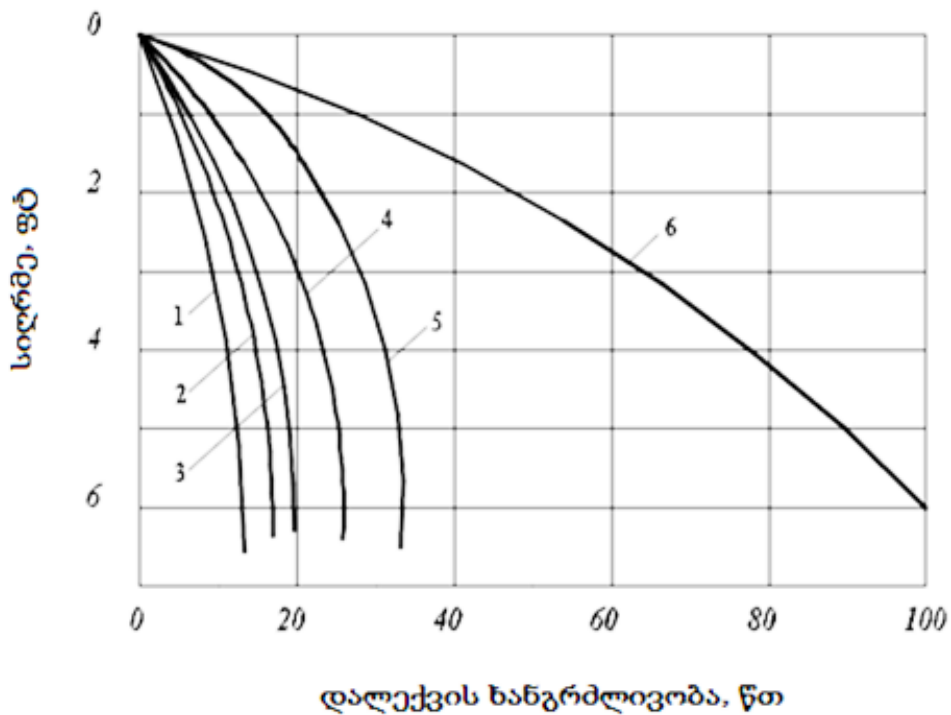
ვ. ა. ბაგრაში, ნ. მ. პოპოვა, ა. ა. კარპინსკი და ტ. ა. კირიუხინა მდგარ წყალში ჩამდინარე წყლების დალექვის კვლევებისთვის იყენებდნენ სედიმენტაციურ სასწორს [30]. მოსკოვის ჩამდინარე წყლების გამწმენდ სადგურზე კვლევების შედეგად დადგინდა, რომ ერთსა და იმავე სადგურზე, დღე-ღამის სხვადასხვა დროს, დაწმენდის ეფექტი მნიშვნელოვნად იცვლებოდა. აგრეთვე გამოვლინდა დაწმენდის ეფექტის დამოკიდებულება დალექვის ხანგრძლივობაზე. ჩამდინარე წყლების სედიმენტაციური ანალიზის შედეგად მოხდა ჩამდინარე წყლების მახასიათებლების შედარება.

არაკოაგულირებული და კოაგულირებული წყლების დალექვის პროცესების კვლევისას, ი. ვ. ვეიცერმა და ზ. ა. კოლობოვამ გამოავლინეს, რომ დალექვის დროს, ხდება შეწონილი ნაწილაკების გრავიტაციული კოაგულაცია და ერთნაირი ჰიდრავლიკური სისხოს პირობებში, წყლის სვეტის გაზრდასთან ერთად, იზრდება დალექვის ეფექტიც [34, 35].

ა. ი. ჟუკოვმა, დ. ი. სოკოლოვმა, ს. ფ. საველიევმა და სხვა მკვლევარებმა დაადგინეს, რომ სალექრებში ჩამდინარე წყლების დალექვის ეფექტი განსხვავდება ცილინდრში წყლის დალექვისგან. სიჩქარის განსხვავებას იწვევს არა მხოლოდ სლექრისა და ექსპერიმენტალური ცილინდრის სიმაღლის განსხვავება, არამედ, რაც ხელს უშლის შეწონილი ნაწილაკების დალევას. მათ მიერ დადგინდა შეწონილი ნაწილაკების სიჩქარის ვერტიკალური ტურბულენტური მდგენელის დამოკიდებულება სითხის ნაკადის სიჩქარეზე და კალაპოტის ზომებზე [31, 36, 37].

აშშ-ში ეკენფელდმა და ო'კონორმა [30] მდგარ წყალში მყოფი ჩამდინარე წყლების დალექვის კვლევისათვის შექმნეს დანადგარი, რომელიც შედგებოდა ცილინდრისგან, რომელზეც სხვადასხვა სიმაღლეზე, ჩამდინარე წყლის ნიმუშების ასაღებად დამაგრებული იყო მილყელები და თერმომეტრები. კვლევის დროს ჩამდინარე წყლების ნიმუშები აიღებოდა დროის სხვადასხვა ინტერვალში, სხვადასხვა სიღრმიდან. მიღებულ იქნა

ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტის მრუდები. მათ მიერ მიღებული გრაფიკიდან გამომდინარეობს, რომ ჩამდინარე წყლის სვეტის გაზრდასთან ერთად მატულობს მისი დაწმენდის ეფექტი, რაც შეესაბამება ჟუკოვის კვლევებს. აშშ-ში, ეკენფელდის და ო'კონორის კვლევის შედეგებს დღესაც იყენებენ საკანალიზაციო სადგურებში პირველადი სალექრების პროექტირებისას.



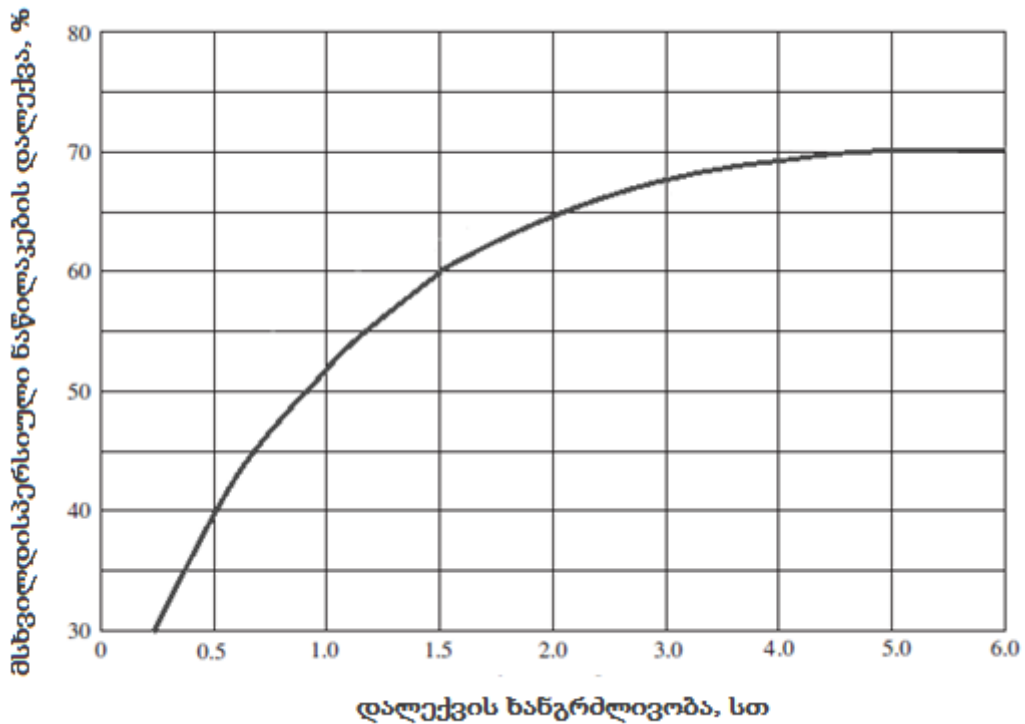
ნახ. 2.1. ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტის მრუდები.

1. $\vartheta = 20\%$; 2. $\vartheta = 30\%$; 3. $\vartheta = 40\%$; 4. $\vartheta = 50\%$; 5. $\vartheta = 60\%$; 6. $\vartheta = 70\%$;

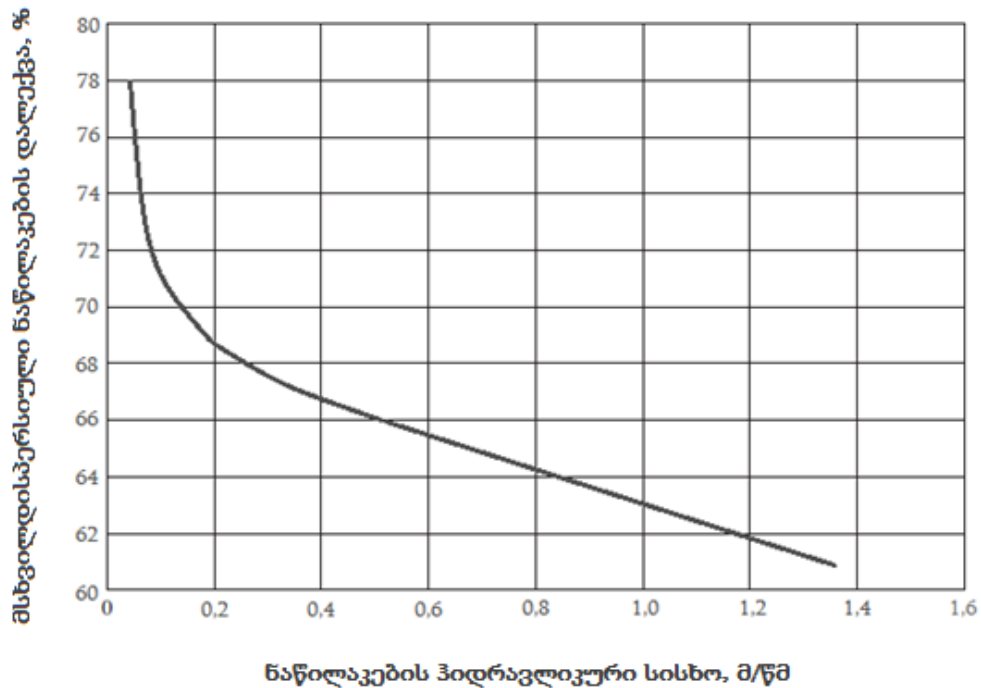
მ.ს. შიფრინი [38] კვლევებს ატარებდა 500 მგ/ლ-მდე შეწონილი ნაწილაკების შემცველობის ჩამდინარე წყლებზე, 76 მმ დიამეტრისა და 30-დან 250 სმ-მდე სიმაღლის მქონე ცილინდრებში. კვლევა ტარდებოდა ჩამდინარე წყლის დაწმენდის ეფექტის სხვადასხვა ფაქტორზე დამოკიდებულების დასადგენად. დადგინდა, რომ ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტი დამოკიდებულია მხოლოდ შეწონილი ნაწილაკების

საწყის კონცენტრაციასა და მათ ჰიდრავლიკურ სისხოზე.

ფლოკულაციური დალექვის კვლევისას, ლაბორატორიული ტესტირების დროს ჩამდინარე წყლის ნიმუშებს იღებენ სინჯსაღებიდან, დროის გარკვეულ ინტერვალში, სხვადასხვა სიმაღლეზე [39]. ყოველი ნიმუშისთვის ხდება შეწონილი ნივთიერებების კონცენტრაციის განსაზღვრა. აბსცისათა ღერძზე ხდება დალექვის ხანგრძლივობის დატანა, ხოლო ორდინატთა ღერძზე - დალექილი ნივთიერებების რაოდენობის, შეწონილი ნაწილაკების სრულ რაოდენობასთან მიმართებაში (ნახ. 2.2.). ან აბსცისათა ღერძზე დააქვთ მსხვილდისპერსული ნაწილაკების მინიმალური ჰიდრავლიკური სისხო, ხოლო ორდინატთა ღერძზე - ყველა დალექილი ნივთიერების პროცენტული რაოდენობა, საერთო დანალექთან მიმართებაში (ნახ. 2.3.).



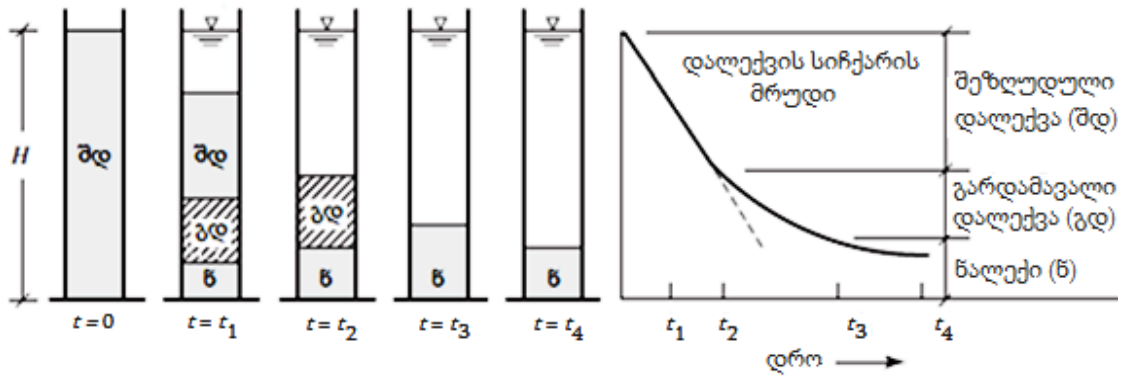
ნახ. 2.2. მყარი შეწონილი ნაწილაკების დალექვის დამოკიდებულება დროზე



ნახ. 2.3. მყარი შეწონილი ნაწილაკების დალექვის პროცენტული რაოდენობის დამოკიდებულება ჰიდრავლიკურ სისხოზე

ჩამდინარე წყლების ფლოკულაციური დალექვის დროს ნაწილაკები ერთიანდება ე. წ. ღრუბლებში, რომლებიც დალექვის პროცესში იცვლიან ფორმას, კუთრ წონას და ზომას. ამის შედეგად იცვლება მათი დალექვის სიჩქარეც. ღრუბლის დალექვის კანონები ძლიერ განსხვავდება ცალკეული, ერთგვაროვანი, სფეროსებრი ნაწილაკების თავისუფალი დალექვის კანონებისგან.

როდესაც წყალი შეიცავს ნაწილაკების მაღალ კონცენტრაციას (მაგალითად 1000 მგ/ლ) დისკრეტულ და ფლოკულაციურ დალექვასთან ერთად თავს იჩენს შეზღუდული დალექვა. ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაცია და შესაბამისად მათ შორის მცირე მანძილი ხელს უწყობს მათ აგლომერაციას. ერთმანეთთან დაკავშირებული ნაწილაკები ცდილობენ შეინარჩუნონ ურთიერთკავშირი და ილექებიან ერთიან ფენად. ამის გამო იკლებს დალექვის სიჩქარე. ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაციის გამო სითხე გადაადგილდება ნაწილაკებს შორის არსებულ სივრცეში, ზემოთკენ. დალექვადი მასის ზემოთ გამოიყოფა დაწმენდილი სითხე [40].



ნახ. 2.4. ცილინდრში, ერთგვაროვანი კონცენტრირებული სუსპენზიის დალექვისას მიმდინარე პროცესები

შეზღუდული დალექვის სიჩქარე დამოკიდებულია ნაწილაკების კონცენტრაციასა და მათ მახასიათებლებზე. ფლოკულაციური დალექვის მსგავსად, შეზღუდული დალექვის ანალზს, ძირითადად აწარმოებენ ექსპერიმენტალური დაკვირვებების საშუალებით.

2.2. შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს განმსაზღვრელი დამოკიდებულებები

გამწმენდი ნაგებობების გაანგარიშებისას აუცილებელია დაბინძურებული ჩამდინარე წყლების ძირითადი პარამეტრების ცოდნა. როგორც უკვე აღინიშნა, ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი პარამეტრია შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხო - შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარე.

მე-19 საუკუნის დასაწყისში, მეცნიერებმა ა. ნავიემ, ო. კომიმ, ს. პუასონმა, სენ-ვენანმა და ჯ. სტოქსმა შეიმუშავეს დიფერენციალური განტოლებები, რომლებიც აღწერს ბლანტი სითხეების მოძრაობის კანონებს [41, 42, 43, 44].

რეინოლდსმა, ბლანტი სითხის დინების შესწავლისას, დაადგინა მსგავსების კრიტერიუმი, რომელიც სრულად აღწერდა სითხით ნაწილაკის

გარშემოდენის ხასიათს. მოგვიანებით ამ ძირითად ჰიდრავლიკურ კრიტერიუმს ეწოდა რეინოლდსის რიცხვი (Re). რეინოლდსის რიცხვი განსაზღვრავს, თუ რამდენად ეწინააღმდეგება სითხის სიბლანტე მოცემული სიჩქარით მოძრავი ნაწილაკის წრფივ გადაადგილებას:

$$Re = \frac{\rho_b u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu}, \quad (2.2.1.)$$

სადაც Re არის რეინოლდსის (უგანზომილებო) რიცხვი;

ρ_b - სითხის სიმკვრივე, კგ/მ³;

u - ნაწილაკის სიჩქარე, მ/წმ;

d - ნაწილაკის დიამეტრი, მ;

μ - სითხის დინამიკური სიბლანტე, (ნ·წმ)/მ²;

ν - სითხის კინემატიკური სიბლანტე, $\nu = \frac{\mu}{\rho_b}$, მ²/წმ.

რეინოლდსის რიცხვის სიდიდის მიხედვით განისაზღვრება შეწონილი ნაწილაკის გარშემოდენის სამი რეჟიმი: ლამინარული ($Re = 0 \div 1$); გარდამავალი ($Re = 1 \div 800$) და ტურბულენტური ($Re > 800$).

რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობისას $Re < 1$ ნაწილაკის გარშემოდენა ხდება ლამინარულ რეჟიმში. რეინოლდსის რიცხვის ზრდასთან ერთად ნაკადი კარგავს მდგრადობას, ნაწილაკის უკან წარმოიქმნება ორი გრიგალი, მაგრამ გარშემოდენა რჩება ლამინარული და სტაციონარული, თუმცა ნაწილაკზე მოქმედი წნევების სიმეტრია ირღვევა. რეინოლდსის რიცხვის შემდგომი ზრდისას ხდება გრიგალების დაგრძელება და ნაწილაკისგან მოწყვეტა. გრიგალების მოწყვეტა ხდება ხან ერთი, ხან მეორე მხრიდან. გრიგალები მიყვებიან ნაწილაკს და ამ ტიპის ნაკადს კარმანის ბილიკს უწოდებენ. როდესაც $Re > 800$ გრიგალები ვეღარ ასწრებენ ჩამოყალიბებას და ნაწილაკს უკან მოსდევს ტურბულენტური არე [45].

გარდა ნაწილაკის გარშემოდენისა რეინოლდსის რიცხვი აღწერს სითხის ნაკადის მოძრაობის რეჟიმებს, რომელიც აგრეთვე შეიძლება იყოს ლამინარული, გარდამავალი ან ტურბულენტური. მოძრაობის ლამინარული

რეჟიმის დროს ადგილობრივი სიჩქარეები ნაკადის არც ერთ წერტილში არ განიცდის პულსაციას. ნაკაში სიჩქარეები არ იცვლება დროში და არ ხდება ნაწილაკების აღრევა. მოძრაობის ტურბულენტურ რეჟიმში სიჩქარეები, ყოველ წერტილში იცვლება. სიჩქარის სიდიდის და მიმართულების ცვალებადობის მუხედავად, ყოველ მოცემულ წერტილში ჭავლის გადატანითი მოძრაობა მუდმივია [46].

ნაკადის მოძრაობის რეჟიმი დამოკიდებულია იმაზე, თუ სად ხდება სითხის მოძრაობა, მილსადენში, არხში თუ კაპილარში. სითხის ნაკადის მოძრაობისას რეინოლდსის რიცხვი შეიძლება განისაზღვროს ფორმულთ:

$$\text{Re} = \frac{\rho u R}{\mu} = \frac{u R}{\nu}, \quad (2.2.2.)$$

სადაც R არის ჰიდრავლიკური რადიუსი, ცოცხლი კვეთის ფართობის (ω)

$$\text{ფართობა დასველებულ ზედაპირთან } (\chi), R = \frac{\omega}{\chi}.$$

ერთი რეჟიმიდან მეორეში გადასვლა განისაზღვრება რეინოლდსის კრიტიკული რიცხვით - $\text{Re}_{კრ}$. თუ $\text{Re} < \text{Re}_{კრ}$, რეჟიმი ლამინარულია, ხოლო თუ $\text{Re} > \text{Re}_{კრ}$ - ტურბულენტური. რეინოლდსის კრიტიკული რიცხვის მნიშვნელობები ნაპოვნია ექსპერიმენტულად: მრგვალი ცოცხალი კვეთისთვის $\text{Re}_{კრ} = 2320$; იმის გათვალისწინებით, რომ მრგვალი ცილინდრული მილისათვის ჰიდრავლიკური რადიუსი $R = \frac{d}{4}$, სხვა განივი კვეთის შემთხვევაში $\text{Re}_{R,კრ} = \frac{\text{Re}_{კრ}}{4} = \frac{2320}{4} = 580$, (მაგალითად ღია არხებისთვის) [46, 47].

დღესდღეობით, დისპერსული სისტემების გაანგარიშებისას ფართოდ გამოიყენება სტოქსის ფორმულა რომელიც განსაზღვრავს წინააღმდეგობის ძალას, რომელიც მოქმედებს ძალიან მცირე ზომის, სფერული ფორმის ნაწილაკზე, მის გადაადგილებისას სითხეში. სტოქსის მიხედვით სხეულზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა პროპორციულია მოძრაობის სიჩქარისა:

$$F_{წინ} = 3\pi\mu du, \quad (2.2.3.)$$

სადაც $F_{წინ}$ არის წინააღმდეგობის ძალა, რომელიც მიმართულია ნაწილაკის

მოძრაობის საპირისპიროდ, ნ;

μ - სითხის დინამიკური სიბლანტე, პა·წმ;

d - ნაწილაკის დიამეტრი, მ;

u - ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარე, მ/წმ.

სტოქსის ფორმულა მართებულია, თუ: გარსშემოდენა ლამინარულია და რეინოლდსის რიცხვი $Re < 1$; დასაღეჯი ნაწილაკები მცირე ზომისაა ($d \leq 100$ მკმ) და გააჩნიათ სფეროსებრი ფორმა; დაღეჯვის პროცესი მიმდინარეობს მონოდისპერსულ სისტემაში, სადაც ნაწილაკები ერთი ზომისაა და დაღეჯვის პროცესში ისინი არ იცვლიან ფორმასა და ზომას.

თავისუფალი დაღეჯვის იდეალურ მაგალითს წარმოადგენს ერთი ნაწილაკის მოძრაობა სითხეში, რომელიც ჩასხმულია უსასრულოდ დიდი მოცულობის ჭურჭელში. უნდა ითქვას, რომ თავისუფალი სედიმენტაციის კანონები, მცირე დაზუსტებებით, სრულდება დისპერსულ სისტემებშიც.

ნაწილაკის დაღეჯვისას, სიმძიმის ძალის ზეგავლენით, მისი სიჩარე, ნულოვანი სიჩქარიდან იწყებს გაზრდას. გარკვეული დროის შემდეგ ნაწილაკი იძენს პრაქტიკულად მუდმივ სიჩქარეს, რომელსაც ვარდნის საბოლოო სიჩქარეს უწოდებენ. თანაბარი მოძრაობისას, ნიუტონის პირველი კანონის თანახმად, ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ჯამი ნულის ტოლია.

ნაწილაკზე მოქმედი სიმძიმის ძალის საპირისპიროდ მოქმედებს არქიმედეს ამომგდები ძალა. აქედან გამომდინარე:

$$Vg(\rho_b - \rho_s) = 3\pi\mu du. \quad (2.2.4.)$$

სადაც V არის ნაწილაკის მოცულობა, მ³;

g - თავისუფალი ვარდნის აჩქარება, მ/წმ²;

ρ_b - ნაწილაკის სიმკვრივე, კგ/მ³.

სფეროსებრი ნაწილაკის მოცულობა შეადგენს:

$$V = \frac{\pi d^3}{6}. \quad (2.2.5.)$$

შესაბამისად, ლამინარული რეჟიმის დროს, მცირე ზომის ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხო შეადგენს [42]:

$$u = \frac{g(\rho_g - \rho_l)d^2}{18\mu}, \quad (2.2.6.)$$

ფორმულა (2.2.6.)-ის გამოყენების ზედა ზღვარს წარმოადგენს რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობა $Re = 1$, რაც შეესაბამება ნაწილაკის ზღვრულ ზომას $d \approx 0,15$ მმ-ს, ჩამდინარე წყლის ტემპერატურისას 15°C .

სტოქსის დალექვის ფორმულის გამოყენების ქვედა ზღვარი შეესაბამება რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობას $Re \approx 10^{-4}$. რეინოლდსის რიცხვის უფრო დაბალი მნიშვნელობებისას ძალიან მცირე ზომის ნაწილაკების სიჩქარეზე გავლენას ახდენს ბროუნის მოძრაობა [48].

ფორმულიდან (2.2.6) ჩანს, რომ, თუ ნაწილაკის სიმკვრივე ρ_g ნაკლებია სითხის სიმკვრივეზე ρ_l , ნაწილაკი იწყებს ამოტივტივებას, ამგვარად, ფორმულის გამოყენება შესაძლებელია ნაწილაკების ამოტივტივების სიჩქარის გასაზომად. ამ ფორმულას, აგრეთვე ნავიე-სტოქსის განტოლებას უწოდებენ [49].

სტოქსის მიერ მიღებულ იქნა დაშვებები, რომ: სითხის მოძრაობა დამყარებულია; სხეულის მოძრაობაზე არ მოქმედებს გარე მასური ძალები; სხეული გადაადგილდება საკმაოდ დაბალი სიჩქარით.

სხვადასხვა მკვლევარები ცდილობდნენ სტოქსის თეორიის სრულყოფას.

კ. ოზენი [50] თვლიდა, რომ სტოქსის თეორია არ არის სრული იმის გამო, რომ მიღებულია დაშვება ინერციის ძალების სიმცირის შესახებ. რეალობაში, მცირე რეინოლდსის რიცხვებისთვის ინერციის ძალები აღწევენ მნიშვნელოვან სიდიდეებს. ამ უზუსტობის თავიდან ასაცილებლად ოზენმა ნავიე-სტოქსის ფორმულაში შეიტანა ინერციული წევრები, კერძოდ წინააღმდეგობის კოეფიციენტი (c_d). ოზენის განტოლება მართებულია როდესაც $Re \ll 1$ და ემთხვევა სტოქსის ფორმულას სფეროსებრი ნაწილაკის სიახლოვეს. ოზენის მიხედვით სფეროსებრი ნაწილაკისთვის

წინააღმდეგობის კოეფიციენტი გამოითვლება ფორმულით:

$$c_d = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{3}{16} \text{Re} \right). \quad (2.2.7.)$$

რადგან ოზენის ფორმულა არის მიახლოება მოძრაობის სრული განტოლების ამოსახსნელად ნაკადის მთელ არეში, რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობებისას $\text{Re} \ll 1$, მას თვლიან ზუსტი ამოხსნის მისაღებად მიმდევრობითი მიახლოებების პროცესის საწყის განტოლებად [51].

ლ. პრანდტლის სასაზღვრო ფენის თეორიის მიხედვით წინააღმდეგობის ძალები წარმოიქმნება სითხით სხეულის გარსშემოდენისას წარმოქმნილი ხახუნის ძალების გამო [52].

ი. ბიურგერის [53] და ი. ნიკურძის [54] ცდებმა აჩვენა, რომ სასაზღვრო შრეში, რეალურად ხდება სიჩქარეთა მკვეთრი ცვლა, ხოლო ნაკადის სხვა არეში სიჩქარის ცვლა საკმაოდ მცირეა, რაც სრულად ემთხვევა პრანდტლის თეორიას. მაგრამ პრანდტლის თეორია მართებულია რეინოლდსის რიცხვის გარკვეული მნიშვნელობებისთვის და ამოტომ არა არის სრული.

რ. რიჩარდსი [55], ცდების მეშვეობით იკვლევდა ქვიშის და ხრემის ნაწილაკების წინააღმდეგობის კოეფიციენტის რეინოლდსის რიცხვზე დამოკიდებულებას. ადგენდა სხვადასხვა დამოკიდებულების გამოყენების ზღვრებს. ექსპერიმენტები ტარდებოდა ცხაურაზე გაცრილი ნაწილაკებისთვის, ამასთან საშუალო სტატისტიკური სიჩქარის სიდიდე ყოველი ფრაქციისთვის განისაზღვრებოდა 100 დაკვირვების საფუძველზე. ექსპერიმენტის შედეგად დადგინდა, რომ გრაფიკზე მიღებულ წერტილებს, ასიმპტოტების სახით გააჩნიათ ორი წრფე, რომელთაგან ერთ-ერთი განისაზღვრება სტოქსის ფორმულით, ხოლო მეორე - კვადრატული წინააღმდეგობის ფორმულით.

სითხეში მოძრაობისას, გარემოს მხრიდან, ნაწილაკზე მოქმედებს წინააღმდეგობის ძალა, რომელიც დამოკიდებულია როგორც დისპერსიული გარემოს თვისებებზე (სიმკვრივესა და სიბლანტეზე), ასევე სხეულის ფორმასა და სიჩქარეზე. მოძრავ სხეულებზე მოქმედი ბლანტი ხახუნის

წინააღმდეგობის კანონი პირველად ჩამოაყალიბა ნიუტონმა:

$$F_{წინ} = c_d S \frac{\rho_b u^2}{2}, \quad (2.2.8.)$$

სადაც $F_{წინ}$ არის წინააღმდეგობის ძალა, ნ;

c_d - უგანზომილებო წინააღმდეგობის კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია სხეულის ფორმასა და მოძრაობის რეჟიმზე;

S - სხეულის მიდელის ფართობი (ნაწილაკის პროექცია სიბრტყეზე, რომელიც სხეულის მოძრაობის მიმართულების პერპენდიკულარულია $S = \frac{\pi d^2}{4}$, მ²).

ნიუტონის ბლანტი ხახუნის წინააღმდეგობის კანონიდან გამომდინარე, განტოლება (2.2.4) მიიღებს სახეს:

$$Vg(\rho_f - \rho_b) = c_d S \frac{\rho_b u^2}{2}, \quad (2.2.9.)$$

ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო გამოითვლება განტოლებიდან (2.2.9):

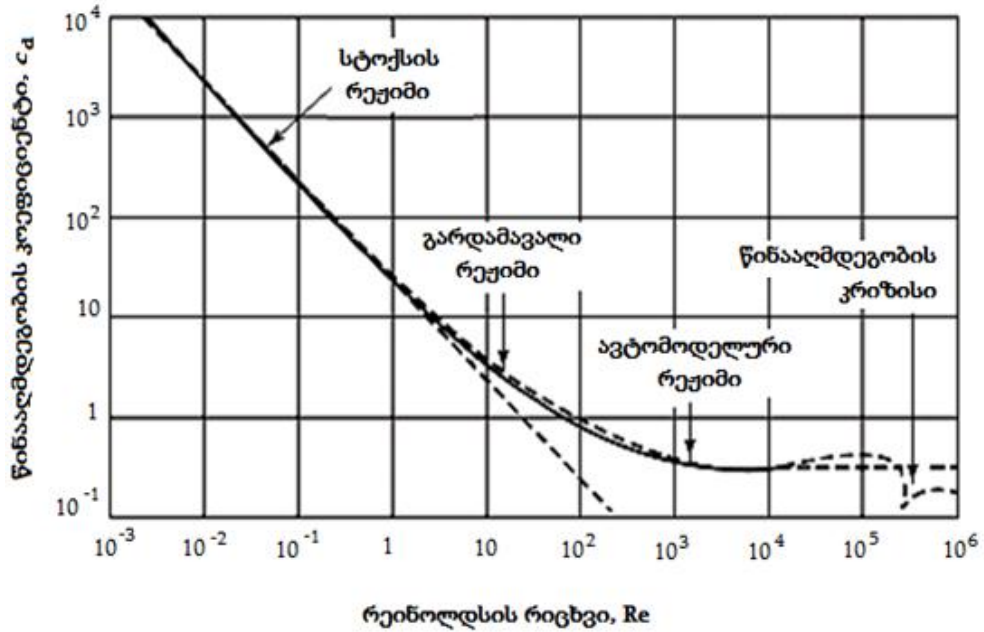
$$u = \sqrt{\frac{4g(\rho_f - \rho_b)d}{3c_d\rho_b}} \quad (2.2.10.)$$

მოძრავ ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა დამოკიდებულია ნაკადის რეჟიმზე და შესაბამისად რეინოლდსის რიცხვზე.

რელის მიერ, მრავალრიცხოვანი ცდების შედეგების დამუშავების შედეგად, მიღებულ იქნა დიაგრამა, ე. წ. წინააღმდეგობის სტანდარტული მრუდი (ნახ. 2.5), რომელიც აკავშირებს წინააღმდეგობის კოეფიციენტს რეინოლდსის რიცხვთან.

როდესაც $Re < 1$ ადგილი აქვს ნაწილაკის ლამინარულ გარსშემოდენას. ამ რეჟიმს სტოქსის რეჟიმს უწოდებენ. სტოქსის რეჟიმში მყარი სფეროსებრი ნაწილაკის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი განისაზღვრება ფორმულით:

$$c_d = \frac{24}{Re}. \quad (2.2.11.)$$



ნახ. 2.5. მყარი სფეროსებრი ნაწილაკის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სტანდარტული მრუდი

განტოლებებიდან (2.2.8.) და (2.2.11.) მიიღება მცირე ზომის სფეროსებრ ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალის სიდიდე, სტოქსის (2.2.3.) ფორმულის სახით.

როდესაც რეინოლდსის რიცხვი იცვლება დიაპაზონში $Re = 1 \div 800$, ადგილი აქვს გარდამავალ რეჟიმს. ამ რეჟიმში $c_d(Re)$ დამოკიდებულებების აღსაწერად გამოიყენება მრავალი ემპირიული დამოკიდებულება:

- ალენის ფორმულა:

$$c_d = \frac{13}{\sqrt{Re}}; \quad (2.2.12.)$$

- კლიაჩკოს ფორმულა:

$$c_d = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}; \quad (2.2.13.)$$

- აეოვ - ტოდესის ფორმულა:

$$c_d = \left(0,325 + \sqrt{0,124 + \frac{24}{Re}} \right)^2. \quad (2.2.14.)$$

ცნობილია გარდამავალ რეჟიმში c_d წინააღმდეგობის კოეფიციენტის

განმსაზღვრელი კიდევ მრავალი სხვა დამოკიდებულება, რომლებიც პრაქტიკულად ერთნაირ შედეგს იძლევა [39, 56, 57, 58].

როდესაც რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობები შეადგენს $Re = 800 \div 10^5$, ადგილი აქვს სითხის მიერ ნაწილაკის ტურბულენტურ გარსშემოდენას. ამ შემთხვევაში წინააღმდეგობის კოეფიციენტი მუდმივი სიდიდეა. კერძოდ, სფეროსებრი ნაწილაკისთვის იგი შეადგენს $c_d = 0,44$. გარსშემოდენის ამ რეჟიმს ავტომოდელურ რეჟიმს უწოდებენ.

როდესაც $Re > 3 \cdot 10^5$, წინააღმდეგობის კოეფიციენტი მკვეთრად კლებულობს, მიახლოებით ხუთჯერ. პირველად ეს მოვლენა აღმოაჩინა გ. ეიფელმა 1912 წელს [59]. ეიფელის ეგექტი ახსნა პრანდტლმა: „ხდება სასაზღვრო შრის ტურბულენტობის მატება, იცვლება ძირითადი ნაკადის დინება, ხდება ტურბულენტური კვალის შევიწროვება და წინააღმდეგობის ძალის კლება“ [52]. ამ მოვლენას ეწოდა წინააღმდეგობის კრიზისი.

მაკკენზი ლ. დევსის ნაშრომში [39], ჰიდრავლიკური სისხოს გამოსათვლელად კეთდება დაშვება, რომ სითხის ნაკადი იმყოფება ლამინარულ რეჟიმში, ამიტომ გამოთვლა წარმოებს სტოქსის კანონის გამოყენებით. ჰიდრავლიკური სისხოს მიხედვით ზუსტდება რეინოლდსის რიცხვი. თუ იგი 1-ზე ნაკლებია - გამოთვლა სრულდება. თუ იგი 1-ზე მეტია, რეინოლდსის რიცხვის მიხედვით ხდება წინააღმდეგობის კოეფიციენტისთვის შესაბამისი განტოლების შერჩევა, ხოლო სიჩქარის დასადგენად გამოიყენება ნიუტონის განტოლება (2.2.10.). შემდეგ ეს სიჩქარე ისევ გამოიყენება რეინოლდსის რიცხვის გადასამოწმებლად. ინტერაციის პროცესი მიმდინარეობს მანამ, სანამ არ იქნება მიღწეული კონვერგენტული გადაწყვეტილება, ანუ სიჩქარე მოგვცემს რეინოლდსის რიცხვს, რომელიც ტოლი იქნება რიცხვისა, რომელიც გამოყენებული იყო ჰიდრავლიკური სისხოს დასადგენად.

ჰიდრავლიკური სისხოს გამოსათვლელი ძირითადი ფორმულების გარდა (2.2.3., 2.2.10.), ცნობილია ნახევრად ემპირიული ფორმულები, რომლებიც გამოიყენება ფართო დიაპაზონის დიამეტრების

ნაწილაკებისთვის. მაგალითად ვინთერვერპის ფორმულა [60]:

$$u = \frac{gd^2}{18\nu} \left(\frac{\rho_g - \rho_b}{\rho_b} \right) \frac{1}{1 + 0,15\text{Re}^{0,687}} \quad (2.2.21.)$$

ამ ფორმულის ნაკლს წარმოადგენს შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარის გამოთვლა ინტერაციის მეთოდით (მიახლოებული მნიშვნელობის პოვნა შემდგომი მიახლოებით, რომელიც იქნება უფრო ზუსტი).

არსებობს ემპირიული ფორმულები, რომლებიც არის უნივერსალური წყლის მოძრაობის ნებისმიერი რეჟიმისათვის და მათი რეალიზაცია არ ითხოვს ინტერაციულ მეთოდს. ერთერთი მათგანია შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარის გამოსათვლელი ემპირიული ფორმულა [61]:

$$u = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\left(\frac{36\nu}{d} \right)^2 + 7,25 \left(\frac{\rho_g - \rho_b}{\rho_b} \right) dg} - \frac{36\nu}{d} \right) \quad (2.2.22.)$$

ჰიდრაულიკური სისხოს განსაზღვრისას მნიშვნელოვან საკითხს წარმოადგენს გამოთვლების ჩასატარებლად ფორმულის შერჩევა ან ემპირიული და თეორიული შეფასებების ერთობლივი გამოყენების შესაძლებლობის არსებობის საკითხი. ექსპერიმენტალური კვლევებისას მიღებული შედეგების გავრცელება სხვა, მსგავს მოვლენებზე დაკავშირებულია რიგ სირთულეებთან, რომელთა გადასაწყვეტად მიმართავენ მსგავსების თეორიას, რომლის მეშვეობით შესაძლებელია სხვადასხვა ფიზიკური სიდიდეების გაერთიანება ფარდობით სიდიდეებში - მსგავსების კრიტერიუმებში. მსგავსების კრიტერიუმები ფარდობითი სიდიდეებია, რომელთაც არ გააჩნიათ ფიზიკური განზომილება, ამასთან ფარდობითი სიდიდეების რაოდენობა ნაკლებია მათ მისაღებად გამოყენებულ ფიზიკურ სიდიდეთა რაოდენობაზე. ფარდობითი სიდიდეები განიხილება როგორც ახალი ცვლადები. ცვლადების შემცირება ამარტივებს ფიზიკური პროცესების შესწავლას, რადგან კრიტერიალური განტოლებების მეშვეობით აღწერილი ფიზიკური მოვლენები ასახავს არა მხოლოდ ცალკეული ფაქტორის გავლენას, არამედ ითვალისწინებს ფაქტორთა

ერთობლიობას, რაც ამარტივებს მათი გამოყენებისას საკვლევი პროცესის განხილვას.

2.3. ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხოს განსაზღვრა კრიტერიალური განტოლებების მაშვეობით

დინამიკური სისტემების მსგავსების აუცილებელ პირობას წარმოადგენს ამ სისტემებზე მოქმედი ძალების მსგავსება. ჰიდრაულიკაში, სისტემაზე ძირითად მოქმედ ძალებს წარმოადგენს სამი ძალა: სიმძიმის ძალა, წნევის ძალა და წინააღმდეგობის ძალა.

ცალკეული, მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის გრავიტაციული დალექვისას სტაციონარულ რეჟიმში ($u_{სტ} = \text{const}$), მასზე მოქმედი სიმძიმის და არქიმედეს ძალები გაწონასწორებულია წინააღმდეგობის ძალით:

$$\rho_{სტ} V_{სტ} \cdot g - \rho_{ს} \cdot V_{სტ} \cdot g = c_d \frac{\pi d^2 \rho_{ს} u_{სტ}^2}{4 \cdot 2},$$

ან

$$(\rho_{სტ} - \rho_{ს}) \frac{\pi d^3}{6} g = c_d \frac{\pi d^2 \rho_{ს} u_{სტ}^2}{4 \cdot 2}, \quad (2.3.1.)$$

სადაც $u_{სტ}$ არის ნაწილაკის სტაციონარული დალექვის სიჩქარე, მ/წმ.

რეინოლდსის რიცხვი წარმოადგენს ბლანტი სითხის მსგავსების კრიტერიუმს და ნაწილაკის დალექვისას სტაციონარულ რეჟიმში გამოითვლება დამოკიდებულებით:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{ს} u_{სტ} d}{\mu}, \quad (2.3.2.)$$

შესაბამისად სტაციონარულ რეჟიმში შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხო შეადგენს:

$$u_{სტ} = \text{Re} \frac{\mu}{\rho_{ს} d}. \quad (2.3.3.)$$

განტოლება (2.3.1.) განტოლება (2.3.3.)-ის გათვალისწინებით მიიღებს

სახეს:

$$\text{Re}^2 \cdot c_d = \frac{4g(\rho_g - \rho_l)\rho_l d^3}{3\mu^2}. \quad (2.3.4.)$$

როგორც ცნობილია, არქიმედეს კრიტერიუმის მნიშვნელობა შეადგენს:

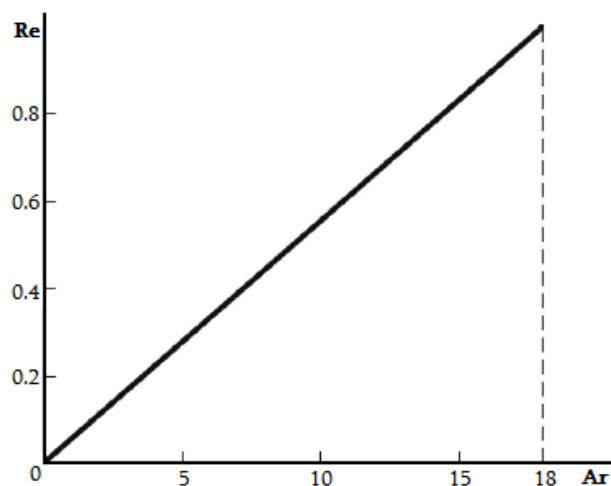
$$\text{Ar} = \frac{g(\rho_g - \rho_l)\rho_l d^3}{\mu^2}, \quad (2.3.5.)$$

აქედან გამომდინარე, განტოლება (2.3.4.) გამოისახება შემდეგი სახით:

$$\text{Re}^2 \cdot c_d = \frac{4}{3}\text{Ar}. \quad (2.3.6.)$$

ნაწილაკის სტაციონარულ რეჟიმში დალექვისას განტოლება (2.3.6.) წარმოადგენს რეინოლდსის და არქიმედეს რიცხვების დამაკავშირებელ კრიტერიალურ განტოლებას.

თუ ცნობილია პარამეტრები ρ_l , ρ_g , d და μ განტოლებებით (2.3.5., 2.3.6. და 2.3.3.) დგინდება არქიმედეს რიცხვი, რეინოლდსის რიცხვი და შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო სტაციონარული დალექვისას (ან ამოტივტივებისას).



ნახ. 2.6. სტოქსის რეჟიმში დალექვისას Re (Ar) დამოკიდებულების გრაფიკი

ნაწილაკის სიჩქარის ექსპრეს შეფასებისთვის [62] იყენებენ

რეინოლდსის და არქიმედეს რიცხვების დამოკიდებულებას:

$$\text{Re} = f(\text{Ar}) = 2 \sqrt{\frac{\text{Ar}}{3c_d}}. \quad (2.3.7.)$$

ნახ. 2.6.-ზე გამოსახულია რეინოლდსის და არქიმედეს რიცხვების დამოკიდებულება სტოქსის რეჟიმისთვის, როდესაც წინააღმდეგობის კოეფიციენტი $c_d = \frac{24}{\text{Re}}$. მოცემული რეჟიმისთვის არქიმედეს რიცხვის მაქსიმალური მნიშვნელობა, როდესაც $\text{Re} = 1$, შეადგენს $\text{Ar} = 18$.

ნახ. 2.7.-ზე გამოსახულია რეინოლდსის და არქიმედეს რიცხვების დამოკიდებულება გარდამავალ და ავტომოდელურ რეჟიმში.

ავტომოდელური რეჟიმისთვის $c_d = 0,44$, ხოლო გარდამავალი რეჟიმისთვის წინააღმდეგობის კოეფიციენტის მნიშვნელობის ანგარიში ხორციელდება კლიაჩკოს ფორმულით $c_d = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}}}$. ამ რეჟიმების გამყოფი არქიმედეს რიცხვის ზღვრული მნიშვნელობა შეადგენს $\text{Ar} = 270\,000$.

Re და Ar კრიტერიუმებს შორის თანაფარდობა დამოკიდებულია რეჟიმის პირობებზე.

ლამინარული რეჟიმის დროს, როდესაც $\text{Ar} < 36$, რეინოლდსის რიცხვი შეადგენს:

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar}}{18}. \quad (2.3.8.)$$

გარდამავალი რეჟიმისთვის, როდესაც $36 < \text{Ar} < 83000$:

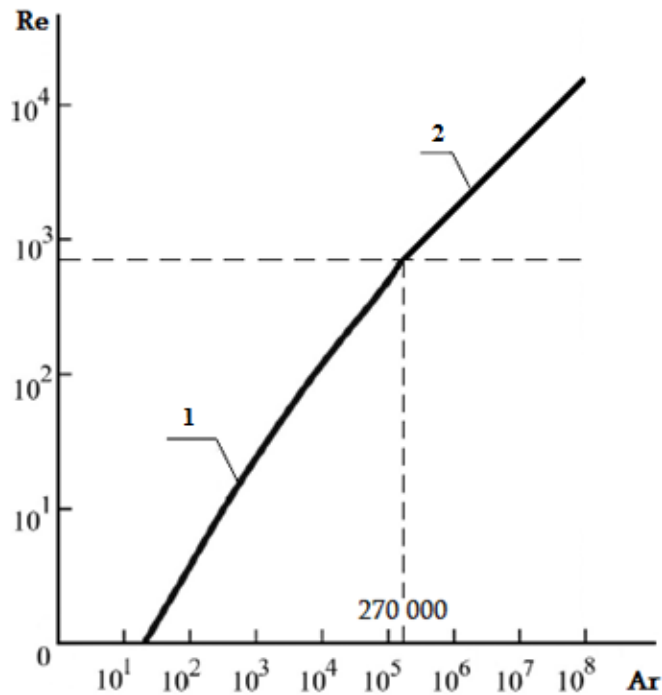
$$\text{Re} = 0,153\text{Ar}^{0,714}. \quad (2.3.9.)$$

ტურბულენტური რეჟიმისთვის, როდესაც $\text{Ar} > 83000$:

$$\text{Re} = 1,74\sqrt{\text{Ar}}. \quad (2.3.10.)$$

ზოგადად ყველა რეჟიმისთვის რეინოლდსის რიცხვი შეიძლება გამოითვალოს განტოლებით:

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,575\sqrt{\text{Ar}}}. \quad (2.3.11.)$$



ნახ. 2.7. $Re (Ar)$ დამოკიდებულების გრაფიკი ნაწილაკის მოძრაობისას გარდამავალ (1) და ავტომოდელურ (2) რეჟიმებში

ზემოთ განხილული კანონზომიერებები ეხება თავისუფალ დაღეჟვას, როდესაც მყარი ნაწილაკების კონცენტრაცია სითხეში მცირეა და მოძრაობისას ისინი არ ეხებიან ერთმანეთს [63].

ჰიდროდინამიკური პროცესების კვლევისთვის ნაშრომში [58] გამოყენებულია კრიტერიალური განტოლებები. კვლევის საგანს წარმოადგენდა: ცალკეული სფეროსებრი ნაწილაკის შეზღუდული დაღეჟვა სითხეში; აღმავალი სითხის ნაკადით ერთგვაროვანი მონოდისპერსული მარცვლოვანი ფენის შექონვა; ერთგვაროვანი სითხის ფილტრაცია ფოროვან მარცვლოვან შრეში. ნაშრომში, თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევების შედეგების განზოგადებით და მსგავსების თეორიის გამოყენებით დადგენილ იქნა, რომ ჰიდრაულიკური წინააღობების კანონებს გააჩნიათ საერთო საფუძველი და მათი აღწერა შესაძლებელია საერთო განტოლებით:

$$Re = \frac{\frac{4}{3}GaKr(1-k_1^2)}{\frac{a}{(1-k_2)^2} + b\sqrt{\frac{4}{3}GaKr}}, \quad (2.3.12.)$$

სადაც Ga არის გალილეის კრიტერიუმი $\left(Ga = \frac{d^3 \rho_s^2 g}{\mu^2} \right)$;

Kr - კრიტერიუმი, რომელიც ითვალისწინებს დამატებით მოქმედ ძალებს, გარკვეული ჰიდრომექანიკური პროცესის განხორციელებისას. ცალკეული სფეროსებრი ნაწილაკის შეზღუდული დაღეჯვისას სითხეში $Kr = \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}$.

k_1 და k_2 - შეზღუდვის კოეფიციენტები. (ცალკეული სფეროსებრი ნაწილაკის შეზღუდული დაღეჯვისას სითხეში $k_1 = k_2 = d/D$, სადაც d და D შესაბამისად ნაწილაკის და ჭურჭლის დიამეტრებია);

a და b - კოეფიციენტები, რომლებიც ითვალისწინებს სხვადასხვა სახის წინაღობებს (განისაზღვრება ექსპერიმენტალური გზით, ცალკეული სფეროსებრი ნაწილაკის შეზღუდული დაღეჯვისას სითხეში. ჩატარებულ კვლევაში დადგინდა, რომ $a=20,6$ და $b=2/3$).

არქიმედეს კრიტერიუმი გამოისახება როგორც:

$$Ar = Ga \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l} = \frac{d^3 \rho_s g (\rho_s - \rho_l)}{\mu^2} = \frac{d^3 g (\rho_s - \rho_l)}{\rho_l \nu^2}. \quad (2.3.13.)$$

ზემოაღნიშნულის გათვალისწინებით ფორმულამ (2.3.12) ცალკეული სფეროსებრი ნაწილაკის შეზღუდული დაღეჯვისას სითხეში მიიღო სახე:

$$Re = \frac{\frac{4}{3} Ar \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)}{\frac{a}{\left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^2 + b} \sqrt{\frac{4}{3} Ar}}. \quad (2.3.14.)$$

საღეჯრების გაანგარიშებისას კრიტერიალური განტოლებების გამოყენებით, მხედველობაში მიიღება როგორც შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედი ძალები, ასევე ნაწილაკის გარსშემოდენისას მიმდინარე სფეციფური პროცესები. მიუხედავად ამისა, რამოდენიმე ძალის ერთდროული მოქმედებისას, დინამიკური მსგავსების სრული დაცვა წარმოადგენს საკმაოდ რთულ და ხშირად განუხორციელებელ ამოცანას.

ამიტომ მოდელირებისას, ხშირად განიხილავენ მხოლოდ იმ ძალებს, რომლებიც ყველაზე დიდ გავლენას ახდენს შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკურ სისხოზე და ნაკლებად მნიშვნელოვან ძალებს უგულებელყოფენ.

2.4. სალექრების ჰიდრავლიკური და სამშენებლო პარამეტრების გაანგარიშების მეთოდების ანალიზი

სალექრებში, წყლის გაწმენდის ეფექტურობა დამოკიდებულია ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკურ სისხოზე. სალექრების გაანგარიშებისას ძირითად ამოცანას წარმოადგენს მათი ზომების და მუშაობის რეჟიმის დადგენა. ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მოთხოვნილი ხარისხიდან და გამომდინარე ხდება ყველაზე მცირე დასალექი ნაწილაკის ზომის დადგენა და ამ ნაწილაკისთვის წარმოებს ჰიდრავლიკური სისხოს გამოთვლა. ჰორიზონტალური სალექრების გაანგარიშებისას აუცილებელია დადგინდეს დალექვის ზონის ისეთი სიგრძე, რომელიც წყლის მოძრაობის მოცემული სიჩქარის პირობებში უზრუნველყოფს გაწმენდის საჭირო ეფექტს.

შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის შემცირების საჭირო ეფექტურობა (%) განისაზღვრება ფორმულით [28]:

$$\exists t = \left(1 - \frac{C_2}{C_1}\right) \cdot 100, \quad (2.4.1.)$$

სადაც C_1 არის ჩამდინარე წყალში შეწონილი ნაწილაკების საწყისი კონცენტრაცია, მგ/ლ;

C_2 - დაწმენდილ წყალში შეწონილი ნაწილაკების დასაშვები საბოლოო კონცენტრაცია (პირველადი დალექვის შემდეგ, როგორც წესი, მიიღება 100-150 მგ/ლ).

ს. ვ. იაკოვლევის [30] მიერ რეკომენდირებული იყო სალექრის გაანგარიშება ჩამდინარე წყლების საათობრივი დატვირთვიდან

გამომდინარე, გეგმაში ერთ კვადრატულ მეტრ სალექრის ფართობზე. სალექრის ზომები განისაზღვრებოდა შემდეგი გამოსახულებებით:

– სალექრის საერთო ფართობი:

$$F = Q/q_0, \quad (2.4.2.)$$

სადაც F არის სალექრის ფართობი, მ²;

Q - ჩამდინარე წყლების მოდინება მ³/სთ;

q_0 - გეგმაში ერთ კვადრატულ მეტრ სალექრის ფართობზე,

ჩამდინარე წყლების საათობრივი დატვირთვა, მ/სთ;

– სალექრის დიამეტრი:

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi q_0}}, \quad (2.4.3.)$$

ამ მეთოდის ნაკლი იმაში მდგომარეობს, რომ შესაძლებელია სალექრისთვის ნებისმიერი სიმაღლის შერჩევა და იგი არ არის დაკავშირებული დიამეტრთან და გამდინარე სითხის მოძრაობის სიჩქარესთან.

ს. ვ. იაკოვლევის და ვ.ი. კალიცუნის სალექრის გაანგარიშების მეთოდი ეფუძნება სალექრის მარგი ქმედების კოეფიციენტის გამოყენებას, რომელიც განისაზღვრება რეალურ სალექარასა და მის მოდელში დალექვის ეფექტის დამოკიდებულებით (ერთნაირ გარემო პირობებში). ლაბორატორიულ პირობებში ხდება შეწონილი ნაწილაკების დალექვის გრაფიკის აგება. ნაპოვნი მარგი ქმედების კოეფიციენტისთვის განისაზღვრება შეწონილი ნაწილაკების დალექვის ხანგრძლივობა. შემდგომ, საანგარიშო სიჩქარის გათვალისწინებით, ხდება სალექრის სიგრძის განსაზღვრა.

ამ მეთოდის მთავარი ნაკლია სხვადასხვა რეჟიმისა და მოძრაობის ხასიათის უგულებელყოფა. აგრეთვე, სალექრის გაანგარიშებისთვის გამოიყენება გასაშუალოებული ჰიდრავლიკური სისხო, რაც აგრეთვე ამცირებს გამოთვლის სიზუსტეს.

მოგვიანებით დადგინდა, რომ ტურბულენტურ ნაკადში დალექვის

სიჩქარის განსაზღვრისთვის უფრო მართებულია შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოსა და ვერტიკალური ტურბულენტური მდგენელის სხვაობის გამოყენება. ამის გათვალისწინებით, ჰორიზონტალური სალექრების სიგრძის დასადგენად ფართო გამოყენება ჰპოვა განტოლებამ:

$$L = K_1 \frac{h_1}{u_0 - w} v = K_1 K_2 \frac{h_1}{u_0} v = K \frac{h_1}{u_0} v, \quad (2.4.4.)$$

სადაც L არის სალექრის სიგრძე, მ;

$K = K_1 K_2$ - ნაკადის ტურბულენტურობის (K_1) და სხვა ფაქტორების გავლენის კოეფიციენტი ($K_2 = \frac{h_1}{u_0 - w}$).

h_1 - დალექვის სიღრმე, მ;

v - სითხის მოძრაობის სიჩქარე, მ/წმ;

u_0 - შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო მდგარ წყალში, მ/წმ;

w - სითხის მოძრაობის სიჩქარის ვერტიკალური ტურბულენტური მდგენელი, მ/წმ;

ამ ფორმულის ნაკლოვანებას წარმოადგენს სალექარში სითხის დინების რეალურ სქემებთან შეუსაბამობა.

სალექრის გაანგარიშების უფრო ზუსტ, მაგრამ შედარებით რთულ მეთოდს წარმოადგენს ა. ი. ჟუკოვის მიერ შემოთავაზებული მეთოდი [64, 65, 66, 67].

სალექრის სიგრძე იანგარიშება ფორმულით:

$$L = l_0 + l_1 + l_2 + l_3 + l_4, \quad (2.4.5.)$$

სადაც l_0 არის წყლის გამანაწილებელი მოწყობილობის სიგრძე, მ;

l_1 - დაშორება, რომლის საზღვრებში აქტიური ფენის სიმაღლე აღწევს სალექრის საანგარიშო სიღრმეს (ჭავლის გაფართოება), მ;

l_2 - დაშორება, რომლის დროსაც აქტიური ფენის სიმაღლე სალექრის საანგარიშო სიმაღლის ტოლია, მ;

l_3 - დაშორება, რომლის საზღვრებში ხდება ნაკადის შევიწროება, მ;

l_4 - დაშორება გადამლობ ფარსა და შემკრებ ღარს შორის, მ.

ამ ფორმულაში შემავალი სიდიდეების გაანგარიშება ხდება განტოლებებით:

$$l_1 = \sqrt[1,15]{\frac{H-h_0}{k_1}}; \quad (2.4.6.)$$

$$l_2 = v \frac{H-h_1}{u_0-w_2}; \quad (2.4.7.)$$

$$l_3 = \frac{H}{tga}; \quad (2.4.8.)$$

l_4 მნიშვნელობის შერჩევა ხდება $0,2 \div 0,3$ მ-ის ფარგლებში,

სადაც H არის სალექრის საანგარიშო სიღრმე, მ;

h_0 - წყლის მოძრავი ფენის სიმაღლე სალექარში მიწოდებისას, მ;

k_1 - კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია სალექრის l_1 უბანზე წყლის მოძრაობის საშუალო სიჩქარეზე;

$h_1 = \frac{l_1}{v_1}(u_0 - w_1)$ - შეწონილი ნაწილაკის დალექვის სიღრმე l_1 უბანზე, მ;

v - ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე l_2 უბანზე, მ/წმ;

u_0 - შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო, მ/წმ;

w_1 და w_2 - შესაბამისად, სითხის მოძრაობის v_1 და v სიჩქარის ვერტიკალური ტურბულენტური მდგენელები;

a - ნაკადის შევიწროების კუთხე, მიიღება $25-30^\circ$.

ა. დ. გირგიდოვის მეთოდით სალექრის გაანგარიშებისას, პირველ რიში, ხდება შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს განსაზღვრა [68]. ამ პარამეტრის მნიშვნელობის სიზუსტეზე დამოკიდებულია სალექრის სწორი პარამეტრების შერჩევა. ყველა ტიპის სალექრისთვის ჰიდრავლიკური სისხო განისაზღვრება ფორმულით:

$$u_0 = \frac{1000H}{t_{\text{დალ}} \cdot \left(\frac{K \cdot H}{h_1}\right)^{n_2}}, \quad (2.498.)$$

სადაც H არის სალექრის გამდინარე ნაწილის სიმაღლე (მიიღება ტიპობრივი სალექრის შესაძლებელი სიღრმიდან გამომდინარე), მ;

K – სალექრის მოცულობის გამოყენების კოეფიციენტი (აიღება ცხრილიდან N 2.1);

h_1 – დალექვის სიღრმე მდგარ წყალში დალექვისას, რომელიც მიიღება 0,5 მ;

n_2 – ხარისხის მაჩვენებელი, რომელიც დამოკიდებულია შეწონილი ნაწილაკების აგლომერაციის უნარზე;

$t_{დალ}$ – დალექვის ხანგრძლივობა, რომელიც შეესაბამება დაწმენდის მოცემულ ეფექტს. მიიღება ლაბორატორიულ პირობებში, წმ.

ნაწილაკი, ჩამდინარე წყალში მოძრაობს ნაკადის სიჩქარით. მუშა ნაკადის სიჩქარე ($v_{ნაკ}$) განისაზღვრება ფორმულით:

$$v_{ნაკ} = \frac{1000q_{max}}{H \cdot B^n}. \quad (2.4.10.)$$

დალექვის შედეგად დღე-ღამეში გამოყოფილი ნალექის რაოდენობა (Q_6) განისაზღვრება მიწოდებულ და დაწმენდილ წყალში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციიდან გამომდინარე (შესაბამისად $C_{მიწ}$ და $C_{დაწ}$):

$$Q_6 = \frac{Q(C_{მიწ} - C_{დაწ})}{(100 - P_6)\gamma_6 \cdot 10^4}, \quad (2.4.11.)$$

სადაც Q არის ჩამდინარე წყლის ხარჯი დღე-ღამეში, მ³/დღ.დ;

P_6 – ნალექის ტენიანობა, რომელიც მიიღება 94-96%;

γ_6 – ნალექის სიმკვრივე, გ/სმ³.

სალექრის განყოფილებების რაოდენობა მიიღება არანაკლებ ორისა.

სალექრის სიგრძე (L) განისაზღვრება ფორმულით:

$$L = \frac{v_w \cdot H}{(u_0 - v_6)K \cdot 10^4}, \quad (2.4.12)$$

სადაც v_6 არის ტურბულენტური მდგენელის სიჩქარე, მმ/წმ.

საღებრების ძირითადი საანგარიშო სიდიდეები

ცხრილი 2.1

საღებარი	K მაცულობის გამოყენების კოეფიციენტი	H საღებრის გამდინარე ნაწილის სიმაღლე, მ	B საღებრის სიგანე, მ	v_w მუშა ნაკადის სიჩქარე, მმ/წმ	ფსკერის ქანობი ლამის შემკრები- საკენ
ჰორიზონტალური	0,5	1,5-4	$2H-5H$	5-10	0,005-0,05
რადიალური	0,45	1,5-5	-	5-10	0,005-0,05
ვერტიკალური	0,35	2,7-3,8	-	-	-
მბრუნავი შემკრებ- გამანაწილებელი მოწყობილობით	0,85	0,8-1,2	-	-	0,05
დაღმავალ-აღმავალი დინებით	0,65	2,7-3,8	-	$2u_0-3u_0$	-
თხელფენოვანი ბლოკებით					
მუშაობის წინდენითი (წინაღდენითი) სქემით	0,5-0,7	0,025-0,2	2-6	-	-
მუშაობის ჯვარედინი სქემით	0,8	0,025-0,2	1,5	-	0,005

საანგარიშო პარამეტრებით მიიღება ტიპური საღებარი, ან ხდება ინდივიდუალური საღებრის პროექტირება.

ზემოთ განხილული გაანგარიშების მეთოდები გამოიყენება საღებრებისთვის, რომლებშიც შენარჩუნებულია სითხის მოძრაობის ლამინარული რეჟიმი. მაგრამ ხშირ შემთხვევაში, საღებრებში თავს იჩენს ტურბულენტური მოძრაობის რეჟიმი. საღებრის გაანგარიშებისას უნდა განისაზღვროს მისი ისეთი სიგრძე, რომ შეწონილმა ნაწილაკებმა, რომელთა ზომა მეტია რაღაც ფიქსირებულ სიდიდეზე, ტურბულენტური ნაკადის პირობებში მოასწროს ფსკერზე დაღებვა.

იქიდან გამომდინარე, რომ დღესდღეობით არ არსებობს შეწონილი ნაწილაკების ტურბულენტურ რეჟიმში დაღებვის სრულყოფილი მეთოდი,

იყენებენ შემდეგ ხერხს: ჰიპოთეტიურ ლამინარულ რეჟიმში გამოითვლება გასაშუალოებული ტურბულენტური ნაკადის სიჩქარის მქონე ნაწილაკის დალექვისთვის საჭირო სალექრის სიგრძე. შემდგომ, ნაკადის ტურბულენტობის გასათვალისწინებლად, ხდება სალექრის სიგრძის გაზრდა ემპირიულად [69].

სალექრის სიგრძის დასადგენად იყენებენ ორ ფორმულას:

$$L = \alpha_1 \int_0^h \frac{u_x(z)}{w} dw, \quad (2.4.13)$$

სადაც α_1 არის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს ნაკადის ტურბულენტობას – ნაწილაკის ტრაექტორიის ქაოტურ ხასიათს (განისაზღვრება ექსპერიმენტალურად).

მიღებულია დაშვება, რომ:

$$u_x(z) = v = \text{const.} \quad (2.4.14.)$$

მაშინ ფორმულა იღებს შემდეგ სახეს:

$$L = \alpha_1 \frac{vh}{w}. \quad (2.4.15.)$$

მეორე დამოკიდებულება შემდეგი სახისაა:

$$L = \frac{vh}{w - u_{\text{ფეწ}}}, \quad (2.4.16.)$$

სადაც $u_{\text{ფეწ}}$ არის სიჩქარის შეწონვის მდგენელი, რომელიც, როგორც წესი განისაზღვრება საშუალო სიჩქარიდან გამომდინარე, ექსპერიმენტალურად: $u_{\text{ფეწ}} = kv$, სადაც k დამოკიდებულია რეინოლდსის რიცხვზე, ფარდობით ხაოიანობაზე და რამოდენიმე სხვა პარამეტრზე.

ორივე ზემოაღნიშნული ფორმულა არ არის საკმარისად ზუსტი, რადგან არ ითვალისწინებს ტურბულენტური რეჟიმის მრავალ მახასიათებელს.

სალექრის სიგრძის უფრო ზუსტი გამოთვლისთვის გამოიყენება დიფუზიის მოდელი სასრული სიჩქარით [70].

მეთოდი ეფუძნება სიჩქარეების ჰორიზონტალურ (u_x) და ვერტიკალურ (u'_z) მდგენელებად დაშლას. როდესაც $u'_z < w$, განტოლებები ასახავს შეწონილი ნაწილაკების დალექვის პროცესს.

ითვლება, რომ სალექრის ფსკერი ჰორიზონტალურია, წყლის მოძრაობა - თანაბარი.

გაანგარიშება წარმოებს ნაკადის დაბალი საშუალო სიჩქარის პირობებში, რათა დაკმაყოფილდეს ორი მოთხოვნა:

- სალექარში ნაკადის ტრანპორტუნარიანობა უნდა იყოს ნაკლები დასაწმენდად შემოსული წყლის მყარ წონურ ხარჯზე;
- სითხის სიჩქარის პულსაცია უნდა იყოს ნაკლები დასალექი შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკურ სისხოზე.

მაღალი სიჩქარის პულსაციის პირობებში იზრდება სალექრის სიგრძე.

მეთოდში მიღებულია დაშვება, რომ შეწონილ ნაწილაკებს გააჩნიათ მხოლოდ ორი ფიქსირებული სიჩქარით მოძრაობის უნარი. იმის და მიხედვით, თუ რომელი სიჩქარით მოძრაობს ნაწილაკი, მას მიაკუთვნებენ პირველ ან მეორე კლასს. შემოაქვთ თვითოეული კლასისთვის პარციალური კონცენტრაციების აღნიშვნები ϑ_1 და ϑ_2 , [71].

ტურბულენტურ ნაკადში ნალექის გასათვლელ განტოლებას გააჩნია შემდეგი სახე [72]:

$$\begin{cases} u_x \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} + \sigma_z \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z} - w \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z} + \omega^L (\vartheta_1 - \vartheta_2) = 0, \\ u_x \frac{\partial \vartheta_2}{\partial x} - \sigma_z \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z} - w \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z} + \omega^L (\vartheta_2 - \vartheta_1) = 0. \end{cases} \quad (2.4.17.)$$

საანგარიშო სქემის (ნახ.2.8.) მიხედვით ნაწილაკები ნაკადში ხვდებიან წერტილში a კოორდინატებით $x = 0$, $z = h$, ჰიდრავლიკური სისხოთი u .

სალექრის ფსკერზე დალექვა ხდება ინტერვალში:

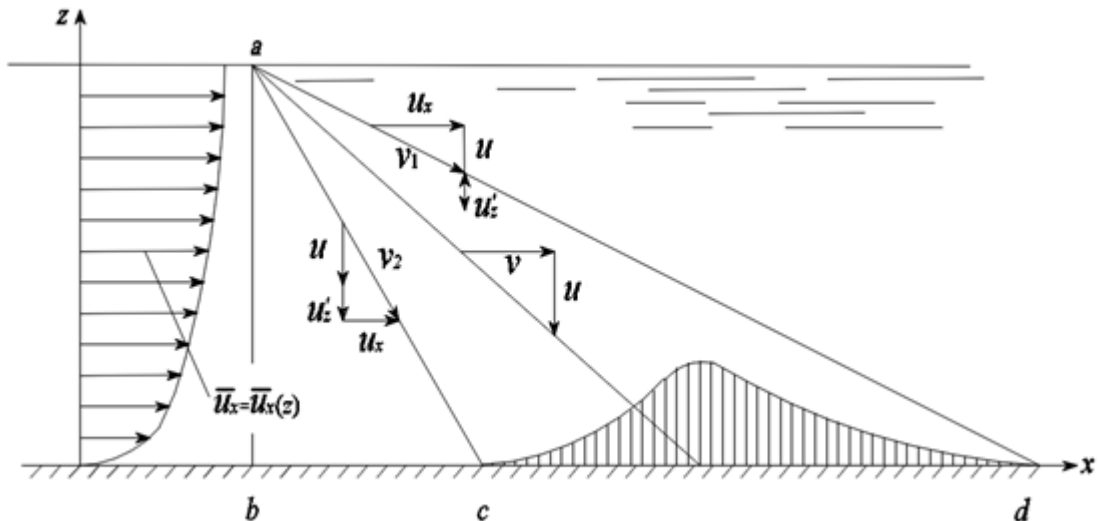
$$\frac{hv}{u'_z + u} < x < \frac{hv}{u - u'_z}, \quad (2.4.18.)$$

სადაც v არის სალექარში სითხის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე;

$+u'_z$ და $-u'_z$ - ვერტიკალური სიჩქარეები.

შეწონილი ნაწილაკების ნახევარი ილექება მონაკვეთზე:

$$0 < x < \frac{hv}{u}. \quad (2.4.19.)$$



ნახ. 2.8. ნაკადში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სქემა

პრაქტიკული გამოთვლებისას ითვლება, რომ $u_x = v = const$, სადაც v არის განივ კვეთზე სითხის მოძრაობის საშუალო სიჩქარე.

ვერტიკალური სიჩქარე გამოითვლება დამოკიდებულებით:

$$u'_z = \sigma_z u, \quad (2.4.20.)$$

სადაც σ_z წარმოადგენს უნივერსალურ მუდმივას.

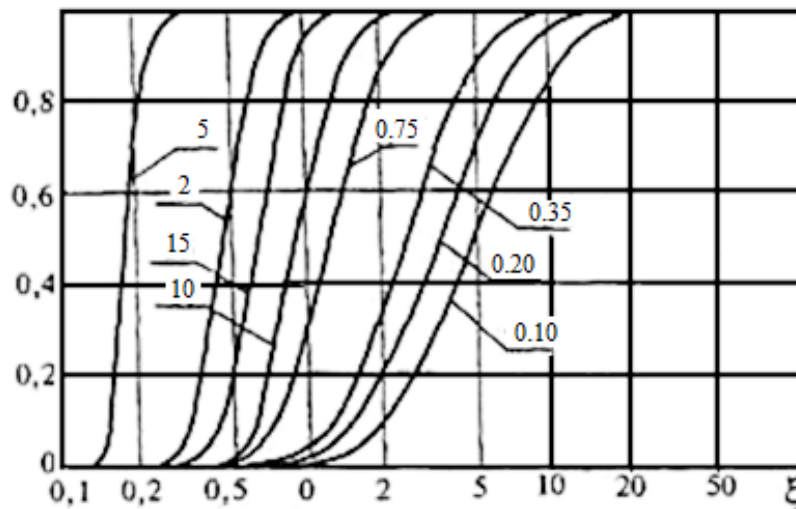
ამ შემთხვევაში დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა იღებს შემდეგ სახეს:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vartheta_1}{\partial \varepsilon} + \sigma_z \frac{\partial \vartheta_1}{\partial \varepsilon} - \frac{u}{u_x} \frac{\partial \vartheta_1}{\partial \varepsilon} + 2\sigma_x (\vartheta_1 - \vartheta_2) = 0, \\ \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \varepsilon} - \sigma_z \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \varepsilon} - \frac{u}{u_x} \frac{\partial \vartheta_2}{\partial \varepsilon} + 2\sigma_x (\vartheta_2 - \vartheta_1) = 0. \end{cases} \quad (2.4.21)$$

სადაც σ_x არის უნივერსალური მუდმივა.

განტოლებათა სისტემის ამოხსნა დამოკიდებულია მხოლოდ ერთ პარამეტრზე $\frac{u}{u_x}$ - ჰიდრაულიკურ სისხოზე. შესაბამისად შესაძლებელი ხდება პარამეტრების არსებობის შემთხვევაში აიგოს ნომოგრამა.

ნომოგრამა, ასახავს მოცემული ჰიდრაულიკური სისხოს მქონე ნაწილაკის ფსკერზე, $x = f(\xi)$ კოორდინატაზე დალექვის ალბათობას.



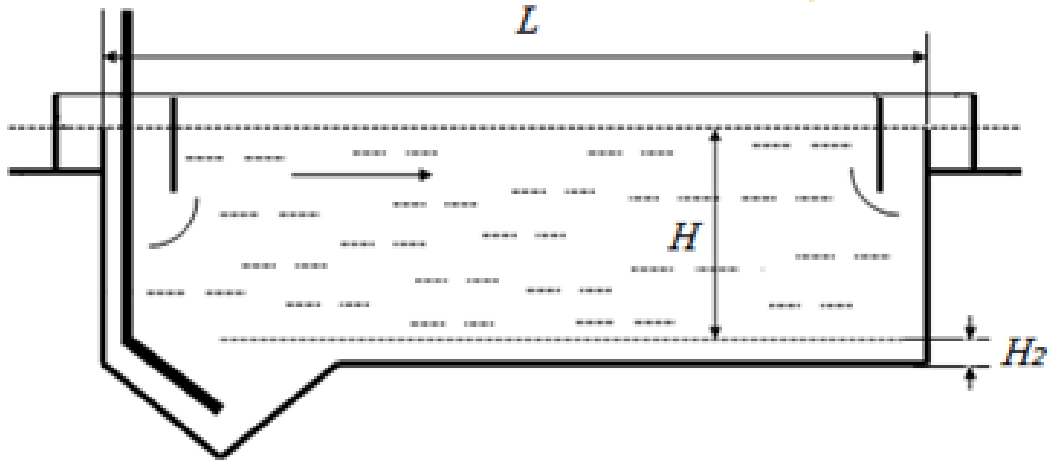
ნახ. 2.9. სალექრის სიგრძის გამოსათვლელი ნომოგრამა

დღესდღეობით პირველადი სალექრების ტექნოლოგიური გამოთვლის ყველაზე ფართოდ გავრცელებული მეთოდს წარმოადგენს სალექრების გაანგარიშება განზოგადოებული მეთოდით.

2.4.1. სალექრების გაანგარიშება განზოგადოებული მეთოდით

სალექრების განზოგადოებული მეთოდით გაანგარიშებისას პირველ რიგში ხდება სალექრის ზომების დადგენა, ხოლო შემდგომ ზუსტდება საანგარიშო სიდიდეები. ერთ-ერთ ძირითად სიდიდეს წარმოადგენს სალექრის გამდინარე ნაწილში წყლის საშუალო საანგარიშო სიჩქარე, რომელიც პირველ მიახლოებაში, რადიალური სალექრებისთვის (კვეთში

რადიუსის ნახევარზე) და ჰორიზონტალური სალექრებისთვის მიიღება $v = 5 \div 7$ მმ/წმ, მბრუნავი გამანაწილებელი მოწყობილობით და ვერტიკალური სალექრებისთვის $v = 0$.



ნახ.2.10. ჰორიზონტალური სალექარი.

H - სალექრის გამდინარე ნაწილის სიღრმე; H_2 - ნეიტრალური ზონის სიმაღლე

ჰორიზონტალური სალექრის სიგრძე განისაზღვრება ფორმულით:

$$L = \frac{v \cdot H}{K \cdot u_0}, \quad (2.4.21)$$

სადაც v არის სალექრის გამდინარე ნაწილში წყლის საშუალო საანგარიშო სიჩქარე, მმ/წმ;

u_0 – ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო, მმ/წმ.

H - სალექრის გამდინარე ნაწილის სიღრმე (ნეიტრალური ფენის საზღვრიდან წყლის დონემდე), მ.

K - კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია სალექრის ტიპზე და წყლის მიმწოდებელი და გამყვანი მოწყობილობების კონსტრუქციაზე, რომელიც მიიღება:

- ჰორიზონტალური სალექრებისთვის 0,5;
- რადიალურისთვის - 0,45;

- ვერტიკალურისთვის - 0,35;
- სალექრებისთვის მბრუნავი გამანაწილებელი მოწყობილობით - 0,85;

შეწონილი ნაწილაკების პირობითი ჰიდრავლიკური სისხო განისაზღვრება ფორმულით:

$$u_o = \frac{1000 \cdot K \cdot H}{a \cdot t \cdot \left(K \cdot \frac{H}{h}\right)^n} - w, \quad (2.4.22)$$

სადაც a არის კოეფიციენტი, რომელიც ითვალისწინებს წყლის ტემპერატურის გავლენას მის სიბლანტეზე (მიიღება ცხრილი N 2.2 - ით);

a კოეფიციენტის დამოკიდებულება მინიმალურ ჩამდინარე წყლების საშუალო-თვიურ ტემპერატურაზე

ცხრილი N 2.2

მინიმალური საშუალო-თვიური ტემპერატურა °C	60	50	40	30	25	20	15	10	5	0
a	0,45	0,55	0,66	0,8	0,9	1	1,14	1,3	1,5	1,8

t - ცილინდრში დალექვის ხანგრძლივობა, წყლის h სიმაღლისას, რომელიც შეესაბამება მოცემული დაწმენდის ეფექტს, წმ. განისაზღვრება ექსპერიმენტალურად, ან მიიღება მიახლოებული სიდიდე, ცხრილიდან N 2.3. ცხრილში ასახულია შეწონილი ნაწილაკების ძირითადი სახეობები, დალექვის ხანგრძლივობა წყლის ტემპერატურისთვის 20 °C. ცხრილი N 2.3-ის მეშვეობით, შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციისა და დაწმენდის ეფექტის შუალედური მნიშვნელობებისათვის, დალექვის ხანგრძლივობა განისაზღვრება ინტერპოლაციის გზით;

n - ემპირიული კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია

შეწონილი ნაწილაკების თვისებებზე, მიიღება ექსპერიმენტალურად. განისაზღვრება მდგარ წყალში დალექვისას, არა ნაკლებ 120 მმ დიამეტრის მქონე ჭურჭელში. კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო ჩამდინარე წყლებისთვის განისაზღვრება გრაფიკიდან, ნახ. 2.11.-ით;

მდგარ წყალში, ჩამდინარე წყლების დაწმენდის ეფექტის დამოკიდებულება დალექვის ხანგრძლივობაზე

ცხრილი N 2.3

დაწმენდის ეფექტი, %	500 მმ სიღრმის ცილინდრში დალექვის ხანგრძლივობა, შეწონილი ნაწილაკებისთვის:										
	კოაგულირებული (n = 0,25)				წვრილდისპერსული მინერალური, სიმკვრივით 2-3 გ/სმ ³ (n = 0,4)				სტრუქტურული, მძიმე, სიმკვრივით 5-6 გ/სმ ³ (n = 0,6)		
	კონცენტრაციისას, მგ/დმ ³										
	100	200	300	500	500	1000	2000	3000	200	300	400
20	600	300			150	140	100	40	-	-	-
30	900	540	320	260	180	150	120	50	-	-	-
40	1320	650	450	390	200	180	150	60	75	60	45
50	1900	900	640	450	240	200	180	80	120	90	60
60	3800	1200	970	680	280	240	200	100	180	120	75
70	-	3600	2600	1830	360	280	230	130	390	180	130
80	-	-	-	6260	1920	690	570	370	3000	580	380
90	-	-	-	-	-	-	1470	1080	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-	3600	1850	-	-	-

w - სალექარში წყლის მოძრაობის სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი (მიიღება ცხრილით N 2.4).

საღებარში წყლის მოძრაობის v სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელი - w

ცხრილი N 2.4

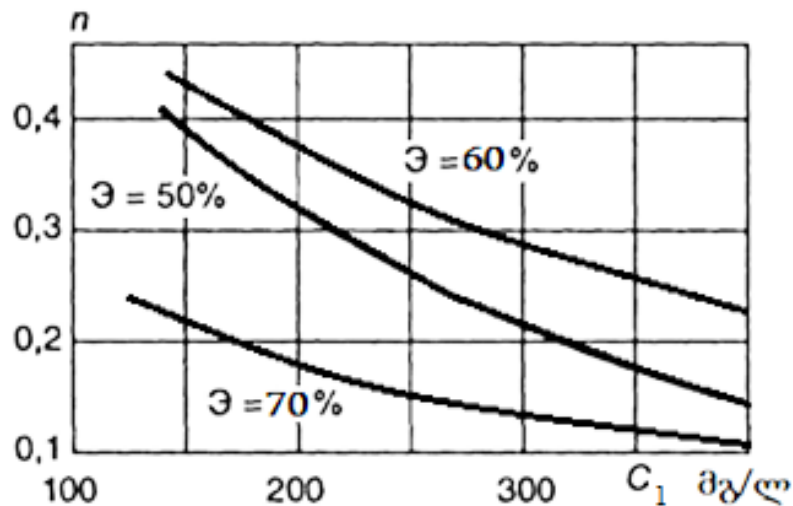
v , მმ/წმ	5	10	15	20
w , მმ/წმ	0	0,05	0,1	0,5

თუ ჩამდინარე წყლის ტემპერატურა საწარმოო პირობებში განსხვავდება ლაბორატორიული პირობების ტემპერატურისგან, ჰიდრავლიკური სისხოს (მმ/წმ) გაანგარიშებისას საჭიროა შესწორების შეტანა:

$$u'_0 = \frac{\mu_{\text{ლაბ}} u_0}{\mu_{\text{საწ}}}, \quad (2.4.23.)$$

სადაც $\mu_{\text{ლაბ}}$ არის ჩამდინარე წყლის დინამიკური სიბლანტე ლაბორატორიულ პირობებში, გ/(სმ·წმ).

$\mu_{\text{საწ}}$ - ჩამდინარე წყლის დინამიკური სიბლანტე საწარმოო პირობებში, გ/(სმ·წმ).



ნახ. 2.11. კომუნალურ-საყოფაცხოვრებო ჩამდინარე წყლებში n - ხარისხის მაჩვენებლის დამოკიდებულების გრაფიკი შეწონილი ნაწილაკების საწყის კონცენტრაციაზე

ჰორიზონტალური და რადიალური სალექრების სიგრძის (L) და რადიუსის (R) დადგენის შემდეგ ზუსტდება v - ს მნიშვნელობა:

$$v = \frac{Q}{3,6HB}, \quad (2.4.24.)$$

სადაც B არის სალექრის სიგანე, მ (მიიღება 2 - 5 H);

$(KH/h)^n$ -ის მდგენელის მნიშვნელობები

ცხრილი N 2.5

სალექრის სიმაღლე h	სალექრის $(KH/h)^n$			
	ვერტიკალური	რადიალური	ჰორიზონტალური	მბრუნავი გამანაწილებელი მოწყობილობით
1	-	-	-	1,14
1,5	-	1,08	1,11	1,27
2	1,11	1,16	1,19	-
3	1,21	1,29	1,32	-
4	1,29	1,38	1,41	-
5	-	1,46	1,5	-

რადიალური სალექრებისთვის v მიიღება კვეთში, რადიუსის ნახევარზე:

$$v = \frac{Q}{3,6\pi RH}. \quad (2.4.25.)$$

თუ დაზუსტებული მნიშვნელობა დიდად განსხვავდება სიჩქარის ვერტიკალური მდგენელის მიღებული მნიშვნელობისაგან, ხდება L და R სიდიდეების ხელმეორედ გამოთვლა, v -ს მიღებული მნიშვნელობის გათვალისწინებით.

სალექრის წარმადობის q ($მ^3/სთ$) გაანგარიშება ხდება სალექრის გეომეტრიული ზომებიდან და საჭირო დაწმენდის ეფექტიდან გამომდინარე:

- ჰორიზონტალური სალექრებისთვის:

$$q = 3,6KLB(u_0 - w), \quad (2.4.26.)$$

- რადიალური, ვერტიკალური და მბრუნავი შემკრებ-გამანაწილებელი მოწყობილობით სალექრის წარმადობა:

$$q = 2,8K(D - d_{შეშ}) (u_0 - w), \quad (2.4.27)$$

სადაც D_{set} არის სალექრის დიამეტრი;

$d_{შეშ}$ - შემშვები მოწყობილობის დიამეტრი.

- დაღმავალ-აღმავალი დინების სალექრების წარმადობა:

$$Q = 1,41KD^2 \cdot u_0; \quad (2.4.28.)$$

- სალექრებისთვის თხელფენოვანი ბლოკებით მუშაობის ჯვარედინი სქემით:

$$q = \frac{7,2KH_{ბ}L_{ბ}u_0}{K_{ბ}h_{ბ}}, \quad (2.4.29.)$$

სადაც $H_{ბ}$ არის თხელფენოვანი ბლოკის სიმაღლე (მ);

$L_{ბ}$ - თხელფენოვანი ბლოკის სიგრძე (მ);

$K_{ბ}$ - გამოყოფილი ნაწილაკების მოშლის კოეფიციენტი, ბრტყელი ფირფიტებისთვის მიიღება 1,2-ის, ხოლო დარული ფირფიტებისთვის 1-ის ტოლი;

$h_{ბ}$ - თხელფენოვანი ბლოკის იარუსის სიმაღლე (მ);

- სალექრებისთვის თხელფენოვანი ბლოკებით მუშაობის უკუდენითი სქემით[73]:

$$q = 3,6KH_{ბ} B_{ბ} v. \quad (2.4.30.)$$

პირველადი სალექრებიდან მოსაშორებელი ლამის მოცულობა განისაზღვრება ჩამდინარე წყლების დალექვის ეფექტის შესაბამისად. სალამე კამერის მოცულობა მიიღება არა უმეტეს 2 დღ.დ-ში დაგროვილი ნალექის მოცულობისა.

ზოგიერთ შემთხვევაში, შეწონილი ნაწილაკების დალექვის კინეტიკის

მახასიათებელი მონაცემების არქონის შემთხვევაში, სალექრები შეიძლება გაითვალისწინოს ჩამდინარე წყლის დატვირთვით სალექრის სარკის ფართობზე, ან მოძრაობის სიჩქარისა და დალექვის ხანგრძლივობის მიხედვით [74].

სხვა სახის ჩამდინარე წყლებისთვის მონაცემები მიიღება ანალოგიური შემადგენლობის სალექრების ექსპლუატაციის მონაცემებით.

ლაბორატორიული ტესტირება გამართლებულია თუ ხდება არსებული სალექრების შეფასება და გამწმენდი სადგურის გაფართოება და მოდერნიზაცია. ტესტების ჩატარება სირთულეს წარმოადგენს ახალი პროექტების შექმნისას, რადგან საკმაოდ რთულია ჩამდინარე წყლების კოაგულაციის და ფლოკულაციის პროცესში ნაწილაკების კონცენტრაციის ამოცნობა.

დღესდღეობით, სალექრების არაეფექტური ფუნქციონირება, ხშირ შემთხვევაში დაკავშირებულია მათი გაანგარიშებისას, შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს განსაზღვრის უზუსტობით. ჰიდრავლიკური სისხოს გამოთვლის არასრულყოფილების გამო, შეწონილი ნაწილაკები ან ვერ ასწრებენ სალექრის ძირზე დალექვას და მიყვებიან გაყვანილ წყალს, ან სალექრის ზომები ბევრად აღემატება ოპტიმალურს, რაც საგრძნობლად ზრდის მათ ღირებულებას.

2.5. სალექრების მოდელირება და ოპტიმალური პარამეტრების შერჩევა და ანალიზი

სალექრების თეორიული კვლევებისთვის იყენებენ რამოდენიმე ტიპის მოდელს [75]:

- ემპირიულ და სტატისტიკურ;
- ბალანსის ან ნულგანზომილებიან;
- ერთგანზომილებიან კინემატიკურ;
- CFD მოდელებს (*Computational Fluid Dynamics Models* - გამოთვლითი ჰიდროდინამიკის მოდელები);

- პოტენციალური დინებების მოდელები.

ემპირიული და სტატისტიკური მოდელების აგება ხდება მარტივი განტოლებებით (ალგებრული დამოკიდებულებებით), რომელთა მეშვეობით განისაზღვრება საძიებო სიდიდე.

ემპირიული და სტატისტიკური მოდელები ეფუძნება ექსპერიმენტულ მონაცემებს, ამიტომ მათი გამოყენება შეზღუდულია ექსპერიმენტის დროს შექმნილი პირობებით.

ემპირიული და სტატისტიკური მოდელების სუსტი მხარეებია:

- ისინი არ ითვალისწინებენ სალექრის ფორმას, მასში არსებულ ჰიდრავლიკურ პირობებს და დიფუზიას;
- დაკავშირებული არიან კონკრეტულ ობიექტთან, რომლისთვისაც ტარდებოდა კვლევა.

სალექრებში მიმდინარე პროცესების მოდელირება ემპირიული და სტატისტიკური მეთოდებით წარმოებს რიგი ფიზიკური პროცესების გათვალისწინების გარეშე, ამიტომ მათ “Black Box” (შავი ყუთის) მოდელებს უწოდებენ [76].

უკანასკნელი 10 წლის განმავლობაში ევროკავშირის ქვეყნებში, სალექრების პროექტირებისას ამ კლასის მოდელებს ნაკლებად იყენებენ.

ბალანსის ან ნულგანზომილებიანი (0D) მოდელები გამოისახება ან ალგებრული დამოკიდებულებებით, ან დიფერენციალური განტოლებებით.

ბალანსის ან ნულგანზომილებიანი მოდელი არ ითვალისწინებს:

- სალექრის ფორმას;
- სალექარში ჩამდინარე წყლის მიწოდების და მისგან დაწმენდილი წყლის გადინების ადგილებს;
- სალექარში ნაკადის მოძრაობის სიჩქარეს და მის ცვლილებას;
- დიფუზიას.

ევროპის ქვეყნებში ეს მოდელი გამოიყენება პროექტირების საწყის ეტაპზე სალექრის სავარაუდო ზომების დასადგენად.

ერთგანზომილებიანი კინემატიკური (1D) მოდელები ეფუძნება

საღებარში დამაბინძურებლის გადაადგილების განტოლების (მასაგადაცემის განტოლების) ამოხსნას. ამ მოდელში ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე ითვლება მუდმივ სიდიდედ. სასაზღვრო ამოცანის ამოხსნა ხდება ანალიტიკურად ან რიცხვობრივად. საღებრის მოცულობას ყოფენ საანგარიშო ფენებად და ყოველ ფენაში ახდენენ დამაბინძურებლის გადაადგილების განტოლების ინტეგრირებას. ყველაზე ხშირად გამოთვლებისას იყენებენ 10-11 ფენას, თუმცა მათი რაოდენობა შეიძლება შეადგენდეს 6-დან 400 ფენამდე.

ერთგანზომილებიანი კინემატიკური მოდელი არ ითვალისწინებს:

- საღებარში ნაკადის არათანაბარ სიჩქარეს;
- საღებრის ფორმას და მის შიგნით კონსტრუქციურ თავისებურებებს;
- ერთგანზომილებიანი მოდელებში ითვლება, რომ საღებრის ნებისმიერ

ჰორიზონტალურ კვეთში დამაბინძურებლის კონცენტრაცია ერთგვაროვანია.

ერთგანზომილებიანი მეთოდი ფართოდ გამოიყენება საღებრების გაანგარიშებისას, მაგრამ აღსანიშნავია, რომ იგი არ გამოდგება საღებრებისთვის, რომელთაც გააჩნიათ ტიხრები, დეფლექტორები, წყალსაშვები და სხვა მსგავსი მოწყობილობები, რადგან მათში, ნებისმიერ ჰორიზონტალურ სიბრტყეში დამაბინძურებლების კონცენტრაციები არსებითად განსხვავებულია.

CFD - გამოთვლითი ჰიდროდინამიკის მოდელებში საღებრის გამოთვლა წარმოებს ორ ეტაპად:

1. ჰიდროდინამიკური ამოცანის ამოხსნა, რომელიც მიზნად ისახავს საღებარში სიჩქარის ველის განსაზღვრას;
2. მასაგადაცემის ამოცანის ამოხსნა, გულისხმობს საღებარში დამაბინძურებლის გადაადგილების დადგენას.

ჰიდროდინამიკური ამოცანის ამოსახსნელად გამოიყენება როგორც ბლანტი სითხის მოდელი (ნავიე-სტოქსის განტოლება), ასევე არაბლანტი უკუმშველი სითხის მოდელი (პოტენციალური დინების მოდელი).

რადგან CFD მოდელები ეყრდნობა მექანიკის ფუნდამენტალურ კანონებს და პროცესების მოდელირება ხდება ფიზიკური პროცესების მაქსიმალური გათვალისწინებით, მათ “Glass Box” (მინის ყუთის) მოდელებს უწოდებენ [75, 76, 77].

CFD მოდელის სუსტ მხარეს წარმოადგენს კომპიუტერული დროის და რესურსის დიდი ხარჯი, რაც აფერხებს მის დანერგვას საინჟინრო პრაქტიკაში. გარდა ამისა ბლანტი სითხის მოდელის გამოყენებისას საჭიროა გაკეთდეს ტურბულენტური რეჟიმის მოდელის შერჩევის დასაბუთება.

დღესდღეობით არ შექმნილა ტურბულენტური რეჟიმის უნივერსალური მოდელი: ზოგიერთი მოდელი იძლევა უკეთეს შედეგს თავისუფალი ნაკადებისთვის, ზოგიერთი - სალექრის კედლების სიახლოვეში დინებებისთვის და ა.შ.

ბლანტი დინებების CFD მოდელების გამოყენების ალტერნატიულ მიდგომას წარმოადგენს იდეალური სითხეების, კერძოდ *პოტენციალური დინებების მოდელების* გამოყენება. ეს მოდელები იძლევა საშუალებას ამოიხსნას წყლის დინების ჰიდროდინამიკის მრავალი ამოცანა.

დღესდღეობით, მათემატიკურ მოდელირებასთან ერთად კომპიუტერული ტექნიკის გამოყენება, საშუალებას იძლევა შეიქმნას დალექვის ისეთი მათემატიკური მოდელი, რომელიც აღწერს ნაწილაკის მოძრაობის კანონებს დალექვის ნებისმიერ რეჟიმში.

III თავი

ჩამდინარე წყლების დისპერსიული ფაზის სედიმენტაციის კვლევა

3.1. დისპერსიული ფაზის ნაწილაკების გრავიტაციული დალექვის კვლევა

დისპერსიულ სისტემებში მიმდინარე პროცესების ანალიზის გამარტივების მიზნით მოსახერხებელია არა ჰეტეროგენული (მრავალფაზიანი), არამედ ორფაზიანი სისტემების კვლევა, რომელშიც ერთი ფაზა წარმოადგენს უწყვეტ დისპერსიულ გარემოს, ხოლო მეორე - დისპერსიულ ფაზას, ამ გარემოში განაწილებულ ნაწილაკებს.

პრაქტიკული ამოცანების ამოხსნისას, როგორც წესი, განიხილავენ არა ცალკეული ნაწილაკს, არამედ დისპერსიული ნაწილაკების ერთობლიობას (ღრუბელს), რომელიც შეიცავს ათასობით ცალკეულ ნაწილაკს. მაგრამ მცირე კონცენტრაციის შემთხვევაში, ყოველი ცალკეული ნაწილაკის მოძრაობა არ არის დამოკიდებული მეზობელ ნაწილაკებზე. ამიტომ, თუ მოხდა ცალკეული ნაწილაკის ტრაექტორიისა და სჩქარის დადგენა, შესაძლებელი ხდება მთელი დისპერსიული სისტემის ქცევის პროგნოზირება. ამ მიდგომის გამოყენების აუცილებელ პირობას წარმოადგენს მოცულობითი კონცენტრაციის დაბალი მნიშვნელობა.

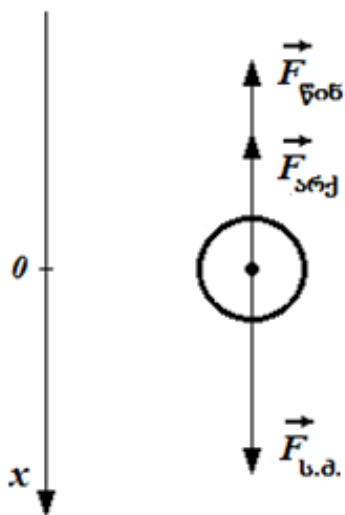
ნაწილაკების დალექვის კანონზომიერების კვლევისათვის განიხილავენ სფეროსებრი ფორმის ნაწილაკებს. თუ ნაწილაკის ფორმა არ არის სფეროსებრი, განიხილება მისი ეკვივალენტური დიამეტრი ($d_{გვ}$), რომელიც მოცემული ნაწილაკის მოცულობის ($V_{გ}$) მქონე სფეროს დიამეტრის

$$\text{ტოლია: } d_{გვ} = \sqrt[3]{\frac{6V_{გ}}{\pi}}.$$

თავისუფალი დალექვის იდეალურ მაგალითს წარმოადგენს ერთი ნაწილაკის მოძრაობა სითხეში, რომელიც ჩასხმულია უსასრულოდ დიდი მოცულობის ჭურჭელში. უნდა ითქვას, რომ თავისუფალი სედიმენტაციის

კანონები, მცირე დაზუსტებებით, სრულდება დისპერსულ სისტემებშიც.

განვიხილოთ დისპერსიული ფაზის სფეროსებრი, მცირე ზომის ნაწილაკის გრავიტაციული დალექვა სტოქსის რეჟიმში ($Re < 1$). მოვახდინოთ ნაწილაკზე მოქმედი ძალების პროექცირება ღერძზე, რომელიც მიმართულია ვერტიკალურად ქვემოთ (ნახ.3.1.).



ნახ. 3.1. სითხეში თავისუფალი დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედი ძალები

ნაწილაკზე მოქმედებს შემდეგი ძალები:

- სიმძიმის ძალა:

$$F_{ს.ა.} = mg, \quad (3.1.1.)$$

სადაც m არის ნაწილაკის მასა, კგ;

g - თავისუფალი ვარდნის აჩქარება, მ/წმ²;

- არქიმედეს ძალა:

$$F_{არქ} = -\rho_b \cdot V_b \cdot g = -m \frac{\rho_b}{\rho_b} g, \quad (3.1.2.)$$

სადაც ρ_b არის ნაწილაკის სიმკვრივე, კგ/მ³;

V_b - ნაწილაკის მოცულობა, მ³.

- წინააღმდეგობის ძალა:

$$F_{\text{წინ}} = -c_d \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_b u^2}{2}. \quad (3.1.3.)$$

ზემოაღნიშნული ძალების გათვალისწინებით, სფეროსებრი ნაწილაკის გრავიტაციული დაღეჟვის განტოლება იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{du}{dt} = \frac{F_{\text{ს.ძ.}} - F_{\text{არქ}} - F_{\text{წინ}}}{m}, \quad (3.1.4.)$$

სტოქსის რეჟიმში წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდის ($c_d = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24\mu}{\rho_b u d}$) და იმის გათვალისწინებით, რომ ნაწილაკის მასა $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_b$ განტოლება (3.1.4.) გამოისახება როგორც:

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\rho_b - \rho_b}{\rho_b} - \frac{18\mu}{\rho_b d^2} u. \quad (3.1.5.)$$

სტაციონარულ რეჟიმში, როდესაც $\frac{du}{dt} = 0$, ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო განისაზღვრება სტოქსის ფორმულით (2.2.6.):

$$u = \frac{(\rho_b - \rho_b) d^2}{18\mu} g.$$

გამოვსახოთ განტოლება (3.1.4.) ფარდობითი სიდიდებით.

დროის მასშტაბად შევარჩიოთ სიდიდე, რომელსაც გააჩნია დროის განზომილება t_* :

$$t_* = \frac{\rho_b d^2}{18\mu}. \quad (3.1.6.)$$

სიჩქარის მასშტაბად შევარჩიოთ u_* :

$$u_* = \frac{(\rho_b - \rho_b) d^2}{18\mu} g. \quad (3.1.7.)$$

შემოვიტანოთ აღნიშვნა:

$$y = \frac{u}{u_*}, \quad (3.1.8.)$$

$$\tau = \frac{t}{t_*}. \quad (3.1.9.)$$

საბოლოო ჯამში ვღებულობთ უგანზომილებო დიფერენციალურ განტოლებას შემდეგი სახით:

$$\frac{dy}{d\tau} = 1 - y. \quad (3.1.10.)$$

საწყისი პირობებიდან გამომდინარე ($\tau = 0$; $y = 0$) დიფერენციალური განტოლების (3.1.10) ამოხსნას აქვს შემდეგი სახე:

$$y = 1 - \exp(-\tau) = 1 - e^{-\tau}. \quad (3.1.11.)$$

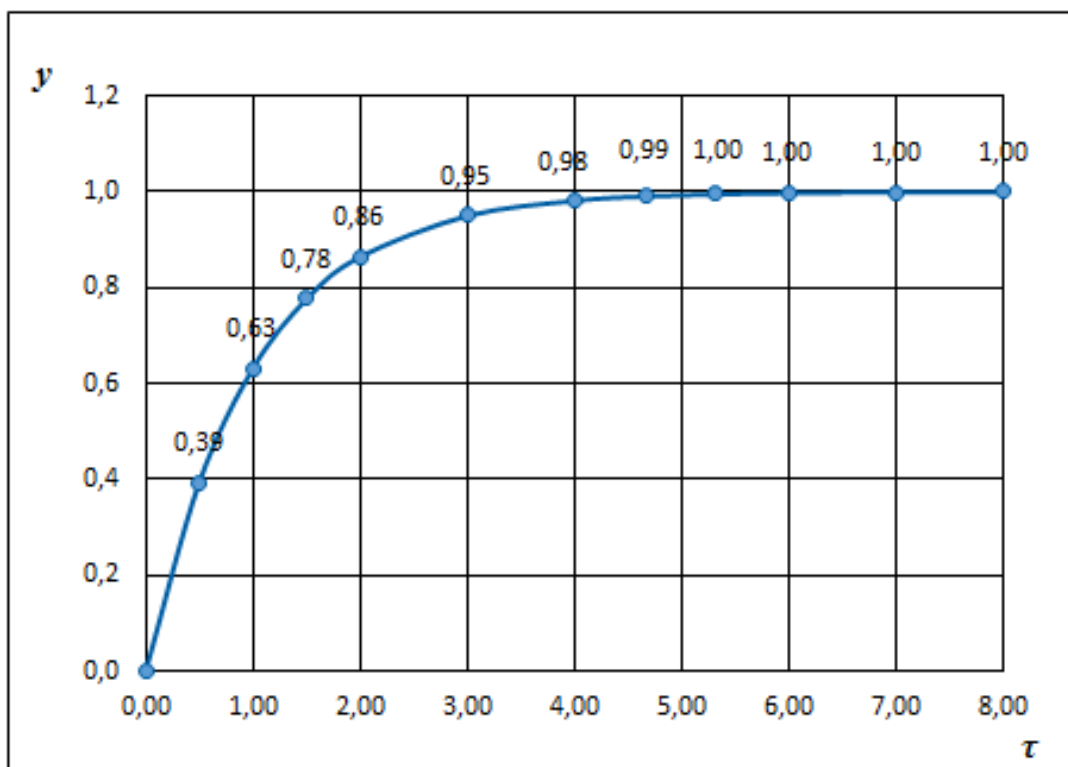
დავადგინოთ ნაწილაკის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების ფარდობითი სიდიდეების რიცხითი მნიშვნელობები (ცხრილი 3.1.) და ავაგოთ გრაფიკი (ნახ.3.2.).

შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხოს დროზე დამოკიდებულება

ცხრილი 3.1.

τ	0	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00	4,00	4,66	5,30	6,00	7,00	8,00
y	0	0,39	0,63	0,78	0,86	0,95	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00

გრაფიკიდან ჩანს, რომ დალექვისას ნაწილაკი დროის გარკვეულ მომენტამდე მოძრაობს აჩქარებულ რეჟიმში, ხოლო შემდგომ მისი სიჩქარე ხდება მუდმივი. შეწონილი ნაწილაკის მუდმივი სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით (2.2.6.).



ნახ. 3.2. ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხოს დამოკიდებულება დალექვის ხანგრძლივობაზე.

განტოლებების (3.1.8 და 3.1.9) გათვალისწინებით განტოლება (3.1.11.) იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{u}{u_*} = 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_*}\right). \quad (3.1.12.)$$

შესაბამისად,

$$u = u_* \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_*}\right)\right]. \quad (3.1.13.)$$

u_* და t_* -ის მნიშვნელობების გათვალისწინებით, აჩქარებული მოძრაობისას ჰიდრაულიკური სისხოს განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$u(t) = \frac{d^2 g(\rho_5 - \rho_6)}{18\mu} \left[1 - \exp\left(-\frac{18\mu}{\rho_5 d^2} t\right)\right]. \quad (3.1.14.)$$

როდესაც გამოსახულება $1 - \exp\left(-\frac{18\mu}{\rho_5 d^2} t\right)$ უახლოვდება ერთს,

ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობა გადადის სტაციონარულში.

ფარდობითი სიდიდეების შემთხვევაში აჩქარებული მოძრაობა აღწევს ზღვრულ მნიშვნელობას როდესაც $1 - \exp(-\tau)$ უახლოვდება 1-ს. ნახ.3.1-ზე გამოსახულ გრაფიკზე ჩანს, რომ როდესაც $\tau \approx 4.66$, სიდიდე $1 - \exp(-\tau)$ ხდება მიახლოებით ერთის ტოლი, დალექვის სიჩქარის გადახრა სტაციონარული სიჩქარისგან არ აღემატება 1 %-ს. აქედან გამომდინარეობს, რომ აჩქარებული მოძრაობის გადასვლა სტაციონარულ რეჟიმში ხდება როდესაც:

$$\tau = \frac{t}{t_*} = 4,66. \quad (3.1.15.)$$

t_* - ის მნიშვნელობის გათვალისწინებით, განტოლებიდან (3.1.15.) ვღებულობთ, რომ დრო, რომელიც დასჭირდება ნაწილაკს მოძრაობის სტაციონარულ რეჟიმში გადასასვლელად შეადგენს:

$$t = 4,66 \frac{\rho_b d^2}{18\mu}. \quad (3.1.16.)$$

განტოლებიდან (3.1.16.) გამომდინარეობს, რომ ნაწილაკის არასტაციონარულ რეჟიმში მოძრაობის ხანგრძლივობა დამოკიდებულია ნაწილაკის სიმკვრივესა და ზომაზე (დიამეტრზე) და დისპერსიული გარემოს (სითხის) დინამიკურ სიბლანტეზე.

მიღებული დამოკიდებულებები (3.1.14.) და (3.1.16.) საშუალებას ძლევს დავადგინოთ სტოქსის რეჟიმში მოძრავი მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო და განვსაზღვროთ თუ რა დროის შემდეგ იწყებს ნაწილაკი მოძრაობას სტაციონარულ რეჟიმში მუდმივი სიჩქარით.

იმისათვის, რომ განვსაზღვროთ ნაწილაკის სიჩქარის დამოკიდებულება მის მიერ გავლილ მანძილზე (დალექვის სიღრმეზე), შემოვიღოთ მანძილის მასშტაბი:

$$h_* = u_* t_* = g\rho_b (\rho_b - \rho_s) \left(\frac{d^2}{18\mu} \right)^2. \quad (3.1.17.)$$

შემოვიღოთ ფარდობითი სიდიდე:

$$\xi = \frac{h}{h_*}, \quad (3.1.18.)$$

რადგან:

$$dt = \frac{dh}{u},$$

შესაბამისად:

$$dt = \frac{d\xi h_*}{u}. \quad (3.1.19.)$$

განტოლებების (3.1.16 და 3.1.17) გათვალისწინებით განტოლება (3.1.19) იღებს სახეს:

$$dt = \frac{d\xi t_* u_*}{u}. \quad (3.1.20.)$$

რადგან $u = y \cdot u_*$ და განტოლება (3.1.20.)-ის გათვალისწინებით განტოლება (3.1.5.) იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{dy}{d\xi} \cdot \frac{u_*}{t_*} \cdot \frac{u}{u_*} = g \frac{\rho_\delta - \rho_\beta}{\rho_\delta} - \frac{18\mu}{\rho_\delta d^2} u. \quad (3.1.21.)$$

u_* , t_* და y მნიშვნელობების გათვალისწინებით და განტოლებაში (3.1.21.) ტოლობის ორივე მხარის $\frac{t_*}{u_*}$ - ზე გავამრავლებით, ვღებულობთ შემდეგი სახის დამოკიდებულებას:

$$y \frac{dy}{d\xi} = 1 - y. \quad (3.1.22.)$$

ზღვრული პირობების დროს $\xi = 0$; $y = 0$ დიფერენციალურ განტოლება (3.1.22.)- ის ამოხსნას წარმოადგენს:

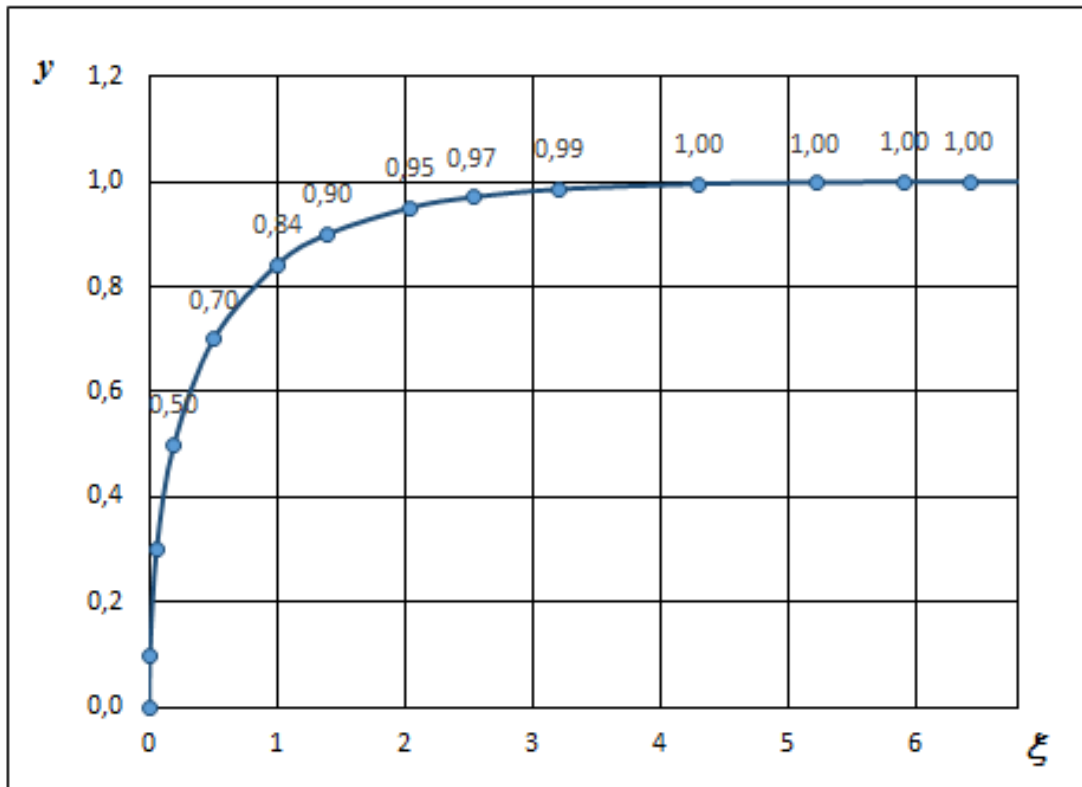
$$\xi = -[y + \ln(1 - y)]. \quad (3.1.23.)$$

გამოვთვალოთ ნაწილაკის მიერ განვლილი მანძილის დალექვის სიჩქარეზე დამოკიდებულების რიცხვითი მნიშვნელობები (ცხრილი 3.2.) და ავაგოთ გრაფიკი (ნახ.3.3.).

შეწონილი ნაწილაკის მიერ განვლილი მანძილის ჰიდრავლიკურ სისხოზე დამოკიდებულება

ცხრილი 3.2.

ξ	0	0,06	0,19	0,50	1,00	1,40	2,05	2,54	3,21	4,30	5,22	5,91	6,42
y	0	0,30	0,50	0,70	0,84	0,90	0,95	0,97	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00



ნახ.3.3. ნაწილაკის მიერ გავლილი მანძილის დამოკიდებულება ჰიდრავლიკურ სისხოზე

გრაფიკზე ჩანს, რომ როდესაც $\xi \approx 3.21$, ნაწილაკის სიჩქარის გადახრა სტაციონარული სიჩქარისგან 1 %-ზე ნაკლებია. აქედან გამომდინარეობს, რომ ნაწილაკის მოძრაობის გადასვლა სტაციონარულ რეჟიმში ხდება როდესაც:

$$\xi = \frac{h}{h_*} = 3,21. \quad (3.1.24.)$$

განტოლება (3.1.17.)-ის გათვალისწინებით, განტოლება (3.1.24)-დან გამომდინარეობს, რომ მანძილი, რომელსაც გაივლის ნაწილაკი მოძრაობის

სტაციონარულ რეჟიმში გადასვლამდე შეადგენს:

$$h = 3,21g\rho_{\delta}(\rho_{\delta} - \rho_{\nu})\left(\frac{d^2}{18\mu}\right)^2. \quad (3.1.25.)$$

იმის დასადგენად, თუ რამდენად მართებულია მიღებული დამოკიდებულებები შეგვიძლია გამოვიანგარიშოთ სტაციონარულ რეჟიმში გადასვლამდე ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობისას მისი საშუალო სიჩქარე ($\bar{u}'_{\nu\beta}$):

$$\bar{u}'_{\nu\beta} = \frac{h}{t} = \frac{3,21g\rho_{\delta}(\rho_{\delta} - \rho_{\nu})\left(\frac{d^2}{18\mu}\right)^2}{4,66\frac{\rho_{\delta}d^2}{18\mu}} = 0,69\frac{(\rho_{\delta} - \rho_{\nu})d^2}{18\mu} \text{ გ.} \quad (3.1.26.)$$

ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობისას საშუალო სიჩქარის გაანგარიშება აგრეთვე შეიძლება დამოკიდებულებიდან:

$$\bar{u}_{\nu\beta} = \frac{u_{\nu\beta}}{2}, \quad (3.1.27.)$$

სადაც $u_{\nu\beta}$ არის სტაციონარულ რეჟიმში ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო.

განტოლება (2.2.6.)-ის გათვალისწინებით განტოლება (3.1.27) გამოისახება როგორც:

$$\bar{u}_{\nu\beta} = 0,5\frac{(\rho_{\delta} - \rho_{\nu})d^2}{18\mu} \text{ გ.} \quad (3.1.28.)$$

განტოლება (3.1.26)-სა და (3.1.28)-ს შორის განსხვავება გამოწვეულია ძალებით, რომლებიც არ იყო გათვალისწინებული გამოთვლებში, მათი სიმცირის გამო. ნაწილაკის არასტაციონარული მოძრაობის კანონების უფრო ზუსტი განასაზღვრისთვის მხედველობაში უნდა მივიღოთ ნაწილაკზე მოქმედი დამატებითი ძალები [78, 79]:

- დამატებითი წინააღმდეგობის ძალა, რომელიც დაკავშირებულია ნაწილაკის მიერ გამოძევებული სითხის აჩქარებასთან (ვირტუალური, ან დამატებითი მასის ძალა);
- ძალა, რომელიც გამოწვეულია მოძრაობის წინაპირობით (ბასეს ძალა).

იგი წარმოიქმნება ნაწილაკის გარშემო სასაზღვრო შრის ჩამოყალიბების არასტაციონარული პროცესებით.

ამგვარად, ჩატარებული კვლევის შედეგად მიღებულ იქნა დამოკიდებულებები, რომლებიც საშუალებას იძლევა დამაკმაყოფილებელი სიზუსტით დავადგინოთ სტოქსის რეჟიმში ლამინარული გარსშემოდენისას:

- მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო, როგორც აჩქარებული ისე სტაციონარული მოძრაობისას;
- რა დროის შემდეგ იწყებს ნაწილაკი მოძრაობას სტაციონარულ რეჟიმში მუდმივი სიჩქარით;
- სტაციონარულ რეჟიმში გადასვლამდე ნაწილაკის მიერ გავლილი მანძილი.

3.2. ორფაზიან ნაკადში შეწონილი ნაწილაკების რელაქსაციის

სიჩქარის კვლევა

სითხის ნაკადში მყარი შეწონილი ნაწილაკების ჰორიზონტალურად გადაადგილებისას მათი სიჩქარე შეიძლება განსხვავდებოდეს ნაკადის მოძრაობის სიჩქარისგან. ნაწილაკის სიჩქარის ცვლილება შესაძლოა გამოიწვევოს იყოს ჰიდროდინამიკური ნაგებობის ზედაპირებთან ან კონსტრუქციულ ელემენტებთან შეჯახებით, ნაკადში არსებული ტურბულენტური პულსაციებით, სისტემაში რაიმე ნივთიერების (მაგალითად ფლოკულანტის ან კოაგულანტის) დამატებით ან ნაწილაკების ურთიერთ შეჯახებით. იმ შემთხვევაში, როდესაც ნაწილაკის ჰორიზონტალური სიჩქარე მეტია ნაკადის სიჩქარეზე, ნაწილაკის სიჩქარე იწყებს კლებას ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე და პირიქით, თუ ნაწილაკის სიჩქარე ნაკადის სიჩქარეზე ნაკლებია – ნაწილაკის სიჩქარე იზრდება [80, 81, 82, 83].

დრო, რომელიც ეხარჯება ნაწილაკს ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე წარმოადგენს ნაწილაკის დინამიკური რელაქსაციის დროს, რომელიც

სტოქსის რეჟიმში განისაზღვრება გამოსახულებით [84, 85]:

$$\tau = \frac{\rho_{\text{ფ}} d_{\text{ფ}}^2}{18\mu}, \quad (3.2.1.)$$

სადაც τ არის ნაწილაკის დინამიკური რელაქსაციის დრო;

$\rho_{\text{ფ}}$ - შეწონილი ნაწილაკის სიმკვრივე;

$d_{\text{ფ}}$ - შეწონილი ნაწილაკის დიამეტრი;

μ - სითხის დინამიკური სიბლანტე.

შეწონილი ნაწილაკების ჰორიზონტალური გადაადგილების კვლევისას, მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარის დასაზუსტებლად, მყარი ნაწილაკისა და სითხის მოძრაობის სიჩქრეთა სხვაობის გათვალისწინება.

შეწონილი ნაწილაკების რელაქსაციის სიჩქარის დასადგენად განვიხილოთ სითხის ნაკადის სტაციონარული, ერთგანზომილებიანი მოძრაობა ჰორიზონტალური Ox ღერძის გასწვრივ. ნაკადში სიჩქარეთა განაწილება მოცემულია ფუნქციით $u(x)$.

ნიუტონის მეორე კანონზე დაყრდნობით გამოვსახოთ დისპერსიული სისტემის მყარი შეწონილი ნაწილაკის ვექტორული განტოლება:

$$m \frac{d\vec{u}_{\text{ფ}}}{dt} = \sum \vec{F}_i, \quad (3.2.2.)$$

სადაც m არის შეწონილი ნაწილაკის მასა, $m = \frac{\pi d_{\text{ფ}}^3}{6} \rho_{\text{ფ}}$

$\vec{u}_{\text{ფ}}$ - შეწონილი ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარის ვექტორი;

\vec{F}_i - ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ვექტორები.

დავუშვათ, რომ ნაწილაკზე გავლენას ახდენს მხოლოდ წინააღმდეგობის ძალა და სხვა ძალები გაწონასწორებულია. ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალის სიდიდე გამოითვლება განტოლებით:

$$F_{\text{წობ}} = c_d \cdot S \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} |\vec{u}_{\text{ს}} - \vec{u}_{\text{ფ}}|}{2} (\vec{u}_{\text{ს}} - \vec{u}_{\text{ფ}}). \quad (3.2.3.)$$

სადაც c_d არის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;

S - სხეულის მიდელის ფართობი (ნაწილაკის პროექცია სიბრტყეზე, რომელიც სხეულის მოძრაობის მიმართულების პერპენდიკულარულია) $S = \frac{\pi d^2}{4}$;

ρ_b - სითხის სიმკვრივე;

\vec{u}_b - ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე;

$\vec{u}_b - \vec{u}_\delta$ - სითხის და ნაწილაკის სიჩქარეების დამოკიდებულების ვექტორი.

განტოლება (3.2.2)-ის გათვალისწინებით, ნაწილაკის მოძრაობის განტოლება (3.2.2.) იღებს სახეს:

$$\frac{\pi d_\delta^3}{6} \rho_b \frac{d\vec{u}_\delta}{dt} = c_d \cdot \frac{\pi d_\delta^2}{4} \cdot \frac{\rho_b |\vec{u}_b - \vec{u}_\delta|}{2} (\vec{u}_b - \vec{u}_\delta). \quad (3.2.4.)$$

ანალიტიკური მეთოდით განტოლება (3.2.4.)-ის ამოხსნის მიღება შესალებელია სითხის ნაკადის მოძრაობის მუდმივი სიჩქარის პირობებში ($u_b = const$).

სტოქსის რეჟიმში, ნაკადის ლამინარული მოძრაობისას, რეინოლდსის რიცხვი გამოისახება დამოკიდებულებით:

$$Re = \frac{\rho_b |\vec{u}_b - \vec{u}_\delta| d_\delta}{\mu} < 1, \quad (3.2.5.)$$

სტოქსის რეჟიმში წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდე განისაზღვრება დამოკიდებულებით:

$$c_d = \frac{24}{Re} = \frac{24\mu}{\rho_b |\vec{u}_b - \vec{u}_\delta| d_\delta}. \quad (3.2.6.)$$

განტოლება (3.2.6.)-ის გათვალისწინებით, მოძრაობის განტოლება (3.2.4.) იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{\pi d_\delta^3}{6} \rho_b \frac{d\vec{u}_\delta}{dt} = \frac{24\mu}{\rho_b |\vec{u}_b - \vec{u}_\delta| d_\delta} \cdot \frac{\pi d_\delta^2}{4} \cdot \frac{\rho_b |\vec{u}_b - \vec{u}_\delta|}{2} (\vec{u}_b - \vec{u}_\delta). \quad (3.2.7.)$$

მათემატიკური გარდაქმნების შედეგად, განტოლება (3.2.7.) შეგვიძლია წარმოვადგინოთ, როგორც:

$$\frac{d\vec{u}_b^2 \rho_b}{18\mu} \cdot \frac{d\vec{u}_b}{dt} = (\vec{u}_b - \vec{u}_b). \quad (3.2.8.)$$

შემოვიღოთ აღნიშვნა:

$$t_* = \frac{\rho_b d^2}{18\mu}. \quad (3.2.9.)$$

სიდიდე t_* წარმოადგენს შეწონილი ნაწილაკის დინამიკური რელაქსაციის დროს, რომელიც ასახავს ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობის ხანგრძლივობას ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე.

შემოვიღოთ ფარდობითი სიდიდეები:

$$y = \frac{u_b}{u_*}; \quad (3.2.10.)$$

$$\tau = \frac{t}{t_*}; \quad (3.2.11.)$$

$$y_0 = \frac{u_0}{u_*}; \quad (3.2.12.)$$

სადაც u_0 არის ნაკადში შეწონილი ნაწილაკის საწყისი სიჩქარე.

განტოლებაში (3.2.8.) ფარდობითი სიდიდეების გათვალისწინებით ვღებულობთ შემდეგი სახის დიფერენციალურ განტოლებას:

$$\frac{dy}{d\tau} = 1 - y. \quad (3.2.13.)$$

საწყისი პირობებიდან გამომდინარე ($\tau = 0$; $y = y_0$) დიფერენციალური განტოლების (3.2.13.) ამოხსნას აქვს შემდეგი სახე:

$$y = 1 - (1 - y_0) \exp(-\tau). \quad (3.2.14.)$$

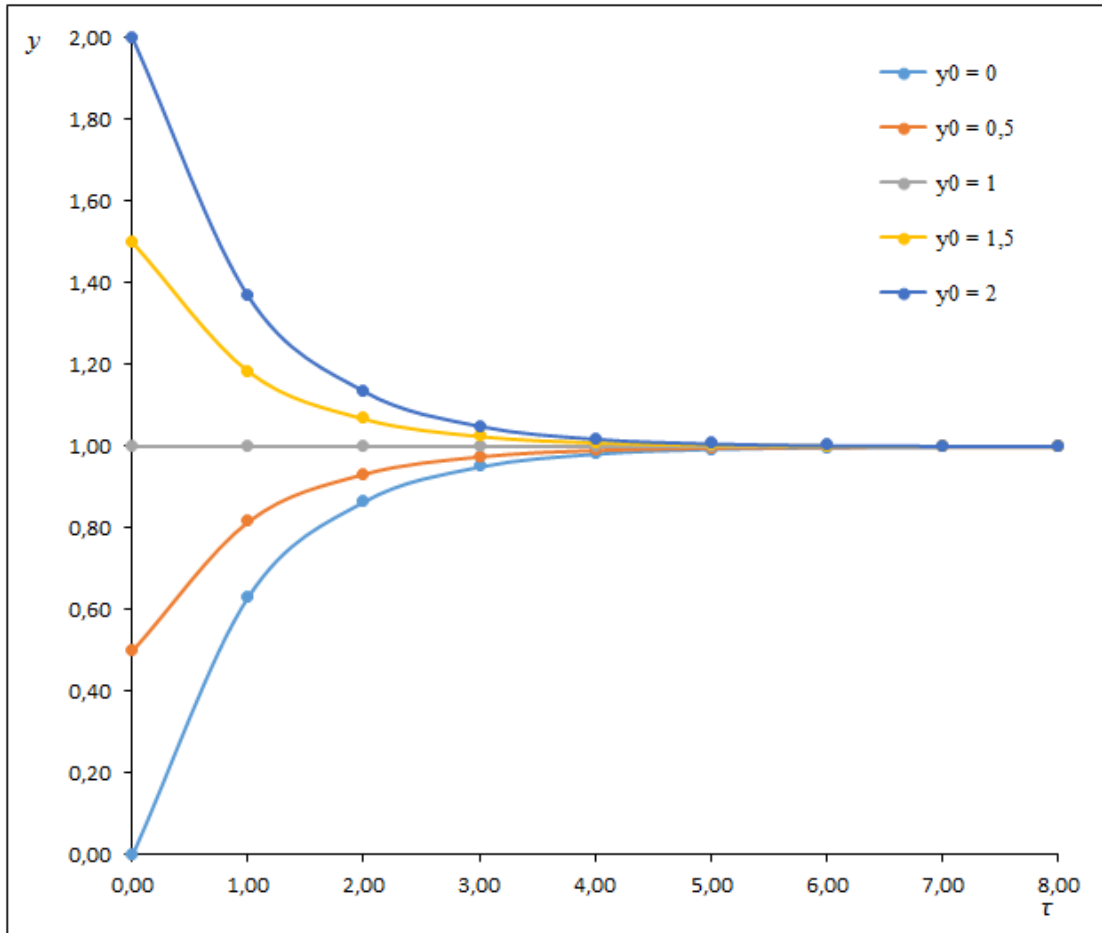
დავადგინოთ ნაწილაკის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების $y(\tau)$ ფარდობითი სიდიდეების რიცხითი მნიშვნელობები, ნაწილაკის საწყისი სიჩქარის y_0 -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისთვის (ცხრილი 3.3) და ავაგოთ გრაფიკი (ნახ. 3.4).

შეწონილი ნაწილაკის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულება y_0 -ის სხვადასხვა მნიშვნელობებისას

ცხრილი 3.3.

τ	$y = 1 - (1 - y_0)e^{-\tau}$				
	$y_0 = 0$	$y_0 = 0,5$	$y_0 = 1$	$y_0 = 1,5$	$y_0 = 2$
	$y = 1 - e^{-\tau}$	$y = 1 - 0,5e^{-\tau}$	$y = 1$	$y = 1 + 0,5e^{-\tau}$	$y = 1 + e^{-\tau}$
0,00	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00
1,00	0,63	0,82	1,00	1,18	1,37
2,00	0,86	0,93	1,00	1,07	1,14
3,00	0,95	0,98	1,00	1,02	1,05
4,00	0,98	0,99	1,00	1,01	1,02
5,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,01
6,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

გრაფიკიდან ჩანს, რომ როდესაც შეწონილი ნაწილაკის საწყისი სიჩქარე მეტია ნაკადის სიჩქარეზე ($y_0 > 1$), ნაწილაკის სიჩქარე იწყებს კლებას ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე. როდესაც ნაწილაკის საწყისი სიჩქარე ნაკლებია ნაკადის სიჩქარეზე ($y_0 < 1$), ნაწილაკის სიჩქარე მატულობს ნაკადის სიჩქარის სიდიდემდე, ხოლო როდესაც ნაწილაკის სიჩქარე ნაკადის სიჩქარის ტოლია ($y_0 = 1$), მისი სიჩქარე არ იცვლება.



ნახ.3.4. ლამინარულ რეჟიმში ნაკადში მოძრავი ნაწილაკის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი

განტოლებების (3.2.9., 3.2.10., 3.2.11., 3.2.12.) გათვალისწინებით, გამოვსახოთ განტოლება (3.2.14.) შემდეგი სახით:

$$\frac{u_{\tau}}{u_b} = 1 - \left(1 - \frac{u_0}{u_b}\right) \exp\left(-t \frac{18\mu}{\rho_{\tau} d_{\tau}^2}\right), \quad (3.2.15.)$$

საიდანაც:

$$u_{\tau} = u_b - (u_b - u_0) \exp\left(-t \frac{18\mu}{\rho_{\tau} d_{\tau}^2}\right). \quad (3.2.16.)$$

განტოლება (3.2.16.) წარმოადგენს სტოქსის რეჟიმში, მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ნაკადში მოძრაობის განტოლებას, რომელიც ასახავს ნაწილაკის რელაქსაციის სიჩქარის, დროზე დამოკიდებულებას.

შეწონილი ნაწილაკის მიერ ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე განვლილი მანძილის დასადგენად შეწონილი ნაწილაკის მოძრაობის განტოლება

გამოვსახოთ როგორც:

$$\frac{du_{\delta}}{dt} = \frac{du_{\delta}}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{du_{\delta}}{dx} u_{\delta}. \quad (3.2.17.)$$

განტოლების (3.2.8.) გათვალისწინებით ვღებულობთ:

$$\frac{du_{\delta}}{dx} = \frac{(u_{\delta} - u_{\delta})}{u_{\delta}} \cdot \frac{18\mu}{\rho_{\delta} d^2}. \quad (3.2.18.)$$

შემოვიტანოთ ახალი ფარდობითი სიდიდე:

$$\xi = \frac{x}{x_*}, \quad (3.2.19.)$$

სადაც:

$$x_* = t_* u_*. \quad (3.2.20.)$$

განტოლების (3.2.9) და იმის გათვალისწინებით, რომ $u_* = u_{\delta}$, განტოლება (3.2.20.) იღებს სახეს:

$$x_* = u_{\delta} \frac{d_{\delta}^2 \rho_{\delta}}{18\mu}. \quad (3.2.21.)$$

განტოლებიდან (3.2.19.) x -ის მნიშვნელობა შეადგენს::

$$x = \xi x_* \quad (3.2.22.)$$

განტოლებებიდან (3.2.10.) u_{δ} -ის მნიშვნელობაა:

$$u_{\delta} = y u_{\delta} \quad (3.2.23.)$$

განტოლებების (3.2.10., 3.2.21., 3.2.22., 3.2.23.) გამოყენებით, გამოვსახოთ განტოლება (3.2.18.) შემდეგი სახით:

$$\begin{aligned} \frac{d(yu_{\delta})}{d(\xi x_*)} &= \frac{(u_{\delta} - u_{\delta})}{u_{\delta}} \cdot \frac{18\mu}{d_{\delta}^2 \rho_{\delta}} \Rightarrow \frac{u_{\delta}}{x_*} \cdot \frac{dy}{d\xi} = \frac{(u_{\delta} - u_{\delta})}{u_{\delta}} \cdot \frac{18\mu}{d_{\delta}^2 \rho_{\delta}} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{dy}{d\xi} &= \frac{(u_{\delta} - u_{\delta})}{u_{\delta}} \cdot \frac{18\mu}{d_{\delta}^2 \rho_{\delta}} \cdot \frac{x_*}{u_{\delta}} \Rightarrow \frac{dy}{d\xi} = \frac{(u_{\delta} - u_{\delta})}{u_{\delta}} \Rightarrow \frac{dy}{d\xi} = \frac{u_{\delta}}{u_{\delta}} - 1. \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{dy}{d\xi} &= \frac{1}{y} - 1. \Rightarrow \frac{dy}{d\xi} = \frac{1-y}{y}. \end{aligned} \quad (3.2.24.)$$

სასაზღვრო პირობებიდან გამომდინარე ($\xi = 0; y = y_0$), დიფერენციალური განტოლების (3.2.24.) ამოხსნას წარმოადგენს:

$$\xi = (y_0 - y) + \ln \left| \frac{1-y_0}{1-y} \right|. \quad (3.2.25.)$$

განტოლებების (3.2.10., 3.2.11., 3.2.12., 3.2.19., 3.2.21) გათვალისწინებით, განტოლება (3.2.25.) გამოვსახოთ როგორც:

$$\begin{aligned} \frac{x}{x_*} &= (y_0 - y) + \ln \left| \frac{1-y_0}{1-y} \right|. \Rightarrow x = u_b \frac{d_{\xi}^2 \rho_{\xi}}{18\mu} \cdot \left(\frac{u_0}{u_b} - \frac{u_{\xi}}{u_b} \right) + \ln \left| \frac{1-u_0/u_b}{1-u_{\xi}/u_b} \right|. \Rightarrow \\ &\Rightarrow x = \frac{d_{\xi}^2 \rho_{\xi}}{18\mu} (u_0 - u_{\xi}) + \ln \left| \frac{1-u_0}{1-u_{\xi}} \right|. \end{aligned} \quad (3.2.26.)$$

განტოლება (3.2.26.) წარმოადგენს ნაკადში მოძრავი შეწონილი ნაწილაკის მიერ განვლილ მანძილს, ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე.

ამგვარად, კვლევის შედეგად, ნიუტონის მეორე კანონზე დაყრდნობით, ნაწილაკის საწყისი სიჩქარისა და ნაკადის სიჩქარის, აგრეთვე ნაწილაკისა და სითხის ფიზიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით, ლამინარული რეჟიმის პირობებში, მიღებულია მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე მისი რელაქსაციის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების განტოლება. აგრეთვე, მიღებულია ნაწილაკის სიჩქარის რელაქსაციის დროს განვლილი მანძილის საანგარიშო განტოლება [86].

ორფაზიან ნაკადში შეწონილი ნაწილაკების მოძრაობის კანონების კვლევისას მიღებული დამოკიდებულებების გამოყენება საშუალებას იძლევა დაზუსტდეს ნაწილაკების ჰორიზონტალური გადაადგილების სიდიდე, რასაც დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა ენიჭება დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების გაანგარიშებისას.

3.3. კონსოლიდირებული ნაწილაკების დალექვის კანონზომიერებების

კვლევა

დისპერსიული სისტემის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაცია.

მონოდისპერსიულ სისტემებში განასხვავებენ ნაწილაკების მოცულობით C_V , მასურ C_m და რაოდენობრივ C_n კონცენტრაციებს:

- C_V არის ნაწილაკების ჯამური მოცულობა სისტემის მოცულობის ერთეულში:

$$C_V = \frac{\sum V_{\bar{g}}}{V_{\text{სობ}}}, \quad (3.3.1.)$$

სადაც $V_{\bar{g}}$ არის ნაწილაკის მოცულობა, $V_{\bar{g}} = \frac{\pi d_{\bar{g}}^3}{6}$, $d_{\bar{g}}$ - ნაწილაკის დიამეტრი;

$V_{\text{სობ}}$ - სისტემის მოცულობა, მ³;

- C_m - ნაწილაკების ჯამური მასა სისტემის მოცულობის ერთეულში:

$$C_m = \frac{\sum m_{\bar{g}}}{V_{\text{სობ}}}, \quad (3.3.2.)$$

სადაც $m_{\bar{g}}$ არის ნაწილაკის მასა, კგ;

- C_n - ნაწილაკების რაოდენობა სისტემის მოცულობის ერთეულში:

$$C_n = \frac{n}{V_{\text{სობ}}}, \quad (3.3.3.)$$

სადაც n არის დისპერსიული ფაზის ნაწილაკების რაოდენობა.

მოცულობით, მასურ და რაოდენობრივ კონცენტრაციებს შორის არსებობს შემდეგი დამოკიდებულება:

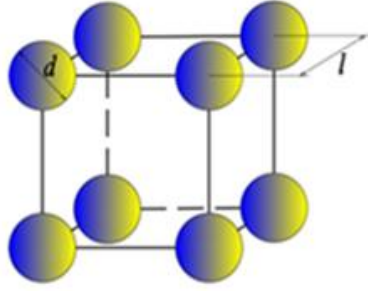
$$C_V = \frac{C_m}{\rho_{\bar{g}}} = C_n V_{\bar{g}} = \frac{C_n \cdot \pi d_{\bar{g}}^3}{6}, \quad (3.3.4.)$$

სადაც $\rho_{\bar{g}}$ არის ნაწილაკის სიმკვრივე [87, 88].

დისპერსიული ფაზის ნაწილაკებს შორის მანძილის კონცენტრაციაზე დამოკიდებულების განსაზღვრისთვის განვიხილოთ მონოდისპერსიული სისტემის ყველაზე ალბათური ელემენტარული მოცულობა, რომელიც წარმოადგენს რვა თანაბარად დამორებული სფეროსებრი ნაწილაკისგან შექმნილ კუბს [89]. ნაწილაკების დიამეტრია d და ცენტრებს შორის მანძილი - l (ნახ.3.5.).

ამ შემთხვევაში მყარი ფაზის მოცულობა, შეადგენს ერთი ნაწილაკის მოცულობას:

$$V_{\bar{g}} = \frac{\pi d_{\bar{g}}^3}{6}. \quad (3.3.5.)$$



ნახ. 3.5. დისპერსიული სისტემის ელემენტარული მოცულობა ნაწილაკების კუბური განლაგებისას

ელემენტარული მოცულობა, განმარტებიდან გამომდინარე არის:

$$V_{\text{სოლ}} = l^3.$$

შესაბამისად, ელემენტარული სისტემის მოცულობითი კონცენტრაცია გამოითვლება დამოკიდებულებით:

$$C_V = \frac{\sum V_{\text{გ}}}{V_{\text{სოლ}}} = \frac{\pi d_{\text{გ}}^3}{6} \cdot \frac{1}{l^3}. \quad (3.3.6.)$$

შემოვიღოთ ფარდობითი სიდიდე:

$$k = \frac{l}{d_{\text{გ}}} \quad (3.3.7.)$$

მაშინ ელემენტარული სისტემის მოცულობითი კონცენტრაცია იქნება:

$$C_V = \frac{\pi}{6k^3}. \quad (3.3.8.)$$

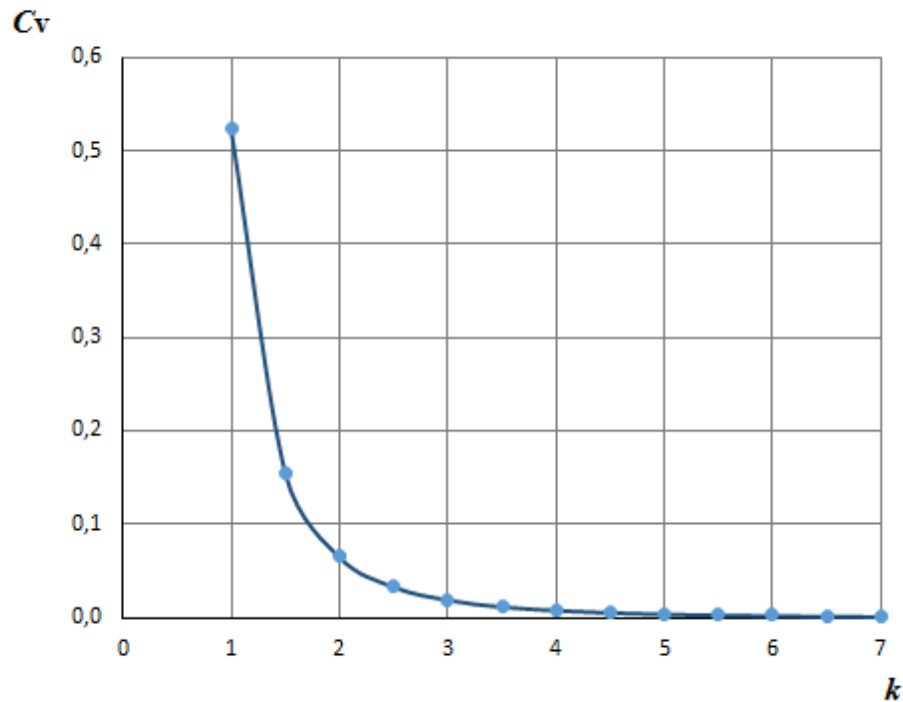
განვსაზღვროთ მოცულობითი კონცენტრაციის, ნაწილაკებს შორის მანძილზე დამოკიდებულების რიცხვითი მნიშვნელობები (ცხრილი 3.4) და ავაგოთ გრაფიკი (ნახ. 3.6.).

მოცულობითი კონცენტრაციის, შეწონილ ნაწილაკებს შორის მანძილზე დამოკიდებულება

ცხრილი 3.4.

k	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
C_V	0,524	0,155	0,065	0,034	0,019	0,012	0,008	0,006	0,004	0,003	0,002

მნიშვნელობას $k = 1$ შეესაბამება მოცულობითი კონცენტრაცია $C_V = \frac{\pi}{6} \approx 0.52$, რომლის დროსაც ნაწილაკების ზედაპირები ერთმანეთს ეხებიან.



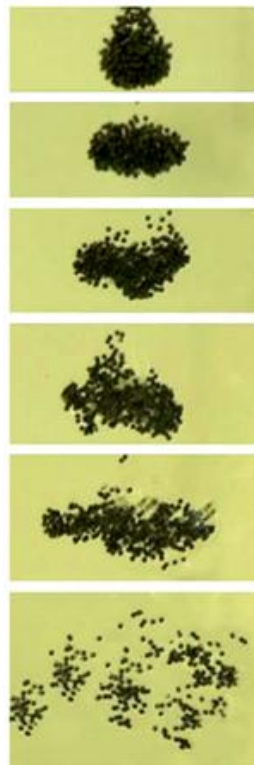
ნახ.3.6. მოცულობითი კონცენტრაციის დამოკიდებულება ნაწილაკებს შორის მანძილზე

ნაწილაკების ღრუბლის გრავიტაციული დალექვისას, როდესაც ღრუბლის ზომა ბევრად აღემატება ცალკეული ნაწილაკის ზომას ($d_{\text{ღრ}} \gg d_{\text{წ}}$), ადგილი აქვს დალექვის სამ რეჟიმს: შეუღწევადი, ფოროვანი და ნაწილობრივ შეღწევადი ღრუბლის დალექვის რეჟიმებს (ნახ.3.7.).

- პირველ რეჟიმში ნაწილაკებს შორის მანძილი საკმაოდ მცირეა, სასაზღვრო შრის სისქე მეტია ნაწილაკებს შორის მანძილზე. დალექვისას ხდება ამ სისტემაში არსებული მთელი გარემოს დალექვა და ნაწილაკების ჯგუფი მოძრაობს როგორც ერთი მთლიანი სხეული. ღრუბელი შეუღწევადია და დისპერსული გარემო გარსშემოედინება მთლიან ღრუბელს. მოძრაობის კანონი ექვემდებარება იდენტური მოცულობის მქონე სხეულის

მოდრაობის კანონებს;

- მეორე რეჟიმში ღრუბელი ფოროვანია. ნაწილაკებს შორის მანძილი დიდია, ამიტომ დასაშვებია მათ შორის არსებული ჰიდროდინამიკური ურთიერთქმედების უგულვებელყოფა. ღრუბლის მასათა ცენტრი მოძრაობს ამ ღრუბელში არსებული ცალკეული ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარით;



ნახ. 3.7. ნაწილაკების ღრუბლის დალექვის დინამიკა

- მესამე რეჟიმი ნაწილობრივ შეღწევადია. ამ შემთხვევაში დისპერსული გარემოს ნაკადი ნაწილობრივ გარსშემოედინება ღრუბელს და ნაწილობრივ აღწევს ნაწილაკებს შორის. ურთიერთქმედება ნაწილაკებს შორის იწვევს ღრუბლის დალექვის სიჩქარის მატებას ან კლებას. ანალიტიკურად ასეთი რეჟიმის აღწერა რთულია, ამიტომ მას ძირითადად იკვლევენ ექსპერიმენტული გზით. [90].

ნაწილაკთა ერთობლიობის მოძრაობის ზემოაღნიშნული რეჟიმების

რეალიზაცია დამოკიდებულია ღრუბელში ნაწილაკების მოცულობით კონცენტრაციაზე C_V -ზე [91, 92, 93, 94].

ნაწილაკების კონცენტრაციიდან გამომდინარე, შესაძლებელია დავადგინოთ, თუ რომელ რეჟიმში ხდება ნაწილაკთა ღრუბლის დალექვა. ამისთვის ჩავატაროთ ღრუბლის ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის ზღვრული მნიშვნელობის ანალიზი.

პირველ რეჟიმში, ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაციის შემთხვევაში, როდესაც ღრუბელი შეუღწევადია და მოძრაობს როგორც ერთი მთლიანი სხეული, დიამეტრით $d_{\text{ღრ}}$, ნიუტონის ბლანტი ხახუნის წინააღმდეგობის კანონის მიხედვით შეუღწევად ღრუბელზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა ($F_{\text{წინ}}^{\text{შ}}$) იქნება:

$$F_{\text{წინ}}^{\text{შ}} = c_d^{\text{შ}} \cdot S_{\text{ღრ}} \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{ღრ}}^2}{2} = c_d^{\text{შ}} \cdot \frac{\pi d_{\text{ღრ}}^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{ღრ}}^2}{2}. \quad (3.3.9.)$$

სადაც $c_d^{\text{შ}}$ არის შეუღწევად ღრუბელში ნაწილაკების ღრუბლის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;

$S_{\text{ღრ}}$ - ნაწილაკების ღრუბლის მიდელის ფართობი (ნაწილაკის პროექცია სიბრტყეზე, რომელიც მოძრაობის მიმართულების

პერპენდიკულარულია), $S = \frac{\pi d_{\text{ღრ}}^2}{4}$;

$d_{\text{ღრ}}$ - ნაწილაკთა ღრუბლის დიამეტრი;

$u_{\text{ღრ}}$ - ნაწილაკების ღრუბლის ჰიდავლიკური სისხო.

ნაწილობრივ შეღწევად ღრუბელში, ნაწილაკთა მცირე კონცენტრაციის დროს, ღრუბლის ცალკეულ ნაწილაკზე დიამეტრით $d_{\text{წ}}$ მოქმედებს წინააღმდეგობის ძალა:

$$F_{\text{წინ}}^{\text{წ}} = c_d^{\text{წ}} \cdot S_{\text{წ}} \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{წ}}^2}{2} = c_d^{\text{წ}} \cdot \frac{\pi d_{\text{წ}}^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{წ}}^2}{2}, \quad (3.3.10.)$$

სადაც $c_d^{\text{წ}}$ არის ნაწილობით შეღწევად ღრუბელში ცალკეულ ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;

$S_{\text{წ}}$ - ნაწილაკის მიდელის ფართობი, $S_{\text{წ}} = \frac{\pi d_{\text{წ}}^2}{4}$.

ღრუბელში ნაწილაკების რაოდენობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$n = C_n V_{\text{ღრ}} = C_n \frac{\pi d_{\text{ღრ}}^3}{6}, \quad (3.3.11.)$$

სადაც $V_{\text{ღრ}}$ არის ნაწილაკების ღრუბლის მოცულობა.

ფორმულიდან (3.3.4.) გამომდინარეობს:

$$C_n = \frac{C_V}{V_{\text{ფ}}} = C_V \left(\frac{\pi d_{\text{ფ}}^3}{6} \right)^{-1}. \quad (3.3.12.)$$

განტოლება (3.3.11)-ში (3.3.12)-ის გათვალისწინებით ვღებულობთ, რომ ღრუბელში ნაწილაკების რაოდენობა შეადგენს:

$$n = C_V \left(\frac{d_{\text{ღრ}}}{d_{\text{ფ}}} \right)^3. \quad (3.3.13.)$$

ფოროვან ღრუბელში ყველა ნაწილაკზე მოქმედებს წინააღმდეგობის ჯამური ძალაა:

$$F_{\text{წინ}}^{\text{ფ.წ}} = c_d^{\text{ფ.წ}} \cdot \frac{\pi d_{\text{ფ}}^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{ფ}}^2}{2} \cdot n = c_d^{\text{ფ.წ}} \cdot \frac{\pi d_{\text{ფ}}^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{ფ}}^2}{2} \cdot C_V \left(\frac{d_{\text{ღრ}}}{d_{\text{ფ}}} \right)^3. \quad (3.3.14.)$$

ზღვრულ მნიშვნელობად მივიჩნით ღრუბელში ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია C_V^* , რომლის დროსაც ნაწილობრივ შეღწევადი და შეუღწევადი ღრუბლების წინააღმდეგობის ძალები ერთნაირია ($F_{\text{წინ}}^{\text{ფ.წ}} = F_{\text{წინ}}^{\text{წ}}$):

$$c_d^{\text{ფ.წ}} \cdot \frac{\pi d_{\text{ფ}}^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{ფ}}^2}{2} \cdot C_V \left(\frac{d_{\text{ღრ}}}{d_{\text{ფ}}} \right)^3 = c_d^{\text{წ}} \cdot \frac{\pi d_{\text{ღრ}}^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{ღრ}}^2}{2},$$

შესაბამისად:

$$C_V \cdot u_{\text{ფ}}^2 \cdot c_d^{\text{ფ.წ}} \cdot \frac{d_{\text{ღრ}}}{d_{\text{ფ}}} = c_d^{\text{წ}} \cdot u_{\text{ღრ}}^2. \quad (3.3.15.)$$

განტოლებიდან (3.3.15) გამომდინარეობს, რომ ნაწილაკების ღრუბლის დალექვის ნაწილობრივ შეღწევად და შეუღწევადი რეჟიმების ზღვარს წარმოადგენს მოცულობითი კონცენტრაციის (C_V^* -ს) მნიშვნელობა:

$$C_V^* = \frac{c_d^{\text{წ}}}{c_d^{\text{ფ.წ}}} \cdot \frac{d_{\text{ფ}}}{d_{\text{ღრ}}} \cdot \left(\frac{u_{\text{ღრ}}}{u_{\text{ფ}}} \right)^2. \quad (3.3.16.)$$

ანალოგიურად შეგვიძლია ზღვრული კონცენტრაციის დადგენა სტოქსის რეჟიმისთვის, ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენისას,

რომელიც იქნება ზემოაღნიშნული განტოლების კერძო შემთხვევა.

სტოქსის რეჟიმში რეინოლდსის რიცხვი $Re < 1$, წინააღმდეგობის კოეფიციენტი $c_d = \frac{24}{Re}$. იმის გათვალისწინებით, რომ რეინოლდსის რიცხვი

$Re = \frac{\rho_b u \cdot d}{\mu}$, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდე შეადგენს:

$$c_d = \frac{24}{Re} = \frac{24\mu}{\rho_b u \cdot d}, \quad (3.3.17.)$$

ნიუტონის ბლანტი ხახუნის წინააღმდეგობის ფორმულისა და განტოლება (3.3.17)-ის გათვალისწინებით, წინააღმდეგობის ძალა იღებს სტოქსის ფორმულის (2.2.3.) სახეს:

$$F_{წიბ} = 3\pi\mu u d.$$

ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაციის შემთხვევაში, სტოქსის რეჟიმში შეუღწევადი ღრუბლისთვის, წინააღმდეგობის ძალა შეადგენს:

$$F_{წიბ}^{\partial} = 3\pi\mu_{\varrho} d_{\varrho}. \quad (3.3.18.)$$

ნაწილობრივ შეღწევადი ღრუბლის შემთხვევაში, განტოლება (3.3.11.)-ის გათვალისწინებით, ყველა ნაწილაკზე მოქმედებს წინააღმდეგობის ჯამური ძალა გამოიხატება დამოკიდებულებით:

$$F_{წიბ.სტ.}^{\partial} = n \cdot 3\pi\mu_{\varrho} d_{\varrho} = 3\pi\mu_{\varrho} d_{\varrho} C_V \left(\frac{d_{\varrho}}{d_{\varrho}}\right)^3. \quad (3.3.19.)$$

სტოქსის რეჟიმში მოცულობითი კონცენტრაციის ზღვრულ მნიშვნელობას წარმოადგენს სიდიდე, რომლის დროსაც ნაწილობრივ შეღწევადი და შეუღწევადი ღრუბლების წინააღმდეგობის ძალები ერთნაირია $F_{წიბ}^{\partial} = F_{წიბ}$:

$$3\pi\mu_{\varrho} d_{\varrho} C_V \left(\frac{d_{\varrho}}{d_{\varrho}}\right)^3 = 3\pi\mu_{\varrho} d_{\varrho}, \quad (3.3.20.)$$

შესაბამისად:

$$C_V^* = \left(\frac{d_{\varrho}}{d_{\varrho}}\right)^2 \cdot \frac{u_{\varrho}}{u_{\varrho}}. \quad (3.3.21.)$$

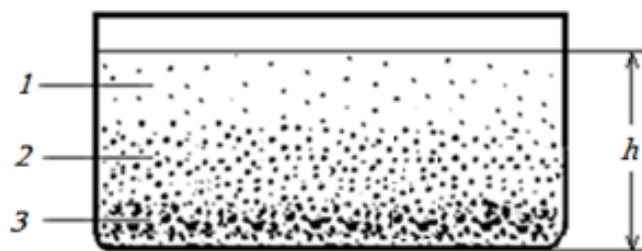
დამოკიდებულებები (3.3.16.) და (3.3.21.) საშუალებას იძლევა დავადგინოთ თუ როგორ ხდება ნაწილაკების ღრუბლის დალექვა. თუ ღრუბელში ნაწილაკების კონცენტრაცია მეტია ზღვრული კონცენტრაციის

მნიშვნელობაზე ($C_V > C_V^*$), მაშინ ნაწილაკების ღრუბელი მოძრაობს პირველ რეჟიმში, როგორც ერთი მთლიანი ნაწილაკი (შეულწევადი ღრუბელი), ხოლო როდესაც ნაწილაკების კონცენტრაცია ნაკლებია ზღვრული კონცენტრაციის მნიშვნელობაზე ($C_V < C_V^*$), მაშინ ადგილი აქვს დალექვის მეორე რეჟიმს და ღრუბელი ნაწილობრივ შედწევადა [95].

ზემოთ მიღებული დამოკიდებულებები სამართლიანია ცალკეული ღრუბლის გრავიტაციული დალექვისას, მაგრამ მაღალი კონცენტრაციების შემთხვევაში შეწონილი ნაწილაკების დალექვა ხორციელდება სხვა სახის კანონზომიერებებით.

3.4. სალექრებში, შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვლილების დინამიკის კვლევა

სალექრებში, გრავიტაციული დალექვისას, შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაცია თანდათანობით იზრდება წყლის ზედაპირიდან, სალექრის ფსკერის მიმართულებით (ნახ. 3.8.). თავისუფალი დალექვის ზონის ქვემოთ (1) ყალიბდება შეზღუდული დალექვის (2) და ნალექის გამკვრივების (3) ზონები. რეალობაში, შეწონილი ნაწილაკების დალექვისას ძირითად ზონებს შორის წარმოიქმნება მცირე სისქის მქონე გარდამავალი ზონები.



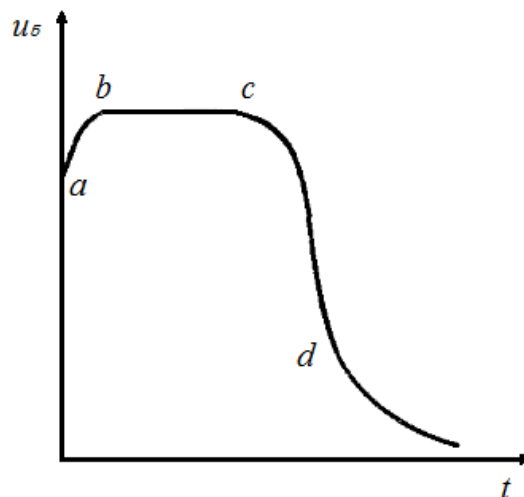
ნახ. 3.8. სალექარში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის პროცესის სქემა

1- თავისუფალი დალექვის ზონა; 2 - შეზღუდული დალექვის ზონა;

3 - ნალექის გამკვრივების ზონა.

განვიხილოთ ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების სედიმენტაციისას, კონცენტრაციის ცვლილების დინამიკა.

დალექვის საწყის ეტაპზე (ნახ. 3.9.), ნაწილაკების მოძრაობა აჩქარებულია (მონაკვეთი *ab*). ნაწილაკებზე მოქმედი ძალების დინამიკური წონასწორობის დამყარების შემდეგ, როდესაც წინააღმდეგობის ძალა უტოლდება სიმძიმის ძალისა და ამომგდები ძალის ტოლქმედს, ნაწილაკები იძენს მუდმივ სიჩქარეს (მონაკვეთი *bc*). ნაწილაკების კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად თავს იჩენს შეზღუდული დალექვა, რომლის დროსაც დისპერსიული ფაზის ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების შედეგად, ჩნდება დამატებითი ძალები. კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად იზრდება ჰიდროდინამიკული წინააღმდეგობა. ყოველივე ეს იწვევს შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარის კლებას (მონაკვეთი *cd*). დალექვის პროცესის ბოლო ფაზაზე ხდება ნალექის გამკვრივება. კონცენტრაცია იმდენად იზრდება, რომ რთულდება სითხის შეღწევა ნაწილაკებს შორის. ამ პროცესის დროს ნაწილაკთა დალექვის სიჩქარე ძალიან მცირეა [96, 97, 98, 99, 100].



ნახ. 3.9. შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი

განვსაზღვროთ ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის, დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულება. ამისათვის,

შეგვიძლია ვისარგებლოთ ჰიპსომეტრიული კნონით, რომელიც პერენმა გამოიყენა მყარდისპერსიული სისტემისთვის. პერენმა დაადგინა, რომ სითხეში, გრავიტაციული დალექვის პირობებში, შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმის მატებასთან ერთად, ნაწილაკების რაოდენობა იზრდება ექსპონენციალურად. იგივე დამოკიდებულებით ხდება მოლეკულების განაწილების კლება, ჰაერის სვეტის სიმაღლის მატებასთან ერთად. ნაწილაკების კონცენტრაციის, დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების გასაანგარიშებლად, პერენმა გამოიყენა ლაპლასის ბარომეტრიული ფორმულა იდეალური აირებისთვის:

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{mg(h-h_0)}{kT}\right), \quad (3.4.1.)$$

სადაც p არის h სიმაღლეზე აირის წნევა;

p_0 - აირის წნევა h_0 სიმაღლეზე;

m - აირის მოლეკულის მასა;

k - ბოლცმანის მუდმივა, რომელიც აკავშირებს ნაწილაკების ენერგიასა და ტემპერატურას ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ ჯ/კ);

T - აირის აბსოლუტური ტემპერატურა (K).

ვინაიდან აირის წნევა დამოკიდებულია ნაწილაკების კონცენტრაციაზე ბარომეტრიული ფორმულა შეგვიძლია გამოვსახოთ როგორც:

$$C_{n(h)} = C_{n_0} \exp\left(-\frac{mg(h-h_0)}{kT}\right), \quad (3.4.2.)$$

სადაც $C_{n(h)}$ არის h სიმაღლეზე ნაწილაკების რაოდენობრივი კონცენტრაცია;

C_{n_0} - ნაწილაკების რაოდენობრივი კონცენტრაცია h_0 სიმაღლეზე.

განტოლებას (3.4.2.) უწოდებენ ჰიფსომეტრიულ კანონს (hipsos - სიმაღლე).

იმის გავითვალისწინებთ, რომ $mgh = U_{პოტ}$, ხოლო $h_0 = 0$, განტოლება (3.4.2.) იღებს ბოლცმანის განაწილების კანონის სახეს, რომელიც გამოხატავს ნაწილაკების კონცენტრაციის განაწილებას პოტენციური ენერგიის ($U_{პოტ}$) მიხედვით:

$$C_{n(h)} = C_{n_0} \exp\left(-\frac{U_{პოტ}}{kT}\right), \quad (3.4.3.)$$

განტოლებები (3.4.2.-3.4.3.) სამართლიანია ნებისმიერ პოტენციურ ძალათა ველში. მრავალრიცხოვანი ცდების მეშვეობით, პერენმა დაადგინა ჰიპსომეტრული კანონის მართებულება მცირე ზომის ნაწილაკების შემცველი მონოდისპერსიული სუსპენზიებისთვისაც [101, 102, 103, 104, 105].

შეწონილი ნაწილაკის სითხეში გრავიტაციული დალექვისას ჰიპსომეტრულ კანონში უნდა გავითვალისწინოთ ამომგდები ძალის შედეგად შეწონილი ნაწილაკების მასის კლება:

$$m_{აბ} = m - m_b = V_b(\rho_b - \rho_s) = m \frac{(\rho_b - \rho_s)}{\rho_b}, \quad (3.4.4.)$$

სადაც $m_{აბ}$ არის სითხეში შეწონილი ნაწილაკის მასა;

m - ნაწილაკის მასა;

m_b - ნაწილაკის მოცულობის მქონე სითხის მასა;

V_b - შეწონილი ნაწილაკის მოცულობა.

სითხეში შეწონილი ნაწილაკების დალექვისას ნულოვან სიმაღლედ მივიჩნით სითხის ზედაპირი ($h_0 = 0$), მაშინ ნაწილაკის დალექვის სიღრმე შეადგენს h -ს. განტოლება (3.4.4.)-ის გათვალისწინებით, ჰიპსომეტრული კანონი სუსპენზიებისთვის იღებს შემდეგ სახეს:

$$C_{n(h)} = C_{n_0} \exp\left(\frac{mgh(\rho_b - \rho_s)}{kT\rho_b}\right). \quad (3.4.5.)$$

განტოლება (3.3.4.)-ის გამოყენებით გამოვსახოთ რაოდენობრივი კონცენტრაციები მოცულობითი კონცენტრაციების მეშვეობით:

$$C_{n(h)} = \frac{C_{V(h)}}{V_b}, \quad (3.4.6.)$$

$$C_{n_0} = \frac{C_{V_0}}{V_b}, \quad (3.4.7.)$$

იმის გათვალისწინებით, რომ $m = \frac{\rho_b \pi d^3}{6}$, გამოსახულება (3.4.5.) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$C_{V(h)} = C_{V_0} \exp\left(\frac{h\pi d^3 g(\rho_b - \rho_s)}{6kT}\right). \quad (3.4.8.)$$

გამოვსახოთ:

$$\beta = \frac{\pi d^3 g(\rho_f - \rho_b)}{6kT}, \quad (3.4.9.)$$

მაშინ გამოსახულება (3.4.8.) მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$C_{V(h)} = C_{V0} e^{\beta h}. \quad (3.4.10.)$$

განტოლება (3.4.10.) წარმოადგენს შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის დამოკიდებულებას დალექვის სიღრმეზე.

ამ განტოლების გალოგარითმებით, შეგვიძლია გამოვიანგარიშოთ შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმე:

$$h = \frac{1}{\beta} \ln \frac{C_{V0}}{C_{V(h)}}. \quad (3.4.11.)$$

დამოკიდებულებები (3.4.10., 3.4.11.) საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ თუ როგორ იცვლება შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია მათი სუსპენზიაში დალექვისას.

იმის დასადგენად თუ რა მოცულობითი კონცენტრაციის დროს ხდება შეწონილი ნაწილაკების გარსშემოდენის ლამინარული რეჟიმის გადასვლა გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმზე განვსაზღვროთ ჩამდინარე წყალში შეწონილი ნაწილაკების საწყისი რაოდენობა (n):

$$n = \frac{C_{V0}}{V_f} = \frac{6C_{V0}}{\pi d^3}. \quad (3.4.12.)$$

თავისუფალი დალექვისას, ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენისას, სისტემის ნაწილაკებზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა $F_{წინ}^{\Sigma}$ სტოქსის ფორმულის (2.2.3.) გამოყენებით იქნება:

$$F_{წინ}^{\Sigma} = n3\pi\mu_{\ell} d = \frac{6C_{V0}}{\pi d^3} \cdot 3\pi\mu_{\ell} d = C_{V0} \frac{18\mu_{\ell}}{d^2}, \quad (3.4.13.)$$

სადაც $F_{წინ}^{\Sigma}$ არის ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა ლამინარული რეჟიმით გარსშემოდენისას;

μ_{ℓ} - ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო ლამინარული გარსშემოდენისას, მ/წმ.

კონცენტრაციის ზრდასთან ერთად ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების შედეგად გაჩენილი დამატებითი წინააღმდეგობის

ძალების გამო, ნაწილაკების გარსშემოდენა კარგავს ლამინარულ ხასიათს. ამ შემთხვევაში წინააღმდეგობის ძალა გამოითვლება ნიუტონის ბლანტი ხახუნის წინააღმდეგობის ფორმულით (2.2.8.):

$$F_{წიბ}^{\delta} = c_d S \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\delta}^2}{2} = c_d \frac{\pi d^2 \rho_{\text{ს}} u_{\delta}^2}{8}, \quad (3.4.14.)$$

სადაც $F_{წიბ}^{\delta}$ არის ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა გარდამავალი რეჟიმით გარსშემოდენისას;

u_{δ} - ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო გარდამავალი რეჟიმით გარსშემოდენისას, მ/წმ.

ამგვარად, გარდამავალი რეჟიმით ნაწილაკების გარსშემოდენისას, ნაწილაკებზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა იქნება:

$$F_{წიბ}^{\delta} = c_d \frac{\pi d^2 \rho_{\text{ს}} u_{\delta}^2}{8} n' = c_d \frac{\pi d^2 \rho_{\text{ს}} u_{\delta}^2}{8} \frac{6C_V}{\pi d^3} = c_d \frac{3\rho_{\text{ს}} u_{\delta}^2 C_V}{4d}, \quad (3.4.15.)$$

სადაც n' არის ნაწილაკების რაოდენობა გარდამავალ რეჟიმში;

C_V - გარდამავალ რეჟიმში ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია.

კონცენტრაციის ზღვრულ მნიშვნელობად მივიჩნიოთ ნაწილაკების ისეთი მოცულობითი კონცენტრაცია C'_V , რომლის დროსაც ნაწილაკების ლამინარულ და გარდამავალ რეჟიმებში გარსშემოდენისას წინააღმდეგობის ძალები ერთნაირია:

$$\begin{aligned} F_{წიბ}^{\omega} = F_{წიბ}^{\delta} &\Rightarrow C_{Vo} \frac{18\mu u_{\omega}}{d^2} = c_d \frac{3\rho_{\text{ს}} u_{\delta}^2 C'_V}{4d} \Rightarrow \\ &\Rightarrow C'_V = C_{Vo} \frac{24\mu u_{\omega}}{c_d \rho_{\text{ს}} u_{\delta}^2}. \end{aligned} \quad (3.4.16.)$$

იმის გათვალისწინებით, რომ ლამინარული რეჟიმის პირობებში წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდე შეადგენს: $c_d = \frac{24}{Re}$, ხოლო რეინოლდსის რიცხვის მნიშვნელობაა $Re = \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\omega} d}{\mu}$, განტოლება (3.4.16.) იღებს სახეს:

$$C'_v = C_{v0} \frac{du_{\text{ლ}}^2}{\mu u_{\text{გ}}^2}. \quad (3.4.17)$$

მიღებული განტოლება (3.4.17.) წარმოადგენს სითხეში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის ზღვრულ მნიშვნელობას, რომლის მიღწევასაც ნაწილაკების გარსშემოდენის ლამინარული რეჟიმი გადადის გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმში.

იმის დასადგენად, თუ რა ($h_{\text{ზღ}}$) სიღრმეზე ხდება ნაწილაკების დალექვის ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმის გადასვლა გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმში, განტოლებაში (3.4.11.) შევიყვანოთ ზღვრული კონცენტრაციის მნიშვნელობა (3.4.17.):

$$h_{\text{ზღ}} = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\mu u_{\text{გ}}^2}{du_{\text{ლ}}^2}. \quad (3.4.18.)$$

განტოლება (3.4.18.) წარმოადგენს სალექარში შწონილი ნაწილაკების დალექვისას, ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმის, გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმზე გადასვლის სიღრმეს [106].

ამგვარად, ჩატარებული ანალიზის შედეგად მიღებულია დამოკიდებულებები, რომლებიც საშუალებას იძლევა დავადგინოთ შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმიდან გამომდინარე მათი მოცულობითი კონცენტრაცია. აგრეთვე, მიღებულია ნაწილაკების ლამინარულ და გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმებს შორის კონცენტრაციის ზღვრულ მნიშვნელობა და გამოყვანილია კონცენტრაციის ზღვრული მნიშვნელობისას ნაწილაკების დალექვის სიღრმე.

მიღებული დამოკიდებულებების გამოყენებით შესაძლებელია ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის მიხედვით დავადგინოთ, თუ რომელი გარსშემოდენის რეჟიმში ილექება შეწონილი ნაწილაკები და რომელი ფორმულით უნდა ვაწარმოოთ ნაწილაკებზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალის და შესაბამისად ჰიდრავლიკური სისხოს გამოთვლა.

IV თავი

შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის მოდელირება

4.1. შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის კვლევა უჯრედულ მოდელზე დაყრდნობით

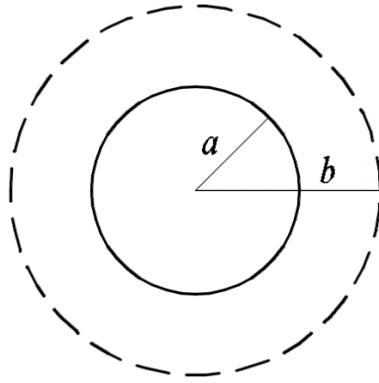
დისპერსიული გარემოს გამყოფი ნაგებობების გაანგარიშებისას უმნიშვნელოვანეს ამოცანას წარმოადგენს შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს კორექტული გამოთვლა.

ნაწილაკის სითხეში მოძრაობისას, მის გარშემო იქმნება სიჩქარისა და წნევის ველი, რომელიც გავლენას ახდენს მის მახლობლად არსებულ ნაწილაკებზე. თავად ამ ნაწილაკებზე ხდება მეზობელი ნაწილაკების მხრიდან ჰიდროდინამიკური ზემოქმედება. ვინაიდან რეალურ დისპერსიულ სისტემებში თავს იჩენს ნაწილაკების ერთობლივი დალექვა, მნიშვნელოვანია, დალექვის დროს მიმდინარე პროცესების კვლევისას, ნაწილაკთა ჰიდროდინამიკური ურთიერთქმედების გათვალისწინება.

ნაწილაკთა ერთობლიობის დალექვის კანონების აღწერა წარმოადგენს საკმაოდ რთულ ამოცანას, ამიტომ მოცულობითი კონცენტრაციის მაღალი მნიშვნელობებისას, ხშირად იყენებენ მიახლოებულ მიდგომას - ე.წ. უჯრედულ მოდელს.

უჯრედული მოდელი საშუალებას იძლევა სისტემის ნაწილაკების გარსშემოდენის ამოცანა ამოიხსნას იმავე დამოკიდებულებებით, რომლებიც გამოიყენება ცალკეული ნაწილაკის მოძრაობის კანონების დადგენისას. განსხვავებას წარმოადგენს სასაზღვრო პირობები.

უჯრედული მოდელში ხდება საკვლევი დისპერსიული სისტემის დაყოფა ერთი ზომის უჯრედებად. ყოველ მათგანს გააჩნია სფეროსებრი ფორმა და მის ცენტრში მოთავსებულია ერთი ნაწილაკი (ნახ. 4.1.) [107, 108].



ნახ. 4.1. უჯრედულ მოდელში ნაწილაკისა და სითხის უჯრედის სქემატური გამოსახულება

უჯრედის ზომა დამოკიდებულია დისპერსიულ სისტემაში ნაწილაკების კონცენტრაციაზე.

დავუშვათ, დისპერსიულ სისტემაში, მოცულობით V იმყოფება მყარი ნაწილაკები მოცულობით V_0 . გამოვსახოთ:

$$\frac{V_0}{V} = C_V, \quad (4.1.1.)$$

სადაც C_V არის მყარი ფაზის მოცულობითი კონცენტრაცია.

სისტემაში ნაწილაკების რაოდენობა შეადგენს:

$$N = \frac{3C_V}{4\pi r^3}, \quad (4.1.2.)$$

სადაც a არის ნაწილაკის რადიუსი.

უჯრედში, ყოველი ნაწილაკის გარშემო იმყოფება სითხე მოცულობით:

$$V' = \frac{4}{3}\pi(R^3 - r^3), \quad (4.1.3.)$$

სადაც b არის უჯრედის რადიუსი.

უჯრედში სითხის მოცულობა აგეთვე შეგვიძლია გამოვსახოთ რიგორც:

$$V' = \frac{4}{3}\pi R^3(1 - C_V). \quad (4.1.4.)$$

განტოლებაბიდან (4.1.3., 4.1.4) გამოვსახოთ უჯრედის რადიუსი:

$$R = rC_V^{-\frac{1}{3}}, \quad (4.1.5.)$$

დისპერსული ნაწილაკების შემცველი სუსპენზიის სიბლანტე აღემატება დისპერსული სითხის საწყის სიბლანტეს, რაც გამოწვეულია ნაწილაკებს შორის დამაკავშირებელი ძალების გაჩენით. ამ შემთხვევაში საუბრობენ სითხის ეფექტურ სიბლანტეზე (μ_e). შეზღუდული დალექვისას სითხის დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტის გაზრდა იწვევს ყოველი ცალკეული ნაწილაკის სიჩქარის შემცირებას ნაწილაკის თავისუფალი დალექვის სიჩქარესთან შედარებით.

ეფექტური სიბლანტის მნიშვნელობა დამოკიდებულია მოცულობითი კონცენტრაციის სიდიდეზე. დისპერსიულ სისტემაში ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის მცირე მნიშვნელობებისას მყარი სფეროსებრი ნაწილაკების შემცველი ნაკადის ეფექტური დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტის მნიშვნელობა გამოთვალა ეინშტეინმა [109]:

$$\mu_e = \mu_0(1 + kC_v), \quad (4.1.6.)$$

სადაც μ_e არის ეფექტური დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტი;

μ_0 - სუფთა სითხის დინამიკური სიბლანტის კოეფიციენტი;

k - შემასწორებელი კოეფიციენტი, რომელიც ეინშტეინის გამოთვლით შეადგენს 2,5-ს.

ამ დამოკიდებულებების გაანგარიშებისას ხდებოდა მყარი ნაწილაკის ზეგავლენით სითხეში გაჩენილი დამატებითი დამაბულობების გამოთვლა. შემდგომი ექსპერიმენტების შედეგად დადგინდა, რომ განტოლება (4.1.7.) მართებულია მხოლოდ მოცულობითი კონცენტრაციებისას $C_v \leq 10^{-2}$ [110].

დავეყრდნოთ ნაშრომში [111] შეზღუდული დალექვის თეორიული და ექსპერიმენტალური კვლევების შედეგად მიღებული დამოკიდებულებების შედარებითი ანალიზის შედეგად, მიღებულ საანგარიშო დამოკიდებულებებს:

- სითხის ეფექტური სიბლანტის საანგარიშო დამოკიდებულება:

$$\mu_e = \mu_0 \cdot \exp\left(\frac{k_1 C_v}{1 - k_2 C_v}\right), \quad (4.1.7.)$$

- ეფექტური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ამსახველი განტოლება:

$$c_{d\gamma} = \frac{c_d}{1+k_3 C_V^{1/3}}, \quad (4.1.8.)$$

სადაც $c_{d\gamma}$ არის ეფექტური წინააღმდეგობის კოეფიციენტი;

c_d - წინააღმდეგობის კოეფიციენტი თავისუფალი დალექვისას.

- შეწონილი ნაწილაკის ეფექტური დალექვის სიჩქარე, რომელიც ასახავს ნაწილაკის სიჩქარეს შეზღუდული დალექვისას:

$$u_\gamma = \frac{u_\sigma}{1+k_3 C_V^{1/3}}. \quad (4.1.9.)$$

სადაც k_1 , k_2 და k_3 არის შემასწორებელი კოეფიციენტები;

u_γ - ნაწილაკის სიჩქარე შეზღუდული დალექვისას;

u_σ - შეწონილი ნაწილაკის თავისუფალი დალექვის სიჩქარე.

შეზღუდული დალექვის გაანგარიშებისას იყენებენ რეინოლდსის ეფექტურ რიცხვს (Re_γ), რომელიც გამოითვლება ფორმულით:

$$Re_\gamma = \frac{\rho u_\gamma d}{\mu_\gamma}, \quad (4.1.10.)$$

სადაც d არის ნაწილაკის დიამეტრი.

შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდის დასადგენად განვიხილოთ შეწონილი ნაწილაკის სითხეში დალექვისას, მასზე მოქმედი წინააღმდეგობის ღობის ძალის სიდიდე, რომელიც ნიუტონის ბლანტი ხახუნის წინააღმდეგობის კანონის მიხედვით შეადგენს:

$$F_{წინ}^{\partial} = c_d S \frac{\rho_\gamma u_\gamma^2}{2}, \quad (4.1.11.)$$

სადაც c_d არის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი, რომელიც დამოკიდებულია სხეულის ფორმასა და მოძრაობის რეჟიმზე;

$$S - \text{სხეულის მიდელის ფართობი } S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

განტოლებიდან (4.1.11.) და მიდელის ფართობის სიდიდის გათვალისწინებით, წინააღმდეგობის კოეფიციენტი გამოვსახოთ როგორც:

$$c_d = \frac{F_{წინ}^{\partial}}{\frac{1}{8} \pi d^2 \rho_\gamma u_\gamma^2}, \quad (4.1.12.)$$

მაშინ, განტოლებების (4.1.8. და 4.1.12.) გათვალისწინებით ეფექტური

წინააღმდეგობის კოეფიციენტის საანგარიშო დამოკიდებულება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$c_{d\gamma} = \frac{F_{წინ}^{\beta}}{\frac{1}{8} \pi d^2 \rho_b u_{\gamma}^2 (1 + k_3 C_V^{1/3})}. \quad (4.1.13.)$$

წინააღმდეგობის ძალის გამოსათვლელად გამოვიყენოთ შეწონილი ნაწილაკის თანაბარი სიჩქარით გრავიტაციული დალექვისას მასზე მოქმედი ძალების ბალანსის განტოლება:

$$F_{წინ}^{\beta} = F_{ს.ა.} - F_{არქ}. \quad (4.1.14.)$$

ნაწილაკზე მოქმედი სიმძიმის ძალა გამოითვლება დამოკიდებულებით:

$$F_{ს.ა.} = mg = \rho_b \frac{\pi d^3}{6} g, \quad (4.1.15.)$$

სადაც m არის ნაწილაკის მასა.

არქიმედეს ძალა, შეზღუდული დალექვისას, მეტია თავისუფალი დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედ ამავე ძალაზე. ვინაიდან შეზღუდული დალექვისას სითხეში იზრდება საშუალო ჰიდროსტატიკური წნევის გრადიენტი და არქიმედეს ძალის სიდიდე დამოკიდებულია ნაწილაკზე ვერტიკალურად მოქმედ ჰიდროსტატიკურ წნევათა სხვაობაზე, აქედან გაომდინარე არქიმედეს ძალის გამოთვლისას სითხის სიმკვრივის (ρ_b) მაგივრად უნდა გამოვიყენოთ სითხის ეფექტური სიმკვრივე [111]:

$$\rho_{\gamma} = \rho_b C_V + \rho_b (1 - C_V). \quad (4.1.16.)$$

სადაც ρ_{γ} არის სითხის ეფექტური სიმკვრივე;

ρ_b - მყარი შეწონილი ნაწილაკის სიმკვრივე;

ρ_b - სითხის სიმკვრივე.

შეზღუდული დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედი არქიმედეს ძალის სიდიდე სითხის ეფექტური სიმკვრივის (4.1.16) გათვალისწინებით, გამოისახება დამოკიდებულებით:

$$F_{არქ} = [\rho_b C_V + \rho_b (1 - C_V)] \frac{\pi d^3}{6} g, \quad (4.1.17.)$$

სადაც g არის თავისუფალი ვარდნის აჩქარება.

შეზღუდული დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედი სიმძიმის და არქიმედეს ძალების სხვაობა მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$F_{ს.ბ.} - F_{არქ.} = \rho_{\delta} \frac{\pi d^3}{6} g - [\rho_{\delta} C_V + \rho_{\beta}(1 - C_V)] \frac{\pi d^3}{6} g,$$

ან, არითმეტიკული გარდაქმნების შედეგად:

$$F_{ს.ბ.} - F_{არქ.} = \frac{\pi d^3}{6} g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_V). \quad (4.1.18.)$$

შესაბამისად, განტოლება (4.1.18.)-ის გათვალისწინებით, შეზღუდული დალექვისას, ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალის საანგარიშო განტოლება (4.1.14.) შეგვიძლია გამოვსახოთ როგორც:

$$F_{წინ.}^{\beta} = \frac{\pi d^3}{6} g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_V). \quad (4.1.19.)$$

წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ეფექტური სიდიდე შეზღუდული დალექვისას, განტოლებების (4.1.13., 4.1.19.) გათვალისწინებით, მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$c_{d\beta} = \frac{\frac{\pi d^3}{6} g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_V)}{\frac{1}{8} \rho_{\beta} u_{\beta}^2 \pi d^2 (1 + k_3 C_V^{1/3})}$$

და არითმეტიკული გარდაქმნების შემდეგ ვღებულობთ:

$$c_{d\beta} = \frac{4dg(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_V)}{3 \rho_{\beta} u_{\beta}^2 (1 + k_3 C_V^{1/3})}. \quad (4.1.20.)$$

ლამინარულ რეჟიმში შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის ძალის გამოსათვლელად გამოვიყენოთ სტოქსის ფორმულა [44]:

$$F_{წინ.}^{\beta} = 3\pi d u_{\beta} \mu_0, \quad (4.1.21.)$$

განტოლება (4.1.21.) გამოვსახოთ განტოლებების (4.1.7., 4.1.9.) გათვალისწინებით, მაშინ ლამინარულ რეჟიმში შეზღუდული დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალის სიდიდე იქნება:

$$F_{წინ.}^{\beta} = 3\pi d u_{\beta} \left(1 + k_3 C_V^{1/3}\right) \mu_0 \exp\left(\frac{k_1 C_V}{1 - k_2 C_V}\right). \quad (4.1.22.)$$

გავათანაბროთ წინააღმდეგობის ძალა (4.1.22.), სიმძიმის და არქიმედეს ძალების სხვაობასთან (4.1.18.):

$$3\pi d u_0 \left(1 + k_3 C_V^{1/3}\right) \mu_0 \exp\left(\frac{k_1 C_V}{1 - k_2 C_V}\right) = \frac{\pi d^3}{6} g(\rho_b - \rho_s)(1 - C_V). \quad (4.1.23.)$$

განტოლებიდან (4.1.23.) გამოვსახოთ შეწონილი ნაწილაკის შეზღუდული (ეფექტური) დალექვის სიჩქარე:

$$u_0 = \frac{g(\rho_b - \rho_s) d^2}{18\mu_0} \cdot \frac{(1 - C_V)}{\left(1 + k_3 C_V^{1/3}\right) \exp\left(\frac{k_1 C_V}{1 - k_2 C_V}\right)}. \quad (4.1.24.)$$

ვინაიდან განტოლებაში (4.1.24.) პირველი მამრავლი წარმოადგენს სტოქსის რეჟიმში შეწონილი ნაწილაკის თავისუფალი დალექვის სიჩქარეს:

$$\frac{g(\rho_b - \rho_s) d^2}{18\mu_0} = u_0, \quad (4.1.25.)$$

ნაწილაკის შეზღუდული დალექვის სიჩქარის საანგარიშო განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$u_0 = \frac{u_0(1 - C_V)}{\left(1 + k_3 C_V^{1/3}\right) \exp\left(\frac{k_1 C_V}{1 - k_2 C_V}\right)}. \quad (4.1.26.)$$

შემასწორებელი კოეფიციენტების სიდიდეების დასადგენად, ნაშრომში [111] შეზღუდული დალექვის ექსპერიმენტალური კვლევების მონაცემების კორელაციით, თანმიმდევრული დაახლოების მეთოდის გამოყენებით, მიღებულ იქნა k_2 და k_3 კოეფიციენტების მნიშვნელობები, რომელთა სიდიდემ ორივე შემთხვევაში შეადგინა:

$$k_2 = k_3 = 1. \quad (4.1.27.)$$

k_1 კოეფიციენტის სიდიდის დასადგენად განტოლების (4.1.26.) გალოგარითებით და კოეფიციენტების k_2 და k_3 მნიშვნელობების გათვალისწინებით მიღებულ იქნა დამოკიდებულება:

$$\ln \left[\frac{u_0}{u_0} \left(\frac{1 + C_V^{1/3}}{1 - C_V} \right) \right] = k_1 \left(\frac{C_V}{1 - C_V} \right) \quad (4.1.28.)$$

ექსპერიმენტულ მონაცემებზე დაყრდნობით (ცხრილი 4.1.), აიგო $\ln \left[\frac{u_0}{u_0} \left(\frac{1 + C_V^{1/3}}{1 - C_V} \right) \right]$ სიდიდის, $\frac{C_V}{1 - C_V}$ სიდიდეზე დამოკიდებულების გრაფიკი (ნახ. 4.2.).

გრაფიკზე გამოისახა დახრილი წრფე, რომლის ანალიზის შედეგად

შესაძლებელი გახდა k_1 კოეფიციენტის სიდიდის განსაზღვრა, რომელმაც შეადგინა:

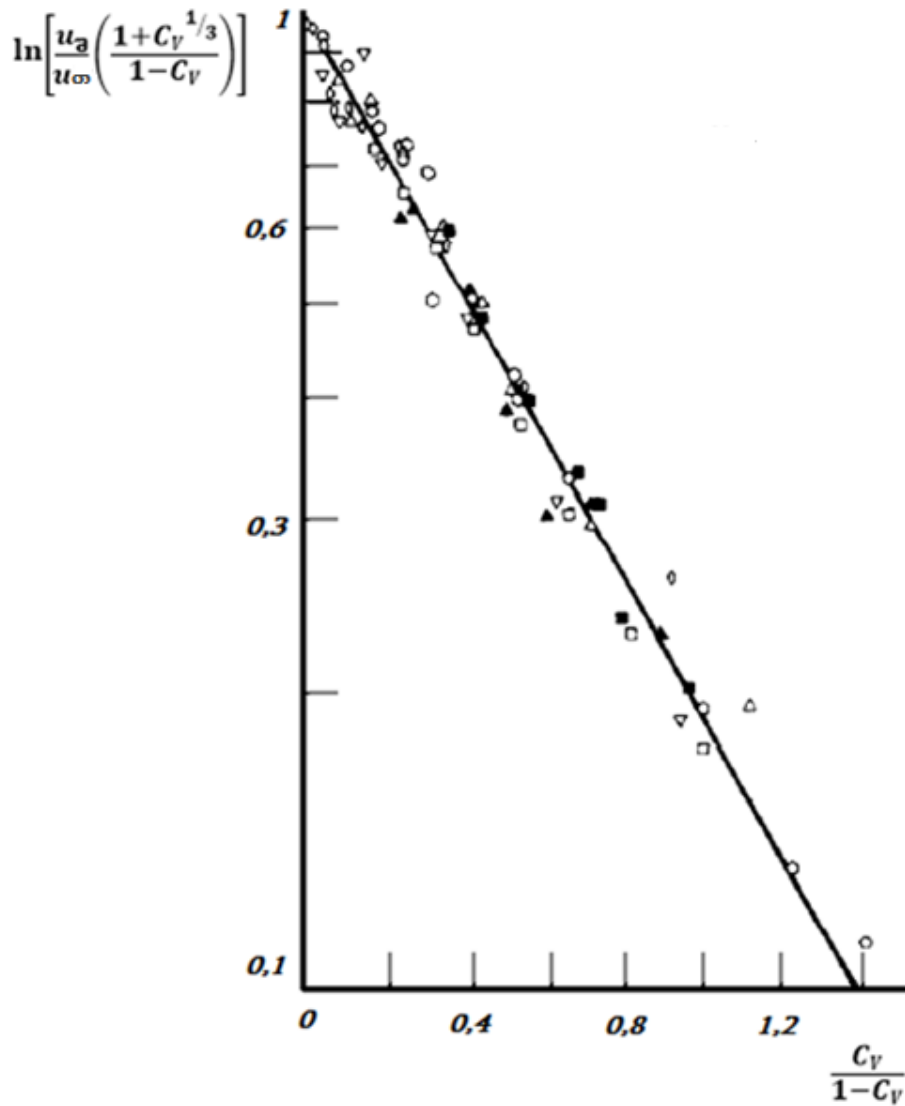
$$k_1 = \frac{5}{3}. \quad (4.1.29.)$$

შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დაღეკვის ექსპერიმენტალური მონაცემები

ცხრილი 4.1.

აღნიშვნა	მკვლევარი	Cv-ს დიაპაზონი	მასალა	ნაწილაკის ზომა d (სმ)	დისპერსიული სითხე
□	სტეინორი [112]	0.076-0.498	სახამებლის მარცვლები	0.174	ზეთი
■		0.076-0.498	მინის ბურთულები	0.00136	წყალი
△	უილსონი [113]	0.02-0.53	მინის ბურთულები	0.0012	წყალი
▲		0.02-0.53		0.0012	წყალი*
○		0.02-0.53		0.00089	წყალი
▽		0.02-0.53		0.00063	წყალი
▼		0.02-0.53		0.00063	წყალი*
⊙		0.02-0.53		0.00042	წყალი*
○	მერტესი და როდესი [114]	0.01-0.60	მინის ბურთულები	0.008	ნავთობი

* წყალს ემატებოდა 0,1% კალგონი, რათა არ მომხდარიყო ნაწილაკების ფლოკულაცია.



ნახ. 4.2. ექსპერიმენტალური მონაცემებით მიღებული მნიშვნელობების გამოყენებით გამოთვლილი $\ln \left[\frac{u_d}{u_0} \left(\frac{1+C_V^{1/3}}{1-C_V} \right) \right]$ სიდიდის დამოკიდებულება, $\frac{C_V}{1-C_V}$ სიდიდეზე

გამოვსახოთ მყარი შეწონილი ნაწილაკების შემცველი სითხის ეფექტური სიბლანტის საანგარიშო განტოლება (4.1.7.) k_1 და k_2 კოეფიციენტების მნიშვნელობის გათვალისწინებით:

$$\mu_e = \mu_0 \cdot \exp \left[\frac{5C_V}{3(1-C_V)} \right]. \quad (4.1.30.)$$

k_3 კოეფიციენტის სიდიდის გათვალისწინებით (4.1.29.), ეფექტური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდე განტოლებიდან (4.1.20.) შეადგენს :

$$c_{d0} = \frac{4dg(\rho_g - \rho_b)(1 - C_V)}{3\rho_b \mu_g^2 (1 + C_V^{1/3})}. \quad (4.1.31.)$$

შეწონილი ნაწილკის დალექვის სიჩქარე k_1 , k_2 და k_3 კოეფიციენტების გათვალისწინებით განტოლება (4.1.26.)-ის გამოყენებით შეადგენს:

$$u_g = \frac{g(\rho_g - \rho_b)d^2}{18\mu_o} \cdot \frac{(1 - C_V)}{\left(1 + C_V^{1/3}\right) \exp\left[\frac{5C_V}{3(1 - C_V)}\right]}, \quad (4.1.32.)$$

ან (4.1.25.) განტოლების გათვალისწინებით:

$$u_g = \frac{u_o(1 - C_V)}{\left(1 + C_V^{1/3}\right) \exp\left[\frac{5C_V}{3(1 - C_V)}\right]}. \quad (4.1.33.)$$

განვსაძვროთ რეინოლდსის ეფექტური რიცხვი, რომელიც ახასიათებს სითხის დინების რეჟიმს და ასახავს ინერციული და ხახუნის ძალების გავლენას ნაწილაკის მამოძრავებელ ძალაზე. ინერციული ძალების შემთხვევაში, როდესაც საუბარია თავისუფალ დალექვაზე, სითხის სიმკვრივეზე (ρ_b) არ ახდენს გავლენას ნაწილაკების მხრიდან გაჩენილი ჰიდროდინამიკული ძალები, განსხვავებით ხახუნის ძალებისაგან, როდესაც ნაწილაკების ურთიერთქმედების შედეგად იზრდება დინამიკური სიბლანტე (μ_g). აქედან გამომდინარე, განტოლებების (4.1.30., 4.1.33.) გათვალისწინებით რეინოლდსის ეფექტური რიცხვის სიდიდე იღებს მნიშვნელობას:

$$Re_g = \frac{\rho_b \mu_g d}{\mu_g} = Re_o \frac{u_g}{u_o \exp\left[\frac{5C_V}{3(1 - C_V)}\right]} = \frac{\rho_b d u_o (1 - C_V)}{\mu_o \left(1 + C_V^{1/3}\right) \exp\left[\frac{10C_V}{3(1 - C_V)}\right]}. \quad (4.1.34.)$$

აღსანიშნავია, რომ შეზღუდული დალექვისას სითხის სიბლანტის, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის, რეინოლდსის რიცხვის და დალექვის სიჩქარის ეფექტური სიდიდეები, შეწონილი ნაწილაკის თავისუფალი დალექვის პირობებში, როდესაც მოცულობითი კონცენტრაცია უახლოვდება ნულს, იღებს ლამინარული რეჟიმის საანგარიშო განტოლებების სახეს.

ამგვარად, უჯრედულ მოდელზე დაყრდნობით, თეორიული და ექსპერიმენტალური მონაცემების ანალიზის შედეგად დადგინდა, რომ შეზღუდული დალექვის კვლევისას, სითხის სიბლანტის, წინააღმდეგობის

კოეფიციენტის, რეინოლდსის რიცხვის და დალექვის საწყისი სიჩქარის მაგივრად, გამოთვლებში უნდა გამოყენებულ იქნას მათი ეფექტური მნიშვნელობები.

4.2. შეწონილი ნაწილაკების დალექვის მოდელირება ლამინარულ რეჟიმში, თავისუფალი და შეზღუდული დალექვის პირობებში

ჩამდინარე წყლების სალექრებში, სითხის დინების სიჩქარე არ არის დიდი, რათა მაქსიმალურად შენარჩუნდეს ლამინარული რეჟიმი. აგრეთვე მცირეა შეწონილ ნაწილაკთა დალექვის სიჩქარე შეზღუდული დალექვისას ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაციის პირობებში, ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების ზრდასთან ერთად, თავს იჩენს ტურბულენტური პულსაციების ჩახშობა, რის გამოც ხდება ლამინარული რეჟიმის შენარჩუნება რეინოლდსის რიცხვის მაღალი მნიშვნელობებისას ($Re < 100$) [112].

სალექრების გაანგარიშებისას, შეწონილი ნაწილაკების თავისუფალი და შეზღუდული დალექვის კვლევისას, ჰიდრავლიკური სისხოს დასადგენად, როგორც წესი, პირველ რიგში იკვლევენ შეწონილი ნაწილაკების თავისუფალ დალექვას და შემდგომ შეზღუდული დალექვის კანონზომიერებებს. ჩვენი მიზანია დალექვის ისეთი მათემატიკური მოდელის შექმნა, რომელიც აღწერს შეწონილი ნაწილაკის როგორც თავისუფალი დალექვის, ისე შეზღუდული დალექვის კანონზომიერებებს.

ვინაიდან შეზღუდული დალექვის მოდელირება რთულდება შეწონილ ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების გამო გაჩენილი დამატებითი წინააღმდეგობის ძალების გაჩენით, მოძრავ ნაწილაკებზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალისთვის შემოყავთ შემასწორებელი კოეფიციენტი (λ), რომელიც ითვალისწინებს შეწონილ ნაწილაკებზე მოქმედ დამატებით წინააღმდეგობებს:

$$F_{წინ}^შ = F_{წინ}^შ \cdot \lambda. \quad (4.2.1.)$$

სადაც $F_{წინ}^შ$ არის წინააღმდეგობის ძალა შეზღუდული დალექვისას;

$F_{წონ}^o$ არის წინააღმდეგობის ძალა თავისუფალი დალექვისას;

λ - შემასწორებელი კოეფიციენტი.

ნიუტონის ბლანტი ხახუნის კანონის მიხედვით თავისუფალი დალექვისას შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა შეადგენს (2.2.8.):

$$F_{წონ}^o = c_d S \frac{\rho_{\text{ს}} u_{\text{ს}}^2}{2} = c_d \frac{\pi d^2 \rho_{\text{ს}} u_{\text{ს}}^2}{8}.$$

შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის ძალის სიდიდე შეადგენს:

$$F_{წონ}^z = c_{d\text{ვ}} \frac{\pi d^2 \rho_{\text{ს}} u_{\text{ს}}^2}{8}. \quad (4.2.2.)$$

სადაც $c_{d\text{ვ}}$ არის ეფექტური წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდე, რომელიც განტოლებიდან (4.1.31.) შეადგენს:

$$c_{d\text{ვ}} = \frac{4dg(\rho_{\text{ს}} - \rho_{\text{ლ}})(1 - C_v)}{3\rho_{\text{ს}} u_{\text{გ}}^2 (1 + C_v^{1/3})}.$$

შემასწორებელი კოეფიციენტის (λ) სიდიდის განსაზღვრისთვის შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის ძალის განტოლება (4.2.2.) გამოვსახოთ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ეფექტური სიდიდის გამოყენებით:

$$F_{წონ}^z = \frac{4dg(\rho_{\text{ს}} - \rho_{\text{ლ}})(1 - C_v)}{3\rho_{\text{ს}} u_{\text{გ}}^2 (1 + C_v^{1/3})} \cdot \frac{\pi d^2 \rho_{\text{ს}} u_{\text{ს}}^2}{8}.$$

მარტივი არითმეტიკული გარდაქმნების შედეგად ზემოაღნიშნული განტოლება იღებს შემდეგ სახეს:

$$F_{წონ}^z = \frac{\pi d^3 g(\rho_{\text{ს}} - \rho_{\text{ლ}})}{6} \cdot \frac{(1 - C_v)}{(1 + C_v^{1/3})}. \quad (4.2.3.)$$

თავისუფალი დალექვისას შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა გამოვსახოთ ბალანსის განტოლების საშუალებით, როგორც სიმძიმისა და არქიმედეს ძალების სხვაობა:

$$F_{წონ}^o = F_{\text{ს.ძ.}} - F_{\text{არქ}} = mg - \rho_{\text{ლ}} V_{\text{ს}} g = \frac{\pi d^3 g(\rho_{\text{ს}} - \rho_{\text{ლ}})}{6}, \quad (4.2.4.)$$

ვინაიდან განტოლება (4.2.3.)-ის პირველი მამრავლი $\frac{\pi d^3 g(\rho_{\text{ს}} - \rho_{\text{ლ}})}{6}$

წარმოადგენს თავისუფალი დალექვისას შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედ წინააღმდეგობის ძალას, განტოლებიდან (4.2.1.) გამომდინარეობს, რომ განტოლება (4.2.3.)-ის მეორე მამრავლი $\frac{1-C_V}{1+C_V^{1/3}}$ გამოსახავს შემასწორებელი კოეფიციენტი λ -ს სიდიდეს:

$$\lambda = \frac{1-C_V}{1+C_V^{1/3}}. \quad (4.2.5.)$$

შესაბამისად შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის ძალის განტოლება (4.2.2.) შეგვიძლია გამოვსახოთ როგორც:

$$F_{წინ} = F_{წინ}^0 \cdot \lambda = F_{წინ}^0 \frac{1-C_V}{1+C_V^{1/3}}. \quad (4.2.6.)$$

აღსანიშნავია, რომ როდესაც მოცულობითი კონცენტრაცია C_V მცირეა და უახლოვდება ნულს, წინააღმდეგობის ძალის მნიშვნელობა უთანაბრდება თავისუფალი დალექვის წინააღმდეგობის ძალის სიდიდეს.

გამოვსახოთ შეწონილი ნაწილაკის გრავიტაციული დალექვის განტოლება შემდეგი სახით (3.1.4.):

$$\frac{du}{dt} = \frac{F_{ს.დ.} - F_{არქ} - F_{წინ}}{m}.$$

ნაწილაკზე მოქმედი სიმძიმის ძალა გამოითვლება დამოკიდებულებით (4.1.15.):

$$F_{ს.დ.} = mg = \rho_b \frac{\pi d^3}{6} g,$$

ვინაიდან შეზღუდული დალექვისას სითხეში იზრდება საშუალო ჰიდროსტატიკური წნევის გრადიენტი და არქიმედეს ძალის სიდიდე დამოკიდებულია ნაწილაკზე ვერტიკალურად მოქმედ ჰიდროსტატიკურ წნევათა სხვაობაზე, არქიმედეს ძალა შეზღუდული დალექვისას, მეტია თავისუფალი დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედ არქიმედეს ძალაზე [111]. აქედან გამომდინარე არქიმედეს ძალის გამოთვლისას სითხის სიმკვრივის (ρ_b) მაგივრად უნდა გამოვიყენოთ სითხის ეფექტური სიმკვრივე ფორმულიდან (4.1.16.):

$$\rho_g = \rho_b C_V + \rho_b (1 - C_V).$$

სადაც ρ_g არის სითხის ეფექტური სიმკვრივე;

C_V - შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია;

შეზღუდული დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედი არქიმედეს ძალის სიდიდე სითხის ეფექტური სიმკვრივის გათვალისწინებით, გამოისახება დამოკიდებულებით (4.1.17.):

$$F_{არქ} = \frac{\rho_g \pi d^3}{6} = g[\rho_b C_V + \rho_b(1 - C_V)] \frac{\pi d^3}{6} g.$$

შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის ძალის განტოლება (4.2.5.)

შეგვიძლია გამოვსახოთ როგორც:

$$F_{წიბ} = F_{წიბ}^0 \frac{1 - C_V}{1 + C_V^{1/3}}.$$

შეზღუდული დალექვისას ბალანსის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$m \frac{du}{dt} = \rho_b \frac{\pi d^3}{6} g - [\rho_b C_V + \rho_b(1 - C_V)] \frac{\pi d^3}{6} g - F_{წიბ}^0 \frac{1 - C_V}{1 + C_V^{1/3}}, \quad (4.2.7.)$$

ან თავისუფალი დალექვისას წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდის გათვალისწინებით $F_{წიბ}^0 = c_d \frac{\pi d^2 \rho_b u^2}{8}$:

$$m \frac{du}{dt} = \rho_b \frac{\pi d^3}{6} g - [\rho_b C_V + \rho_b(1 - C_V)] \frac{\pi d^3}{6} g - c_d \frac{\pi d^2 \rho_b u^2}{8} \frac{1 - C_V}{1 + C_V^{1/3}}. \quad (4.2.8.)$$

ნაწილაკის მასის სიდიდის გათვალისწინებით $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_b$ განტოლება (4.2.8.) მიიღებს სახეს:

$$\frac{du}{dt} = \frac{g(\rho_b - \rho_b)(1 - C_V)}{\rho_b} - c_d \frac{3\rho_b u^2}{4d\rho_b} \cdot \frac{1 - C_V}{1 + C_V^{1/3}}. \quad (4.2.9.)$$

მიღებული განტოლება (4.2.9.) წარმოადგენს არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებას, რომელსაც არ აქვს ანალიტიკური ამოხსნა. განტოლება იძენს წრფივი დიფერენციალური განტოლების სახეს მხოლოდ ლამინარული დალექვის პირობებში, როდესაც წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდეა $c_d = \frac{24}{Re} = \frac{24\mu}{\rho_b u}$. გამოვსახოთ განტოლება (4.2.9.)

ლამინარული დალექვის პირობებში წინააღმდეგობის კოეფიციენტის

სიდიდის გათვალისწინებით:

$$\frac{du}{dt} = \frac{g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_V)}{\rho_{\delta}} - \frac{18\mu u(1 - C_V)}{d^2 \rho_{\delta} (1 + C_V^{1/3})}. \quad (4.2.10.)$$

როგორც ზემოთ ავლინებთ, ჩამდინარე წყლების სალექრებში, ლამინარული რეჟიმის შენარჩუნების უზრუნველსაყოფად სითხის დინების სიჩქარე არ არის დიდი და შეზღუდული დალექვისას, ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაციის პირობებში, ხდება ტურბულენტური პულსაციების ჩახშობა, ლამინარული რეჟიმის შენარჩუნება ხორციელდება რეინოლდსის რიცხვის მაღალი მნიშვნელობებისას ($Re < 100$). ამიტომ შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ განტოლება (4.2.10.) ადვიკატურად ასახავს ჩამდინარე წყლების სალექრებში დალექვის კანონზომიერებებს.

მიღებულ განტოლებაში (4.2.10.) გასათვალისწინებელია შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის დამოკიდებულება დალექვის სიღრმეზე:

$$\frac{du}{dt} = \frac{g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_V(h))}{\rho_{\delta}} - \frac{18\mu u(1 - C_V(h))}{d^2 \rho_{\delta} (1 + C_V(h)^{1/3})}, \quad (4.2.11.)$$

სადაც $C_V(h)$ არის მოცულობითი კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულება.

მიღებულ განტოლებაში (4.2.11.) შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვალებადობის გასათვალისწინებლად შეგვიძლია ვისარგებლოთ ჩვენს მიერ მიღებული დამოკიდებულებით (3.4.10.):

$$C_{V(h)} = C_{V_0} e^{\beta h}, \quad (4.2.12.)$$

სადაც:

$$\beta = \frac{\pi d^3 g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})}{6kT}. \quad (4.2.13.)$$

გამოსახულება (4.2.13.)-ის გათვალისწინებით დამოკიდებულება (4.2.11.) მიიღებს სახეს:

$$\frac{du}{dt} = \frac{g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_{V_0} e^{\beta h})}{\rho_{\delta}} - \frac{18\mu u}{d^2 \rho_{\delta}} \cdot \frac{(1 - C_{V_0} e^{\beta h})}{\left(1 + C_{V_0}^{\frac{1}{3}} e^{\frac{\beta h}{3}}\right)}. \quad (4.2.14.)$$

იქიდან გამომდინარე, რომ შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხო შეადგენს $u = \frac{dh}{dt}$, გამოვსახოთ დიფერენციალურ განტოლებათა სისტემა:

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = \frac{g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_{v0}e^{\beta h})}{\rho_{\delta}} - \frac{18\mu u}{d^2\rho_{\delta}} \cdot \frac{(1 - C_{v0}e^{\beta h})}{\left(1 + C_{v0}^{\frac{1}{3}}e^{\frac{\beta h}{3}}\right)}, \\ u = \frac{dh}{dt}. \end{cases} \quad (4.2.15.)$$

შეწონილი ნაწილაკების დალექვის განტოლება (4.2.15.) შეგვიძლია გამოვსახოთ როგორც მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლება ცვლადით h :

$$\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})(1 - C_{v0}e^{\beta h})}{\rho_{\delta}} - \frac{18\mu}{d^2\rho_{\delta}} \cdot \frac{(1 - C_{v0}e^{\beta h})}{\left(1 + C_{v0}^{\frac{1}{3}}e^{\frac{\beta h}{3}}\right)} \frac{dh}{dt}. \quad (4.2.16.)$$

დალექვის საწყის პირობებს წარმოადგენს:

$$t_0 = 0; \quad h(t) = h_0; \quad \frac{dh(t)}{dt} = u_0, \quad (4.2.17.)$$

სადაც h_0 არის შეწონილი ნაწილაკის საწყისი კოორდინატა.

თავისუფალი დალექვის პირობებში მცირე კონცენტრაციის შემთხვევაში მოცულობითი კონცენტრაცია უახლოვდება ნულს და მიღებული დიფერენციალური განტოლება (4.2.16.) იღებს ლამინარულ რეჟიმში თავისუფალი დალექვის განტოლების სახეს:

$$\frac{d^2h}{dt^2} = \frac{g(\rho_{\delta} - \rho_{\beta})}{\rho_{\delta}} - \frac{18\mu}{d^2\rho_{\delta}} \cdot \frac{dh}{dt}. \quad (4.2.18.)$$

ჩვენს მიერ შემოთავაზებული დალექვის მოდელი ითვალისწინებს:

- შეწონილი ნაწილაკის პარამეტრებს - მათ დიამეტრსა და სიმკვრივეს;
- დისპერსიული გარემოს მახასიათებლებს - სითხის სიმკვრივესა და დინამიკურ სიბლანტეს და ტემპერატურას;
- ნაწილაკის ჰიდრავლიკურ სისხოს;
- შეწონილი ნაწილაკის დალექვის სიღრმის დროზე

დამოკიდებულებას.

- დალექვის პირობებს - სალექრში დალექვისას მყარი ფაზის მოცულობითი კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულებას.

აღსანიშნავია, რომ მოცულობითი კონცენტრაციის ცვლილება დამოკიდებულია როგორც შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმესა და ნაწილაკისა და დისპერსიული გარემოს მახასიათებლებზე, ასევე ჩამდინარე წყლების ტემპერატურაზე. ჩვენს მიერ მიღებული შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების ამსახველი განტოლება (4.2.16.) ითვალისწინებს როგორც ნაწილაკებისა და დისპერსიული გარემოს მახასიათებლებს, ასევე დისპერსიული გარემოს ტემპერატურას, რაც საშუალებას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ სალექრებში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის დინამიკა განსხვავებულ ტემპერატურულ პირობებში.

მიღებული დიფერენციალური განტოლების ამოხსნა შესაძლებელია რიცხვითი მეთოდებით, ან მწკრივებად დაშლის მეთოდით, თუმცა დღესდღეობით, არსებობს რიგი სპეციალიზირებული კომპიუტერული პროგრამები, რომელთა მეშვეობით მსგავსი დიფერენციალური განტოლებების ამოხსნა არ წარმოადგენს დიდ სირთულეს.

ამგვარად, შეწონილი ნაწილაკების დალექვის შემუშავებული მოდელი საშუალებას იძლევა, ლამინარელი რეჟიმის პირობებში, საწყის პირობებიდან გამომდინარე განისაზღვროს არა მხოლოდ შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხოს მნიშვნელობის ცვლილება დროის განმავლობაში, არამედ დადგინდეს ნაწილაკის დალექვის სიღრმე, როგორც თავისუფალი, ისე შეზღუდული დალექვისას. მიღებული დამოკიდებულებები ადეკვატურად ასახავს ბუნებაში მიმდინარე პროცესებს. მათი გამოყენება საშუალებას იძლევა დადგინდეს დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების ოპტიმალური ზომები, რაც უზრუნველყოფს მინიმალური ხარჯებით ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მოთხოვნილი ეფექტის მიღწევას.

ზოგადი დასკვნები

ნაშრომში წარმოდგენილი თეორიული კვლევების ანალიზის საფუძველზე მიღებულია შემდეგი დამოკიდებულებები:

- ლამინარულ რეჟიმში, შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ბალანსის განტოლების გამოყენებით და ნაწილაკისა და სითხის ფიზიკური მახასიათებლების გათვალისწინებით მიღებულ იქნა, მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლება, როგორც აჩქარებული ისე სტაციონარული მოძრაობისთვის;
- მიღებული ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლების ანალიზის შედეგად დადგინდა სტაციონარულ რეჟიმში გადასვლამდე, ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობის ხანგრძლივობის და მის მიერ გავლილი მანძილის საანგარიშო დამოკიდებულებები;
- ლამინარული რეჟიმის პირობებში, ნიუტონის მეორე კანონზე დაყრდნობით, ნაწილაკისა და ნაკადის სიჩქარეების გათვალისწინებით, მიღებულია მცირე ზომის, სფეროსებრი ნაწილაკის მიერ ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე განვლილი მანძილისა და ნაწილაკის რელაქსაციის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების საანგარიშო განტოლებები;
- კონსოლიდირებული ნაწილაკების ღრუბლის დალექვისას, ნაწილობრივ შეღწევად და შეუღწევად ღრუბლებზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალების გათანაბრებით მიღებულ იქნა კონცენტრაციის ზღვრული მნიშვნელობის საანგარიშო განტოლება, რომლის მიღწევისას ხდება ნაწილობრივ შეღწევადი დალექვის რეჟიმის გადასვლა შეუღწევადი ღრუბლის დალექვის რეჟიმში;
- ჰიპსომეტრულ კანონზე დაყრდნობით, საწყისი კონცენტრაციისა და შეწონილ ნაწილაკთა ლამინარული და გარდამავალი გარსშემოდენისას ჰიდრავლიკური სისხოს გათვალისწინებით,

მიღებულ იქნა შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების საანგარიშო განტოლება, რომელიც აგრეთვე ითვალისწინებს ჩამდინარე წყლების ტემპერატურას;

- წინააღმდეგობის ძალების გათანაბრებით ნაწილაკების ლამინარული და გარდამავალი რეჟიმებით გარსშემოდენისას და ორივე რეჟიმში ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს გათვალისწინებით, მიღებულ იქნა ზღვრული კონცენტრაციისა და ზღვრული სიღრმის საანგარიშო განტოლება, რომლის მიღწევის შემდეგ, ნაწილაკების დალექვის ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმი იცვლება გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმით;
- შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის კვლევების შედეგად მიღებულ ექსპერიმენტალურ და თეორიულ მონაცემებზე დაყრდნობით და შეწონილი ნაწილაკების სითხეში განაწილების უჯრედული მოდელის გამოყენებით დაზუსტდა სითხის დინამიკური სიბლანტის, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის, რეინოლდსის რიცხვის და ჰიდრავლიკური სისხოს ეფექტური მნიშვნელობები;
- შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ბალანსის განტოლებაზე დაყრდნობით, წინააღმდეგობის კოეფიციენტისა და სითხის სიმკვრივის ეფექტური სიდიდეების გათვალისწინებით, მიღებულ იქნა ლამინარულ რეჟიმში შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვისას ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო დიფერენციალური განტოლება.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. ყრუაშვილი ი., ინაშვილი ი., კუპრავეიშვილი მ., ბზიავა კ. წყლის რესურსების ინტეგრირებული მართვა. თბილისი, 2008. – 320 გვ.
2. Relationship between the enjoyment of economic, social and cultural rights and the promotion of the realization of the right to drinking water supply and sanitation. E/CN.4/Sub.2/2002/10. 25 June 2002.
3. <http://www.wri.org/our-work/topics/water>,
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 18.04.2019.
4. Introduction to the new EU Water Framework Directive.
http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/info/intro_en.htm#top-page,
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 18.04.2019.
5. Summary of Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control).
<http://ec.europa.eu/environment/industry/stationary/ied/legislation.htm>,
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 18.04.2019.
6. http://www.geostat.ge/cms/site_images/_files/georgian/agriculture/Garemo_2015.pdf,
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 18.04.2019.
7. <http://moe.gov.ge/res/images/file-manager/wyali/monitoringi/weliwdeuli-2015-wyali.pdf>,
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 18.04.2019.
8. http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/eia/documents/EaP_GREEN/Georgia_30.09_Consultation_meeting_on_the_draft_SEA_report/SEA_Scoping_Report_GEO.pdf,
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 18.04.2019.
9. **Воронов Ю. В., Яковлев С. В.** Водоотведение и очистка сточных вод. Москва, 2006. – 704 с.
10. **Яковлев С. В., Карелин Я. А., Ласков Ю. М., Воронов Ю. В.** Очистка производственных сточных вод. Москва, Стройиздат, 1985. – 336 с.
11. საქართველოს მთავრობის დადგენილება №343, 2014-2020 წწ. საქართველოს ბიომრავალფეროვნების სტრატეგიისა და მოქმედებათა გეგმის დამტკიცების შესახებ”, ქ. თბილისი, 8 მაისი 2014.
12. **Колова А. Ф., Пазенко Т. Я.** Водоснабжение и водоотведение. Красноярск. СФУ. 1012. – 147 с.
13. **Лихачев Н. И., Ларин И. И.** и др. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Справочник проектировщика. 2-е изд., М: Стройиздат, 1981 – 639 с.

14. **Максимов С. П., Алексеев И. А.** Обзор методов биологической очистки сточных вод // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XLI междунар. науч.-практ. конф. № 12(37). – Новосибирск: СибАК, 2014. <https://sibac.info/conf/tech/xli/40523>
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 18.04.2019.
15. **Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Ар ван Э.** Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. М.: Мир, 2004. – 480 с.
16. **Хальченко И. Г.,** Физико-химические методы очистки сточных вод с использованием модифицированных форм природных силикатов. Владивосток, 2015. – 125 с.
17. **Исхакова И. О., Ткачева В. Э.** Инновационные методы очистки сточных вод современного гальванического производства. *Вестник технологического университета*. Т.19, №10, 2016. – с. 26-31.
18. **Subtil E. L., Mierzwa J. C., Hespanhol I.** Comparison between a conventional membrane bioreactor (C-MBR) and a biofilm membrane bioreactor (BF-MBR) for domestic wastewater treatment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 31, No. 03, July - September, 2014. – pp. 683-691.
19. **Judd S.** The MBR book. Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment, Elsevier, Oxford. 2006. – 325 p.
20. **Медведьев И. Е., Григорьева Е. В., Поливанова Т. В.** Использование мембранных биореакторов для очистки сточных вод. *Сборник научных трудов 3-й Международной молодежной научной конференции: Юность и Знания – Гарантия Успеха*. Курск, 05-06 октября, 2016. – сс. 334-339.
21. **Степанов С. В., Габидуллина Л. А., Степанов А. С., Дубов О. В.** Биологическая очистка сточных вод нефтеперерабатывающего завода в биосорбционно-мембранном реакторе. *Водоснабжение и санитарная техника*. № 12, 2015. – сс. 24-31.
22. **Завьялов В. С.** Совершенствование электрохимической очистки сточных вод. Владивосток, Дальнаука, 2006. – 32 с.
23. **ნაცვლიშვილი ნ., ნაცვლიშვილი მ.** წყალმომარაგება და წყალარინება. თბ. : „საუნჯე“, 2010, – 304 გვ.
24. **Алексеев Л. С.** Контроль качества воды. Изд. 3-е перераб. и доп. Москва.: ИНФРА - М, 2004. – 154 с.
25. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 10 – 2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. Федеральное Агентство по Техническому Регулированию и Метрологии. Москва, Бюро НДТ, 2015.
26. **Алексеев Л. С., Гладков В. А.** Улучшение качества мягких вод. Москва, Стройиздат, 1994. – 148 с.

27. **ხამგალაძე ჰ.** ჩამდინარე წყლების გაწმენდა. გამომცემლობა „განათლება“. თბილისი, 1978. – 266 გვ.
28. **Яковлев С. В., Карелин Я. А. , Жуков А. И., Колобанов С. К.** Канализация. Изд. 5-е, перераб. и доп. Москва, Стройиздат, 1975. – 632 с.
29. **Пономарёв В. Г.** Выбор сооружений для очистки сточных вод от взвешенных загрязнений. *НДТ - Наилучшие Доступные Технологии*, № 1'2015. – сс. 30-37.
30. **Яковлев С. В., Калицун В. И.** Механическая очистка сточных вод. М: Стройиздат, 1972. – 230 с.
31. **Белов П. С.** Основы технологии нефтехимического синтеза. Москва Ленинград: Химия, 1965. – 380 с.
32. **Жуков А. И., Демидов Л. Г., Монгайт И. Д, Родзимер И. Д.** Канализация промышленных предприятий. М: Стройиздат, 1969. – 375 с.
33. **Яковлев С. В., Скидров И. В., Швецов В. Н.** и др. Биологическая очистка производственных сточных вод. Процессы, аппараты и сооружения. М.: Стройиздат, 1985. – 208 с.
34. **Вейцер Ю. И.** Методы и способы регенерации коагулянта из осадков. *Водоснабжение и канализация*. М.: ЦБНТИ МКХ, 1971. – сс.42-54.
35. **Вейцер Ю. И., Колобова З. А.** Осаждение коагулирующих суспензий. - м.: *ОНТИ АКХ*, Т. 1. 1960. – сс. 55-57.
36. **Соколов Д. Я.** Отстойные бассейны для ирригации и гидростанций. М., Сельхозгиз, 1945. – 444 с.
37. **Савельев С. Ф.** Исследование вертикальной составляющей скорости потока. *Научные исследования института гидротехники*, т. 22. Л., 1938. – сс.188-206.
38. **Шифрин С. М.** Современные способы механической очистки сточных вод. Ленинград; Москва: Госстройиздат. Ленингр. отд-ние., 1956. – 179 с.
39. **Mackenzie L. Davis.** Water and Wastewater Engineering. Design Principles and Practice. 2010, – 1278 p.
40. **Пикалов Е. С.** Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Механические и физические методы очистки промышленных выбросов в атмосферу и гидросферу. Владимир, 2015. – 79 с.
41. **Navier.** Mémoire sur les lois du mouvement des fluides. *Mémoires de l'Académie des sciences de l'Institut de France*. Т. 6, 1822. – pp. 389-416.
42. **Poisson.** Mémoire sur les équations générales de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques et des fluids. *Journal de l'École Polytechnique*. Т. 13, 1831. – pp. 139-186.
43. **De Saint-Venant.** Note à au Mémoire sur la dynamique des fluides, présenté le

14 avril 1834. *Comptes rendus*. Т. 17, № 22, 1843. – pp. 1240-1244.

44. **Stokes**. On the theories of internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. Т. 8, 1845. – pp. 287-319.
45. **Малюга В. С.** Численное моделирование обтекания сферы потоком вязкой несжимаемой жидкости. *Прикладная гидромеханика*. Том 15, N 3. 2013. – с. 43-67.
46. **Кременецкий Н. Н., Штеренлихт Д. В., Алышев В. М., Яковлева Л. В.** Гидравлика – 3-е изд., перераб. М.: Энергия, 1980. – с.384.
47. **Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И.** Гидравлика. 4-е изд., перераб. М.: Энергия, 1964 – с.352.
48. **Шишкин З. Н., Карелин Я. А., Колобанов С. К., Яковлев С. В.** Канализация. Госстройиздат, Москва, 1960, – 592 с.
49. **Башаров М. М., Сергеева О. А.** Устройство и расчет гидроциклонов. Казань, 2012. – с. 92.
50. **Oseen C. W.** The theory of liquid crystals. *Trans. Faraday Soc.* 29, 1933 – pp.883-889.
51. **Кафаров В. В., Дорохов И. Н., Кольцова Э. М.** Системный анализ процессов химической технологии. Процессы массовой кристаллизации из растворов и газовой фазы. Издательство «Наука», Москва, 1983. – 368 с.
52. **Прандтль Л.** Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
53. **Burgers J. M., Proc.** Kon. Nederl. Akad. Wetensch. 42, 1939. – p. 293.
54. **Nikuradse J.** Strömungsgesetze in rauhen Röhren. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens. *Forschungsheft 361. Beilage zu, Ausgabe B, Bd. 4, Berlin, 1933.* – pp. 1-22.
55. **Richards, Robert H.** A Textbook of Ore Dressing. *Engineering and Mining Journal*, New York: McGraw-Hill, 1932. – p. 233.
56. **Шрайбер А. А.** Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений. *Итоги науки и техники. Комплексные и специальные разделы механики*. М.: ВИНТИ. Т. 3, 1988. – сс. 3-80.
57. **Архипов В.А., Березиков А.П.** Основы теории инженерно-физического эксперимента. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. – с. 206.
58. **Кравцов М. В. Кравцов А. М.** Общее уравнение закона гидравлического сопротивления при стесненном падении одиночного шара и движении жидкости в зернистых слоях. *Гидроэнергетика*, 2014. – с. 85-96.
59. **Павлов В. А.** Физический механизм уменьшения сопротивления за счет слабой ионизации пограничного слоя при обтекании тела звуковым

потоком. *Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 4. Вып. 2, 2010.* – с. 16-22.

60. **Winterwerp J. C.**, A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research* 36, 1998. – pp. 309-326.
61. **Дроздов Е. В., Журавлева И. В.** Расчет гидравлической крупности частиц загрязнений сточных вод. *Строительство и архитектура*. Выпуск № 2, 2009. – с. 29-35.
62. **Ланчаков Г. А.** Технологические процессы подготовки природного газа и методы расчета оборудования. Москва. «Недра», 2000. – 280 с.
63. **Студёнов И. И. Шилова Н. А.** Расчет гидравлической крупности взвеси при моделировании динамики концентрации взвешенных веществ в приустьевых районах арктических морей на примере Белого моря. *Арктика: экология и экономика* № 3 (19), 2015. – с. 40-47.
64. **Ботук Б. О.** Очистка бытовых сточных вод. Издательство министерства коммунального хозяйства РСФСР. Ленинград. 1949. – 304 с.
65. **Васильев Г. В.** Водоснабжение и канализация предприятий легкой промышленности. М., 1954. – 236 с.
66. **Демидов Л. Г., Шигорин Г.Г.** Канализация. I и II часть. М: Минкомхозиздат, 1951. – 364 с.
67. **Федоров Н. Ф., Шифрин С.М.** Канализация. М: "Высшая школа", 1968. – 592 с.
68. **Гиргидов А. Д.** Расчет длины ирригационных отстойников. *Охрана окружающей среды от загрязнения промышленными выбросами*. Л.: Изд-во ЛТИ ЦБП, 1975. – с. 56-63.
69. **Гиргидов А. Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика). С - Пб: Изд-во СПбГПУ, 2007. – 340 с.
70. **Гиргидов А. Д.** Турбулентная диффузия с конечной скоростью. С - Пб: Изд-во СПбГПУ, 1996. – 260 с.
71. **Гиргидов А. Д.** О феноменологических градиентных зависимостях. *Физико-математические науки*. № 2, С - Пб: Изд-во СПбГПУ. 2011. – сс.122-126.
72. **Rus F., Ciulic L. G. Marinuc M.** Experimental research regarding the influence of inlet geometry and air stream characteristics over separation efficiency. *Journal of Engineering Studies and Research*. Vol. 17. No. 2, 2011. – pp. 83-85.
73. СНИП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения. Государственный комитет СССР по делам строительства. Москва, 1986.
74. **Кумина Т. Д.** Расчет выноса взвеси из радиальных и горизонтальных отстойников. *Труды Ленинградского политехнического института*. № 383. Ленинград: Изд-во: ЛГПИ, 1982. – с.77-80.
75. **Нагорная Е. К.** Современные методы исследования процесса массопереноса в отстойниках систем водоотведения. *Zbior raportow*

naukowych. Aktualne problemy w współczesnej nauki. Wydawca: Sp. z.o.o. "Diamond trading tour", 2013. – с. 5-12.

76. **Zhou S.** State of the Art Clarifier Modeling Technology-Part II / S. Zhou, A. McCorquodale, J. Richardson, T. Wilson. *Water Environment Federation, WEFTEC*, 2005. – pp. 1-16.
<http://www.hydrosims.com/files/StateofheartmodelingclarifiersWeb>
უკანასკნელად იქნა გადამოწმებული - 18.04.2019.
77. **Plosz B. G.** A critical review of clarifier modelling: State-of-the-art and engineering practices. B. G. Plosz, I. Nopens, L. Rieger, A. Griborio, J. De Clercq, P. A. Vanrolleghem, G. T. Daigger, I. Takacs, J. Wicks, G. A. Ekama. *Proceedings 3rd IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar (WWTmod2012)*. Mont-Sainte-Anne, Quebec, Canada, February 26-28, 2012. Canada, 2012. - pp. 27-30.
78. **Нигматулин Р. И.** «Динамика многофазных сред». Часть I. Наука. Москва. 1987. – 464 с.
79. **Hari Prasad Neopane.** Sediment Erosion in Hydro Turbines, PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, 2010. - 105 p.
80. **Василевский М. В., Романдин В. И., Зыков Е. Г.** Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов. Издательство ТПУ. Томск. 2013. – 288 с.
81. **Василевский М. В., Зыков Е. Г.** Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах. Издательство ТПУ. Томск. 2005. – 89 с.
82. **Фукс Н. А.** Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
83. **Теверовский Е. Н., Дмитриев Е.С.** Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
84. **Курочкин В. Е., Шарфарец Б. П., Шарфарец Е. Б.** Обзор математических моделей, описывающих процесс транспорта примесей и одиночных частиц в потоке жидкости. *Научное приобретение*. Том № 4, 2015. – сс. 36-42.
85. **Koike S., Takahashi H., Tanaka K., Hirota M., Takita K., Masuya G.** Correction method for particle velocimetry data based on the stokes drag law. *AIAA Journal*. – V. 45, N 11. 2007. – p. 2770-2777.
86. **ინაშვილი ი., დენისოვა ი.** სითხის ნაკადში შეწონილი ნაწილაკების რელაქსაციის სიჩქარის კვლევა. *საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი. სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "ჰიდროინჟინერია"*. N 1-2. 2019
87. **Metzger B., Nicolas M., Guazzelli E.** Falling clouds of particles in viscous fluids. *Journal of Fluid Mechanics*. № 580, 2007. – p. 283-301.
88. **Зимон А. Д., Лещенко Н. Ф.** Коллоидная химия: Москва, «Агар» 2003. – 319 с.

89. **Пилов П. И.** Гравитационная сепарация полезных ископаемых. Днепропетровск: Национальный горный университет, 2003. – 123 с.
90. **Arkhipov V. A., Usanina A. S.** Regimes of sedimentation of a consolidated system of solid spherical particles. *Pleiades Publishing. Fluid Dynamics*, Vol. 52, No. 5, 2017. – pp. 666-677.
91. **Abade G. C. Cunha F. R.** Computer simulation of particle aggregates during sedimentation. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. № 196, 2007. – p. 4597-4612.
92. **Круашвили И., Инашвили И.** Теоретические основы транспортирования взвешенных твердых частиц безнапорным водным потоком. *Известия Армянской Сельскохозяйственной Академии*, Ереван, № 5, 2005. – сс. 88 - 93.
93. **Kruashvili I., Inashvili I.** Mathematical model of defining concentration and turbulent exchange coefficient in suspended streams. *Annals of Agrarian Science*, vol. 3. N1, 2005. – pp. 98-102.
94. **Антонникова А. А., Архипов В. А.** и др. Методы исследования гравитационного осаждения консолидированной системы частиц. *Ползуновский вестник* № 3, 2016. – сс. 119-124.
95. **ინაშვილი ი., ინაშვილი ი.** ჩამდინარე წყლებში კონსოლიდირებული ნაწილაკების დალექვის კანონზომიერებები. *საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომების კრებული კრებული N2 (508)-2018*, გვ. 31-37.
96. **Касаткин А. Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. 10-ое изд., стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973 г. М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
97. **Безруков Л. В.** Физика: в 3 ч. Ч.1: Механика. Молекулярная физика. Новочерк. гос. мелиор. акад., 2011. – 232 с.
98. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. Москва: Наука, 1974. – 714 с.
99. **Иванов С. А.** Газовая динамика. Самара. «Самарский ГТУ», 2014. – 61 с.
100. **M. Jean Perrin.** Brownian Movement and Molecular Reality. Translated from the *Annales de chimie et de physique*, 8me series, 1909, by F. Soddy. Taylor and Francis. London. 1910. – p. 93.
101. **Болдырев А. И.** Физическая и коллоидная химия. 2-е изд., перераб. И доп. М.: Высш. шк., 1983. – 408 с.
102. **Воюцкий С. С.** Курс коллоидной химии. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: «Химия», 1975. – 512 с.
103. **Килимник Д. Ю.** Разработка метода расчета скоростей седиментации частиц в полидисперсной суспензии: Дис. канд. техн. наук: 25.00.36: Санкт-Петербург, 2004. – 140 с.

104. **Кикоин А. К., Кикоин И. К.** Общий курс физики. Молекулярная физика. Издание второе, переработанное. М.: 1976. – 480 с.
105. **Brubacher L.** An experiment to measure Avogadro's constant. Repeating Jean Perrin's confirmation of Einstein's Brownian motion equation. *Chem 13 news*. May, 2006. – pp. 14-17.
106. **ინაშვილი ი., დენისოვა ი.** ჩამდინარე წყლების სალექრებში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვლილების დინამიკის კვლევა. *სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "ჰიდროინჟინერია"*. N-2(25-26), 2018. გვ 43-49.
107. **Броунштейн Б. И., Фишбейн Г. А.** Гидродинамика, массо- и теплообмен в дисперсных системах. Л.: Химия, 1977. – 279 с.
108. **Вдовин К. Н., Сеницкий Е. В., Хренов И. Б., Дерябин Д. А.** Поведение экзогенных добавок в железоуглеродистых сплавах. Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. *Материалы 74-й международной научно-технической конференции*. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, Т. 1. 2016. – сс. 65-68.
109. **Einstein A.** A new determination of molecular dimensions, *Ann. Phys.* 19 (4), 1906. – pp. 289-306.
110. **Рудяк В. Я., Белкин А. А., Егоров В. В.** Об эффективной вязкости наносупензий. *Журнал тех. физики*, Том 79, вып. 8. 2009. – сс. 18-25.
111. **Barnea E., Mizrahi J.** A generalised approach to the fluid dynamics of particulate systems. Part 2. Sedimentation and fluidisation of clouds of spherical liquid drops. *Can. J. Chem. Eng.* V. 53, № 5, 1975. – pp. 461-468.
112. **Steinour J. H.**, *Znd. Eng. Chem.*, 36, 1944. – p. 618.
113. **Wilson B. W.** *Austral. J. Appl. Sci.*, 4, 1953. – p. 274.
114. **Mertes T. S. and Rhodes H. B.** *Chem. Eng. Progr.*, 51, 1955. – pp. 429-517.
115. **Носырев М. А.** Определение скоростей и концентраций дисперсных частиц при стесненном движении на основе минимума интенсивности диссипации энергии. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук — Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 104 с.