

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი
ხელნაწერის უფლებით

ირინა დენისოვა

ჩამდინარე წყლების სედიმენტაციის კვლევა შეწონილი ნაწილაკების
ჰიდრაულიკური სისხოს გათვალისწინებით

სადოქტორო პროგრამა მშენებლობა

შიფრი 0406

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2019 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
სამშენებლო ფაკულტეტი
წყალმომარაგების, წყალარინების, თბოაირმომარაგებისა და შენობათა
საინჟინრო აღჭურვის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ირმა ინაშვილი
პროფესორი, ტ.მ.კ.
აკადემიური დოქტორი.

რეცენზენტები: შორენა კუპრეიშვილი
ასოცირებული პროფესორი,
ტ.მ.კ. აკადემიური დოქტორი.

დავით ჩხაიძე
ასოცირებული პროფესორი,
ტ.მ.კ. აკადემიური დოქტორი.

დაცვა შედგება 2019 წლის 10 ივლისს 15 საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამშენებლო ფაკულტეტის
სადისერტაციო კოლეგიის სხდომაზე, სტუ-ის სამშენებლო ფაკულტეტი I
კორპუსი, მე-5 სართული, ბიბლიოთეკა, აუდიტორია 508.

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 71.

დისერტაციის გაცნობა შესაძლებელია სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,
ხოლო ავტორეფერატისა – ფაკულტეტის ვებგვერდზე.

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი: დემურ ტაბატაძე
პროფესორი, ტ.მ.კ.
აკადემიური დოქტორი.

შესავალი

ნაშრომის საერთო დახასიათება

თემის აქტუალობა

წყალი ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ბუნებრივი რესურსია დედამიწაზე. 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.

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) და სხვა.

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 იმისა, რომ დღესდღეობით ექსპლუატაციაში შეჰყავთ ჩამდინარე წყლების გამწმენდი ახალი ნაგებობები, ქვეყნის ეკონომიკური მდგომარეობისა და საკანონმდებლო ხარვეზების გამო საქართველოს ჩამდინარე წყლების ინფრასტრუქტურის მდგომარეობა საკმაოდ მძიმეა. საყოფაცხოვრებო და სამრეწველო ჩამონადენი, ხშირ შემთხვევაში, ყოველგვარი გაწმენდის გარეშე ჩაედინება წყალსატევებში, რითაც დიდ ზიანს აყენებს მათ ეკოსისტემას.

შექმნილი მდგომარეობიდან გამოსავალს წარმოადგენს ჩამდინარე წყლების გამწმენდი სისტემების მოდერნიზაცია და ახალი, მოწინავე ტექნოლოგიების გამოყენება, მაგრამ დღევანდელი ეკონომიკური ვითარებიდან გამომდინარე, აგრეთვე მეტად აქტუალურია არსებული, დაბალხარჯიანი და ეფექტური მეთოდების დახვეწა.

ჩამდინარე წყლებიდან მყარდისპერსიული მინარევების მოშორების ყველაზე მარტივ ხერხს წარმოადგენს სედიმენტაცია - შეწონილი ნაწილაკების გრავიტაციული დალექვა. მყარდისპერსიული მინარევების დალექვა ხდება სალექრებში, ჩამდინარე წყლების მექანიკური გაწმენდის საფეხურზე.

ერთ-ერთი ძრითადი პარამეტრი, რომელიც გამოიყენება დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების გაანგარიშებისას არის შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიჩქარე - ჰიდრავლიკური სისხო. ჰიდრავლიკური სისხოს 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 ჰიდრავლიკური სისხოს მაქსიმალურად ზუსტი განსაზღვრა.

კვლევის მიზანი და ამოცანები

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია ჩამდინარე წყლების დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების - სალექრების ჰიდრავლიკური და სამშენებლო პარამეტრების გაანგარიშების მიზნით, ჩამდინარე წყლებში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის კანონების კვლევა. კერძოდ, შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხოს გაანგარიშების მეთოდის სრულყოფა; ცალკეული ნაწილაკის აჩქარებული და მუდმივი სიჩქარით მოძრაობის საანგარიშო დამოკიდებულებების შემუშავება; ნაწილაკის სითხის ნაკადისგან

განსხვავებული სიჩქარით მოძრაობისას მისი რელაქსაციის სიჩქარის დადგენა; მაღალი კონცენტრაციების პირობებში კონსოლიდირებულ ნაწილაკთა ღრუბლის დალექვის კანონზომიერებების კვლევა; შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვისას ნაწილაკთა სიჩქარის და დალექვის სიღრმის 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, 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 თანაბარი სიჩქარით მოძრაობისას;
- მიღებული ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლების ანლიზის შედეგად დადგინდა თანაბარი მოძრაობის 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 ექსპერიმენტულ და თეორიულ მონაცემებზე დაყრდნობით და შეწონილი ნაწილაკების სითხეში განაწილების უჯრედული მოდელის გამოყენებით დაზუსტდა სითხის დინამიკური სიბლანტის, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის და რეინოლდსის რიცხვის 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.

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 დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების პროექტირებისას.

კვლევის შედეგები ხელს შეუწყობს ჰიდრავლიკაში, წყალმომარაგებაში, 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.

დისერტაციის ძირითადი შედეგები თავების მიხედვით

სადისერტაციო ნაშრომის პირველ თავში „ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მეთოდები და გამწმენდი ნაგებობები“ აღწერილია: ჩამდინარე წყლების კლასიფიკაცია დამაბინძურებლების, კატეგორიების, მინარევების ზომის და კონცენტრაციის მიხედვით; ჩამდინარე წყლების შემადგენლობის განსაზღვრის კრიტერიუმები; ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მეთოდები; სალექრების კლასიფიკაცია და მათი კონსტრუქციული გადაწყვეტილებები, კერძოდ, ჰორიზონტალური, ვერტიკალური, რადიალური სალექრები და სალექრები თხელფენოვანი ელემენტებით; სალექრების მუშაობის პრინციპი.

განხილულია სხვადასხვა ტიპის სალექრების უპირატესობები და სუსტი მხარეები. აღინიშნულია, რომ ჩამდინარე წყლების გაწმენდის ყველაზე მარტივ, დაბალხარჯიან და ფართოდ გავრცელებულ მეთოდს წარმოადგენს მექანიკური გაწმენდა, კერძოდ შეწონილი დამაბინძურებლების მოშორება სალექრებში სედიმენტაციის საშუალებით.

ნაშრომის მეორე თავში „გამწმენდი ნაგებობების ჰიდრაულიკური და გეომეტრიული პარამეტრები“ განხილულია: შტეიერნაგელის, პ.ს. ბელოვის, ა. ი. ჟუკოვის, ი. ვ. ვეიცერის, ეკენფელდის, ო'კონორის, და სხვა მკვლევართა მიერ ჩატარებული ჩამდინარე წყლების დალექვის პროცესის შემსწავლელი ექსპერიმენტული კვლევები; ა. ნავიეს, ო. კომის, ს. პუასონმის, სენ-ვენანის, ჯ. სტოქსის, კ. ოზენის მიერ მიღებული შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრაულიკური სისხოს განმსაზღვრელი დიფერენციალური განტოლებები; ლ. პრანდლტლის, ი. ბიურგერის, ი. ნიკურძის მიერ შემუშავებული თეორია ნაწილაკის გარსშემოდენისას წარმოქმნილი ხახუნის ძალების შესახებ; ალენის, კლაჩკოს, აეოვ - ტოდესისა და სხვა მკვლევართა მიერ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის განმსაზღვრელი ნახევრად ემპირიული და ემპირიული დამოკიდებულებები; დინამიკური სისტემების მსგავსების ძირითადი კრიტერიუმები, როგორცაა რეინოლდსის რიცხვი, არქიმედეს და გალილეოს კრიტერიუმები; კრიტერიალური განტოლებების და მსგავსების კრიტერიუმების გრაფიკული დამოკიდებულებების მეშვეობით

შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხოს გაანგარიშების მეთოდოლოგია; ს. ვ. იაკოვლევის და ვ. ი. კალიცუნის, მიხედვით სალექრების გაანგარიშების მეთოდი, რომელიც მართებულია მხოლოდ ლამინარული რეჟიმის პირობებში; ა. ი. ჟუკოვის, და ა. დ. გირგიდოვის მეთოდოლოგიით სალექრების გაანგარიშება, რომელიც ითვალისწინებს ნაწილაკის სიჩქარის ჰორიზონტალურ და ვერტიკალურ მდგენელებად დაშლას; პირველადი სალექრების გაანგარიშების განზოგადოებული მეთოდი, რომელიც ეფუძნება ლაბორატორიულ პირობებში მიღებულ მონაცემებს.

ლიტერატურული წყაროების ანალიზის საფუძველზე ჩვენს მიერ გამოვლენილია სალექრების გაანგარიშების ზემოაღნიშნული მეთოდების სუსტი მხარეები, რაც იწვევს სალექრების არაეფექტურ ფუნქციონირებას, კერძოდ, სალექრების გაბარიტების არასწორი შერჩევის შემთხვევაში ვერ ხერხდება ჩამდინარე წყლების მოთხოვნილი გაწმენდის ეფექტის მიღწევა ან ხდება ხარჯის გაზრდა, რაც ეკონომიკურად გაუმართლებელია.

სადისერტაციო ნაშრომის მესამე თავში **”ჩამდინარე წყლების დისპერსიული ფაზის სედიმენტაციის კვლევა”** დადგინდა შეწონილი ნაწილაკების თავისუფალი დალექვის კანონზომიერებები. აგრეთვე გამოკვლეულ იქნა ორფაზიან ნაკადში ნაწილაკების ჰორიზონტალური გადაადგილებისას მათი რელაქსაციის სიჩქარე.

დისპერსიულ სისტემებში სფეროსებრი ნაწილაკის თავისუფალი დალექვის კვლევისას გამოყენებული იყო შეწონილი ნაწილაკის გრავიტაციული დალექვის განტოლება. ნაწილაკზე მოქმედი ძალების პროექცირება განხორციელდა ვერტიკალურ ღერძზე:

$$m \frac{du}{dt} = F_{ს.ა.} - F_{არქ} - F_{წინ}, \quad (1)$$

სადაც: m არის ნაწილაკის მასა, კგ; $\frac{du}{dt}$ - ნაწილაკის აჩქარება, მ/წმ²;

$F_{ს.ა.}$ - ნაწილაკზე მოქმედი სიმძიმის ძალა, ნ;

$$F_{ს.ა.} = mg. \quad (2)$$

g - თავისუფალი ვარდნის აჩქარება, მ/წმ²; $F_{\text{არქ}}$ - ნაწილაკზე მოქმედი არქიმედეს ძალა, ნ:

$$F_{\text{არქ}} = \rho_{\text{ს}} \cdot V_{\text{ს}} \cdot g = m \frac{\rho_{\text{ს}}}{\rho_{\text{ფ}}} g, \quad (3)$$

$\rho_{\text{ს}}$ არის სითხის სიმკვრივე, კგ/მ³; $\rho_{\text{ფ}}$ - ნაწილაკის სიმკვრივე, კგ/მ³; $V_{\text{ს}}$ - ნაწილაკის მოცულობა, მ³; $F_{\text{წინ}}$ - ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა, ნ:

$$F_{\text{წინ}} = c_d \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_{\text{ს}} u^2}{2}, \quad (4)$$

d - ნაწილაკის დიამეტრი, მ; c_d - წინააღმდეგობის კოეფიციენტი; u - ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო, მ/წმ.

ზემოაღნიშნული ძალების, ლამინარულ რეჟიმში ნაწილაკების გარსშემოდენისას წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდის ($c_d = \frac{24}{\text{Re}}$) გათვალისწინებით და რიგი გარდაქმნების შედეგად, სფეროსებრი ნაწილაკის გრავიტაციული დაღეჭვის განტოლებამ მიიღო შემდეგი სახე:

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\rho_{\text{ფ}} - \rho_{\text{ს}}}{\rho_{\text{ფ}}} - \frac{18\mu}{\rho_{\text{ფ}} d^2} u. \quad (5)$$

თანაბარი მოძრაობის რეჟიმში, როდესაც $\frac{du}{dt} = 0$, ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო განისაზღვრება სტოქსის ფორმულით:

$$u = \frac{(\rho_{\text{ფ}} - \rho_{\text{ს}}) d^2}{18\mu} g. \quad (6)$$

განტოლება (5)-ის ამოსახსნელად შემოვიღეთ ფარდობითი სიდიდეები:

- დროის მასშტაბად შევარჩიეთ ისეთი სიდიდე, რომელსაც გააჩნია დროის განზომილება t_* :

$$t_* = \frac{\rho_{\text{ფ}} d^2}{18\mu}. \quad (7)$$

- სიჩქარის მასშტაბად - შეწონილი ნაწილაკის სიჩქარე თავისუფალი დაღეჭვისას (u_*):

$$u_* = \frac{(\rho_{\text{ფ}} - \rho_{\text{ს}}) d^2}{18\mu} g. \quad (8)$$

შემოვიტანეთ აღნიშვნები:

$$y = \frac{u}{u_*}, \quad (9)$$

$$\tau = \frac{t}{t_*}. \quad (10)$$

რიგი გარდაქმნების შედეგად მივიღეთ შემდეგი სახის განტოლება:

$$\frac{dy}{d\tau} = 1 - y, \quad (11)$$

საწყისი პირობებიდან გამომდინარე ($\tau = 0$; $y = 0$) დიფერენციალური განტოლების (11) ამოხსნაა:

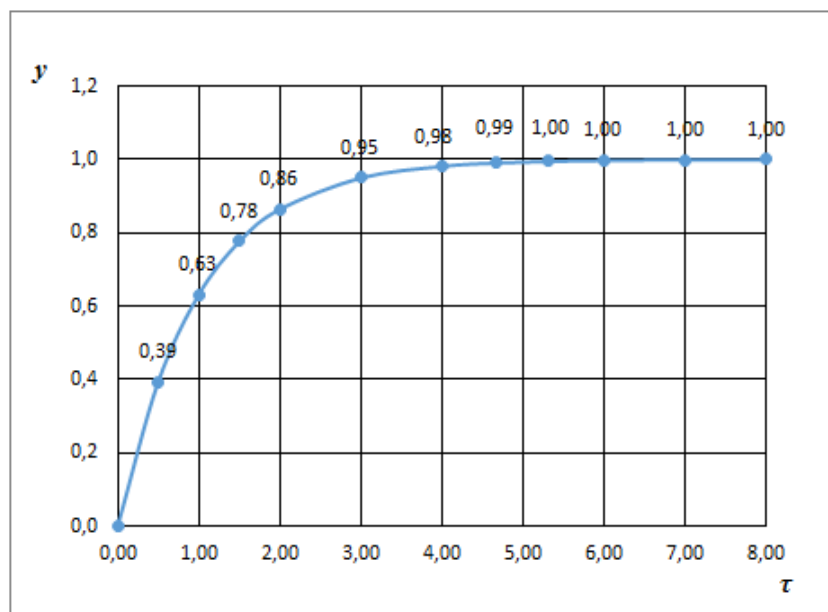
$$y = 1 - \exp(-\tau) = 1 - e^{-\tau}. \quad (12)$$

ფარდობითი სიდიდე τ -თვის რიცხითი მნიშვნელობების მინიჭებით შევადგინეთ ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხოს დროზე დამოკიდებულების ცხრილი და ავაგეთ გრაფიკი (ნახ. 1.).

შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხოს დროზე დამოკიდებულება

ცხრილი 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



ნახ. 1. ნაწილაკის ჰიდრაულიკური სისხოს დროზე დამოკიდებულება დალექვის ხანგრძლივობაზე.

გრაფიკზე ჩანს, რომ დალექვისას ნაწილაკი დროის გარკვეულ მომენტამდე მოძრაობს აჩქარებულ რეჟიმში, ხოლო შემდგომ მისი სიჩქარე ხდება მუდმივი.

განტოლებების (9, 10) გათვალისწინებით განტოლება (12) გამოვსახეთ როგორც:

$$u = u_* \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{t_*}\right) \right]. \quad (13)$$

ფარდობითი სიდიდეების u_* და t_* -ის მნიშვნელობების ჩასმით, აჩქარებული მოძრაობისას ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლებამ მიიღო შემდეგი სახე:

$$u(t) = \frac{d^2 g(\rho_f - \rho_b)}{18\mu} \left[1 - \exp\left(-\frac{18\mu}{\rho_f d^2} t\right) \right]. \quad (14)$$

გამოსახულება $1 - \exp\left(-\frac{18\mu}{\rho_f d^2} t\right)$ -ის 1-თან მიახლოებისას, ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობა გადადის მუდმივი სიჩქარით მოძრაობის რეჟიმში. ნახ.1-ზე გამოსახულ გრაფიკზე ჩანს, რომ როდესაც $\tau \approx 4.66$, სიდიდე $1 - \exp(-\tau)$ ხდება მიახლოებით ერთის ტოლი, ამ შემთხვევაში დალექვის სიჩქარის გადახრა მუდმივი სიჩქარისგან არ აღემატება 1 %-ს. აქედან გამომდინარეობს, რომ აჩქარებული მოძრაობის გადასვლა მუდმივი სიჩქარით მოძრაობის რეჟიმში ხდება როდესაც:

$$\tau = \frac{t}{t_*} = 4,66. \quad (15)$$

t_* - ის მნიშვნელობის გათვალისწინებით, განტოლებიდან (15) გამომდინარეობს, რომ დრო, რომელიც დასჭირდება ნაწილაკს მუდმივი სიჩქარით მოძრაობის რეჟიმში გადასასვლელად შეადგენს:

$$t = 4,66 \frac{\rho_f d^2}{18\mu}. \quad (16)$$

მიღებული დამოკიდებულებები (14) და (16) საშუალებას იძლევა დავადგინოთ სტოქსის რეჟიმში მოძრავი მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო ნაწილაკის აჩქარებული და მუდმივი

სიჩქარით მოძრაობის დროს და განვსაზღვროთ თუ რა დროის შემდეგ იწყებს ნაწილაკი მოძრაობას მუდმივი სიჩქარით.

ნაწილაკის დალექვისას მის მიერ გავლილი მანძილის დასადგენად, ჩავატარეთ ანალოგიური ქმედებები: შემოვიღეთ მანძილის მასშტაბი - h_* და მანძილის ფარდობითი სიდიდე ξ . ნაწილაკის გრავიტაციული დალექვის განტოლება გამოისახა როგორც:

$$y \frac{dy}{d\xi} = 1 - y. \quad (17)$$

საწყისი პირობებიდან გამომდინარე ($\xi = 0$; $y = 0$) დიფერენციალური განტოლების (18) ამოხსნაა:

$$\xi = -[y + \ln(1 - y)]. \quad (18)$$

ფარდობითი სიდიდე y -თვის რიცხითი მნიშვნელობების მინიჭებით აგებული გრაფიკის ანალიზის შედეგად დადგინდა რომ ნაწილაკის იწყებს მუდმივი სიჩქარით მოძრაობას როდესაც $\xi = h/h^* = 3,21$.

მუდმივი სიჩქარით მოძრაობის რეჟიმში გადასვლამდე ნაწილაკის დალექვის სიღრმის საანგარიშო განტოლებამ მიიღო შემდეგი სახე:

$$h = 3,21g\rho_\sigma(\rho_\sigma - \rho_b) \left(\frac{d^2}{18\mu} \right)^2. \quad (19)$$

მიღებული დამოკიდებულება (19) საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ შეწონილი ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობისას განვლილი მანძილის სიდიდე.

ამგვარად, ჩატარებული კვლევის შედეგად მიღებულ იქნა:

- სტოქსის რეჟიმში ლამინარული გარსშემოდენისას მცირე ზომის სფეროსებრი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლება, როგორც აჩქარებული ისე მუდმივი სიჩქარით მოძრაობისას;
- ნაწილაკის მუდმივი სიჩქარით მოძრაობის რეჟიმში გადასვლამდე დახარჯული დროის საანგარიშო დამოკიდებულება;
- აჩქარებული მოძრაობისას ნაწილაკის მიერ განვლილი მანძილის საანგარიშო განტოლება.

შეწონილი ნაწილაკების გადაადგილების კვლევისას, მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს ნაწილაკის მოძრაობის ჰორიზონტალური სიჩქარის დადგენა, რომელიც შეიძლება განსხვავდებოდეს ნაკადის მოძრაობის სიჩქარისგან. შეწონილი ნაწილაკის რელაქსაციის სიჩქარის დასადგენად განვიხილეთ სითხის ნაკადის მუდმივი სიჩქარით მოძრაობა ჰორიზონტალური ღერძის გასწვრივ. ნიუტონის მეორე კანონზე დაყრდნობით გამოვსახეთ დისპერსიული სისტემის მყარი შეწონილი ნაწილაკის გადაადგილების ვექტორული განტოლება:

$$m \frac{d\vec{u}_\delta}{dt} = \sum \vec{F}_i, \quad (20)$$

სადაც: m არის შეწონილი ნაწილაკის მასა; \vec{u}_δ - შეწონილი ნაწილაკის მოძრაობის სიჩქარის ვექტორი; $\sum \vec{F}_i$ - ნაწილაკზე მოქმედი ძალების ვექტორების ჯამი.

ნაშრომში განვიხილეთ შემთხვევა, როდესაც ნაწილაკზე გავლენას ახდენს მხოლოდ ნაკადით გამოწვეული წინააღმდეგობის ძალა და სხვა ძალები გაწონასწორებულია. ამ შემთხვევაში წინააღმდეგობის ძალა გამოითვლება განტოლებით:

$$F_{\text{წიბ}} = c_d \cdot S \cdot \frac{\rho_b |\vec{u}_b - \vec{u}_\delta|}{2} (\vec{u}_b - \vec{u}_\delta). \quad (21)$$

სადაც: c_d არის წინააღმდეგობის კოეფიციენტი; S - სხეულის მიდელის ფართობი $S = \frac{\pi d^2}{4}$; \vec{u}_b - ნაკადის მოძრაობის სიჩქარე; $\vec{u}_b - \vec{u}_\delta$ - ნაწილაკის და ნაკადის სიჩქარეების დამოკიდებულების ვექტორი.

წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდე სტოქსის რეჟიმში შეადგენს:

$$c_d = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24\mu}{\rho_b |\vec{u}_b - \vec{u}_\delta| d_\delta}. \quad (22)$$

განტოლებების (21, 22)-ის გათვალისწინებით და მათემატიკური გარდაქმნების შედეგად მოძრაობის განტოლება (20) იღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{d\vec{u}_\delta}{dt} = (\vec{u}_b - \vec{u}_\delta) \frac{18\mu}{d_\delta^2 \rho_b}. \quad (23)$$

ანალიტიკური მეთოდის გამოყენებით განტოლება (23)-ის ამოხსნა შესალებელია მხოლოდ სითხის ნაკადის მუდმივი სიჩქარით მოძრაობის პირობებში.

შემოვიღეთ ფარდობითი სიდიდეები: $y = \frac{u_{\xi}}{u_*}$; $\tau = \frac{t}{t_*}$; $y_0 = \frac{u_0}{u_*}$;
 $t_* = \frac{\rho_{\xi} d_{\xi}^2}{18\mu}$, რომელთა გამოყენებით განტოლებამ (23) მიიღო შემდეგი სახე:

$$\frac{dy}{d\tau} = 1 - y. \quad (24)$$

საწყისი პირობებიდან გამომდინარე ($\tau = 0$; $y = y_0$) დიფერენციალური განტოლების (24) ამოხსნას წარმოადგენს გამოსახულება:

$$y = 1 - (1 - y_0) \exp(-\tau). \quad (25)$$

ფარდობითი სიდიდეების მნიშვნელობების გამოყენებით, განტოლება (25) გამოვსახეთ როგორც:

$$u_{\xi} = u_b - (u_b - u_0) \exp\left(-t \frac{18\mu}{\rho_{\xi} d_{\xi}^2}\right). \quad (26)$$

განტოლება (26) წარმოადგენს ლამინარულ 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, განტოლების (23) გათვალისწინებით, გამოვსახეთ როგორც:

$$\frac{du_{\xi}}{dx} = \frac{(u_b - u_{\xi})}{u_{\xi}} \cdot \frac{18\mu}{\rho_{\xi} d_{\xi}^2}. \quad (27)$$

ფარდობითი სიდიდეების $\xi = \frac{x}{x_*}$, $t_* = \frac{\rho_{\xi} d_{\xi}^2}{18\mu}$, $x_* = u_b \frac{d_{\xi}^2 \rho_{\xi}}{18\mu}$ გამოყენებით და იმის გათვალისწინებით, რომ $u_* = u_b$ და $u_{\xi} = y u_b$ განტოლება (27) გამოვსახეთ როგორც:

$$\frac{dy}{d\xi} = \frac{1-y}{y}. \quad (28)$$

სასაზღვრო პირობებიდან გამომდინარე ($\xi = 0$; $y = y_0$),

დიფერენციალური განტოლების (39) ამოხსნას წარმოადგენს:

$$\xi = (y_0 - y) + \ln \left| \frac{1-y_0}{1-y} \right|. \quad (29)$$

ფარდობითი სიდიდეების გათვალისწინებით, განტოლება (29) გამოვსახეთ როგორც:

$$x = \frac{d_{\xi}^2 \rho_{\xi}}{18\mu} (u_0 - u_{\xi}) + \ln \left| \frac{1-u_0}{1-u_{\xi}} \right|. \quad (30)$$

მიღებული განტოლება (30) წარმოადგენს ნაკადში მოძრავი შეწონილი ნაწილაკის მიერ განვლილ მანძილს ნაკადის სიჩქარის მიღწევამდე. ამ დამოკიდებულებების გამოყენება საშუალებას იძლევა დაზუსტდეს ნაწილაკების ჰორიზონტალური გადაადგილების სიდიდე, რაც მნიშვნელოვანია დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების გაანგარიშებისას.

ვინაიდან დისპერსიული სისტემის ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი მახასიათებელია შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაცია, ჩამდინარე წყლების სედიმენტაციის კვლევისას, ცალკეული ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხოს დადგენასთან ერთად მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს კონცენტრირებული ნაწილაკების ღრუბლის სედიმენტაციის კვლევა, რომლის დალექვის დინამიკა, გარკვეულ პირობებში, განსხვავდება ცალკეული ნაწილაკის მოძრაობის კანონებისგან.

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

ნაწილობრივ შეღწევად და შეუღწევად ღრუბლის დალექვის რეჟიმებს შორის ზღვური მოცულობითი კონცენტრაციის მნიშვნელობის დასადგენად მოვახდინეთ ორივე რეჟიმში ნაწილაკებზე მოქმედი წინაღობის ძალების გათანაბრება, რის შედეგადაც მიღებულ იქნა დამოკიდებულება:

$$C_V^* = \frac{c_d^{\text{შ}}}{c_d^{\text{ფ.შ}}} \cdot \frac{d_{\xi}}{d_{\text{ღრ}}} \cdot \left(\frac{u_{\text{ღრ}}}{u_{\xi}} \right)^2. \quad (31)$$

სადაც: C_V^* არის ნაწილაკების ღრუბლის დალექვის ნაწილობრივ შეღწევად და შეუღწევადი რეჟიმებს შორის ზღვრული კონცენტრაცია; $c_d^{\text{შ}}$ და $c_d^{\text{ნ.შ}}$ არის შეუღწევად და ნაწილობრივ შეღწევად ღრუბელში წინააღმდეგობის კოეფიციენტი; $d_{\text{ღრ}}$ - ნაწილაკთა ღრუბლის დიამეტრი; $u_{\text{ღრ}}$ - ნაწილაკების ღრუბლის ჰიდავლიკური სისხო.

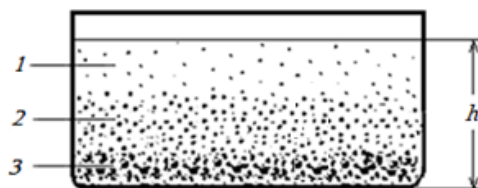
ლამინარულ რეჟიმში განტოლებამ (31) მიიღო შემდეგი სახე:

$$C_V^* = \left(\frac{d_{\text{ღ}}}{d_{\text{ღ}}}\right)^2 \cdot \frac{u_{\text{ღ}}}{u_{\text{წ}}} \quad (32)$$

დამოკიდებულებები (31) და (32) საშუალებას იძლევა დავადგინოთ თუ როგორ ხდება ნაწილაკების ღრუბლის დალექვა. თუ ღრუბელში ნაწილაკების კონცენტრაცია მეტია ზღვრული კონცენტრაციის მნიშვნელობაზე, მაშინ ნაწილაკების ღრუბელი მოძრაობს როგორც ერთი მთლიანი სხეული - შეუღწევადი ღრუბელი, ხოლო როდესაც ნაწილაკების კონცენტრაცია ნაკლებია ზღვრული კონცენტრაციის მნიშვნელობაზე, მაშინ ღრუბელი ნაწილობრივ შეღწევადია.

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

სალექრებში, გრავიტაციული დალექვისას, შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაცია თანდათანობით იზრდება წყლის ზედაპირიდან სალექრის ფსკერის მიმართულებით (ნახ. 4.). თავისუფალი დალექვის ზონის ქვემოთ (1) ყალიბდება შეზღუდული დალექვის (2) და ნალექის გამკვრივების (3) ზონები.



ნახ. 4. სალექარში შეწონილი ნაწილაკების დალექვის პროცესის სქემა
 1- თავისუფალი დალექვის ზონა; 2 - შეზღუდული დალექვის ზონა;
 3 - ნალექის გამკვრივების ზონა.

შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების დასადგენად შეგვიძლია გამოვიყენოთ ჰიფსომეტრული კანონი, რომელიც ასახავს იდეალურ აირებში მოლეკულების განაწილების კლებას ჰაერის სვეტის სიმაღლის მატებასთან ერთად:

$$C_{n(h)} = C_{n_0} \exp\left(-\frac{mg(h-h_0)}{kT}\right), \quad (33)$$

სადაც: $C_{n(h)}$ არის h სიმაღლეზე ნაწილაკების რაოდენობრივი კონცენტრაცია; C_{n_0} - ნაწილაკების რაოდენობრივი კონცენტრაცია 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).

მრავალრიცხოვანი ცდების შედეგად დადგინდა, რომ იგივე დამოკიდებულებით ხდება სითხეში, გრავიტაციული დალექვის პირობებში, შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმის მატებასთან ერთად ნაწილაკების რაოდენობის ექსპონენციალური გაზრდა. ეს კანონი სამართლიანია ნებისმიერ პოტენციურ ძალათა ველში, მათ შორის მცირე ზომის ნაწილაკების შემცველი მონოდისპერსიული სუსპენზიებისთვისაც.

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

$$m_{\text{შფ}} = m - m_b = V_b(\rho_b - \rho_s) = m \frac{(\rho_b - \rho_s)}{\rho_b}, \quad (34)$$

სადაც: $m_{\text{შფ}}$ 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 მივიჩნიეთ სითხის ზედაპირი ($h_0 = 0$). განტოლება (32)-ის და ნაწილაკის მასის გათვალისწინებით, აგრეთვე რაოდენობრივი კონცენტრაციის მოცულობითი კონცენტრაციით ჩანაცვლებით ჰიფსომეტრული კანონი

სუსპენზიებისთვის იღებს შემდეგ სახეს:

$$C_{V(h)} = C_{V_0} \exp\left(\frac{h\pi d^3 g(\rho_s - \rho_l)}{6kT}\right). \quad (35)$$

სადაც: $C_{V(h)}$ არის h სიღრმეზე ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია.

C_{V_0} - ნაწილაკების საწყისი მოცულობითი კონცენტრაცია.

შემოვიტანეთ აღნიშვნა:

$$\beta = \frac{\pi d^3 g(\rho_s - \rho_l)}{6kT}. \quad (36)$$

განტოლება (34)-ის გათვალისწინებით გამოსახულებამ (35) მიიღო შემდეგი სახე:

$$C_{V(h)} = C_{V_0} e^{\beta h}. \quad (37)$$

განტოლება (37) წარმოადგენს შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის დამოკიდებულებას დალექვის სიღრმეზე.

ამ განტოლების გალოგარითმებით, შეგვიძლია გამოვიანგარიშოთ სხვადასხვა კონცენტრაციისას შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმე:

$$h = \frac{1}{\beta} \ln \frac{C_{V_0}}{C_{V(h)}}. \quad (38)$$

დამოკიდებულებები (37, 38) 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, კონცენტრაციის ზღვრულ მნიშვნელობად მივიჩნიეთ ნაწილაკების ისეთი მოცულობითი კონცენტრაცია C'_V , რომლის დროსაც ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენისას ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალის სიდიდე ($F_{წინ}^{\omega}$) უტოლდება გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმში ნაწილაკებზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალის სიდიდეს ($F_{წინ}^{\beta}$). :

$$F_{წინ}^{\omega} = F_{წინ}^{\beta} \quad (39)$$

ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენისას, სისტემის ყველა

ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა სტოქსის ფორმულით შეადგენს:

$$F_{წიბ}^{\text{ლ}} = n3\pi\mu u_{\text{ლ}} d = C_{V0} \frac{18\mu u_{\text{ლ}}}{d^2}, \quad (40)$$

სადაც: n არის ჩამდინარე წყალში შეწონილი ნაწილაკების საწყისი რაოდენობა; $u_{\text{ლ}}$ - ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო ლამინარული გარსშემოდენისას.

გარსშემოდენის გარდამავალი რეჟიმის დროს ნაწილაკებზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა გამოვიანგარიშეთ ნიუტონის ბლანტი ხახუნის წინააღმდეგობის ფორმულის გამოყენებით:

$$F_{წიბ}^{\text{ბ}} = n'c_d \frac{\pi d^2 \rho_{\text{კ}} u_{\text{ბ}}^2}{8} = c_d C_V \frac{3\rho_{\text{კ}} u_{\text{ბ}}^2}{4d}, \quad (41)$$

სადაც: n' არის ნაწილაკების რაოდენობა გარდამავალ რეჟიმში; $u_{\text{ბ}}$ - ნაწილაკის ჰიდრავლიკური სისხო გარდამავალი რეჟიმით გარსშემოდენისას; C_V - გარდამავალ რეჟიმში ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია.

გარდამავალ რეჟიმში ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაცია გამოვსახეთ როგორც ლამინარულ და გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმებს შორის ზღვრული კონცენტრაცია $C_V = C'_V$.

განტოლებების (40 და 41) გათვალისწინებით განტოლება (39) იღებს სახეს:

$$C_{V0} \frac{18\mu u_{\text{ლ}}}{d^2} = c_d \frac{3\rho_{\text{კ}} u_{\text{ბ}}^2}{4} \frac{C'_V}{d}. \quad (42)$$

განტოლება (42)-დან გამომდინარეობს, რომ ზღვრული კონცენტრაცია ნაწილაკის ლამინარულ და გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმებს შორის შეადგენს:

$$C'_V = C_{V0} \frac{24\mu_{\text{ლ}}}{c_d \rho_{\text{კ}} u_{\text{ბ}}^2}. \quad (43)$$

განტოლება (43) წარმოადგენს ნაწილაკების კონცენტრაციის ზღვრულ მნიშვნელობას, რომლის მიღწევის შემდეგ ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმი იცვლება გარდამავალი გარსშემოდენის რეჟიმით.

იმის დასადგენად, თუ რა ($h_{\text{ზღ}}$) სიღრმეზე ხდება ნაწილაკების

ზღვრული კონცენტრაციის მიღწევა, ჩვენს მიერ მიღებული შეწონილი ნაწილაკების დალექვის სიღრმის კონცენტრაციაზე დამოკიდებულების განტოლებაში (38) შევიყვანეთ ზღვრული კონცენტრაციის მნიშვნელობა (43):

$$h_{\text{ზღ}} = \frac{1}{\beta} \ln \frac{c_d \rho_{\text{ს}} u_{\text{გ}}^2}{24 u_{\text{ლ}}}. \quad (44)$$

განტოლება (44) წარმოადგენს შეწონილი ნაწილაკების დალექვისას, ლამინარული გარსშემოდენის რეჟიმის, გარდამავალ გარსშემოდენის რეჟიმზე გადასვლის სიღრმეს.

სადისერტაციო ნაშრომის მეოთხე თავში „შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის მოდელირება“ უჯრედულ მოდელზე დაყრდნობით და თეორიული და ექსპერიმენტული მონაცემების ანალიზის შედეგად დადგინდა, რომ შეზღუდული დალექვის კვლევისას, სითხის სიბლანტის, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის და რეინოლდსის რიცხვის მაგივრად, გამოთვლებში უნდა გამოყენებულ იქნას მათი ეფექტური მნიშვნელობები. შემუშავებულ იქნა ნაწილაკების ლამინარული გარსშემოდენისას შეწონილი ნაწილაკების დალექვის გაანგარიშების მათემატიკური მოდელი, რომელიც აღწერს შეწონილი ნაწილაკების როგორც თავისუფალი, ისე შეზღუდული დალექვის კანონზომიერებებს.

შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის მოდელირებისას ნაწილაკებს შორის ურთიერთქმედების გამო გაჩენილი დამატებითი წინააღმდეგობის ძალების გასათვალისწინებლად შემოყავთ შემასწორებელი კოეფიციენტი (λ):

$$F_{\text{წონ}}^{\text{შ}} = F_0 \lambda. \quad (45)$$

სადაც: $F_{\text{წონ}}^{\text{შ}}$ არის წინააღმდეგობის ძალა შეზღუდული დალექვისას; F_0 - წინააღმდეგობის ძალა თავისუფალი დალექვისას.

თავისუფალი დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედი წინააღმდეგობის ძალა ($F_{\text{წონ}}^{\text{ფ}}$) ნიუტონის ბლანტი ხახუნის კანონის მიხედვით შეადგენს:

$$F_{\text{წონ}}^{\text{ფ}} = c_d \frac{\pi d^2 \rho_{\text{ს}} u_{\text{წ}}^2}{8}. \quad (46)$$

შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის ძალა ($F_{წინ}^{\sigma}$) შეადგენს:

$$F_{წინ}^{\sigma} = c_{d\gamma} \frac{\pi d^2 \rho_b u_{\sigma}^2}{8}. \quad (47)$$

სადაც: $c_{d\gamma}$ არის შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ეფექტური სიდიდე, რომელიც შეადგენს:

$$c_{d\gamma} = \frac{4d\gamma(\rho_b - \rho_b)(1 - C_V)}{3\rho_b u_{\sigma}^2 (1 + C_V^{1/3})}. \quad (48)$$

შემასწორებელი კოეფიციენტის (λ) სიდიდის განსაზღვრისთვის შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის ძალის განტოლება (47) გამოვსახეთ წინააღმდეგობის კოეფიციენტის ეფექტური სიდიდის გამოყენებით:

$$F_{წინ}^{\sigma} = \frac{\pi d^3 \gamma (\rho_b - \rho_b)}{6} \cdot \frac{(1 - C_V)}{(1 + C_V^{1/3})}. \quad (49)$$

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

$$F_{წინ}^{\sigma} = F_{ს.ძ.} - F_{არქ} = mg - \rho_b V_b g = \frac{\pi d^3 \gamma (\rho_b - \rho_b)}{6}. \quad (50)$$

ვინაიდან განტოლება (49)-ის პირველი მამრავლი $\frac{\pi d^3 \gamma (\rho_b - \rho_b)}{6}$ წარმოადგენს თავისუფალი დალექვისას შეწონილ ნაწილაკზე მოქმედ წინააღმდეგობის ძალას, განტოლება (45)-ის მეორე მამრავლი $\frac{1 - C_V}{1 + C_V^{1/3}}$ გამოსახავს შემასწორებელი კოეფიციენტი λ -ს სიდიდეს:

$$\lambda = \frac{1 - C_V}{1 + C_V^{1/3}}. \quad (51)$$

შეწონილი ნაწილაკების შეზღუდული დალექვის კანონზომიერების დასადგენად გამოვსახეთ შეწონილი ნაწილაკის გრავიტაციული დალექვის განტოლება (1):

$$\frac{du}{dt} = \frac{F_{ს.ძ.} - F_{არქ} - F_{წინ}^{\sigma}}{m}.$$

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. აქედან გამომდინარე არქიმედეს ძალის გამოთვლისას სითხის სიმკვრივის (ρ_b) მაგივრად გამოვიყენეთ სითხის ეფექტური სიმკვრივე (ρ_g):

$$\rho_g = \rho_b C_v + \rho_b (1 - C_v). \quad (52)$$

შეზღუდული დალექვისას ნაწილაკზე მოქმედი არქიმედეს ძალის სიდიდე სითხის ეფექტური სიმკვრივის გათვალისწინებით, გამოისახა დამოკიდებულებით:

$$F_{არქ} = \frac{\rho_g \pi d^3}{6} = [\rho_b C_v + \rho_b (1 - C_v)] \frac{\pi d^3}{6} g. \quad (53)$$

შეზღუდული დალექვისას წინააღმდეგობის ძალის განტოლება შეგვიძლია გამოვსახოთ როგორც:

$$F_{წიბ}^{\theta} = F_{წიბ}^{\sigma} \frac{1 - C_v}{1 + C_v^{1/3}}. \quad (54)$$

განტოლებების (53, 54) და სიმძიმის ძალის სიდიდის გათვალისწინებით შეზღუდული დალექვისას ბალანსის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$\frac{du}{dt} = \frac{g(\rho_b - \rho_b)(1 - C_v)}{\rho_b} - c_d \frac{3\rho_b u^2}{4d\rho_b} \cdot \frac{1 - C_v}{1 + C_v^{1/3}}. \quad (55)$$

მიღებული განტოლება (55) წარმოადგენს არაწრფივ დიფერენციალურ განტოლებას, რომელსაც არ აქვს ანალიტიკური ამოხსნა. განტოლება იძენს წრფივი დიფერენციალური განტოლების სახეს მხოლოდ ლამინარული დალექვის პირობებში, როდესაც წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდეა $c_d = \frac{24}{Re} = \frac{24\mu}{\rho_b u}$. განტოლება (55) გამოვსახეთ ლამინარული დალექვის პირობებში წინააღმდეგობის კოეფიციენტის სიდიდის გათვალისწინებით:

$$\frac{du}{dt} = \frac{g(\rho_b - \rho_b)(1 - C_v)}{\rho_b} - \frac{18\mu u(1 - C_v)}{d^2 \rho_b (1 + C_v^{1/3})}. \quad (56)$$

ჩამდინარე წყლების სალექრებში, ლამინარული რეჟიმის შენარჩუნების უზრუნველსაყოფად სითხის დინების სიჩქარე არ არის დიდი და შეზღუდული დალექვისას, ნაწილაკების მაღალი კონცენტრაციის პირობებში, ხდება ტურბულენტური პულსაციების ჩახშობა, ამიტომ, ლამინარული რეჟიმის შენარჩუნება ხორციელდება რეინოლდსის რიცხვის მაღალი მნიშვნელობებისას ($Re < 100$). აქედან გამომდინარე, შეგვიძლია ჩავთვალოთ, რომ განტოლება (56) ადვიკატურად ასახავს ჩამდინარე წყლების სალექრებში დალექვის კანონზომიერებებს.

შეზღუდული დალექვის ბალანსის განტოლებაში (56) შეწონილი ნაწილაკების მოცულობითი კონცენტრაციის დალექვის სიღრმეზე დამოკიდებულების გასათვალისწინებლად, ვისარგებლეთ ჩვენს მიერ მიღებული დამოკიდებულებით (37):

$$C_{V(h)} = C_{V_0} e^{\beta h}, \quad (57)$$

სადაც:

$$\beta = \frac{\pi d^3 g(\rho_b - \rho_l)}{6kT}. \quad (58)$$

გამოსახულება (57)-ის გათვალისწინებით დამოკიდებულება (56) მიიღებს სახეს:

$$\frac{du}{dt} = \frac{g(\rho_b - \rho_l)(1 - C_{V_0} e^{\beta h})}{\rho_b} - \frac{18\mu u}{d^2 \rho_b} \cdot \frac{(1 - C_{V_0} e^{\beta h})}{\left(1 + C_{V_0}^{\frac{1}{3}} e^{\frac{\beta h}{3}}\right)}. \quad (59)$$

იქიდან გამომდინარე, რომ შეწონილი ნაწილაკების ჰიდრავლიკური სისხო შეადგენს $u = \frac{dh}{dt}$, გამოსახულება (59) გამოვსახეთ როგორც მეორე რიგის დიფერენციალური განტოლება ცვლადით h :

$$\frac{d^2 h}{dt^2} = \frac{g(\rho_b - \rho_l)(1 - C_{V_0} e^{\beta h})}{\rho_b} - \frac{18\mu}{d^2 \rho_b} \cdot \frac{(1 - C_{V_0} e^{\beta h})}{\left(1 + C_{V_0}^{\frac{1}{3}} e^{\frac{\beta h}{3}}\right)} \frac{dh}{dt}. \quad (61)$$

დალექვის საწყის პირობებს წარმოადგენს:

$$t_0 = 0; \quad h(t) = h_0; \quad \frac{dh(t)}{dt} = u_0, \quad (62)$$

სადაც h_0 არის შეწონილი ნაწილაკის საწყისი კოორდინატა.

ჩვენს მიერ შემოთავაზებული შეწონილი ნაწილაკის დალექვის მათემატიკური მოდელი (61, 62) 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.

ამგვარად, შეწონილი ნაწილაკების დალექვის შემუშავებული მოდელი საშუალებას იძლევა, ლამინარული რეჟიმის პირობებში, საწყის პირობებიდან გამომდინარე, განისაზღვროს არა მხოლოდ შეწონილი ნაწილაკის ჰიდრავლიკური 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 გაანგარიშებულ იქნას დისპერსიული ფაზის გამყოფი ნაგებობების - ჩამდინარე წყლების სალექრების ოპტიმალური ზომები, რაც უზრუნველყოფს მინიმალური ხარჯებით ჩამდინარე წყლების გაწმენდის მოთხოვნილი ეფექტის მიღწევას.

ზოგადი დასკვნები

წარმოდგენილი თეორიული კვლევების ანალიზის საფუძველზე ნაშრომში 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 თანაბარი სიჩქარით მოძრაობისას;
- მიღებული ჰიდრავლიკური სისხოს საანგარიშო განტოლების ანალიზის შედეგად დადგინდა თანაბარი მოძრაობის რეჟიმში გადასვლამდე, ნაწილაკის აჩქარებული მოძრაობის ხანგრძლივობის და მის მიერ გავლილი მანძილის საანგარიშო დამოკიდებულებები;
- ლამინარული რეჟიმის პირიბებში, 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 ექსპერიმენტულ და თეორიულ მონაცემებზე დაყრდნობით და შეწონილი ნაწილაკების სითხეში განაწილების უჯრედული მოდელის გამოყენებით დაზუსტდა სითხის დინამიკური სიბლანტის, წინააღმდეგობის კოეფიციენტის და რეინოლდსის რიცხვის 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.

ნაშრომის აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დებულებები მოხსენებული იყო საქართველოს 2017 წლის სტუდენტთა 85-ე საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე.

გამოქვეყნებული შრომების სია

1. **ი. ინაშვილი, ი. დენისოვა.** ჩამდინარე წყლებში კონსოლიდირებული ნაწილაკების დალექვის კანონზომიერებები. საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის სამეცნიერო შრომების კრებული, N 2 (508), 2018, გვ. 31-37.
2. **ი. ინაშვილი, ი. დენისოვა.** ჩამდინარე წყლების სალექრებში შეწონილი ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვლილების დინამიკის კვლევა. სტუ, სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "ჰიდროინჟინერია", N 2 (25-26), 2018, გვ 43-49.
3. **ი. ინაშვილი, ი. დენისოვა.** სითხის ნაკადში შეწონილი ნაწილაკების რელაქსაციის სიჩქარის კვლევა. სტუ-ის სამეცნიერო-ტექნიკური ჟურნალი "ჰიდროინჟინერია", N1-2 (27-28), 2019.
4. **I. Inashvili, I. Denisova, K. Bziava.** Regularities of sedimentation of spherical particles in a laminar flow. Georgian Technical University's Collection of Academic Works N 2 (512), 2019, pp. 81-88.

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 - 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 mode, 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 partially 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 partially 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.